

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta"



**PROGETTAZIONE E SPERIMENTAZIONE DI UN DISPOSITIVO DI SICUREZZA
BASATO SU ATTUATORI IN LEGA A MEMORIA DI FORMA**

Relatore: Ing. Giuseppe SALA

Tesi di Laurea di:

Salvatore LA LOGGIA Mat. 720848

Anno Accademico 2009-2010

Indice

Introduzione	5
Capitolo Primo: Evoluzione storica dei sistemi bloccoporta	7
1.1 Bloccoporta con cere e paraffine (MBL)	8
1.2 Pastiglia PTC e bimetallo	10
1.2.1 PTC.....	10
1.2.2 Bimetallo	11
1.2 Bloccoporta con PTC (ML80)	12
1.3 Bloccoporta con bimetallo/PTC (DS88)	14
1.4 Bloccoporta DA.....	18
1.4.1 Principio di funzionamento	19
1.5 Bloccoporta con solenoide (DF)	21
1.6 Requisiti richiesti	22
1.6.1 Materiali d'impiego	23
Capitolo Secondo: Generalità sulle leghe a memoria di forma	26
2.1 Cenni storici	27
2.2 Proprietà e caratteristiche	28
2.2.1 Trasformazione martensitica termoelastica	29
2.2.2 Trasformazione martensitica termoelastica per le leghe a memoria di forma	34
2.2.3 Memoria di forma a una via.....	36
2.2.4 Effetto pseudoelastico (o superelastico).....	40
2.2.5 Due esempi pratici	43

2.2.6 La transizione di fase R.....	46
2.2.6 Vita a fatica.....	48
2.3 Trattamenti termici	49
2.3.1 Ciclaggio termico forzato della martensite	49
2.3.2 Effetto dell'invecchiamento sulla fase R	50
2.4 Misura delle temperature di trasformazione.....	52
2.5 Leghe a memoria di forma di utilizzo commerciale	55
2.5.1 Leghe Ni-Ti.....	55
2.5.2 Leghe a base Rame.....	57
2.6 Applicazioni commerciali	59
2.6.1 Recupero vincolato.....	59
2.6.2 Attuatori	61
2.6.3 Applicazioni della superelasticità	63
Capitolo terzo: Progetto preliminare	65
3.1 Nascita ed evoluzione del progetto	66
3.2 Parametri di progettazione	68
3.3 Studio del comportamento del NiTiNOL.....	69
3.3.1 Prova a deformazione imposta	70
3.3.2 Prova "in forza"	74
3.3.3 Prove di fatica e affidabilità.....	76
3.4 Studio della meccanica.....	78
3.4.1 Ganascia	81
3.4.2 Sensing	81
3.4.3 Molle di compressione	82
3.4.4 Slitta e sicurezza	83
3.4.5 Linguette e contatti elettrici.....	85
3.4.6 Corpo e coperchio	87

3.5 Analisi FE (Finite Element Analysis).....	89
3.6 Fase di montaggio	93
Capitolo quarto: Progetto esecutivo	95
4.1 Stampante laser per prototipi.....	96
4.2 Il prototipo	98
4.3 Prove di laboratorio	103
4.3.1 Filo da 76 μm e contro-molla	103
4.3.2 Filo da 150 μm e contro-molla.....	104
4.3.3 Crimp e contatti elettrici	105
4.3.4 Ulteriori problematiche.....	105
4.4 Analisi dei costi.....	106
4.4.1 Costo del singolo componente polimerico	106
4.4.2 Costo del singolo componente elettrico	107
4.4.3 Costo del filo.....	108
4.4.4 Costi di produzione	109
Capitolo quinto: Conclusioni	111
Bibliografia	114
ALLEGATO 1 - Schede tecniche delle molle.....	115
ALLEGATO 2 - Studio semplificato delle forze in gioco	122

Introduzione

Fin dai tempi antichi, l'uomo si è cimentato nella sperimentazione di nuovi materiali, modificando e cercando di migliorare gli strumenti che era in grado di realizzare, trovando, e a volte scoprendo, nuove tipologie di materiali.

È partito dalla pietra, passando all'oro e argento per poi specializzarsi nella metallurgia del rame e le sue leghe, delle quali, ad esempio, abbiamo in eredità una vasta quantità di opere d'arte statuaria.

