

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica



Progettazione sistematica di un'interfaccia haptic  
mediante Shape Memory Alloys

Relatore: Prof. Gaetano CASCINI

Co-relatore: Ing. Marco CITRO

Tesi di Laurea di:

Giorgio QUERCIOLI Matr. 739881

Anno Accademico 2011 - 2012



Concedimi  
la serenità di accettare le cose che non posso cambiare,  
il coraggio per cambiare quelle che posso  
e la saggezza per riconoscerne la differenza.

Preghiera Cherokee





# Indice Generale

<b>Sommario.....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VII</b>
<b>Capitolo 1 Introduzione.....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 2 Satin.....</b>	<b>3</b>
2.1 Struttura dispositivo Satin.....	4
2.1.1 Sistema di visione .....	4
2.1.2 Interfaccia tattile .....	7
2.1.2.1 Mesh triangolare .....	7
2.1.2.2 Sistema di movimentazione .....	10
2.2 Requisiti Satin.....	12
<b>Capitolo 3 Analisi sistemica .....</b>	<b>17</b>
3.1 Analisi requisiti.....	18
3.1.1 Angolo massimo relativo “ $\alpha$ ”: .....	20
3.1.2 Numero di settori “n”.....	28
3.1.3 Conclusioni parziali dell’analisi dei requisiti.....	30
3.2 Analisi sistema .....	31
3.2.1 EMS model (Energy Material and Signal).....	33
3.2.1.1 EMS model Satin complessivo .....	33
3.2.1.2 EMS model elemento striscia .....	35
3.2.1.3 EMS model mesh triangolare.....	36
3.2.1.3.1 EMS model settore a movimentazione assoluta.....	37
3.2.1.3.2 EMS model settore a movimentazione relativa .....	38
3.2.1.4 EMS model Conclusioni .....	39

3.2.2 MTS model (minimal technical system) .....	40
3.2.2.1 MTS model System striscia.....	41
3.2.2.2 MTS model Sub System settore .....	42
3.2.3 Functional model, modalità di funzionamento.....	43
3.2.3.1 Modalità “Esplorazione”:	44
3.2.3.2 Modalità “Tocco”:	45
3.2.3.3 Modalità “Modifica”:	46
3.2.3.4 Functional model della coppia di settori .....	47
3.2.3.5 Osservazioni.....	48
3.2.4 Sistem operator.....	49
3.2.5 Problem flow network.....	50
<b>Capitolo 4 Sviluppo del concept SMA attuato.....</b>	<b>53</b>
4.1 Shape Memory Alloys.....	54
4.1.1 La lega NiTi .....	55
4.1.2 Transizione di fase .....	56
4.1.3 morfologia applicazioni.....	57
4.1.4 Modalità di apporto energia termica. ....	59
4.1.5 Proprietà. ....	59
4.1.6 Test sulle SMA.....	63
4.1.7 Conclusioni .....	65
4.2 Problem flow network attuazione mediante SMA .....	65
4.2.1 Problem flow network controllo .....	66
4.2.2 Problem flow network proprietà .....	69
4.3 Sviluppo concept.....	71
4.3.1 Attuazione .....	71
4.3.1.1 Disposizione filo in SMA.....	71
4.3.1.2 Configurazione attuatore .....	73
4.3.1.3 Corsa necessaria e lunghezza filo SMA .....	79
4.3.1.4 Cinematica, legge di moto.....	79

4.3.2 Elemento lettura posizione settore .....	82
4.3.2.1 Encoder .....	83
4.3.2.2 Potenzimetro resistivo.....	85
4.3.2.3 Controllo senza feedback:.....	87
4.3.3 Prototipo.....	88
4.3.4 Sistema di bloccaggio .....	89
4.3.4.1 Elementi blocco e guida.....	91
4.3.4.2 Elemento Morsa .....	93
4.3.5 Configurazione definitiva .....	96
4.4 Dimensionamenti .....	103
4.4.1 Dimensionamento sistema di movimentazione: .....	104
4.4.2 Dimensionamento morsa .....	109
4.4.3 Dimensionamento sistema di scarico.....	113
4.5 Analisi elementi finiti .....	116
4.5.1 Test morsa.....	117
4.5.2 Test intera striscia .....	118
4.5.3 Materiali.....	120
<b>Capitolo 5 Descrizione SMA Satin e valutazioni.....</b>	<b>123</b>
5.1 Satin SMA.....	124
5.2 Modulo base.....	126
5.2.1 Sistema di movimentazione .....	127
5.2.2 Sistema di blocco .....	130
5.2.3 Sistema attivazione e disattivazione blocco.....	133
5.2.4 Procedura di bloccaggio e sbloccaggio della morsa .....	135
5.2.4.1 Disattivazione morsa.....	135
5.2.4.2 Attivazione morsa .....	138
5.3 Procedure di funzionamento .....	141
5.3.1 Modalità esplorazione .....	141
5.3.2 Modalità tocco .....	142
5.3.3 Modalità modifica.....	142

## Indice

5.4 Procedura taratura .....	143
5.4.1 Taratura primo avvio del sistema, manuale.....	143
5.4.2 Taratura, automatica.....	143
5.5 Prestazioni .....	147
<b>Capitolo 6 Conclusioni.....</b>	<b>151</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>157</b>
<b>Appendice .....</b>	<b>161</b>
A: Codici Matlab .....	161
B: Catalogo SAES Getters SMA wires .....	165
C: Potenzimetro usato .....	177
D: Catalogo Vanel, molle utilizzate .....	179
E: Messe in tavola parti .....	183
F: Immagini parti in fase di lavorazione.....	211
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>213</b>

## Sommario

Il sistema Satin è un sistema multimodale e multisensoriale concepito per consentire l'esplorazione e la modifica di superfici virtuali senza l'uso delle interfacce uomo-macchina classiche quali mouse e tastiera. Esso include un'interfaccia tattile composta da una striscia di materiale flessibile movimentata da una mesh di settori triangolari, azionati tramite servomotori e posizionata nello spazio da un Haptic Master. Lo scopo della presente tesi è uno studio di fattibilità, utilizzando le Leggi sull'Evoluzione dei Sistemi Ingegneristici della logica TRIZ, riguardo la sostituzione dei servomotori con le leghe a memoria di forma come sistema di attuazione. L'esito positivo dell'analisi ha confermato l'efficacia del TRIZ come valido strumento di supporto nell'individuare le problematiche e determinare la direzione in cui sviluppano le soluzioni. Infine il TRIZ ha guidato lo sviluppo di un nuovo concept che è effettivamente un'evoluzione del sistema pre esistente sia per quanto riguarda l'incremento delle prestazioni, sia per quanto riguarda l'armonizzazione delle parti costituenti.



## **Abstract**

Satin is a multimodal and multisensory system devised to allow the exploration and modification of virtual surfaces without using classical human-machine devices as mouse and keyboard. It includes a tactile interface composed by a flexible strip. It is moved by a mesh of triangular sectors actuated by servomotors and positioned in the space by an Haptic Master. The goal of the thesis is a feasibility study using the Laws of Evolution System Engineering of TRIZ about the substitution of the servo motors actuators with the Shape Memory Alloys. The positive results of this thesis confirm that TRIZ can be a valid instrument to detect problems and funnel the solution's directions. Therefore it drive the develop of a new concept that is effectively an evolution of the preexistent system, let it increasing performances and the harmonization of the constituent parts.





# Capitolo 1

## Introduzione

Il sistema SATIN è un'interfaccia multimodale e multisensoriale per l'esplorazione e la modifica di oggetti virtuali. Nella sua ultima versione è costituito da un apparato di visualizzazione stereoscopica a retroproiezione e un dispositivo Haptic Master connessi ed integrati con un'interfaccia tattile, costituita da un nastro flessibile che assume la forma dell'oggetto virtuale in esame permettendo così all'utente di esplorare, valutare e modificare la superficie rappresentata. La movimentazione della striscia flessibile è realizzata mediante una mesh di triangoli incernierati ad assi inclinati, i quali, attraverso un sistema di azionamenti relativi ed assoluti, permettono di sviluppare il meccanismo dal centro verso le estremità. Tale configurazione garantisce la possibilità di alloggiare l'interfaccia su un sistema di posizionamento spaziale a 6 gradi di libertà. L'implementazione di appositi sensori di interazione su ogni punto di contatto permettono all'utente di effettuare direttamente modifiche locali alla curvatura della superficie [1].

L'obiettivo che si propone la tesi non è la progettazione di una nuova versione del sistema satin, ma in primo luogo l'esecuzione di un'analisi di fattibilità sulla possibilità di sostituzione del sistema di attuazione elettromeccanico esistente con un meccanismo che preveda l'impiego delle SMA (Shape Memory Alloys), conservando la configurazione a mesh triangolare dell'ultima versione del Satin.

In secondo luogo, se tale analisi dovesse avere esito positivo, si procede con lo studio e lo sviluppo di un nuovo concept che sia una vera e propria evoluzione della versione attuale del sistema Satin.

Con tale modifica ci si prefigge lo scopo di incrementare le prestazioni in termini di dimensioni del sistema, e dunque riduzione raggio di curvatura rappresentabile e peso, nonché una riduzione dei costi di implementazione.

## Capitolo 1

La tesi si articola nel seguente modo:

Nel capitolo 2 si descrive sinteticamente il sistema SATIN attuale (anche se non fisicamente esistente) in tutte le sue parti, prestando particolare attenzione alla striscia a mesh triangolare, elemento che si andrà ad analizzare in maniera approfondita nel corso della tesi essendo il soggetto principale dello studio.

Nel capitolo 3 si procede con l'analisi critica del sistema dapprima elaborando i requisiti estratti dal capitolo 2 e successivamente tramite lo strumento del TRIZ, si andranno a formalizzare una serie di modelli che costituiranno l'architettura di partenza per lo sviluppo di un nuovo concept.

Nel capitolo 4 si procede con lo sviluppo vero e proprio del nuovo concept, descrivendo e motivando dettagliatamente ogni singola scelta o strada intrapresa in modo da strutturare un vero e proprio percorso di crescita e sviluppo a partire dall'idea concettuale (conceptual design) fino al prototipo fisico (design for manufacturing).

Nel capitolo 5 si descriveranno nel dettaglio le funzionalità e le potenzialità del nuovo sistema, ponendo particolare attenzione anche alle procedure ideate per il suo corretto funzionamento, evidenziando al termine le prestazioni ottenute come confronto con quelle del sistema attuale.

Infine nel capitolo 6 si illustreranno le conclusioni relative allo studio svolto.

## Capitolo 2

### Satin

In questo capitolo si introduce con maggiore dettaglio il sistema Satin la cui più recente versione è oggetto di studio della tesi “Sviluppo del sistema di movimentazione di un'interfaccia tattile per l'esplorazione di oggetti virtuali” di Alessandro Mansutti [1], da cui è stata estratta la prima parte più descrittiva di questo capitolo.

SATIN (Sound And Tangible Interfaces for Novel product design) è un sistema multimodale e multisensoriale per la valutazione delle superfici virtuali di prodotti estetici mediante un'interfaccia tattile, un sistema di visualizzazione stereoscopica e un sistema di riproduzione sonora. L'interfaccia tattile consiste di una striscia flessibile, tralata ed orientata nello spazio da un sistema costituito da un Haptic Master, che imita il nastro disposto dai progettisti sui modelli fisici per apprezzare le linee di valutazione di stile (Figura 2.1). Una visualizzazione 3D della figura è sovrapposta al dispositivo fisico per mezzo di un sistema di visualizzazione stereoscopico a retroproiezione.

Il fine che si propone il dispositivo è dunque di riprodurre la linea di stile; e dunque di permettere all'utente di esplorare e modellare un oggetto virtuale disegnato al CAD (nello specifico dunque la superficie selezionata) tramite uno strumento haptic che trasformi le informazioni digitali del modello CAD in informazioni tattili percepibili dall'utente e viceversa, senza l'uso delle interfacce classiche quali mouse e tastiera.

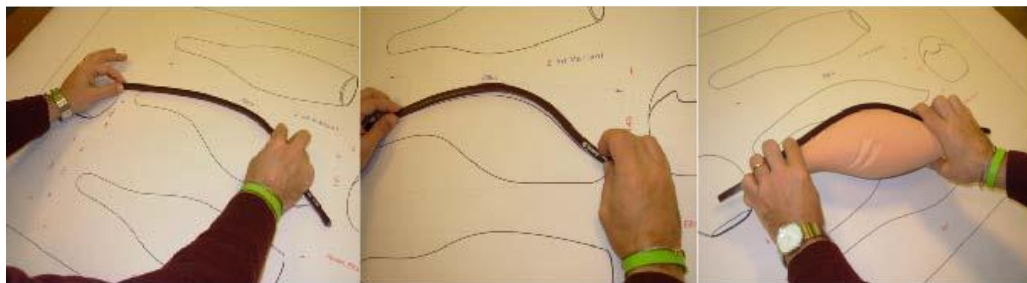


Figura 2.1: Linea di stile a nastro.

## 2.1 Struttura dispositivo Satin

L'ultima versione del Satin, consiste, come le precedenti, in un sistema di visione, e in un'interfaccia tattile.

### 2.1.1 Sistema di visione

Le figure riportate in questo paragrafo sono riferite alla versione precedente e fisicamente esistente del Satin, questo perché il sistema di visione e il principio di funzionamento è rimasto invariato rispetto alle versioni precedenti.

Il sistema di visualizzazione è composto sostanzialmente da un proiettore DLP, uno specchio, uno specchio semiriflettente e uno schermo a retroproiezione. Il proiettore (C) è situato in modo tale da trovarsi al di sopra ed in posizione posteriore rispetto al sistema tattile. Tale disposizione permette all'utente di posizionarsi davanti al sistema di visualizzazione senza essere disturbato dall'ombra della propria testa ed in modo che i componenti del sistema stesso non interferiscano con il luogo di lavoro adibito all' interfaccia tattile (A). In tal modo, l'utente può spostare liberamente le mani all'interno di tale spazio e può interagire con il sistema afferrando e maneggiando l'interfaccia fisica (F) posizionata sotto lo specchio semiriflettente e sostenuta dal Haptic Master (D).

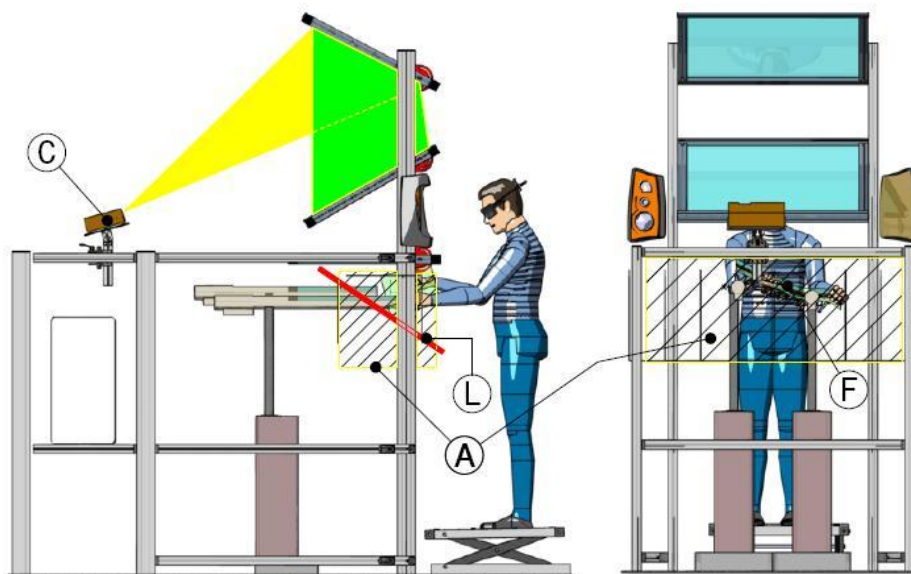


Figura 2.2: Sistema di visualizzazione, vista laterale e frontale.

L'immagine stereo proveniente dal proiettore viene riflessa sullo specchio posizionato in cima (G) verso lo schermo a retro proiezione (H), il quale, risulta appositamente inclinato in modo da correggere l'immagine precedentemente distorta. L'utente vede la proiezione specchiata sul piano virtuale in cui l'immagine 3D viene creata attraverso lo specchio semiriflettente (I). Questa configurazione offre ottime possibilità di visualizzazione e permette di controllare il senso di profondità. Una apposita struttura (B) sostiene i componenti sopracitati, mentre una piattaforma (E) permette di portare l'utente alla corretta altezza operativa.

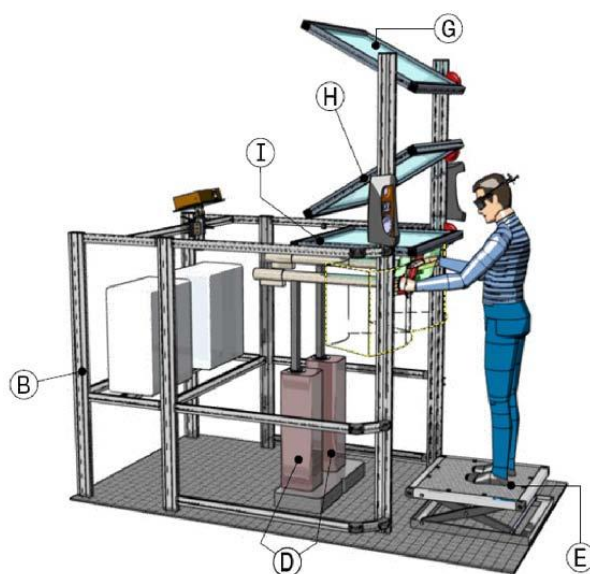


Figura 2.3: Sistema di visualizzazione, vista isometrica.

Mediante tale sistema risulta possibile sovrapporre la superficie virtuale dell'oggetto in esame alla superficie dell'interfaccia tattile, come indicato in Figura 2.4.

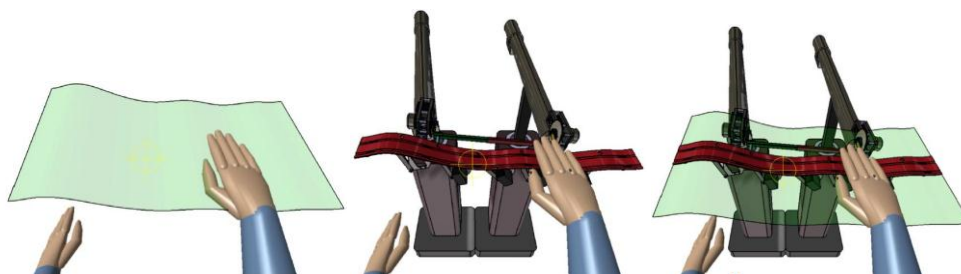


Figura 2.4: Sovrapposizione superficie virtuale con striscia fisica.

Per aumentare la percezione realistica dell'immagine mista 3D gli occhiali stereoscopici indossati dall'utente, così come l'orientazione del suo punto di vista, risultano essere tracciati per garantire una rigenerazione in tempo reale dell'immagine. Per seguire il punto di vista dell'utente è stato utilizzato il sistema d'inseguimento Optitrack, composto da tre videocamere che rilevano la posizione di 6 sfere riflettenti asimmetriche installate sugli occhiali stereoscopici (Figura 2.5).

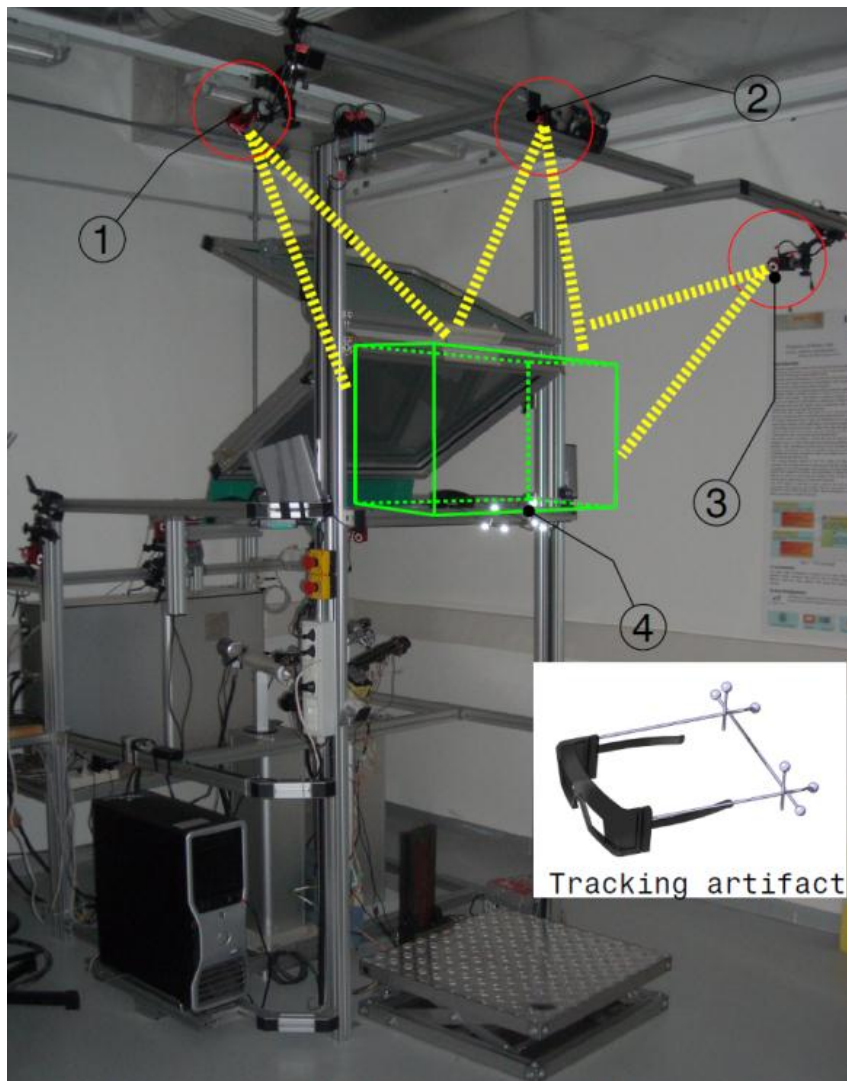


Figura 2.5: Sistema di tracciamento Optitrack.

### 2.1.2 Interfaccia tattile

L'interfaccia tattile è l'elemento del sistema satin su cui occorre porre la maggiore attenzione, perché è questa la parte su cui verte l'analisi della presente tesi. Questa è costituita da una striscia a mesh triangolare movimentata da servomotori.

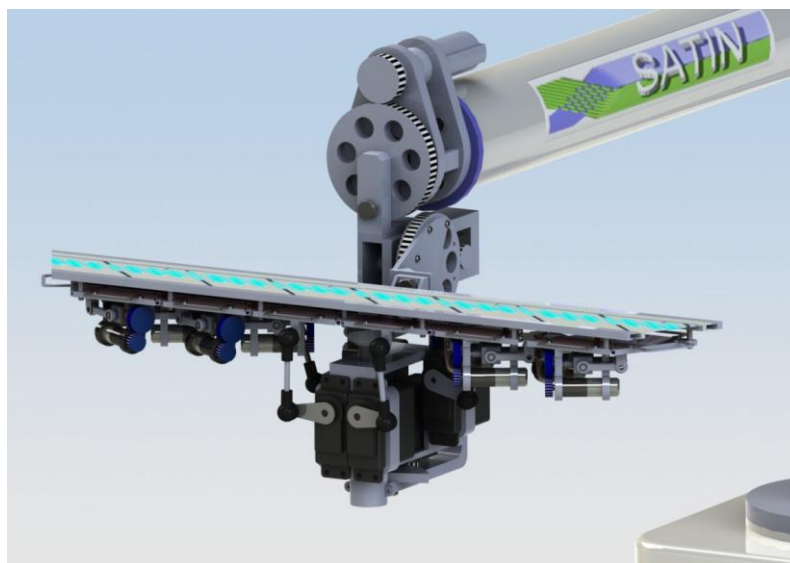


Figura 2.6: Sistema Satin attuale.

#### 2.1.2.1 Mesh triangolare

La configurazione dell'interfaccia è settoriale, a triangoli equilateri incernierati con assi inclinati, e prende spunto dalla metodologia di discretizzazione del continuo dei metodi ad elementi finiti.

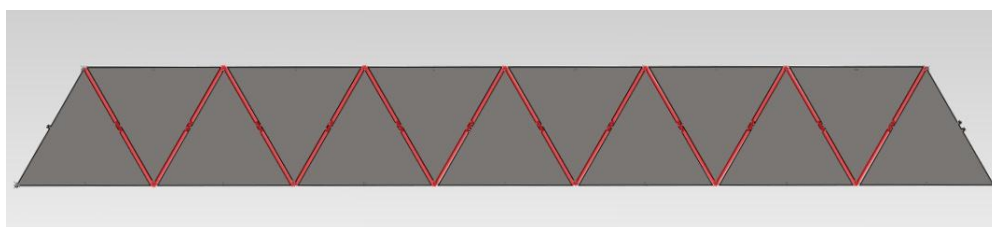


Figura 2.7: Configurazione mesh triangolare.

La proiezione in pianta della striscia è suddivisa in una mesh di triangoli equilateri, i cui lati adiacenti sono collegati mediante un giunto a cerniera che permette la rotazione relativa dei singoli settori. Sui vertici dei triangoli sono posizionati i collegamenti tra settori e striscia, i pin, che coincidono con i punti di contatto tra la superficie reale e quella virtuale. Tali organi di collegamento, oltre a permettere ai settori di guidare la striscia, hanno la funzione di distanziare quest'ultima dai settori di movimentazione. Tale accorgimento risulta necessario in quanto, nel caso in cui si cercasse di rappresentare superfici concave con piccoli raggi di curvatura, la striscia andrebbe a collidere con i settori.

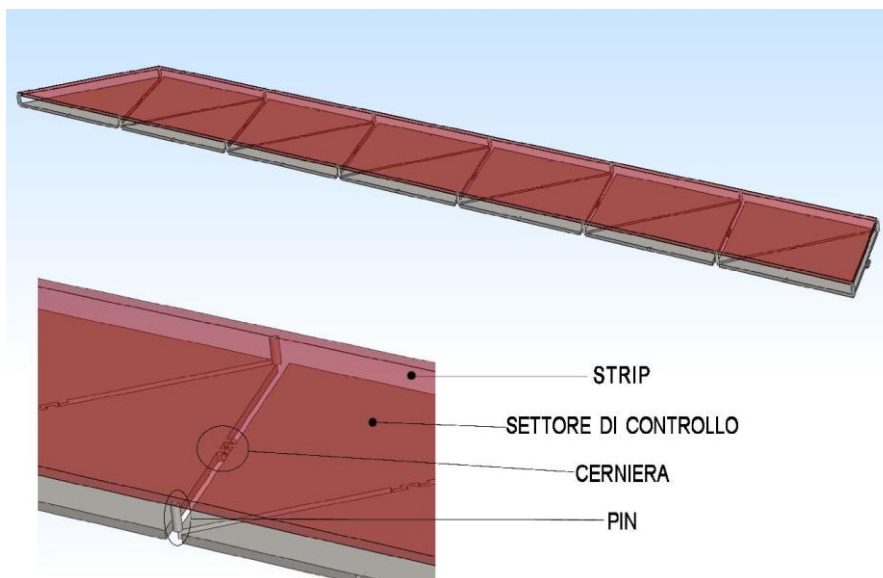


Figura 2.8: Elementi interfaccia tattile.

La rotazione relativa di tutti i settori, o solo di alcuni, permette alla striscia di rappresentare le superfici in esame.

I triangoli equilateri costituenti la mesh, hanno il lato di lunghezza pari a 50 mm. La larghezza della striscia risulta di circa 4,33 mm mentre la lunghezza è determinata dal numero di settori posti in serie. Considerando il settore centrale collegato all'Haptic Master ed inclinando i settori mobili di un angolo pari a  $30^\circ$  il raggio di curvatura è pari a circa 63 mm. Per quanto riguarda la torsione è possibile ottenere una rotazione relativa fra gli estremi di  $180^\circ$ .



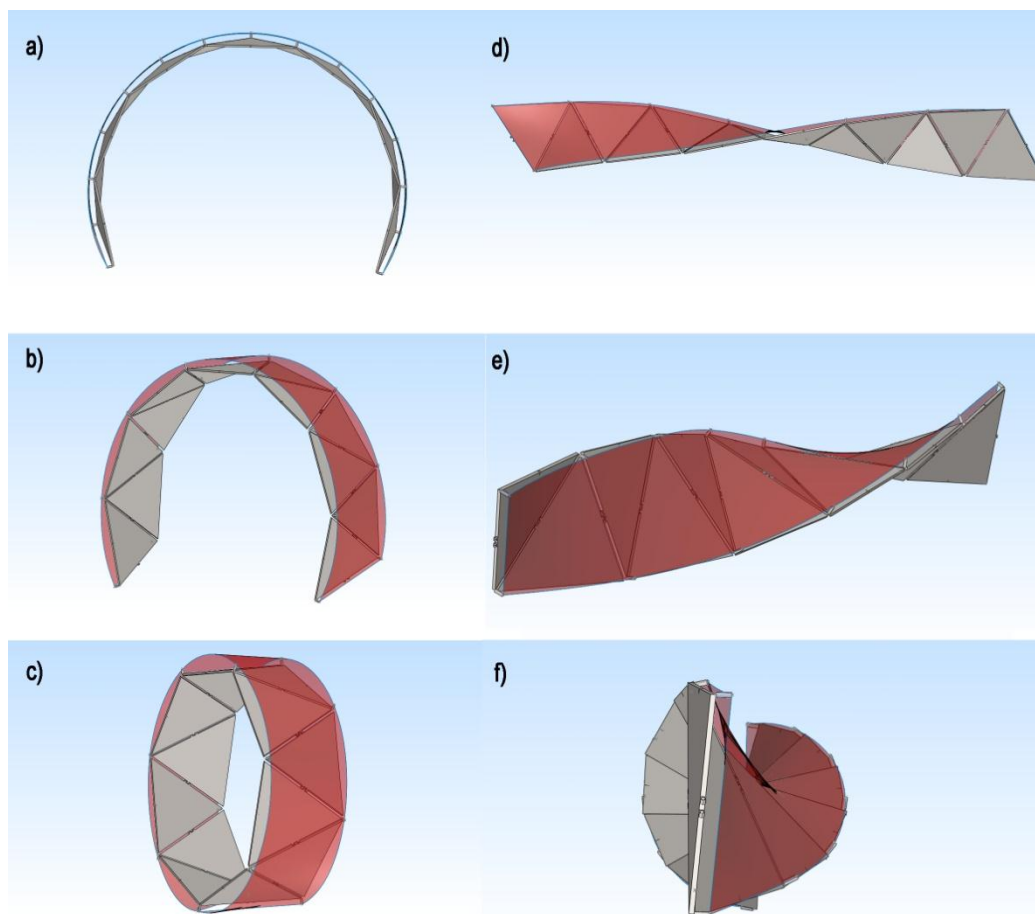


Figura 2.9: a),b)-Curvatura cilindrica con rotazione relativa di  $20^\circ$ , c)-Curvatura cilindrica con rotazione relativa di  $30^\circ$ , d),e),f)-Torsione.

La presenza dei distanziali che separano la striscia flessibile dai settori di controllo richiede che la striscia sia in grado di scivolare sui pin, in quanto, se quest'ultima fosse fissata ai supporti non sarebbe in grado di flettere correttamente. Questa è dunque fissata al settore centrale ed è permesso lo spostamento relativo con gli altri settori come se fosse vincolata con dei pattini. In questo modo si ottengono curvatures corrette, tuttavia i pin sono a contatto con la striscia sempre in punti diversi al variare del raggio di curvatura che si vuole rappresentare.

Al fine di consentire una maggiore precisione di rappresentazione è stato eseguito uno studio sulla deriva dei punti di contatto [1].

### 2.1.2.2 Sistema di movimentazione

Il sistema è movimentato tramite servomotori connessi con i settori triangolari tramite un sistema di riduzioni e leve.

A causa delle elevate coppie in gioco agenti sulle cerniere dei settori più centrali, vicini a quello solidale all'Haptic master, non è stato possibile adottare per l'intera striscia una configurazione miniaturizzata con l'uso di micromotori.

Da cui per i settori più esterni, si usa un sistema di servomotori miniaturizzati solidali al settore triangolare. Quindi l'azionamento di tali settori è relativo al settore su cui è alloggiato il micro servomotore.

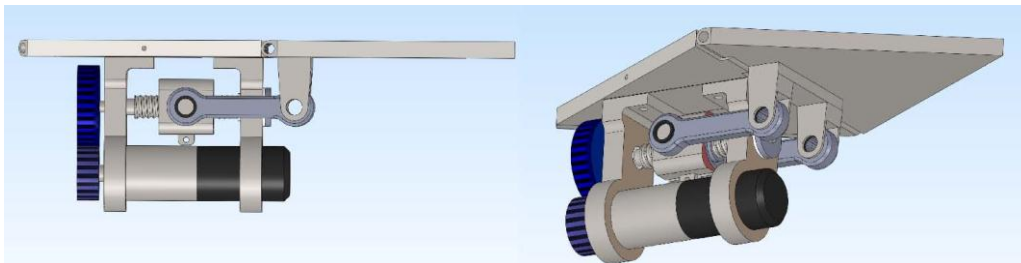


Figura 2.10: Singolo settore.

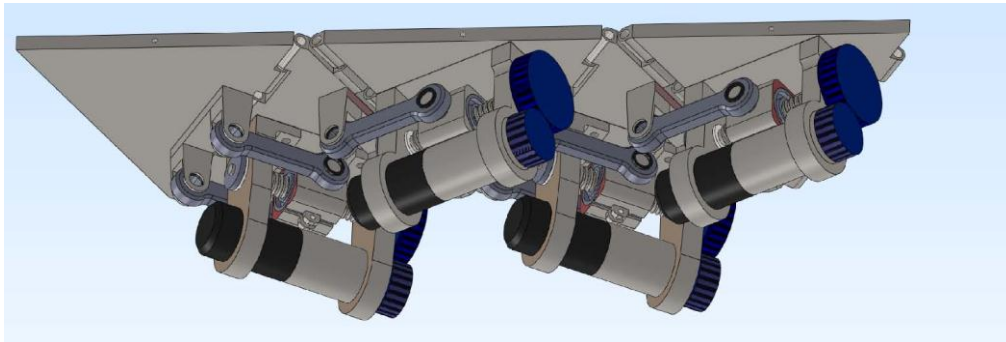


Figura 2.11: Ripetizione settori costituenti la parte di striscia a movimentazione relativa.

Per i settori centrali invece, è necessario un azionamento in grado di fornire un'elevata coppia motrice, date le rilevanti coppie in gioco. Per questo motivo i servomotori risultano di notevoli dimensioni e non possono essere alloggiati come i precedenti al di sotto dei settori triangolari. Da cui i motori sono fermi rispetto al meccanismo, solidali all' Haptic master, e trasmettono la potenza necessaria al moto mediante un sistema biella manovella. Tali settori sono dunque ad azionamento "assoluto" rispetto all' Haptic master.

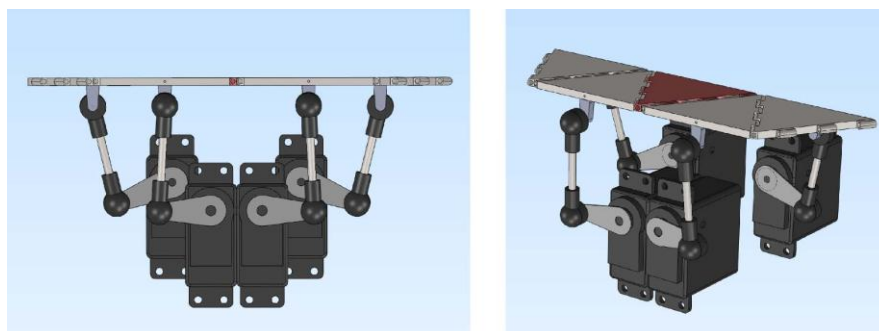


Figura 2.12: Settori a movimentazione assoluta.

Il sistema risulta dunque nella sua configurazione completa l'unione delle due parti come rappresentato in fig 2.13.

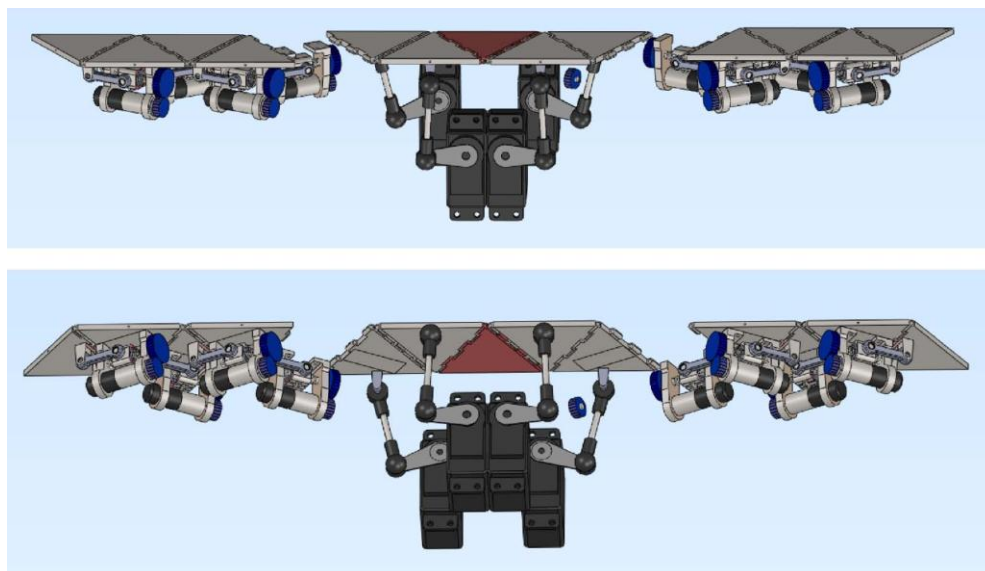


Figura 2.13: Configurazione della striscia per intero, unione delle parti a movimentazione relativa e assoluta.

## 2.2 Requisiti Satin

Una volta noto il sistema nella sua struttura e nelle sue parti, è necessario conoscere nel dettaglio i requisiti imprescindibili che il sistema deve soddisfare, in modo così da aver noti i limiti entro cui si può operare per valutare la possibilità di una modifica, che mantenga dunque il sistema funzionale.

A tal fine si è provveduto a concordare tali requisiti con l'Ing. Alessandro Mansutti, autore dell'ultima versione del Satin.

### I) Raggio di curvatura minimo

Disponendo la mesh a riprodurre una forma cilindrica, il raggio di curvatura minimo è relativo al cilindro minimo rappresentabile oltre il quale la striscia non è in grado di avvolgersi. Questo sostanzialmente per limiti dovuti all'ingombro delle parti atte al movimento, disposte al di sotto dei settori triangolari.

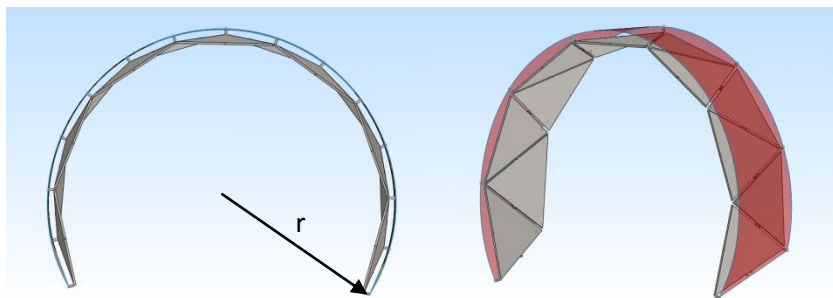


Figura 2.14: Raggio di curvatura.

Il raggio di curvatura minimo, è dunque il maggior limite per la rappresentabilità di una superficie. Difatti superfici con raggi di curvatura inferiore a tale vincolo risultano non rappresentabili dal sistema.

Si impone che il valore maggiore per il raggio di curvatura minimo sia di 60mm, ovvero pari a quello della versione esistente. Questo valore indica che in nessun caso il raggio minimo rappresentabile potrà essere superiore a tale valore, altrimenti si peggiorerebbero le prestazioni rispetto alla versione preesistente.

Eventualmente si può successivamente pensare ad una sua riduzione, non superando comunque un certo valore (inteso sui 50mm), in quanto è inutile andare a ridurre eccessivamente il raggio di curvatura in quanto si andrebbe a perdere la regolarità della superficie e i pin distanziali non sarebbero più in grado di prevenire la collisione tra striscia in plastica e settori triangolari.

## II) Lunghezza striscia

Il limite relativo alla lunghezza della striscia, è un limite inferiore in quanto deve essere sufficientemente estesa da restituire al meglio la sensazione tattile. Se questa fosse eccessivamente corta, verrebbe meno la funzione per cui la striscia è posta, a causa di una riduzione della resa della sensazione tattile.

Tale limite inferiore è quantificato in 300mm. Tendenzialmente è meglio non scendere sotto tale valore, ma essendo stretta la dipendenza dalla lunghezza del lato del triangolo può essere ulteriormente ridotto qualora esigenze di realizzazione lo richiedessero.

## III) Altezza striscia

L'altezza della striscia, intesa come distanza tra i pin trasversalmente allo sviluppo della striscia, è una grandezza molto critica, in quanto è direttamente legata al lato del triangolo.

Tale dimensione ha un limite inferiore, difatti un valore troppo ridotto impedisce l'apprezzamento delle curvature rappresentate, questo essenzialmente a causa delle dimensioni della mano dell'utente, che si interfaccia con la striscia.

Si assume dunque come dimensione minima in larghezza il valore di 20mm, questo impone di conseguenza che il lato del triangolo deve avere valore maggiore di 23mm.

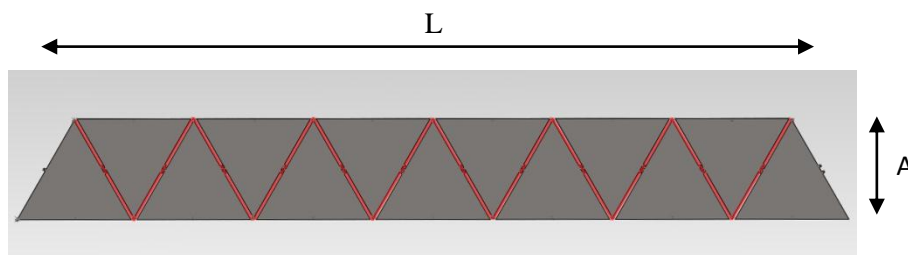


Figura 2.15 Limiti dimensionali, Lunghezza e Altezza.

### **IV) Lato triangolo**

Siccome la versione proposta deve essere un miglioramento di quella esistente, si prevede in ogni caso che il triangolo costituente la mesh non sia maggiore per dimensioni a quello già esistente. Dunque si impone che il lato del triangolo non superi i 50mm.

Per lato, si intende la distanza tra gli assi dei pin Poiché questi si trovano esattamente ai vertici del triangolo effettivamente rappresentato esente da approssimazioni inevitabilmente introdotte dalla presenza delle cerniere, che potrebbero avere dimensioni non trascurabili.

### **V) Numero settori triangolari**

Il sistema è simmetrico rispetto al settore centrale, vincolato all'Haptic master, dunque il numero dei settori deve essere dispari per mantenere la simmetria del sistema rispetto al centro vincolato.

### **VI) Resistere al tocco utente**

In condizione di meccanismo fermo, ovvero a configurazione raggiunta in cui la superficie rappresentata è quella desiderata, la struttura deve opporre una resistenza e dunque non deve modificarsi nel momento in cui l'utente tasta la superficie. Per questo è richiesto che all'estremo a sbalzo più sollecitato la forza imponibile sia di 35 Newton applicata in direzione e verso gravitazionale. Durante il movimento invece non è presente un vincolo di questo tipo, e la struttura deve dunque semplicemente auto sostenersi.

Il tocco anche energico della superficie comporta l'azione di forze dell'ordine dei 5-10[N], il vincolo di 35 Newton è da considerarsi un vincolo di resistenza sull'integrità strutturale del sistema, tale vincolo è trattabile, e si considera soddisfacente una forza superiore ai 25 [N].

### **VII) Posizionamento azionamento**

C'è una distanza tra mesh costituita dai triangoli e striscia tattile, imposta dai pin, che risultano lunghi 6mm, tra striscia e settore triangolare non deve essere dunque interposto alcun elemento altrimenti la striscia andrebbe a collidere con esso. Quindi tutti gli elementi atti all'attuazione devono essere posizionati sulla faccia inferiore della striscia.

### **VIII) Movimento settore continuo**

Il posizionamento relativo di un settore rispetto all'altro è continuo, ovvero non discretizzato in step, difatti i motori ruotano in continuo e la posizione è controllata dall'encoder interno al motore e dunque si possono assumere tutte le posizioni intermedie e la rotazione del settore si può considerare continua. L'introduzione di una discretizzazione costituirebbe dunque un peggioramento prestazionale rispetto alla versione esistente.

### **IX) Precisione posizionamento**

E' da porre in grande enfasi l'elevatissima precisione di posizionamento richiesta, intesa come angolo fisicamente sotteso tra due settori successivi. Questo poiché l'errore sull'angolo relativo presente tra due settori, si amplifica su tutti i settori ad essi successivi, in conseguenza del fatto che i sistemi di riferimento sono relativi a ciascuna coppia di settori.

### **X) Velocità attuazione**

Questo vincolo è relativo al tempo che intercorre tra la configurazione piana e la configurazione di curvatura massima rappresentabile.

Si può approssimativamente considerare come il tempo che impiega uno dei settori a ruotare relativamente al successivo, a partire dalla posizione piana (angolo relativo  $180^\circ$ ) fino a raggiungere l'angolo massimo richiesto, questo perché il sistema non muove un settore alla volta, ma si considera il moto contemporaneo dei settori. Questo tempo è dunque funzione dell'escursione angolare che deve soddisfare ogni settore, e si impone che debba essere di circa 3 secondi in modo da consentire uno spostamento sufficientemente rapido della striscia sulla superficie in esplorazione.

Occorre tenere conto delle diverse configurazioni dei diversi settori, e chiaramente il tempo da considerare dovrà essere quello relativo al meccanismo più lento.





# Capitolo 3

## Analisi sistemica

Nel capitolo 2 si sono descritti i requisiti del sistema Satin, ovvero tutte quelle caratteristiche dimensionali e geometriche, nonché funzionali che ne caratterizzano l'ultima versione. Tali requisiti costituiscono dunque il punto di partenza per lo studio di una nuova versione di modo che siano evidenti i limiti entro cui lavorare per non giungere a proporre dunque una semplice alternativa al sistema esistente, ma una effettiva evoluzione.

Nel presente capitolo si procede con la fase di analisi vera e propria del sistema. In primis si procede elaborando criticamente i requisiti sopracitati, in modo da ottenere una lista strutturata e parametrizzata dei limiti operativi più estesa, comprensiva dunque di quei parametri necessari all'analisi che non sono direttamente dichiarati tra i requisiti, ma che possono essere da essi dedotti.

Successivamente si procede con l'analisi del sistema esistente tramite gli strumenti forniti dalla logica TRIZ. Saranno proposte differenti tipologie di modellazioni del sistema, ciascuna delle quali mirata a individuare eventuali problematiche o criticità in differenti aree di lavoro, su cui sia possibile intervenire per apportare un effettivo miglioramento.

### 3.1 Analisi requisiti

Si riporta un elenco sintetico dei requisiti descritti nel capitolo 2, dopo di che si procederà con una loro analisi critica, in modo da estrarre, elaborandoli, il maggior numero possibile di informazioni utili.

- 1) Raggio di curvatura minimo rappresentabile 60 [mm] eventualmente riducibile fino a 50 [mm].
- 2) Lunghezza minima striscia 300 [mm].  
(Se tale lunghezza dovesse comportare problematiche eccessivamente complesse è ammessa una tolleranza fino a un paio di cm.).
- 3) Altezza minima striscia 20 [mm].  
Da questo vincolo si ricava direttamente la lunghezza minima del lato=23 [mm].
- 4) Dimensione massima lato triangolo 50 [mm].
- 5) Il numero dei settori triangolari deve essere dispari, con il centrale solidale all'haptic master.
- 6) In fase tocco non deve deformarsi con una forza non inferiore a 35 [N] imposta in direzione e verso gravitazionale, sull'estremo più sollecitato.
- 7) L'azionamento deve essere interamente alloggiato sulla faccia inferiore della striscia.
- 8) Il posizionamento relativo dei settori deve essere continuo, non discretizzato in passi.
- 9) E' richiesta una elevatissima precisione di posizionamento (angolo compreso tra due settori successivi).
- 10) Tempo massimo completa escursione 3 [sec].

Dalla lista si possono estrarre i primi cinque requisiti, che sostanzialmente sono descrittivi delle dimensioni e della geometria che caratterizza il sistema Satin. Si riassumono dunque in elenco i requisiti geometrici:

Raggio curvatura rappresentabile	→	( $\geq 60$ [mm] )
Lunghezza striscia	→	( $\geq 300$ [mm] )
Lato triangolo	→	( $23$ [mm] $\leq l \leq 50$ [mm] )
Numero settori	→	( dispari )

Questi requisiti descrivono sostanzialmente tre grandezze: la lunghezza complessiva della mesh, le dimensioni dei triangoli che la compongono, e il raggio di curvatura minimo che deve essere in grado di rappresentare. Legando tra di loro con relazioni matematiche queste dimensioni, si ottengono ulteriori informazioni qui di seguito elencate, fondamentali per la progettazione del nuovo sistema.

- a) Unendo il raggio di curvatura al lato del triangolo si ottiene la formula matematica che descrive l'angolo massimo relativo tra due settori successivi " $\alpha$ ";
- b) Dal lato del triangolo e dalla lunghezza della striscia si ottiene la formula matematica che indica il numero di settori " $n$ " costituenti la striscia.

Si procede ora descrivendo nel dettaglio come si sono estrapolate queste grandezze dai requisiti concordati.

### 3.1.1 Angolo massimo relativo “ $\alpha$ ”:

L’angolo massimo relativo descrive la massima inclinazione relativa tra due settori adiacenti per soddisfare il vincolo di minimo raggio di curvatura.

Per comprendere meglio il concetto, si immagini la striscia avvolta attorno ad un cilindro, il cui raggio di base corrisponda al minimo raggio di curvatura che si desidera ottenere. In questa configurazione si definisce “ $\alpha$ ” [deg] l’angolo relativo tra i due settori adiacenti.

Dunque l’angolo  $\alpha$  è la massima inclinazione relativa sia oraria che antioraria tra due settori adiacenti a e b, a partire dalla posizione in piano ovvero con angolo relativo pari a  $180^\circ$ .

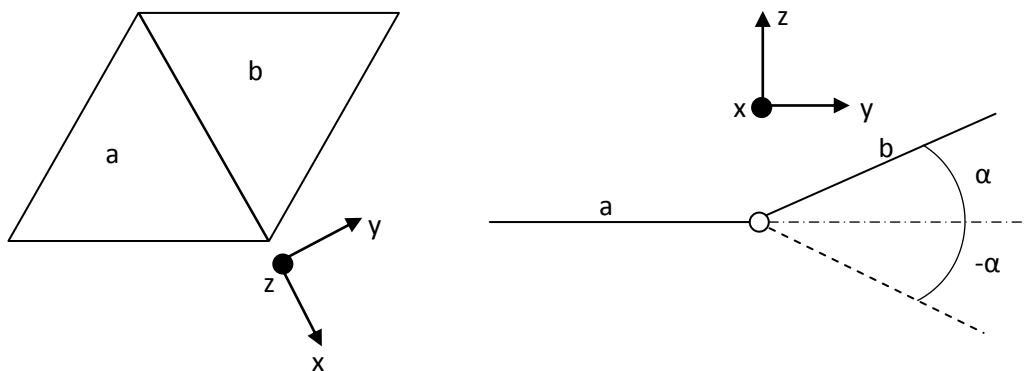


Figura 3.1: Vista superiore (a sinistra) e frontale (a destra) dei due settori adiacenti a e b, e angolo relativo  $\alpha$ .

Tale angolo è dunque una funzione del lato del triangolo e del raggio di curvatura minimo del cilindro che si desidera rappresentare.

$$\alpha [deg] = f(\text{lato}_{\text{triangolo}} [mm], \text{raggio}_{\text{curvatura min}} [mm])$$

Si procede dunque ora descrivendo nel dettaglio il procedimento usato per ricavare l'angolo relativo tra due settori adiacenti, i cui estremi giacciono sul cilindro di raggio generico "r" che si desidera rappresentare.

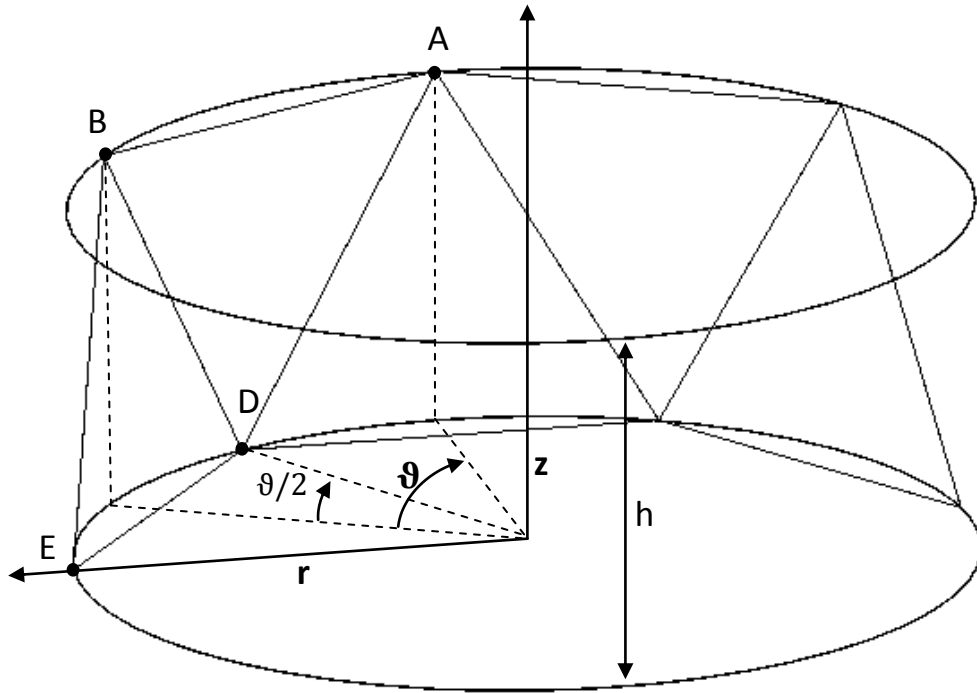


Figura 3.2: Sezione di cilindro su cui si avvolge la striscia.

- 1) Si individuano gli estremi dei due settori  $A, B, D, E$  giacenti sul cilindro in coordinate cilindriche.

Si osserva che tutti i punti hanno la stessa distanza radiale "r" dall'asse del cilindro di riferimento.

$$A = (r, \vartheta, h) \quad B = (r, 0, h) \quad D = \left(r, \frac{\vartheta}{2}, 0\right) \quad E = \left(r, -\frac{\vartheta}{2}, 0\right)$$

- 2) Si trasformano le coordinate dei punti nel sistema di riferimento cartesiano.

L'operatore di trasformazione risulta:

$$\begin{cases} x = r \cos(\vartheta) \\ y = r \sin(\vartheta) \\ z = h \end{cases}$$

Da cui i punti nel sistema di riferimento cartesiano sono:

$$A = \begin{cases} x = r \cos(\vartheta) \\ y = r \sin(\vartheta) \\ z = h \end{cases} \quad B = \begin{cases} x = r \cos(0) = r \\ y = r \sin(0) = 0 \\ z = h \end{cases}$$

$$D = \begin{cases} x = r \cos(\frac{\vartheta}{2}) \\ y = r \sin(\frac{\vartheta}{2}) \\ z = 0 \end{cases} \quad E = \begin{cases} x = r \cos(-\frac{\vartheta}{2}) \\ y = r \sin(-\frac{\vartheta}{2}) \\ z = 0 \end{cases}$$

- 3) Si individuano le equazioni dei piani passanti per le due terne di punti  $I = A, B, D$  e  $II = B, D, E$  (ovvero i piani su cui giacciono i settori).

Si vuole dunque ottenere la forma per  $I$  e  $II$ :

$$ax + by + cz + d = 0$$

Siano i punti appartenenti al piano I

$$A = x_1, y_1, z_1 \quad B = x_2, y_2, z_2 \quad D = x_3, y_3, z_3$$

e i punti appartenenti al piano II

$$B = x_1, y_1, z_1 \quad D = x_2, y_2, z_2 \quad E = x_3, y_3, z_3$$

L'equazione del piano passante per i tre punti si ottiene annullando il determinante della matrice:

$$\begin{bmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{bmatrix}$$

Ovvero:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0$$

L'equazione del piano I risulta:

$$\begin{aligned} & [h r \sin \vartheta] x + [h r (1 - \cos \vartheta)] y \\ & + \left[ r^2 \left( \sin \frac{\vartheta}{2} - \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \vartheta - \sin \vartheta + \sin \vartheta \cos \frac{\vartheta}{2} \right) \right] z \\ & + \left[ h r^2 \left( -\sin \frac{\vartheta}{2} + \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \vartheta - \sin \vartheta \cos \frac{\vartheta}{2} \right) \right] = 0 \end{aligned}$$

L'equazione del piano II risulta:

$$\begin{aligned} & \left[ -2 h r \sin \frac{\vartheta}{2} \right] x + \left[ -2 r^2 \left( \cos \frac{\vartheta}{2} - 1 \right) \sin \frac{\vartheta}{2} \right] z \\ & + \left[ h r^2 \sin \frac{\vartheta}{2} \left( 2 \cos \frac{\vartheta}{2} - 1 \right) \right] = 0 \end{aligned}$$

Si sono dunque ottenute le equazioni dei due piani I e II scritte nella forma canonica, ovvero rinominando i termini:

$$\text{Piano I: } a_I x + b_I y + c_I z + d_I = 0$$

e

$$\text{Piano II: } a_{II} x + b_{II} y + c_{II} z + d_{II} = 0$$

Si osserva che i due piani sono in funzione delle grandezze  $h$  e  $\vartheta$  che vedremo ora come possono essere semplicemente ottenute da relazioni trigonometriche.

E' semplice ottenere  $\vartheta$  osservando la figura 3.2

$$\vartheta = 2 A \sin\left(\frac{l}{2r}\right)$$

Per ricavare  $h$  occorre porre attenzione su un singolo settore triangolare:

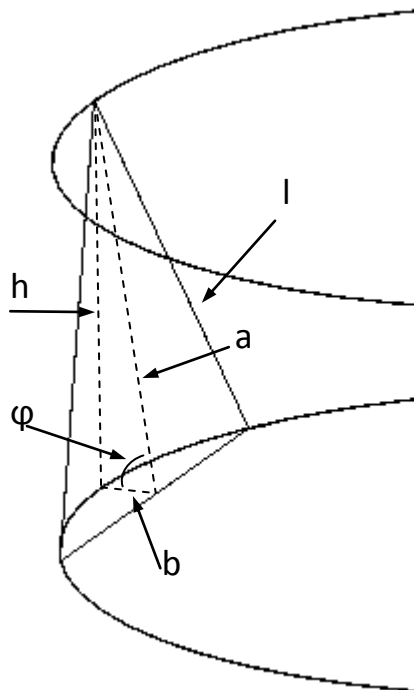


Figura 3.3: Particolare del settore triangolare con i parametri caratteristici.

$$h = a \sin\varphi = a \sin\left[\text{Acos}\frac{b}{a}\right]$$



Dove  $a$  è semplicemente l'altezza del settore triangolare:

$$a = l \sin 60^\circ = l \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Mentre  $b$  per essere meglio inquadrata, necessita di una vista del cilindro dall'altro in cui si evidenzia solamente il lato base:

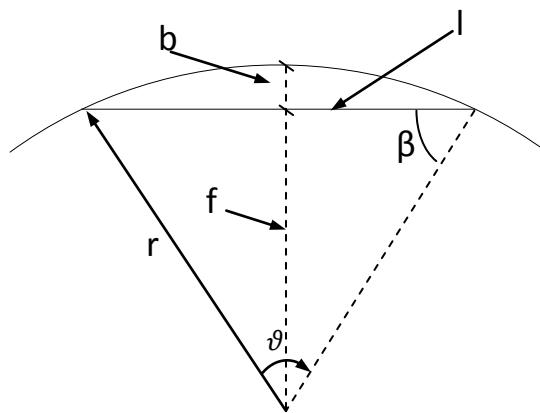


Figura 3.4: Vista del cilindro dall'alto.

$$b = r - f = r - r \sin \beta = r \left( 1 - \sin \left[ \text{Acos} \left[ \frac{l}{2r} \right] \right] \right)$$

Possiamo dunque riscrivere  $h$  che risulta dunque unicamente funzione di  $l$  e  $r$ :

$$h = l \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \left[ \text{Acos} \left( \frac{2r \left( 1 - \sin \left[ \text{Acos} \left[ \frac{l}{2r} \right] \right) \right)}{l \sqrt{3}} \right) \right]$$

- 4) Si ricava l'angolo di intersezione tra i due piani così ottenuti, corrispondente dunque all'angolo relativo tra i due settori.

L'angolo di intersezione tra i due piani I e II, è l'angolo tra i vettori ad essi normali, che risultano dunque rispettivamente:

$$v = (a_I, b_I, c_I) = (v_x, v_y, v_z)$$

$$w = (a_{II}, b_{II}, c_{II}) = (w_x, w_y, w_z)$$

L'angolo tra due vettori è ricavabile dal loro prodotto scalare:

$$\widehat{vw} = \text{Acos}\left(\frac{v_x w_x + v_y w_y + v_z w_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \cdot \sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}}\right)$$

Si è ottenuta dunque l'equazione che descrive l'andamento dell'angolo relativo tra i due settori solamente in funzione di  $l$  lato settore triangolare e  $r$  raggio di raccordo minimo rappresentabile.

Si è dunque ricavata la funzione

$$\alpha [deg] = f(\text{lato}_{\text{triangolo}} [mm], \text{raggio}_{\text{curvatura min}} [mm])$$

La funzione così ottenuta è stata implementata sul software Matlab, difatti si è scelto di inserire lato  $l$  e raggio  $r$  come vettori contenenti una serie di valori di possibile scelta. In output ne risulta una matrice in cui sono individuate tutte le possibili combinazioni dei valori di  $l$  e  $r$  inseriti. Tale matrice è rappresentata figurativamente da una superficie di risposta.

Si riporta in appendice [A] il relativo codice Matlab, CASE 1 del programma.

Si è scelto di inserire come valori limite superiore e inferiore del raggio di raccordo, i valori dichiarati come massimo da non superare, pari a 60 [mm] e il valore minimo cui arrivare riducendo tale limite, pari a 50 [mm]. I valori limite riguardo il lato sono i requisiti limite sulla lunghezza.

Si riporta la superficie di risposta ottenuta in Matlab:

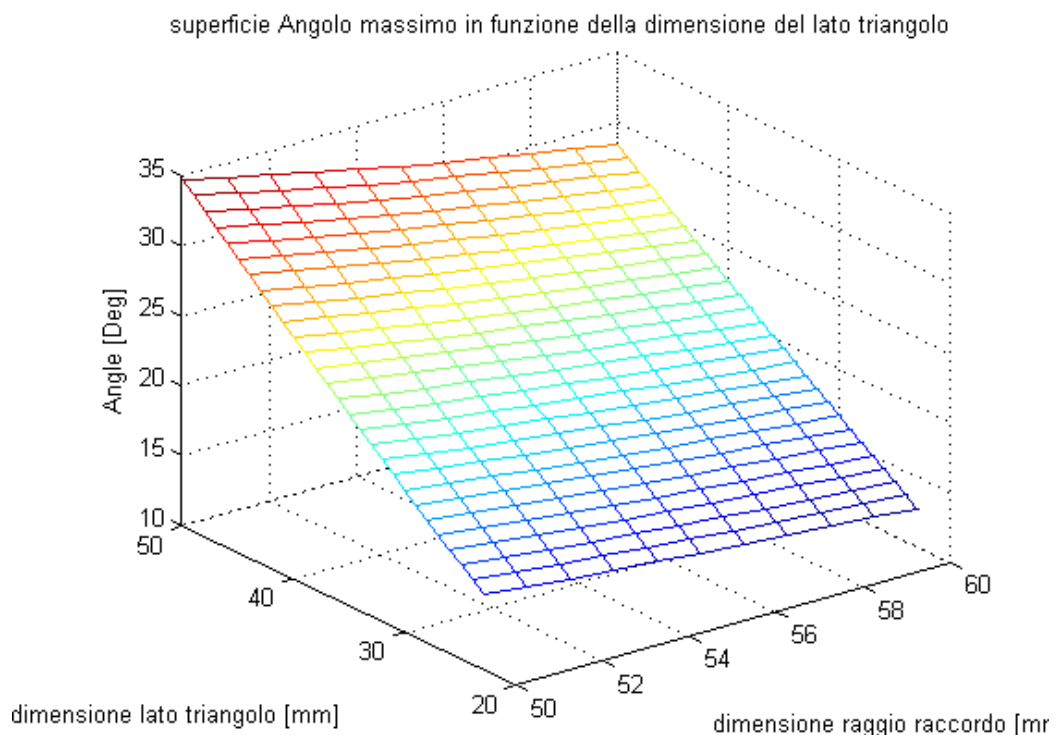


Figura 3.5: Superficie di risposta indice di tutte le combinazioni ottenibili.

Si può osservare che a parità di raggio di raccordo, tale relazione esplicita il legame tra lato e angolo relativo tra due settori, per cui più si riduce il lato del triangolo, più va a ridursi l'inclinazione relativa necessaria tra i due triangoli successivi.

### 3.1.2 Numero di settori “n”

Con “n” definiamo il numero settori necessari a realizzare la striscia, tenendo conto che questi devono essere dispari (requisito 5), la lunghezza della striscia deve essere 300 [mm] (requisito 2) a meno di una minima tolleranza (pochi mm) e il lato deve avere lunghezza compresa tra 23 e 50 [mm] (requisiti 3 e 4).

Dunque n è una funzione che descrive il minimo numero di settori necessari a costituire la striscia della lunghezza desiderata, tenendo conto dei diversi requisiti e delle tolleranze stabilite, al variare della lunghezza del lato del settore triangolare.

$$n_{\text{settori}} = f(\text{lato}_{\text{triangolo}}[\text{mm}], \text{lunghezza}_{\text{striscia}}[\text{mm}])$$

Siccome la lunghezza della striscia è imposta, a meno di una piccola tolleranza, il numero dei settori è sostanzialmente funzione della dimensione del lato del triangolo. Sostanzialmente si divide la lunghezza della striscia per la metà del lato del triangolo e si ottiene il numero dei triangoli.

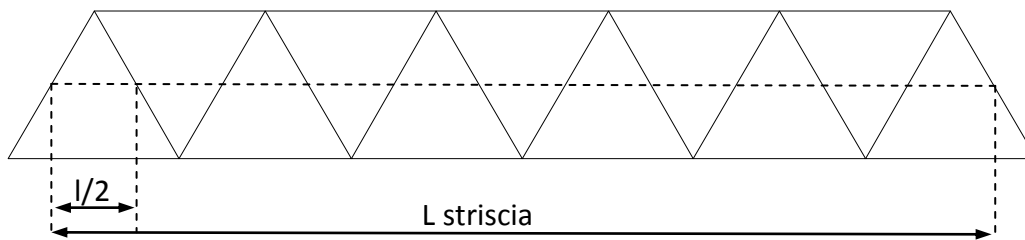


Figura 3.6: Dimensioni utili della striscia.

$$n_{\text{settori}} = \frac{\text{lunghezza}_{\text{striscia}}[\text{mm}]}{\text{lato}_{\text{triangolo}}[\text{mm}]}$$

E' stato stabilito un valore di tolleranza pari a 5 [mm] e sostanzialmente tramite un ciclo for si approssima al numero intero di triangoli inferiore se la lunghezza della striscia differisce per meno del valore tollerato dai richiesti 300 [mm]. Altrimenti si approssima al valore intero superiore.

Si riporta in appendice [A] il relativo codice Matlab, CASE 3 del programma. La funzione così implementata in Matlab, individua tutte le possibili combinazioni visualizzate per comodità in un grafico di punti:

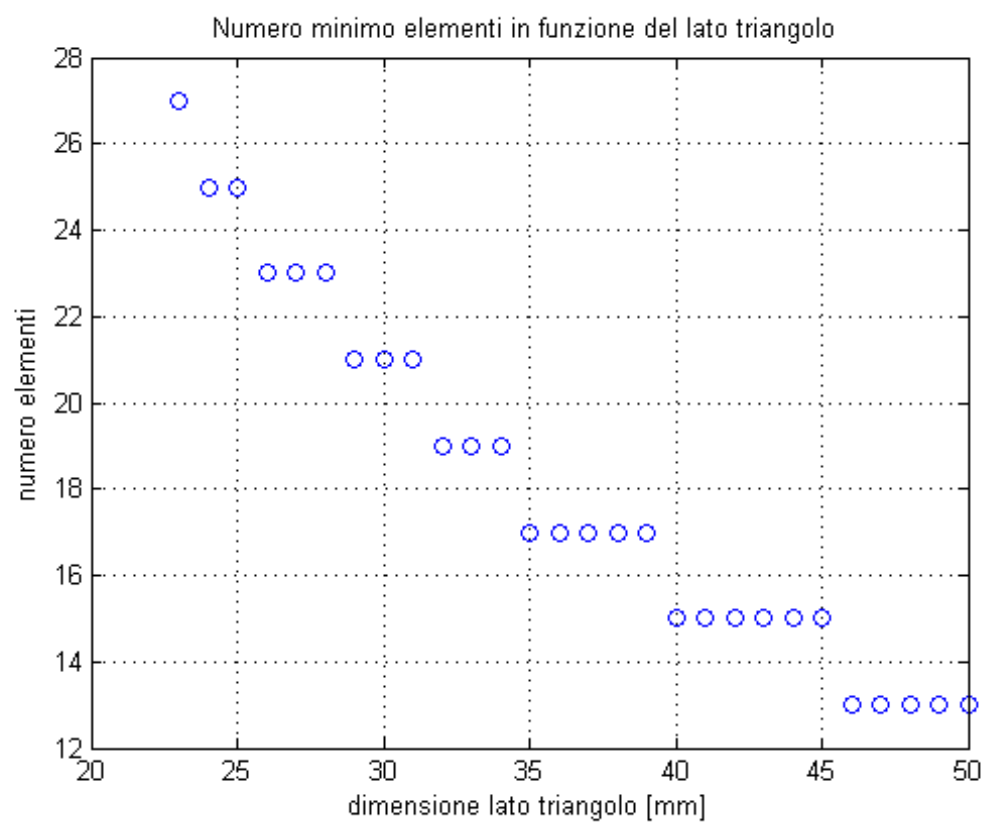


Figura 3.7: Numero elementi triangolari in funzione del lato triangolo.



### 3.2 Analisi sistema

In questa analisi si riprende il sistema per intero e se ne descrivono criticamente tutte le caratteristiche e le funzionalità, con l'aiuto di schemi concettuali, che hanno il fine di evidenziare limiti, problematiche o eventuali difetti non direttamente visibili in una visione d'insieme.

In questo modo si ottiene un modello del sistema esistente, che rende esplicite le aree che necessitano un miglioramento, e aiuti di conseguenza a proporre le linee guida per lo sviluppo di un nuovo studio.

In particolare si segue il primo postulato dell'architettura TRIZ, acronimo russo Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch, tradotto in Theory of Inventive Problem Solving, teorizzata da Genrich Altshulle. Il primo postulato riguarda le leggi (obiettive) sull'evoluzione dei sistemi [5] [6].

Lo studio prevede dunque una serie di step, in cui sono stati creati diverse tipologie di modelli del medesimo sistema, che permettono di sviscerare le criticità e guidano alla scelta della strada da intraprendere. Al termine di tale processo sarà possibile costruire un diagramma chiamato problem flow network, che raccoglie tutti i limiti e le relative possibili soluzioni.

In sintesi la procedura di analisi si può schematizzare nel seguente diagramma:

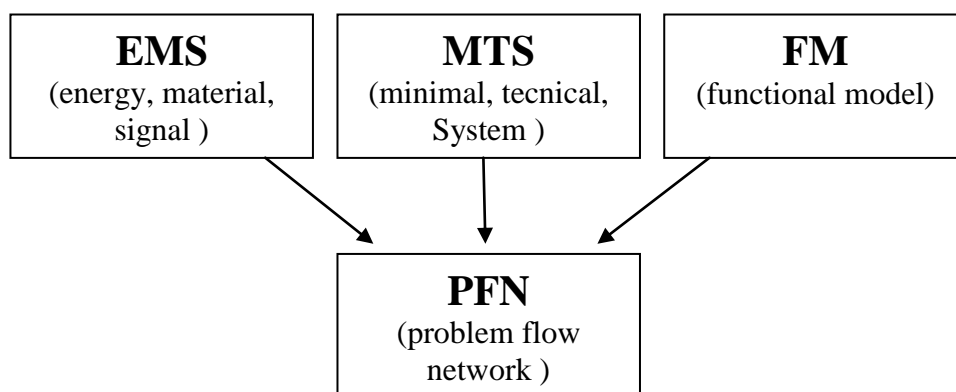


Figura 3.8: Schema sintetico dei modelli usati per lo studio del sistema.

E' importante sottolineare a priori dell'analisi il fine che si propone di raggiungere idealmente il sistema e la soluzione attualmente esistente, in modo da non perdere mai di vista l'obiettivo centrale che ci propone di raggiungere.

### Sistema ideale:

Superficie chiusa (oggetto fisico) che prenda le sembianze di un secondo oggetto virtuale, descritto da un modello CAD, e ne permetta l'esplorazione, intesa come restituzione di sensazione tattile, e la modifica.

### Sistema attuale:

Il sistema consiste in una striscia a mesh triangolare. Sui vertici dei triangoli sono innestati dei pin, i cui estremi, collegati ad una striscia in materiale plastico, risultano tangenti alla superficie da descrivere. E' proprio la striscia in plastica che esplica la funzione di interfaccia tattile diretta con l'utente. Il movimento è permesso da maniglie in alluminio solidali ai triangoli. E' importante sottolineare che il movimento non è direttamente dovuto all'applicazione di forza da parte dell'utente. Infatti le maniglie sono dotate di estensimetri, che ne rilevano la deformazione dovuta all'imposizione di pressione da parte dell'utente che desidera muoverle in una determinata direzione. Dunque è l'unità pc che, ricevuto in input il segnale in uscita dagli estensimetri, provvede ad inviare il corretto segnale di movimento all'Haptic Master e a tutti i servomotori, ed è dunque effettivamente il diretto responsabile dello spostamento della striscia sulla superficie virtuale.



### 3.2.1 EMS model (Energy Material and Signal)

In primo luogo è necessario descrivere l'intero sistema come una black box che metta in evidenza tutto ciò che il sistema riceve in input e successivamente ad elaborazione restituisce come output, riuniti in tre categorie fondamentali: materiali, segnali ed energia. Si osserva che il sistema Satin non riceve in input e non produce in output sostanze fisiche e dunque la categoria dei materiali, ma solo energia e segnali [5] [6] [7].

#### 3.2.1.1 EMS model Satin complessivo

Per l'analisi EMS, ci si riferisce al sistema satin senza separare le modalità di funzionamento, dunque si rappresentano tutti gli ingressi e le uscite che ciascun elemento può ricevere e generare.

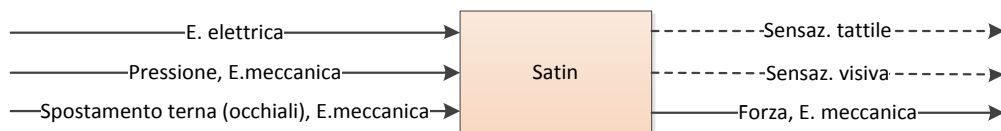


Figura 3.9: EMS riferito all'intero sistema Satin (visione inclusa).

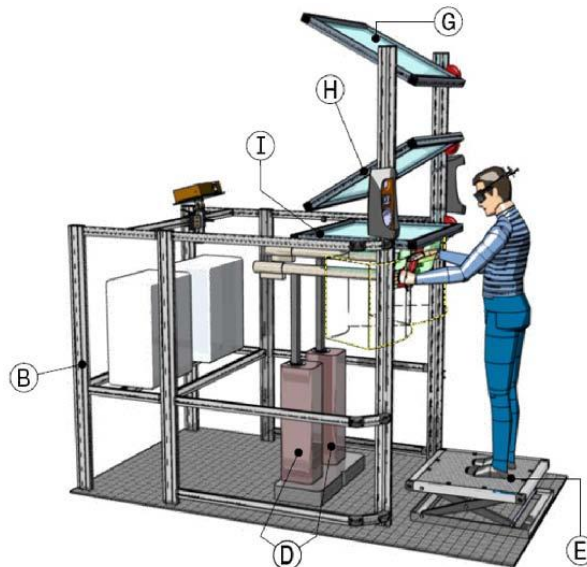


Figura 3.10: Il sistema satin.

Andando ad espandere l'elemento Satin, ne si evidenzia ora ogni singolo componente particolare, e si iniziano a separare dunque gli elementi nei tre macro blocchi costituenti il sistema,[1] ovvero:

- a) Il sistema di visione, che permette la visualizzazione stereoscopica dell'oggetto virtuale.
- b) L'unità Pc centrale, atta all'elaborazione dei segnali ricevuti e all'invio dei comandi a tutti gli altri elementi.
- c) Il sistema di movimentazione della striscia, a sua volta diviso in due parti:
  - l'haptic master e i servomotori necessari a sorreggere la striscia e a spostarla nello spazio consentendo le rotazioni: rollio, beccheggio e imbardata.
  - La striscia stessa, su cui si approfondisce l'analisi in questa sede.

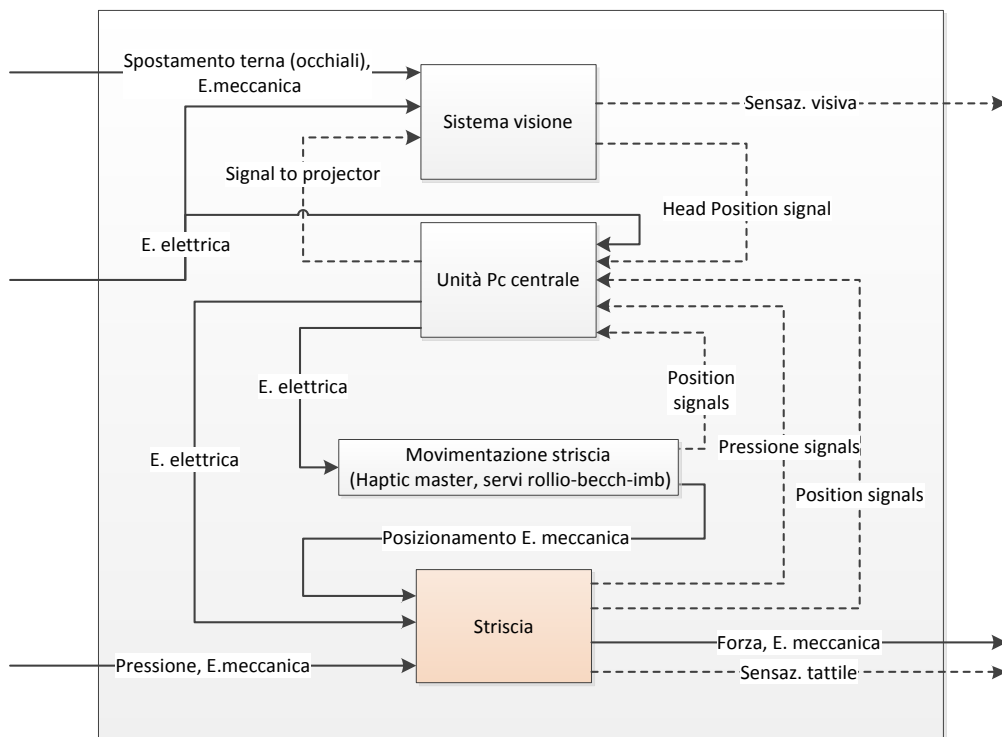


Figura 3.11: Il sistema Satin nelle sue parti fondamentali, sistema di visione, unità elaborazione segnali, sistema di movimentazione striscia.

### 3.2.1.2 EMS model elemento striscia

Si espande dunque l'elemento striscia che come già detto è l'oggetto di studio della presente tesi, si evidenzia che a sua volta è suddivisa in tre elementi fondamentali:

- Le maniglie in alluminio su cui sono posti gli estensimetri, posizionate lungo tutto il perimetro della mesh, sono responsabili dell'invio all'unità centrale dei segnali che decreteranno lo spostamento dell'intero sistema di movimentazione. Difatti agendo tramite pressione delle dita su di esse, l'utente di fatto modifica la posizione nello spazio della striscia.
- La striscia in plastica, ovvero l'elemento che permette la restituzione all'utente della sensazione tattile in modalità d'uso di "tocco". Sarà questa infatti che consente all'utente di apprezzare la curvatura rappresentata toccandola con mano.
- La mesh di settori triangolari movimentata, che consente tramite variazione degli angoli relativi tra i diversi settori, la riproduzione delle superfici al cad. E' questa parte che andremo ad approfondire.

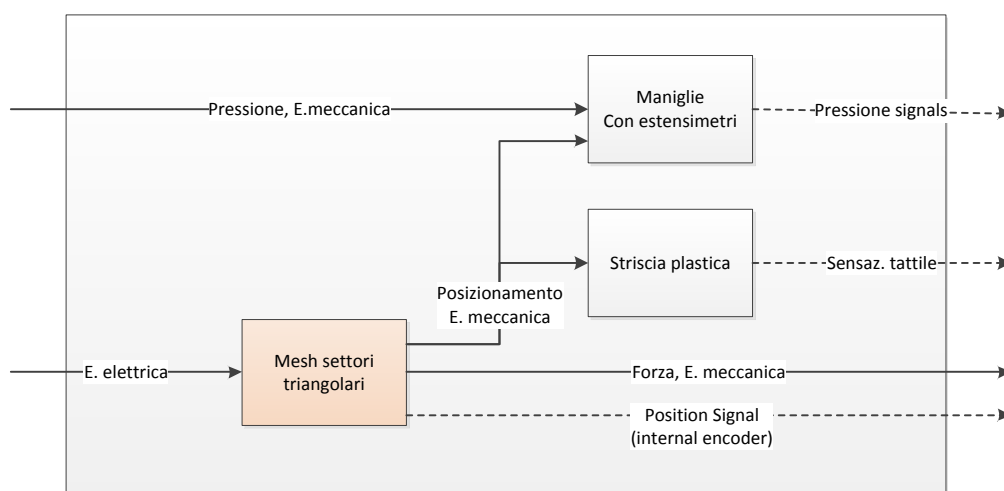


Figura 3.12: Gli elementi costituenti la striscia.

Nell'immagine a pagina seguente si riporta un esploso CAD della striscia attuata, si notano la striscia in plastica, rossa, i settori triangolari, e gli azionamenti sottostanti la striscia. Non sono rappresentate le maniglie estensimetriche, che sono situate su ogni lato esterno dei triangoli.

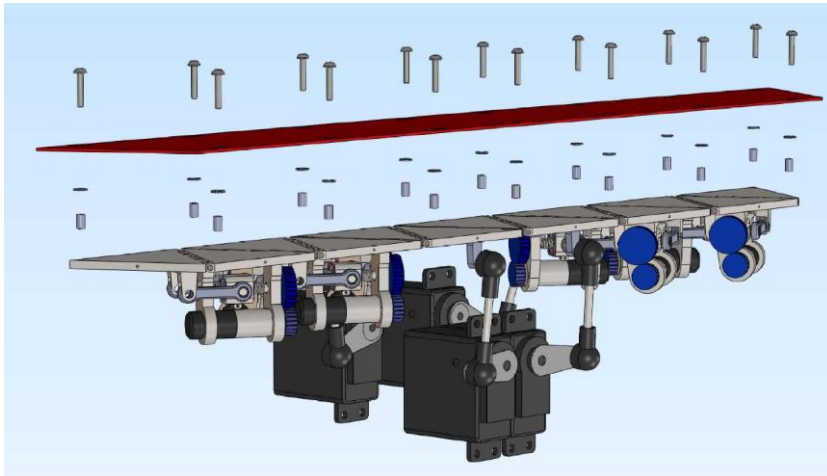


Figura 3.13: La striscia nelle sue parti.

### 3.2.1.3 EMS model mesh triangolare

In ultimo si analizza la mesh di triangoli, questa è costituita da diversi moduli ripetuti in serie. I settori sono divisi in due categorie, ad azionamento relativo e ad azionamento assoluto, e, a cambiare, oltre alla tipologia di attuatore utilizzato, risulta anche il sistema di riferimento del settore movimentato.

Nel caso assoluto questo rimane fisso per tutti i settori in movimento, difatti i servomotori sono solidali all'haptic master. Nel caso relativo invece, ogni settore è riferito al settore che lo precede, ed allo stesso tempo è sistema di riferimento per il settore seguente.

Il modulo base è la coppia di settori triangolari, che, a fronte di potenza elettrica in ingresso restituisce un segnale posizionale ( encoder interno al servo ) e forza meccanica intesa come coppia impressa al triangolo movimentato.

Dunque a livello concettuale il modello EMS della coppia di settori risulta il seguente:

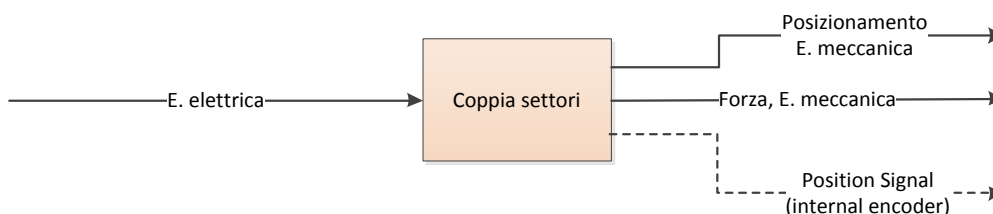


Figura 3.14: Modulo base.

Si espande dunque ora l'ultimo elemento del sistema, distinguendo tra le due tipologie di sistema di riferimento assoluto e relativo.

### 3.2.1.3.1 EMS model settore a movimentazione assoluta

Per quanto riguarda i settori a movimentazione assoluta, i servomotori, che integrano al loro interno le riduzioni, sono tutti posti nel medesimo sistema di riferimento, fisso rispetto ai triangoli che vanno a movimentare. Il segnale di posizione è inviato all'unità di elaborazione dall'encoder interno al motore, e dunque a monte della catena riduzioni-cinematismi.

I settori condividono quindi il medesimo sistema di riferimento, e, preso in considerazione un settore assoluto generico, il triangolo posto a monte rispetto ad esso ha l'unica funzione di fissarne i gradi di libertà a livello della cerniera.

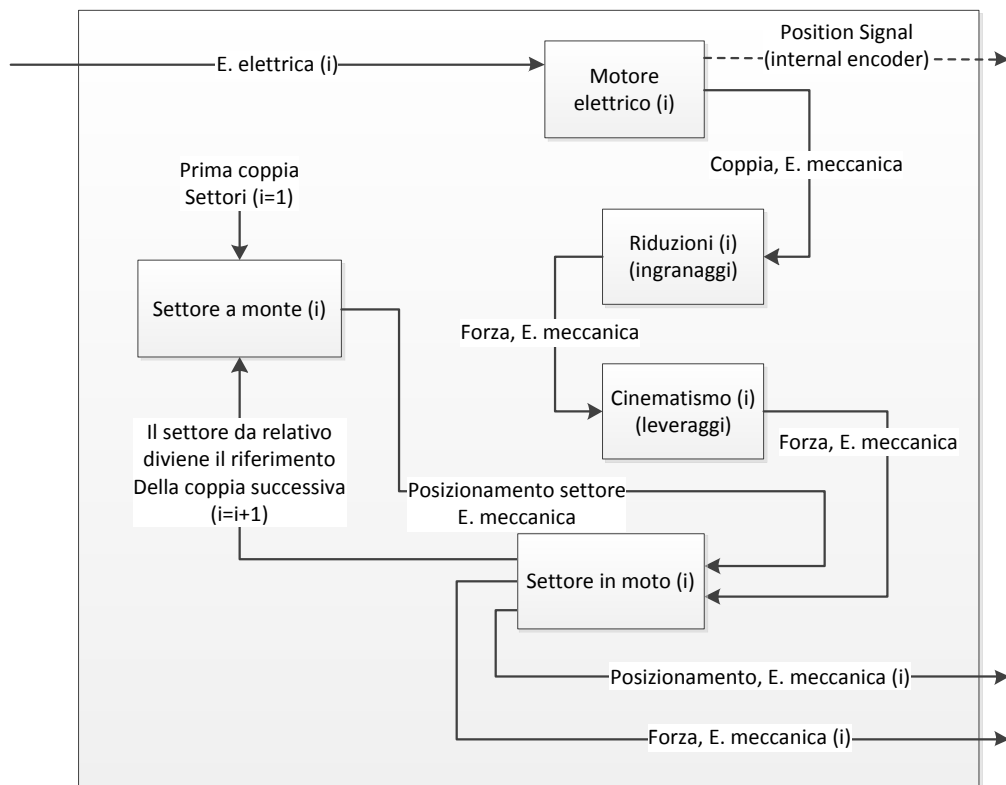


Figura 3.15: Coppia di settori a movimentazione assoluta.

### 3.2.1.3.2 EMS model settore a movimentazione relativa

Per quanto riguarda la coppia di settori a movimentazione relativa, il settore di riferimento sorregge il motore elettrico che tramite una catena di riduzioni e cinematismi, impone la legge di moto al settore successivo. Il segnale di posizione è inviato al computer dall'encoder interno al motore.

Nella coppia successiva è il settore che per la coppia precedente era in movimento a fungere da riferimento per il successivo.

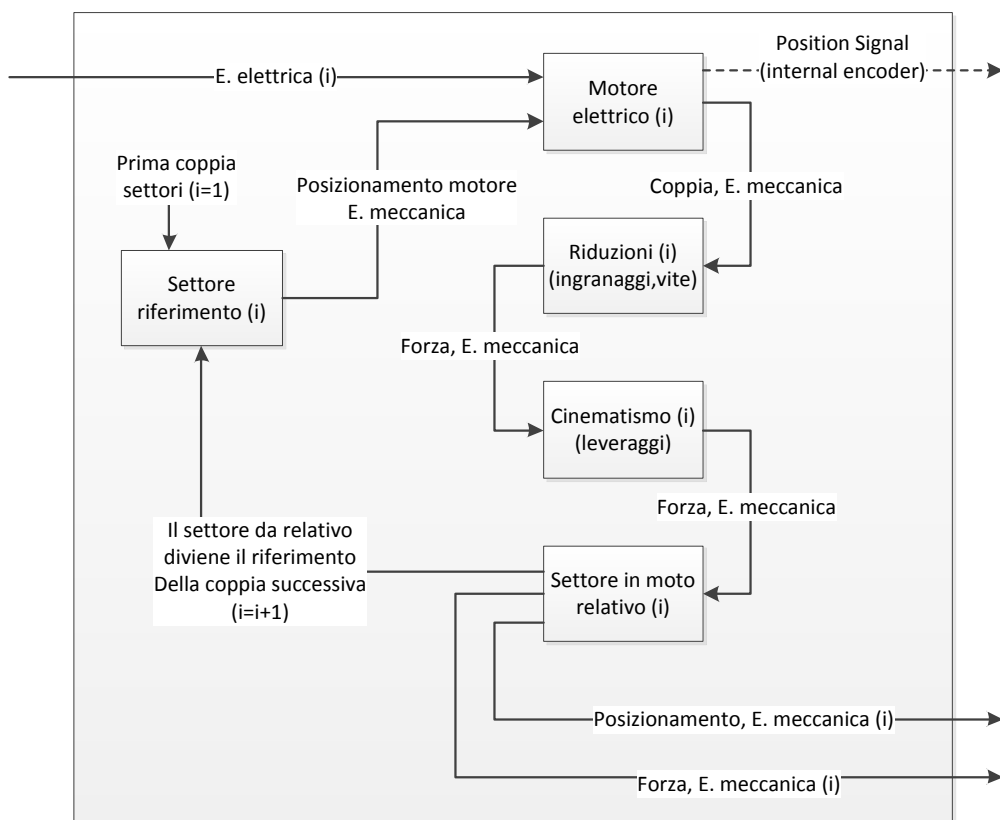


Figura 3.16: Coppia settori a movimentazione relativa.

### 3.2.1.4 EMS model Conclusioni

Dai diagrammi EMS rappresentativi della coppia di settori movimentati, risulta evidente un importante limite intrinseco alla tipologia di movimentazione del sistema Satin in esame, ovvero la distanza inevitabile tra l'elemento responsabile dell'invio del segnale posizionale, l'encoder interno al motore, e l'effettivo oggetto della movimentazione, ovvero il settore triangolare. La catena di elementi costituiti da riduzioni e leveraggi, che si interpone tra di essi, è causa di errori sistematici nel posizionamento degli elementi costituenti la mesh.

Difatti non è possibile conoscere con esattezza l'effettiva posizione del triangolo questo perché la posizione angolare del settore è dedotta dall'equazione di moto che descrive l'intera struttura del sistema a monte del settore in movimento. E' dunque semplice intuire che ogni approssimazione presente sul posizionamento di un settore, si amplifica proseguendo lungo lo sviluppo della mesh, essendo i settori posti in serie.

Essendo il sistema costituito di numerose parti, gran parte degli errori di posizione sono attribuibili ai giochi tra di esse. conseguenza della presenza degli inevitabili giochi presenti tra le numerose parti.

Si conclude che nello sviluppo di un nuovo concept che migliori le performances di quello esistente, è da tenere in grande considerazione la possibilità di introdurre una lettura posizionale più diretta, questo costituirebbe un importante miglioramento in quanto si andrebbero a ridurre notevolmente gli errori sistematici dovuti ai giochi.

Inoltre occorre sviluppare il novo concept cercando di eliminare per quanto possibile eventuali riduzioni e leveraggi, principali responsabili dei giochi.

### 3.2.2 MTS model (minimal technical system)

Il modello rispecchia la prima legge sull'evoluzione dei sistemi meccanici, ovvero la *legge della completezza del sistema*: un sistema meccanico è composto da 4 elementi fondamentali, qualsiasi sia la sua complessità [5] [6] [7].

*Control*: elemento atto al controllo delle parti del sistema.

*Engine*: elemento che consente il moto delle parti erogando il sistema di forze necessario, ad esempio una coppia nel caso di un motore rotativo.

*Transmission*: elemento che rende disponibile al tool le forze erogate dall'elemento engine connettendo i due elementi.

*Tool*: elemento che compie effettivamente la funzione che si prefigge il sistema.

*Object*: elemento che subisce direttamente la funzione primaria del sistema tramite interazione con il tool.

Nel modello è posta particolare enfasi ai legami di interazione presenti tra gli elementi. Le interazioni tra le parti sono rappresentate da delle frecce mono o bidirezionali a seconda dei flussi funzionali.

Per meglio comprendere il modello se ne riporta la struttura generica, tenendo conto che tutti gli elementi possono potenzialmente interagire tra di loro.

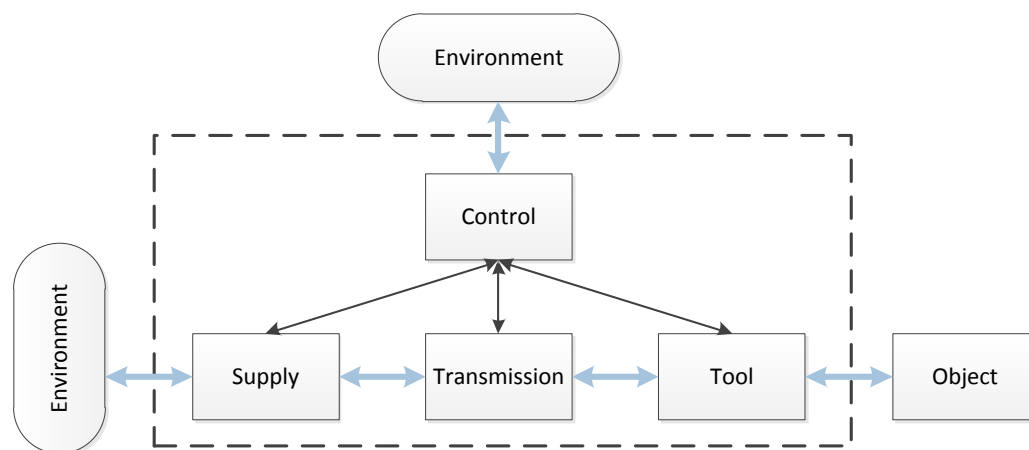


Figura 3.17: Modello EMS.



### 3.2.2.1 MTS model System striscia

Si analizza solamente la parte relativa alla striscia, nel modello è dunque tralasciato il sistema di visualizzazione.

La mano è l'oggetto mentre il tool è l'intera striscia satin, nel cinematismo si include il sistema di movimentazione nello spazio della striscia ( che consente rollio, beccheggio e imbardata).

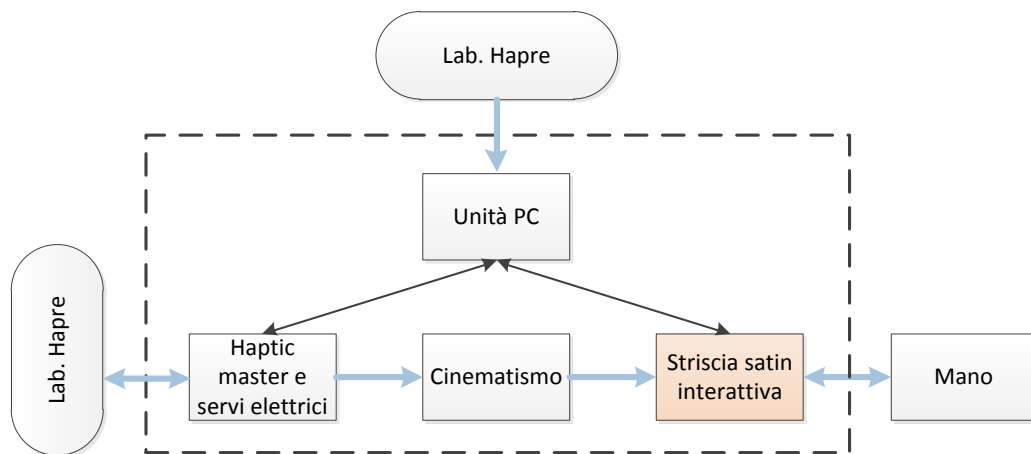


Figura 3.18: Modello del sistema generale.

L'environment è costituito dal laboratorio, che ha la sola funzione di contenere la struttura e fornire energia elettrica necessaria al funzionamento, e su cui dunque, questa non compie funzioni, se non per quanto riguarda i servomotori, che essendo molto rumorosi, modificano in un certo senso lo stato dell'ambiente circostante alterandolo con rumore di fondo. L'effetto relativo alla produzione di calore è invece trascurabile rispetto all'ambiente esterno.

L'unità computer riceve i segnali posizionali dai servomotori legati all'haptic master e da quelli posti sulla striscia, ed invia ad essi corrente elettrica.

Il cinematismo collega la striscia all'haptic master e ai servomotori, mentre la mano è l'oggetto di interazione con la striscia, che riceve da essa le forze che la sostengono, ed impone pressione agli estensimetri.

La parte del sistema di interesse è la striscia, su cui dunque si affina lo studio, con un secondo behaviour model di dettaglio.

### 3.2.2.2 MTS model Sub System settore

In questo caso più di dettaglio analizziamo solamente uno degli elementi della striscia, costituito da settore e relativo servo di movimentazione, che ripetuto in serie costituisce l'intera striscia.

Il triangolo è l'oggetto, mosso dal tool che è il sistema di leveraggi, mentre come trasmissione sono considerate solo le riduzioni del servo. Il motore è ancora una volta il servo elettromeccanico.

A seconda che sia il settore a movimentazione assoluta o relativa l'environment del servo è costituito dall'elemento di fissaggio solidale all'haptic master oppure dall'elemento triangolare a monte.

Il servo tramite le riduzioni e le leve muove i settori della striscia, mentre l'unità pc riceve il segnale dall'encoder del servo e dagli estensimetri posti sulle maniglie ai lati del triangolo, e invia di conseguenza la corrente al motore. In ultimo la striscia in plastica questa volta è l'oggetto, che viene posizionato nello spazio dal triangolo tramite il pin.

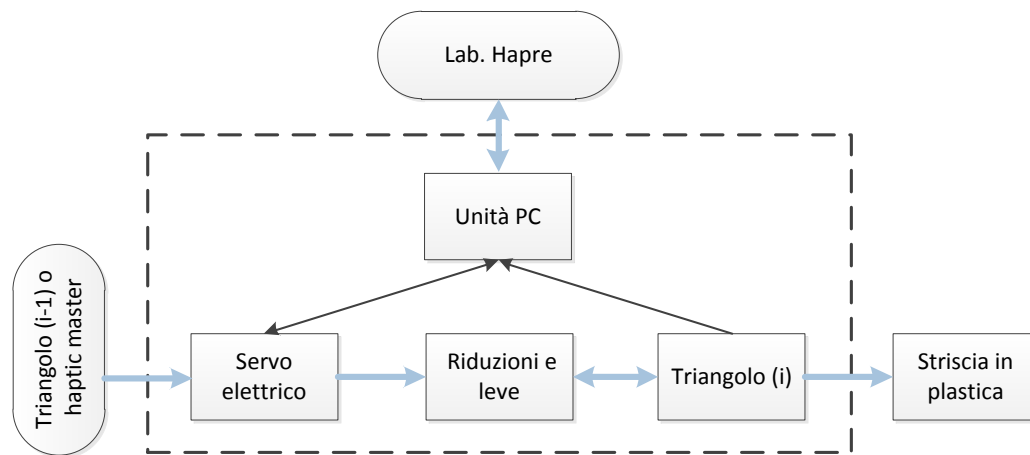


Figura 3.19: Il settore movimentato.

Da questa analisi ci si rende conto come una maggiore integrazione delle parti costituenti permetterebbe una notevole semplificazione della struttura, in perfetto accordo con le leggi sull'evoluzione dei sistemi meccanici [5] [6]:

Legge n° 2 : *legge dell'energy conductivity*, ovvero sull'incremento dell'efficienza di circolazione dell'energia tra i collegamenti.

Legge n° 3: legge sull'armonizzazione delle parti del sistema.

Legge n° 5: legge sullo sviluppo delle parti del sistema, ossia un sistema evolve quando evolvono le sue singole parti.

### 3.2.3 Functional model, modalità di funzionamento

Vediamo ora il sistema da un punto di vista degli input e degli output che esso riceve-trasmette nelle diverse modalità di funzionamento previste.

Per questo studio ci si avvale di un modello funzionale, in cui i diversi input e output sono contraddistinti da frecce rappresentanti le relazioni funzioni presenti tra i diversi elementi catalogate come [5] [6] [7]:

*Funzioni utili:* ovvero tutte quelle interazioni necessarie al funzionamento del sistema. E' rappresentata da un segmento orientato a tratto continuo.

*Funzioni incomplete:* ovvero tutte le interazioni desiderate, ma che non compiono completamente la funzione prevista. E' rappresentata da un segmento orientato a tratto discontinuo.

*Funzioni dannose:* quelle interazioni indesiderate che creano problematiche di diverso tipo all'interno del sistema. E' rappresentata da un segmento orientato a tratto ondulato (un segmento orientato rosso nei diagrammi successivi).

Vediamo dunque lo schema funzionale relativo alle diverse modalità, che, come già descritte nel dettaglio nel capitolo 2, sono tre:

modalità *esplorazione*,      modalità *tocco*,      modalità *modifica*.

**3.2.3.1 Modalità “Esplorazione”:**

IN: pressione sulle manopole.

OUT: movimento attuatori, la striscia cambia posizione sul CAD e ne assume la forma.

In modalità esplorazione, L’utente impone una pressione sulle manopole poste sulla striscia, il sistema di forze risultante, letto dagli estensimetri sui tre assi, viene inviato all’unità pc che provvede a integrare lo spostamento desiderato con l’effettiva possibilità di movimento della mesh fisica, mantenendo il vincolo di tangenza con la superficie virtuale esistente nel CAD.

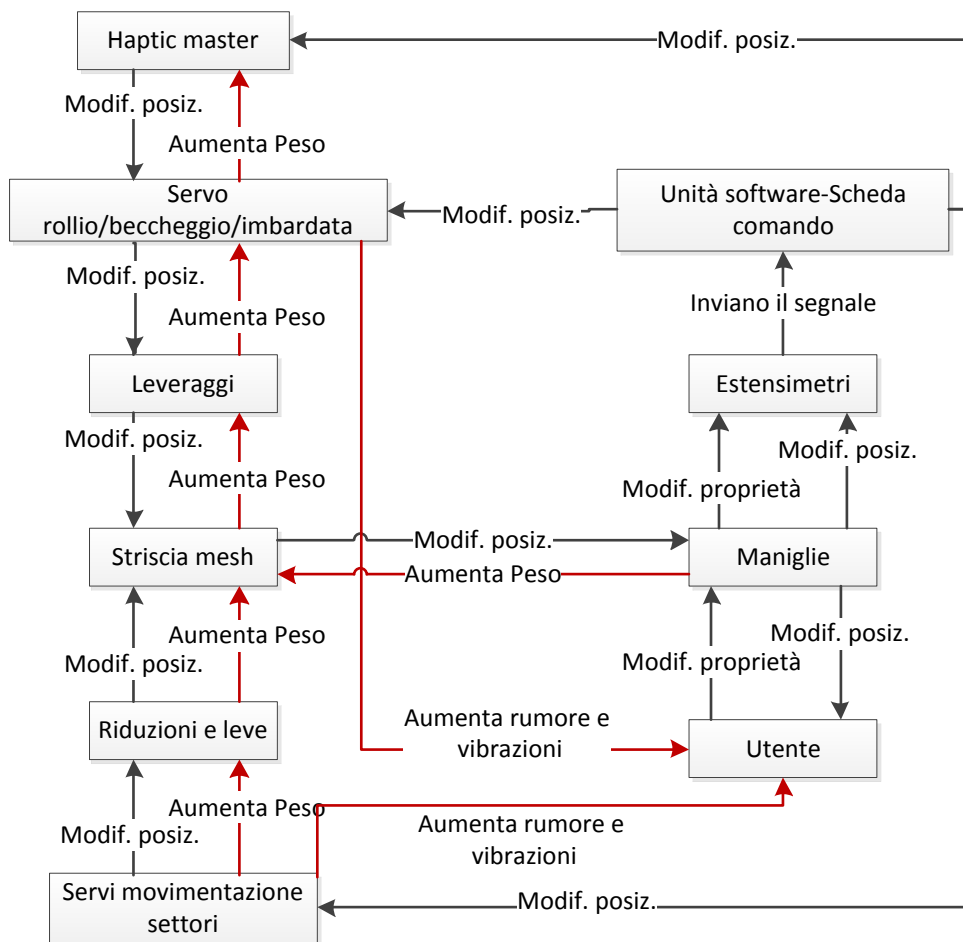


Figura 3.20: Functional model in modalità “Esplorazione”.

**3.2.3.2 Modalità “Tocco”:**

IN: pressione mani sulla striscia.

OUT: restituzione sensazione tattile.

In modalità tocco l'apparecchiatura è ferma nella posizione impostata nella modalità esplorazione, ed è in questa fase che la striscia trasmette l'informazione tattile all'utente, che può sentire la superficie reale in plastica tangente alla superficie virtuale al CAD.

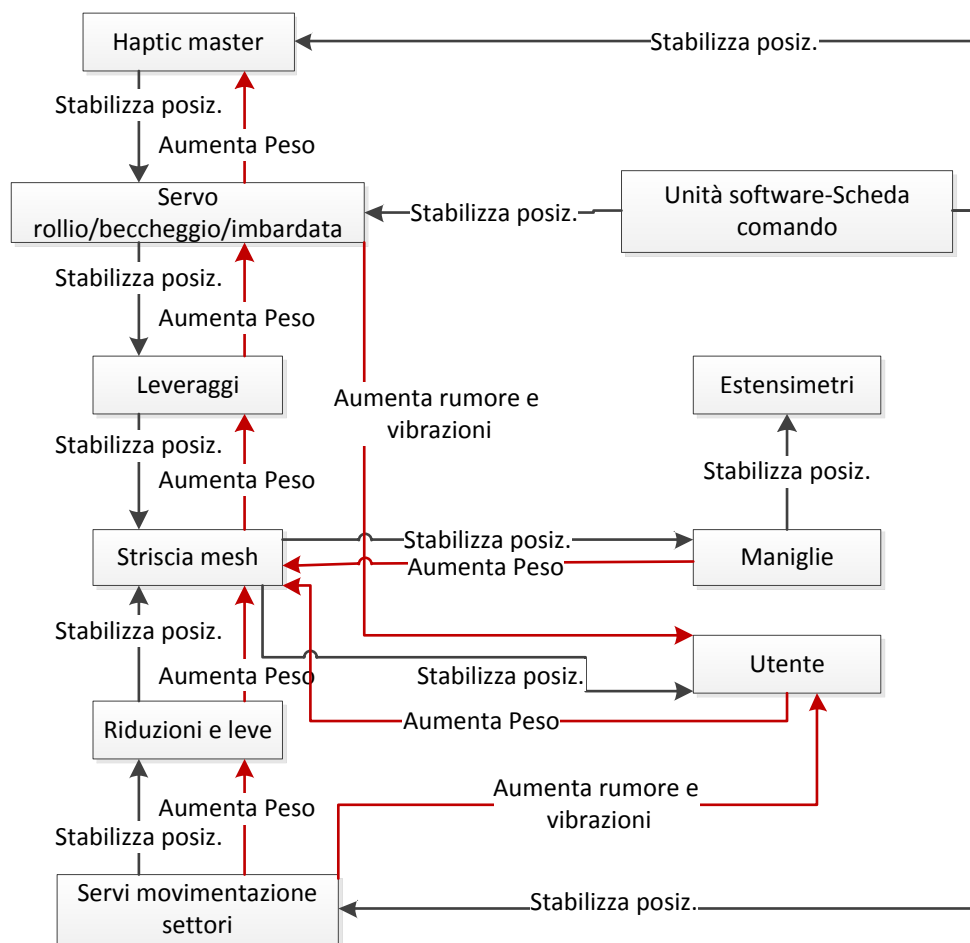


Figura 3.21: Functional model in modalità “Tocco”.

**3.2.3.3 Modalità “Modifica”:**

IN: pressione sulle manopole.

OUT: modifica diretta del disegno CAD e conseguente riadattamento della striscia alla superficie tramite movimento degli attuatori.

In modalità modifica, la mesh è stata posizionata sulla porzione di superficie virtuale che si desidera modificare. Le informazioni inviate dagli estensimetri sulle manopole, vanno a modificare la superficie virtuale al CAD e di conseguenza, vengono inviati all’haptic master e ai servomotori gli input per modificare la mesh fisica coerentemente con la modifica del CAD.

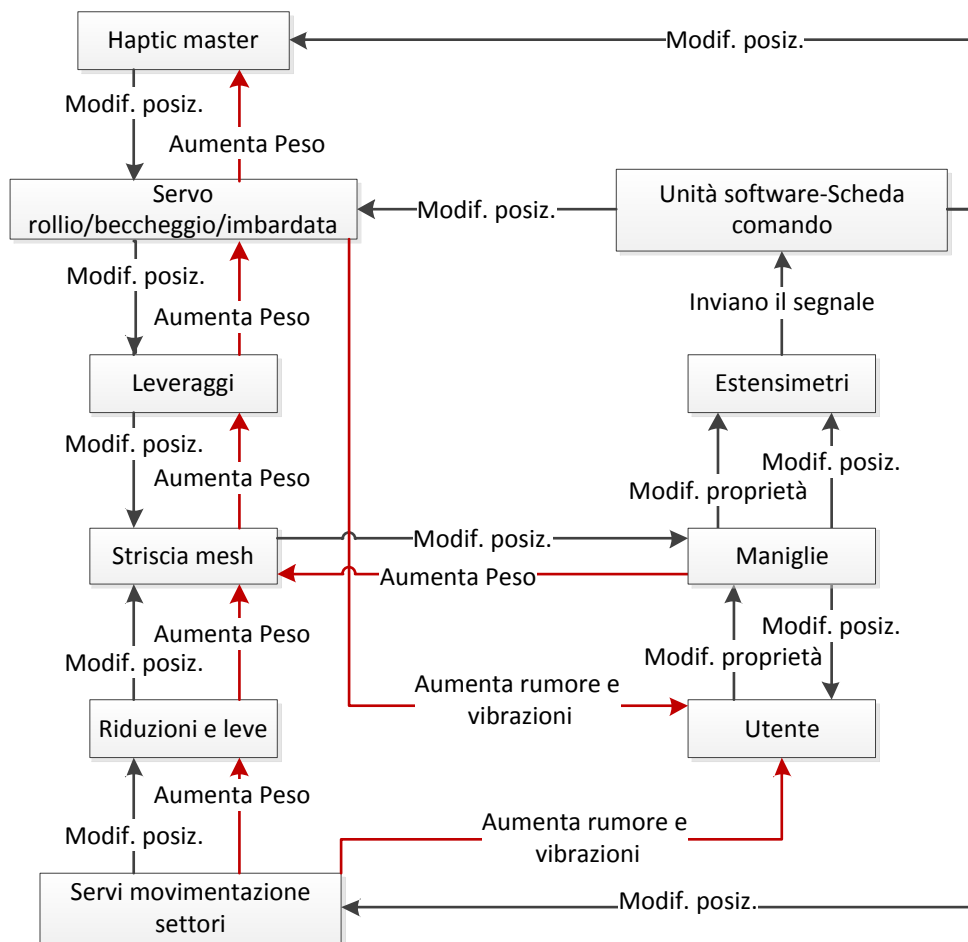


Figura 3.22: Functional model in modalità “Modifica”.

Si osserva che nei tre modelli funzionali i servomotori di movimentazione compiono verso l'utente due funzioni dannose, ovvero aumentano il rumore dell'ambiente circostante, e trasmettono vibrazioni. E' importante distinguere che, mentre il rumore arriva direttamente all'orecchio dell'utente, le vibrazioni sono trasmesse dai motori alla struttura del sistema, che a sua volta arriva all'utente. Dunque la funzione dannosa relativa all'aumento delle vibrazioni in realtà interessa tutte le componenti del sistema.

### 3.2.3.4 Functional model della coppia di settori

Dopo aver rappresentato gli schemi funzionali dell'intero sistema, ci si concentra sulla coppia di settori servo attuati e si riproduce lo schema funzionale per questo sottosistema, in modo da focalizzare meglio l'area di interesse su cui si concentra lo studio.

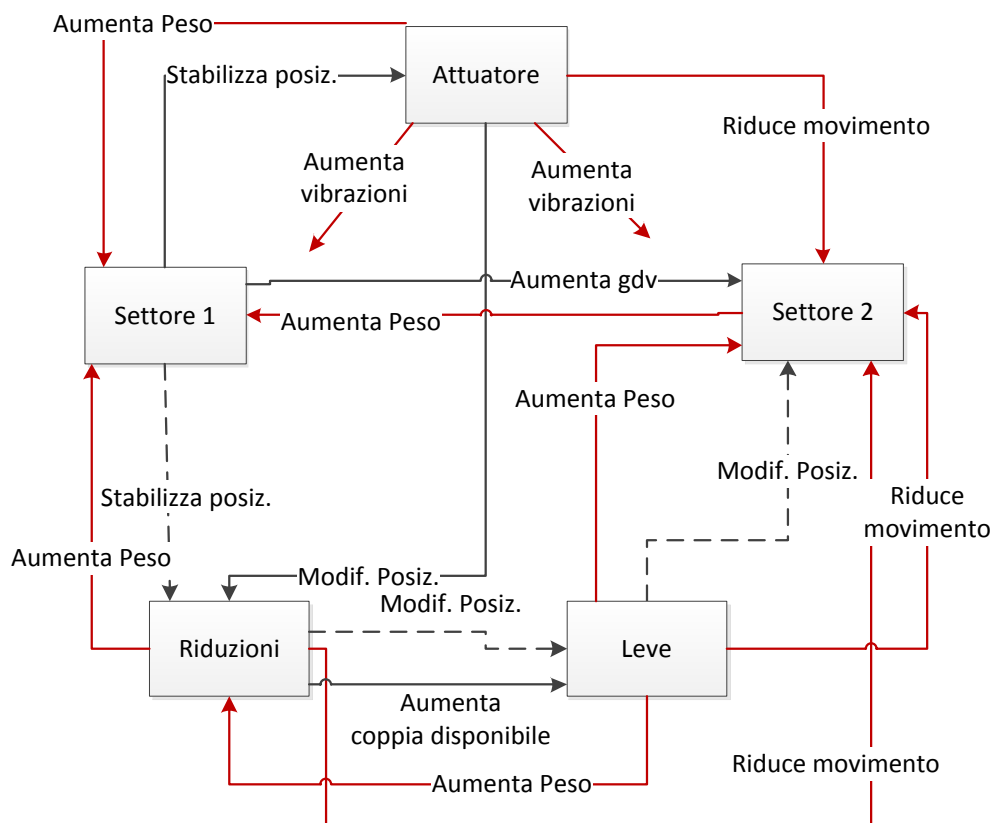


Figura 3.23: Functional model della coppia di settori servo attuati.

Nel modello funzionale precedente, le varie parti descritte in dettaglio sono:

- Settore 1:* si intende il triangolo che supporta l'azionamento, quindi incluso l'apparato rigido, ad esso solidale che supporta motore, ingranaggi e vite senza fine.
- Attuatore:* si intende il solo elemento motore elettrico.
- Riduzioni:* si intendono i due ingranaggi, di cui il primo solidale al motore elettrico e il secondo solidale alla vite senza fine, la vite senza fine e il manicotto che scorre su di essa.
- Leve:* si intende l'elemento che connette il manicotto che scorre sulla vite senza fine al settore 2 ovvero i due braccetti che costituiscono la biella del sistema.
- Settore 2:* si intende il triangolo attuato, inclusa la manovella ad esso solidale.

Il settore 1 Aumenta i gradi di vincolo del settore 2, difatti quest'ultimo è ad esso incernierato ed è permessa quindi solo la rotazione. L'azione dannosa «Riduce movimento» è da interpretare come ingombro degli elementi mentre le azioni non sufficienti sono dovute ai giochi presenti intrinseci agli elementi trasmissioni e leve.

La funzione dannosa relativa all'aumento delle vibrazioni non è connessa agli elementi, perché sostanzialmente come avveniva nei modelli funzionali precedenti, riguarda direttamente o indirettamente tutti gli elementi, per questo la si rappresenta sotto forma di frecce che non puntano un particolare elemento, ma tutti i componenti in generale.

### **3.2.3.5 Osservazioni**

Dai modelli funzionali ancora una volta si legge che la criticità maggiore del sistema è dovuto al numero di parti costituenti la catena cinematica che permette la movimentazione. Inoltre si è ottenuta una importante informazione per quanto riguarda i servomotori, che sono fonti di rumore e vibrazioni, particolarmente fastidiose per l'utilizzatore, nonché dannose a livello dell'usura delle parti del sistema.



### 3.2.4 System operator

Il system operator è uno schema molto utile che consente di inquadrare il sistema oggetto di studio rispetto diversi livelli temporali, tre tipicamente come in questo caso ( passato, presente e futuro) e su diversi livelli di dettaglio a partire dall'ambiente esterno al sistema (il super system) fino ad arrivare al livello minimo di scomposizione del sistema desiderato. Una volta ottenuto questo schema è più semplice scegliere l'area di dettaglio operativa [5] [6] [7].

	PAST	PRESENT	FUTURE
SUPER SYSTEM	Utente Ambiente esterno	Utente Ambiente esterno Struttura sostegno attrezzatura visione Attrezzatura visione(camere)	
SYSTEM	Prototipo fisico	Haptic master Unità pc (software gestione) Servi rollo beccheggio imbardata Cinematismi collegamento striscia-servi <u>Satin striscia interattiva</u>	?
SUB SYSTEM I	Creta Materiali plastici modellabili Legno ... Utensili?	<p>Striscia plastica Alimentazione Maniglie comando Estensimetri Cavi segnale Cavi potenza <u>Striscia meches attuata</u></p>	
SUB SYSTEM II		<p>Coppia triangoli Micro servio elettrico Ingranaggi prima riduzione Vite senza fine Manicotto vite Leva</p>	

Figura 3.24: System operator relativo al Satin.

La scelta dell'analisi verte su un sottosistema di secondo livello, evidenziato in giallo in figura, comprensivo di tutte quelle parti che riguardano direttamente la movimentazione tramite servomotori.

### 3.2.5 Problem flow network

Al termine della raccolta di tutte le informazioni necessarie, si può procedere con l'ultimo schema dell'analisi, ovvero con uno schema ad albero che raccolga tutte le problematiche relative alla soluzione implementata, nonché le proposte di soluzione a tali problematiche e i conseguenti problemi che tale soluzione comporta [5] [6] [10].

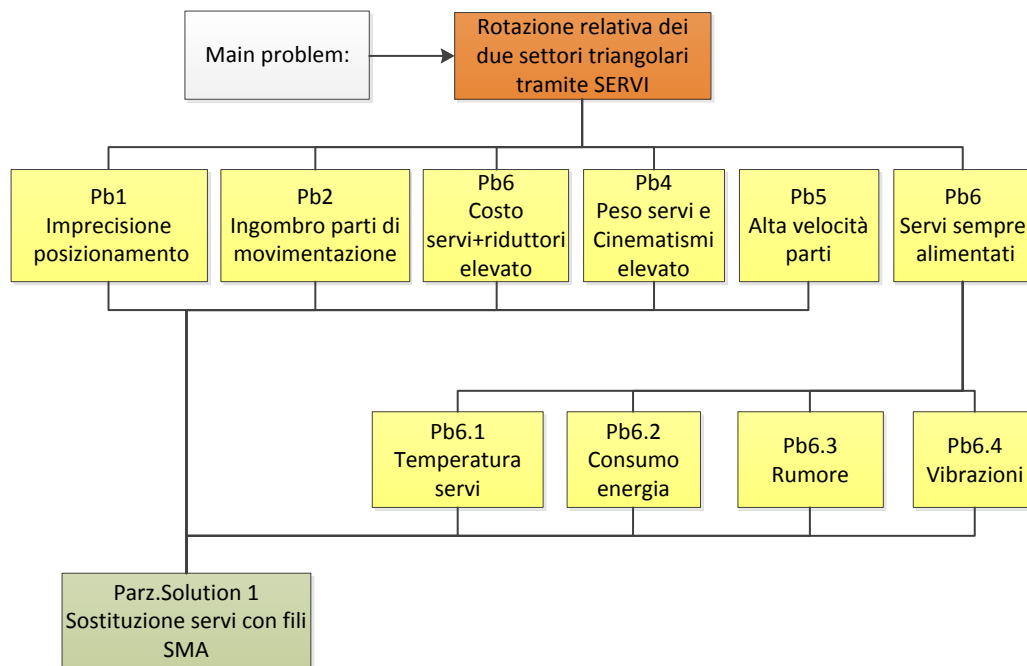


Figura 3.25: Problem flow network con Soluzione parziale SMA.

Il questa prima parte del problem flow network sono riassunti dunque tutti i limiti del sistema esistente, dovuti come è evidente alla tipologia di attuazione. Si descrivono ora nel dettaglio le problematiche elencate nello schema:

*Pb.1)* L'imprecisione di posizionamento è effetto della distanza a livello di catena cinematica tra: effettiva misura della posizione ( svolta dall'encoder interno al servo) e oggetto del posizionamento ( il settore a valle della catena cinematica),difatti i giochi tra i cinematismi sono consistenti, con conseguente perdita di precisione di posizionamento, effetto amplificato all'allontanarsi dal triangolo centrale solidale all'haptic master.

*Pb.2)* Il sistema di attuazione è ad ingombro elevato, dovuto sostanzialmente alle dimensioni di motori e cinematismi, è questo il limite che determina la dimensione del settore triangolare con lato di 50 [mm].

*Pb.3)* Alto costo dei componenti presenti: servomotori centrali 80€ cadauno, mini servomotori sui settori 70€ cadauno, riduttori 110€ cadauno, micro cuscinetti autolubrificanti ecc..

*Pb.4)* Peso proprio elevato della struttura, dovuto alla presenza dei cinematismi e motori, questo implica un ulteriore limite, ovvero al differenziazione in due sistemi di riferimento per i settori triangolari in relativo e assoluto, poiché i micro servomotori non sono in grado di sostenere l'intera striscia a sbalzo. Dunque la striscia non è costituita dallo stesso modulo per tutta la lunghezza con conseguente minore armonizzazione delle parti.

*Pb.5)* I motori ruotano ad alta velocità e bassa coppia, con conseguente rischio per quanto riguarda l'usura, la serie di riduzioni consente di aumentare la coppia erogata aumentando giochi e vibrazioni.

*Pb.6)* Il sistema è alimentato in continuo in tutte le modalità.

*Pb.6.1)* I servomotori si surriscaldano con conseguente peggioramento delle prestazioni.

*Pb.6.2)* Il sistema consuma corrente continuamente.

*Pb.6.3)* I motori elettrici sono rumorosi e il rumore aumenta notevolmente quando sono posti sotto sforzo.

*Pb.6.4)* Vibrazioni trasmesse alla mano, soprattutto se i motori sono posti sotto sforzo.

Alla serie di problematiche emerse dallo studio, si propone come soluzione l'utilizzo delle *SMA (Shape Memory Alloy*, di cui si parlerà nel capitolo 4) come elemento che eroghi la forza motrice per la movimentazione dei settori al posto dei servomotori.

Una ulteriore osservazione non direttamente emersa dall'analisi tramite modelli riguarda la *posizione dei pin*, ovvero quegli elementi di collegamento tra elemento triangolare metallico costituente la mesh e striscia tattile in plastica. Nella versione attuale di *Satin* i pin non sono posti esattamente all'incrocio degli assi delle cerniere, corrispondenti ai reali vertici della mesh, ma più all'interno, sui vertici dei triangoli. E' introdotta dunque un'ulteriore approssimazione, anche se minimale, nel posizionamento dei punti di contatto con la striscia.



## **Capitolo 4**

### **Sviluppo del concept SMA attuato**

Nella prima parte del capitolo si propone una panoramica sulle leghe a memoria di forma. Sarà fornita una descrizione sintetica ma esauriente, focalizzando l'attenzione sulle proprietà utili per l'applicazione, e dunque senza entrare nel particolare per quanto riguarda le caratteristiche metallurgiche.

Al termine di questa parte descrittiva si procede con il completamento dello schema TRIZ Problem flow network, ove sono indicate e descritte le problematiche insorte a causa dell'applicazione delle SMA come attuatori e le relative soluzioni parziali, che guideranno lo sviluppo concettuale del nuovo concept.

Successivamente si illustreranno tutte le soluzioni concettuali alle necessità sorte durante il processo di crescita del concept, strutturando la descrizione in base alle diverse aree funzionali necessarie.

In ultimo si descrivono le scelte progettuali che hanno portato allo sviluppo del sistema Satin SMA attuato, e dunque il dimensionamento e la scelta di tutte le componenti che lavorando sinergicamente consentono il corretto funzionamento dell'intero sistema. Dunque in questa parte ci si occupa sia del dimensionamento del sistema di attuazione, sia della verifica che questo sia effettivamente efficace. Al termine si introduce una sintesi dello studio agli elementi finiti svolto per validare numericamente la resistenza meccanica e il rispetto delle inflessioni massime che hanno portato al dimensionamento in fase di progettazione delle parti più critiche.

## 4.1 Shape Memory Alloys

Con il nome di SMA, Shape Memory Alloys, si classifica un particolare gruppo di leghe metalliche cui può essere assegnata, o memorizzata, una forma definita. Tale forma iniziale può essere ripristinata in seguito a una deformazione imposta, semplicemente fornendo teoricamente lo stesso quantitativo di energia meccanica impiegata nella deformazione, sotto forma di energia termica. In altre parole, un oggetto costituito da questa lega, se deformato meccanicamente, è in grado di riassumere la forma memorizzata inizialmente se riscaldato oltre una determinata temperatura. Oltre alla caratteristica di reversibilità della deformazione, le SMA presentano anche altre caratteristiche: il comportamento superelastico, ovvero deformazione in campo elastico fino all'8%, e la capacità di generare elevate forze in fase di recupero della forma, aspetto di notevole interesse per numerose applicazioni industriali [11].

A questa classe di materiali appartengono diverse leghe metalliche, di cui le più note che hanno avuto un più rilevante sviluppo commerciale sono quelle a base di rame (Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-al-Ni) e quelle a base di Nichel-Titanio (Ni-Ti).

Le leghe a base di Ni-Ti sono utilizzate attualmente per la maggioranza delle applicazioni (circa 90%) nonostante risultino più costose e di più difficile lavorazione; questo è dovuto principalmente ai seguenti fattori [12] [13] :

- maggiore resistenza meccanica;
- migliore stabilità nella trasformazione;
- migliore resistenza all'aggressione da parte dell'ambiente esterno;
- disponibilità in fili e lamine sottili;
- biocompatibilità.

In particolare l'ultima caratteristica ha avuto un ruolo fondamentale nel rendere possibili una ampia gamma di applicazioni biomedicali [13].

Gli studi sulle leghe Ni-Ti, furono compiuti sistematicamente da William Beuhler negli anni 50 del secolo scorso, nei laboratori di artiglieria navale degli Stati Uniti (Naval Ordnance Laboratories, NOL). In particolare Beuhler, durante i suoi studi per applicazioni militari, si concentrò sul comportamento della lega Nichel-Titanio, e dunque da qui il nome della lega NiTiNOL [11].

In questa tesi è appunto il NiTiNOL la SMA che sarà impiegata per sostituire l'attuazione elettromeccanica, e se ne descrivono dunque le principali caratteristiche, concentrandosi sull'applicazione e meno sull'aspetto metallurgico riassumendo e integrando le informazioni raccolte dai documenti [11] [13] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24].

#### 4.1.1 La lega NiTi

Si ritiene importante porre enfasi sulla composizione della lega NiTiNOL, pari al 50% di nichel, difatti la percentuale dei componenti della lega esattamente in pari quantità risulta particolarmente critica in quanto un eccesso di Nichel comporta la formazione di precipitati  $Ti_2Ni_3$  e viceversa un eccesso di titanio comporta precipitati  $Ti_2Ni$ , che vanno ad influire in modo rilevante sulle proprietà della lega. Si riporta il diagramma di stato ove è evidenziata la fase austenitica.

E' importante notare che un aumento dell'ordine dell'1% di Ni consente di abbassare la temperatura di austenitizzazione.

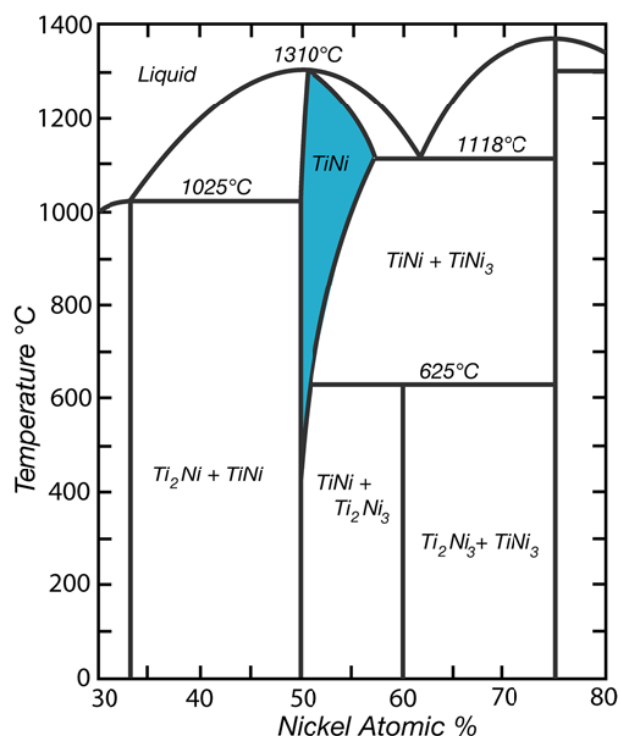


Figura 4.1: Diagramma di fase lega Ni-Ti, è evidenziata la fase austenitica.

### 4.1.2 Transizione di fase

Le proprietà di memoria caratteristiche della lega sono dovute al cambio di fase che attraversa a partire dalla solidificazione e con il successivo raffreddamento. Difatti Il NiTi ha sostanzialmente due configurazione di fase a seconda della configurazione atomica assunta dalla cella metallografica: austenite ad alta temperatura e martensite a bassa temperatura.

Durante il raffreddamento, quando la lega NiTi è completamente solidificata e si trova ancora ad alta temperatura tra gli 800° e i 500°, si trova in fase austenitica. E' in questo momento che la struttura metallografica del campione "memorizza" la forma imposta. Si osserva che Il campione, per tutto il corso del trattamento, deve essere costretto a mantenere la forma che si desidera memorizzare.

Proseguendo con il raffreddamento l'austenite si trasforma gradualmente in martensite, configurazione che può essere deformata facilmente per allineamento delle celle cristallografiche. Questo perché nel passaggio di fase da austenite a martensite, non avvengono scorrimenti tra i piani cristallografici, ma si creano tensioni interne che mantengono le celle martensitiche disallineate. Questo fenomeno noto con il nome di *twinning* spiega dunque la duttilità della fase martensitica, infatti deformando meccanicamente il campione non avviene uno scorrimento dei piani cristallografici in conseguenza del movimento delle dislocazioni come avviene in una deformazione plastica irreversibile. Quello che si verifica dunque in conseguenza dell'applicazione di una forza esterna è un vero e proprio riallineamento delle celle martensitiche.

Il processo è dunque reversibile ricostituendo la fase austenitica, infatti apportando energia termica al campione deformato, accade che la martensite si ritrasforma in austenite, e le celle si riallineano secondo la configurazione memorizzata nella fase austenitica più ad alta temperatura. E' importante sottolineare che esiste una temperatura limite, al superamento della quale il campione si smemorizza ed assumerà la nuova forma che gli viene imposta.

In ultimo si riporta che esiste la possibilità di memorizzare una forma anche nella fase di martensite, questa applicazione è nota come "two ways memory" ma non è una applicazione rilevante in quanto è un effetto che si deteriora con il ripetersi dei cicli e funziona solo in assenza di carichi applicati poiché non è in grado di fornire forze di entità utilizzabili.



Riassumendo dunque il concetto, il campione durante il raffreddamento vede una transizione di fase da austenite a martensite, divenendo facilmente deformabile poiché è facilitato il riallineamento delle celle martensitiche dalle tensioni interne dovute al twinning. Con un successivo apporto di calore si ritorna alla fase austenitica con il recupero della forma memorizzata.

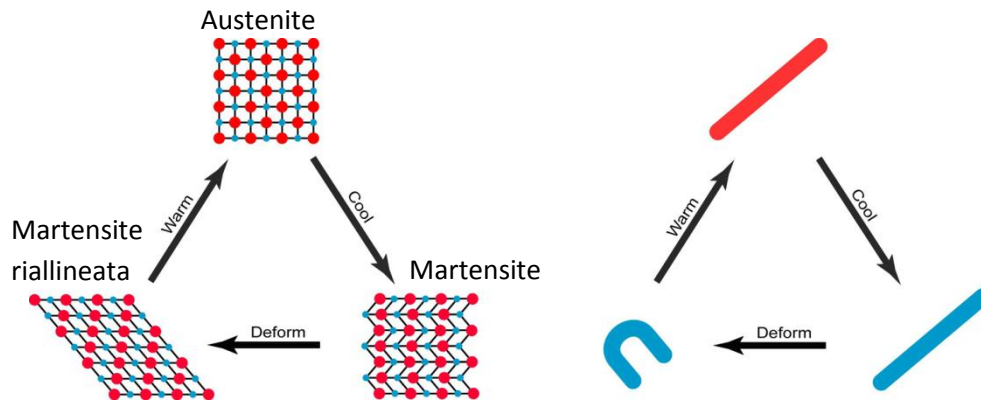


Figura 4.2: cambio di fase, A sinistra a livello microscopico, a destra a livello macroscopico cosa accade al campione.

#### 4.1.3 morfologia applicazioni

Le SMA sono prodotte in una moltitudine di forme diverse, come fili, piastre o ancora oggetti tridimensionali come ad esempio montature di occhiali. L'efficienza energetica delle SMA risulta fortemente dipendente dalla configurazione adottata e dal tipo di deformazione richiesta.

Il caso più favorevole si ottiene con elementi filiformi caricati a tensione, in quanto questa configurazione consente un ottimale utilizzo del materiale che opera in condizioni di sollecitazione uniforme. Configurazioni che generano una distribuzione dello stress non uniforme, realizzano un peggiore utilizzo del materiale e quindi risultano meno efficienti.

Nel nostro caso dunque si studierà l'applicazione di elementi con tale configurazione, ovvero fili di diverse sezioni a seconda del grado di forza richiesto nello specifico. Questo tipo di elemento può essere sfruttato monodimensionalmente, ovvero se riscaldato ridurrà la propria lunghezza di una quantità  $\Delta l$  generando se vincolato o sottoposto a sforzo di trazione, una forza funzione del calore fornito.

Si ricorre ad un esempio pratico per meglio comprendere cosa accade macroscopicamente.

Si consideri dunque un filo in NiTi sottoposto a sforzo di trazione costante. Inizialmente il filo si trova a temperatura ambiente, e tutta la struttura cristallina risulta dunque martensitica allineata dallo sforzo di trazione. Fornendo calore al filo si raggiungerà una temperatura in cui parte della martensite inizierà a trasformarsi in austenite ed il filo inizierà ad accorciarsi proporzionalmente alla percentuale di austenite formata. Questa temperatura è definita  $A_s$  ovvero *austenite start*. Aumentando gradualmente la temperatura si raggiungerà una configurazione in cui tutta la martensite si è trasformata in austenite, temperatura  $A_f$ , ovvero *austenite finish* e in questa configurazione è raggiunto il massimo accorciamento  $\Delta l$  ottenibile. Allo stesso modo con il successivo raffreddamento si raggiungerà una temperatura  $M_s$  (martensite start) in cui parte dell'austenite si trasforma in martensite, fino ad arrivare alla temperatura  $M_f$  (martensite finish) in cui tutta l'austenite è tornata martensite e il filo ha recuperato il  $\Delta l$  riallungandosi della medesima quantità.

Il processo è rappresentato con chiarezza in figura 3.3 Dove è evidenziata l'isteresi di transizione di fase e dunque l'accorciamento  $\Delta l$  in funzione della temperatura conseguente alla percentuale di martensite trasformata in austenite (indicato sull'asse destro del grafico).

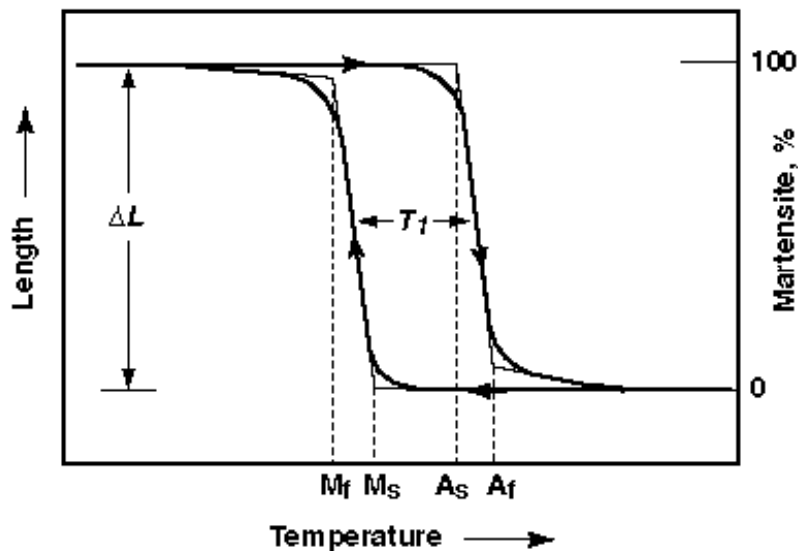


Figura 4.3: Ciclo di transizione di fase a carico imposto costante, al variare della temperatura.

#### **4.1.4 Modalità di apporto energia termica.**

Il riscaldamento dell'elemento può essere realizzato mediante un fluido in temperatura che lambisce l'elemento, mediante irraggiamento da una sorgente termica, o mediante passaggio di energia elettrica.

I primi due casi sono tipici delle applicazioni nelle quali l'attivazione è indotta dal raggiungimento di una determinata temperatura nell'ambiente che circonda l'attuatore come ad esempio termostati o in generale valvole autoregolanti.

Nel terzo caso l'energia può essere applicata o per via induttiva o per via resistiva, mediante circolazione di corrente nell'elemento stesso, il calore deriva dall'energia termica dissipata per effetto joule a causa della resistenza interna al filo.

Per la nostra applicazione useremo il metodo resistivo, collegando il filo in SMA ad un alimentatore tramite fili conduttori. Il metodo resistivo infatti risulta generalmente preferito non solo in conseguenza del fatto che le caratteristiche elettriche di molte leghe a memoria di forma lo rendono di facile implementazione, ma anche perché genera una più uniforme distribuzione della temperatura nel materiale, evitando la generazione di tensioni interne disuniformi. Inoltre semplifica notevolmente la gestione del calore desiderato tramite l'implementazione di un'elettronica dedicata.

#### **4.1.5 Proprietà.**

Si riassumono ora le principali caratteristiche delle leghe a memoria di forma che le hanno rese di grande interesse per lo sviluppo di un sistema di attuazione dedicato.

##### 1) Generazione di forza.

Se si impedisce al materiale di ritornare alla forma ad alta temperatura (austenitica) quando viene portato ad una temperatura superiore a quella di transizione  $A_f$  (nelle leghe NiTi in commercio tipicamente oltre i  $100^\circ$ ), si genera una forza di elevata intensità.

##### 2) Produzione di lavoro.

Se durante il recupero di forma viene applicata una forza esterna con direzione opposta a quella nella quale avviene la deformazione del materiale, un elemento di materiale a memoria di forma è in grado di produrre lavoro meccanico positivo.

3) Elevata resistenza alla trazione.

Il carico di rottura è molto elevato, questo tutela l'integrità dell'elemento nel caso di sovraccarichi accidentali.

4) Effetto superelastico o pseudoelasticità.

Oltre che per effetto termico, la fase martensitica può essere ottenuta ad una temperatura leggermente maggiore di  $A_f$  (e quindi in campo completamente austenitico), mediante applicazione di una azione meccanica che provochi una deformazione del materiale (stress-induced martensite).

Dopo il raggiungimento di un livello di tensione critico, ha inizio la trasformazione in martensite, la deformazione ulteriore fino alla completa trasformazione, avviene ad un livello di tensione circa costante (stress plateau).

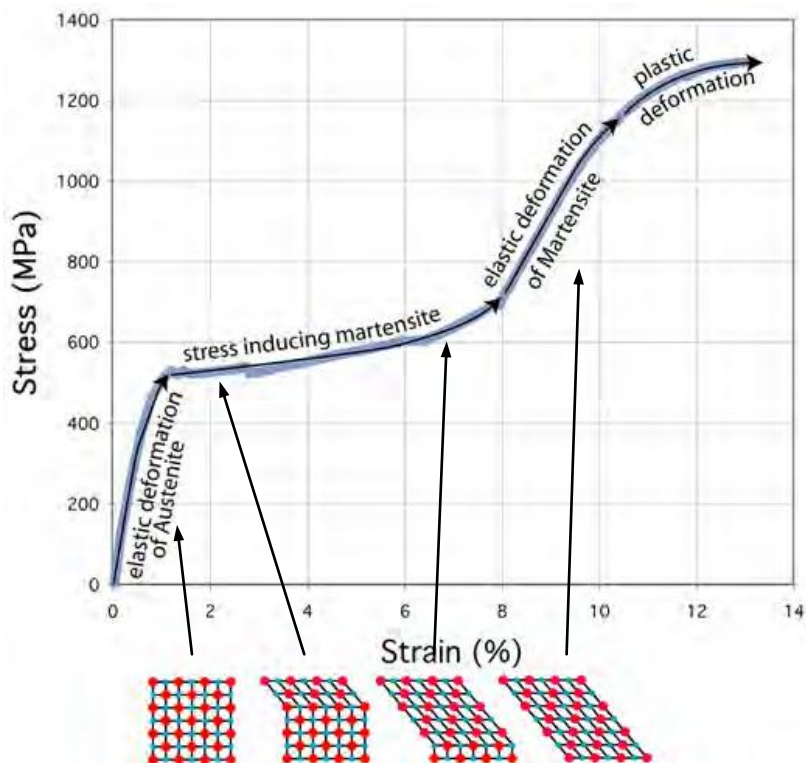


Figura 4.4: Applicazione di un carico ad una SMA in fase austenitica, sotto al grafico si osserva cosa accade al reticolo.

Se la deformazione viene limitata al livello corrispondente all'inizio della deformazione plastica, la trasformazione risulta reversibile e quindi, in corrispondenza di un livello di tensione inferiore a quello che ha indotto la trasformazione in martensite, si ha la trasformazione inversa con ritorno alla situazione iniziale.

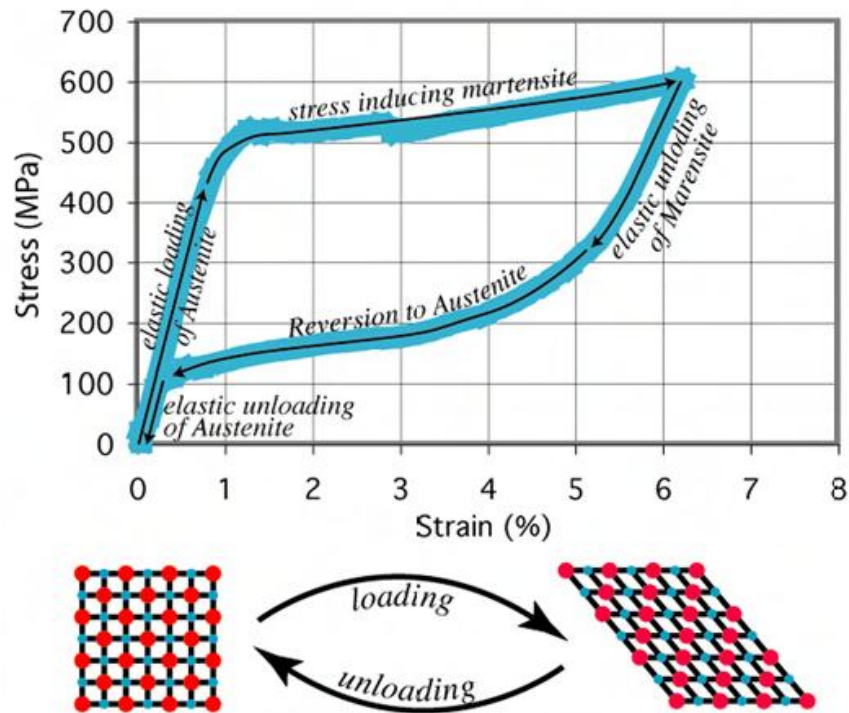


Figura 4.5: Tipico comportamento superelastico del NiTi in fase di applicazione e rimozione di una tensione esterna.

Questo fenomeno, per quanto funzionalmente simile ad un effetto elastico, è in realtà dovuto ad una trasformazione di fase ed è definito con il termine di superelasticità o di pseudoelasticità. Questa caratteristica rende dunque i fili realizzati in questo materiale eccezionalmente elastici, capaci di recuperare al 100% grandi deformazioni con un ritorno a forza costante in corrispondenza dello stress plateau fino al recupero della forma originale.

La deformazione reversibile che può esser prodotta dal fenomeno di superelasticità può raggiungere un'ampiezza pari all' 8% della dimensione iniziale.

### 5) Smorzamento intrinseco.

Le leghe a memoria di forma presentano sia nella fase martensitica che in quella austenitica, elevate capacità di smorzamento. Queste sono dovute a due distinti fenomeni: per la fase martensitica la capacità di smorzamento è dovuta prevalentemente a fenomeni di attrito interno, per la fase ad alta temperatura, dipende prevalentemente da fenomeni di dissipazione nel ciclo di isteresi tra deformazione e recupero superelastico.

### 6) Funzionamento senza attrito, pulito, silenzioso, e senza generazione di scintille.

Gli attuatori a memoria di forma non richiedono l'uso di componenti ausiliari causa di fenomeni di attrito (ad es. ingranaggi), e quindi escludono la generazione di polveri, inoltre permettono un funzionamento senza vibrazioni e silenzioso; l'assenza di generazione di scintille li rende adatti all'impiego in presenza di sostanze infiammabili.

### 7) Semplicità del meccanismo.

Il dispositivo può essere progettato in modo da sviluppare direttamente l'azione richiesta, senza richiedere elementi di trasmissione e collegamento.

### 8) Elevato rapporto potenza/peso.

Questa importante caratteristica è valida soprattutto per attuatori di piccole dimensioni e peso (< 100g), grazie alla loro geometria molto compatta offrono una elevata densità di potenza.

### 9) Fatica e stabilità a lungo termine

Un discorso a parte va fatto per quanto riguarda la fatica e la stabilità a lungo termine, la vita dei componenti e l'effetto memoria sono assumibili come illimitati se sono rispettati i limiti operativi dichiarati da costruttore quali la temperatura massima e la variazione di lunghezza limite dichiarati.

#### 4.1.6 Test sulle SMA

Per verificare le potenzialità teoricamente descritte, e prendere confidenza con il meccanismo SMA si sono svolti dei test sul materiale fornito da SAES Getters [27]. Un filo in SMA è stato montato teso su un dinamometro solidale a una guida in grado di muoversi assialmente, in modo che la forza indicata di trazione fosse nulla. Si osserva che per il montaggio è stato necessario provvedere ad implementare un opportuno sistema di isolamento per impedire che la corrente bypassasse il filo in favore del basamento del dinamometro. Il dinamometro viene dunque bloccato in posizione e di conseguenza al filo è impedita la deformazione assiale, si riporta in figura 4.6 il layout di strumentazioni utilizzato per le prove.

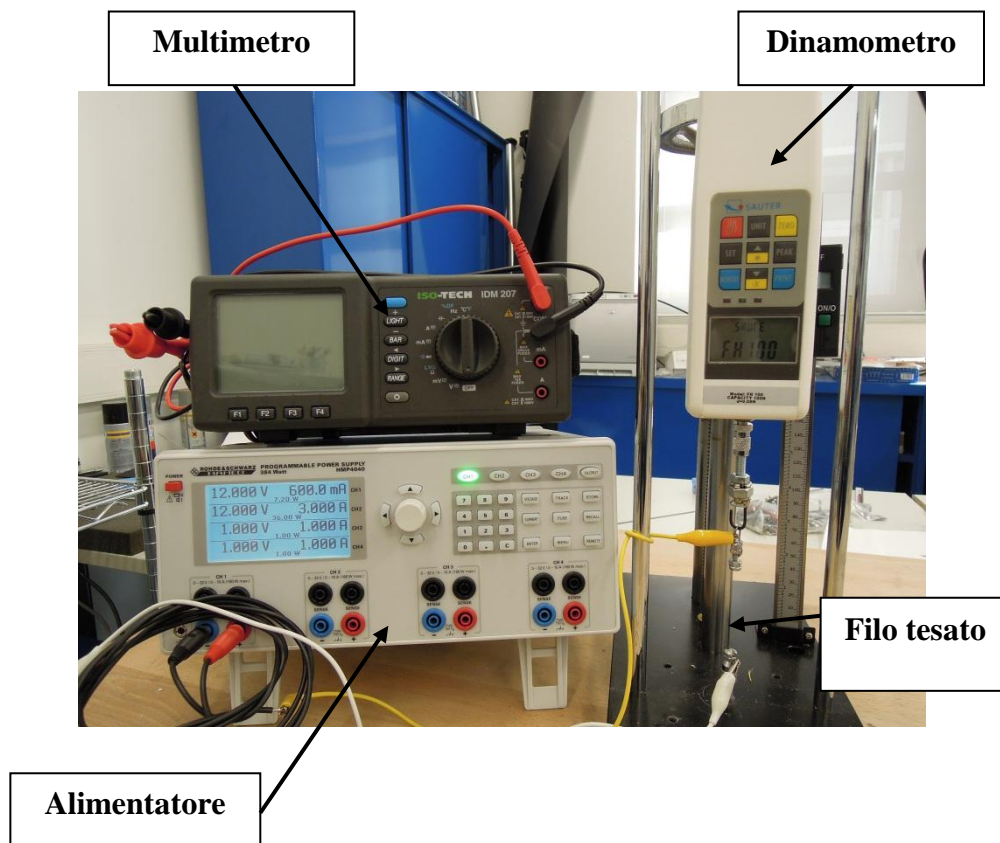


Figura 4.6: Layout strumentazione test filo SMA.

Alimentando il filo la forza di trazione cresce al crescere dell'intensità di corrente che lo attraversa. Tramite campagna sperimentale si è individuata la curva di risposta in forza della SMA ai diversi livelli di alimentazione, riportata in figura 4.7.

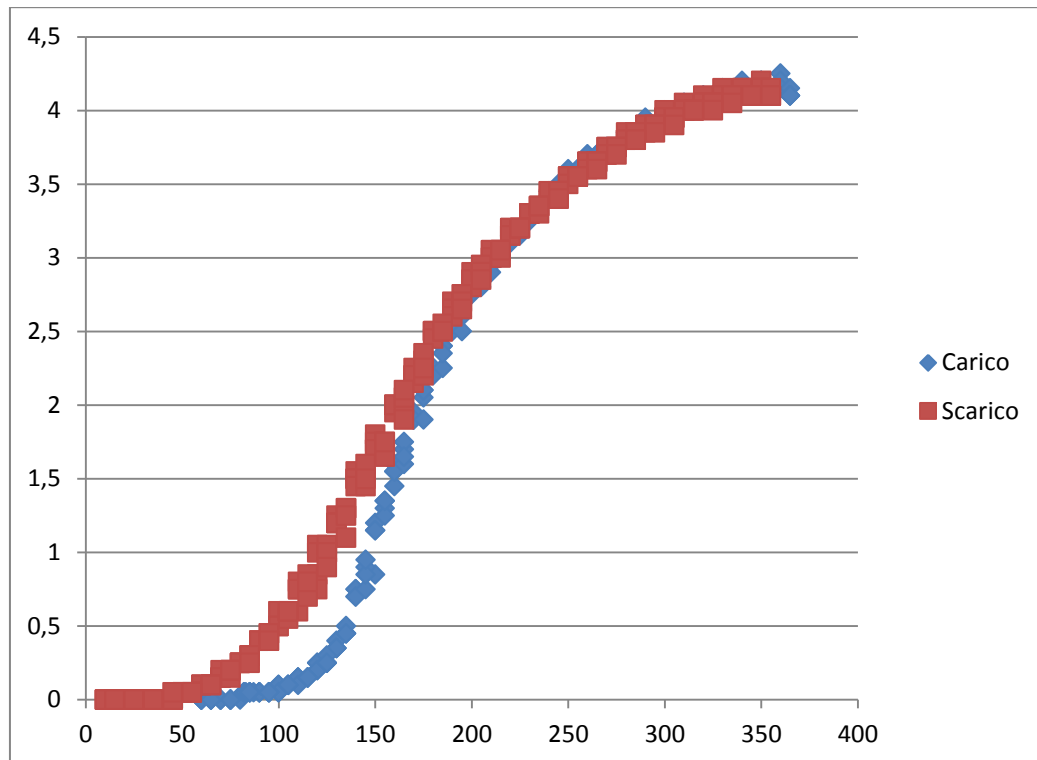


Figura 4.7: Curve al carico e scarico in corrente della SMA.

Dal grafico in figura 4.7 si individuano chiaramente le curve al carico e allo scarico in corrente della SMA che delineano diversi tipi di pendenze. E' chiaramente visibile l'andamento tipico a "S" in cui è identificabile il tratto centrale a crescita lineare. Al ripetere delle prove le curve seguono un transitorio iniziale in cui traslano verso destra a ogni ciclo di attivazione/disattivazione, fino a raggiungere una configurazione di equilibrio e stabilizzarsi definitivamente. Il grafico riportato in figura 4.7 riporta la situazione stabilizzata.

Tutte le caratteristiche note del materiale messo a disposizione da SAES Getters [27] sono riportate sui cataloghi forniti, riportati in appendice [B]. Si osserva che sono stati inseriti solo quei cataloghi relativi al materiale effettivamente usato in questa trattazione, ad esempio difatti non sono presenti i cataloghi per quanto riguarda le molle in SMA.



#### 4.1.7 Conclusioni

Possiamo concludere che fili in SMA possono effettivamente sostituire gli attuatori tradizionali in numerose applicazioni ingegneristiche, comportando notevoli vantaggi in termini di semplificazione dei meccanismi, di riduzione dei costi, delle dimensioni e del peso con conseguente incremento della densità funzionale. Inoltre, la loro implementazione comporta numerosi vantaggi intrinseci, permettendo una movimentazione diretta e smorzata con elevate coppie e forze imponibili, e dunque l'assenza di meccanismi aggiuntivi quali leve o riduzioni. Fondamentale è la compattezza degli elementi SMA (si pensi alle dimensioni di un filo lungo pochi centimetri e di pochi decimi di grammo di peso), e la flessibilità per quanto riguarda la progettazione. Da non dimenticare inoltre il vantaggio per quanto riguarda l'affidabilità e l'elevata efficienza del sistema, in quanto il moto è dovuto alle proprietà fisiche del materiale stesso. E' importante porre attenzione sul fatto che vi sono diversi livelli di integrazione delle SMA in un sistema da attuare. E' possibile partire da una sostituzione facile e veloce "one to one" degli attuatori elettromeccanici senza una riprogettazione dei componenti, ma in questo modo non si sfruttano appieno le potenzialità delle SMA. E' nell'integrazione vera e propria all'interno delle strutture, che si sfruttano appieno tutte le potenzialità offerte, ma questo richiede una revisione dell'approccio di progettazione, tramite analisi funzionale [12].

Infine si sottolinea che l'evoluzione da un sistema servo attuato ad uno SMA attuato rispecchia le leggi Triz sull'evoluzione dei sistemi meccanici, ovvero si verifica il passaggio dal sistema attuato tramite servo elettromeccanico al sistema attuato da energia termica, in cui sono le proprietà metallurgiche della lega stessa a consentire il movimento delle parti.

#### 4.2 Problem flow network attuazione mediante SMA

Tornando al sistema Satin in esame in questa tesi, si punta ad integrare l'attuazione SMA con l'architettura a mesh triangolare. Occorre puntualizzare che tutti i settori devono essere mossi da SMA, non solo quindi si richiede una sostituzione a livello dei micro servomotori, sui settori più esterni, ma anche i settori centrali devono comprendere tale tipologia di movimentazione. Le SMA inoltre devono provvedere al compimento di tutte le funzioni previste. Per concludere non deve essere dunque presente nessun tipo di azionamento diverso dalle SMA all'interno del Satin, escludendo dunque la possibilità di implementare un sistema ibrido servo-SMA attuato.

Si riporta ora lo sviluppo del problem flow network descritto nel capitolo 3, in cui si proponeva l'applicazione al sistema Satin delle SMA come elementi di attuazione per risolvere le problematiche dovute alla movimentazione mediante servomotori. Si descrivono dunque le problematiche insorte dovute all'uso delle SMA con le relative soluzioni parziali, suddividendo l'analisi in due parti: la prima più inerente al controllo, la seconda più inerente alle proprietà delle SMA:

#### 4.2.1 Problem flow network controllo

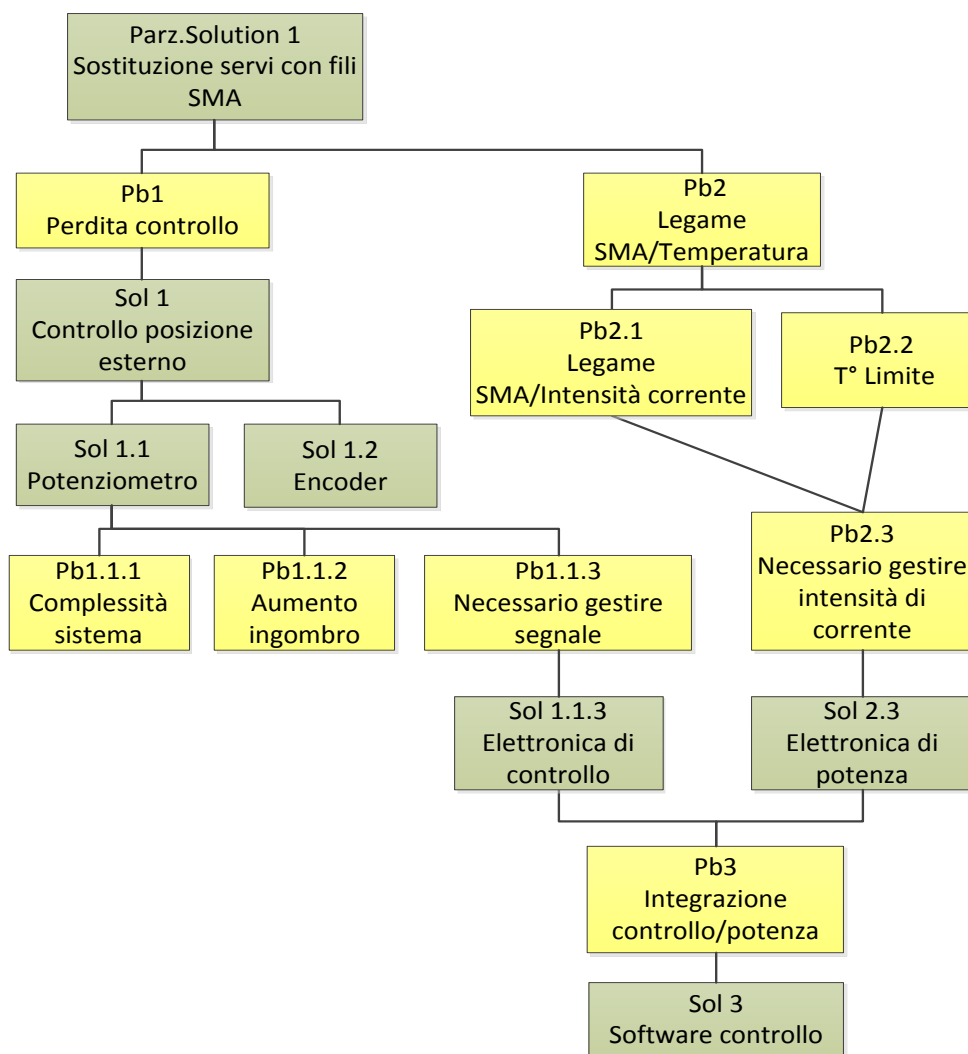


Figura 4.8: Problem flow network controllo attuazione SMA.

Si analizzano separatamente i due rami Pb1) e Pb2) :

**Pb1)** I servomotori hanno un encoder interno, dunque inviano informazioni posizionali, mentre per quanto riguarda la SMA è implementato un sistema di lettura dell'allungamento in funzione della resistenza letta, ma è protetto da brevetto e non disponibile. Dunque nel passaggio di attuazione si perde il controllo posizionale interno.

*Sol 1)* Occorre aggiungere una lettura posizionale tramite elemento esterno, si sono studiate diverse tipologie di misurazioni tra cui si riportano le più adatte allo scopo.

*Sol 1.2)* Encoder, soluzione che si è scartata a causa di numerosi problemi non riportati per semplicità nell'albero, quali costo molto elevato, dimensioni, peso, complessità di gestione del segnale e difficoltà di fissaggio.

*Sol 1.1)* Potenzenziometro, il potenziometro è l'elemento che meglio si presta all'utilizzo, poco ingombrante, leggero e economico ( ordine di pochi euro per i più performanti).

*Pb1.1.1)* Si è introdotto un nuovo elemento, con conseguente necessità di fissaggio e connessioni per l'elettronica, dunque il sistema cresce in complessità.

*Pb1.1.2)* L'elemento per quanto piccolo costituisce un ulteriore ingombro nel sistema considerando anche gli apparati che saranno necessari per il fissaggio e le connessioni all'unità di lettura.

*Pb1.1.3)* Sarà necessario gestire ed elaborare il segnale in uscita.

*Sol 1.1.3)* Si prevedere lo sviluppo di una elettronica di controllo sia hardware che software che legga il segnale in uscita dal potenziometro.

**Pb2)** Le SMA lavorano in funzione della temperatura che raggiungono, difatti l'accorciamento e la forza di trazione imposta è funzione della temperatura.

$$\Delta l = f(\text{Temperatura [deg]})$$

*Pb2.1)* La temperatura è stabilita dall'effetto joule, dunque a seconda della potenza dissipata dal filo e quindi è funzione dell'intensità di corrente elettrica che attraversa il filo, mentre la differenza di potenziale è conseguenza della lunghezza del filo e della potenza dissipata.

$$\text{Temperatura} = f(\text{Intensità corrente [mA]})$$

*Pb2.2)* E' presente una Temperatura limite oltre la quale le SMA perdono la memoria di forma e divengono inutilizzabili, questa Temperatura non va mai superata.

*Pb2.3)* Sarà necessario gestire l'intensità di corrente in ingresso.

*Sol 2.3)* Si prevedere lo sviluppo di una elettronica di potenza sia hardware che software che invii il corretto quantitativo di intensità di corrente al filo.

**Pb3)** E' necessario integrare le due parti di elettronica di controllo e potenza.

*Sol 3)* Sarà necessario sviluppare un software che leghi l'elettronica di controllo all'elettronica di potenza in modo da poter ottenere il legame tra angolo relativo e amperaggio necessario.

$$\text{Angolo relativo [deg]} = f(\text{Intensità corrente [mA]})$$

#### 4.2.2 Problem flow network proprietà

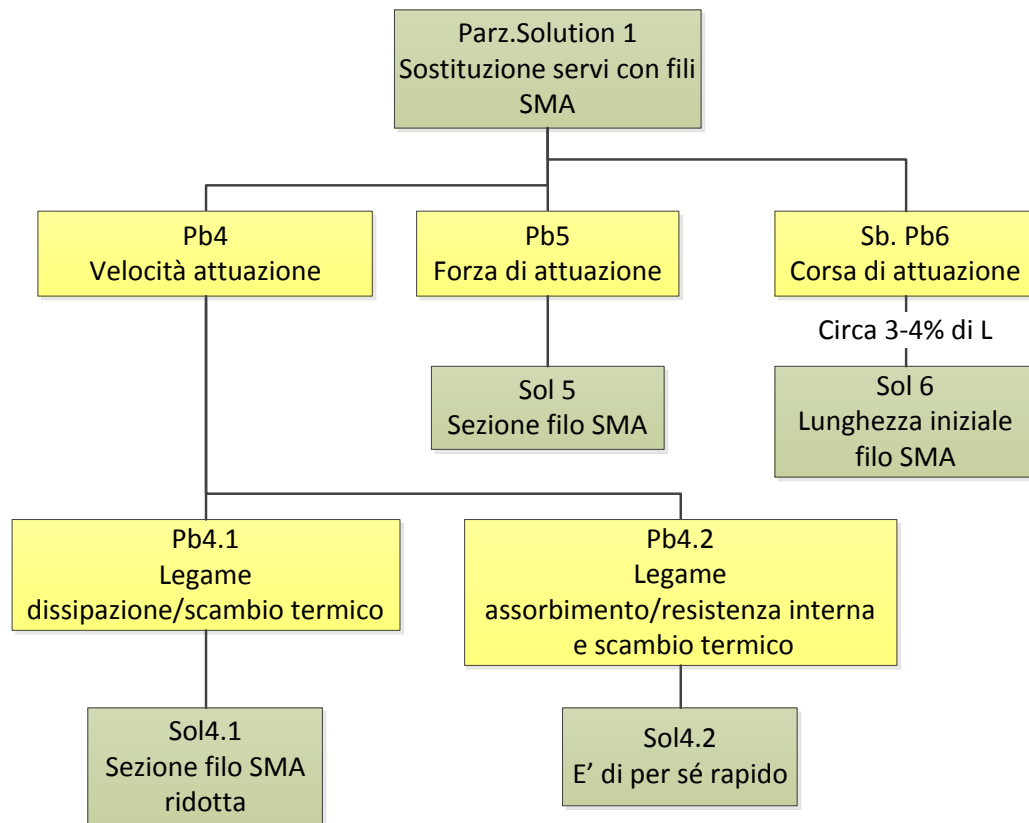


Figura 4.9: Problem flow network proprietà attuazione SMA.

**Pb4)** La velocità di attuazione del filo in SMA, è funzione della velocità dello scambio termico, ovvero della velocità con cui è in grado di assorbire calore per effetto joule dalla corrente, e dissipare calore con l'ambiente circostante.

**Pb4.1)** La velocità di dissipazione dipende dallo scambio termico con l'ambiente circostante il filo in SMA, questi è una funzione della superficie di scambio e dal coefficiente di scambio termico. Minore è la superficie di scambio, maggiore sarà dunque l'inerzia termica del filo e di conseguenza aumenterà il tempo.

*Sol 4.1)* E' preferibile che la sezione del filo SMA sia il più ridotta possibile, difatti il processo dissipativo non è particolarmente lento, ma è comunque meglio non eccedere con le sezioni per evitare di rallentare troppo la movimentazione.

*Pb4.2)* La velocità di assorbimento dipende dalla resistenza interna che permette l'accumulo di potenza termica, e dallo scambio termico con l'ambiente circostante che invece va a ridurre la potenza termica assorbita.

*Sol 4.2)* Si osserva che l'assorbimento è piuttosto rapido e non comporta particolari problematiche.

***Pb5)*** La forza di trazione che il filo SMA esercita se alimentato è funzione della sezione del filo.

*Sol 5)* Sarà necessario dimensionare opportunamente la sezione in base alle richieste del sistema.

***Pb 6)*** La corsa ovvero l'accorciamento che si ottiene con il filo SMA quando alimentato, è funzione della lunghezza iniziale del filo stesso, ed è circa pari al 4% di tale lunghezza.

*Sol 6)* Sarà necessario dimensionare opportunamente la lunghezza iniziale del filo SMA in base alle richieste del sistema.

Si osserva che a seconda delle richieste del sistema, la “*Sol 5*” può andare in contrasto con la “*Sol 4*”, ovvero se la forza richiesta fosse elevata, è necessario valutare se la sezione richiesta non sia in contrasto con la velocità di attuazione richiesta. Questa contraddizione è da valutare caso per caso.

## 4.3 Sviluppo concept

Si analizza il percorso di evoluzione delle parti del sistema, sviluppate in risposta alle richieste funzionali emerse nell'analisi *problem flow network*.

Per descrivere il sistema si è scelto di definire dapprima le caratteristiche basilari che dovranno necessariamente caratterizzarlo, a prescindere dalle dimensioni o dalla configurazione finale che assumerà. Man mano emergeranno dunque le indicazioni sullo sviluppo delle diverse parti che compongono il concept, che saranno indicate volta per volta su immagini relative al risultato finale ottenuto.

La caratteristica fondamentale su cui appoggiare l'intera progettazione è l'indipendenza dei diversi settori, ogni settore deve essere un elemento completo di tutti gli elementi necessari al moto e all'adempimento delle funzioni previste. I settori si muovono indipendentemente l'uno dall'altro, dunque ad esempio uno stesso filo non può essere utilizzato per la movimentazione di due o più coppie di settori adiacenti, stesso discorso vale per la strumentazione di misura o per gli organi funzionali in seguito descritti.

Si procede dunque in questa sezione ad analizzare e descrivere lo sviluppo delle parti funzionali che compongono il sistema, ovvero: l'attuazione, il controllo posizionale e il dispositivo di bloccaggio in posizione.

### 4.3.1 Attuazione

In primo luogo si inizia ad inquadrare l'attuatore del sistema, elemento che consentirà il moto relativo dei due settori, ovvero il filo in SMA e gli organi relativi necessari alla sua applicazione.

#### 4.3.1.1 Disposizione filo in SMA

E' fondamentale innanzitutto riflettere sulla tipologia di forza messa in gioco dall'attuatore. Il filo SMA che attua il sistema è in grado di generare una forza vettoriale di direzione collineare al primo tratto di filo rettilineo collegato al settore in movimento.

Per questo motivo il filo dovrà essere disposto su un asse perpendicolare alla cerniera della coppia di settori, in posizione centrata, rappresentata in figura 4.10.

da un segmento in stile tratto-punto. In questo modo si ottiene la massima efficacia dalla forza di trazione generata dal filo, e si equilibra il sistema di forze che conseguentemente nasce sulla cerniera.

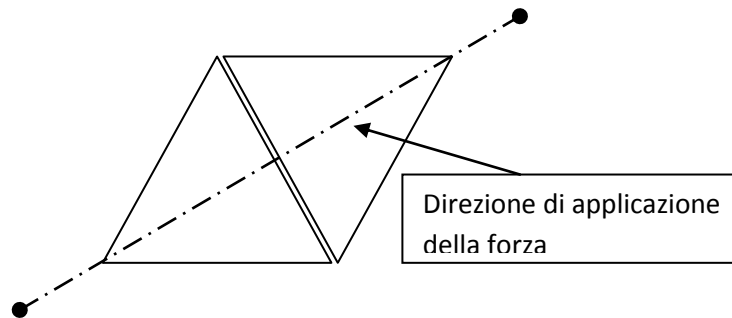


Figura 4.10 : Direzione forza di trazione del filo SMA.

Si osserva che non è necessario che tutto il filo debba essere disposto in questo modo, ma solo il tratto centrale di collegamento (separazione in spazio), per il resto può essere disposto in qualsiasi modo, ad esempio avvolto su pin a spirale.

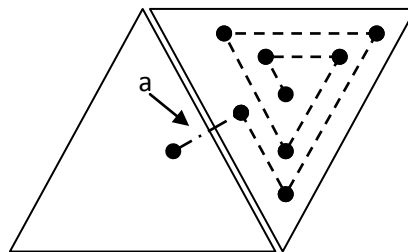


Figura 4.11 : Esempio di possibile layout, il tratto a cavallo della cerniera "a" deve essere rettilineo.

Occorre porre attenzione alla curvatura imposta al filo ad esempio da eventuali pin o pulegge, perché raggi di curvatura troppo stretti possono indurre sollecitazioni locali che possono avere conseguenze sulle prestazioni (si pensi a deformazione plastica locale). E' dunque necessario non superare raggi di curvatura pari a 8÷10 volte il diametro del filo:

$$R_{curvatura} > 8 \div 10 * D_{filo}$$



Rispettando tale relazione non si incorre in plasticizzazioni locali e il comportamento del filo risulta dunque uniforme, rispettando le prestazioni dichiarate da costruttore.

#### 4.3.1.2 Configurazione attuatore

E' fondamentale tenere presente che il verso della forza è unico, ovvero il filo è in grado unicamente di generare una forza di trazione, e per ovvi motivi in nessun caso una spinta. E' necessario dunque prevedere un ulteriore elemento che fornisca una forza di verso opposto alla trazione del filo in modo da consentire il ritorno in posizione del settore.

Questo elemento può essere scelto seguendo due approcci differenti:

- 1) Tramite un secondo filo SMA.

Il secondo filo deve essere posto in modo che la forza generata sia in opposizione alla forza generata dal primo. La variazione dell'angolo relativo avviene in conseguenza della differente alimentazione applicata ai due fili, difatti all'interno dell'escursione massima sarà infinito l'insieme delle posizioni di equilibrio assumibili. Il sistema di attuazione risultante avrà la possibilità di generare sistemi di forze ottimizzati in base alle forze in gioco richieste al momento. All'elevata flessibilità permessa da questa configurazione, per contro si crea complessità aggiuntiva a livello di posizionamento degli elementi, che in questo caso sono due, nonché a livello della gestione delle correnti.

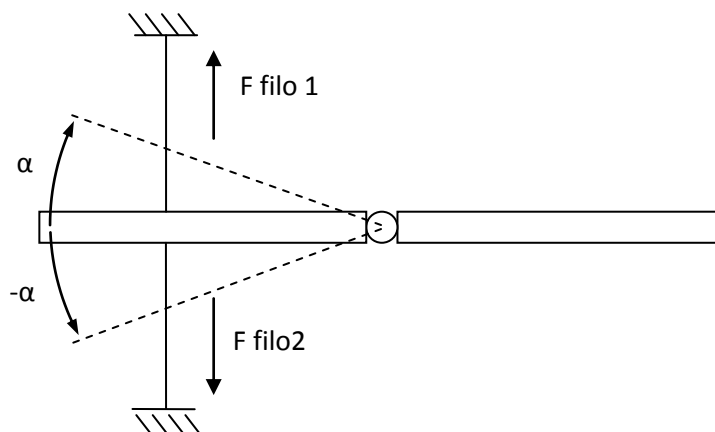


Figura 4.12: Settore movimentato da filo e contro filo.

Questa soluzione pur essendo molto interessante comporta inoltre la presenza di elementi su entrambe le facce del settore, violando in questo modo uno dei requisiti. L'unico modo per risolvere questa problematica sarebbe sfruttare un braccio per l'applicazione della forza di trazione, delle dimensioni del semi spessore del settore, in modo che i fili siano adesi alle due superfici. Per contro le esigue coppie disponibili rendono implementabile questa configurazione solo per applicazioni miniaturizzate in cui non siano richieste elevate forze in gioco, come ad esempio una applicazione che preveda solo l'osservazione dell'oggetto e non la manipolazione. Queste problematiche hanno decisamente portato all'abbandono della soluzione a doppio filo.

2) Tramite una molla in acciaio adeguatamente posizionata.

Tipicamente è la soluzione adottata più di frequente per ottenere la forza di ritorno nella maggior parte dei sistemi SMA attuati esistenti. Difatti la molla eroga una forza sempre attiva che non comporta costi energetici aggiuntivi lavorando per deformazione elastica.

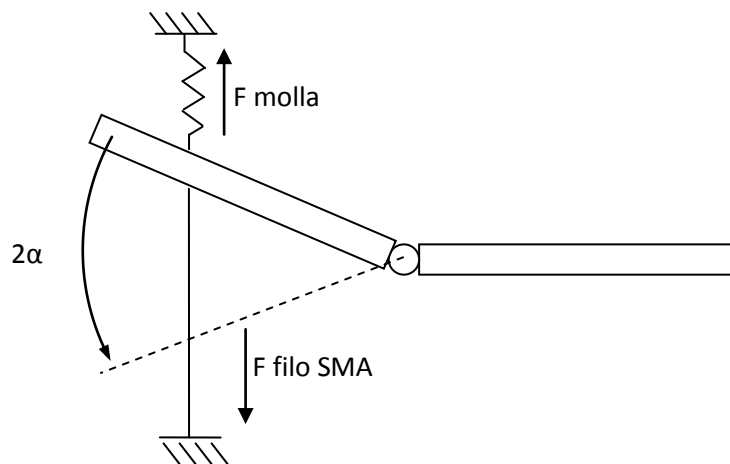


Figura 4.13: Settore movimentato da filo e contro molla in acciaio.

La scelta dunque ricade sulla soluzione con contro molla. Si evidenzia che in ogni caso la SMA deve essere in grado di movimentare l'intera escursione angolare di rotazione del settore, quindi sia per angoli positivi che negativi rispetto alla posizione di equilibrio in cui i due settori giacciono sullo stesso piano.

Molla torsionale

Successivamente ad una ricerca sulle molle presenti sul mercato, la scelta è ricaduta sull'uso di una *molla torsionale*. Questa tipologia di molla infatti è l'unica che consente di utilizzare lo spazio a disposizione in maniera ottimale, potendo essere posta in asse con l'albero della cerniera. In questo modo non vi è alcun ingombro non solo sulla faccia superiore del settore, ma anche sulla faccia inferiore, consentendo maggior libertà progettuale per quanto riguarda gli altri organi funzionali.

Tale disposizione prevede dunque necessariamente che in corrispondenza della cerniera che collega i due settori sia lasciato uno spazio sufficiente a contenere l'elemento, inoltre la molla per equilibrare le forze dovrà essere posta in posizione centrata, in figura 4.14 Si indica la posizione nella zona tratteggiata.

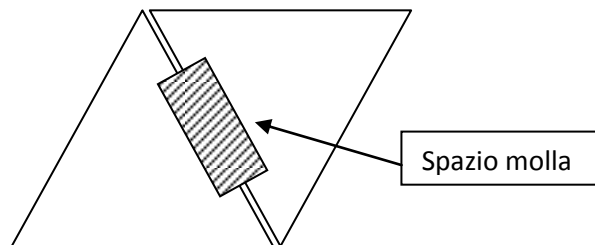


Figura 4.14: I due settori adiacenti con lo spazio centrato per la molla torsionale.

Da questa prima considerazione conseguono importanti informazioni per quanto riguarda la cerniera, che avrà solamente due punti di attacco per lato, inoltre per impedire ai due triangoli il movimento assiale occorrerà pensare a una configurazione in cui uno dei triangoli della coppia sia inserito a incastro nell'altro, e bloccato in asse tramite l'albero centrale.

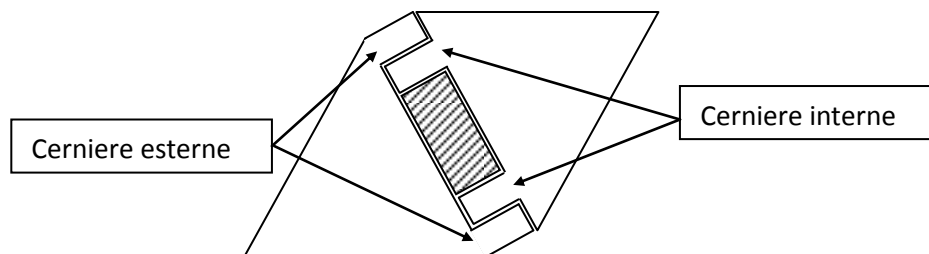


Figura 4.15: Disposizione cerniere sui due triangoli.

La diretta conseguenza di questa scelta porta il settore triangolare a non essere simmetrico rispetto all' altezza che ha per base il lato senza cerniera, difatti se da un lato presenterà le cerniere all'esterno, dall'altro presenterà le cerniere interne, ottenendo la configurazione indicata in figura 4.16.

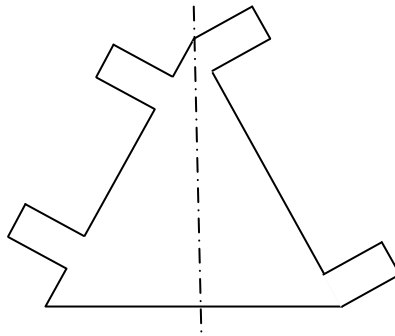


Figura 4.16: configurazione cerniere settore triangolare non simmetrico.

A questo punto possiamo iniziare a definire delle dimensioni relativamente alla molla, la lunghezza sarà lasciata libera e decisa successivamente in base alle altre dimensioni caratteristiche del triangolo, dettate successivamente dagli altri elementi.

Si è stabilito che la molla dovesse avere un diametro esterno di massimo 5 [mm], e di conseguenza si è definito lo spessore del settore triangolare, pari dunque a 5 [mm]. Questa importante dimensione è in armonia con le severe richieste di resistenza dettate dai parametri di progetto ( si pensi alla forza a sbalzo di 35 [N] di intensità). In questo modo si conferisce elevata rigidità alla struttura e si consente inoltre sufficiente spazio per il fissaggio delle basi degli elementi funzionali che si è pensato di integrare all'interno del settore e che dunque non dovessero sporgere dalla superficie del triangolo. Le dimensioni delle cerniere sono state pensate inizialmente di larghezza pari a 4 [mm] con albero centrale di fissaggio di diametro 2 [mm] sempre in conseguenza all'elevata rigidità flessionale necessaria, tendo conto del momento di torsione imposto alla striscia dal carico a sbalzo.

Il momento restituito dalla molla torsionale è proporzionale alla variazione dell'angolo di rotazione tramite la costante di rigidità caratteristica. Dunque l'equazione che ne descrive il comportamento risulta:

$$\Delta_{Momento}[Nmm] = k \cdot \Delta_{angolo}[deg]$$

La rigidezza è scelta in base alla configurazione della molla stessa, infatti si è deciso di lavorare con molle dalla rigidezza non troppo elevata, che nel caso più critico si aggirasse intorno al valore di 0,5 [Nmm/deg]. La tipologia di posizionamento dei terminali scelta è visibile in figura 4.17, in cui la molla è rappresentata in vista assiale in condizioni di riposo, in cui il momento restituito è nullo.

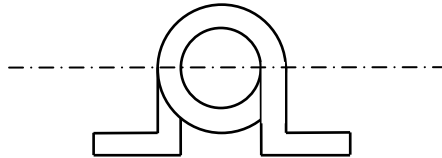


Figura 4.17: Vista assiale molla in stato di momento restituito nullo.

La molla è montata in posizione tra i due settori, sottoposta a torsione di  $360^\circ$  in senso orario, considerando fissa l'estremità sinistra. Si ottiene così la configurazione in cui i due settori adiacenti giacciono sullo stesso piano, (angolo relativo  $180^\circ$ ), indicata in figura 4.18.

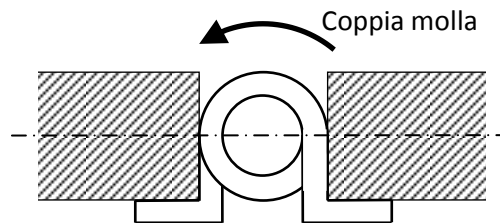


Figura 4.18: Sezione della coppia di settori in posizione piana, la molla è sottoposta a torsione di  $360^\circ$ .

Come si può vedere in figura 4.19, ruotando il settore di  $+a[deg]$  la molla risulterà sottoposta a torsione di  $(360+a)^\circ [deg]$  e fornirà la coppia massima, mentre ruotando il settore di  $-a[deg]$  la molla sarà sottoposta a torsione di  $(360-a)^\circ [deg]$  e la coppia erogata sarà la minima disponibile.

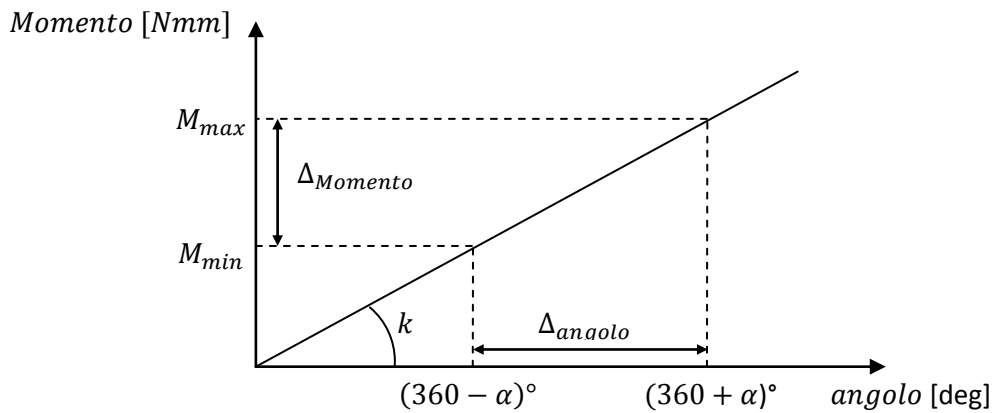


Figura 4.19: momento al variare dell'angolo.

Per maggior chiarezza descrittiva si riportano in figura 4.20 le configurazioni assumibili in condizioni di lavoro della molla dai settori incernierati.

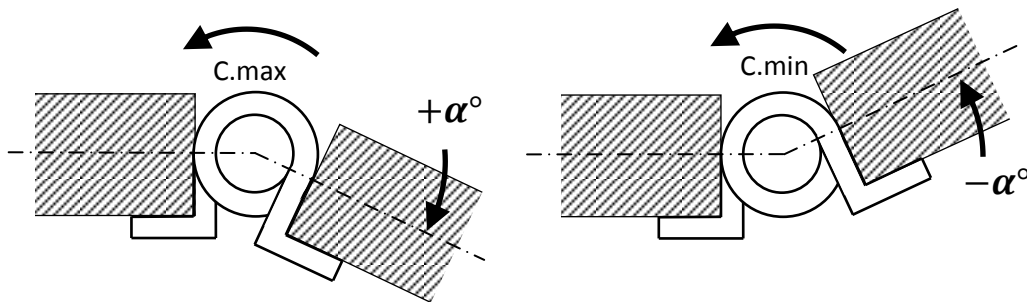


Figura 4.20: Sezione della coppia di settori con inclinazioni relative di  $-\alpha^\circ$  e  $+\alpha^\circ$ .

Si può prevedere nel caso il diametro interno della molla sia considerevolmente maggiore del diametro dell'albero della cerniera, di interporre tra i due un tubo in materiale plastico (teflon) in modo da mantenere la molla il più possibile il asse con l'albero della cerniera.

Per concludere il discorso si sottolinea che vi è grande flessibilità per quanto riguarda le caratteristiche e la configurazione di questa tipologia di molle, difatti se non fossero disponibili a catalogo molle torsionali con le caratteristiche desiderate, è possibile ordinarle su misura indicando al costruttore le caratteristiche richieste.

#### 4.3.1.3 Corsa necessaria e lunghezza filo SMA

La corsa di accorciamento del filo in SMA, è del 3÷4% rispetto alla lunghezza iniziale, quindi per una corsa  $\Delta L_{filo}$  [mm], sarà necessaria una lunghezza iniziale del filo in SMA di minimo  $\frac{\Delta L_{filo}}{0,03 \div 0,04}$  [mm].

$$L_{iniziale} = \frac{\Delta L_{filo}}{0,03 \div 0,04}$$

Per conoscere la lunghezza del filo è quindi prioritariamente necessario conoscere il legame tra escursione angolare  $\Delta \alpha_{settore}$  e corsa del filo  $\Delta L_{filo}$ , che è strettamente legata al cinematismo implementato per il movimento. Si deve dunque pensare allo sviluppo dell'intero sistema tenendo conto della funzione:

$$\Delta L_{filo} = f(\Delta \alpha_{settore})$$

Occorre valutare attentamente la lunghezza del filo, un filo più corto comporta meno potenza elettrica necessaria e minor tempo per l'attuazione, ma va tenuto conto della possibile perdita di precisione posizionale essendo molto spinta la sensibilità richiesta sulla rotazione. Per contro quindi un  $\Delta L_{filo}$  troppo ridotto può essere difficile da gestire se non con un'elettronica dedicata complessa.

#### 4.3.1.4 Cinematica, legge di moto

E' fondamentale studiare con attenzione il legame tra escursione angolare e variazione di lunghezza del filo SMA, questo dovrà essere il più possibile direttamente legato alla rotazione del settore. Il cinematismo deve dunque presentare una dinamica molto semplice e diretta, si dovrà quindi cercare di evitare legami cinematici complessi ed escludere categoricamente la presenza di elementi terzi quali leveraggi e riduzioni, che andrebbero a vanificare il vantaggio dell'applicazione delle SMA.

Alla base dello sviluppo del cinematismo, occorre fare un'importante considerazione riguardo il sistema di forze imposto dal filo SMA. E' necessario che questo sia sempre perpendicolare alla superficie del triangolo in rotazione, in modo da rendere semplice il legame tra l'accorciamento del filo e il valore della coppia erogata.

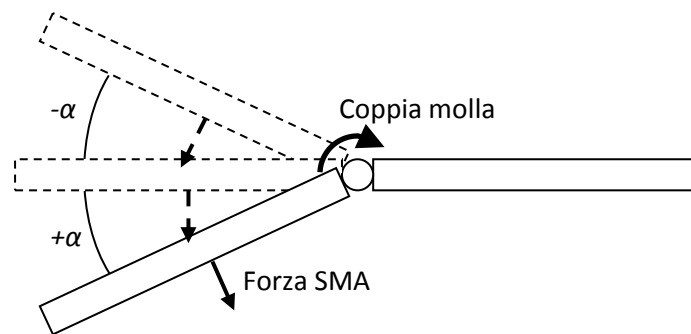


Figura 4.21: Sistema di forze agenti sul settore in moto.

Elemento guida

Nasce dunque l'idea di un elemento che costituisca il braccio di applicazione per la forza di trazione generata dal filo, in figura 4.22 "r", che rimanga costante durante la rotazione. Si sviluppa dunque una guida circolare, con foro centrale per l'alloggiamento della molla, con una scanalatura di alloggiamento per il filo SMA, resa solidale tramite viti al settore in movimento.

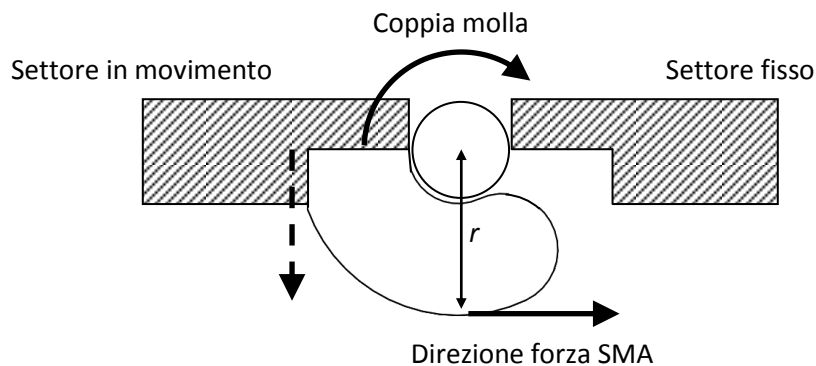


Figura 4.22: Sistema di forze di movimentazione relative alla coppia di settori.

La direzione della forza applicata dal filo SMA rimane dunque sempre parallela al piano del settore considerato sistema di riferimento, e la guida provvede a riportare il punto di applicazione sul triangolo in modo che la forza sia sempre perpendicolare ad esso (vettore tratteggiato in figura 4.21 e figura 4.22). Si osserva in ultimo che la guida è dimensionata in modo da fornire sempre braccio costante entro i limiti assumibili di inclinazione del settore, corrispondenti a  $-\alpha^\circ[deg]$  e  $+\alpha^\circ[deg]$ .



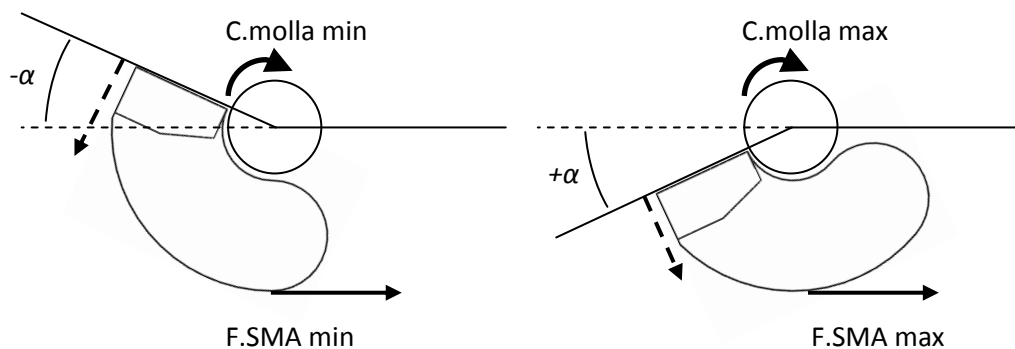


Figura 4.23: posizioni limite assumibili con inclinazione relativa di  $-\alpha[deg]$  e  $+\alpha[deg]$ .

Otteniamo in questo modo una coppia facilmente gestibile, in grado di opporsi al momento imposto dalla molla, crescente all'aumento della rotazione antioraria del settore in moto in figura 4.23. Questa è una conseguenza della legge di accorciamento del filo SMA definita dal cinematismo che definisce il valore della corsa che il filo SMA deve compiere per coprire l'intera escursione angolare richiesta.

$$\Delta l_{filo} = 2 \cdot \alpha[rad] \cdot r[mm]$$

Sarà necessario provvedere a un sistema compatto che permetta di ottenere un ingombro ridotto del filo, in modo da vincere in modo semplice la contraddizione di filo lungo, necessario per ottenere il  $\Delta L_{filo}$  richiesto, ma che occupi poco spazio. Questo perché è importante avere ben chiaro fin dalle prime fasi di sviluppo del prototipo, che il filo e tutti gli apparati ausiliari dovranno essere posti sulla faccia inferiore del triangolo, in modo da non interferire con la striscia in plastica posta superiormente che permette la resa della sensazione tattile.

#### Elemento puleggia di avvolgimento

Nel rispetto della curvatura minima si è pensato di avvolgere il filo in una scanalatura elicoidale ricavata sulla superficie di un cilindro in teflon, le dimensioni di tale elemento sono state ricavate tenendo conto della lunghezza del filo e dello spazio disponibile sul triangolo al fine di impedirne la collisione con gli altri elementi presenti.

Il cilindro sarà reso solidale al settore di riferimento, e sarà progettato in modo che sia impedita la rotazione anche sotto sforzo. Il filo in arrivo dalla guida dovrà essere tangente alla concavità elicoidale ricavata sul cilindro. La dimensione in diametro e altezza e la sua posizione è stabilita in base alla necessità di lunghezza del filo e allo spazio disponibile sul settore evitando le collisioni. La configurazione concettuale finale risulta dunque descritta in figura 4.24, in cui l'ingombro dei settori triangolari è rappresentato da linea tratteggiata.

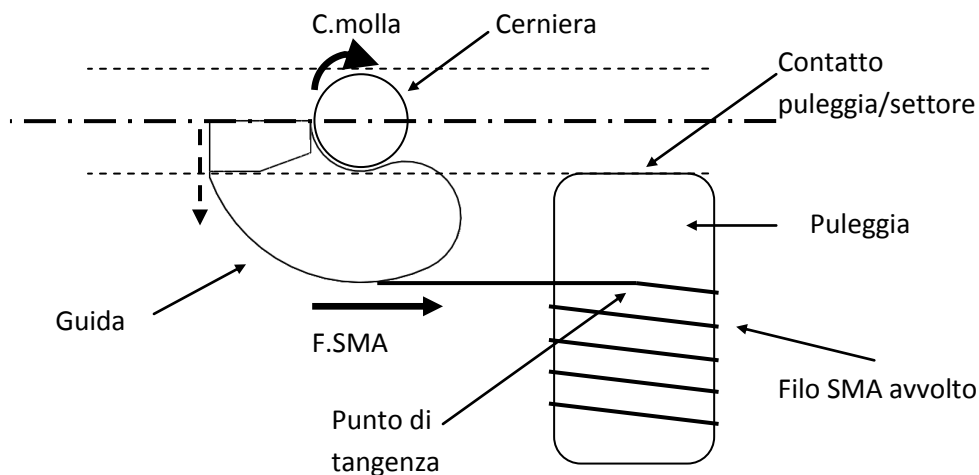


Figura 4.24 Configurazione concettuale del sistema di movimentazione.

Una considerazione importante, riguardo al sistema di movimentazione così implementato, riguarda i giochi del sistema, difatti l'unico gioco presente è quello che permette la rotazione dell'albero che unisce i due settori, all'interno dei fori della cerniera del settore, dotato inoltre di tolleranza molto stretta.

### 4.3.2 Elemento lettura posizione settore

Si procede descrivendo la tipologia di sensore scelto per la lettura dell'angolo relativo tra due settori adiacenti. E' decisiva la scelta della sua posizione sul triangolo considerando la validità del discorso fatto per l'attuazione, ovvero che ogni triangolo dovrà assolvere anche alla funzione di lettura posizionale, fungendo da sistema di riferimento per il successivo ad esso connesso. Da non dimenticare inoltre che la scelta delle dimensioni dei settori è strettamente legata alle dimensioni del sensore di misura. Segue una rapida analisi delle possibilità di misurazione prese in considerazione, senza soffermarsi nei particolari per non appesantire la trattazione focalizzando l'attenzione su strade poi non intraprese.

#### 4.3.2.1 Encoder

Si è deciso di dedicare un paragrafo alla soluzione di misurazione tramite encoder, avendolo citato come soluzione scartata nel capitolo 3. Si riportano riassuntivamente i risultati dell'analisi eseguita suddivisi in vantaggi e svantaggi relativi all'applicazione dello strumento di misura al sistema in esame [25] [26]:

**Vantaggi:** Inerzia minima e allo scopo trascurabile essendo le accelerazioni di entità trascurabile.

Non impone nessun tipo di resistenza al moto.

Leggero, preciso, rapido nella lettura e trasmissione delle informazioni.

**Svantaggi:** Non può essere collegato sull'asse dei triangoli, date le dimensioni considerevoli altrimenti andrebbe a collidere con la striscia in plastica prevista superiormente, è necessario pensare il posizionamento.

Occupava un volume consistente, sarebbe indubbiamente l'elemento di maggior ingombro all'interno del sistema.

Richiesta competenze elevate nella scelta e nella gestione del segnale restituito, che richiede un'elettronica hardware e software dedicata. E' uno strumento di potenzialità troppo avanzate rispetto allo scopo per cui sarebbe implementato ovvero di sola lettura posizionale.

Elevato costo.

Si è proceduto con la scelta dell'encoder a catalogo RS [28], quelli più adatti allo scopo, scelti sostanzialmente in base alle dimensioni, risultano essere:

- l'encoder miniaturizzato serie AEDA 3300 della Avago technologies;

- l'encoder miniaturizzato serie AEDA 3200 della Agilent technologies.

Sono entrambi sostanzialmente contenuti in un cilindro di circa 17 [mm] di diametro e 18 [mm] di altezza.

Si è pensato alle possibili modalità di collegamento, escludendo il posizionamento in asse, e sono insorte non poche difficoltà proprio a causa delle dimensioni rilevanti di tale elemento, si riporta comunque la configurazione più interessante.

- 1) Può essere usato un filo (acciaio, nylon) sufficientemente rigido, vincolato a un lato al settore e avvolto attorno all'albero dell'encoder (sfruttando le sedi di una vite senza fine) in modo da ottenere un effetto moltiplicativo tra rotazione settore e rotazione albero encoder.

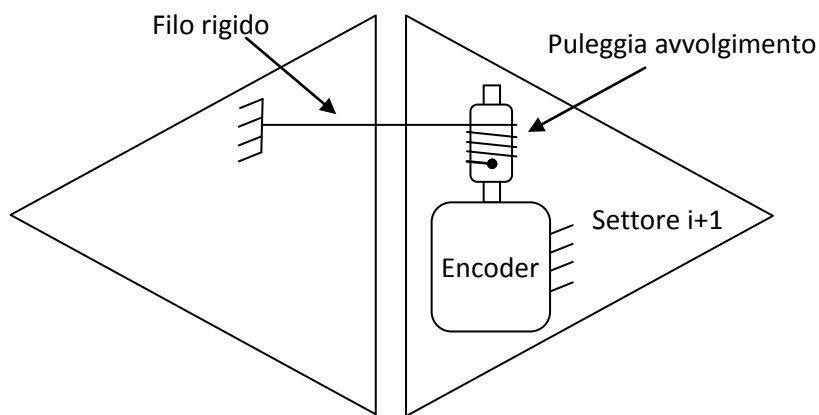


Figura 4.25: Possibile posizionamento di encoder al di sotto del settore triangolare.

- 2) L'asse dell'encoder sarebbe interessante da posizionare verticalmente, perpendicolare al piano di giacenza del settore, per ridurre il più possibile l'ingombro laterale (questi oggetti hanno un diametro tipicamente molto ridotto, dell'ordine dei 12-13 mm).

Il grande limite relativo al posizionamento dell'encoder sulla faccia inferiore del triangolo, in conseguenza delle dimensioni non trascurabili, consta nell'aggiunta di ulteriori elementi interposti tra oggetto in movimento e lo strumento di misura. E' evidente il ripresentarsi della problematica già presente nella versione servo attuata del Satin, descritta nel capitolo 3. Inoltre la difficoltà di utilizzo a causa dell'elettronica sofisticata, lo spreco di potenzialità dovuto alle funzionalità eccessive rispetto alla richiesta e l'elevato costo, hanno portato ad abbandonare tale soluzione in favore di altre strade più efficaci.

#### 4.3.2.2 Potenzimetro resistivo

Un potenziometro resistivo consiste in un elemento resistivo in contatto con un elemento conduttore cui è permesso il movimento, nel nostro caso, rotazionale. L'elemento resistivo è alimentato con corrente continua o alternata e la tensione in uscita è (idealmente) una funzione lineare dello spostamento in ingresso [24] [25].

L'impiego di tale soluzione comporta innegabili vantaggi quali: dimensioni e peso molto contenuti, semplicità di funzionamento (è sufficiente leggere direttamente la resistenza in uscita senza rielaborazione del segnale), e costi dell'ordine di pochi euro per la componentistica ad alte prestazioni di qualità elevata (elevata linearità di comportamento, precisione e durata). Alla luce delle potenzialità offerte, è evidente che per l'applicazione è semplice e decisamente efficace usare come strumento di misura un potenziometro resistivo.

Per verificare l'applicabilità e le prestazioni della soluzione illustrata, si sono svolti dei test sui potenziometri. Si riporta in figura 4.26 il layout dell'apparecchiatura costruita per svolgere i test. Questa è costituita da una base in legno su cui è riportata una scala graduata lineare corrispondente ai gradi di rotazione del potenziometro. La cassa del potenziometro è solidale alla base in legno, mentre l'elemento rotante è solidale a una bacchetta in alluminio. La bacchetta viene mossa manualmente sulla scala graduata e il corrispondente valore di resistenza restituito dal potenziometro è letto da un multimetro ad esso collegato.

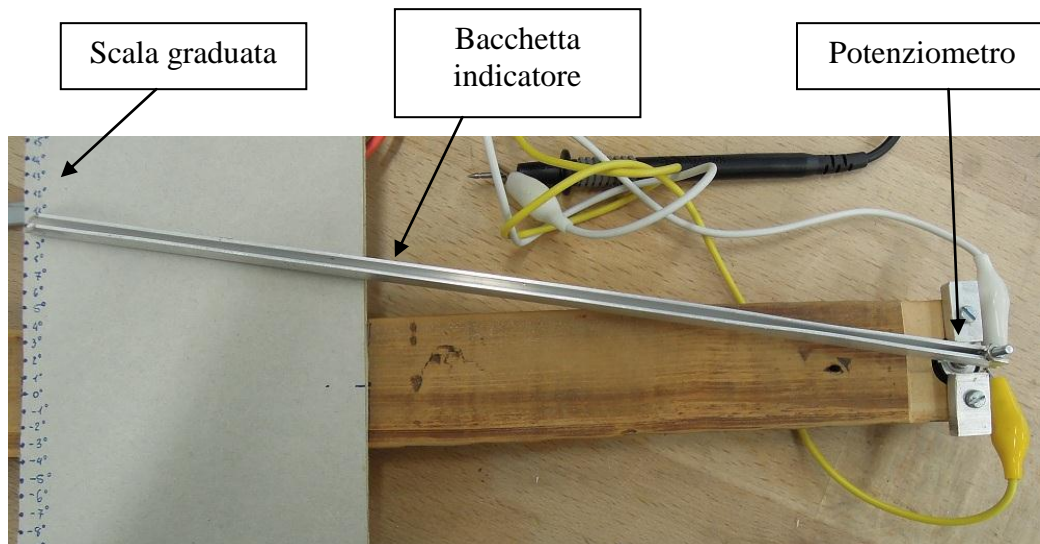


Figura 4.26: Dispositivo per i test sui potenziometri.

Le prove sperimentali hanno avuto principalmente lo scopo di verificare l'affidabilità del potenziometro usato come strumento di misura angolare, intesa principalmente come ripetibilità delle letture durante più cicli. Si è effettivamente verificato il legame lineare tra rotazione albero e resistenza in [Ohm], come riportato dal grafico in figura 4.27.

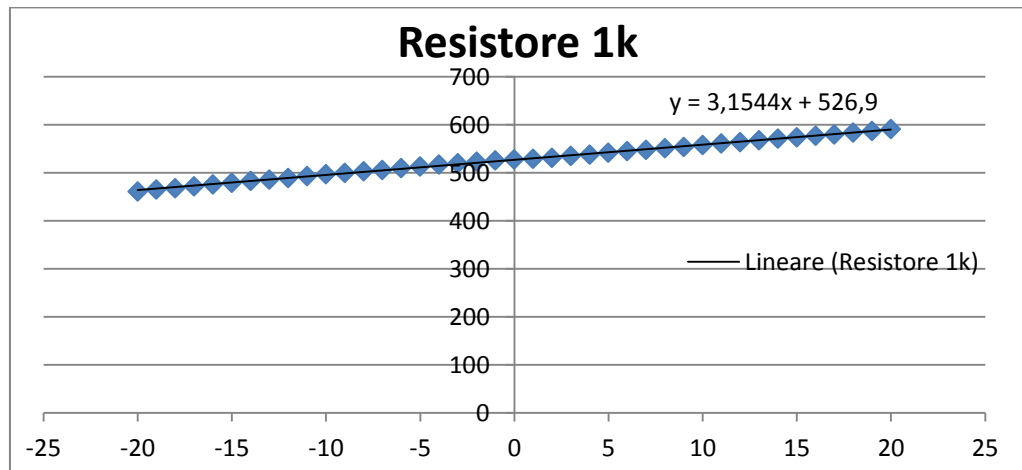


Figura 4.27: Esempio di prova sperimentale su resistore da 1 [kOhm].

Per le prove si è usato inizialmente un resistore molto semplice, del costo di pochi centesimi di euro. Una volta verificate le proprietà, si è scelto per l'applicazione un resistore ad alta qualità, del costo comunque molto contenuto dell'ordine dell'euro. Il potenziometro scelto a catalogo RS [28] risulta il Rotary position sensor 3382G-1-103G della Bourns, di elevata qualità e morfologicamente interessante grazie alle dimensioni ridotte. La scheda tecnica è riportata in appendice [C].

Date le dimensioni decisamente ridotte, è stato possibile pensare a un collocamento del potenziometro in asse con la cerniera che collega i due settori adiacenti, consentendo in questo modo la lettura posizionale diretta, superando dunque definitivamente il limite di lettura posizionale indiretta. E' dunque semplice e immediato ottenere la funzione che lega l'inclinazione del triangolo al valore di resistenza in OHM.

$$\Delta_{angolo}[deg] = cost \cdot \Delta_{resistenza}[Ohm]$$

La soluzione costruttiva prevede che la cassa del potenziometro (sistema di riferimento rotazionale) sia resa solidale ad uno dei due settori mediante un braccio ricavato di pezzo sul triangolo, mentre l'elemento rotante è reso solidale all'albero della cerniera, a sua volta bloccato per interferenza nei fori della cerniera dell'altro settore della coppia.

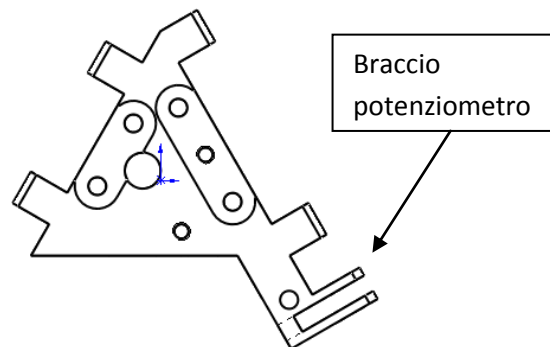


Figura 4.28: Vista superiore settore triangolare definitivo.

In figura 4.28 è riportato il settore nella sua configurazione definitiva, si osserva che la lunghezza del braccetto è dimensionata in modo tale da impedire al potenziometro di collidere con gli altri elementi della striscia durante il movimento.

#### 4.3.2.3 Controllo senza feedback:

Si ritiene utile e importante aprire una parentesi su questa interessante possibilità, è infatti possibile ottenere informazioni sull'accorciamento percentuale della SMA sfruttando la SMA stessa, ovvero il cambio di resistività al passaggio da fase martensitica ad austenitica [14] [15] [16]. Difatti, nota la resistività in fase completamente austenitica e in fase completamente martensitica, è possibile ottenere la curva che lega accorciamento percentuale alla resistività. Tale curva prevede un tratto lineare, che sfruttato come campo di lavoro, può essere univocamente usato per conoscere l'allungamento. Per contro questo tipo di controllo è oggetto di svariati studi, poiché la curva cambia ad ogni utilizzo ed a ogni ciclo è necessaria una procedura di taratura apposita. Inoltre è evidente come sia assolutamente necessaria una precisione di montaggio molto elevata, in particolare per quanto riguarda la lunghezza iniziale del filo (si lavora su variazioni di allungamento di pochi millimetri), che in laboratorio sarebbe molto difficile da ottenere, dunque non si percorre questa strada ricordando l'enfasi sulla "realizzabilità" che si propone il presente studio.

### 4.3.3 Prototipo

Una volta stabilite le modalità di movimentazione e di misura dell'escursione angolare, E' stato realizzato un prototipo che consentisse di eseguire una prima valutazione sull'applicabilità delle soluzioni individuate. Il prototipo è costituito da due settori in legno connessi da cerniere in metallo e movimentati da una molla torsionale e un filo in SMA. La rotazione viene letta da un potenziometro in asse. Si riportano dunque alcune immagini relative al prototipo, in particolare in figura 4.29 si può vedere la strumentazione connessa, ovvero l'alimentatore e il multimetro a sinistra a SMA disattivata, mentre a destra attiva.

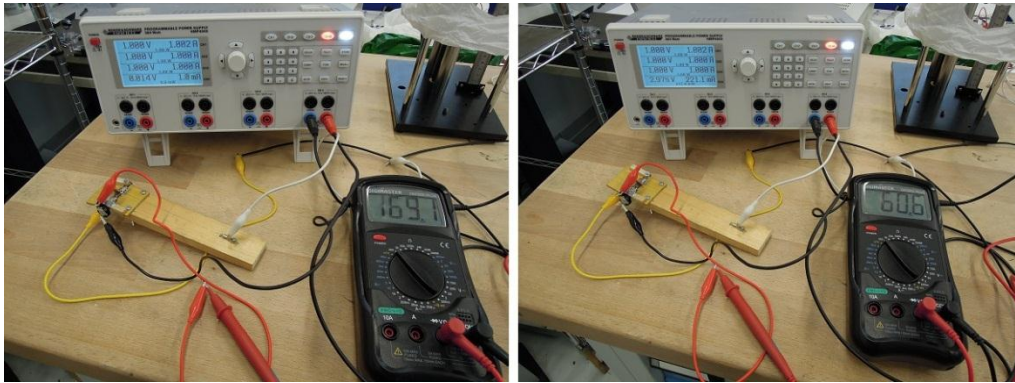


Figura 4.29 Layout test SMA alimentata (destra) e non (sinistra).

In figura 4.30 invece si riportano le immagini del prototipo con vista laterale lungo l'asse della cerniera, è visibile il potenziometro ed è molto chiara l'escursione angolare, regolata dal raggio della guida e dalla lunghezza del filo SMA che ne definisce la corsa.

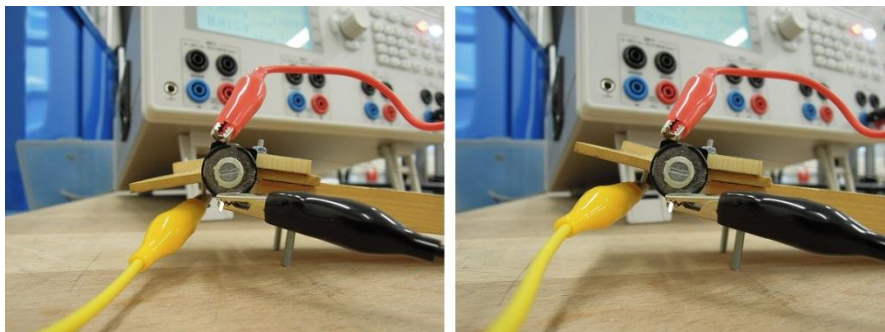


Figura 4.30 Vista in asse SMA alimentata (destra) e non (sinistra).



#### 4.3.4 Sistema di bloccaggio

Data la specifica richiesta al sistema, relativa al resistere in modalità tocco ad una forza applicata a sbalzo sull'estremo della striscia pari a 35 [N], ci si rende immediatamente conto della necessità di prevedere un sistema che sia in grado di immobilizzare la striscia in posizione. Pensare di mantenere il sistema immobile agendo unicamente sul sistema di forze messe in gioco da molla torsionale e filo SMA di movimentazione significherebbe sovradimensionare irragionevolmente il tutto. In conseguenza si otterrebbe un sistema che necessita di grandi quantità di energia elettrica. Questo porta a un crollo dell'efficienza del sistema.

Il sistema di bloccaggio, è stato pensato in modo da massimizzare l'efficienza per quanto riguarda il consumo energetico del sistema. Difatti il blocco è in funzione quando è disattivato il sistema di movimentazione, e viceversa, come si nota in figura 4.31 e 4.32.

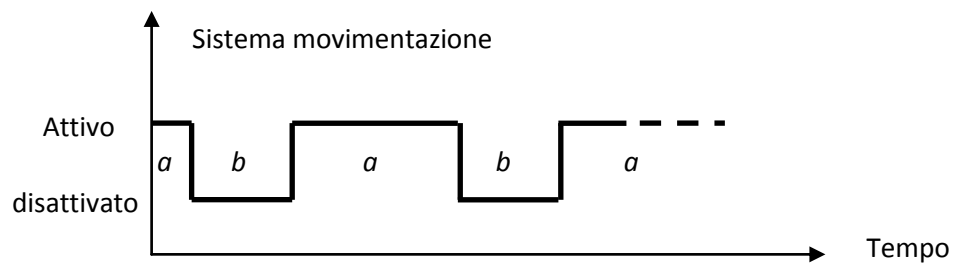


Figura 4.31: Alimentazione al sistema di movimentazione nelle fasi: "a" esplorazione o modifica e "b" tocco.

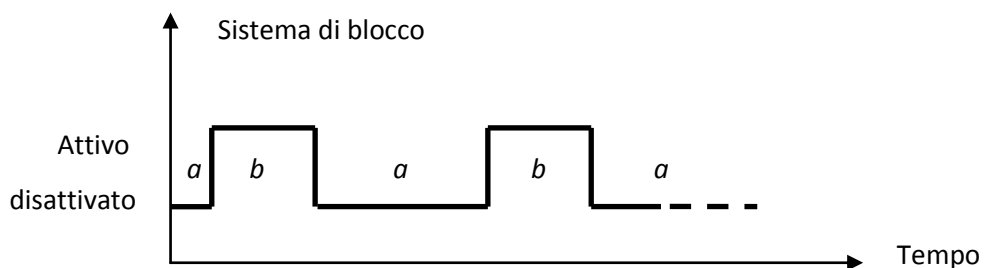


Figura 4.32: Alimentazione al sistema di blocco nelle fasi: "a" esplorazione o modifica e "b" tocco.

Inoltre in conseguenza del desiderio di ulteriore incremento dell'efficienza energetica si è pensato a un meccanismo che potesse inserire e disinserire il sistema di blocco, in modo da ridurre la spesa energetica al tempo strettamente necessario per l'inserimento o il disinserimento. In questo modo il sistema di blocco non comporta consumo di corrente elettrica durante il tempo in cui è attivato.

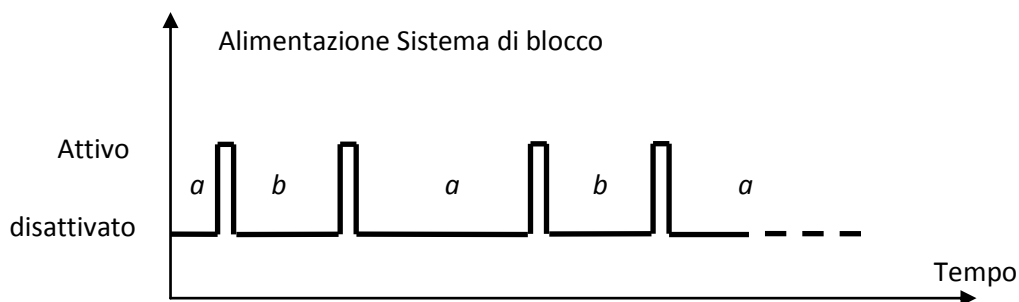


Figura 4.33: Alimentazione al sistema di inserimento blocco nelle fasi: "a" esplorazione o modifica e "b" tocco.

Data la richiesta per cui il sistema deve poter essere bloccato in qualsiasi posizione, si esclude una soluzione "a step" discreti, facilmente implementabile ad esempio tramite perni. Si conclude che l'unica possibilità consiste nello sfruttare una forza di attrito, che consenta il bloccaggio in continuo e dunque permetta ai due settori di assumere qualsiasi posizione angolare relativa.

E' chiara la necessità della presenza di un braccio per l'applicazione della forza di attrito. Si sfrutta dunque l'elemento guida, in modo da non aggiungere un ulteriore elemento, dimensionandone di conseguenza lo spessore, noto che dovrà lavorare soggetto a un sistema di forze rilevanti.

Al fine di ridurre al più possibile le labilità e la deformabilità plastica dell'intera striscia, è nata l'idea di un elemento rigido e compatto, all'interno del quale la guida fosse in grado di scorrere liberamente o potesse essere serrata con forza a seconda della richiesta. Tale elemento è stato sviluppato in modo che le forze agenti sulla guida fossero simmetriche, in modo da non imporre pericolose sollecitazioni di flessione.

#### 4.3.4.1 Elementi blocco e guida

Questo elemento ha dunque il compito di assorbire assieme alla guida l'intera forza a sbalzo. In questo elemento sono previsti due fori di tolleranza molto stretta, entro cui sono liberi di scorrere due perni cilindrici. I perni premuti contro le superfici laterali della guida creano il sistema di forze di attrito necessario a bloccare quando richiesto il moto relativo.

La forza di attrito che nasce tra superficie dei perni e superfici della guida è scaricata sul blocco tramite sollecitazione di taglio sui i perni in corrispondenza delle superfici dei fori in cui essi scorrono.

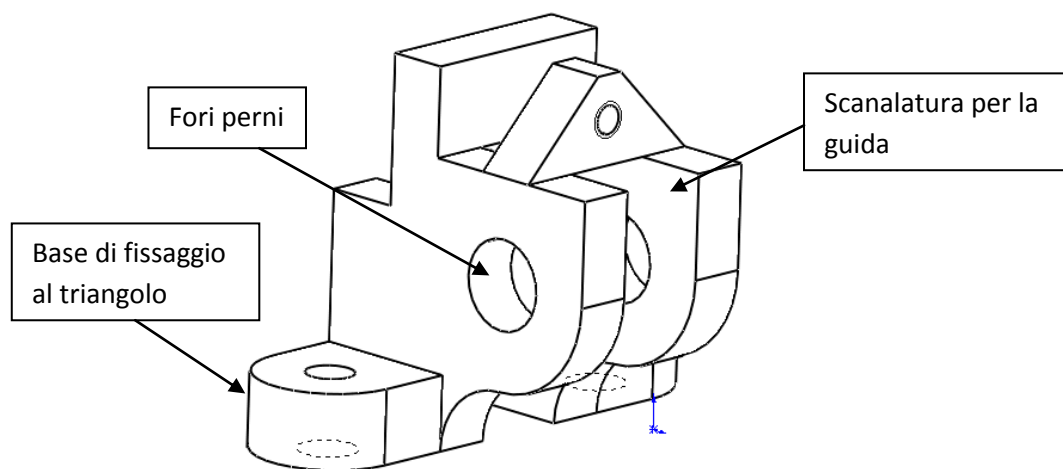


Figura 4.34: Elemento blocco, con tutte le parti funzionali indicate.

Si riporta inoltre anche una figura della guida in modo da comprendere meglio il meccanismo, la forza di attrito giace sul piano di contatto tra guida e perni.

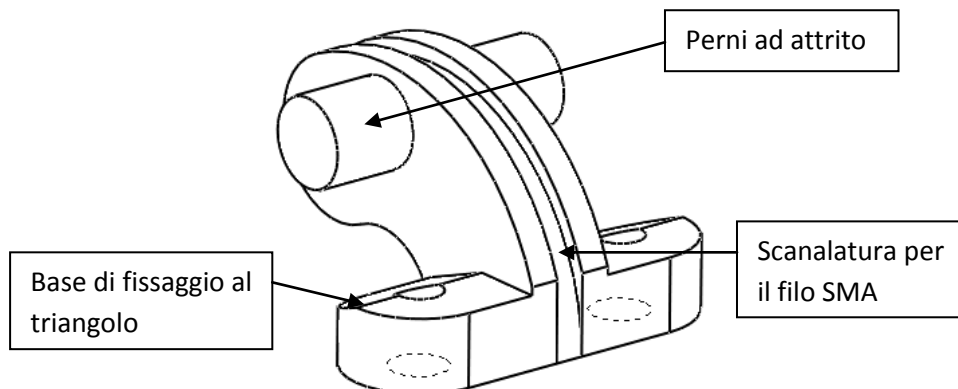


Figura 4.35: Elemento guida, con tutte le parti funzionali indicate.

Si ricorda che le basi di fissaggio ai triangoli sono in essi inserite, e sono fissate tramite bulloni M2. Si nota come abbiano dimensioni considerevoli, poiché dimensionate opportunamente considerando il carico applicato. Vediamo quindi come appare il sistema con una vista laterale in asse con la cerniera in figura 4.36.

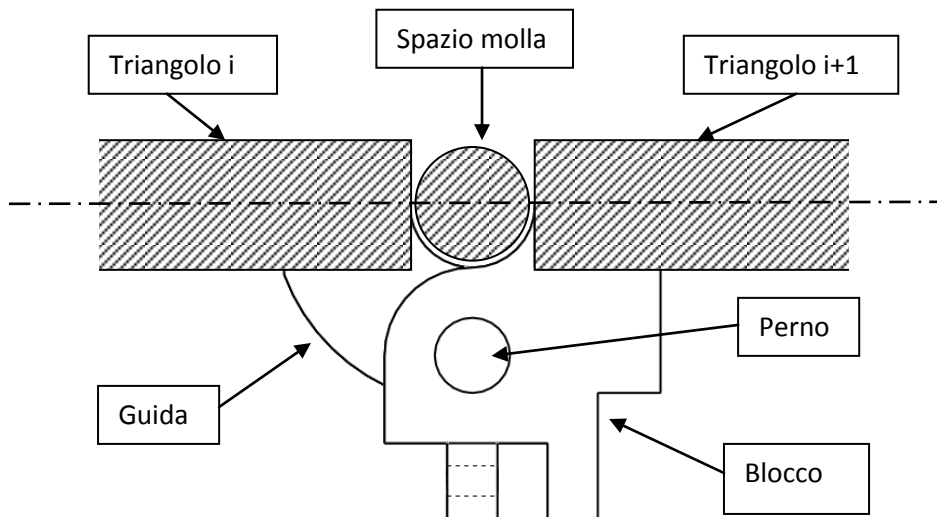


Figura 4.36: Vista in sezione di come appare il sistema di blocco inserito nei settori, la guida è inserita nel blocco e risulta poco visibile.

Il bilancio che mantiene i due settori in posizione è dunque equilibrato dalle forze scambiate tra guida e blocco tramite i perni ad attrito, e dalle forze che nascono sulla cerniera.

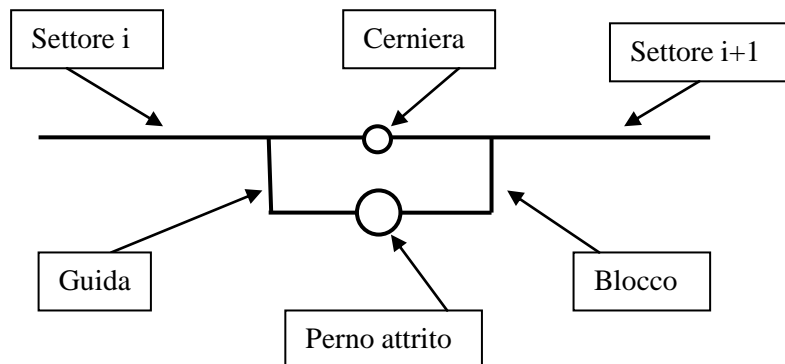


Figura 4.37: Sistema rappresentato in forma schematica.

E' ora importante notare che, analogamente al sistema di movimentazione, i giochi tra le parti che consentono il bloccaggio sono molto ridotti, difatti, oltre che sull'albero della cerniera già discusso, l'unico ulteriore gioco presente è in corrispondenza dei perni ad attrito e dei fori entro cui questi scorrono. Essendo la tolleranza in questo punto molto spinta si conclude che i giochi tra le parti sono stati effettivamente ridotti considerevolmente.

#### 4.3.4.2 Elemento Morsa

L'ultima soluzione da implementare riguarda i perni ad attrito. Occorre un sistema che imponga su di essi la forza normale necessaria a ottenere l'attrito sulle due superfici tra perni e guida, che sia in grado di mantenere il sistema fermo nella condizione più sfavorevole di carico applicato. La configurazione teorica è ricaduta sullo sviluppo di una morsa di serraggio con il compito di trasmettere normalmente ai perni la forza generata da una molla a compressione, amplificandola con un sistema di leve.

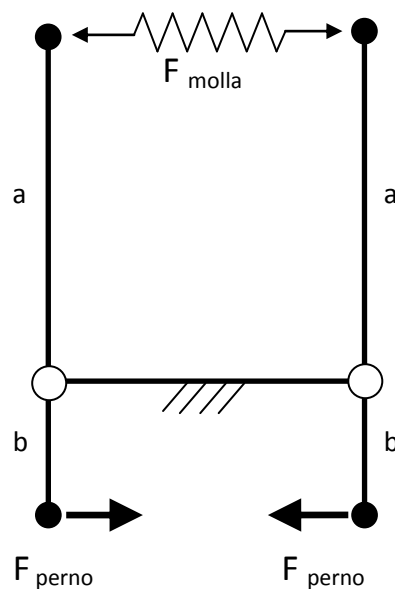


Figura 4.38: Configurazione teorica della morsa di serraggio.

Dunque la morsa trasmette la forza della molla normalmente ai perni.

$$F_{perno} = \frac{a}{b} \cdot F_{molla}$$

Prima di procedere è opportuno riflettere sulle caratteristiche che l'elemento morsa dovrà necessariamente presentare. Le forze normali sui due perni dovranno essere uguali per mantenere la simmetria. Deve essere dimensionato in modo che non avvengano collisioni nel momento in cui si impone l'angolo minimo " $\alpha$ " di rotazione tra tutti i settori componenti la striscia. Inoltre sarà posizionato in modo da lasciare spazio per inserire la puleggia su cui avvolge il filo SMA. Si è scelto dunque di posizionarlo in corrispondenza della cerniera con sviluppo verticale, rendendolo solidale all'elemento blocco. Infine il sistema dovrà essere completo degli elementi che ne permettano tutte le funzioni desiderate, e dunque dovrà essere anche in grado di attivarsi e disattivarsi.

Nota la posizione e le caratteristiche si è costruita una valutazione degli ingombri delle parti. Si riporta unicamente la configurazione definitiva dell'elemento, il percorso di crescita è un processo iterativo volto alla modifica delle grandezze in gioco fino a ottenere la configurazione ottimale definitiva.

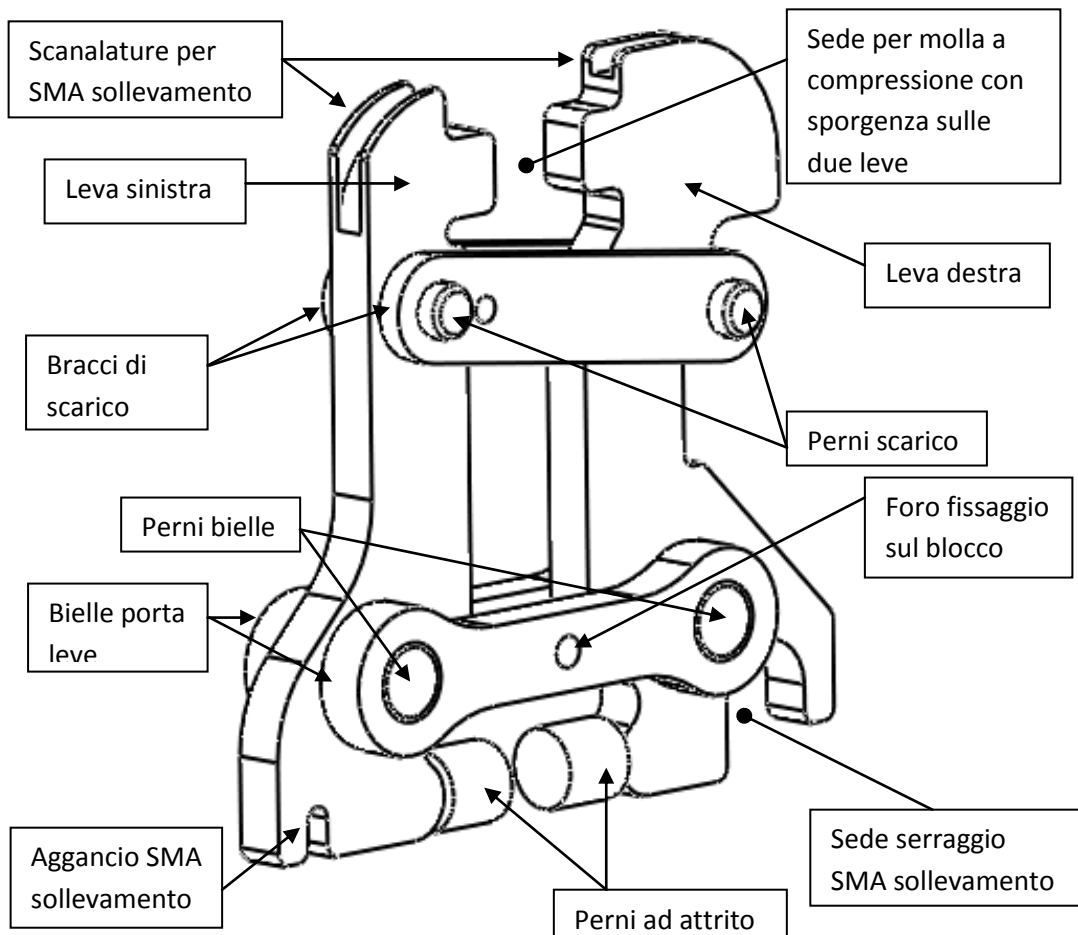


Figura 4.39: La morsa nella sua versione finale con tutte le parti costituenti.

La morsa è resa solidale al blocco tramite le bielle che alloggiavano nell'apposita sede ricavata di pezzo. Una vite ferma il tutto e ha il solo compito di mantenere in posizione centrata l'elemento e non riceve dunque alcuna sollecitazione dovuta ai sistemi di forze essendo questi simmetrici. Una considerazione va fatta riguardo al fissaggio delle parti della morsa. I perni che uniscono le bielle alle leve sono bloccati per interferenza sulle leve con accoppiamento forzato foro base *H7-n6*, mentre hanno gioco con le bielle. Infatti le bielle sono tenute unite e in posizione dal blocco e non necessitano ulteriori fissaggi. I perni che uniscono i bracci di scarico alle leve sono bloccati per interferenza sui bracci con accoppiamento forzato foro base *H7-n6*, mentre vi è gioco con le leve, se così non fosse i bracci di scarico rischierebbero di sfilarsi dalle sedi. Le due leve, agli apici, dove è collocata la molla a compressione, sono dotate di una sporgenza che adeguatamente sagomata a seconda del diametro interno della molla a compressione funge da alloggio. Il contatto con i perni avviene tramite tangenza su una superficie cilindrica, in modo che siano concessi micro scorrimenti e non si creino dunque ulteriori sollecitazioni oltre alle forze normali previste dal cinematismo.

Il bloccaggio e lo sbloccaggio sono permessi da due sistemi di fili SMA, il primo definito "*SMA di sollevamento*", in grado di contrastare la forza della molla principale di compressione denominata "*molla di serraggio*", sgravando i perni ad attrito dal carico. Il secondo assieme ad una seconda molla, definiti "*elementi di scarico*", sono in grado di posizionare il "*braccio di scarico*" la cui funzione è di mantenere sollevata la morsa senza che sia attiva la SMA di sollevamento. Questa configurazione consente di realizzare la separazione delle funzioni in tempo descritta all'inizio del paragrafo, con incremento notevole dell'efficienza energetica del sistema.

Nel capitolo 5 saranno descritte nel dettaglio le modalità di funzionamento nonché le interazioni tra tutte le parti costituenti la morsa.

Si sottolinea che le forze in gioco sulle leve sono unicamente dovute alla trasmissione ai perni della forza generata dalla molla di serraggio, e dalla forza generata dalla SMA di sollevamento. L'unica flessione cui sono sottoposte dunque è in direzione della forza applicata dalla molla, e non esistono altre componenti flessionali dovute al carico applicato a sbalzo sulla striscia che è interamente gestito dal sistema tra blocco, perni ad attrito e guida. In ultimo è interessante introdurre una riflessione sui giochi introdotti sulla morsa, questi non interferiscono in alcun modo sulla precisione posizionale della striscia in alcuna modalità, poiché la morsa è un elemento a sé stante, non coinvolto direttamente nella cinematica che regola il movimento o il fermo in posizione della striscia.

### 4.3.5 Configurazione definitiva

Le dimensioni di blocco e guida risultano i fattori critici su cui si definisce la dimensione del triangolo. Per rendere possibile il posizionamento su uno stesso triangolo, precisamente sui due lati che presentano la cerniera, dei due elementi guida e blocco senza incorrere in collisioni, si è calcolato che la distanza “*pin to pin*” ovvero la distanza tra gli incroci degli assi delle cerniere (in figura 4.40 In stile tratto punto) fosse di 37,26 [mm].

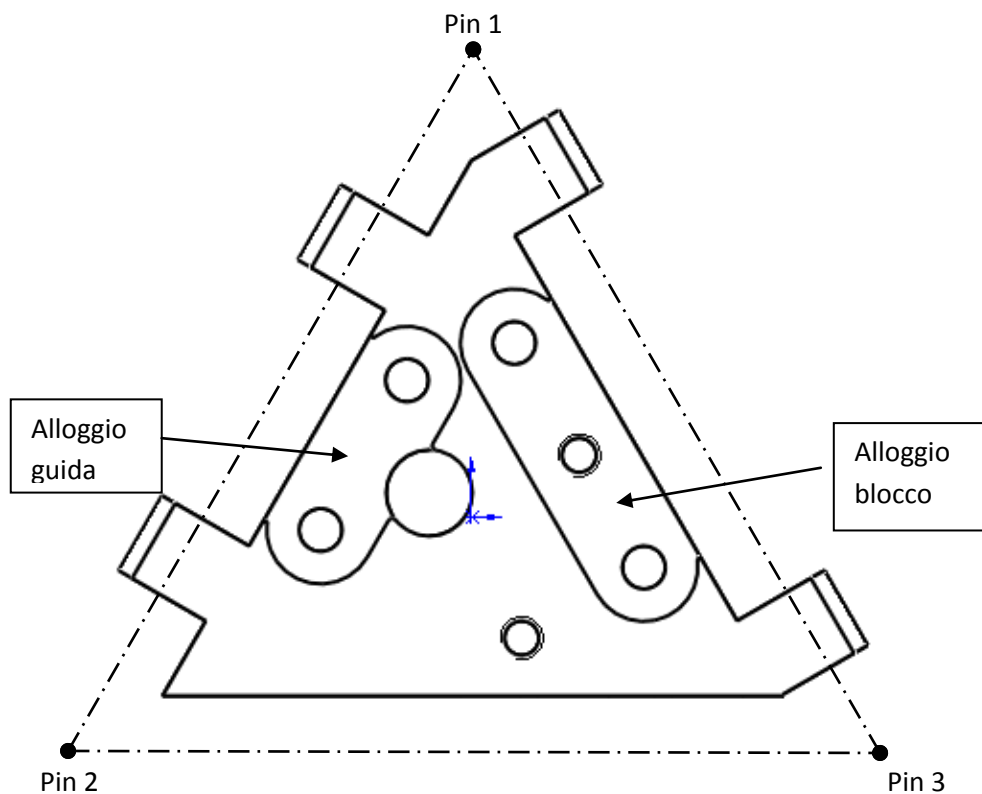


Figura 4.40: dimensioni triangolo dati guida e blocco.

In questo paragrafo saranno spiegate le conseguenze dimensionali sul resto del sistema che questa soluzione comporta. Data la dimensione critica ovvero la distanza tra gli incroci degli assi delle cerniere, si sono potute calcolare con le equazioni Matlab descritte nel capitolo 3 le grandezze critiche mancanti.

- a) L'angolo relativo massimo assumibile “ $\alpha$ ”, considerando che si desiderano migliorare le performances e dunque ridurre il raggio di raccordo a 50 [mm] risulta essere pari a  $25^\circ$  [deg].



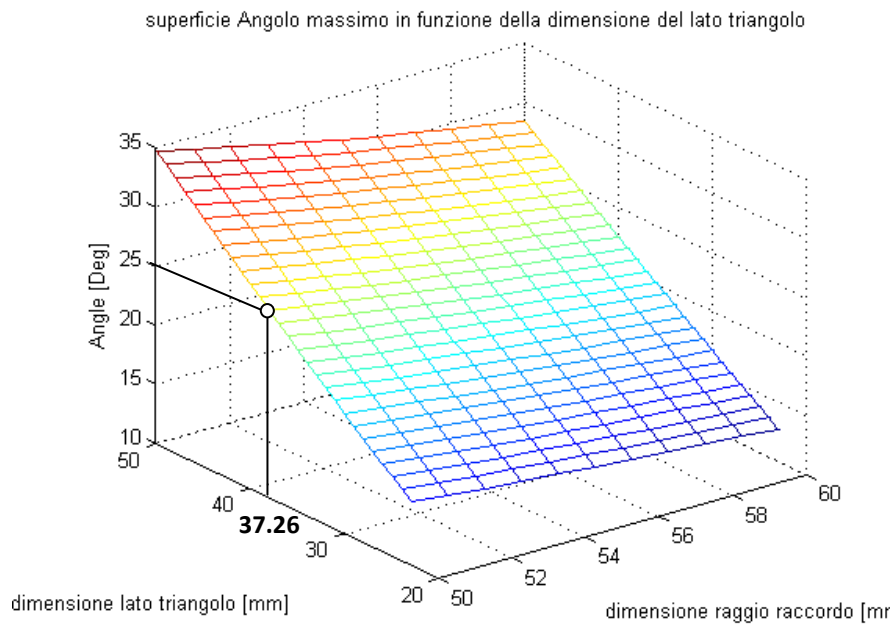


Figura 4.41 Superficie di risposta dove si evidenzia l'angolo massimo.

- b) Il numero di settori che compongono la striscia compatibilmente con le richieste si ottiene incrociando i dati. Saranno necessari in totale 17 settori, e dunque considerando il settore centrale solidale all'haptic master i settori a sbalzo saranno di conseguenza 8 per lato.

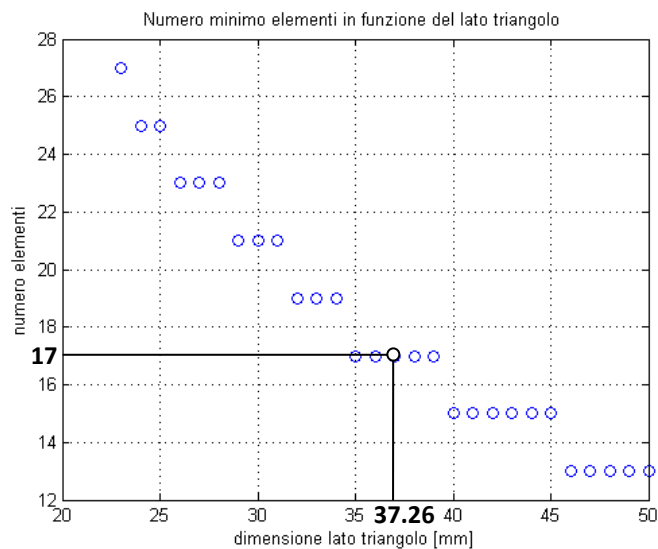


Figura 4.42: Numero elementi triangolari in funzione del lato triangolo.

E' fondamentale sottolineare l'importanza dell'angolo di inclinazione relativa " $\alpha$ ", parametro base che ha permesso lo sviluppo di tutte le valutazioni sugli ingombri di tutte le parti del sistema, specialmente per quanto riguarda morsa e puleggia. Seguono alcune considerazioni riguardo alcuni dettagli costruttivi di importanza rilevante.

### Pin

Il posizionamento del pin esattamente all'incrocio degli assi si è ottenuto inserendo l'elemento sul braccio del potenziometro, in questo modo si mantiene la striscia tattile lontana dall'elemento potenziometro, impedendo la collisione tra i due.

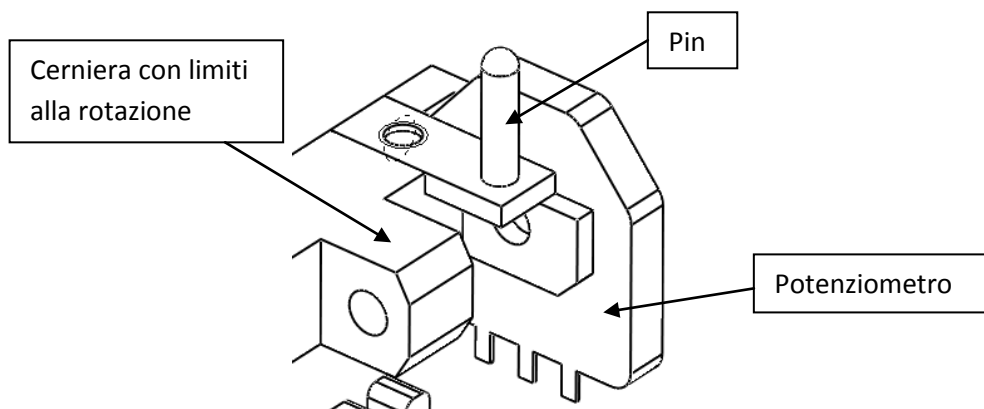


Figura 4.43: Pin distanziamento posizionato all'incrocio degli assi e cerniera.

### Blocco rotazione di pezzo

E' opportuno impedire la rotazione del settore triangolare oltre un certo limite per evitare che il filo SMA di movimentazione possa danneggiarsi in conseguenza ad un urto accidentale. Sulla cerniera del triangolo si è ricavato di pezzo tramite sfaccettature il limite massimo di inclinazione che si è deciso consentire, pari a  $30^\circ$ . In figura 4.43 si può vedere il layout della cerniera con le due sfaccettature.

### Fissaggio e isolamento SMA movimentazione, sollevamento, scarico

Fondamentale, è il sistema di isolamento tra sistema e attuatore a trazione SMA, difatti, la maggioranza delle strutture del sistema sono in metallo, materiale inevitabilmente conduttore di corrente, dunque è indispensabile che in nessun caso questo entri in contatto con il filo SMA. In caso contrario essendo semplificabile tutto il sistema come un unico conduttore, si creerebbero inevitabili corto circuiti.

Si descrivono dunque il sistema di isolamento, il fissaggio al sistema nonché l'aggancio dei fili elettrici.

Si osserva in generale, che dove possibile è preferibile costruire il componente in contatto con il filo SMA in materiale non conduttore (teflon). Dove è necessario invece che il componente sia metallico per questioni di resistenza meccanica, occorre provvedere a un sistema di rivestimento isolante (vernice, nastro adesivo per elettricisti resistente alle alte temperature).

#### *SMA movimentazione*

E' in contatto con: puleggia ove si avvolge, guida e triangolo.

E' fissata alla vite senza fine ad un capo e al triangolo all'altro.

La puleggia è in teflon, dunque non vi sono problemi di isolamento, il fissaggio ad essa è garantito da una vite che serra la SMA nel foro superiore, tra i filetti e la plastica della vite senza fine. Il filo di alimentazione è inserito lateralmente nel foro ove entra la SMA ed è bloccato a pressione dalla punta della vite di serraggio.

La guida è in acciaio, occorre un isolamento tramite vernice isolante spray ad alta resistenza, o nastro isolante, sempre ad alta resistenza per evitare che con lo strisciamento e la temperatura a lungo andare si usuri perdendo la funzionalità.

L'isolamento e il fissaggio al triangolo si risolve con un foro passante in cui è inserito trasversalmente un cilindro in teflon, il filo in SMA passa attorno ad esso e viene fissato sulla puleggia, sempre in teflon, presente sul triangolo cui è solidale la guida, sempre tramite un foro e una vite, Il filo conduttore è bloccato sulla puleggia dalla stessa vite.

#### *SMA sollevamento*

E' in contatto con: leve della morsa, bracci e forse molla, da cui occorre isolare tutti questi componenti nei punti di contatto poiché sono tutti metallici, tramite nastro o vernice spray ad alta resistenza.

E' fissata ai due estremi delle leve, da un lato alloggia in una sede ricavata nella leva, dall'altro è fissata tramite un dispositivo che tramite una vite va a serrare i due capi del filo.

I fili conduttori elettrici sono bloccati ad un capo dalla SMA che si avvolge all'esterno, dall'altro sul sistema di serraggio che ha anche il compito di serrare la SMA.

*SMA di scarico*

Non è in contatto con alcun componente, sul braccio di scarico scorre attorno a un perno in teflon che funge da rinvio, mentre è fissata sulla puleggia dove c'è la spianatura per l'incastro con il blocco, da due viti che hanno il compito di condurre anche l'alimentazione.

Cavi trasmissione corrente/segnale

Si accenna una possibile soluzione per quanto riguarda il posizionamento e la gestione dei cavi per la trasmissione della corrente e dei segnali delle diverse parti. La soluzione migliore che comporta minor peso e ingombro è collegare in serie dei chip, ciascuno contenente tutti i cavi sia per l'alimentazione che per il segnale.

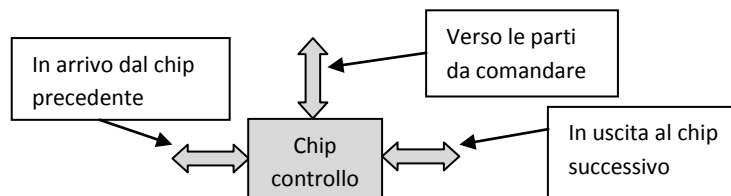


Figura 4.44: Idea concettuale per il Chip di gestione segnali/correnti.

Vite fine corsa

Sul triangolo si è pensato di inserire un congegno che impedisse la collisione degli organi costitutivi, nel caso in cui la rotazione relativa massima di 25° venisse accidentalmente superata. Si è pensato di inserire una vite che in posizione di inclinazione relativa pari a 25° fosse in battuta con la guida e ne fermasse così la corsa. Inoltre tale soluzione è sfruttata dal sistema di taratura della striscia, descritto nel capitolo 5.

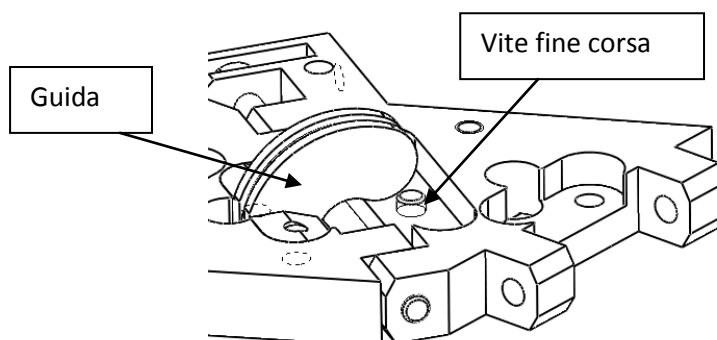


Figura 4.45 Coppia di settori con guida e vite di fine corsa.

Settore centrale

L'intera striscia sarà costituita dalla ripetizione del modulo base fatta eccezione per il settore centrale connesso all'haptic master, difatti la striscia, come espresso da richieste progettuali, deve essere necessariamente simmetrica. Sarà quindi necessario un elemento che presenti su entrambi i lati il sistema di blocco, e di conseguenza due morse, due pulegge e due potenziometri. Si osserva che è impossibile pensare a una soluzione a due guide, che avrebbe risolto non pochi problemi per quanto riguarda il posizionamento delle due pulegge e dei potenziometri. Questo a causa della certa collisione delle due morse poste sui lati incernierati in caso di inclinazione relativa, essendo solidali ambedue ai settori adiacenti posti in rotazione. Il modulo base sarà descritto nel dettaglio nel capitolo 5 focalizzando sulle diverse funzionalità degli elementi, mentre ora si riporta qualche immagine del settore centrale con indicate le parti costituenti.

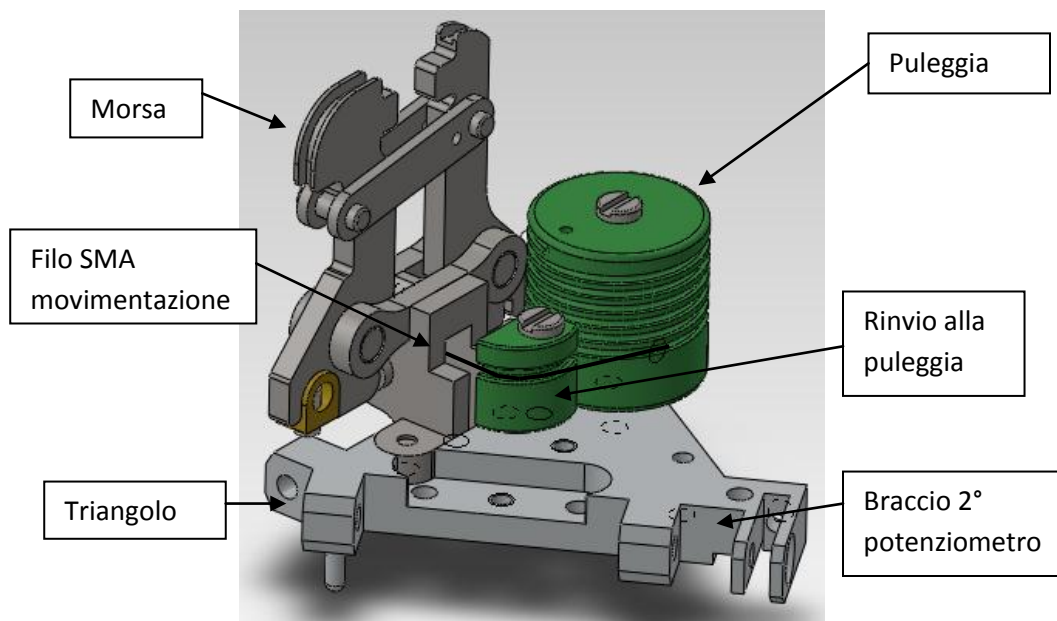


Figura 4.46: Il settore centrale lato puleggia e rinvio.

Il settore centrale è simmetrico rispetto all'altezza che ha per base il lato sprovvisto di cerniera, dunque in figura 4.46 e 4.47, si riporta il triangolo di base con le parti montate solo su una delle due metà simmetriche, in modo che risultino maggiormente visibili. Si notano le due sedi per i potenziometri e i pin di posizionamento solidali a tutti gli spigoli, essendo il settore riferimento

centrale di tutta la striscia. Inoltre è necessario modificare leggermente l'attacco dell'elemento blocco, asportando una piccola sezione per impedire la collisione nel montaggio con l'altro elemento blocco. Per evidenti motivi di spazio, la puleggia non è stato possibile posizionarla rispettando la tangenza con il filo SMA in uscita dalla guida. Di conseguenza è stato necessario aggiungere un elemento di rinvio realizzato in teflon come la puleggia, questo inoltre rispetta il raggio di raccordo minimo imponibile al filo SMA ed è serrato al triangolo con le stesse modalità della puleggia.

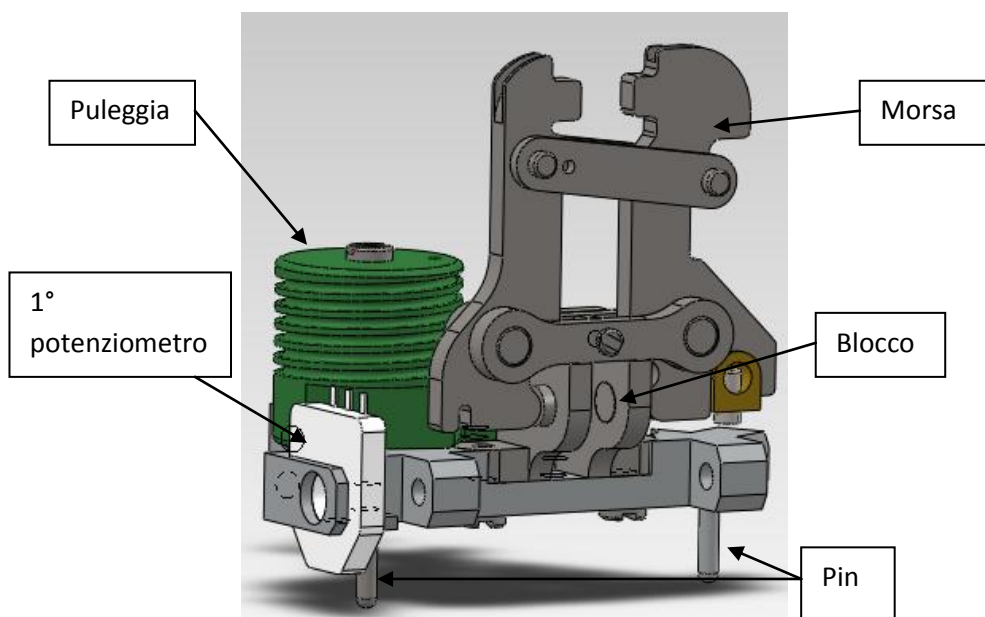


Figura 4.47: Il settore centrale lato morsa e potenziometro.

#### 4.4 Dimensionamenti

Il sistema per quanto riguarda tutte le sue parti, al di fuori delle molle e dei fili SMA, risulta essere uguale per tutti i settori lungo lo sviluppo della striscia a partire dal settore centrale verso gli estremi. Questi sono dimensionati in modo da essere in grado di sopportare le sollecitazioni più gravose rilevate nelle situazioni operative più critiche. Sarebbe stato possibile rivedere la progettazione di tutti gli elementi settore per settore considerando sollecitazioni decrescenti, e ottenendo dei vantaggi per quanto riguarda il peso dell'intero sistema. Per contro Sarebbero aumentati considerevolmente i costi di realizzazione dei pezzi, considerando che una volta impostata una macchina utensile per realizzare un pezzo meccanico, i successivi hanno costi decisamente inferiori dell'ordine di 1/20 il costo del primo. E' evidente come un tale approccio sia dunque assolutamente svantaggioso per quanto riguarda i costi realizzativi.

Contrariamente, sarebbe assurdo fare lo stesso discorso per quanto riguarda molle e fili SMA, poiché è evidente che a seconda della posizione del settore che dovranno attuare, sarà completamente diverso il dimensionamento. E' chiaro che le forze in gioco saranno di entità considerevolmente decrescente all'allontanarsi dal settore centrale e avvicinandosi agli estremi. Dunque dimensionare tutti i sistemi di attuazione sulla situazione più critica vorrebbe dire sovradimensionare il sistema con inutile dispendio energetico ingiustificato.

Siccome la striscia è simmetrica rispetto al settore centrale, per il dimensionamento si riporterà sempre una "semi striscia" ricordando che il discorso fatto è valido anche per l'altra metà.

#### 4.4.1 Dimensionamento sistema di movimentazione:

La lunghezza del filo è uguale per tutti i settori, in quanto definita dato il raggio della guida “ $r=7,5 [mm]$ ” e l’angolo massimo da rappresentare “ $\alpha=25^\circ [deg]$ ”, valori costanti per tutti i settori triangolari lungo lo sviluppo della striscia. La lunghezza effettiva è definita pari a circa 260 [mm], tale lunghezza è necessaria a coprire la variazione di lunghezza considerando l’escursione massima concessa dai limiti ricavati di pezzo sulla cerniera del triangolo pari a  $60^\circ [deg]$ , prevedendo un allungamento del 3%. In tal modo si tutela definitivamente l’integrità del filo in conseguenza di urti accidentali.

Il dimensionamento del sistema di forze necessario alla movimentazione è incentrato sul calcolo della coppia necessaria della molla torsionale e del rispettivo filo SMA di trazione. Le coppie di settori sono dimensionate uguali a due a due (1-2 e 2-3, 3-4 e 4-5, 5-6 e 6-7, 7-8 e 8-9) essendo il braccio di applicazione del carico distribuito rispetto alla relativa cerniera molto simile. Il settore identificato dal numero 9 è il centrale solidale all’haptic master. Il braccio è pari alla metà della distanza tra vertice della striscia e cerniera oggetto del dimensionamento (il braccio è la distanza tra baricentro dei settori a sbalzo e cerniera). Dunque saranno previste 4 tipologie di molle e rispettivo filo SMA per le 8 coppie di settori in analisi.

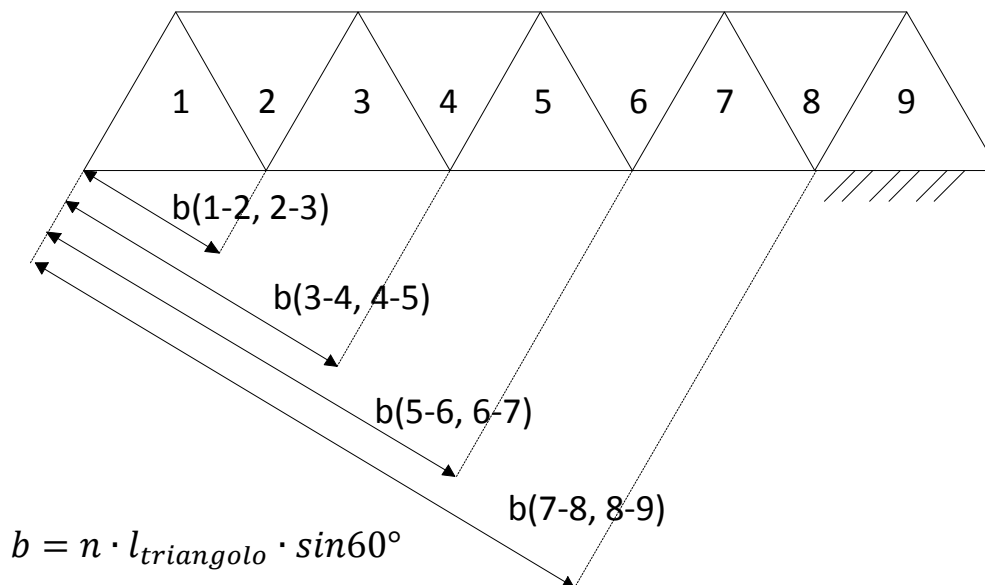


Figura 4.48: Distanze tra vertice e cerniera, “b” indica il doppio del braccio.



Siccome le modalità di dimensionamento sono le medesime per ciascuna coppia di cerniere, si riporta solo il procedimento relativo alla cerniera più critica, ovvero la 8-9 in cui è richiesta la molla torsionale con la coppia maggiore di tutto il sistema. Come detto in precedenza, si adotterà la stessa molla anche per la cerniera 7-8.

La molla deve essere in grado di sostenere, in configurazione di momento minimo disponibile, l'intero carico distribuito. Questa configurazione corrisponde al caso critico in cui tutti i settori sono allineati a sbalzo massimo a esclusione del settore centrale inclinato di  $25^\circ$ , descritta in figura 4.49.

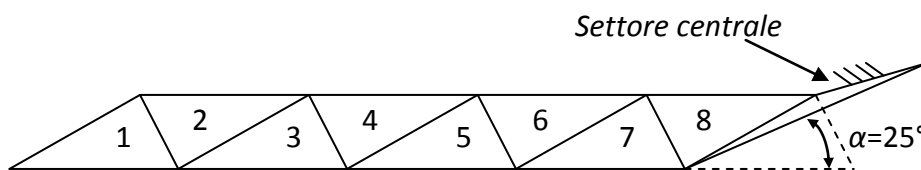


Figura 4.49: Configurazione critica per dimensionamento  $M_{min}$ .

*Procedura identificazione parametri:*

- 1) Si è stimato il carico distribuito dei settori a sbalzo con simulazione Solid Works, tenendo conto di tutte le parti non presenti nel disegno (striscia plastica, maniglie, cavi elettrici ecc.) e con opportuna sovrastima.
- 2) Si è dimensionata la coppia minima della molla " $M_{min}$ ", moltiplicando il carico distribuito per il braccio baricentrico rispetto alla cerniera, questo valore è stato incrementato del 10%, in modo da lavorare nella "zona rettilinea" di trazione del filo SMA in ogni situazione.

$$M_{min}[Nmm] = 1,1 \cdot F_{distr.}[N] \cdot b_{baricentr.}[mm]$$

- 3) Si è calcolata la rigidezza della molla torsionale " $k_{molla}$ ", dividendo il valore di coppia minima richiesta, per i  $335^\circ$  di rotazione.

$$k_{molla} \left[ \frac{Nmm}{deg} \right] = \frac{M_{min}[Nmm]}{335^\circ}$$

- 4) Si è calcolata la coppia massima che la molla potrà imporre in condizioni operative moltiplicando la rigidezza per la torsione massima pari a  $385^\circ$ .

$$M_{max}[Nmm] = k_{molla} \left[ \frac{Nmm}{^\circ} \right] \cdot 385^\circ$$

- 5) La forza minima di trazione richiesta al filo SMA sarà in configurazione descritta in figura 4.49 in cui dovrà contrastare solamente la coppia dovuta al 10% aggiuntivo descritto al punto 2). La forza massima richiesta al filo SMA è notevolmente sovradimensionata in quanto oltre a tenere conto della coppia massima che può fornire la molla " $M_{max}$ ", considera anche il caso "impossibile" in cui la striscia sia capovolta e il carico distribuito vada dunque ad aggiungersi completamente alla coppia massima della molla.

Si riporta un grafico in cui è possibile vedere chiaramente la modalità di scelta della molla.

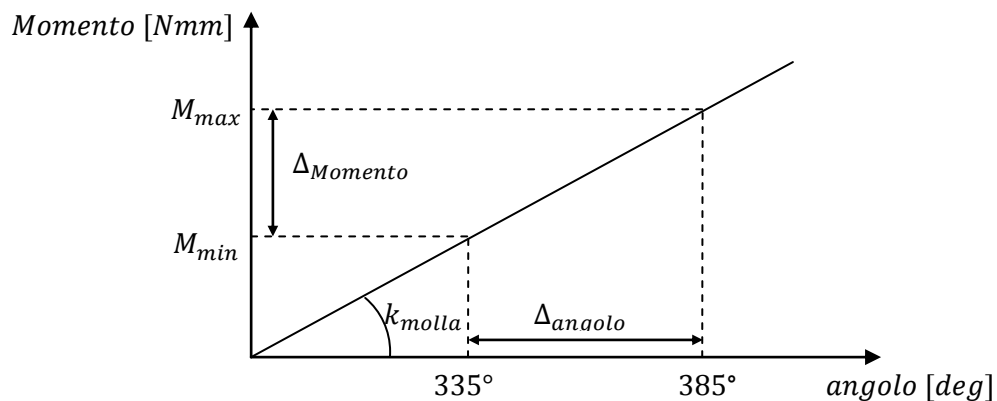


Figura 4.50: Momento minimo e massimo della molla.

Si riportano quindi i valori numerici ottenuti dal dimensionamento descritto, raccolti in tabelle Excel, indicando caso per caso il filo scelto. Si osserva che la forza di trazione del filo SMA è notevolmente superiore al valore stimato come massimo richiesto (che è già di per se una sovrastima), in questo modo si risolvono anche eventuali riduzioni di prestazioni delle SMA.

**dimensionamento molla movimento settore 8-9, 7-8**

braccio guida SMA	7,50 [mm]
braccio forza distribuita	64,54 [mm]
massa settori a sbalzo	260,4 [g]
Momento carico distrib	164,86 [Nmm]
<b>DELTA 10%</b>	<b>16,49 [Nmm]</b>
momento minimo molla	181,35 [Nmm]
rigidezza molla torsionale	0,54 [Nmm/°]
forza min filo SMA	2,20 [N]
forza max filo SMA	49,77 [N]

Si usano 3 fili diametro 200 per una forza di trazione pari a 57[N].

**dimensionamento molla movimento settore 6-7, 5-6**

braccio guida SMA	7,50 [mm]
braccio distribuita	48,40 [mm]
massa settori a sbalzo	188,8 [g]
Momento carico distrib	89,65 [Nmm]
<b>DELTA 10 %</b>	<b>8,96 [Nmm]</b>
momento minimo molla	98,61 [Nmm]
rigidezza molla torsionale	0,29 [Nmm/°]
forza min filo SMA	1,20 [N]
forza max filo SMA	27,06 [N]

Si usano 2 fili diametro 200 per una forza di trazione pari a 38[N].

**dimensionamento molla movimento settore 4-5, 3-4**

braccio guida SMA	7,50 [mm]
braccio distribuita	32,27 [mm]
massa settori a sbalzo	117,2 [g]
Momento carico distrib	37,10 [Nmm]
<b>DELTA 10%</b>	<b>3,71 [Nmm]</b>
momento minimo molla	40,81 [Nmm]
rigidezza molla torsionale	0,12 [Nmm/°]
forza min filo SMA	0,49 [N]
forza max filo SMA	11,20 [N]

Si usa 1 filo diametro 200 per una forza di trazione pari a 19[N].

dimensionamento molla movimento settore 2-3, 1-2	
braccio guida SMA	7,50 [mm]
braccio distribuita	16,13 [mm]
massa settori a sbalzo	46,6 [g]
Momento carico distrib	7,38 [Nmm]
DELTA 10%	0,74 [Nmm]
momento minimo molla	8,11 [Nmm]
rigidezza molla torsionale	0,13 [Nmm/°]
forza min filo SMA	0,10 [N]
forza max filo SMA	2,91 [N]

Si usa il filo diametro 100 per una forza di trazione pari a 4,7[N].

Un'ultima considerazione riguarda le molle, le prime tre tipologie non sono disponibili a catalogo, e vanno commissionate ad un produttore di molle [29] [30] indicando diametro esterno massimo di 5 [mm], il diametro interno minimo (deve contenere l'albero della cerniera), lunghezza massima di 12[mm] e rigidezza  $k_{molla}$ . L'ultima molla è stata scelta a catalogo dalla società Vanel [29], il modello è la G.045.050.1200 di cui si riportano le specifiche in appendice [D].

#### 4.4.2 Dimensionamento morsa

La configurazione critica è ancora una volta quella di striscia con i settori allineati, disposta orizzontalmente.

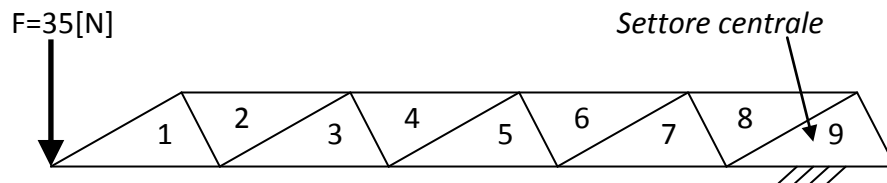


Figura 4.51: Striscia rettilinea con forza a sbalzo.

Identicamente al dimensionamento eseguito per la molla di movimentazione, le morse atte al bloccaggio della coppia di settori sono dimensionate uguali a due a due, questa volta il braccio del carico a sbalzo di entità 35 [N] è il valore indicato da "b" in figura 4.48 Per la scelta delle molle di serraggio si è proceduto dunque calcolando la forza di attrito necessaria in corrispondenza della superficie dei perni per bilanciare il carico a sbalzo. Si osserva che nel calcolo del momento massimo non si considera il carico distribuito, perché è vinto interamente e superato dalla molla torsionale.

Qui di seguito vediamo come agisce il sistema di forze scambiato dai componenti all'interno del sistema morsa; siccome il problema è simmetrico, vediamo solo la metà sinistra del sistema:

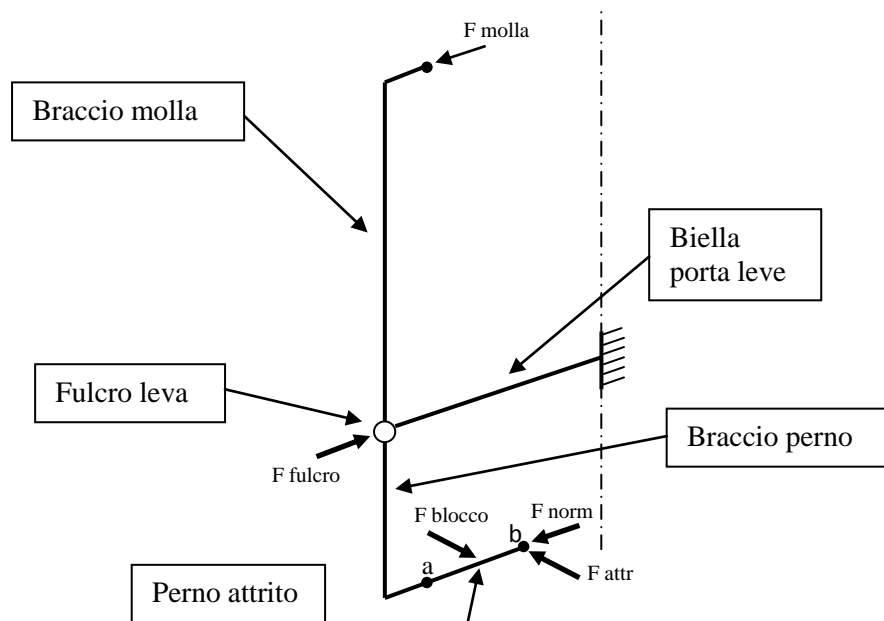


Figura 4.52: Schema statico degli elementi della morsa.

Dove con  $a$  si identifica il contatto tra la leva e il perno ad attrito, mentre con  $b$  il contatto tra perno e superficie guida dove si genera l'attrito. Il verso della forza d'attrito sulla faccia del perno è indicativo e si intende concorde al verso in cui la guida ruoterebbe se lasciata libera. Si osserva che si studia il caso statico, in quanto il sistema non vede parti in movimento in conseguenza dell'applicazione dei carichi, e le deformazioni sono trascurabili grazie al dimensionamento eseguito in fase progettuale.

*Procedura identificazione parametri:*

- 1) Si calcola il momento agente sulla cerniera in conseguenza del carico a sbalzo, si omette il carico distribuito già bilanciato dalla molla.

$$M_{F. sbalzo}[Nmm] = F. sbalzo. [N] \cdot b_{applicazione}. [mm]$$

- 2) Si calcola la forza di attrito necessaria a bilanciare il momento della forza a sbalzo che ha per braccio l'elemento guida, si ricorda che le forze di attrito sono su entrambe le superfici della guida.

$$F_{attr}[N] = \frac{1}{2} \frac{M_{F. sbalzo}[Nmm]}{b_{guida}[mm]}$$

- 3) Si ricava la forza normale da imporre ai perni per garantire la forza di attrito richiesta, considerando il coefficiente di attrito acciaio su acciaio pari a 0,7

$$F_{normale} = \frac{F_{attr}}{\mu_{attr.}}$$

- 4) Si calcola in ultimo la forza richiesta alla molla per imporre tramite leveraggi la forza normale ai perni.

$$F_{molla} = F_{normale} \cdot \frac{b_{perno}}{b_{molla}}$$

In questo modo abbiamo ottenuto la forza minima che deve generare la molla per garantire la tenuta. Si riportano le tabelle Excel usate.

dimensionamento molla blocco morsa 8-9, 7-8		
Momento forza a sbalzo	4517,53	[Nmm]
braccio guida	6,00	[mm]
coeff.attrito acc/acc	0,70	
Forza attrito	376,46	[N]
Forza normale ai perni	537,80	[N]
braccio perno	5,00	[mm]
braccio molla	18,00	[mm]
Forza molla	149,39	[N]

Molla scelta a catalogo Vanel [29] “**C.040.090.0143.A**” da 164 [N] a 9[mm] di lunghezza, rigidezza 31 [N/mm].

dimensionamento molla blocco morsa 6-7, 5-6		
Momento forza a sbalzo	3388,15	[Nmm]
braccio guida	6,00	[mm]
coeff.attrito acc/acc	0,70	
Forza attrito	282,35	[N]
Forza normale ai perni	403,35	[N]
braccio perno	5,00	[mm]
braccio molla	18,00	[mm]
braccio scarico	15,50	[mm]
Forza molla	112,04	[N]

Molla scelta a catalogo Vanel [29] “**C.056.110.0119.A**” da 116 [N] a 9[mm] di lunghezza, rigidezza 40 [N/mm].

dimensionamento molla blocco morsa 4-5, 3-4		
Momento forza a sbalzo	2258,77	[Nmm]
braccio guida	6,00	[mm]
coeff.attrito acc/acc	0,70	
Forza attrito	188,23	[N]
Forza normale ai perni	268,90	[N]
braccio perno	5,00	[mm]
braccio molla	18,00	[mm]
braccio scarico	15,50	[mm]
Forza molla	74,69	[N]

Molla scelta a catalogo Vanel [29] “**C.044.080.0167.A**” da 79 [N] a 9[mm] di lunghezza, rigidezza 10 [N/mm].

dimensionamento molla blocco morsa2-3, 1-2		
Momento forza a sbalzo	1129,38	[Nmm]
braccio guida	6,00	[mm]
coeff.atrito acc/acc	0,70	
Forza attrito	94,12	[N]
Forza normale ai perni	134,45	[N]
braccio perno	5,00	[mm]
braccio molla	18,00	[mm]
braccio scarico	15,50	[mm]
Forza molla	37,35	[N]

Molla scelta a catalogo Vanel [29] “C.046.075.0157.A” da 41 [N] a 9[mm] di lunghezza, rigidità 6 [N/mm].

Tutte le molle scelte in questa sezione a catalogo Vanel [29] sono riportate in appendice [D].

Si osserva che la sollecitazione teorica sulla superficie di contatto del perno con la guida risulta dunque nel caso di maggior sollecitazione ovvero sulla morsa con la molla da 164 [N] pari a:

$$\sigma_{norm} = \frac{F_{norm} [N]}{S_{contatto}[mm^2]} = 84[MPa]$$

Tale valore è evidentemente in grado di garantire che sul componente non avvenga deformazione plastica, che comporterebbe danneggiamento superficiale della parte.



#### 4.4.3 Dimensionamento sistema di scarico

Sono necessarie tre verifiche: la prima volta a dimostrare che la SMA di trazione sia teoricamente in grado di imporre la forza necessaria al sollevamento, la seconda è una semplice verifica statica sulle forze in gioco, mentre la terza è un dimensionamento di massima della SMA di scarico e relativa molla di scarico.

1) Analizziamo la SMA di trazione della morsa, si verifica se questa riesce a comprimere la molla di serraggio dei millimetri necessari. In figura 4.53 si riporta la scomposizione delle forze imposte dal filo SMA agenti sulle leve. La somma dei momenti imposti sulle leve da tali forze rispetto al cir del sistema deve essere tale da superare il momento imposto dalla molla.

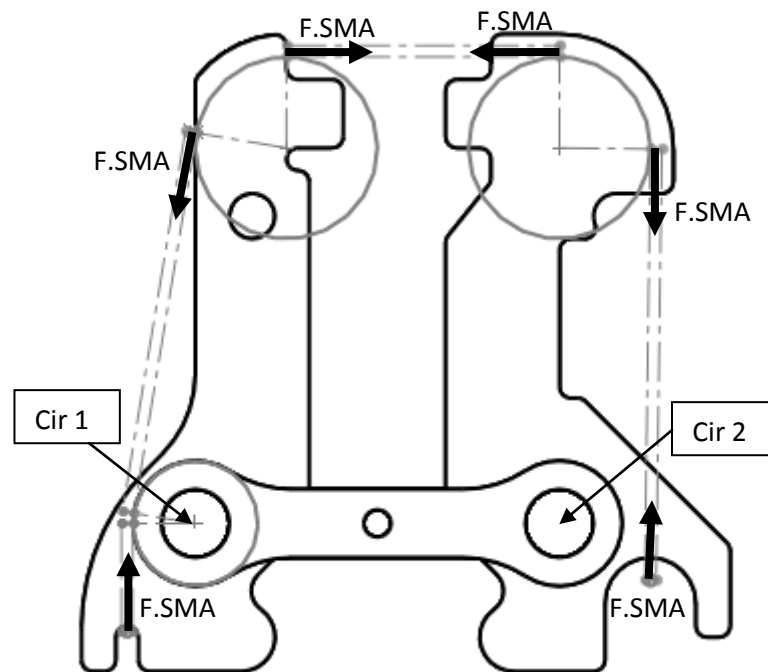


Figura 4.53: Posizione SMA di trazione.

I conti eseguiti su di un foglio Excel indicano la forza di trazione sul singolo filo richiesta per far fronte alle diverse molle scelte per la morsa nel dimensionamento precedente. Si osserva che la forza della molla è maggiorata del valore della rigidità per i due millimetri di corsa aggiuntiva. In tabella sono riportate le forze delle molle e i rispettivi fili SMA scelti per il sistema di trazione. Si osserva inoltre che la rotazione della leva comporta una variazione trascurabile dei momenti applicati.

F.Molla [N]	Momento molla [Nmm]	F.SMA richiesto [N]	diametro SMA scelta [ $\mu\text{m}$ ]	F.SMA limite [N]
226	4068	99	500	118
196	3528	86	500	118
99	1782	43	400	75
53	954	23	300	42

Figura 4.54: Tabella molle della morsa e rispettivo filo SMA di trazione.

2) Vediamo ora le forze agenti sul braccio di scarico, si osserva che la configurazione riportata è semplificata poiché trascura l'inclinazione della leva (di entità trascurabile) essendo il calcolo indicativo. siccome il problema è simmetrico, vediamo solo la metà sinistra del sistema:

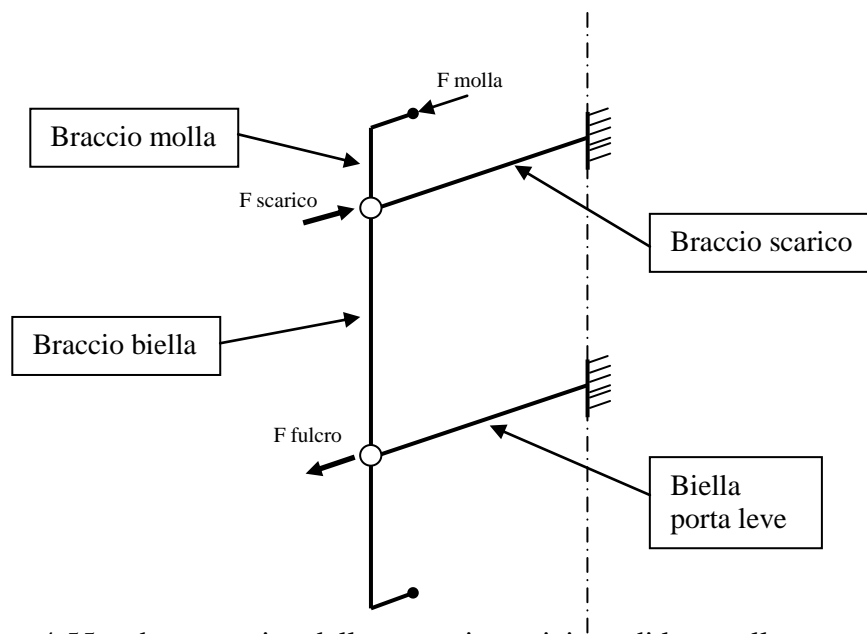


Figura 4.55: schema statico della morsa in posizione di leve sollevate.

Come si può notare non è più presente l'elemento perno, poiché non riceve nessun tipo di sollecitazione dal sistema di leve, mentre entra in gioco l'elemento braccio di scarico che è posto in trazione dalla molla, che si ricorda essere compressa ulteriormente di 1,5[mm] rispetto al modello precedente. La biella porta leve risulta ora sollecitata a compressione.

Il sistema di forze in gioco si ricava da semplice equilibrio dei momenti e traslazioni attorno al fulcro della leva, ovvero il perno che collega la biella porta leva alla leva.

Quindi si descrive il bilancio di forze mirato a ottenere la forza che sollecita a trazione il braccio di scarico, elemento più critico di questa configurazione.

$$F_{fulcro} = \frac{b_{molla}}{b_{biella}} \cdot F_{molla}$$

$$F_{scarico} = F_{fulcro} + F_{molla}$$

La sollecitazione maggiore agente sul braccio di scarico risulta ancora nel caso della morsa che monta la molla da 164 [N] cui vanno aggiunti ulteriori 45 [N] a causa dell'ulteriore compressione di circa 1,5 [mm]. In tal caso la trazione sul braccio di scarico risulta pari a:

$$F_{scarico} \cong 280[N]$$

Di conseguenza occorre dimensionare i bracci e i perni in modo che non avvengano fenomeni di deformazione plastica e la deformazione elastica risulti trascurabile.

3) In ultimo si esegue un rapido dimensionamento per quanto riguarda la SMA di scarico, uguale per tutti i settori, che deve essere in grado di contrastare la forza imposta dalla molla di scarico.

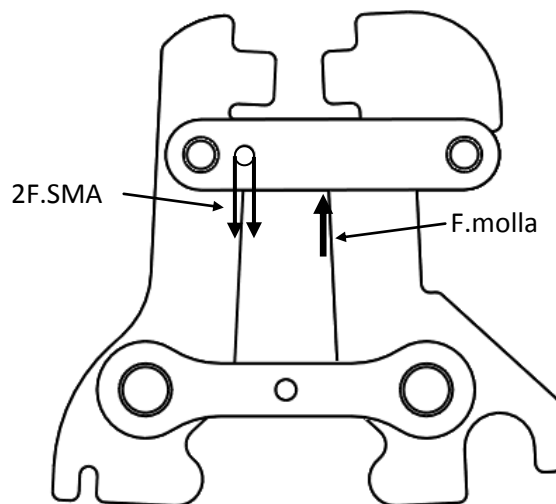


Figura 4.56: SMA di scarico e molla di scarico.

Si sottolinea che il dimensionamento relativo a questa parte è di massima, difatti comporta la messa in gioco di forze di entità minima, che non comportano conseguenze interessanti sugli sforzi all'interno del sistema. Si sceglie indicativamente la SMA di sezione 0,1[mm] che è dunque in grado di imporre una forza di 4,7 [N]. Essendo due fili in parallelo ad esercitare la forza di trazione sul braccio di scarico, la risultante è dunque di 9,4.[N]. La corsa necessaria è garantita dalla distanza dal punto di ancoraggio sulla puleggia al perno di rinvio serrato sul braccio, pari circa al doppio della corsa necessaria (lunghezza della SMA pari a 60 [mm] ). La molla scelta a catalogo Vanel risulta il modello “C.020.032.0100.AP” (in appendice [D] le caratteristiche), scelta secondo il bilancio dei momenti esercitati da SMA, con circa 9[N] di forza per un braccio di 2,5 [mm], e molla con 7,5 [mm] di braccio e di conseguenza 3 [N] di Forza disponibile a 8,5 [mm] di lunghezza (lunghezza necessaria per posizionare il braccio di scarico lontano dalla sede). La molla è inserita nella sua sede mediante l'uso di collanti, che eventualmente permettono anche il riposizionamento nel caso vi siano dei problemi riscontrati durante i test pratici.

### 4.5 Analisi elementi finiti

Siccome il concept deve essere progettato in modo che sia poi effettivamente possibile la sua realizzazione, si è eseguita con l'aiuto dell' Ing. Marco Citro e dell' Ing. Francesco Pucillo, dottorandi del dipartimento di meccanica, una analisi a elementi finiti con il software Abaqus. Lavorando parallelamente in questo modo si sono progettate le singole parti in modo che fosse verificata la resistenza, e dunque non vi sia effettivamente deformazione plastica in nessun punto, e sia trascurabile la deformazione elastica all'applicazione dei carichi. Tali requisiti sono imprescindibili per la funzionalità dell'intero sistema.

Una importante considerazione a prescindere dall'analisi, per quanto riguarda le dimensioni del lato del triangolo base costituente la mesh, riguarda le severe specifiche di carico applicato cui il sistema è sottoposto. In conseguenza del requisito di resistenza ad un carico a sbalzo pari a 35 [N] su 150 [mm] di braccio (minimo ), è evidente come le coppie in gioco nella cerniera più sollecitata, ovvero quella tra settore centrale solidale all'haptic master e il successivo, siano assolutamente importanti. E' infatti impensabile pensare a una miniaturizzazione mantenendo le specifiche di resistenza del sistema originale. Riducendo il carico applicato si sarebbe evidentemente potuto ottenere un sistema considerevolmente più piccolo e sfruttare così appieno i vantaggi dell'applicazione delle leghe a memoria di forma ai sistemi haptic.

Lo studio verte fondamentalmente su due aree: la morsa e dunque tutti gli elementi che la compongono, e l'intera striscia. Ambedue gli studi sulla morsa e sulla striscia hanno portato al dimensionamento di tutte le parti nel rispetto delle proprietà meccaniche dei diversi componenti. I risultati ottenuti dalle analisi sono stati usati per dimensionare e scegliere i materiali delle parti maggiormente sollecitate.

#### 4.5.1 Test morsa

Con il test sulla morsa si sono dimensionate correttamente tutte le parti maggiormente sollecitate, soprattutto per quanto riguarda i perni, le leve e i bracci che uniscono le leve, in modo che gli sforzi massimi risultino cautelativamente lontani dalla sollecitazione di snervamento del materiale usato. Inoltre si è verificato che le deformazioni elastiche siano trascurabili, e non influiscano in negativo durante il movimento dei settori causando eventuali collisioni impreviste.

In figura 4.56 vediamo la simulazione relativa alla morsa attiva, e dunque la verifica sugli sforzi su tutte le componenti coinvolte imponendo la forza della molla di entità massima pari a 164 [N] agli apici delle leve.

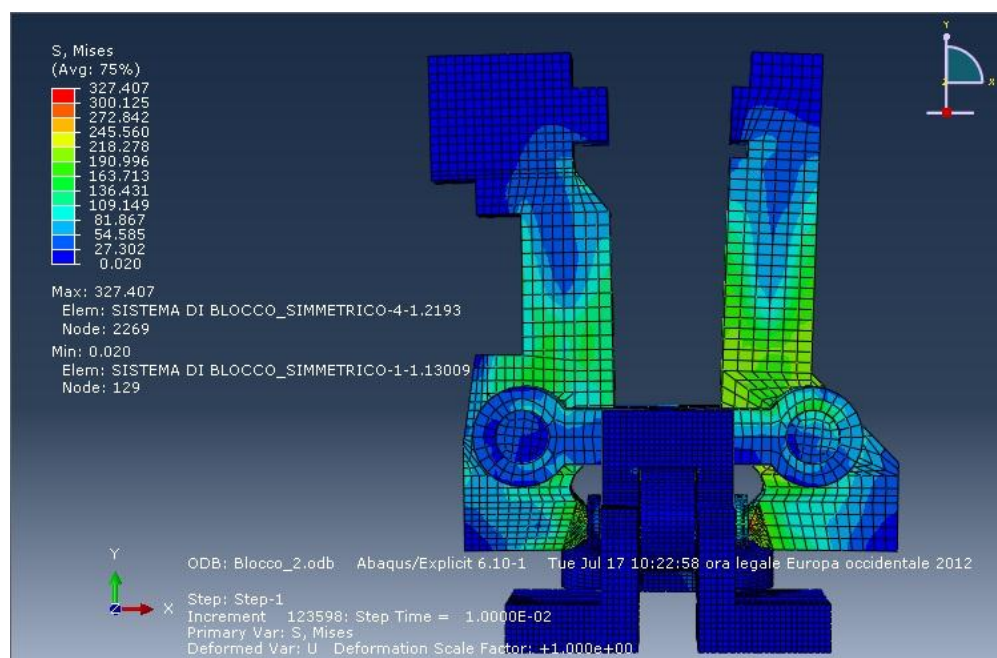


Figura 4.56: Sforzi Mises simulazione morsa attiva premente sui perni.

In figura 4.57 vediamo uno dei test di resistenza a morsa disattivata in cui il braccio di scarico assorbe la forza della molla. Questa immagine è in fase di sviluppo del sistema, difatti in conseguenza di questa analisi il diametro dei perni è stato maggiorato, per rispettare le richieste sull'entità della deformazione elastica, che risultava eccessiva per il rispetto delle collisioni all'interno del sistema complessivo.

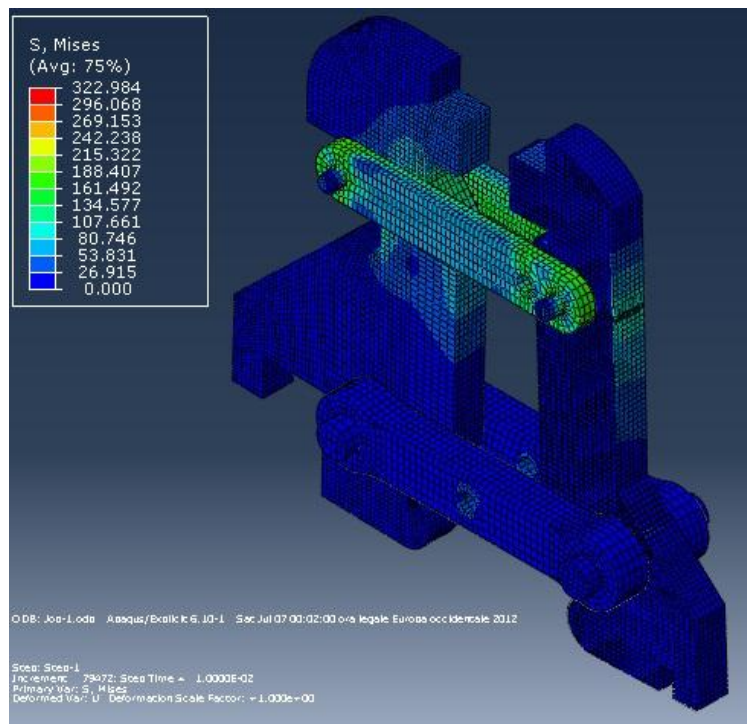


Figura 4.57: Sforzi Mises simulazione morsa inattiva.

#### 4.5.2 Test intera striscia

Con il test sulla striscia si è verificato con il modello di attrito che le forze imposte ai perni dalla morsa fossero effettivamente sufficienti a impedire lo scorrimento della guida in ogni posizione lungo la striscia. Inoltre si è verificata la resistenza delle cerniere dei triangoli in quanto le sollecitazioni sono lontane dai limiti di snervamento del materiale. In ultimo si è valutata la freccia massima totale del braccio a sbalzo con applicazione del carico di 35 [N] all'estremo, quantificata in circa 2 [mm] valore reputato ampiamente accettabile. Si ribadisce che tutte le deformazioni presenti sono sempre in campo elastico.

In figura 4.58 e 4.59 vediamo la striscia sottoposta al carico a sbalzo pari a 35[N] con le forze imposte ai perni ricavati nella simulazione illustrata in figura 4.56. Nella figura 4.58 vediamo gli sforzi di Von Mises, sui settori triangolari costituenti la mesh.

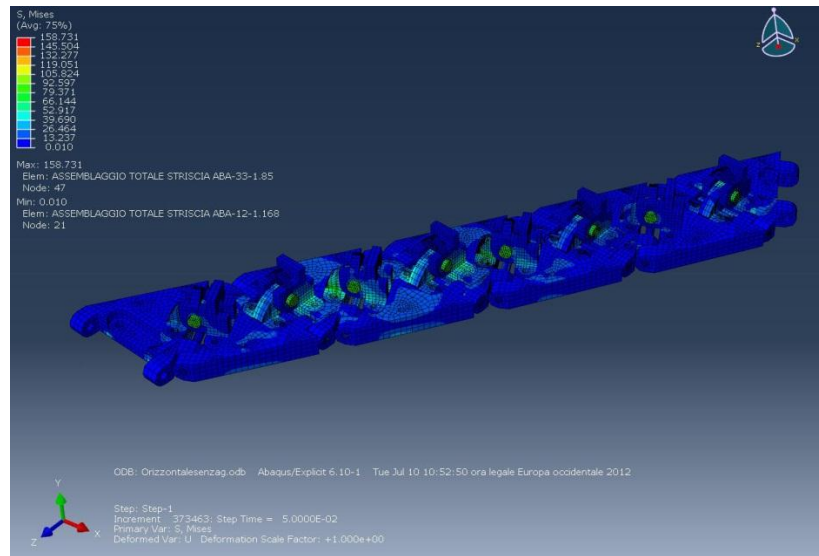


Figura 4.58: Sforzi di Mises sulla striscia con carico a sbalzo e forza normale imposta ai perni.

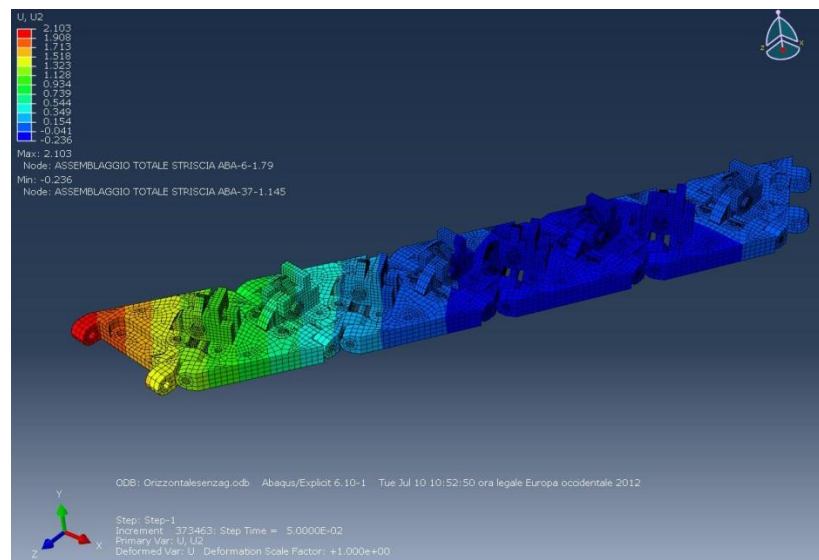


Figura 4.59: Spostamento verticale della striscia con carico a sbalzo e forza normale imposta ai perni.

### 4.5.3 Materiali

Un'ultima considerazione riguarda la scelta dei materiali che costituiranno i diversi elementi componenti il sistema, usati per le analisi Abacus.

*Materiali scelti per la morsa.*

Il sistema di blocco è costituito in acciaio inossidabile ( $E = 206000$  MPa,  $\nu = 0,33$ ). Per valutare l'eventuale plasticizzazione della parte terminale della leva, o della biella, si è inserito in Abaqus un modello di elasto-plasticità dell'acciaio a temperatura ambiente. L'andamento del diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  dell'acciaio scelto è riportato in figura 4.60.

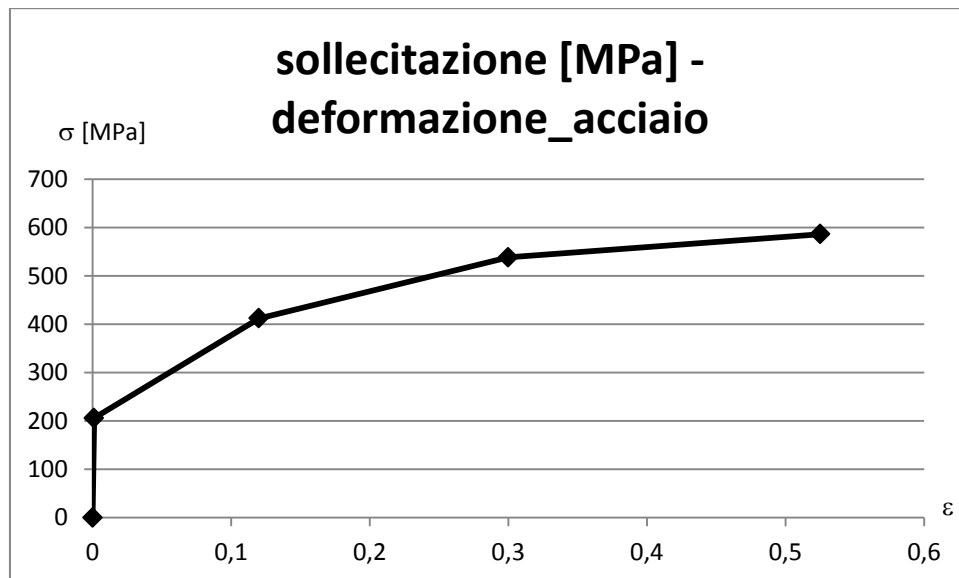


Figura 4.60: Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  dell'acciaio impiegato.

Per quanto riguarda i perni, si è scelto un acciaio di classe di resistenza 8.8, caratterizzato cioè da un limite di snervamento di 640 MPa ed uno di rottura di 800 MPa.



*Materiali scelti per la striscia.*

Per gli elementi triangolari si è scelto come materiale l'alluminio, del quale si riporta la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  in figura 4.61. E' stato scelto come materiale l'alluminio in favore della ridotta massa volumica e della migliore lavorabilità rispetto all'acciaio, date le dimensioni rilevanti di questi elementi, e l'entità non particolarmente critica degli sforzi in gioco.

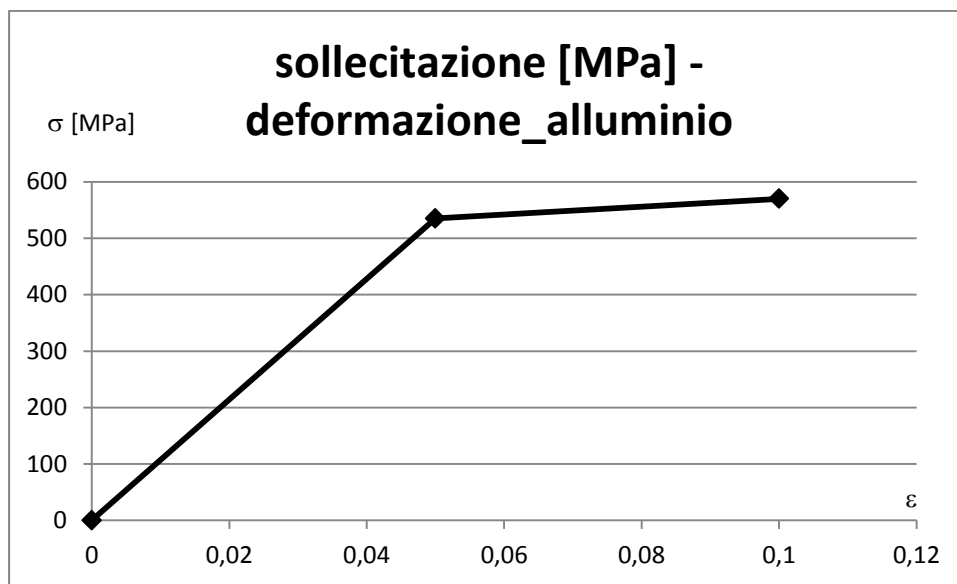


Figura 4.61: Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  dell'alluminio impiegato.

Gli elementi guida, blocco e perni sono in acciaio inossidabile, lo stesso descritto dal diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  riportato in figura 4.60.

In ultimo è opportuna una breve considerazione per quanto riguarda la resistenza a fatica, questa non è preoccupante (soprattutto in considerazione del limitato numero di cicli che verosimilmente saranno eseguiti dal sistema) e dunque non si è ritenuto giustificabile svolgere uno studio in questo senso.



## Capitolo 5

### **Descrizione SMA Satin e valutazioni.**

In questo capitolo si descriverà esaurientemente il nuovo sistema, proponendo inizialmente una visione d'insieme, e successivamente focalizzando l'attenzione sui moduli che ripetuti costituiscono la mesh.

Dopo una prima fase dunque descrittiva del sistema, si procede con una esauriente trattazione per quanto riguarda le procedure di funzionamento, sia per quanto riguarda le singole parti funzionali, come ad esempio il bloccaggio e lo sbloccaggio della morsa che immobilizza il sistema in posizione, sia riguardo le modalità di funzionamento previste ovvero l'esplorazione, il tocco e la modifica. In ultimo si forniscono chiare istruzioni relative alle procedure di primo avvio o di routine per garantire un corretto funzionamento nel tempo.

Il capitolo si conclude con una analisi delle prestazioni del nuovo sistema realizzato SMA attuato, sarà presentato dunque un confronto rispetto alla versione concettuale precedente di satin servo attuato.

Il nuovo concept sviluppato consiste in un'evoluzione del Satin per quanto riguarda il sistema di movimentazione dei settori costituenti la striscia, difatti la peculiarità del sistema consiste nell'utilizzo delle leghe a memoria di forma SMA (shape memory alloy) per generare il sistema di forze necessario al compimento delle diverse funzioni che permettono il funzionamento del sistema.

Il principio di funzionamento dei sottosistemi esterni alla striscia, quali: il sistema di visione, la movimentazione della striscia nello spazio tramite haptic master e il meccanismo di servomotori che consentono alla striscia le rotazioni quali rollio, beccheggio e imbardata, rimangono dunque sostanzialmente invariati. L'unico elemento che necessita di essere rivisto risulta il collegamento del settore centrale della striscia al sistema che permette rollio, beccheggio e imbardata, che risulta identico al precedente, fatta eccezione per una lieve modifica. Difatti le sedi dei servomotori che competono alla movimentazione dei settori più centrali della striscia nella versione precedente, non sono più necessarie, in quanto questi non sono più presenti nel sistema.

## 5.1 Satin SMA

Il sistema si presenta come una striscia costituita dalla ripetizione in serie di un numero dispari di moduli base pari a 17. L'elemento centrale alla striscia è vincolato all'haptic master grazie al sistema che le permette di muoversi tridimensionalmente nello spazio, consentendo le rotazioni di rollio, beccheggio e imbardata.

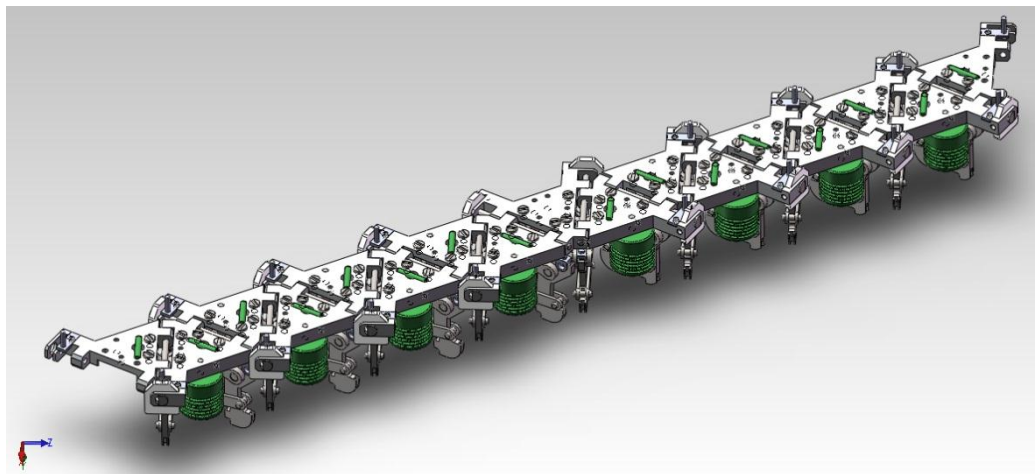


Figura 5.1: Striscia completa dei 17 settori in posizione orizzontale.

Come si nota in figura(1), la faccia superiore si presenta libera da elementi, difatti, oltre alle teste delle viti di fissaggio che hanno un ingombro molto ridotto, pari a 1 [mm] circa, l'unico elemento funzionale sporgente è il potenziometro, che consente la lettura dell'angolo relativo tra due settori successivi.

I pin che sollevano la striscia tattile in plastica impedendone la collisione con i settori triangolari durante l'inflessione, sono posti all'incrocio degli assi delle cerniere, ovvero a circa un millimetro di distanza dal potenziometro, questa posizione dunque, oltre a permettere un minor errore riducendo l'approssimazione posizionale, impedisce la collisione della striscia in plastica con il potenziometro.

La striscia tattile in plastica (non rappresentata in figura) rimane concettualmente identica alla versione precedente descritta nel capitolo 2, ed è collegata alla mesh di triangoli dai pin, secondo il medesimo principio di impedire la collisione in condizione di raggio di raccordo minimo rappresentato.

Sulla faccia inferiore sono invece presenti tutti gli elementi che consentono il compimento delle diverse funzioni necessarie al corretto funzionamento.

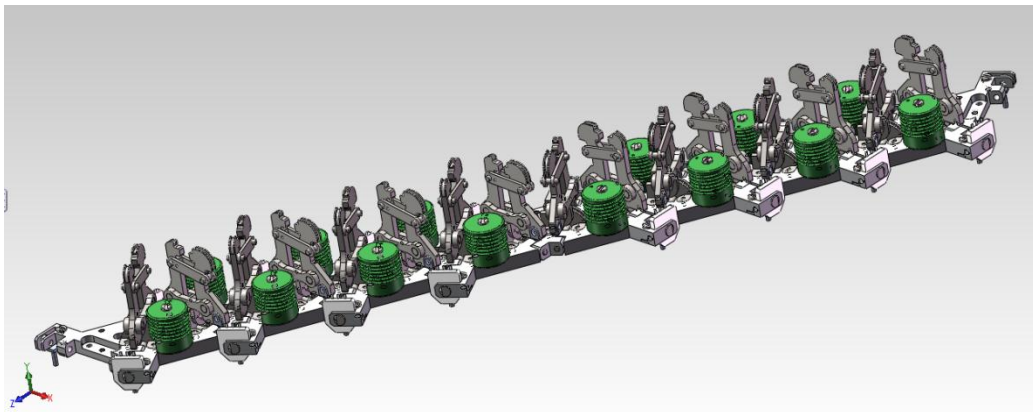


Figura 5.2: Striscia in posizione capovolta.

E' importante notare come tutti gli elementi siano molto compatti tra di loro, e in fase di progettazione, per evitare che questi collidessero ci si è serviti di modelli implementati in Matlab, che per quanto possibile, consentissero di avere delle linee guida per quanto riguarda lo sviluppo e le dimensioni dei diversi elementi.

Si osserva inoltre che il modulo base, triangolare, non è simmetrico rispetto alla sua altezza considerando come base il lato privo di cardini. Sono dunque previsti due tipologie di moduli base, differenziati come “destro” e “sinistro” per via della posizione del potenziometro rispetto al sistema di blocco.

Sostanzialmente il modulo sinistro rispetto al destro risulta speculare rispetto agli assi dei cardini, dunque l'unico elemento costituente che risulta speculare nelle due versioni è, oltre ai triangoli in alluminio, la vite su cui si avvolge la SMA che consente la rotazione relativa dei due settori adiacenti. Tutti gli altri elementi quali la guida, il sistema di blocco e i diversi perni non presentano differenze tra moduli “destri” e “sinistri”.

## 5.2 Modulo base

Il modulo base, è costituito dal settore triangolare, libero sulla faccia superiore, difatti tutti gli organi che assolvono alle funzioni fondamentali previste sono posti sulla faccia inferiore.

Ogni settore, a esclusione degli estremi, riporta tutti gli elementi funzionali che ne consentono sia il fermo in posizione che il movimento, a seconda della richiesta.

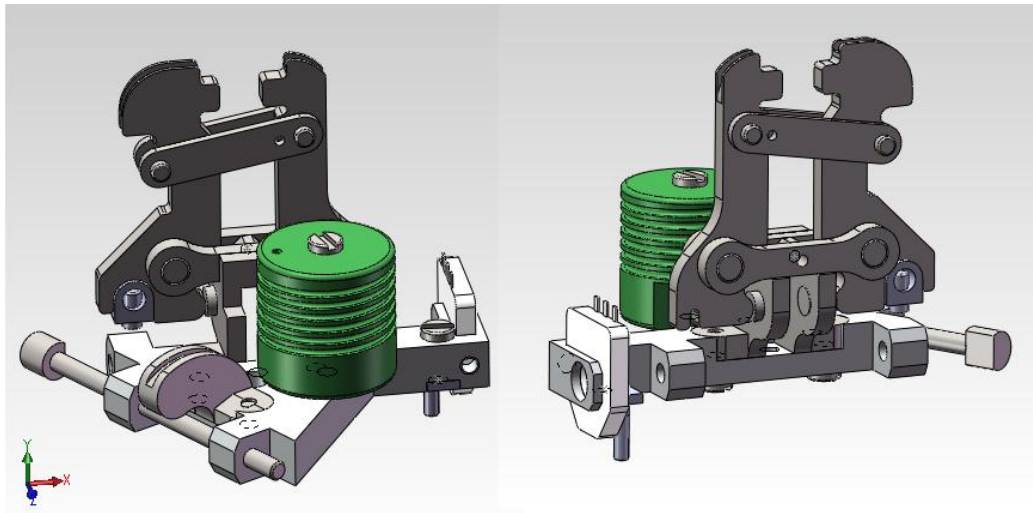


Figura 5.3: modulo base con vista lato guida a sinistra, e lato blocco a destra.

Tali organi si possono descrivere a partire dalle funzioni che compiono, e sono fondamentalmente riconducibili a 2 sottogruppi. Sono resi solidali da viti M2 ai due settori adiacenti, incernierati tra di loro.

I due sottogruppi sono:

- il sistema di movimentazione, cui appartengono: la SMA di movimentazione e la relativa molla torsionale di richiamo, la vite di avvolgimento, la guida e il potenziometro;
- il sistema di blocco: costituito dalla base del blocco e da tutti gli elementi ad esso connessi, e dunque le SMA e le molle che ne permettono il funzionamento, ed in ultimo la guida.

Per consentire una chiara comprensione delle funzionalità, si fa riferimento alla coppia di settori successivi, visualizzando solo quei gruppi di organi atti allo svolgimento della funzione descritta.

### 5.2.1 Sistema di movimentazione

Il sistema di movimentazione è composto non solo dagli organi direttamente legati al movimento, ma anche da quegli elementi che leggono la posizione relativa tra i due settori, istante per istante, e ne permettono dunque il controllo posizionale.

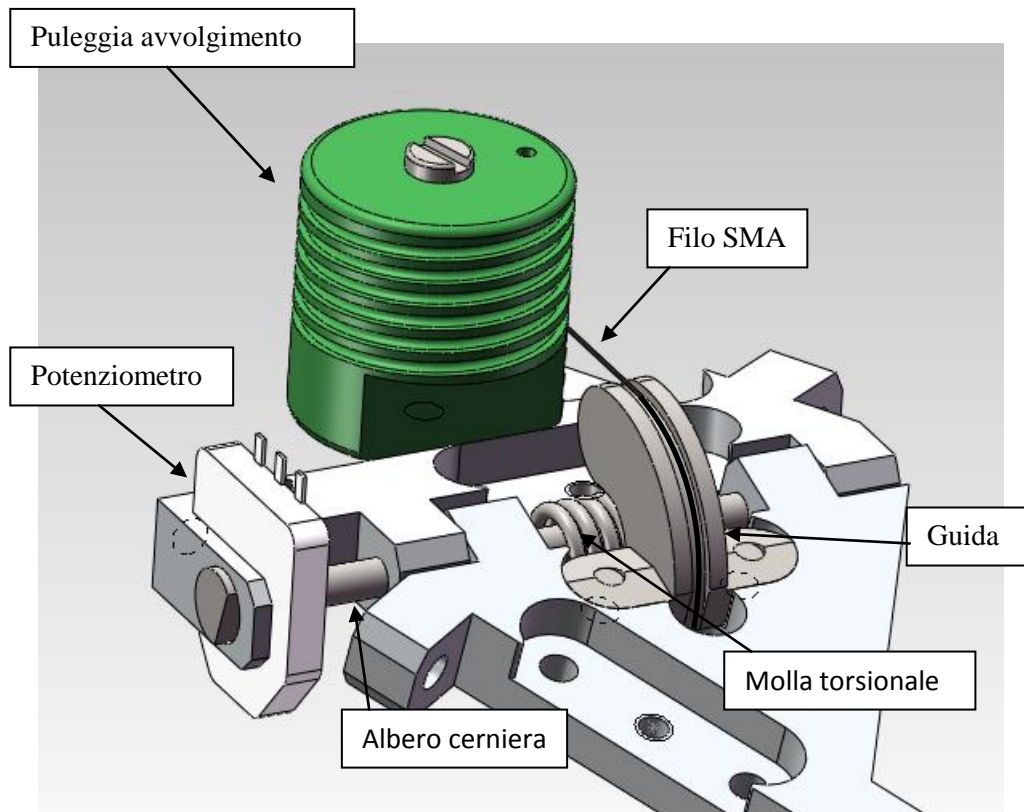


Figura 5.4: coppia settori, organi di movimento.

Il filo SMA alimentato, impone una forza applicata alla guida, che vince la coppia esercitata dalla molla di richiamo e consente la rotazione del settore. Riducendo l'alimentazione al filo SMA sarà la molla a consentire la rotazione del settore nel verso opposto.

Descriviamo meglio gli elementi costituenti il sistema di movimentazione:

### *Puleggia su cui avvolge la SMA:*

Un cilindro in materiale plastico rigido e resistente alle temperature elevate (teflon) che presenta una scanalatura elicoidale in cui è libero di scorrere il filo in SMA. E' reso solidale al settore triangolare tramite una vite M2.

La rotazione è impedita dallo scavo ricavato nella parte inferiore della vite, in contatto con il componente denominato blocco, che sarà descritto in seguito.

### *Guida:*

Consiste in una porzione di corona circolare in acciaio inossidabile, e in questo caso costituisce il braccio su cui agisce la SMA, consentendo di ottenere la coppia necessaria a contrastare la molla torsionale.

Il filo in SMA è libero di scorrere nella scanalatura ricavata superiormente.

### *Filo SMA:*

Uno o più fili di diametro variabile a seconda della forza richiesta, è l'elemento che consente l'escursione angolare nel verso opposto alla coppia esercitata dalla molla torsionale di richiamo.

Il filo in SMA difatti una volta riscaldato per effetto Joule, ha la proprietà di ridurre la propria lunghezza fino al 4% della lunghezza iniziale, generando una forza proporzionale alla temperatura, e dunque all'alimentazione in corrente che viene fornita ai due capi del filo. Durante l'accorciamento il filo SMA è libero di scorrere su puleggia e guida generando un effetto di trazione sul punto ove è reso solidale al triangolo in movimento.

La lunghezza del filo è stata dimensionata, con adeguata tolleranza, in conseguenza dell'escursione angolare che il settore deve compiere pari a  $50^\circ$ , a partire dunque dalla configurazione  $\alpha = -25^\circ$  in cui la molla torsionale esercita la coppia minima.



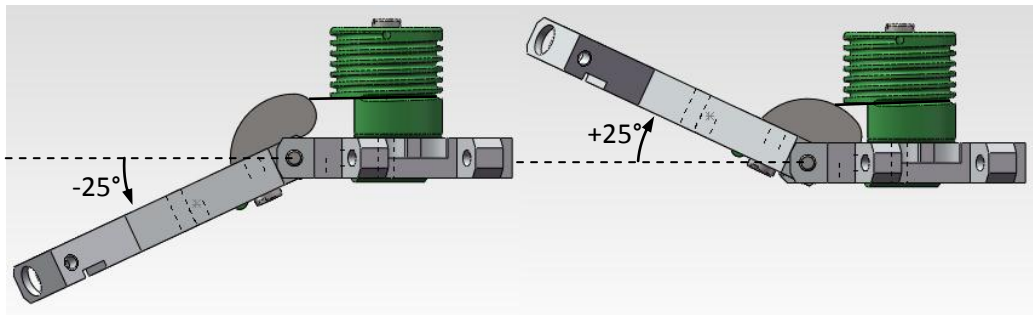


Figura 5.5: a sinistra angolo limite -25, a destra angolo limite +25.

In figura(5) a sinistra vediamo la posizione di equilibrio in cui molla e SMA forniscono la coppia minima, mentre a destra la posizione di equilibrio in cui la SMA è percorsa da un amperaggio maggiore in modo da opporsi alla molla che in tale configurazione eroga la coppia massima.

#### *Molla torsionale:*

E' l'elemento che genera la coppia proporzionale alla rotazione che si oppone alla trazione della SMA, conferisce rigidità al sistema e consente la rotazione del settore nel verso opposto alla coppia esercitata dal filo SMA.

E' dimensionata in modo da poter sostenere l'intero peso della porzione di striscia a sbalzo, compresa una tolleranza, nella posizione più sfavorevole, descritta nel dettaglio nel capitolo 4.

#### *Potenzimetro:*

Tale elemento consente di leggere la posizione relativa dei due settori adiacenti, la cassa esterna è resa solidale al settore che riporta la vite di avvolgimento, mentre il perno rotante è reso solidale all'altro settore tramite l'albero della cerniera, bloccato per interferenza nei fori delle cerniere del settore che porta la guida.

Il principio su cui si basa la lettura si fonda sulla conoscenza della relazione:

$$\text{angolo[deg]} = f(\text{variazione di resistenza [Ohm]})$$

Tale relazione, lineare, è stata ricavata tramite una campagna di test sperimentali sui potenziometri descritta nel capitolo 4.

### 5.2.2 Sistema di blocco

Il sistema di blocco è l'elemento di maggior ingombro, che più influenza le dimensioni dei settori. Nasce dalla necessità di poter rendere rigido il sistema, in assenza di alimentazione, attuando il principio di separazione temporale delle funzioni, la sua dimensione importante è dovuta al fatto che deve rendere l'intera struttura in grado di resistere ad una forza massima applicata a sbalzo di 35 [N].

Data la complessità del sistema si rappresentano i diversi elementi in figure separate, per primi si descrivono gli elementi che permettono il bloccaggio:

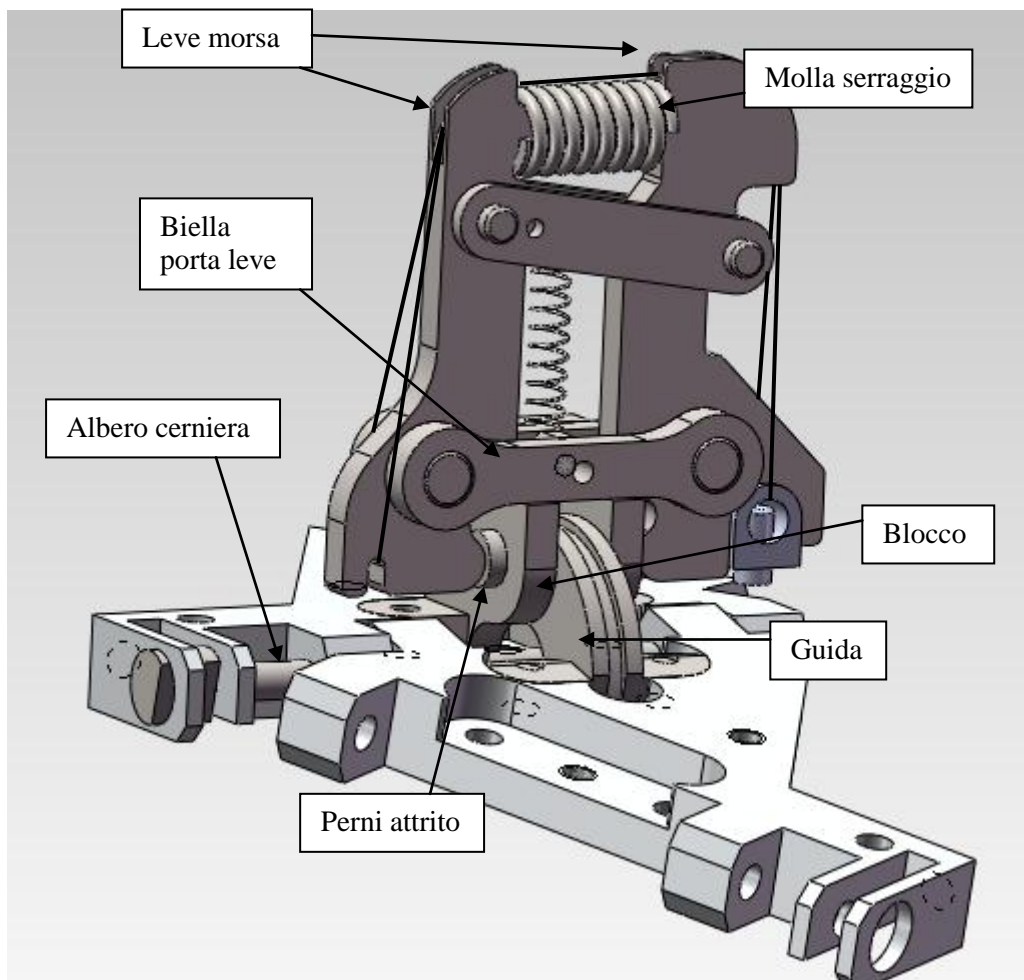


Figura 5.6: coppia settori, organi di blocco lato fronte.

In figura 5.6 sono indicati gli elementi che permettono il blocco del sistema nella posizione desiderata. In questa configurazione la forza fornita dalla *molla di serraggio* si scarica sui *perni*, liberi di scorrere all'interno delle sedi ricavate nell'elemento *blocco*. Questi agiscono impedendo alla *guida* il moto relativo per attrito. In caso di sollecitazione applicata alla striscia, i perni, bloccati per attrito sulla guida, sono tenuti in posizione dall'elemento blocco, dunque tutta la sollecitazione è assorbita dall'elemento blocco tramite taglio sui perni, ed è importante sottolineare che le leve hanno dunque solo il compito di trasferire ai perni la forza generata dalla molla e non ricevono nessuna sollecitazione di flessione dovuta a carichi esterni.

Si descrivono ora più nel dettaglio gli elementi funzionali sopra citati.

#### *Molla di serraggio*

È l'elemento che fornisce la forza necessaria al blocco del sistema, questa viene trasmessa ai perni che agiscono per attrito sulla guida tramite le due leve.

La cerniera che unisce il triangolo centrale al primo settore a sbalzo è quella che subisce il momento maggiore in conseguenza dell'applicazione di un carico sulla striscia. Di conseguenza il sistema di blocco più critico è quello posto in corrispondenza di tale cerniera, e deve dunque essere in grado di impedire la rotazione relativa dei due settori nella condizione di carico applicato massimo ammissibile. La molla dimensionata su questo carico impone la sollecitazione più gravosa per gli organi meccanici del sistema.

Chiaramente vale lo stesso discorso fatto nel caso della movimentazione, ovvero non è necessario che tutti i sistemi di blocco siano uguali, infatti man mano che ci si allontana dalle cerniere centrali, si riduce il braccio di applicazione della forza a sbalzo, e di conseguenza la forza che agente all'apice delle leve potrà essere minore.

#### *Leve morsa*

Sono gli elementi che impongono la forza normale sui perni, che garantirà l'attrito nel contatto superficie perno-guida. Rispetto al fulcro della leva, il braccio su cui agisce la molla ad un estremo, è pari a 18 [mm] mentre il braccio ove avviene il contatto con i perni risulta pari a 5[mm], tale rapporto è stato dimensionato in modo da garantire l'ottenimento della forza di attrito necessaria a mantenere il sistema in posizione imposta la condizione di carico massima ammissibile.

### *Perni attrito*

I perni ad attrito sono degli elementi cilindrici, liberi di muoversi coassialmente ai fori ricavati sull'elemento blocco, la tolleranza tra foro e perno è molto stretta difatti tra i due è previsto un accoppiamento con gioco foro base H7-h7, in questo modo si riducono notevolmente gli errori di posizionamento dovuti ai giochi.

Sulla superficie di contatto con la guida si genera il sistema di forze di attrito che mantiene fermi i perni nella posizione desiderata sulla guida consentendo il blocco del sistema. Il coefficiente di attrito tabellato del contatto acciaio/acciaio è pari a  $\mu = 0,7$ .

### *Guida*

La guida costituisce il braccio della forza di attrito, necessario a imporre il momento che contrasta la coppia dovuta all'applicazione dei carichi sulla striscia, si considera come braccio la distanza tra l'asse della cerniera dei due settori, e il centro del cerchio di contatto del perno, tale distanza è pari a 6 [mm].

Si osserva che la guida compie dunque una doppia funzione, sia per quanto riguarda la movimentazione, fungendo da braccio per l'applicazione della forza di trazione dovuta alla SMA, sia nel sistema di blocco, ove è usata come braccio per le forze di attrito che consentono il bloccaggio del sistema in posizione.

### *Blocco e biella porta leve*

Il blocco costituisce l'elemento chiave del sistema, in quanto è l'elemento che riceve la coppia trasmessa dalla guida ai perni sulle superfici cilindriche di contatto. Le leve sono ad esso collegate tramite due bielle avvitate, queste non ricevono sollecitazioni dovute all'applicazione dei carichi sulla striscia, ma solo la trazione dovuta a  $F_{fulcro}$  da equilibrio alla traslazione.

### **Errore posizionamento**

E' importante sottolineare che l'errore di posizionamento a sistema bloccato è dovuto essenzialmente all'accoppiamento foro base tra i fori sull'elemento blocco e i perni ad attrito, e all'accoppiamento sempre foro base molto stretto H7-h7 tra fori della cerniera lato blocco e l'albero che collega i due settori adiacenti.

### 5.2.3 Sistema attivazione e disattivazione blocco

Il sistema di blocco deve poter essere attivato e disattivato, nasce quindi la necessità di un sistema il più possibile integrato alle leve che permetta di sgravare i perni dalla forza imposta dalla molla di serraggio.

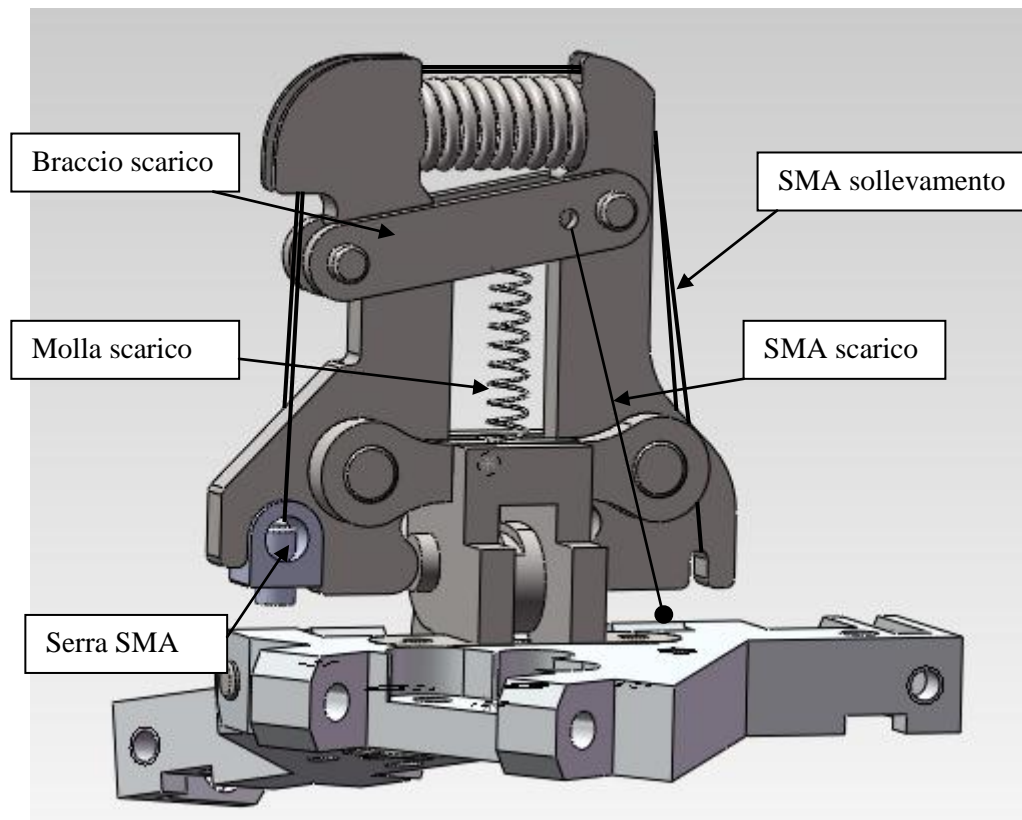


Figura 5.7: Sistema di blocco, coppia settori lato posteriore.

Questo è permesso dalla *SMA di sollevamento*, che comprime la molla di serraggio mantenendo le due leve sollevate dai perni il tempo necessario a portare in posizione un braccio che scarichi tutta la sollecitazione, il *braccio di scarico*.

Il braccio di scarico è portato in tale posizione dalla *molla di scarico* mentre un'altra SMA, definita *SMA di scarico*, che agisce contrariamente alla molla, ha il compito di liberare il braccio di scarico dalla sua sede.

Quando si interrompe l'alimentazione alla SMA di sollevamento, il braccio di scarico rimane in posizione nella sede ricavata sulla leva destra e assorbe tutta la forza imposta dalla molla di serraggio mantenendo le leve sollevate dai perni. Dunque la guida è libera dal sistema di forze imposto dai perni, ed è consentita la rotazione relativa dei due settori.

Gli elementi funzionali introdotti sono:

### *SMA di sollevamento*

Di tutto il sistema, la SMA di sollevamento risulta l'elemento SMA più critico, perché deve essere in grado di vincere la forza imposta dalla molla di serraggio. Come già detto la morsa posta a cavallo della cerniera che collega il settore centrale con il resto della striscia monta la molla più critica. Per vincere tale forza, considerando anche l'incremento dovuto all'ulteriore accorciamento della molla, il filo scelto ha sezione 0,5[mm] ovvero il massimo diametro disponibile a catalogo.

### *Braccio di scarico*

E' l'elemento maggiormente sollecitato dalla molla, che impone una forza maggiore rispetto alla configurazione precedente, poiché è presente un  $\Delta l$  di accorciamento pari a circa 1,3 [mm] in conseguenza della rotazione delle leve.

$$F \text{ molla} = F \text{ molla}[N] + r \left[ \frac{N}{mm} \right] * \Delta l[mm]$$

### *Biella porta leve*

La biella porta leve in configurazione di morsa sbloccata è sollecitata a compressione, e i perni corrispondono ancora al fulcro del sistema di leve.

### *SMA di scarico e molla di scarico*

Questi due elementi consentono il movimento del braccio di scarico. La SMA di scarico con comando di tipo ON/OFF contrasta la molla di scarico e quando attiva allontana il braccio di scarico dalla sede in cui alloggia quando la morsa è disattivata.

### 5.2.4 Procedura di bloccaggio e sbloccaggio della morsa

Di seguito si riporta la procedura che descrive la successione di comandi in termini di ordine di attivazione delle parti alimentate del sistema per adempiere alla funzione per cui sono posti.

Per descrivere cosa accade al sistema in conseguenza dei diversi comandi impartiti si fa uso di uno schema bidimensionale dove è rappresentata la morsa montata sul blocco, e il triangolo ad esso solidale. E' stato nascosto il braccio di scarico lato fronte, in modo da rendere visibile il perno e le sue sedi nelle due posizioni che questo può assumere.

Si evidenziano i cambiamenti dello stato del sistema e le forze in gioco, rappresentate da frecce a tratto continuo per le molle e tratteggiate per le SMA.

#### 5.2.4.1 Disattivazione morsa

- 1) La morsa è attiva e il moto relativo dei due settori successivi non è consentito:

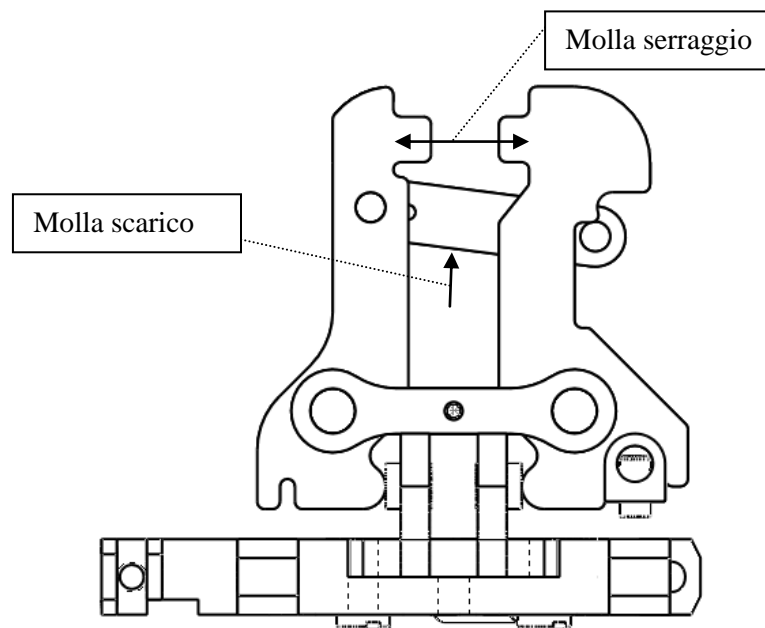


Figura 5.8: Morsa attiva.

Tutte le SMA del sistema non sono alimentate, i perni ad attrito sono premuti sulla guida dalle leve e il braccio di scarico è tenuto in battuta dalla molla di scarico sul bordo inferiore della sede sulla leva destra.

2) Imponi l'alimentazione in corrente alla SMA di sollevamento:

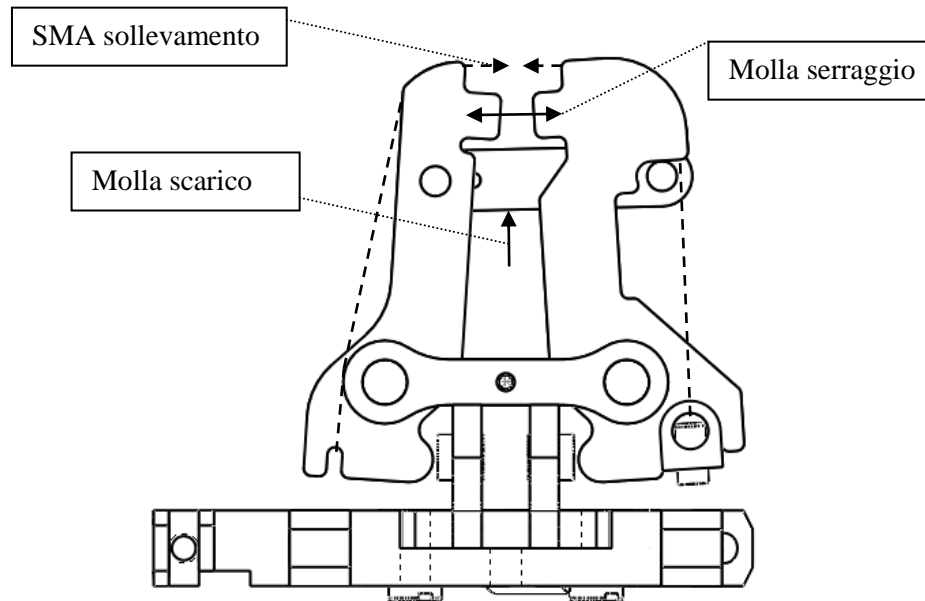


Figura 5.9: SMA di sollevamento attivata.

La SMA di sollevamento, in figura 5.9 rappresentata da linea tratteggiata, comprime la molla di serraggio agendo sulle leve, che ruotando di pochi gradi creano il gioco tra i perni ad attrito e la guida e ne permette dunque il moto relativo.

La molla di scarico solleva il braccio di scarico e lo porta in battuta sulla superficie superiore all'altezza della sede sulla leva destra.

Si osserva che la SMA di sollevamento è l'elemento che richiede il maggior apporto di potenza elettrica del sistema, data la sezione elevata del filo e la forza richiesta e di conseguenza l'effetto Joule necessario. Il vantaggio di tale soluzione si individua nel tempo in cui tale SMA deve rimanere alimentata, difatti deve essere attiva e dunque imporre la trazione agli apici delle leve, solamente il tempo necessario alla molla di scarico per portare in posizione il braccio di scarico. Questo tempo è molto breve, in quanto la molla porta il braccio in posizione pressoché istantaneamente appena il perno supera l'avvallamento che impedisce lo sbloccaggio accidentale fungendo da fermo.



- 3) Interrompi l'alimentazione in corrente alla SMA di sollevamento.

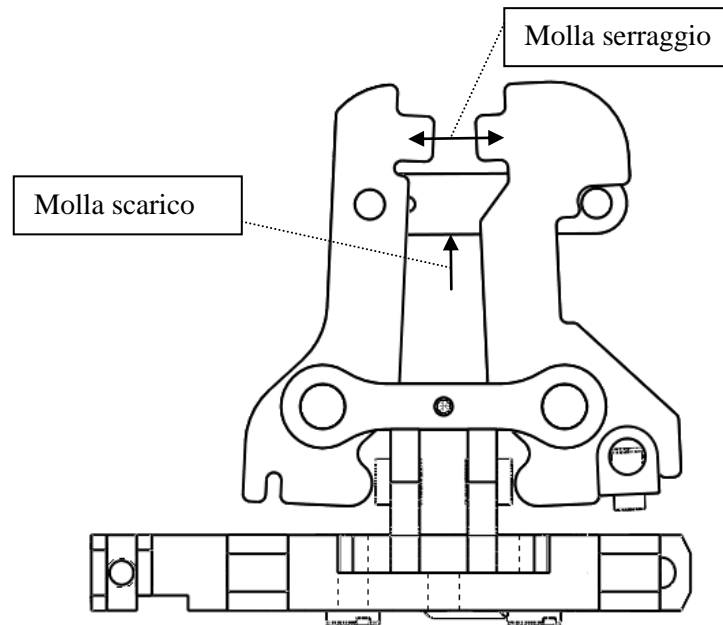


Figura 5.10: SMA di sollevamento disattivata.

Il perno del braccio di scarico si posiziona in battuta nella sua sede sulla leva destra e scarica tutta la forza della molla di serraggio. Le leve della morsa sono mantenute sollevate dai perni dal braccio di scarico che rimane nella posizione assunta.

Il sistema morsa risulta dunque disattivato e privo di alimentazione.

Il moto relativo dei due settori successivi è quindi ora consentito, il movimento della guida all'interno della sua sede nel blocco difatti è concesso grazie al gioco creatosi tra la superficie dei perni ad attrito e la superficie laterale della guida dovuto al sollevamento delle leve.

E' importante porre attenzione sul fatto che l'intera operazione si compie grazie a un unico comando esterno di tipo ON/OFF impartito dalla centralina. La procedura infatti si svolge automaticamente grazie a forze sempre attive, generate da molle in acciaio, in conseguenza dell'alimentazione in corrente alla SMA di sollevamento.

Si conclude che per effetto della sola attivazione e successiva disattivazione della SMA di sollevamento, il sistema che blocca la striscia in posizione si disinserisce.

### 5.2.4.2 Attivazione morsa

La configurazione di partenza è quella rappresentata in figura 5.10. La morsa è disattivata e il moto relativo dei due settori successivi è consentito.

- 1) Alimenta in sequenza la SMA di sollevamento e la SMA di scarico

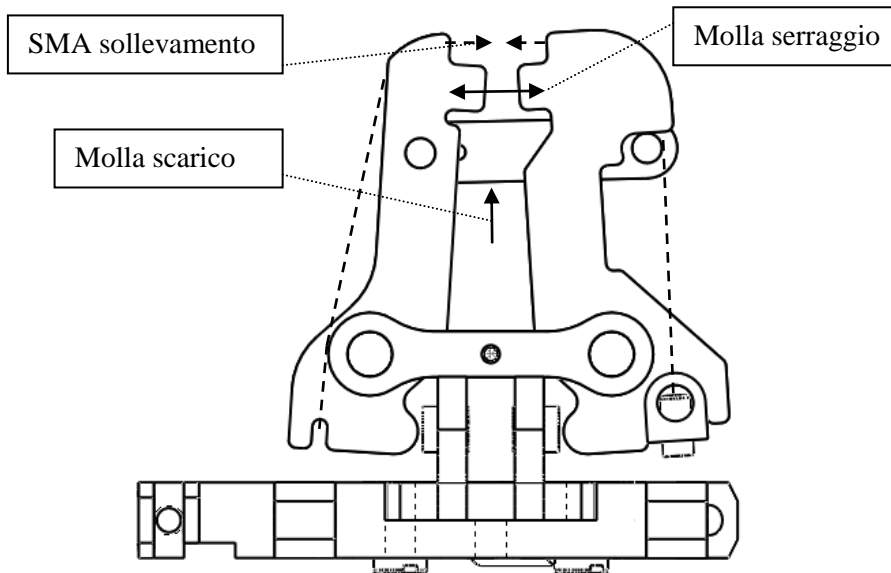


Figura 5.11: SMA sollevamento alimentata.

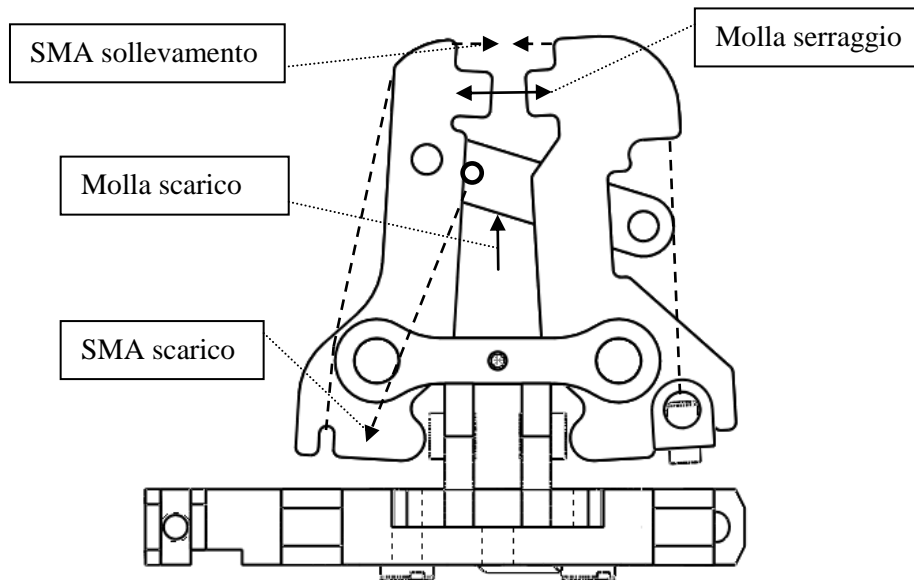


Figura 5.12: SMA sollevamento e scarico alimentate.

In conseguenza di questa successione di comandi, le leve della morsa comprimono la molla di serraggio e il braccio di fermo, non più vincolato nella sua sede dalla forza impressa dalla molla, viene rimosso dalla posizione di bloccaggio e mantenuto in una seconda sede dalla SMA di scarico, che contrasta la forza impartita dalla molla di scarico.

Il perno del braccio di scarico è ora sgravato dai sistemi di forze, e la sede in cui alloggia ora è sempre ricavata sul braccio destro.

2) Interrompi l'alimentazione al sistema di trazione SMA principale

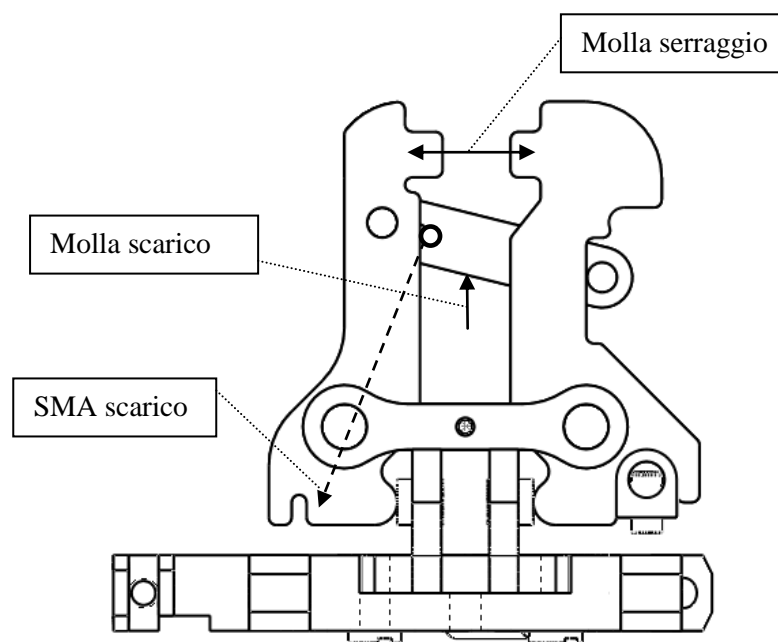


Figura 5.13: SMA di trazione disattivata e SMA di scarico attiva.

Con questa operazione ora la forza della molla di serraggio torna ad agire tramite le leve sui perni ad attrito, che tornano in questo modo in battuta sulla guida.

Una volta scaricata completamente la SMA di trazione, operazione che richiede qualche istante a causa dell'inerzia termica, si conclude effettivamente il bloccaggio del sistema nella posizione desiderata.

Si osserva che durante questa operazione la SMA di scarico rimane attiva per mantenere fuori dalla sede il perno del braccio di scarico.

3) Interrompi alimentazione in corrente al sistema SMA di scarico

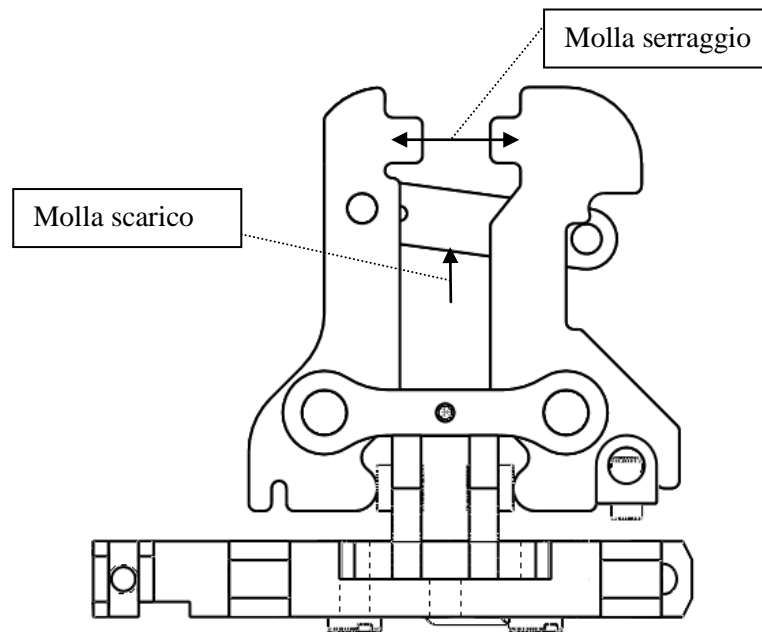


Figura 5.14: Sistema non alimentato in configurazione di morsa attiva.

Con questa ultima operazione si conclude la sequenza di input che consentono l'attivazione del sistema morsa. La disattivazione della SMA di scarico, è consentita poiché una volta posizionate le leve in battuta sui perni ad attrito, il perno del braccio di scarico non potrà più inserirsi nella sede e dunque si lascia che vada in battuta sul bordo inferiore della sua sede in fase di scarico.

Il sistema morsa è dunque ora attivato e privo di alimentazione in corrente.

La rotazione relativa dei due settori non è consentita poiché il movimento della guida all'interno del blocco è impedito dal sistema di forze creatosi nel contatto tra le superfici dei perni ad attrito e le superfici della guida.

## 5.3 Procedure di funzionamento

Come già descritto nel *capitolo 3*, il sistema lavora su 3 diverse modalità di funzionamento: la modalità di esplorazione, in cui l'utente "muove" la striscia sul CAD e dunque la striscia assume di volta in volta la forma imposta; la modalità di tocco, in cui la striscia è ferma in una posizione nello spazio e rappresenta una specifica porzione di superficie al CAD e l'utente può apprezzare fisicamente tale forma tramite tocco della striscia. Infine la modalità di modifica, in cui l'utente, modificando la curvatura della striscia, va a modificare la forma della superficie sul CAD.

Per ciascuna di queste tre modalità di funzionamento è prevista una procedura che descrive le modalità di lavoro delle diverse parti costituenti, nonché la precisa sequenza di comandi da imporre per realizzare la funzione richiesta.

### 5.3.1 Modalità esplorazione

- Imponi alla SMA di movimentazione l'amperaggio memorizzato in precedenza che dunque subisce un pretensionamento che eviterà movimenti bruschi quando verrà disattivata la morsa. Se è la prima accensione la striscia si trova in posizione piana.
- Disattiva la morsa. Dopo questa operazione il sistema rimane circa fermo in posizione grazie al pretensionamento del passo precedente, lo smorzamento intrinseco della SMA consente di non avvertire vibrazioni all'interno del sistema in questa fase, in cui piccoli scostamenti posizionali sono immediatamente corretti dall'unità centrale di elaborazione dati.
- Incrementa o decrementa l'intensità di corrente inviata alla SMA finché il segnale restituito dal potenziometro in [Ohm] raggiunge il valore corrispondente all'angolo desiderato. Tale angolo è dedotto dall'unità computer in conseguenza della pressione imposta dall'utente sulle maniglie dotate di estensimetri.

Quest'ultima operazione è chiaramente implementata in un controllo a ciclo continuo che rimane attivo fino ad un successivo cambio di modalità. Ovvero il valore letto dal potenziometro è istante per istante confrontato con il valore dell'angolo desiderato secondo la legge:

$$\alpha [deg] = f ( R[Ohm] )$$

### 5.3.2 Modalità tocco

- Memorizza valore Ampere corrispondente alla configurazione assunta al momento del cambio modalità. Questa serie di valori, uno per ciascun elemento SMA di movimentazione è salvato sull'unità computer.
- attiva la morsa che tiene in posizione la striscia tramite attrito statico.
- Interrompi l'alimentazione alla SMA di movimentazione, il sistema è ora bloccato nella posizione desiderata e interamente privo di alimentazione.

### 5.3.3 Modalità modifica

Inizialmente rimane invariata con gli estensimetri posti sulle maniglie ai lati dei triangoli.

Si propone uno spunto di sviluppo futuro, un sistema che elimini le maniglie estensimetriche e sfrutti le componenti già presenti nel sistema.

La striscia deve essere tenuta con due mani, ed è mantenuta nella forma originale dall'unità pc. Il software legge il valore dei potenziometri, e nel caso questo stia cambiando, in conseguenza del superamento di un valore minimo di coppia imposta dalle mani dell'utente, da dimensionare accuratamente, (ovvero si sta modificando l'angolo tra i settori), deve inviare alla SMA l'ampereaggio necessario a "SEGUIRE" la variazione di angolo. tutti gli altri settori invece devono essere comandati di conseguenza secondo la legge di modifica della superficie imposta (come d'altronde già avviene).

## 5.4 Procedura taratura

Il sistema necessita di una taratura, sia alla prima messa in funzione, sia quando lo si ritiene necessario per ovviare all' eventuale perdita di precisione di posizionamento in cui si può incorrere con l' utilizzo dello strumento.

### 5.4.1 Taratura primo avvio del sistema, manuale

Durante l'assemblaggio, prima di procedere con l' inserimento della morsa e del filo SMA di movimentazione, il sistema necessita di due fasi fondamentali per la taratura, da eseguire manualmente.

- 1) Occorre regolare la vite di regolazione fine sul triangolo lato blocco, che sarà il riferimento per tutte le successive operazioni di taratura, nonché costituirà il limite fisico alla rotazione relativa che impedirà alle parti atte alla movimentazione del sistema di collidere tra loro.

Tale regolazione è di grande importanza e va eseguita con particolare cura: si disponga la coppia di settori a  $-25^\circ$  con l' aiuto di un goniometro, e si avviti la vite di regolazione fine fino al raggiungimento del contatto tra di essa e la guida.

- 2) In questa configurazione si legga il valore del potenziometro e lo si imponi come valore inferiore indicativo di partenza per la legge:

$$\alpha [deg] = f ( R[Ohm] )$$

In questo modo si è predisposto il sistema a tutte le successive tarature, che verranno svolte in automatico, a questa operazione dovrà seguire la taratura automatica per ottenere una maggiore precisione.

### 5.4.2 Taratura, automatica

Tale taratura del sistema è di fondamentale importanza, e va ripetuta di frequente, in modo da garantire il funzionamento ottimale del sistema. Si ottiene portando in battuta la guida sulla vite di regolazione fine posta sul triangolo opposto tramite alimentazione incrementale in corrente alla SMA di movimentazione. La lettura della resistenza del potenziometro in questa configurazione identifica la posizione di riferimento  $-25^\circ$ , in cui il sistema è avvolto su se stesso in configurazione di raggio di raccordo minimo rappresentabile.

*Procedura:*

Il sistema si presenta bloccato in posizione piana, ovvero l'angolo relativo tra ogni settore risulta pari a circa  $180^\circ$ , salvo piccoli valori dovuti a staratura. Da questa configurazione il settore in movimento potrà compiere un'escursione di  $\alpha = 25 [deg]$  sia in senso orario che antiorario.

- Ad ogni settore è assegnato un numero progressivo, da **1** a **n**, numero dei settori.
- Iterativamente si procede simmetricamente, ovvero, definito l'indice incrementale "*i*":

Per "*i* = 0" fino a " $i = \frac{n-1}{2}$ " e dunque sui settori in movimento considerando il settore centrale fisso,

per i settori "*i* + 1" e "*n* - *i*", ossia ad esempio nel caso della prima iterazione i settori agli estremi della striscia,

- 1) disattiva la morsa.
- 2) Incrementa linearmente l'amperaggio, finché il potenziometro, in conseguenza di un incremento  $\Delta Ampere$  rimane fisso su un valore di resistenza.

Questo accade nel momento in cui la guida raggiunge la posizione limite in battuta sulla vite di regolazione fine, che ne impedisce l'ulteriore rotazione.

Questo valore è memorizzato come resistenza di riferimento della posizione  $-25^\circ$ , e di conseguenza, nota la legge lineare del potenziometro, è nota la relazione:

$$\alpha [deg] = f ( R[Ohm] )$$

- 3) Porta il settore nuovamente in posizione piana al valore di  $\alpha = 0 [deg]$  e attiva la morsa ad essa relativa.

Ripeti il ciclo incrementando l'indice "*i*".



Si riportano quindi delle immagini rappresentative dei diversi step, per una migliore comprensione di come avviene la taratura:

Come possiamo vedere nella figura successiva, la striscia si presenta in posizione piana all'avvio della procedura di taratura.

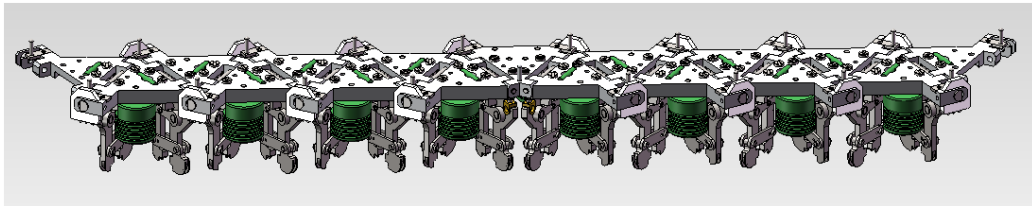


Figura 5.15: La striscia in configurazione piana.

Alla *prima* iterazione sono i settori estremi a ruotare di 25 contemporaneamente, come possiamo notare dalla figura:

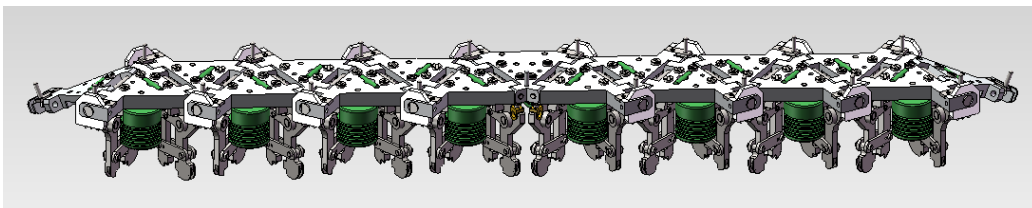


Figura 5.16: settori  $1$  e  $n$  a  $-25^\circ$ .

Al termine della prima iterazione la striscia ritorna in posizione piana:

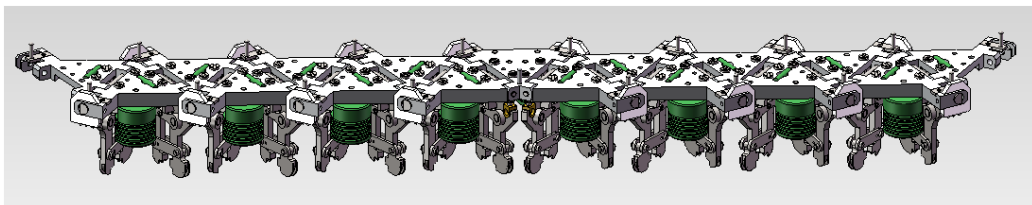


Figura 5.17: La striscia in configurazione piana.

Alla *seconda* iterazione sono il secondo e il penultimo settore ad assumere la configurazione in battuta sulla vite:

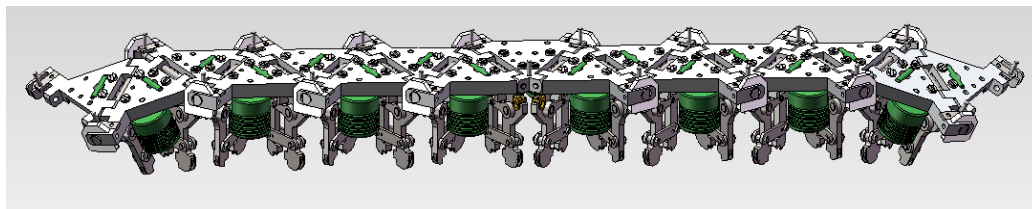


Figura 5.18: settori 2 e  $n-1$  a  $-25^\circ$ .

Al termine della seconda iterazione la striscia riassume la posizione piana:

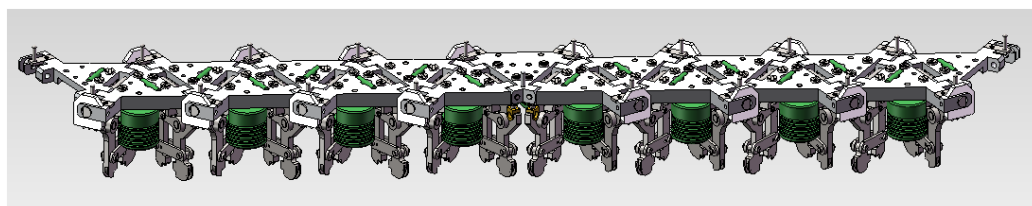


Figura 5.19: La striscia in configurazione piana.

Si riporta direttamente ora l'ultima iterazione in cui sono i triangoli connessi al settore centrale ad assumere la configurazione in battuta sulla vite:

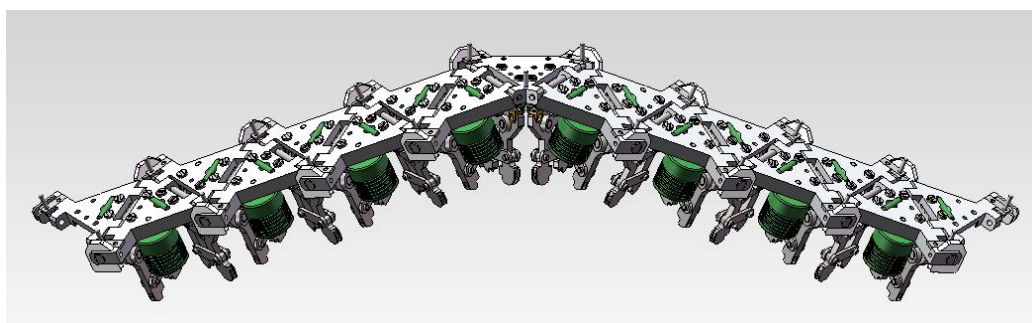


Figura 5.20: settori 8 e  $n-8$  a  $-25^\circ$ .

## 5.5 Prestazioni

Si riassumono ora le prestazioni del nuovo concept di sistema Satin attuato con l'uso delle SMA e si esegue un confronto con la versione di sistema Satin precedente, *elettro attuata*, in modo tale da poter evidenziare i miglioramenti raggiunti.

**Raggio curvatura:** SMA: 50 [mm] *Elettro attuata*: 60 [mm]

Si è ridotto il raggio di curvatura minimo rappresentabile portandolo al limite inferiore dichiarato da specifica.

**Distanza incroci assi cerniere:** SMA: 37 [mm] *Elettro attuata*: 55 [mm]

E' la distanza effettiva che caratterizza la mesh e dunque la risoluzione di rappresentazione di superfici effettiva, è direttamente funzione delle dimensioni del triangolo base e della cerniera di collegamento.

**Lunghezza lato triangolo:** SMA: 28,6 [mm] *Elettro attuata*: 50 [mm]

E' interessante notare che, mentre per il sistema elettro attuato non si può ridurre ulteriormente la dimensione del lato poiché è la minima possibile che permetta l'alloggiamento del micro servo, per il sistema SMA attuato tale dimensione è data dall'ingombro del sistema morsa. Quindi non riguarda direttamente l'attuazione, ma la specifica imposta del carico a sbalzo di 35 [N], andando a ridurre tale specifica la morsa può essere rivista e considerevolmente ridotta consentendo l'ulteriore riduzione della dimensione del lato.

**Distanza pin - pin:** SMA: 37 [mm] *Elettro attuata*: 50 [mm]

E' la distanza effettiva tra i punti che fisicamente muovono la striscia in plastica e dunque descrivono la mesh. Si osserva che nel sistema SMA attuato I pin sono posti esattamente all'incrocio degli assi delle cerniere, sfruttando il braccio che sorregge il potenziometro. In questo modo viene rappresentata una mesh costituita da triangoli effettivamente equilateri, mentre nel sistema servo attuato la posizione dei pin al vertice dei triangoli equilateri introduce una piccola approssimazione nella geometria della mesh.

**Posizione pin all'incrocio degli assi:** SMA: si ..Elettro attuata: no

Come già discusso nel punto precedente.

**Dimensioni striscia:** SMA: 317x32(48) [mm] Elettro attuata: 370x43 [mm]

La dimensione della striscia è dimensionata nel rispetto delle specifiche, il valore tra parentesi indica il massimo ingombro laterale costituito dal braccio che sorregge il potenziometro. Il sistema è stato progettato pensando alla realizzabilità e ai costi, l'adozione di un micro potenziometro (molto costoso e difficile da gestire con strumentazione da laboratorio), ridurrebbe notevolmente tale dimensione, si pensi ad esempio a un suo posizionamento direttamente all'interno della cerniera.

**Spessore triangolo:** SMA: 5 [mm] Elettro attuata: 3 [mm]

Si è incrementato lo spessore del triangolo in alluminio in modo da aumentare la rigidità del sistema, tale incremento non comporta un particolare aggravio per quanto riguarda il peso della struttura in quanto le dimensioni dei triangoli per quanto riguarda il lato sono state considerevolmente ridotte.

**Alimentazione:** SMA: discontinua Elettro attuata: continua

Il sistema SMA attuato risulta alimentato nelle modalità di esplorazione e modifica, mentre nella modalità tocco è privo di alimentazione. Il sistema elettro attuato risulta continuamente alimentato in tutte le modalità di funzionamento.

**Rumore:** SMA: no Elettro attuata: si

Le SMA sono intrinsecamente silenziose, mentre la rotazione o il mantenimento di una posizione del servo produce rumore.

**Vibrazioni:** SMA: no Elettro attuata: si

Le SMA sono intrinsecamente smorzate, non risentono di problemi relativi a vibrazioni o instabilità, cosa che invece accade ai servomotori.

**Lettura posizionale:** *SMA*: diretta    *Elettro attuata*: indiretta

La lettura della posizione del triangolo avviene direttamente sul triangolo oggetto di spostamento angolare rispetto alla relativa cerniera, da cui sono ridotti al minimo gli errori sistematici dovuti ai giochi, come invece accadeva nel sistema elettro attuato in cui la lettura posizionale, all'altezza del servo, avviene a monte di una serie di cinematismi rispetto al triangolo movimentato.

**Giochi tra le parti:** *SMA*: minimi    *Elettro attuata*: consistenti

Per quanto riguarda i giochi, si può fare una differenziazione considerando lo stato del sistema. Il sistema nelle sue modalità di funzionamento può lavorare in due stati: fermo e in movimento. E' interessante distinguere in base allo stato assunto gli elementi che causano giochi.

Per il sistema *elettro attuato* i giochi sono dovuti a:

- sistema In movimento: tutti gli accoppiamenti tra le parti del cinematismo, ingranaggi, vite, manicotto, bielle cerniera nonché i cuscinetti.
- sistema fermo: gli stessi accoppiamenti dello stato precedente.

Per il sistema *SMA attuato* i giochi sono dovuti a:

- sistema In movimento: all'accoppiamento albero asse, fori della cerniera.
- sistema fermo: all'accoppiamento blocco/perno ad attrito e ancora all'albero e fori della cerniera.

Date le tolleranze molto strette di tali accoppiamenti, scelti anche grazie al lento movimento relativo tra tali parti, i giochi risultano molto ridotti rispetto all'applicazione precedente.

**Parti in movimento rapido:** *SMA*: no    *Elettro attuata*: si

Il movimento di attuazione della SMA risulta sufficientemente lento da rendere trascurabili le accelerazioni relative alle parti del sistema, il servo e le componenti del cinematismo del sistema servo attuato sono posti in rotazione veloce, cosa che necessita l'uso di cuscinetti e dunque l'introduzione di ulteriori elementi.

### **Costo realizzazione**

Non è semplice effettuare una valutazione sui costi, si può comunque dire che il costo del sistema movimentato tramite SMA è sostanzialmente dovuto alle lavorazioni meccaniche per la realizzazione delle diverse parti come da preventivo. Il sistema di attuazione e controllo quali molle, filo SMA e potenziometro hanno costi molto contenuti. Per quanto riguarda il sistema a movimentazione elettromeccanica invece oltre ai costi per le lavorazioni meccaniche delle parti occorre considerare i costi piuttosto rilevanti dovuti alla componentistica da acquistare per l'attuazione, quali servomotori, riduzioni e cuscinetti autolubrificanti.

**Diversi sistemi di riferimento:** SMA: no                      *Elettro attuata: si*

Come ultima osservazione si evidenzia che il sistema è simmetrico rispetto al settore centrale, necessariamente diverso in quanto presenta sistemi di blocco ad esso solidali su entrambe le cerniere. Per il resto della lunghezza è semplicemente costituito dalla ripetizione dei moduli base destri e sinistri alternati, non vi è più dunque una differenziazione in settori a movimento assoluto e settori a movimento relativo.

**Studio realizzabilità:** SMA: si                      *Elettro attuata: no*

In ultimo si può concludere riflettendo sulla realizzabilità del sistema, ovvero il sistema a movimentazione SMA è stato sviluppato e studiato in modo che fosse il più semplice possibile la sua effettiva realizzazione fisica. Un dialogo continuo con l'officina meccanica [31] cui è stata commissionata la realizzazione delle parti, ha permesso di arrivare a un concept effettivamente realizzabile con costi decisamente contenuti. Il prototipo è in fase di realizzazione e le parti da assemblare saranno consegnate entro il 21 settembre 2012, si riportano in appendice [F] alcune immagini delle parti in lavorazione.

### **Per concludere**

Alla luce del confronto tra sistema Satin SMA attuato e elettro attuato, si conclude che l'applicazione delle leghe a memoria di forma come sistema di movimentazione comporta innegabili vantaggi. Difatti si sono effettivamente raggiunti, gli obiettivi di incremento delle prestazioni cui si puntava all'inizio dello studio.

# Capitolo 6

## Conclusioni

Lo scopo di valutare l'applicabilità delle leghe a memoria di forma (SMA) al sistema meccanico Satin, in modo da risolvere le problematiche esistenti e proporre così una soluzione concettuale che porti ad un incremento effettivo delle prestazioni secondo le linee guida evidenziate inizialmente è stato effettivamente raggiunto.

L'esito positivo dell'analisi di fattibilità ha portato a verificare l'efficacia dello strumento di analisi TRIZ come valido supporto nel determinare la direzione di evoluzione dei sistemi meccanici. Infatti a seguito dello studio non solo si è ottenuto un incremento delle prestazioni rispetto alla versione precedente, secondo le linee stabilite inizialmente, ma si è verificata una vera e propria evoluzione dell'intera struttura del sistema. Oltre alla riduzione delle dimensioni del sistema, del raggio di curvatura rappresentabile, del peso e dei costi, il sistema si presenta dunque ora più armonico nelle sue parti. Questo principalmente grazie all'attuazione implementata tramite fili in SMA al posto dei servomotori, che ha consentito l'eliminazione della catena cinematica che legava i settori agli attuatori, delle parti veloci in movimento e all'introduzione di proprietà stabilizzanti e smorzanti intrinseche alle caratteristiche metallurgiche delle leghe a memoria di forma. Inoltre il nuovo sistema SMA attuato risulta energeticamente più efficiente, grazie all'uso di corrente elettrica nella quantità effettivamente richiesta dalle forze in gioco momento per momento e alla separazione in tempo delle funzioni, proprietà che consente di disattivare l'alimentazione quando il sistema non è in movimento. Per concludere dunque, tutte queste ulteriori migliorie sono state individuate appunto grazie all'analisi preliminare che ha permesso di individuare a priori la direzione di evoluzione del sistema.

Si ritiene opportuno sottolineare una difficoltà metodologica, in quanto è stato difficile usare lo strumento TRIZ per individuare le criticità presenti nel sistema, poiché questo metodo è nato per essere applicato su sistemi fisicamente esistenti, mentre in questa trattazione si è applicato su un sistema teorico e concettuale le cui problematiche sono chiaramente ancora meno visibili.

Si sintetizzano in tabella i risultati ottenuti come confronto tra le due tipologie di attuazione, ampiamente descritti nel capitolo 5.

	SMA	SERVO
Raggio curvatura minimo rappresentabile	50 [mm]	60 [mm]
Distanza vertici mesh triangolare	37 [mm]	55 [mm]
Lunghezza lato triangolo	28,6 [mm]	50 [mm]
Distanza pin - pin	37 [mm]	50 [mm]
Posizione pin all'incrocio degli assi	si	no
Dimensioni striscia	317x32 [mm]	370x43 [mm]
Spessore triangolo	5 [mm]	3 [mm]
Alimentazione	discontinua	continua
Rumore	no	si
Vibrazioni	no	si
Lettura posizionale	diretta	indiretta
Giochi tra parti	minimi	consistenti
Parti in movimento rapido	no	si
Costo	ridotto	elevato
Diversi sistemi di riferimento	no	si
Studio realizzabilità	si	no
Realizzazione fisica prototipo	si	no

Tabella 1: Sintesi confronto Satin SMA attuato e Satin servo attuato

E' importante evidenziare che la soluzione proposta è stata fortemente condizionata dai requisiti del sistema in merito al carico massimo sopportabile all'estremità della striscia. Questo di fatto ha comportato la necessità di introdurre un sistema di blocco che è risultato fortemente invasivo per quanto riguarda le dimensioni finali dei singoli moduli costituenti la mesh. Riducendo tale specifica è possibile implementare un sistema di bloccaggio di dimensioni meno importanti, con conseguente ulteriore miniaturizzazione della striscia.



Il percorso di crescita che ha seguito il sistema a partire dal conceptual design, fino ad arrivare alla fase di design for manufacturing è stato sviluppato focalizzando sull'effettiva possibilità di realizzazione delle parti, e dunque ragionando sulle lavorazioni necessarie a ottenere i diversi dettagli funzionali. Inoltre si è sempre cercato di concepire il sistema in modo da ridurre al minimo le parti soggette a sistemi di forze non simmetrici, e dunque soggette a flessione in direzioni che potessero arrecare problematiche alle funzionalità. Si è cercato dunque per quanto possibile di far lavorare i componenti maggiormente sollecitati a trazione o compressione.

Inoltre si è sempre tenuto conto della difficoltà di realizzazione, e dunque del costo delle lavorazioni sulle parti. Un parallelo studio su un modello ad elementi finiti ha consentito di prevedere il comportamento del sistema in fase di progettazione arrivando a una soluzione teoricamente effettivamente funzionante in grado di resistere alle specifiche dichiarate, di cui sono state descritte nel dettaglio le modalità di funzionamento. In ultimo sarà realizzato un prototipo che permetterà di testare la soluzione teorica proposta.

Per quanto riguarda il prototipo, è attualmente in costruzione e la data di consegna prevista per le parti da assemblare è il 21 settembre 2012. Per giungere alla realizzazione fisica è stato necessario un dialogo continuo con il referente dell'officina meccanica di precisione incaricata della realizzazione. Questo reciproco scambio di informazioni ha portato a una riprogettazione mirata volta a ridurre i costi di fabbricazione, in modo da poter realizzare il prototipo con costi contenuti e tempi ridotti, modificando eventuali lavorazioni costose non essenziali alla funzionalità del sistema. Al termine di questa fase si è giunti ad un accordo che ha portato il concept ad essere effettivamente realizzato.

Per concludere, la stretta collaborazione e il fitto scambio di informazioni con le persone esperte nei diversi ambiti integrati in questo lavoro di tesi, sia all'interno dell'università (esperti Satin ed esperti SMA) sia all'esterno (officina meccanica) ha costituito una vera e propria crescita personale per quanto riguarda la gestione dei rapporti lavorativi e il lavoro di team.







# Bibliografia

## *Tesi di laurea magistrale relativa al sistema Satin*

- [1] A. Mansutti - *Sviluppo del sistema di movimentazione di un'interfaccia tattile per l'esplorazione di oggetti virtuali*, Ottobre 2011 , Tesi di laurea magistrale, Relatore Prof. L. Vergani, Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica

## *Articoli relativi al sistema Satin*

- [2] M. Bordegoni, U. Cugini, M. Covarrubias, and M. Antolini - *A Force and Touch Sensitive Self-Deformable Haptic Strip for Exploration and Deformation of Digital Surfaces*. Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica.
- [3] M. Covarrubias, M. Bordegoni, U. Cugini, and M. Antolini - *Transmission system improvements in actuating a desktop haptic strip for exploration of virtual objects*. Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011 August 28-31, 2011, Washington, DC, USA.
- [4] M. Bordegoni, F. Ferrise, M. Covarrubias, and M. Antolini - *Haptic and sound interface for shape rendering*. Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica.

## *Materiale didattico relativo al TRIZ*

- [5] G. Cascini - *Lucidi delle lezioni del corso "Metodi di modellazione e simulazione di processi di sviluppo prodotto"*. A.A. 2010-2011.
- [6] Materiale progetto TETRIS - [www.tetris-project.org](http://www.tetris-project.org), ( TEaching TRIZ at School ).

## *Articoli relativi al TRIZ*

- [7] Cascini, G., Rotini, F., & Russo, D. (2008). Networks of Trends; Systematic Definition of Evolutionary Scenarios. *Proceeding World TRIZ Future Conference.* , 9, 355-367.

- [8] Baldussu, A., Becattini, N. and Cascini, G. (2011). Network of contradictions analysis and structured identification of critical control parameters, *Procedia Engineering*, 9, 3–17.
- [9] P. Viveros, E. Zio, C. Nikulin, R. Stegmaier, G. Bravo. Integration of root cause analysis and theory of inventive problem solving. In: Proceedings of the 11th international Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and The Annual European Safety and Reliability Conference. Helsinki, Finland. June 25-29, 2012.
- [10] Khomenko, N., De Gui, R., Lelait, L., & Kaikov, I. (2007). A framework for OTSM-TRIZ Based Computer Support to be used in Complex Problem Management. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 30 (1-2), 125-136.

### *Libri relativi alle SMA*

- [11] Thomas Duerig, Alan Pelton, and Christine Trepanier – *Nitinol*. SMST e-Elastic newsletter, September 2009 Copyright © 2009 ASM International® www.asminternational.org
- [12] F. Butera – *Shape memory actuators for automotive applications*, capitolo estratto da: F. Auricchio, L. Faravelli, G. Magonette e V. Torra – *Shape memory alloys advances in modelling and applications*. CIMNE, Barcelona 2001
- [13] Hiroyasu Funakubo - *Shape memory alloys*. New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1987

### *Articoli relativi alle SMA*

- [14] F. Schiedeck, S. Mojrzisch - *Improvement of SMA Actuator Performance Using Self-Sensing*. Institut für Dynamik und Schwingungen, Leibniz Universität Hannover, Germany
- [15] T. Hooley – *Sub-Miniature SMA Autofocus Actuator and Controller for Mobile-Phone Cameras*, Cambridge, England
- [16] Shu-Hung Liu, Tse-Shih Huang and Jia-Yush Yen - *Tracking Control of Shape-Memory-Alloy Actuators Based on Self-Sensing Feedback and Inverse Hysteresis Compensation*. Published: 28 December 2009, Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

- [17] *Superelasticity and Shape Memory Alloys* [www.doitpoms.ac.uk/tlplib/superelasticity/index.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/superelasticity/index.php), University of Cambridge.
- [18] *Martensite and Martensitic Phase Transformations* [www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2002/martensite.html](http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2002/martensite.html), University of Cambridge.

*Materiale didattico relativo alle SMA*

- [19] Ludovica Rovatti - *LEGHE A MEMORIA DI FORMA e principali applicazioni*. Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"
- [20] *Attuatori in Leghe a Memoria di Forma* <http://ing.univaq.it/mam/sma.html>, Università de L'Acquila, Dipartimento di Energetica
- [21] Vincenzo Arrichiello - *Leghe a Memoria di Forma Caratteristiche ed Applicazioni*. Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria, [www.pstliguria.it](http://www.pstliguria.it), Ottobre 2000

*Lavori d'anno relativi alle SMA*

- [22] Michela Planchestainer – *Leghe a memoria di forma, leghe Nichel-Titanio* [www.ing.unitn.it/~colombo/NITI/indice.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/NITI/indice.htm), Lavoro d'anno, Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali, Corso di *Metallurgia dei Metalli non Ferrosi* Prof. Ing. Diego Colombo.
- [23] Andrea Fabbri - *Attuatori in NiTiNOL ed altri Dispositivi a Memoria di Forma per Applicazioni Aerospaziali* [www.ing.unitn.it/~colombo/NitiAerospace/0copertina.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/NitiAerospace/0copertina.htm) Lavoro d'anno, Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali, Corso di *Metallurgia dei Metalli non Ferrosi* Prof. Ing. Diego Colombo.
- [24] Emanuele Magalini - *Leghe a Memoria di Forma e Vantaggi nell'uso per la Produzione di Fili per Applicazioni Ordontiche*. [www.ing.unitn.it/~colombo/NiTi\\_Maga.pdf](http://www.ing.unitn.it/~colombo/NiTi_Maga.pdf) Lavoro d'anno, Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali, Corso di *Metallurgia dei Metalli non Ferrosi* Prof. Ing. Diego Colombo.
- [24] Brugnara Marco- *Teoria ed applicazioni delle leghe a memoria di forma*. [www.ing.unitn.it/~colombo/LEGHE\\_A\\_MEMORIA\\_DI\\_FORMA/SMA.s.pdf](http://www.ing.unitn.it/~colombo/LEGHE_A_MEMORIA_DI_FORMA/SMA.s.pdf) Lavoro d'anno, Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali, Corso di *Metallurgia dei Metalli non Ferrosi* Prof. Ing. Diego Colombo.

## Bibliografia

### *Libri di misure*

- [25] A. Brunelli – *Misure industriali fisiche e meccaniche*. GISISERVIZI S.R.L. editore, seconda ed. 2003
- [26] Ernest O. Doebelin – *Strumenti e metodi di misura*, McGraw-Hill, seconda edizione 2008

### *Siti internet fornitori materiali utilizzati*

- [27] [www.saesgetters.com](http://www.saesgetters.com) – Cataloghi fili SMA, fornitore materiali utilizzati.
- [28] [www.rs-components.com](http://www.rs-components.com) – Cataloghi encoder e potenziometri.
- [29] [www.vanel.com](http://www.vanel.com) – Catalogo interattivo molle
- [30] Altri produttori di molle speciali: [www.durovis.ch](http://www.durovis.ch)  
[www.mollificiorizzato.com](http://www.mollificiorizzato.com)
- [31] OMCC srl OFFICINE MECCANICHE DI PRECISIONE Viale Carducci 221 20099 Sesto S. Giovanni (Mi) Tel. 02-2407806 Fax 02-2409770. Referente Eugenio Aldo Martinelli, Product & Quality Manager. Realizzazione completa parti meccaniche del prototipo.



# Appendice

## A) - Codice Matlab unico riportante i calcoli descritti nel capitolo 3:

```
clear all
close all
clc

m=menu('Applicazione SMA','1)Superficie di risposta indicativa angolo tra i
settori "alfa" ','2)Calcolo angolo date le dimensioni delle parti(geometria
definita) c,s,m,r_guida (calcolo auto l, corsa SMA e L_iniz SMA)','3) Numero
settori in funzione del lato triangolo');

switch m;

    case 1; %Superficie di risposta indicativa angolo tra i settori "alfa"

        %definiamo dei vettori su cui far variare l [mm] e r [mm] :

        r=[50:1:60];

        l=[23:1:50];

        %ALTRA COPPIA DI VALORI PER R,L per una visione più estesa
        %r=[40:1:70];
        %l=[30:1:80];

        alfa= zeros(length(l),length(r));

        % Implementazione calcoli relativi all'intersezione dei piani nello
        % spazio cartesiano su cui giacciono i settori triangolari con i
        % vertici su un sistema di riferimento cilindrico con raggio
        % variabile
        for i=1:length(l)
            for j=1:length(r)

                th=2*asin(l(i)/(2*r(j)));
                h=l(i)*sqrt(3)/2*sin(acos(2*r(j)*(1-sin(acos(l(i)/(2*r(j)))))/...
                    (l(i)*sqrt(3))));

                v=[ h*r(j)*sin(th), h*r(j)*(1-cos(th)), r(j)^2*(sin(th/2)...
                    -sin(th/2)*cos(th)-sin(th)+sin(th)*cos(th/2))];

                w=[-2*h*r(j)*sin(th/2) , 0 , -2*r(j)^2*(cos(th/2)-1)*sin(th/2)];

                alfarad=acos( (v(1)*w(1)+v(2)*w(2)+v(3)*w(3))/(sqrt(v(1)^2+...
                    v(2)^2+v(3)^2)*sqrt(w(1)^2+w(2)^2+w(3)^2) );

                alfagrad=alfarad*180/pi();

                inclinazione_max_settore=180-alfagrad;

                alfa(i,j) = inclinazione_max_settore;
            end
        end
    end
end
```

## Appendice

```
end
end

alfa
figure(1)
mesh(r,l,alfa)
title('superficie Angolo massimo in funzione della dimensione del lato
triangolo ')
xlabel('dimensione raggio raccordo [mm]')
ylabel('dimensione lato triangolo [mm]')
zlabel('Angle [Deg]')
grid on

case 2 %Calcolo angolo date le dimensioni delle parti (geometria
%definita) c,s,m,r_guida (calcolo auto l, corsa SMA e L_iniz SMA)

%Il lato triangolo inizialmente si è imposto come discretizzato,
%una volta pensato il concept si ottiene in base alle dimensioni
%delle parti:

%VETTORE RAGGIO DI RACCORDO DESIDERATO [mm]
r=[50:1:60];
%RAGGIO GUIDA SMA PER MANTENERE PERPENDICOLARI AL SETTORE LE FORZE[mm]
r_guida=7.5
%SPESORE CERNIERA [mm]
c=4
%PROFONDITÀ CERNIERA [mm]
s=5
%SPAZIO PER MOLLA [mm]
m=12.6
%PERCENTUALE DI ACCORCIAMENTO DELLA SMA
percent_accorciamento=0.04

%DA CUI SI OTTIENE TRAMITE CALCOLI IL LATO l, RIFERITO AGLI ASSI
%DEI FORI DELLE CERNIERE ossia il lato del triangolo "apparente"

l=4*c+m+2*(s/2*1/tan(pi/6))

%E SI RICAVA ANCHE LO SPAZIO DEL TRIANGOLO UTILE SU CUI POTER
%LAVORARE E APPLICARE SMA, PULEGGE E DISPOSITIVI VARI

l_util=4*c+m

%CALCOLO VETTORE ANGOLI DESIDERATI:

for j=1:length(r)

    th=2*asin(1/(2*r(j)));
    h=l*sqrt(3)/2*sin(acos(2*r(j)*(1-sin(acos(1/(2*r(j)))))/...
        (l*sqrt(3)))));

    v=[ h*r(j)*sin(th), h*r(j)*(1-cos(th)), r(j)^2*(sin(th/2)...
        -sin(th/2)*cos(th)-sin(th)+sin(th)*cos(th/2))];

    w=[-2*h*r(j)*sin(th/2) , 0 , -2*r(j)^2*(cos(th/2)-1)*sin(th/2)];

    alfarad=acos( (v(1)*w(1)+v(2)*w(2)+v(3)*w(3))/...
        (sqrt(v(1)^2+v(2)^2+v(3)^2)*sqrt(w(1)^2+w(2)^2+w(3)^2));

    alfagrad=alfarad*180/pi();

    inclinazione_max_settore=180-alfagrad;
    %OTTENIAMO IL VETTORE IN GRADI PER SEMPLICE COMPrensIONE
    alfa(j) = inclinazione_max_settore;
end
end
```

```

        %SALVIAMO ANCHE IL VETTORE IN RADIANTI PER FARE I CONTI
        alfa_rad(j)=pi()-alfarad;
    end
    alfa

    figure(1)
    plot(r,alfa,'o')
    title('Angolo massimo in funzione del raggio di raccordo desiderato')
    xlabel('dimensione raggio raccordo [mm]')
    ylabel('Angle° [Deg]')
    grid on

    corsa=alfa_rad*2*r_guida
    l_iniz_sma=corsa/percent_accorciamento

    figure(2)
    plot(r,l_iniz_sma,'o')
    title('Lunghezza filo SMA in funzione del raggio di raccordo
desiderato')
    xlabel('dimensione raggio raccordo [mm]')
    ylabel('Lunghezza minima sma attiva[mm]')
    grid on

    case 3; %Numero settori in funzione del lato triangolo

    %Numero settori necessari perchè la striscia risulti di lunghezza
    %richiesta al variare del lato triangolo.

    %Lunghezza totale della striscia da rispettare:
    l_tot=300;

    %Vettore con inserite tutte le lunghezze possibili del lato con
    %discretizzazione di 1 [mm]
    l=[23:1:50]

    %Inizializzazione vettore
    n_elementi=zeros(1,length(l));

    %Divido la lunghezza richiesta per la semi ampiezza del lato, ossia
    %la dimensione del triangolo in corrispondenza dell'asse della
    %striscia
    n_elementi(1,:)=(l(1,:)/2).^(-1)*l_tot;

    %Tale valore va approssimato per eccesso
    n_elementi=chop(n_elementi,3)
    n_app=zeros(1,length(l));

    %Andiamo ad approssimare il numero di elementi riferendoci a una
    %tolleranza di toll[mm] inferiore alla lunghezza fissata in 300[mm]
    %della striscia.

    toll=5; %tolleranza = 5[mm]

    for i=1:length(l)

        if 300 - floor(n_elementi(1,i))*l(1,i)/2 < toll

            % Appross difetto
            n_appr(1,i)=floor(n_elementi(1,i));

        else

            % Appross eccesso
            n_appr(1,i)=ceil(n_elementi(1,i));
        end
    end

```

## Appendice

```
end

%Metodo per conoscere se il num settori è pari o
%dispari. Siccome il numero dei settori deve essere dispari,
%nel caso questo sia pari occorre aggiungere un elemento.

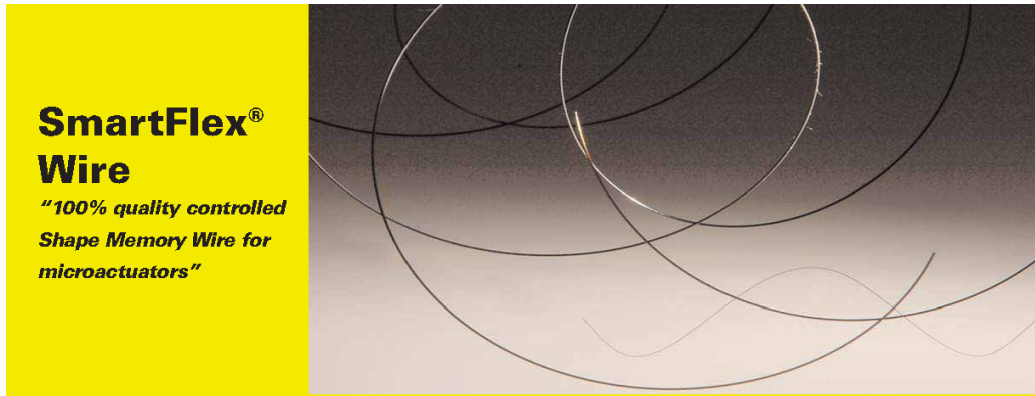
if n_appr(1,i)/2 == ceil(n_appr(1,i)/2)
    n_appr(1,i)=n_appr(1,i)+1;
end
end

n_appr
l_tot=zeros(1,length(l));
l_tot(1,:)=l(1,:).*n_appr(1,+)/2

figure(1)
plot(l,n_appr,'o' )
title('Numero minimo elementi in funzione del lato triangolo ')
xlabel('dimensione lato triangolo [mm]')
ylabel('numero elementi')
grid on

end
```

B) - Catalogo SAES getters SMA wires



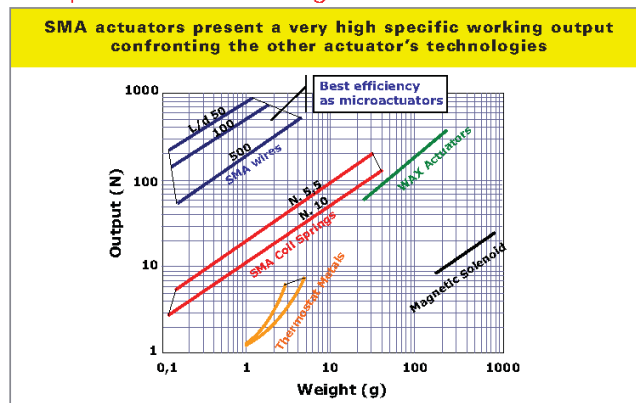
HIGHLIGHTS

General Features

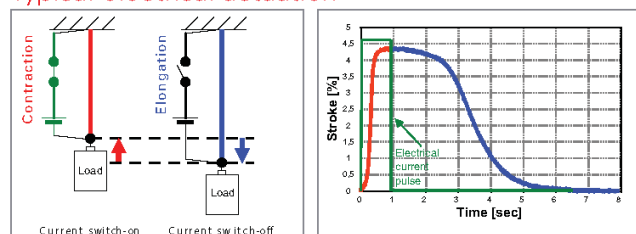
- The smallest powerful electrical actuator
- Direct linear or angular motion using a thin wire
- The simplest solution  
*Simple mechanism without bulky gears*
- The silent solution  
*No noise emission during actuation*
- Nature-like movement  
*Smooth and controlled action*

Product	Diameter [µm]	Diameter [inch]	Max Force [N]	Max Stroke	Suggested operating Force [N]	Suggested operating Stroke
SmartFlex25	25	0,001	0,3	5%	0,1	<3,5%
SmartFlex50	50	0,002	1,2		0,3	
SmartFlex76	76	0,003	2,7		0,8	
SmartFlex01	100	0,004	4,7		1,3	
SmartFlex015	150	0,006	6,2		2,7	
SmartFlex02	200	0,008	19		5	
SmartFlex03	300	0,012	42		12	
SmartFlex04	400	0,016	75		21	
SmartFlex05	500	0,020	118	33		

Comparison of technologies



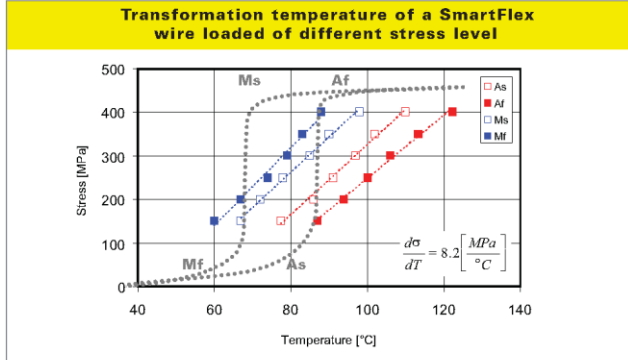
Typical electrical actuation



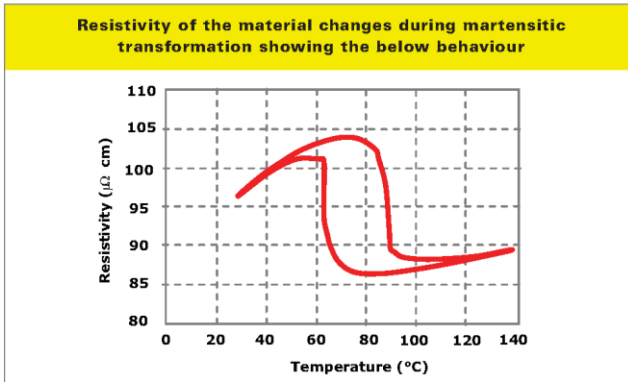
we support your innovation



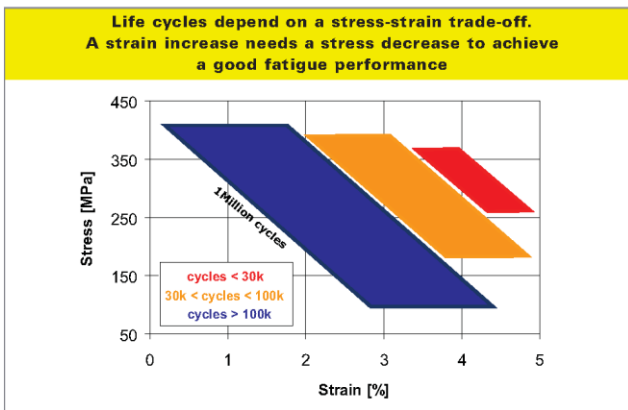
Transformation temperatures



Resistivity



Fatigue behavior



© 2009 SAES Getters. Printed in Italy. All rights reserved. SAES® and SmartFlex® are registered trademarks of SAES Getters S.p.A., its subsidiaries and affiliates. SAES Getters reserves the right to change or modify product specifications at any time without notice.

SmartFlex® Wire

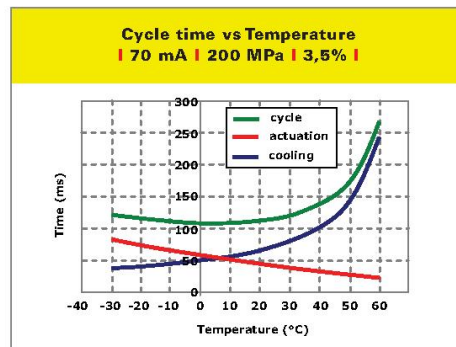
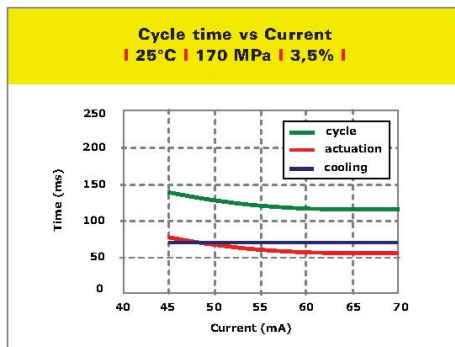
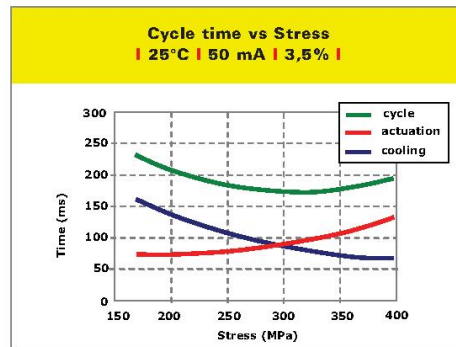
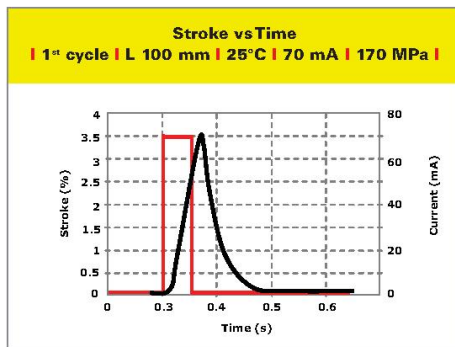
The SAES Getters Group manufacturing companies are ISO9001 certified, the Asian and Italian companies are also ISO14001 certified. Full information about our certifications for each company of the Group is available on our website at [www.saesgetters.com](http://www.saesgetters.com)

D.SMA.93.0



SAES Getters Group  
[www.saesgetters.com](http://www.saesgetters.com)  
[sma@saes-group.com](mailto:sma@saes-group.com)

# SmartFlex® 25 μm

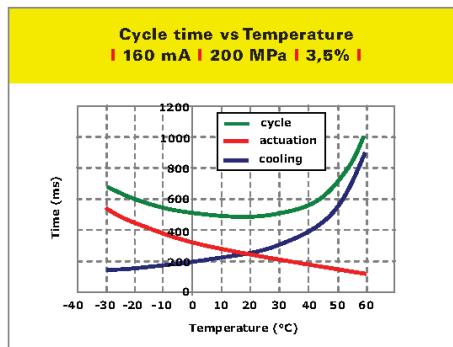
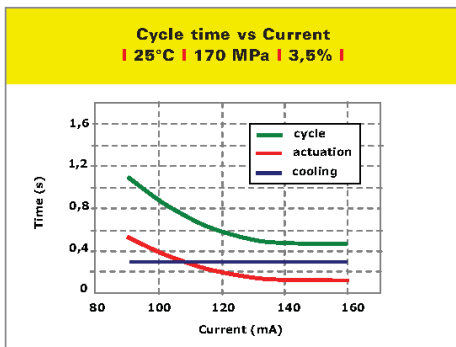
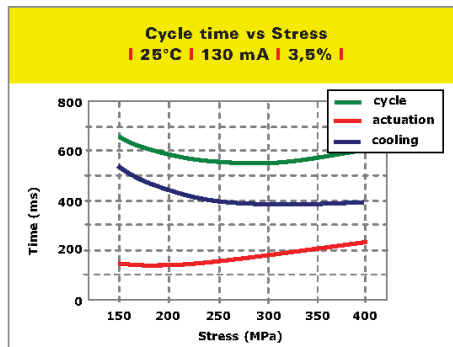
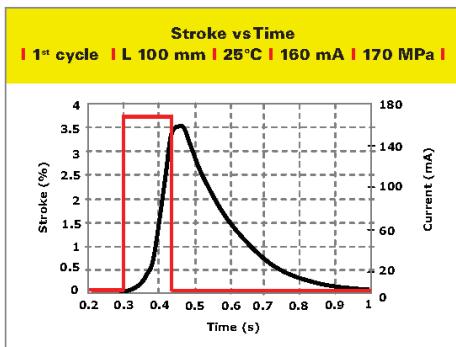
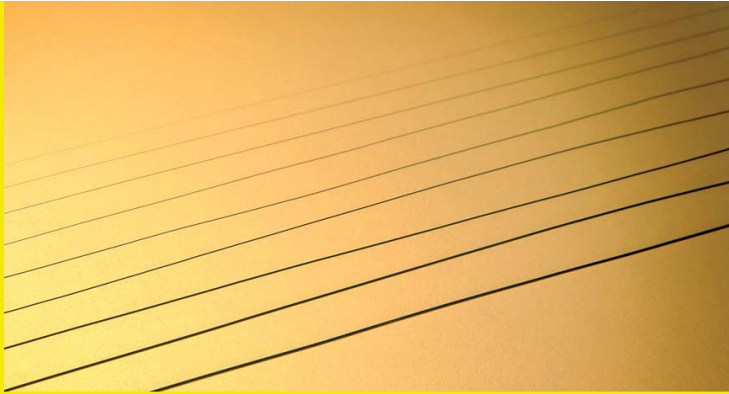


SAES Getters Group  
www.saesgetters.com  
sma@saes.group.com



we support your innovation

**SmartFlex®**  
**50 μm**



The SAES Getters Group manufacturing companies are ISO9001 certified, the Asian and Italian companies are also ISO14001 certified. Full information about our certifications for each company of the Group is available on our website at: [www.saesgetters.com](http://www.saesgetters.com)

© 2009 SAES Getters. Printed in Italy. All rights reserved. SAES® and SmartFlex® are registered trademarks of SAES Getters S.p.A., its subsidiaries and affiliates. SAES Getters reserves the right to change or modify product specifications at any time without notice.

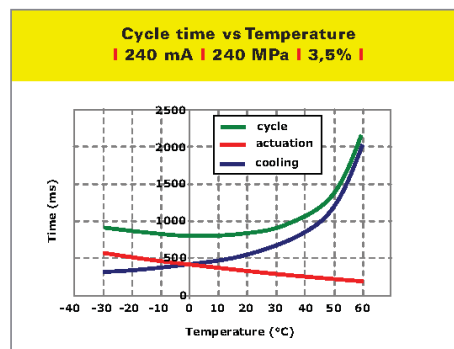
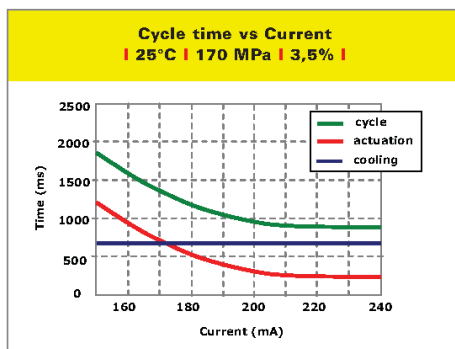
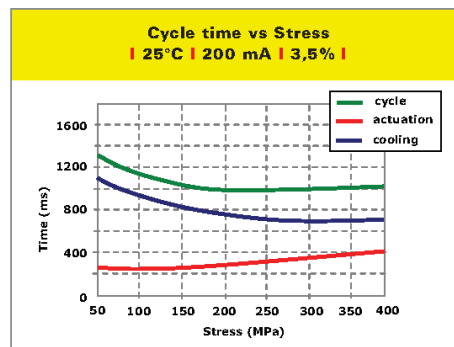
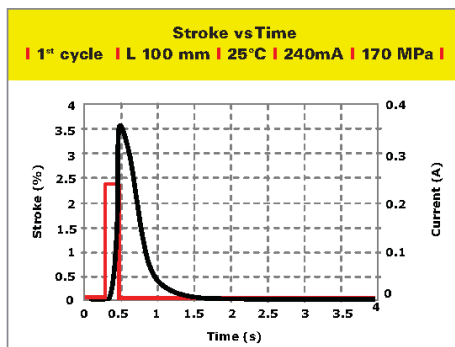
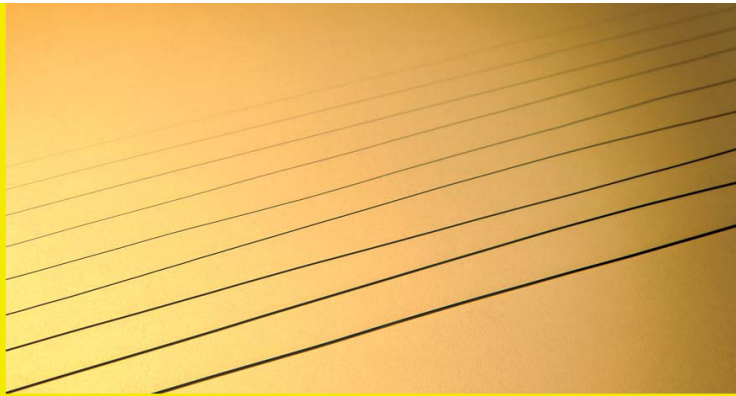
D.SMA.94.0

we support your innovation





**SmartFlex®**  
**76 μm**

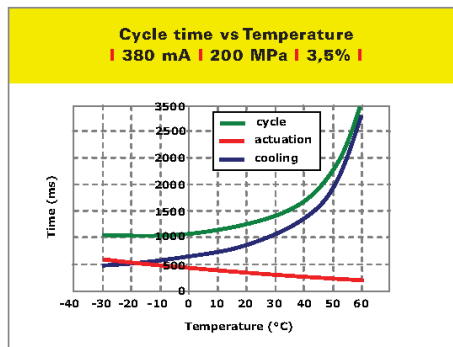
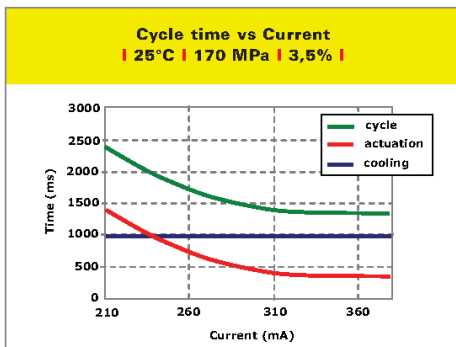
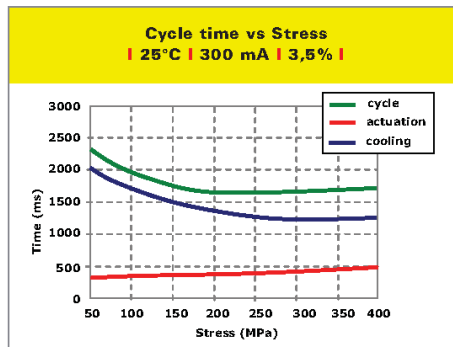
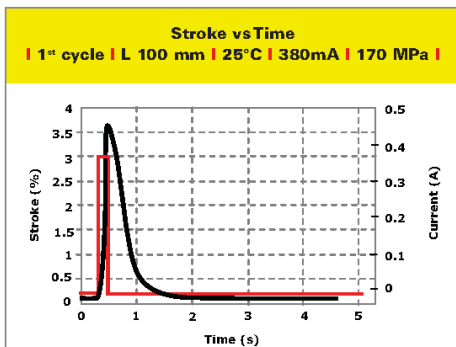
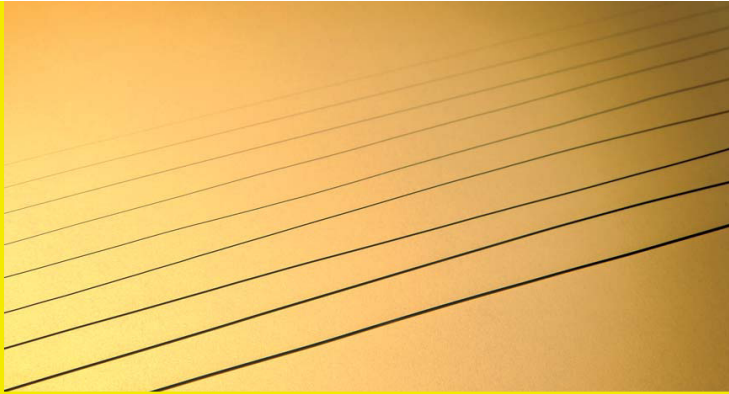


SAES Getters Group  
www.saesgetters.com  
sma@saes-group.com



we support your innovation

**SmartFlex®**  
**100 μm**



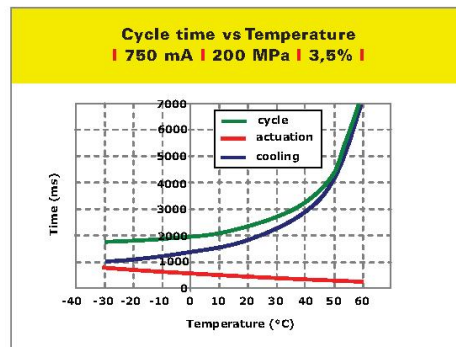
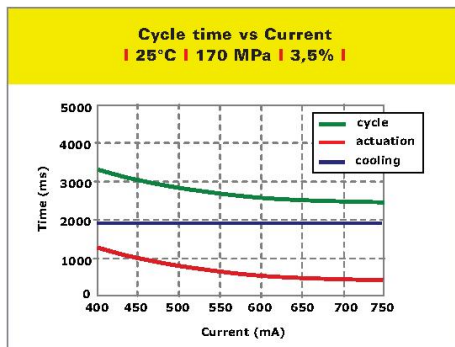
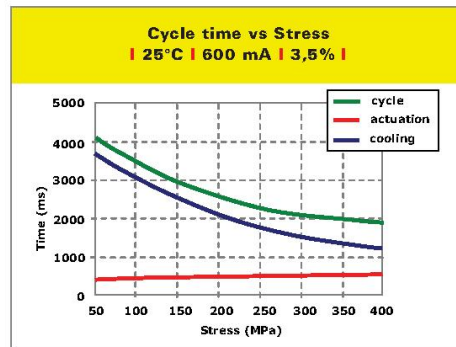
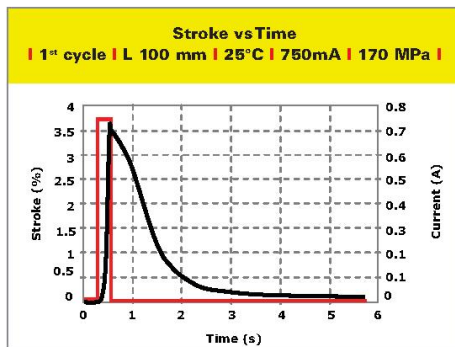
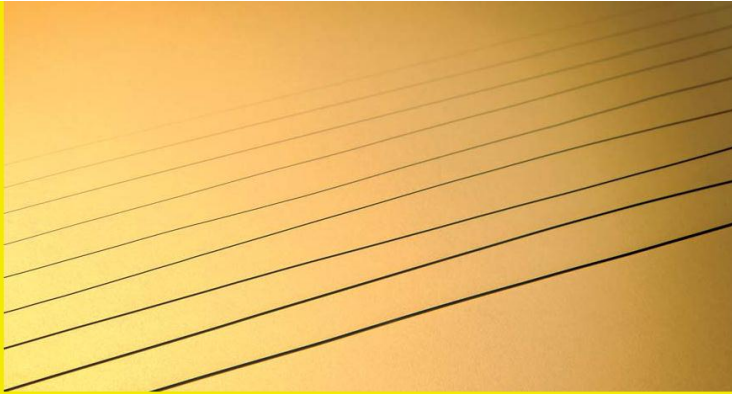
The SAES Getters Group manufacturing companies are ISO9001 certified, the Asian and Italian companies are also ISO14001 certified. Full information about our certifications for each company of the Group is available on our website at: [www.saesgetters.com](http://www.saesgetters.com)

© 2009 SAES Getters. Printed in Italy. All rights reserved. SAES® and SmartFlex® are registered trademarks of SAES Getters S.p.A., its subsidiaries and affiliates. SAES Getters reserves the right to change or modify product specifications at any time without notice.  
D.SMA.95.0



we support your innovation

# SmartFlex® 150 μm

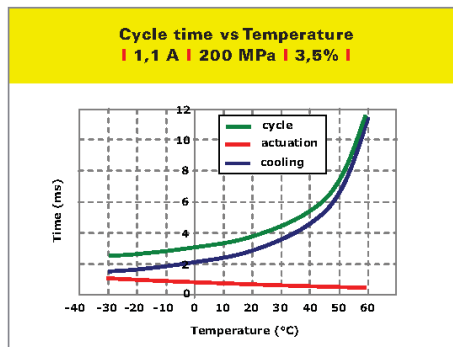
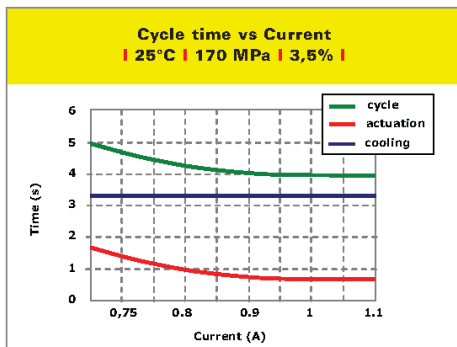
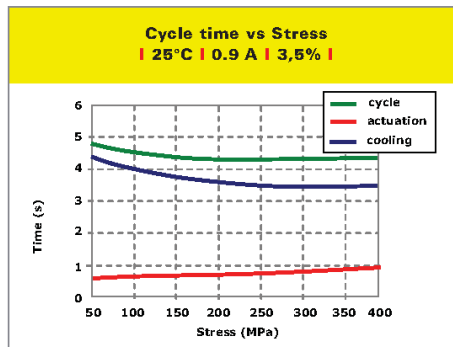
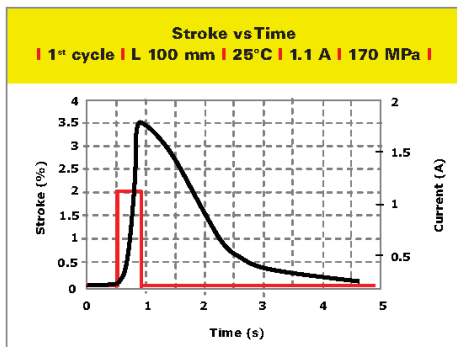
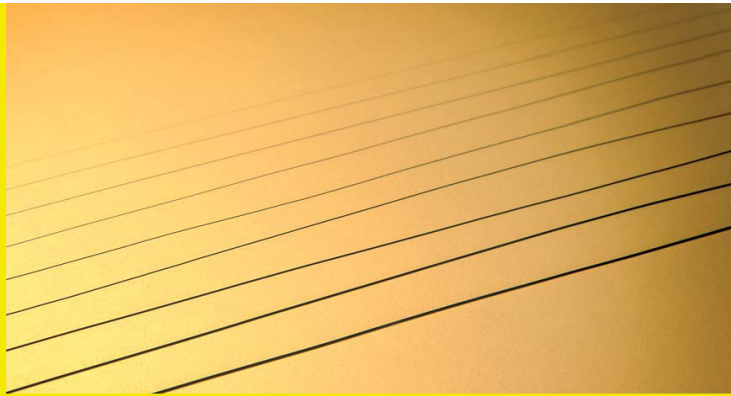


SAES Getters Group  
www.saesgetters.com  
sma@saes-group.com



we support your innovation

**SmartFlex®**  
**200 μm**



The SAES Getters Group manufacturing companies are ISO9001 certified, the Asian and Italian companies are also ISO14001 certified. Full information about our certifications for each company of the Group is available on our website at: [www.saesgetters.com](http://www.saesgetters.com)

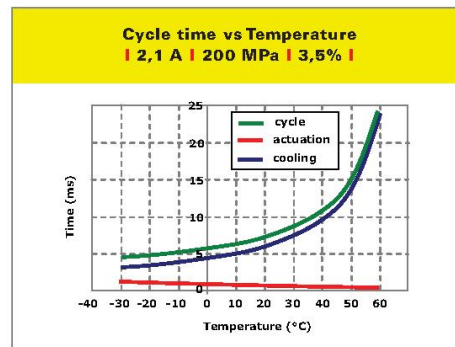
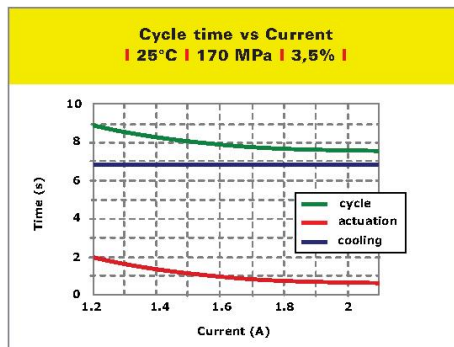
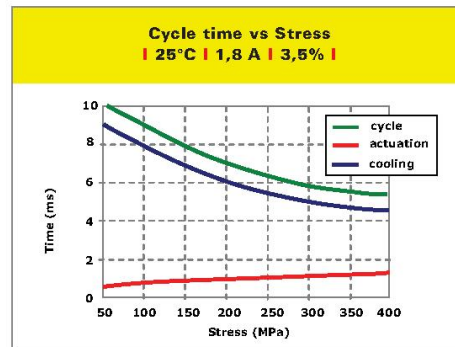
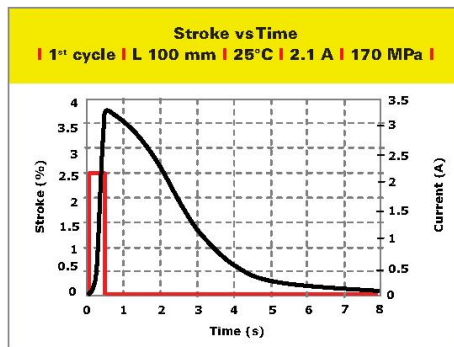
© 2009 SAES Getters. Printed in Italy. All rights reserved. SAES® and SmartFlex® are registered trademarks of SAES Getters S.p.A., its subsidiaries and affiliates. SAES Getters reserves the right to change or modify product specifications at any time without notice.

D.SMA.96.0



we support your innovation

# SmartFlex® 300 μm

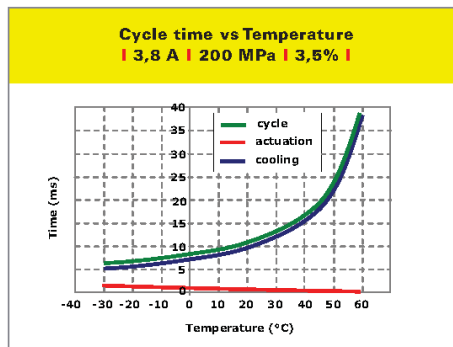
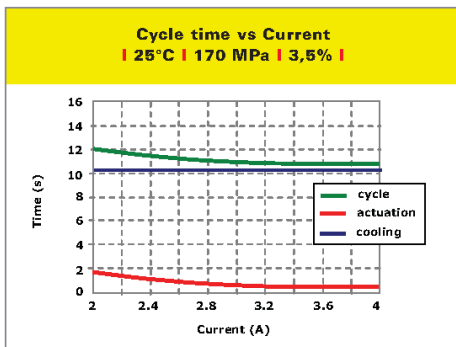
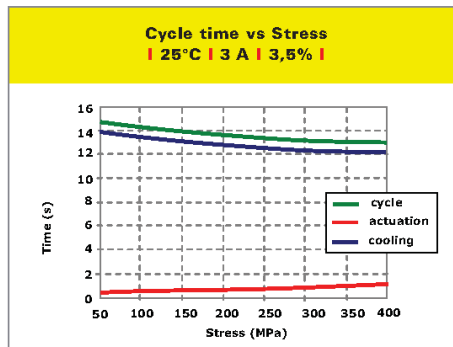
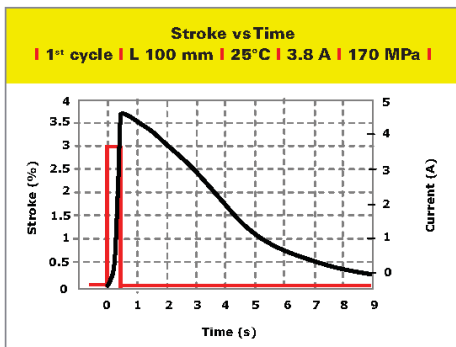
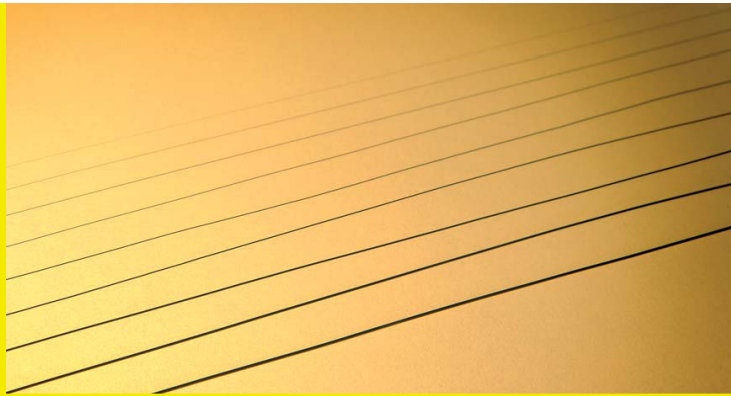


SAES Getters Group  
www.saesgetters.com  
sma@saes-group.com



we support your innovation

**SmartFlex®**  
**400 μm**



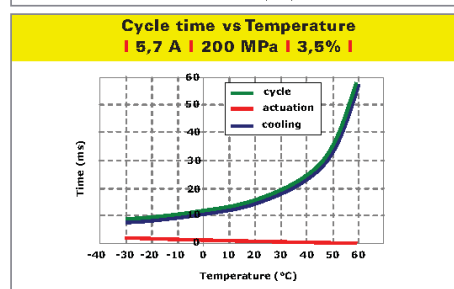
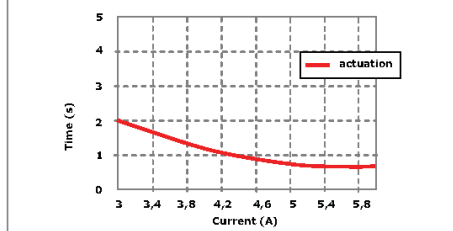
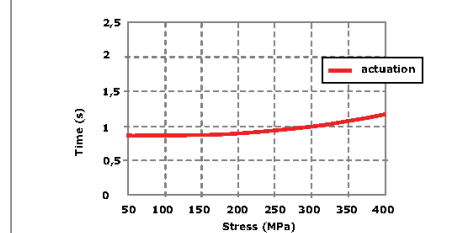
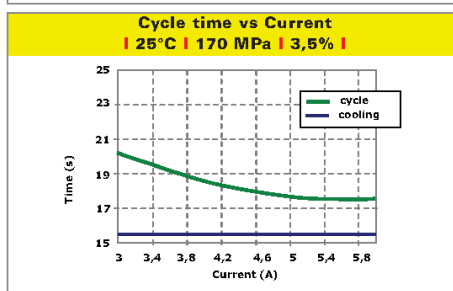
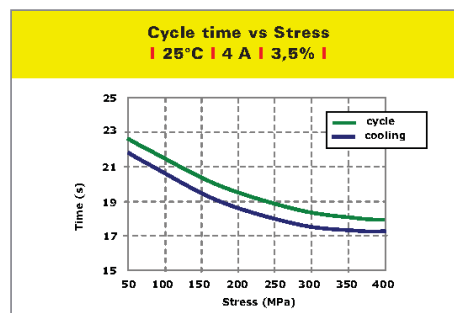
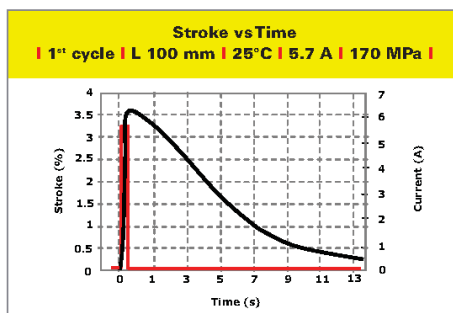
The SAES Getters Group manufacturing companies are ISO9001 certified, the Asian and Italian companies are also ISO14001 certified. Full information about our certifications for each company of the Group is available on our website at: [www.saesgetters.com](http://www.saesgetters.com)

© 2009 SAES Getters. Printed in Italy. All rights reserved. SAES® and SmartFlex® are registered trademarks of SAES Getters S.p.A., its subsidiaries and affiliates. SAES Getters reserves the right to change or modify product specifications at any time without notice.  
D.SMA.97.0



we support your innovation

# SmartFlex® 500 μm



SAES Getters Group  
www.saesgetters.com  
sma@saes-group.com



we support your innovation





**C) - Potenzimetro resistivo "12mm Rotary Position Sensor, 10K"**



**Features**

- Surface mount and through-hole versions
- 12 mm Square / Dustproof
- One million rotational cycles
- Thin profile
- RoHS compliant\*

**Applications**

- Volume control on audio equipment
- Motion controllers
- Dishwasher control systems
- Automotive temperature range

**3382 - 12 mm Rotary Position Sensor**

**Electrical Characteristics**

Standard Resistance Range ..... 2.5K to 100K ohms  
 Resistance Tolerance .....  $\pm 30\%$  std.  
 Linearity .....  $\pm 2\%$   
 Resolution ..... Essentially infinite  
 Insulation Resistance @ 500 VDC ..... 100 megohms min.  
 Dielectric Strength  
 Sea Level ..... 500 VAC  
 70,000 Feet ..... 350 VAC  
 Adjustment Angle .....  $330^\circ$  nom.

**Environmental Characteristics**

Power Rating (16 volts max.)  
 50 °C .....  $\pm 500$  ppm/°C  
 Humidity ..... TRS  $\pm 20\%$   
 120 °C ..... 0 watt  
 Operating Temperature Range .....  $-40^\circ\text{C}$  to  $+120^\circ\text{C}$   
 Temperature Coefficient ...  $\pm 500$  ppm/°C  
 Humidity ..... TRS  $\pm 20\%$   
 Shock ..... 20 G TRS  $\pm 10\%$ ; VRS  $\pm 10\%$   
 Load Life @ 50 °C Rated Power ..... TRS  $\pm 10\%$  / -20 %  
 Rotational Life ..... 1,000,000 cycles  
 TRS  $\pm 20\%$   
 Thermal Shock ..... 5 cycles  
 TRS  $\pm 20\%$ ; VRS  $\pm 10\%$

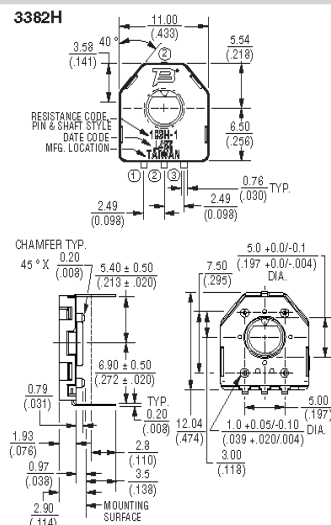
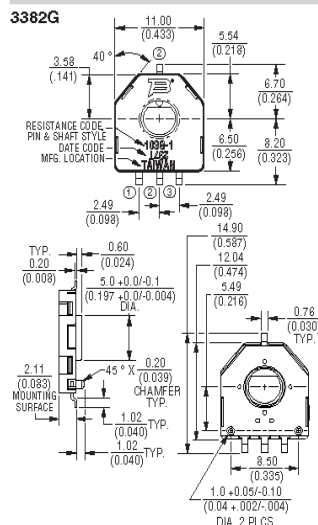
**Physical Characteristics**

Mechanical Angle ... Continuous rotation  
 Torque ..... 30 gf-cm max.  
 Weight ..... Approximately 0.0321 g  
 Marking ..... Resistance code and date code  
 Standard Packaging  
 G Style ..... 1000 pcs./13 " reel  
 H Style ..... 50 pcs./tube  
 IP Rating ..... IP40

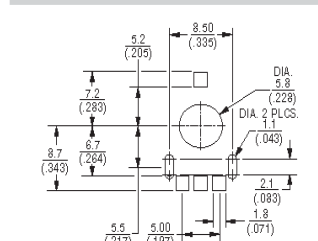
**How To Order**

Model **3382 G - 1 - 103 G**  
 Style  
 G = SMD with 8.5 mm Locator Pin Spacing  
 H = Through-hole with 5 mm x 7.5 mm Locator Pin Spacing  
 Standard Product Indicator  
 -1 = 4 mm Shaft Diameter  
 -2 = 3.5 mm Shaft Diameter  
 Resistance Code  
 Packaging Designator  
 G = 1000 pcs./13 " Reel (G Style)  
 Blank = 50 pcs./Tube (H Style)

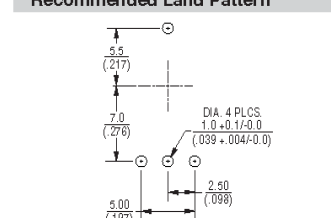
**Product Dimensions**



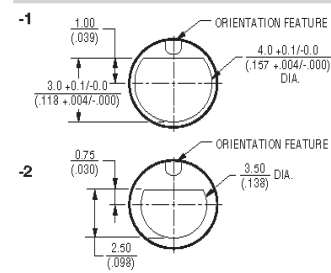
**Recommended Land Pattern**



**Recommended Land Pattern**



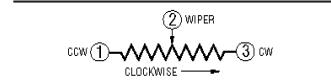
**Rotor Dimensions**



DIMENSIONS: MM (INCHES)  
 TOLERANCES:  $\pm 0.30$  UNLESS OTHERWISE NOTED  
 (INCHES)

**Standard Resistance Table**

Resistance (Ohms)	Resistance Code
2,500	252
5,000	502
10,000	103
25,000	253
50,000	503
100,000	104



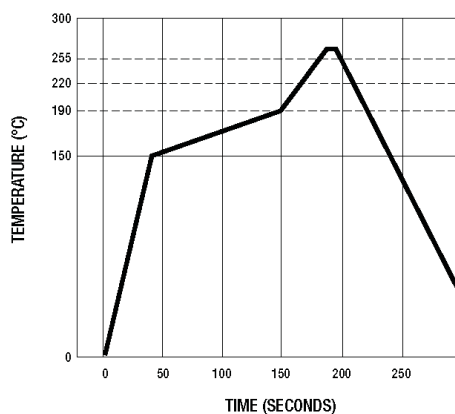
\*RoHS Directive 2002/95/EC Jan 27 2003 including Annex. Specifications are subject to change without notice. Customers should verify actual device performance in their specific applications

**3382 - 12 mm Rotary Position Sensor**



**Processing Information**

Process Description	Materials	Temperature	Time Interval
1. Apply solder paste to test board (8 - 10 mil thick)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sn/Ag/Cu Alloy water soluble or no clean solder paste</li> <li>• Single sided epoxy glass (G10) (UL approved)</li> <li>• PC board approx. 4x4x.06 in.</li> </ul>	Room temperature	
2. Place test units onto board	6 units/board		
3. Ramp up	Convection oven		2.5 °C ±0.5 °/second
4. Preheat		150 °C to 190 °C	90 ±30 seconds
5. Time above liquidus		220 °C	60-90 seconds
6. Peak temperature			260 °C +0 °/-5 ° 10-20 sec. within 5 °C of peak
7. Ramp down		Room temperature	3 °C ±0.5 °C/second



Specifications are subject to change without notice.  
Customers should verify actual device performance in their specific applications

**D) – Molle a catalogo Vanel: [www.vanel.com](http://www.vanel.com)**

Molla torsionale:

<b>Codice</b>	G.045.050.1200
<b>Diam. est. [mm]</b>	4.5
<b>Diam. filo [mm]</b>	0.5
<b>Numero di spire</b>	12
<b>Posizione ramo [°]</b>	0
<b>L. libera [mm]</b>	6.5
<b>Lungh. ramo [mm]</b>	18
<b>Dd [mm]</b>	2.6
<b>Rigidità [N*mm/°]</b>	0.0594
<b>Materiale</b>	Inox
<b>M max. [N*mm]</b>	15.13
<b>F max. [daN]</b>	0.0840556
<b>Angolo max. [°]</b>	254.7
<b>Diam. int. [mm]</b>	3.5
<b>Peso [g]</b>	0.290372
<b>Rotazione</b>	Destra o sinistra

Molle a compressione

<b>Numero di spire</b>	9.2
<b>Codice</b>	C.040.090.0143.A
<b>Diam. filo [mm]</b>	0.9
<b>Diam. est. [mm]</b>	4
<b>L. libera [mm]</b>	14.3
<b>Rigidità [daN/mm]</b>	3.1
<b>Materiale</b>	Filo armonico
<b>Molatura</b>	Si
<b>Diam. int. [mm]</b>	2.2
<b>blocco [mm]</b>	8.73
<b>Peso [g]</b>	0.45297
<b>Alesaggio [mm]</b>	4.08
<b>Albero [mm]</b>	2.156
<b>Passo[mm]</b>	1.72
<b>Flessione con lunghezza [mm]</b>	nessun rischio
<b>Lungh. max. [mm]</b>	11.99

<b>Numero di spire</b>	6.1
<b>Codice</b>	C.056.110.0119.A
<b>Diam. filo [mm]</b>	1.1
<b>Diam. est. [mm]</b>	5.6
<b>L. libera [mm]</b>	11.9
<b>Rigidità [daN/mm]</b>	4.022989
<b>Materiale</b>	Filo armonico
<b>Molatura</b>	Si
<b>Diam. int. [mm]</b>	3.4
<b>blocco [mm]</b>	7.26
<b>Peso [g]</b>	0.649348
<b>Alesaggio [mm]</b>	5.712
<b>Albero [mm]</b>	3.332
<b>Passo[mm]</b>	2.38
<b>Flessione con lunghezza [mm]</b>	nessun rischio
<b>Lungh. max. [mm]</b>	9.59

<b>Numero di spire</b>	10.6
<b>Codice</b>	C.044.080.0167.A
<b>Diam. filo [mm]</b>	0.8
<b>Diam. est. [mm]</b>	4.4
<b>L. libera [mm]</b>	16.7
<b>Rigidità [daN/mm]</b>	1.034483
<b>Materiale</b>	Filo armonico
<b>Molatura</b>	Si
<b>Diam. int. [mm]</b>	2.8
<b>blocco [mm]</b>	8.88
<b>Peso [g]</b>	0.477637
<b>Alesaggio [mm]</b>	4.488
<b>Albero [mm]</b>	2.744
<b>Passo[mm]</b>	1.74
<b>Flessione con lunghezza [mm]</b>	nessun rischio
<b>Lungh. max. [mm]</b>	12.02

<b>Numero di spire</b>	11.2
<b>Codice</b>	C.046.075.0157.A
<b>Diam. filo [mm]</b>	0.75
<b>Diam. est. [mm]</b>	4.6
<b>L. libera [mm]</b>	15.7
<b>Rigidità [daN/mm]</b>	0.6145
<b>Materiale</b>	Filo armonico
<b>Molatura</b>	Si
<b>Diam. int. [mm]</b>	3.1
<b>blocco [mm]</b>	8.77
<b>Peso [g]</b>	0.472927
<b>Alesaggio [mm]</b>	4.692
<b>Albero [mm]</b>	3.038
<b>Passo[mm]</b>	1.54
<b>Flessione con lunghezza [mm]</b>	nessun rischio
<b>Lungh. max. [mm]</b>	9.73

Molla sistema di scarico

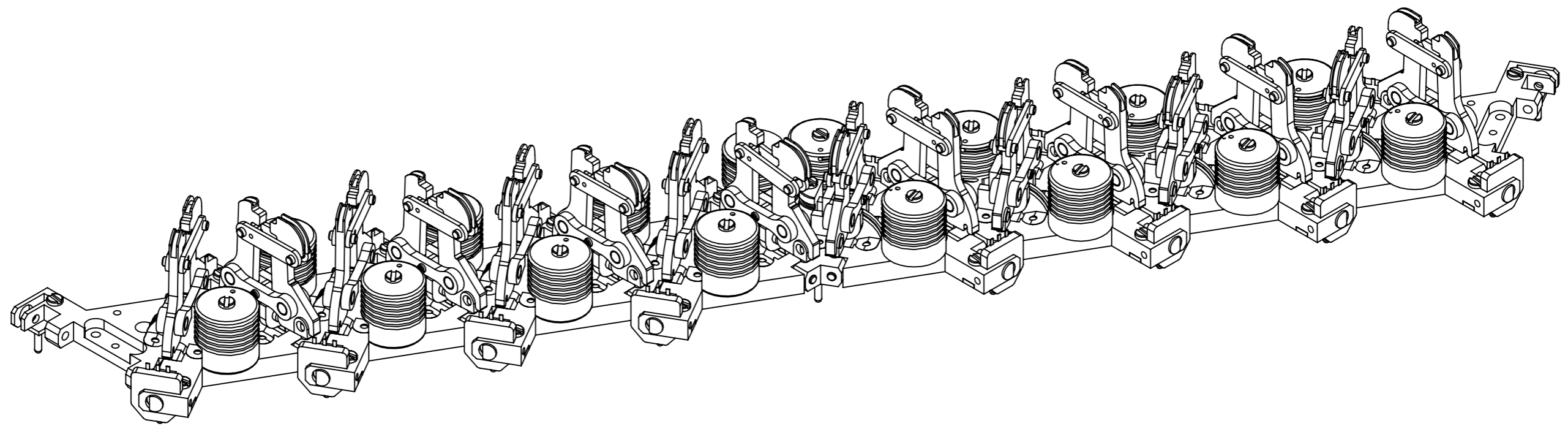
<b>Numero di spire</b>	13.3
<b>Codice</b>	C.020.032.0100.AP
<b>Diam. filo [mm]</b>	0.32
<b>Diam. est. [mm]</b>	2
<b>L. libera [mm]</b>	10
<b>Rigidità [daN/mm]</b>	0.199892
<b>Materiale</b>	Filo armonico
<b>Molatura</b>	No
<b>Diam. int. [mm]</b>	1.36
<b>blocco [mm]</b>	4.73
<b>Peso [g]</b>	0.044778
<b>Alesaggio [mm]</b>	2.04
<b>Albero [mm]</b>	1.3328
<b>Passo[mm]</b>	0.83
<b>Flessione con lunghezza [mm]</b>	6.11
<b>Lungh. max. [mm]</b>	6.04

**E) – Messe in tavola parti**

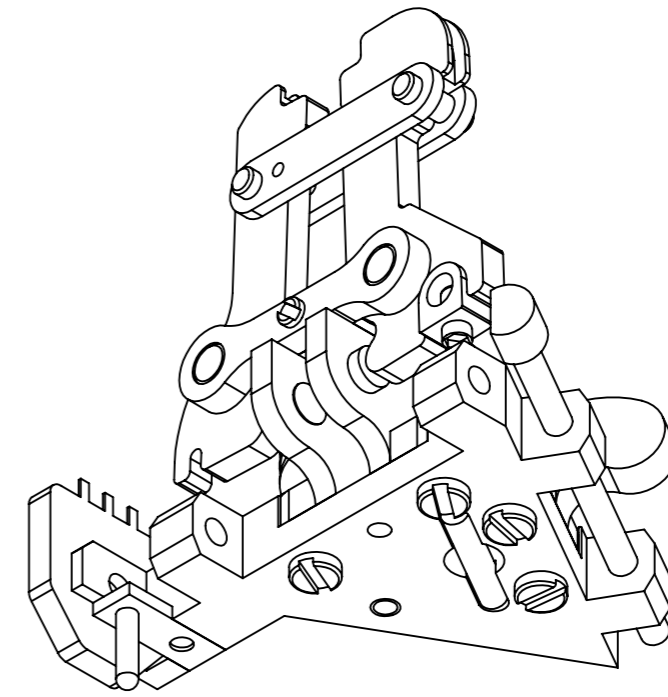
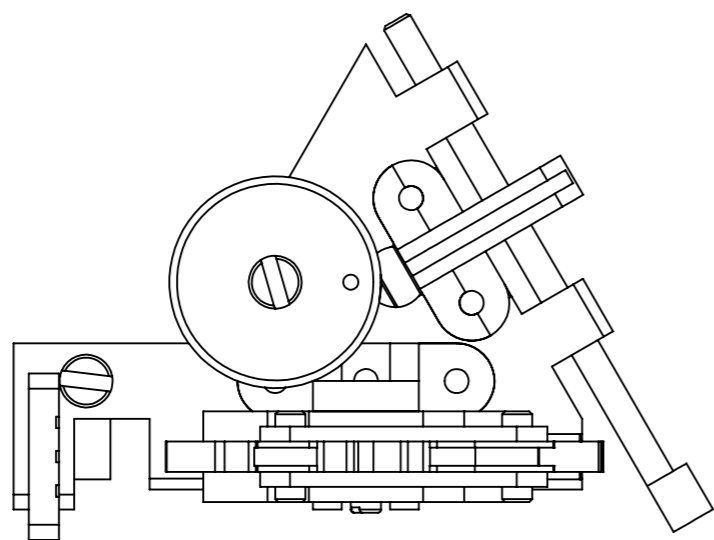
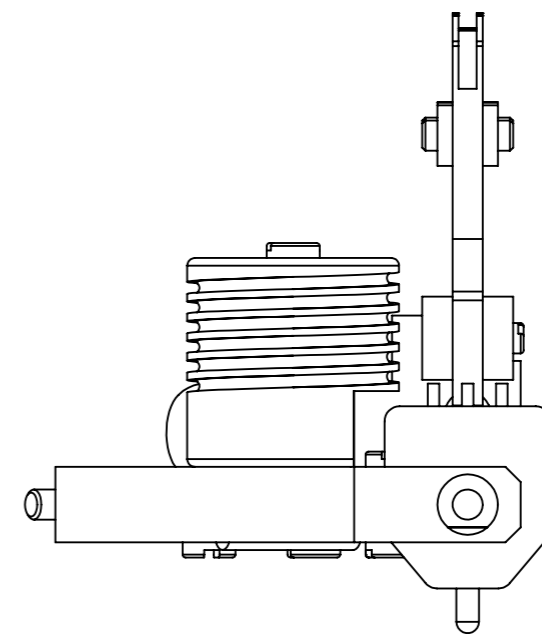
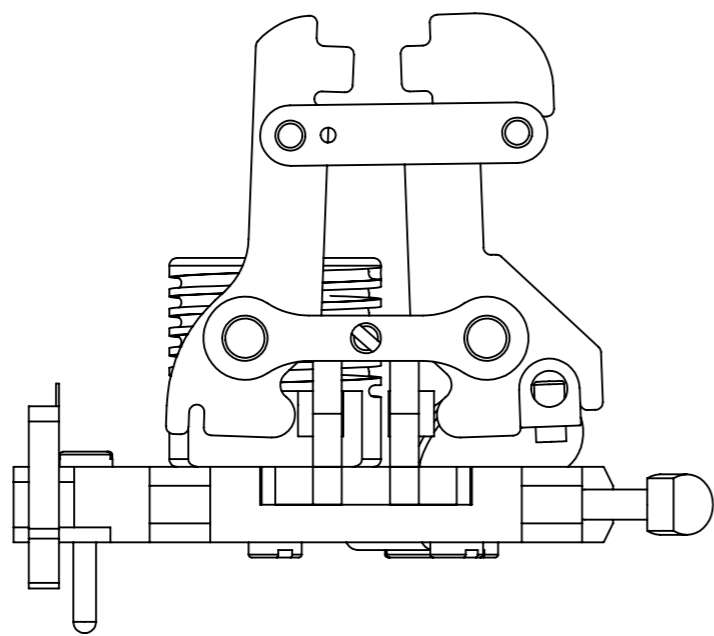
Si riportano le messe in tavola delle parti principali costituenti il modulo.



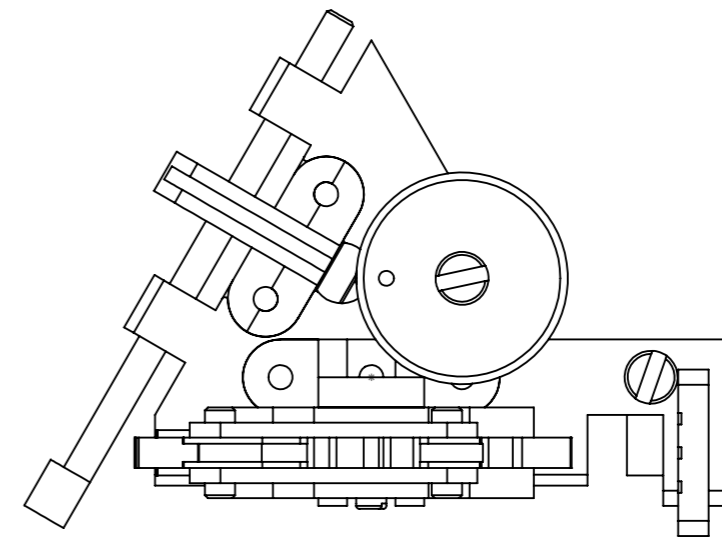
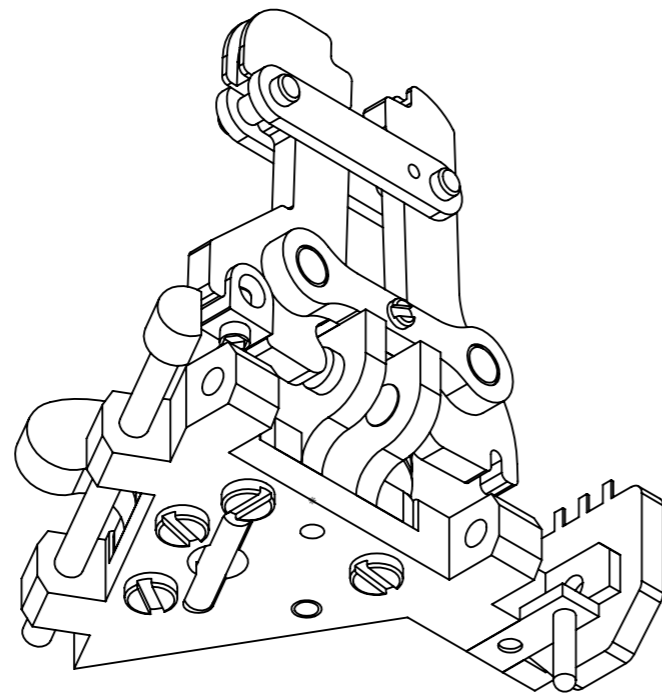
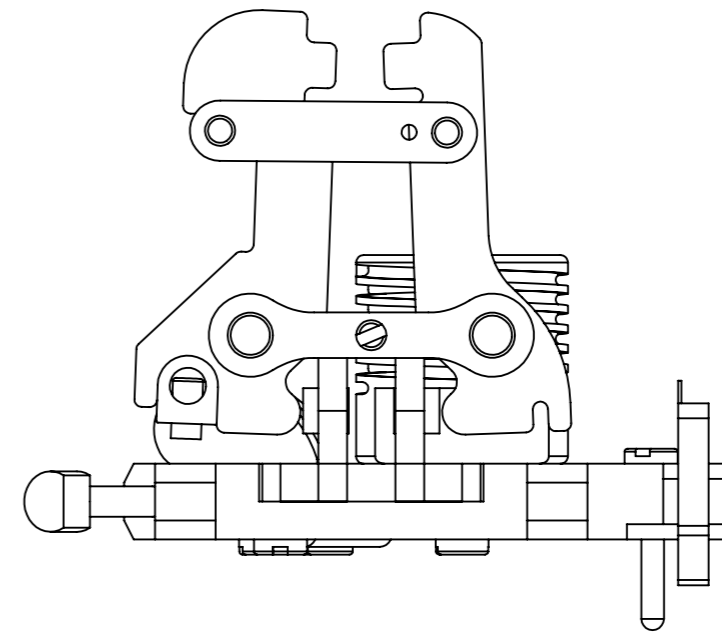
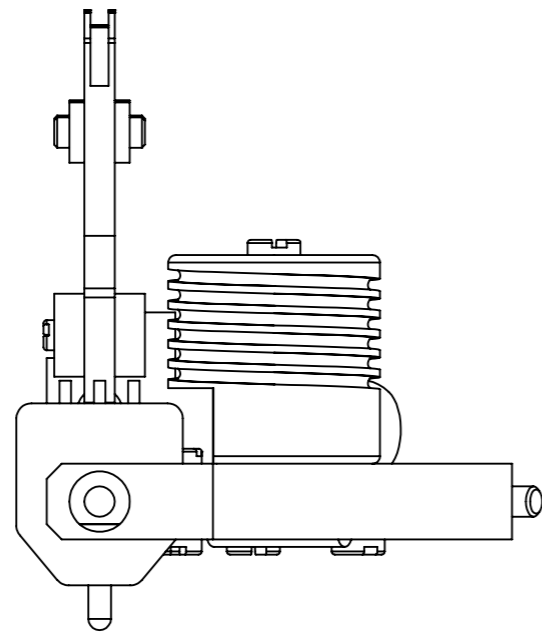




SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:				FINITURA:		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE			
								TITOLO: <h1 style="text-align: center;">Assemblaggio totale striscia</h1>					
DISEGNATO				NOME		FIRMA						DATA	
VERIFICATO													
APPROVATO													
FATTO													
QUALITA'								MATERIALE:		N. DISEGNO			
										Disegno A			
										A3			
								SCALA:1:1		FOGLIO 1 DI 1			

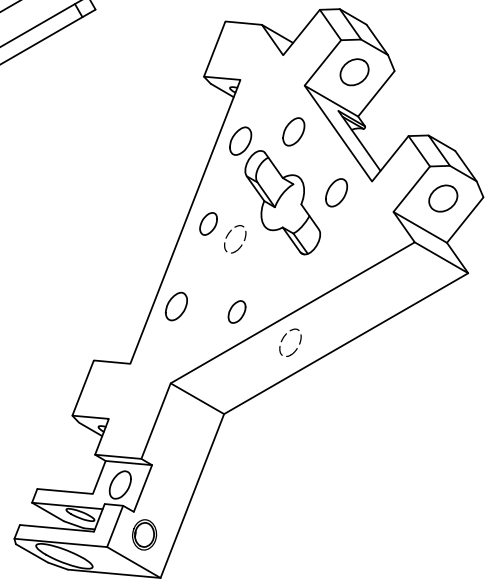
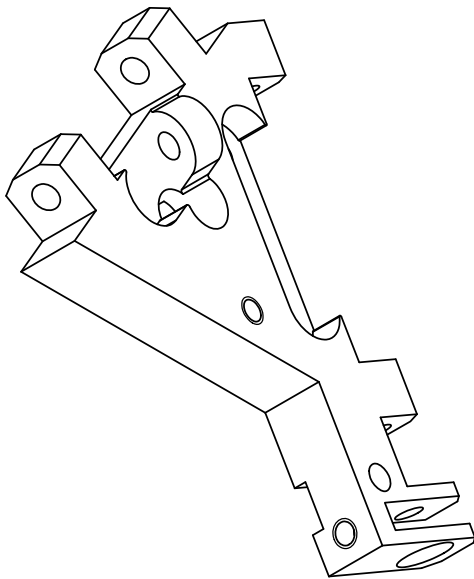
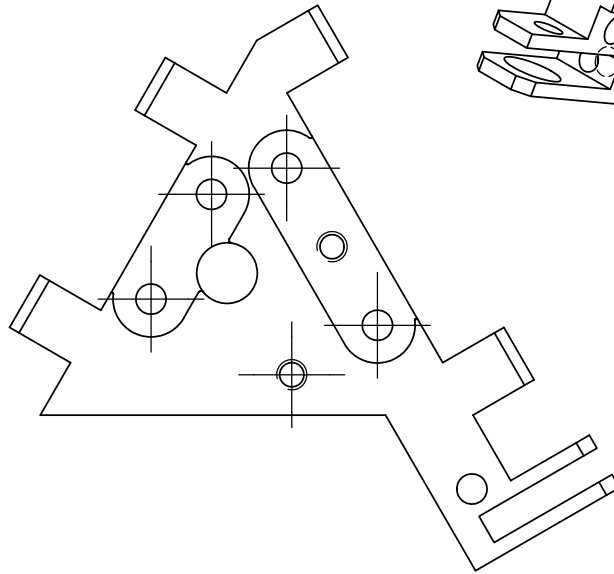
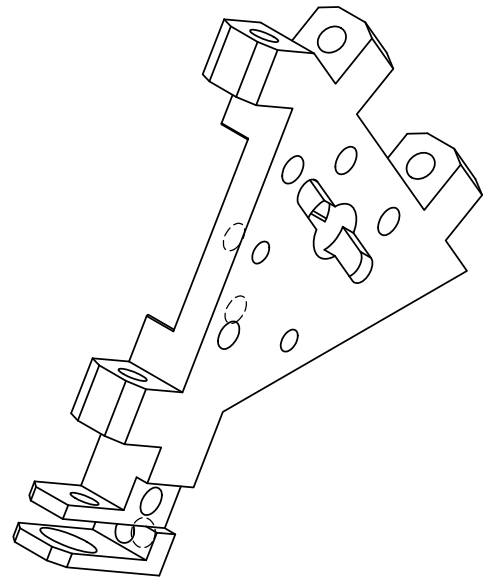
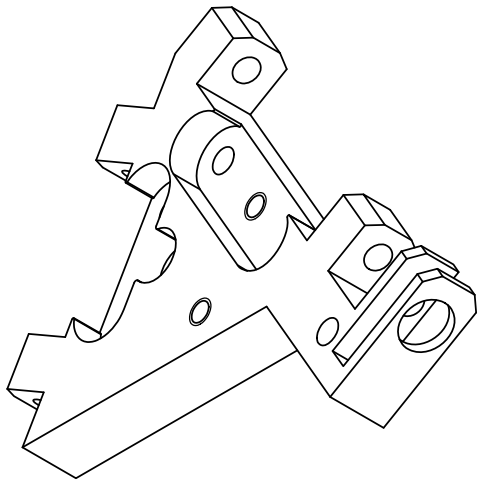


SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
DISEGNATO		NOME		FIRMA		DATA		TITOLO: <b>Assemblato modulo destro completo</b>	
VERIFICATO									
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'						MATERIALE:		N. DISEGNO <b>Disegno B</b>	
								A3	
								SCALA: 2:1	
								FOGLIO 1 DI 1	

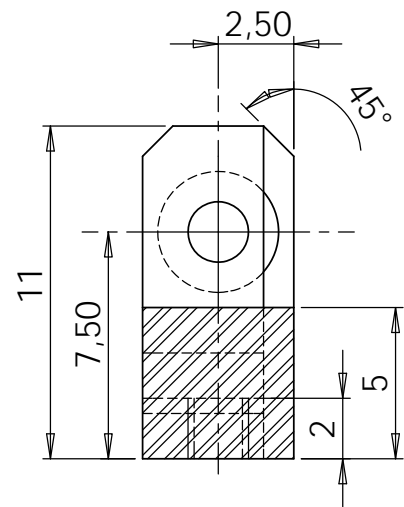


SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
DISEGNATO		NOME		FIRMA		DATA		TITOLO: <b>Assemblato modulo sinistro completo</b>	
VERIFICATO									
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'						MATERIALE:		N. DISEGNO <b>Disegno C</b>	
								A3	
								SCALA: 2:1	
								FOGLIO 1 DI 1	

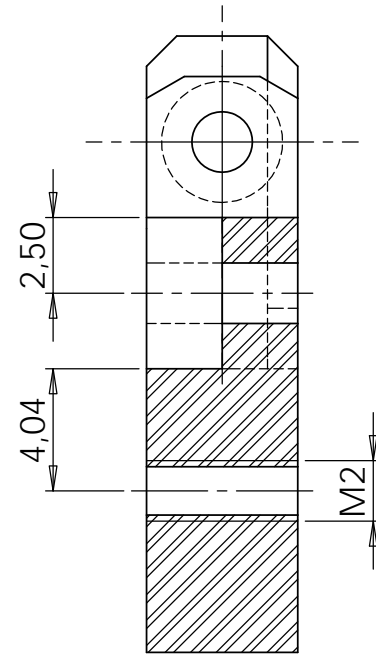




SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						TITOLO:  Triangolo destro			
DISEGNATO		FIRMA		DATA		N. DISEGNO		Disegno5	
VERIFICATO								A4	
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'				MATERIALE: Alluminio		SCALA:2:1		FOGLIO 2 DI 2	
Licenza scolastica di SolidWorks Solo uso accademico									

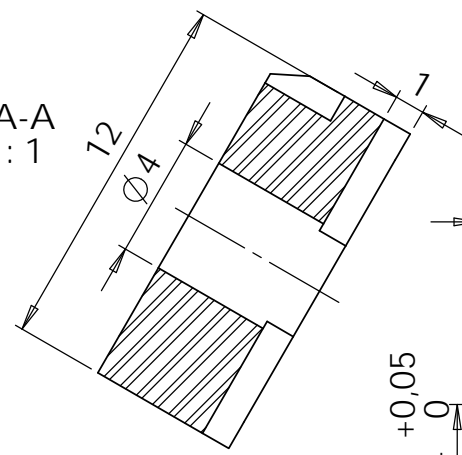


SECTION B-B  
SCALE 4 : 1

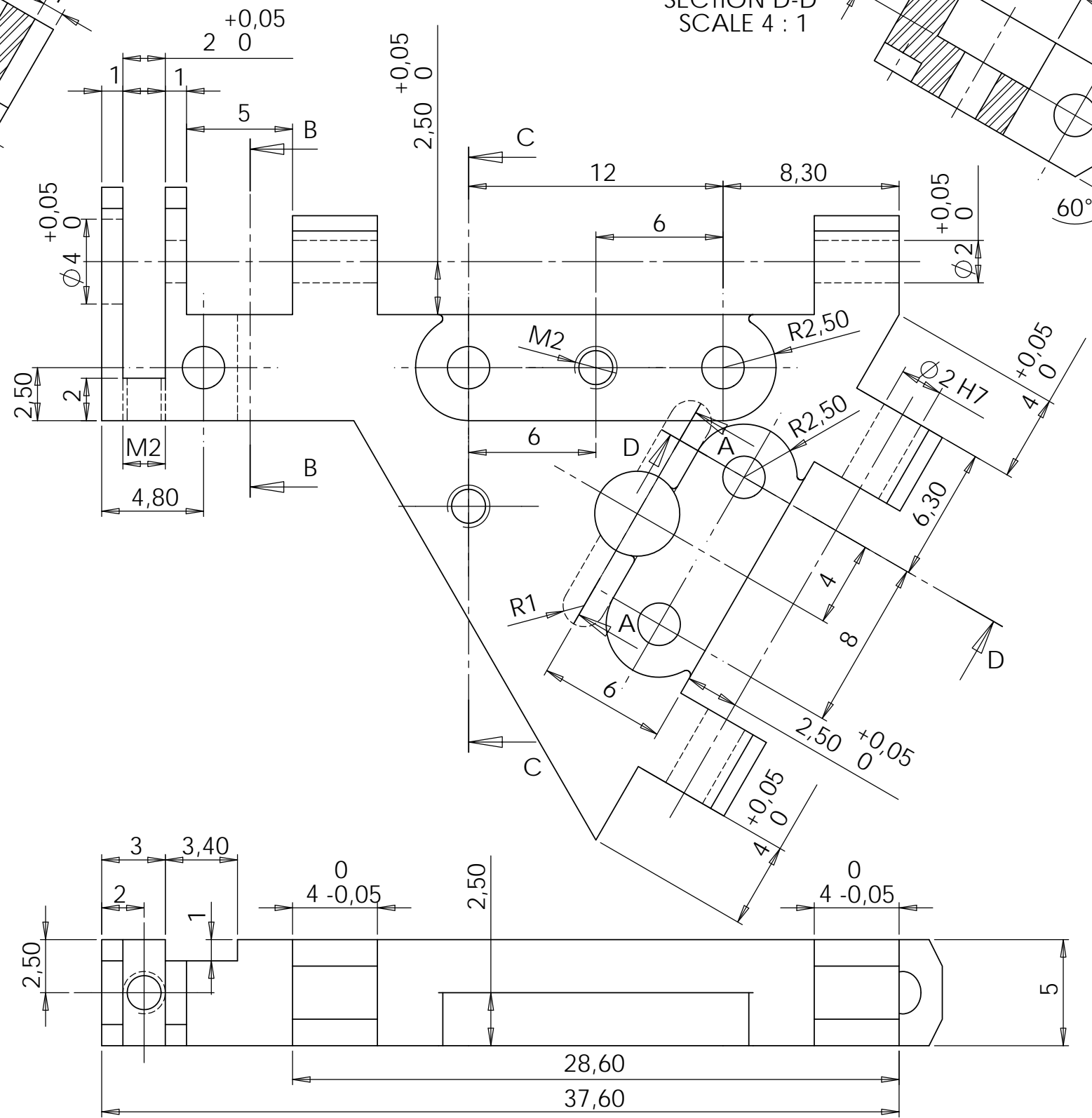
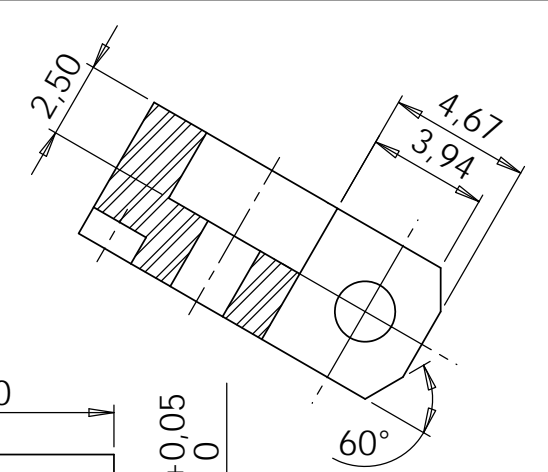


SECTION C-C  
SCALE 4 : 1

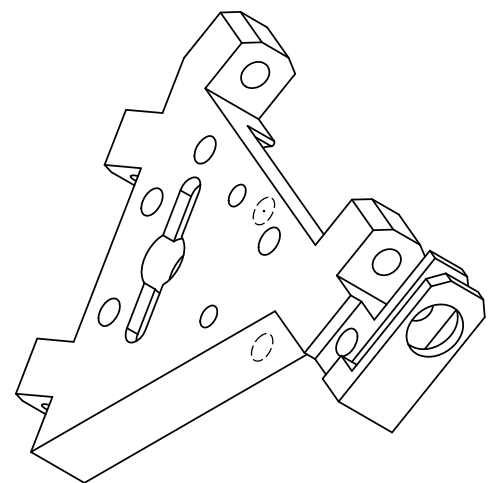
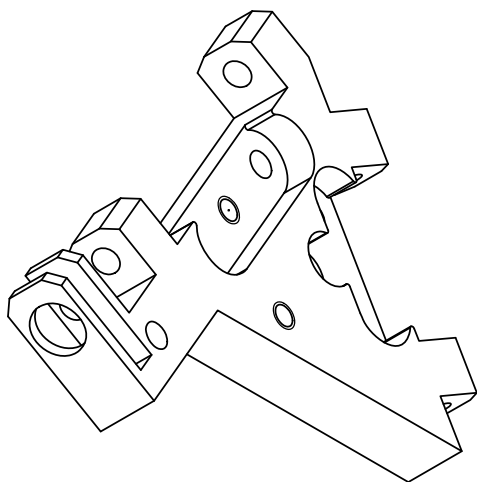
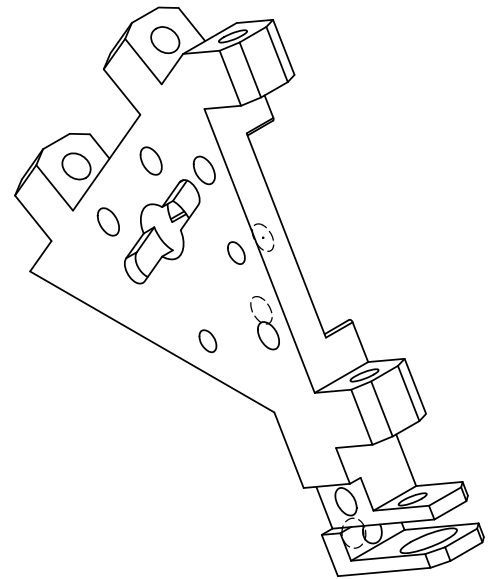
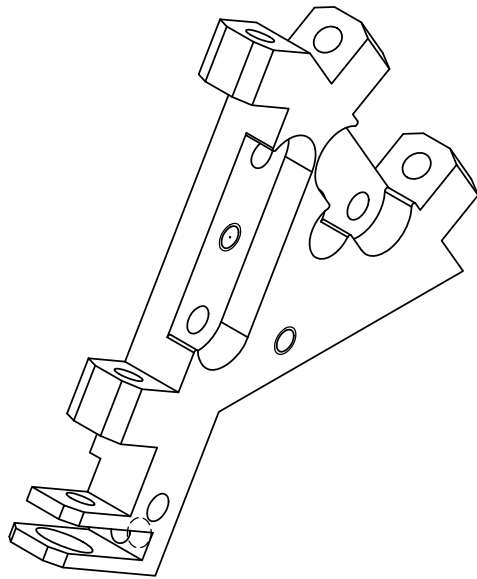
SECTION A-A  
SCALE 4 : 1



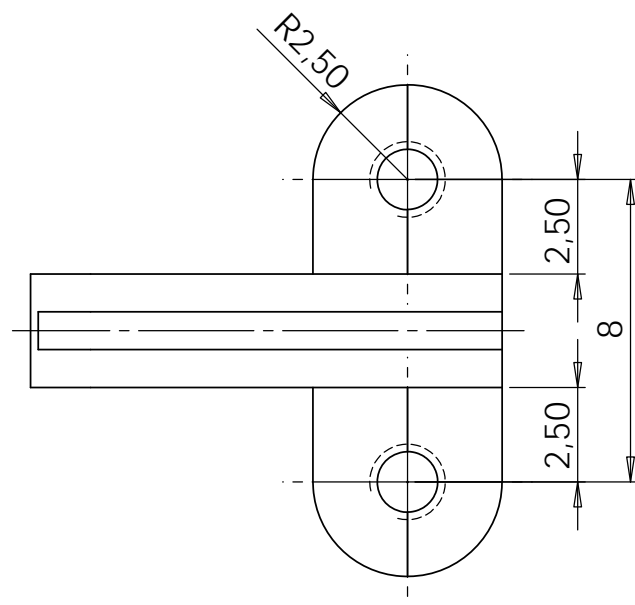
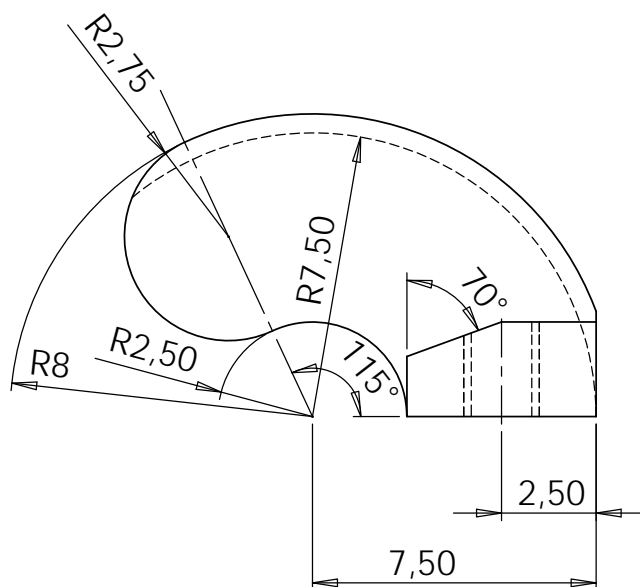
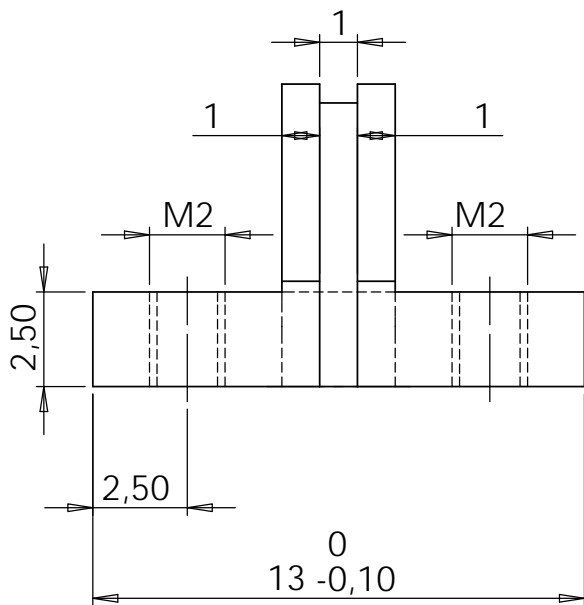
SECTION D-D  
SCALE 4 : 1



Fori non quotati: Ø2mm		FINITURA: 12.5		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE		
DISEGNATO						TITOLO: Triangolo sinistro				
VERIFICATO										
APPROVATO										
FATTO										
QUALITA'						MATERIALE: Alluminio		N. DISEGNO Disegno6		A3
						SCALA:4:1		FOGLIO 1 DI 2		

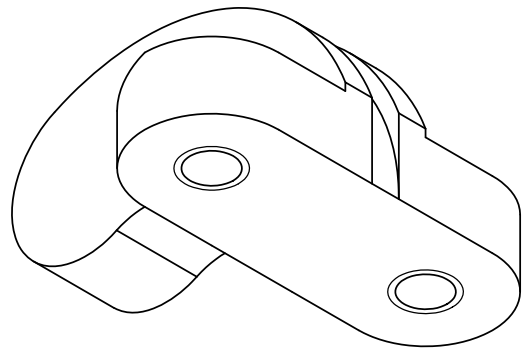
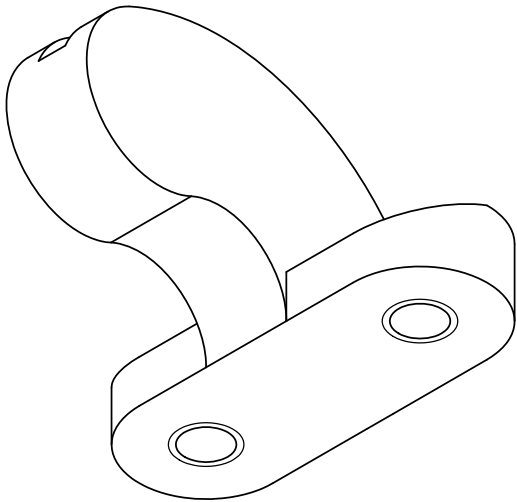
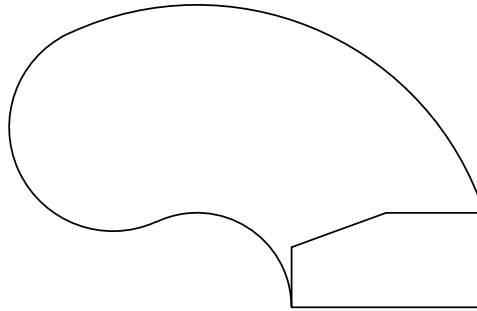
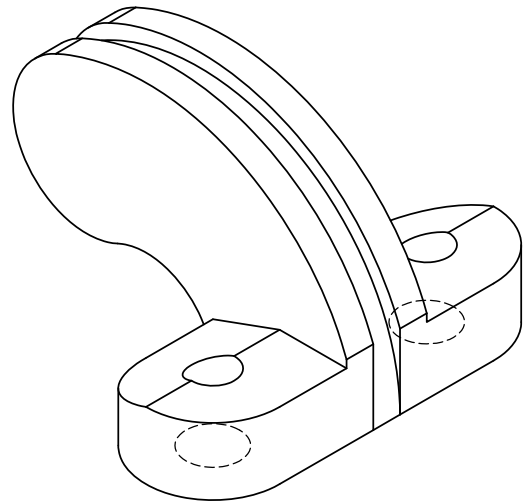
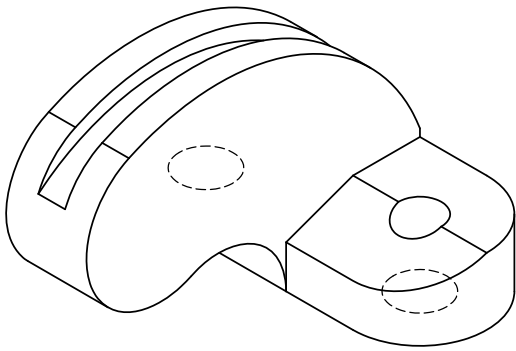


SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						TITOLO:  <b>Triangolo sinistro</b>			
DISEGNATO		FIRMA		DATA					
VERIFICATO									
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'				MATERIALE:		N. DISEGNO		A4	
<b>Licenza scolastica di SolidWorks</b> <b>Solo uso accademico</b>						Disegno6			
SCALA:2:1						FOGLIO 2 DI 2			



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12,5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
NOME		FIRMA		DATA		TITOLO:  Guida			
DISEGNATO		VERIFICATO		APPROVATO		Disegno2			
FATTO		MATERIALE: Acciaio inossidabile		N. DISEGNO		Disegno2		A4	
QUALITA'		Licenza scolastica di SolidWorks Solo uso accademico		SCALA:5:1		FOGLIO 1 DI 2			





SE NON SPECIFICATO:  
QUOTE IN MILLIMETRI  
FINITURA SUPERFICIE:  
TOLLERANZE:  
LINEARE:  
ANGOLARE:

FINITURA:

12.5/  
▽

SBAVATURA E  
INTERRUZIONE DEI  
BORDI NETTI

NON SCALARE IL DISEGNO

REVISIONE

	NOME	FIRMA	DATA			
DISEGNATO						
VERIFICATO						
APPROVATO						
FATTO						
QUALITA'						

TITOLO:

Guida

N. DISEGNO

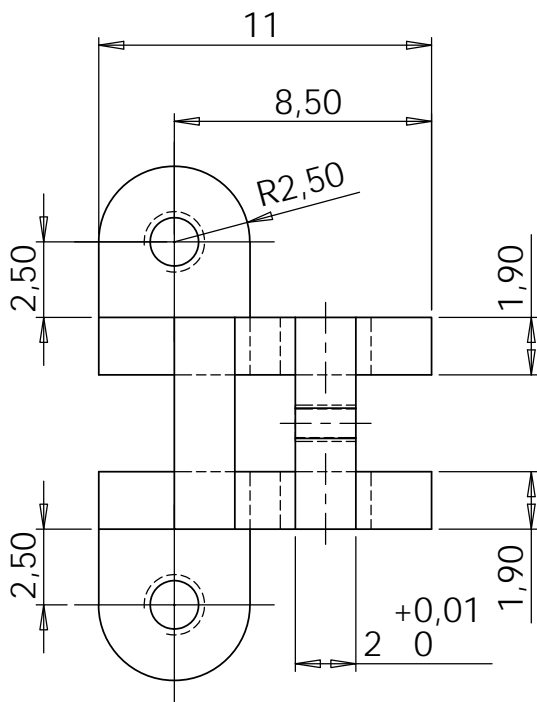
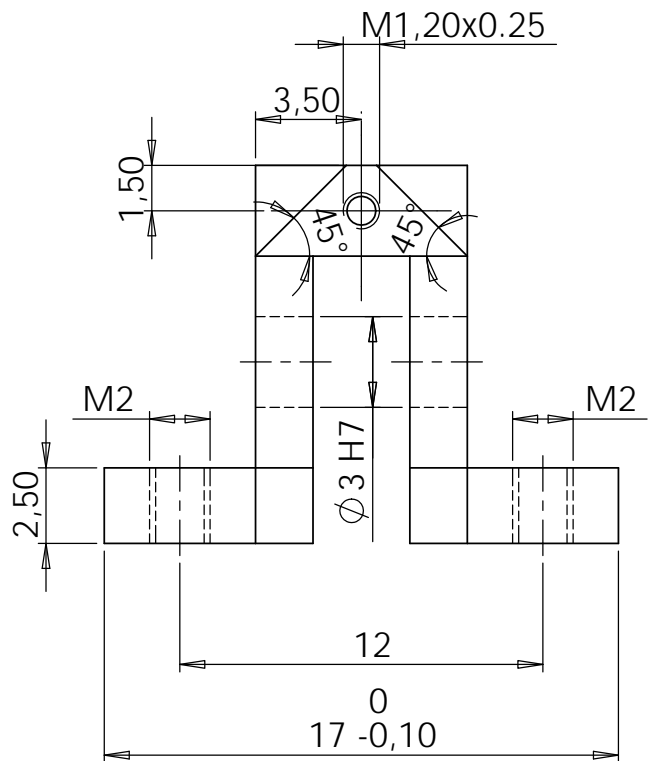
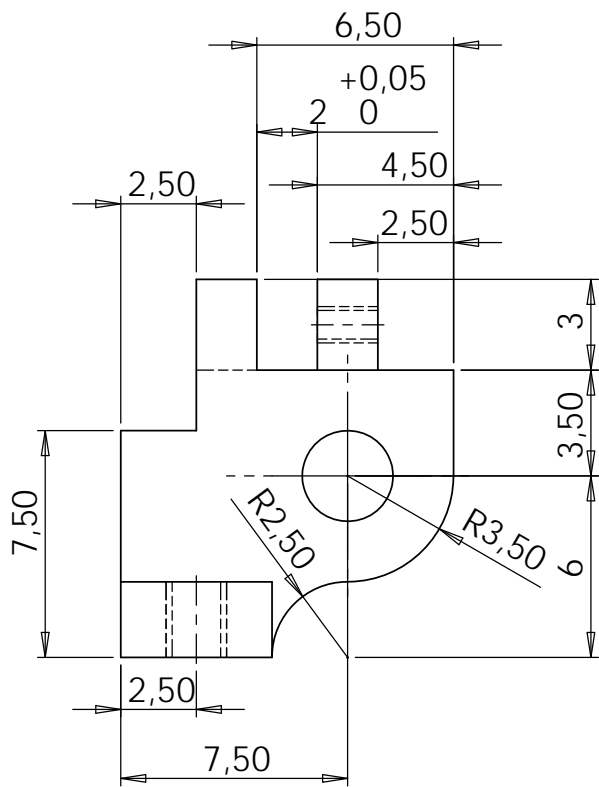
Disegno2

A4

Licenza scolastica di SolidWorks  
Solo uso accademico

SCALA:5:1

FOGLIO 2 DI 2



SE NON SPECIFICATO:  
QUOTE IN MILLIMETRI  
FINITURA SUPERFICIE:  
TOLLERANZE:  
LINEARE:  
ANGOLARE:

FINITURA:

12,5

SBAVATURA E  
INTERRUZIONE DEI  
BORDI NETTI

NON SCALARE IL DISEGNO

REVISIONE

	NOME	FIRMA	DATA		
DISEGNATO					
VERIFICATO					
APPROVATO					
FATTO					
QUALITA'					

TITOLO:

Base blocco

N. DISEGNO

Disegno1

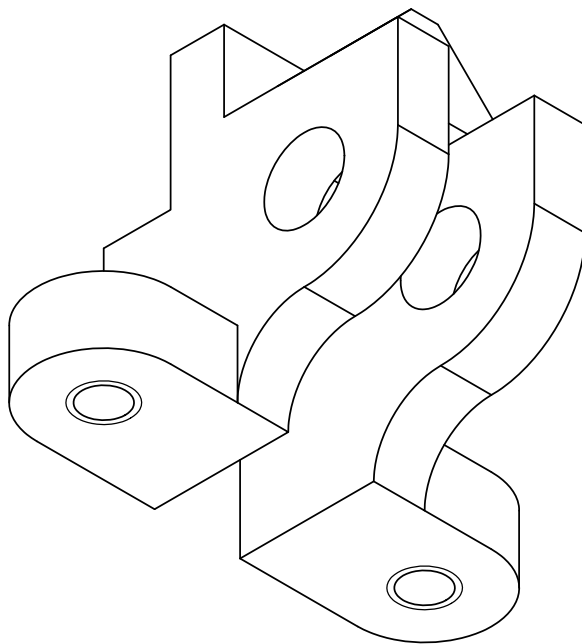
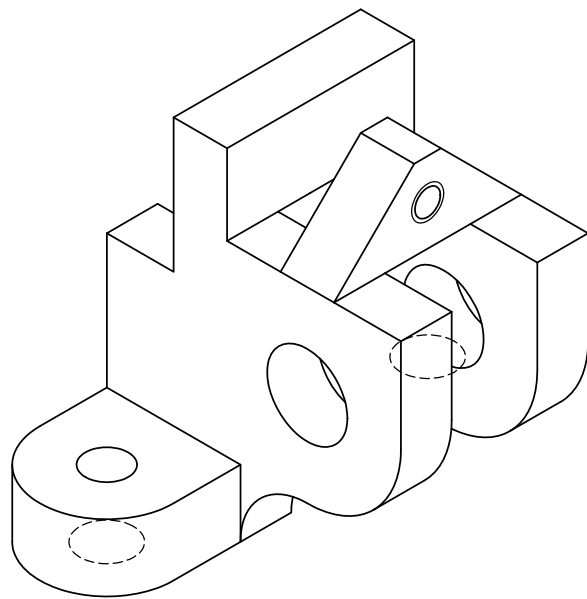
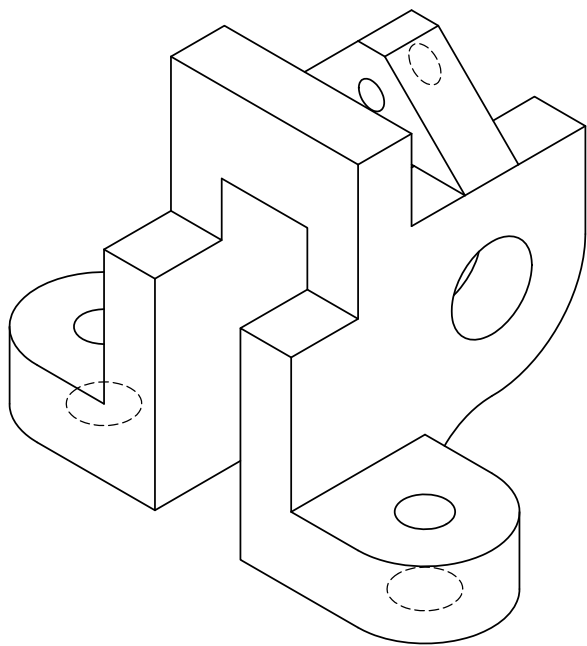
A4

Licenza scolastica di SolidWorks  
Solo uso accademico

MATERIALE:  
Acciaio inossidabile

SCALA:4:1

FOGLIO 1 DI 2



SE NON SPECIFICATO:  
QUOTE IN MILLIMETRI  
FINITURA SUPERFICIE:  
TOLLERANZE:  
LINEARE:  
ANGOLARE:

FINITURA:

12.5/

SBAVATURA E  
INTERRUZIONE DEI  
BORDI NETTI

NON SCALARE IL DISEGNO

REVISIONE

	NOME	FIRMA	DATA		
DISEGNATO					
VERIFICATO					
APPROVATO					
FATTO					
QUALITA'					

TITOLO:

Base blocco

N. DISEGNO

Disegno1

A4

MATERIALE:  
Acciaio inossidabile

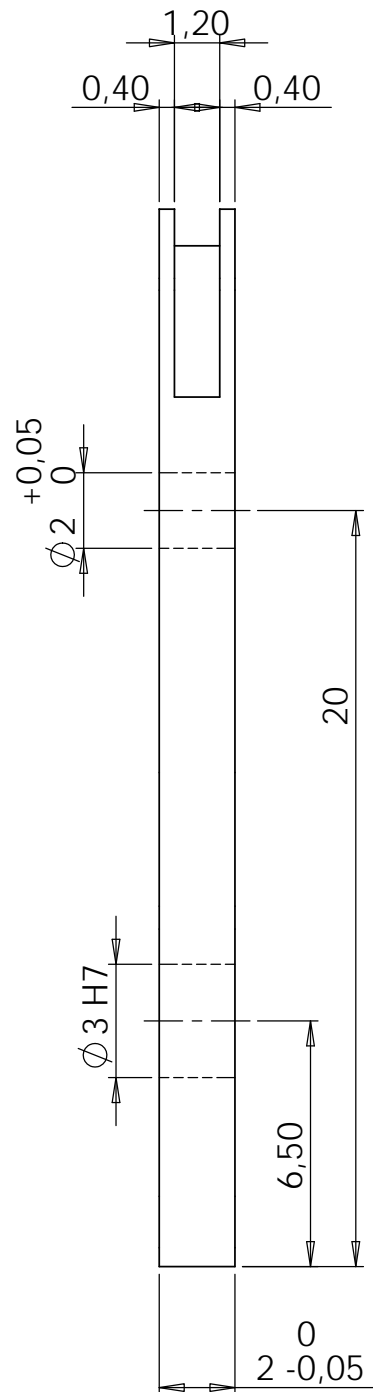
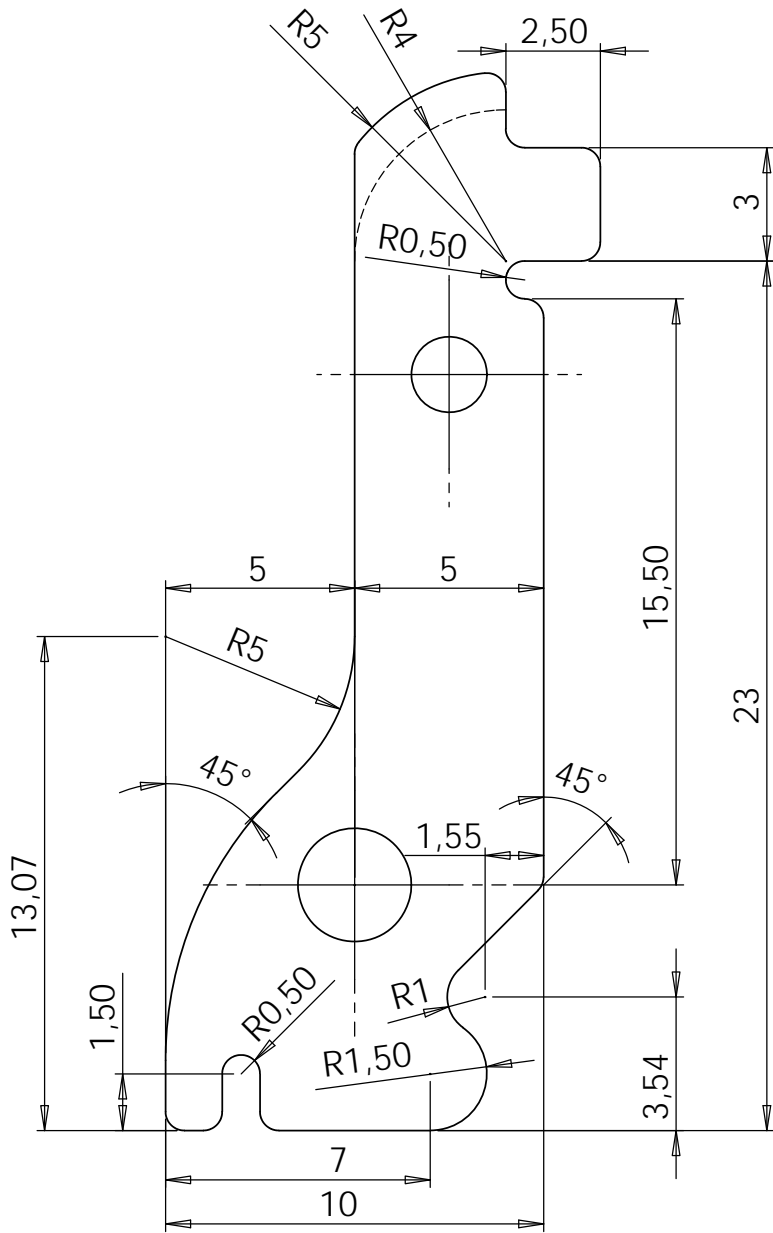
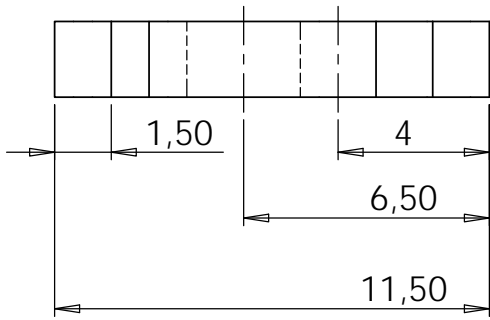
Licenza scolastica di SolidWorks  
Solo uso accademico

SCALA:4:1

FOGLIO 2 DI 2







SE NON SPECIFICATO:  
QUOTE IN MILLIMETRI  
FINITURA SUPERFICIE:  
TOLLERANZE:  
LINEARE:  
ANGOLARE:

FINITURA:

12,5

SBAVATURA E  
INTERRUZIONE DEI  
BORDI NETTI

NON SCALARE IL DISEGNO

REVISIONE

	NOME	FIRMA	DATA		
DISEGNATO					
VERIFICATO					
APPROVATO					
FATTO					
QUALITA'					

TITOLO:

Leva sinistra

N. DISEGNO

Disegno4

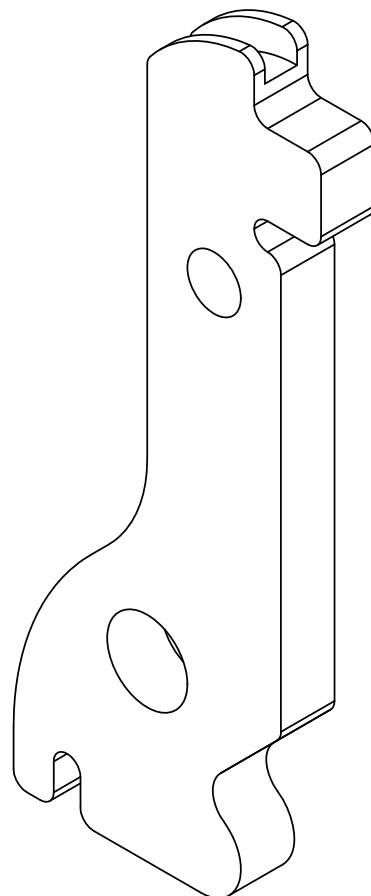
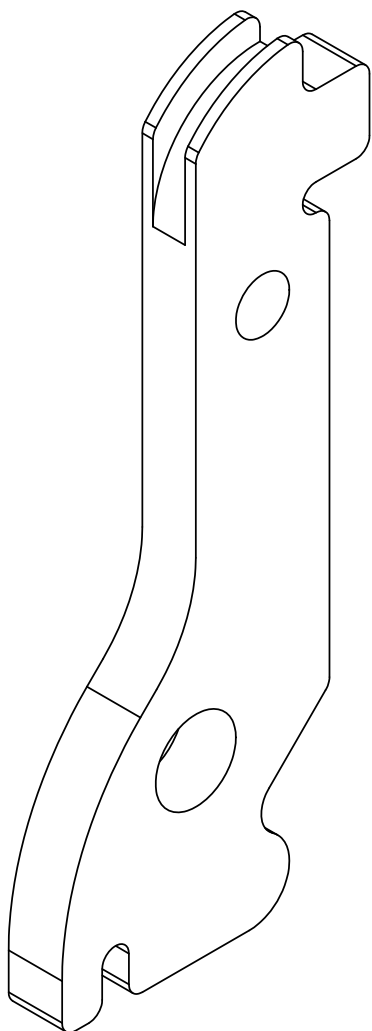
A4

Licenza scolastica di SolidWorks  
Solo uso accademico

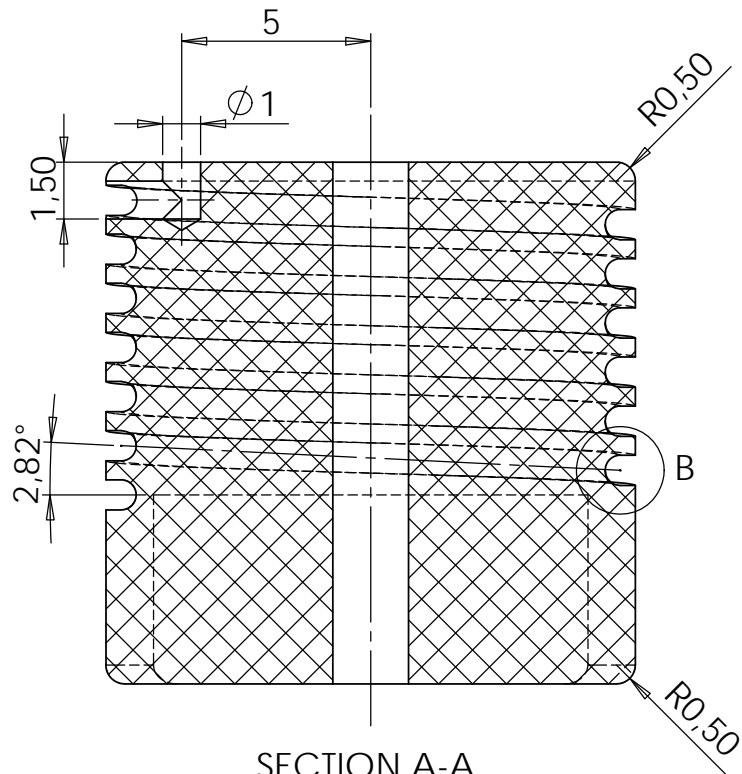
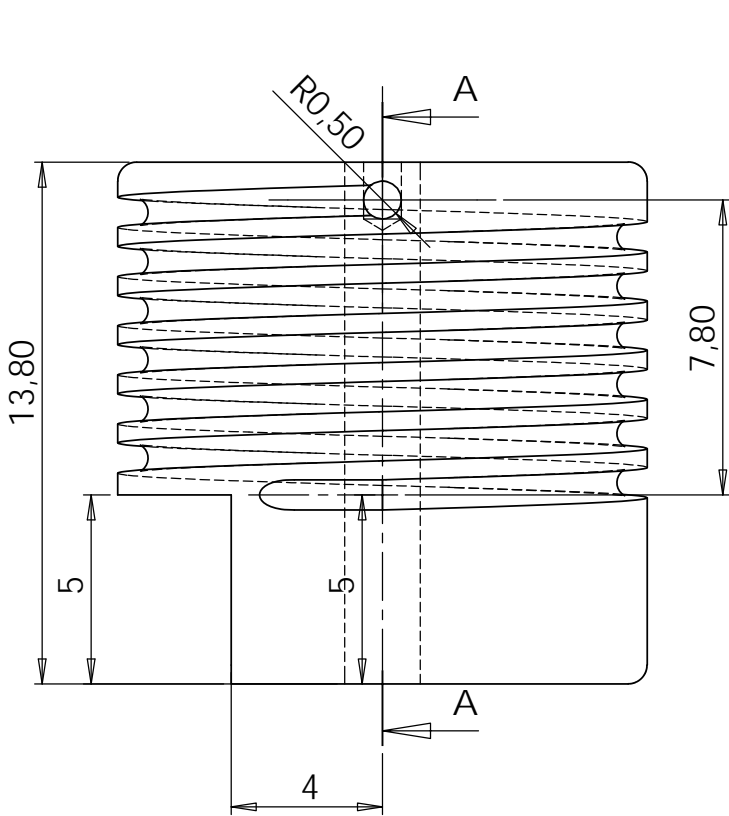
MATERIALE:  
Acciaio inossidabile

SCALA:5:1

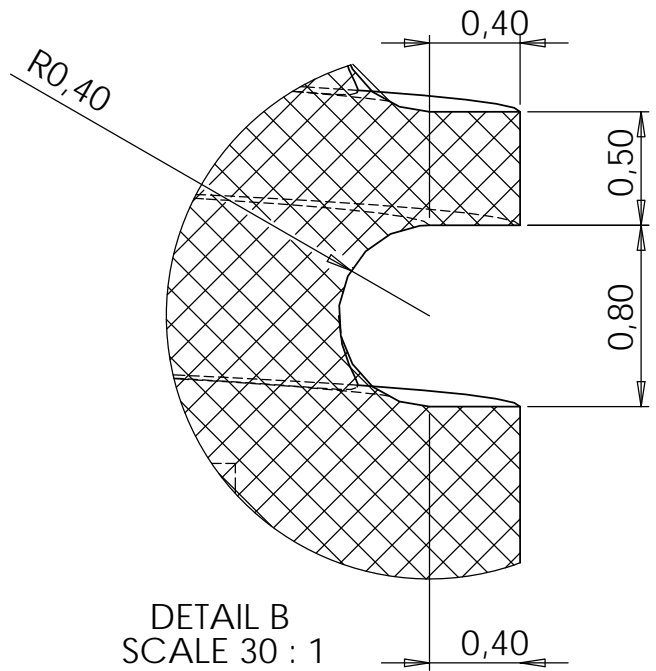
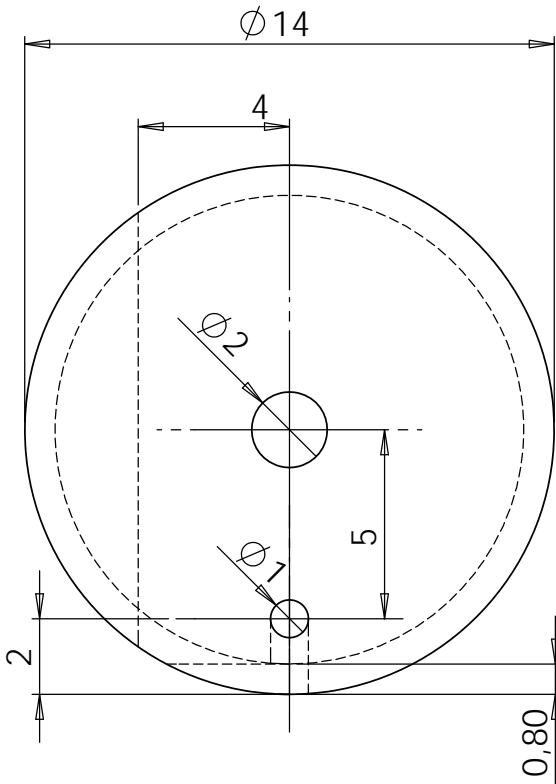
FOGLIO 1 DI 2



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						TITOLO:  <b>Leva sinistra</b>			
DISEGNATO		FIRMA		DATA					
VERIFICATO									
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'				MATERIALE: Acciaio inossidabile		N. DISEGNO <b>Disegno4</b>		A4	
<b>Licenza scolastica di SolidWorks</b>						SCALA:5:1		FOGLIO 2 DI 2	
<b>Solo uso accademico</b>									



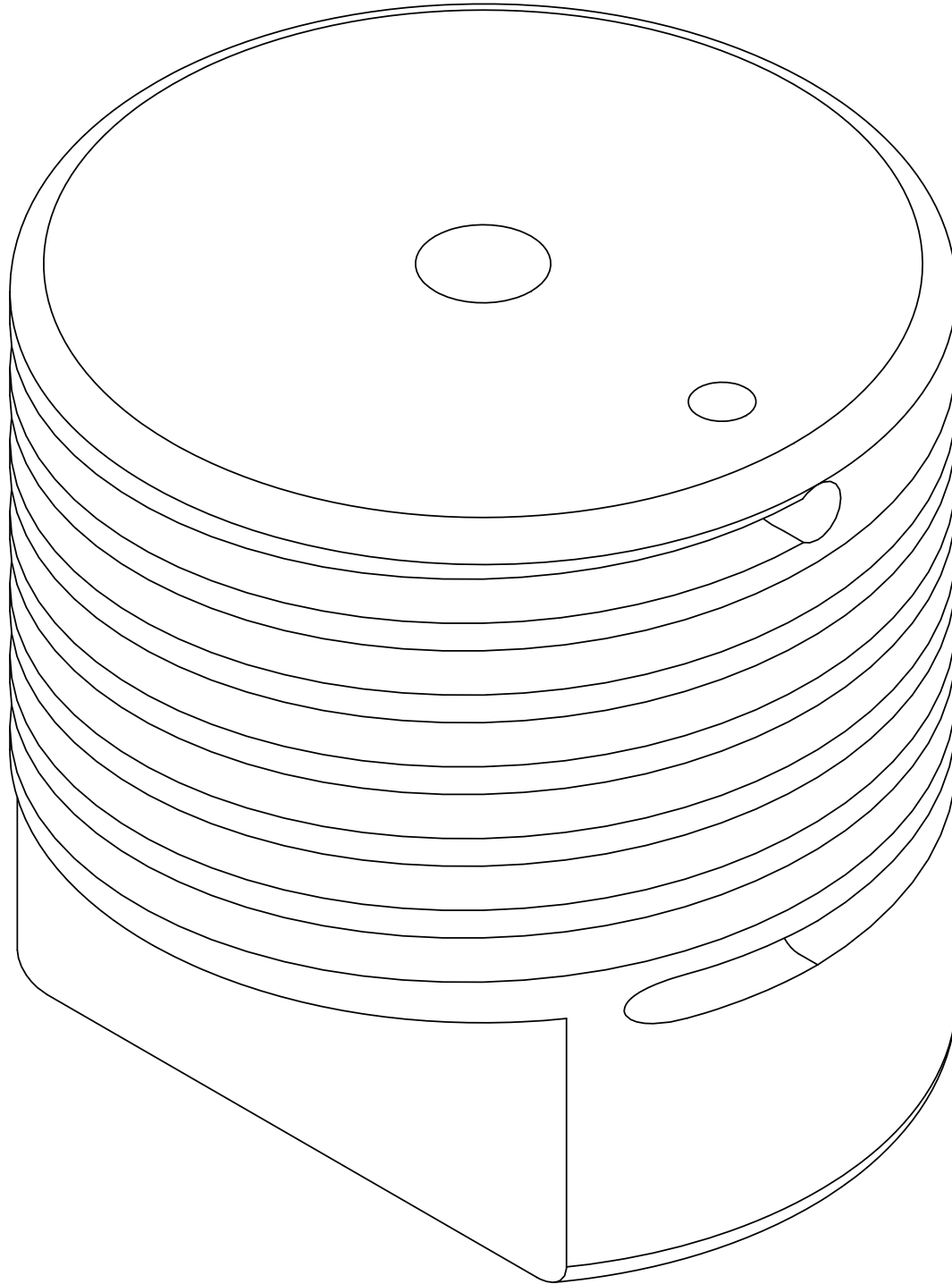
SECTION A-A  
SCALE 5 : 1



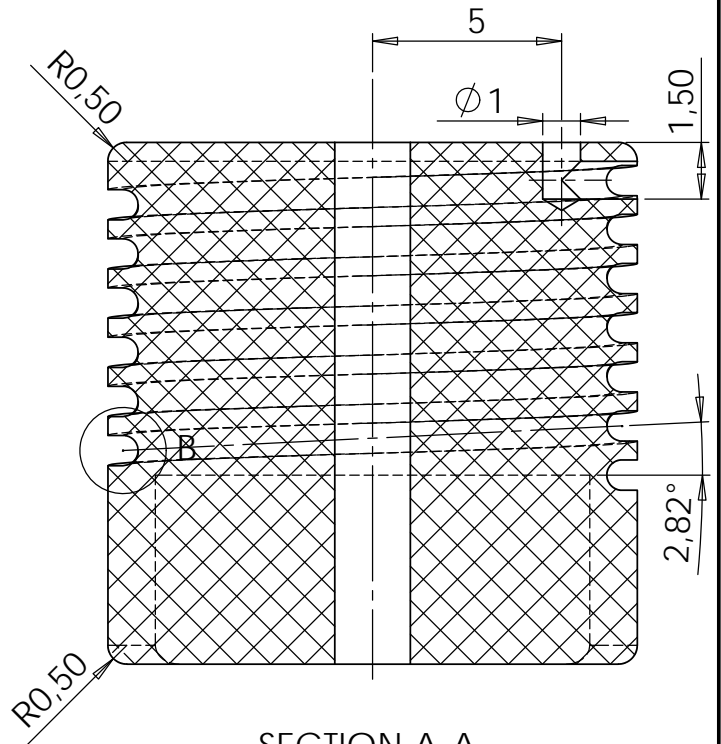
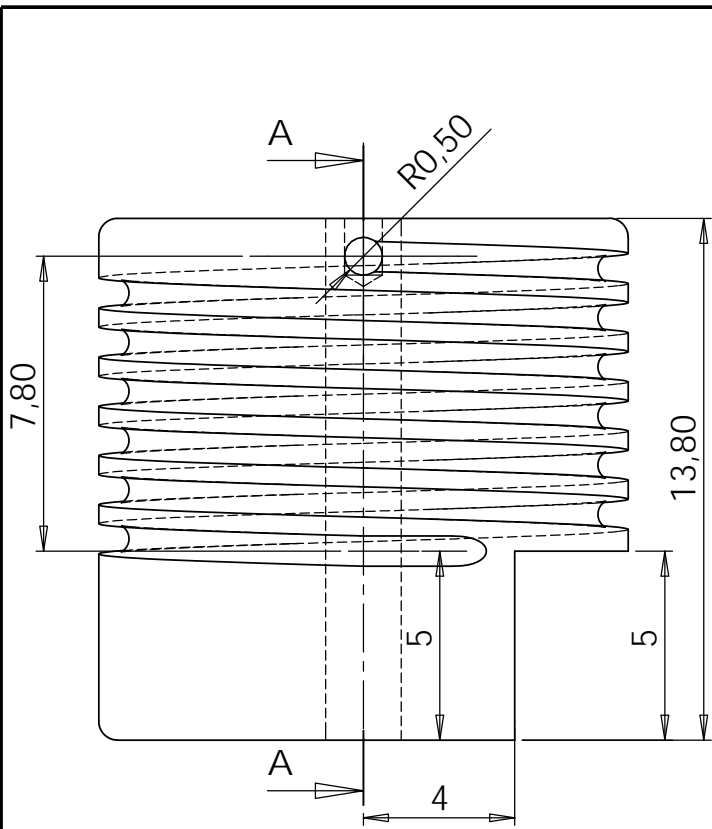
DETAIL B  
SCALE 30 : 1

SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12,5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
NOME		FIRMA		DATA		TITOLO:  Puleggia antioraria DX			
DISEGNATO		VERIFICATO		APPROVATO		FATTO		QUALITA'	
						MATERIALE:  TFFLON		N. DISEGNO  Disegno7	
Licenza scolastica di SolidWorks Solo uso accademico						SCALA:5:1		FOGLIO 1 DI 2	
								A4	

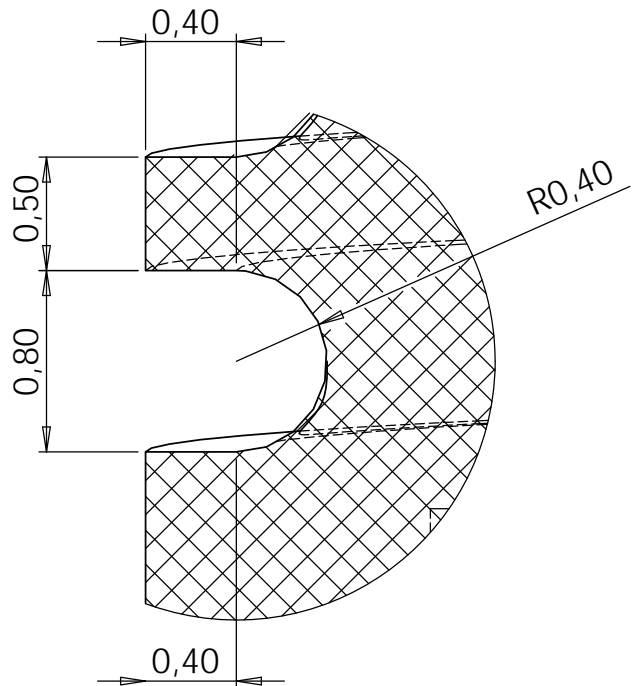
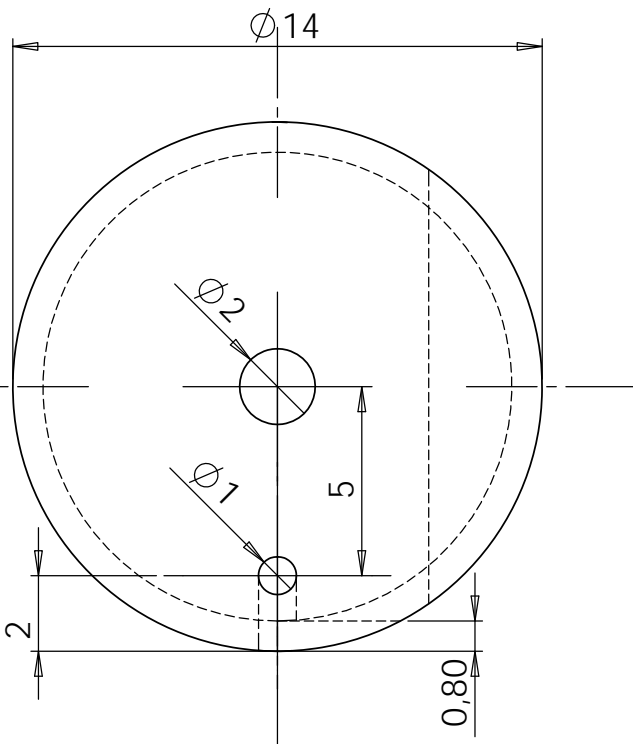




SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/ ▽		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						TITOLO:  Puleggia antioraria DX			
						N. DISEGNO  Disegno7		A4	
<input type="checkbox"/> Licenza scolastica di SolidWorks Solo uso accademico				MATERIALE:		SCALA:10:1		FOGLIO 2 DI 2	

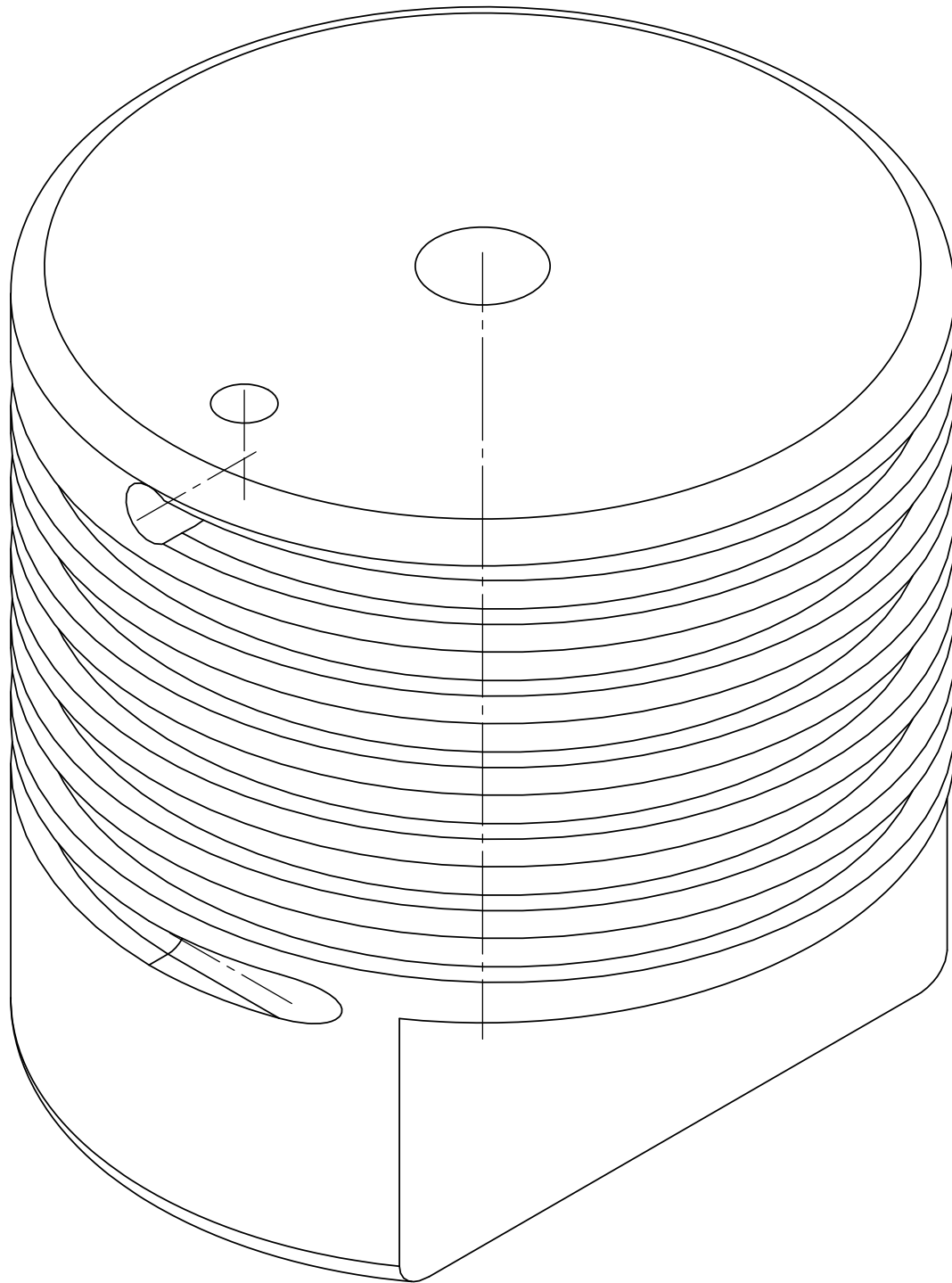


SECTION A-A  
SCALE 5 : 1



DETAIL B  
SCALE 30 : 1

SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12,5		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
NOME		FIRMA		DATA		TITOLO:  Puleggia oraria SX			
DISEGNATO		VERIFICATO		APPROVATO		FATTO		QUALITA'	
				MATERIALE: TEFLON		N. DISEGNO Disegno8		A4	
Licenza scolastica di SolidWorks Solo uso accademico						SCALA:5:1		FOGLIO 1 DI 2	



SE NON SPECIFICATO:  
 QUOTE IN MILLIMETRI  
 FINITURA SUPERFICIE:  
 TOLLERANZE:  
 LINEARE:  
 ANGOLARE:

FINITURA:

12.5/

SBAVATURA E  
 INTERRUZIONE DEI  
 BORDI NETTI

NON SCALARE IL DISEGNO

REVISIONE

	NOME	FIRMA	DATA		
DISEGNATO					
VERIFICATO					
APPROVATO					
FATTO					
QUALITA'					

TITOLO:

Puleggia oraria SX

N. DISEGNO

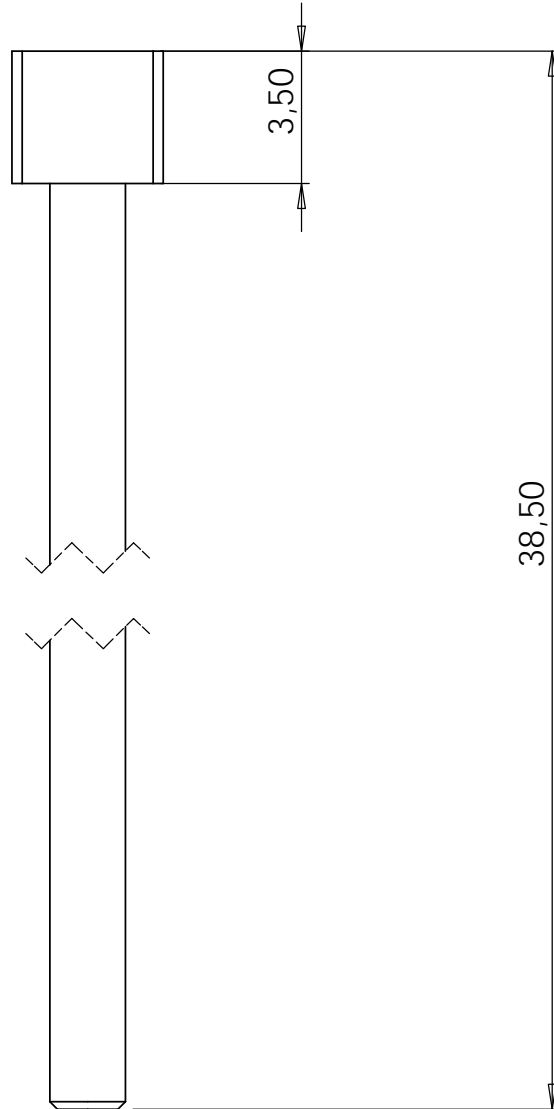
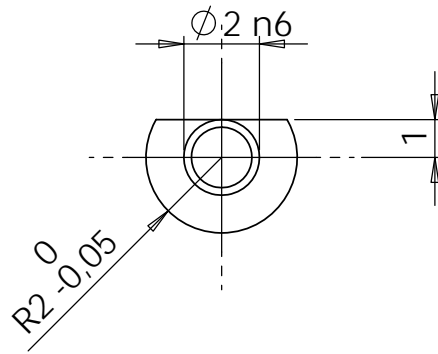
Disegno8

A4

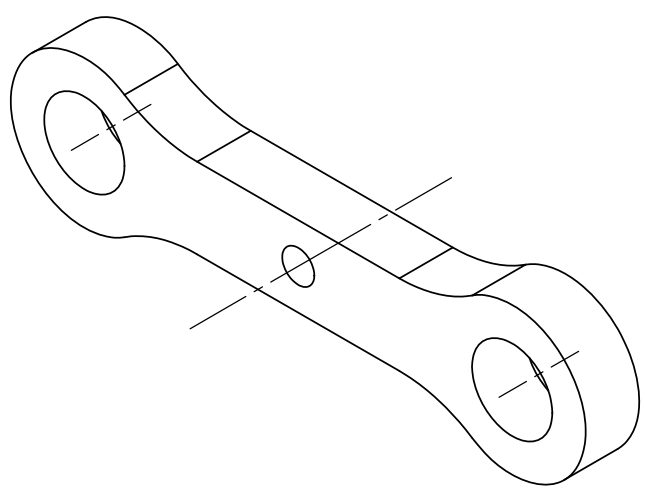
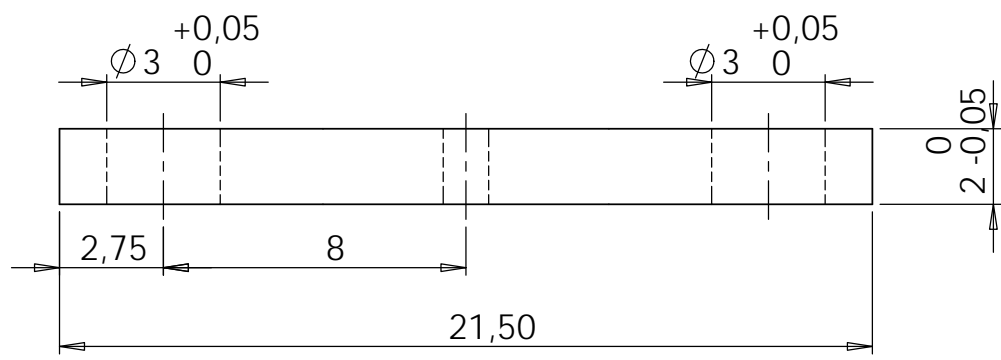
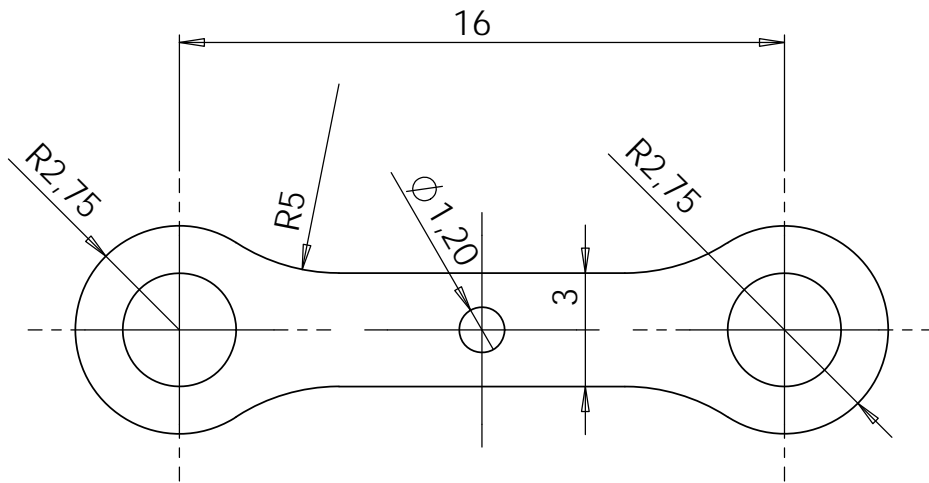
**Licenza scolastica di SolidWorks**  
**Solo uso accademico**

SCALA:10:1

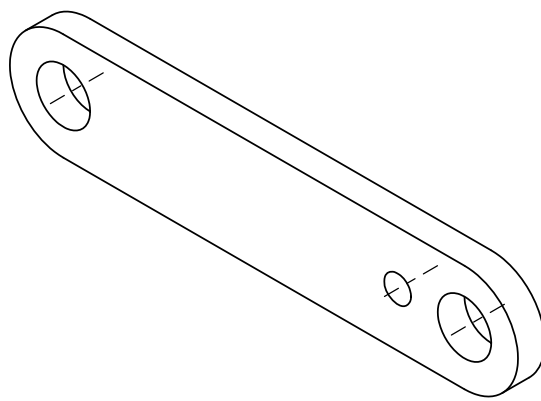
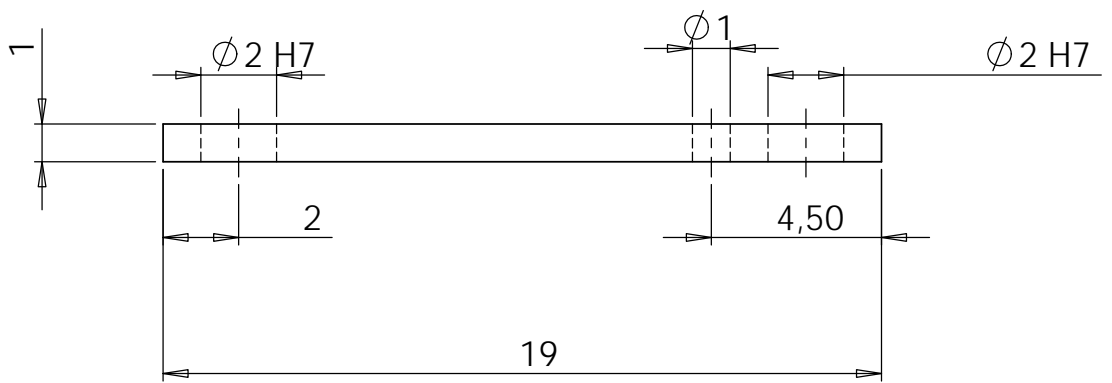
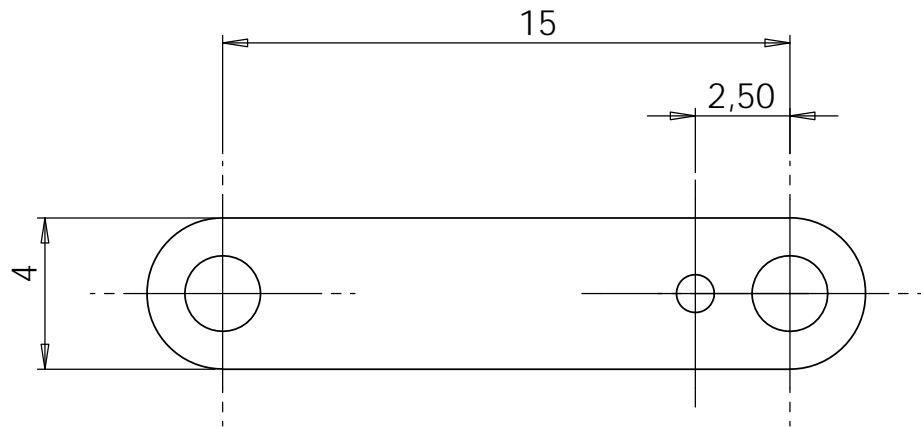
FOGLIO 2 DI 2



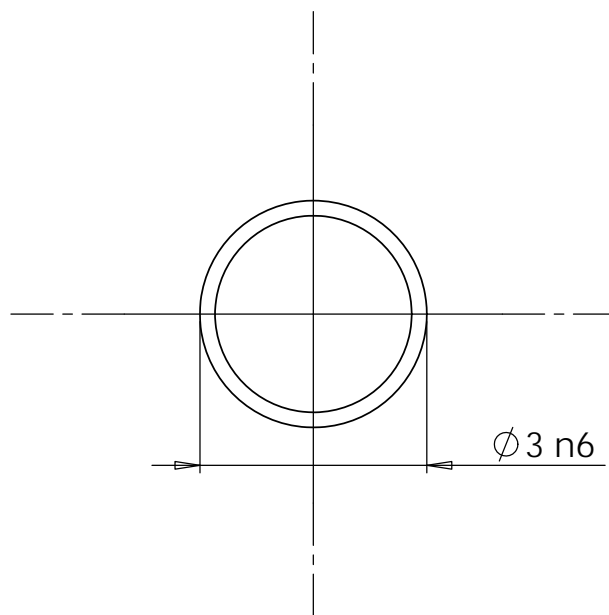
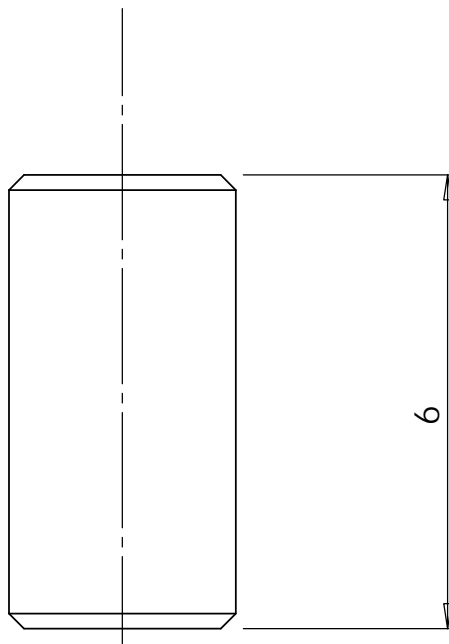
SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI, Smussi 45°		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
NOME		FIRMA		DATA		TITOLO:  Albero cerniera			
DISEGNATO						N. DISEGNO  Disegno9			
VERIFICATO									
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'				MATERIALE: Acciaio inossidabile		SCALA:5:1		FOGLIO 1 DI 1	
Licenza scolastica di SolidWorks Solo uso accademico						A4			



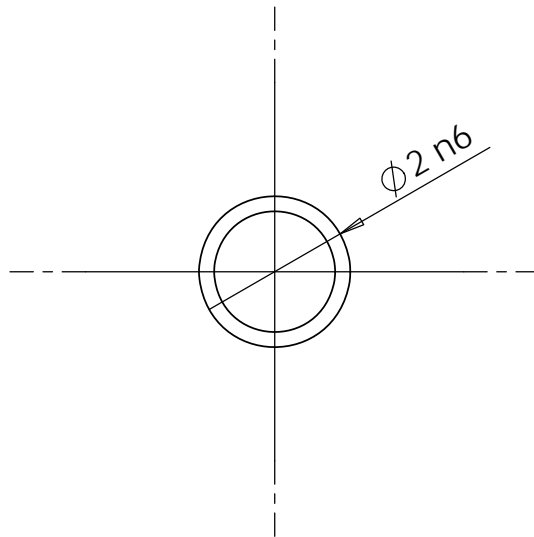
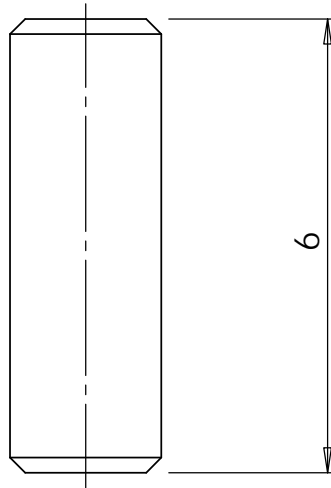
SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
NOME		FIRMA		DATA		TITOLO:  Braccio principale			
DISEGNATO		VERIFICATO		APPROVATO		FATTO		MATERIALE: Acciaio inossidabile	
QUALITA'		MATERIALE:		N. DISEGNO		Disegno10		A4	
Licenza scolastica di SolidWorks Solo uso accademico						SCALA:5:1		FOGLIO 1 DI 1	



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
NOME		FIRMA		DATA		TITOLO:  Braccio blocco			
DISEGNATO		VERIFICATO		APPROVATO		FATTO		MATERIALE: Acciaio inossidabile	
QUALITA'		MATERIALE:		N. DISEGNO		Disegno11		A4	
Licenza scolastica di SolidWorks Solo uso accademico						SCALA:5:1		FOGLIO 1 DI 1	

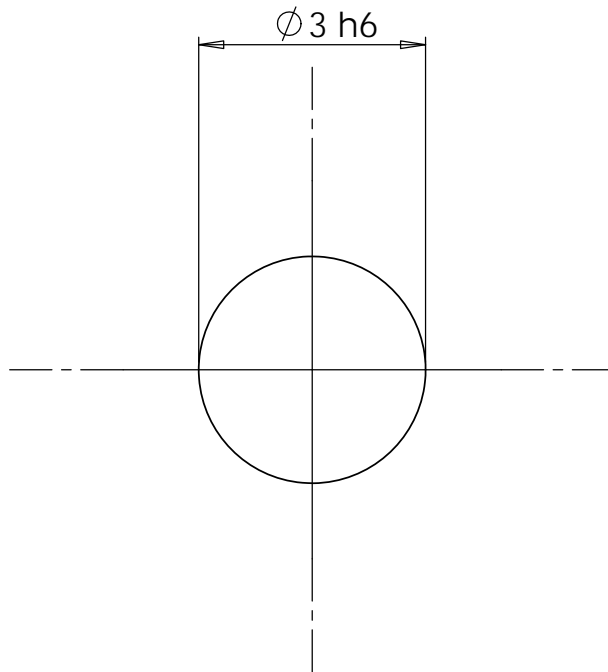
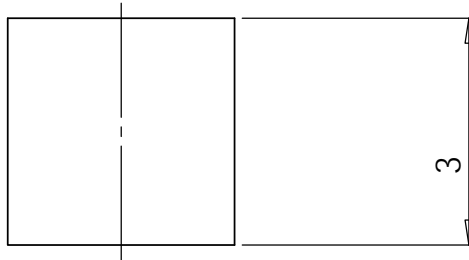


SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI, Smussi 45°		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						TITOLO:			
DISEGNATO		FIRMA		DATA		Perno braccio principale			
VERIFICATO									
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'				MATERIALE: Acciaio inossidabile		N. DISEGNO		Disegno12	
Licenza scolastica di SolidWorks		Solo uso accademico				SCALA:10:1		FOGLIO 1 DI 1	
								A4	

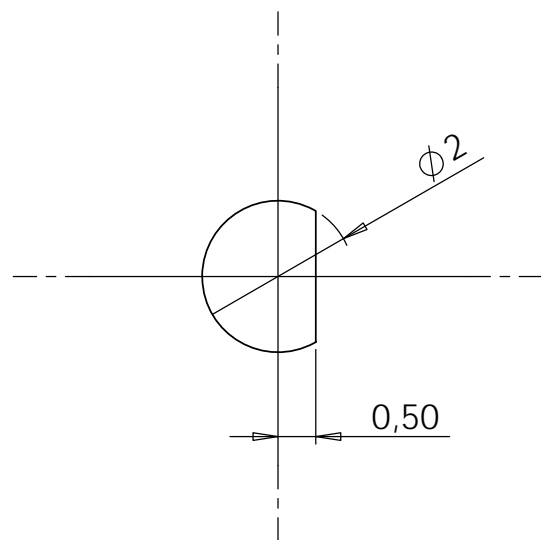
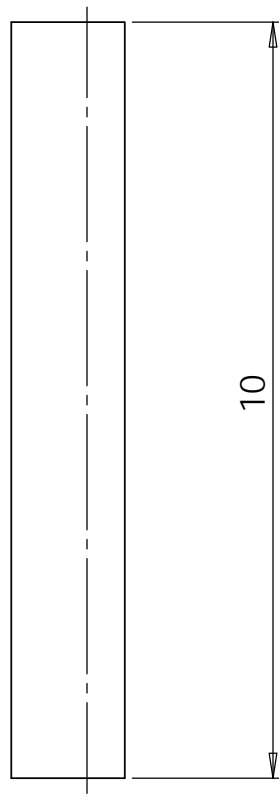


SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  12.5/		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI, Smussi 45°		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						TITOLO:  Perno braccio blocco			
NOME		FIRMA		DATA		N. DISEGNO		Disegno13	
DISEGNATO								A4	
VERIFICATO									
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'				MATERIALE: Acciaio inossidabile		SCALA:10:1		FOGLIO 1 DI 1	
<input type="checkbox"/> Licenza scolastica di SolidWorks <input type="checkbox"/> Solo uso accademico									





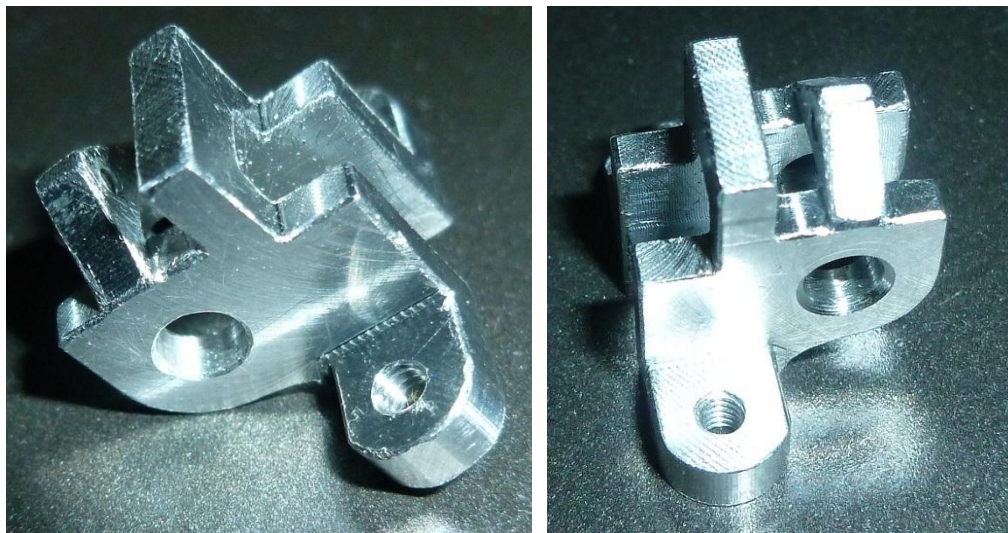
SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  $\frac{12.5}{\sqrt{\quad}}$		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						TITOLO:  <b>Perno freno</b>			
DISEGNATO		FIRMA		DATA		N. DISEGNO		A4	
VERIFICATO						Disegno14			
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'				MATERIALE: Acciaio inossidabile		SCALA:10:1		FOGLIO 1 DI 1	
<input type="checkbox"/> Licenza scolastica di <b>SolidWorks</b> <input type="checkbox"/> Solo uso accademico									



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:  $\nabla 12.5$		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						TITOLO:  Perno scorrimento			
DISEGNATO		FIRMA		DATA		N. DISEGNO		Disegno15	
VERIFICATO								A4	
APPROVATO									
FATTO									
QUALITA'				MATERIALE: TFFI ON		SCALA:10:1		FOGLIO 1 DI 1	
<input type="checkbox"/> Licenza scolastica di SolidWorks <input type="checkbox"/> Solo uso accademico									

**F) - Immagini parti in fase di lavorazione**

Allo stato attuale delle lavorazioni solo alcune parti sono complete, il blocco, le due leve e il braccetto di scarico. Se ne riportano alcune immagini a titolo di esempio.



Immagini relative alla parte “blocco”



Immagine relativa a un esempio di leve con braccio di scarico



## Ringraziamenti

Ringrazio il Professor Gaetano Cascini per il supporto fornito e la grande disponibilità al chiarimento dei numerosi dubbi insorti nel corso di questo percorso.

Ringrazio tutto il gruppo dell'ufficio KAEMaRT, con cui ho condiviso tutti i giorni di questo ultimo anno, e in particolare Marco con cui ho condiviso molto più che la sola scrivania in laboratorio;  $\sum_{i=0}^{\infty} \textit{Grazie Marco}_i$ , e Christopher un grande amico su cui poter sempre contare, oltre che guru personale.

Ringrazio tutti gli amici e in particolare Arianna, trascurati in questi mesi, che mi hanno sopportato nel corso della mia clausura perpetua, comprendendo l'importanza di questo grande obiettivo per il mio futuro.

Infine un grazie ai miei genitori che mi hanno concesso di raggiungere questo importante traguardo.