Con l'avanzare dei secoli e con il miglioramento delle “tecnologie” presenti nei tempi antichi, si riuscì a perfezionare la tecnica di affinazione del ferro, sviluppando la così detta siderurgia. Questo segnò un'ulteriore svolta nei processi produttivi e nei manufatti realizzati, portando ad un miglioramento del tenore di vita grazie all'applicazione nell'agricoltura di nuovi strumenti in “ferro”, ma soprattutto, con l'avvento della rivoluzione industriale nell'ottocento, grazie alla macchina a vapore, molto utilizzata non solo per le locomotive e per la creazione di nuove reti di trasporto, ma anche per la realizzazione di nuovi macchinari.

La tecnologia ha subito un processo di evoluzione esponenziale, passando negli ultimi cinquant'anni da misure caratteristiche dell'ordine dei millimetri, fino ad arrivare oggi all'ordine dei micrometri e nanometri.

Il lavoro svolto nella presente tesi presso Elettrotecnica Rold con sede a Nerviano, in collaborazione con SAES Getters di Lainate, si pone come obiettivo l'applicazione del filo a memoria di forma, comunemente detto SMA (Shape Memory Alloy), nel campo della progettazione di componenti di sicurezza per elettrodomestici, nel caso particolare, di bloccoporta per macchine lavabiancheria.

Si tratta di un progetto totalmente innovativo infatti è la prima volta che lo SMA viene utilizzato per sistemi di sicurezza nel campo degli elettrodomestici e proprio per questo le difficoltà incontrate sono state molteplici.

Nonostante ciò, è stato possibile sviluppare un progetto innovativo e funzionante mettendo a disposizione tutti i mezzi in suo possesso al fine di consentire un completo studio del presente lavoro di tesi.

La collaborazione con SAES Getters è stata fondamentale perché ha permesso di andare a fondo sulle peculiarità e sulle problematiche del filo, rendendosi totalmente disponibile all'esecuzione di prove mirate allo studio del comportamento dello SMA nelle condizioni più prossime possibili a quelle di progetto.

Dall'unione di queste due aziende e con la considerevole collaborazione di Sergio Ruscelli CAD, che per tutto il periodo dello studio effettuato hanno seguito e partecipato con vivo interesse all'evolversi del progetto, è nato il bloccoporta SMA, più piccolo di quelli attualmente prodotti e realizzato con una tecnologia totalmente innovativa rispetto ai suoi predecessori e di cui si è riusciti perfino a realizzare un prototipo funzionante.

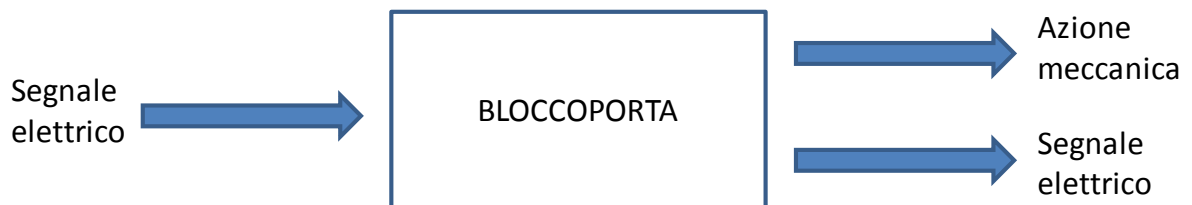
Capitolo Primo

Evoluzione storica dei sistemi bloccoporta

Dagli anni '60 ad oggi, è impossibile celare la velocità con la quale il progresso ha preso piede nei più svariati settori dell'industria, a partire dalle macro-tecnologie fino, ed in particolar modo, alle micro-tecnologie.

Si ritiene quindi appropriato effettuare un'analisi delle varie tipologie di sistemi bloccoporta, seguendone la loro evoluzione negli anni in modo da acquisire una più ampia visione sull'oggetto preso in considerazione e del loro principio di funzionamento.

Il concetto base è molto semplice e si può schematizzare nel seguente modo:



Inviando un segnale elettrico, il bloccoporta deve restituire un segnale meccanico, che costituirà la componente fisica vera e propria del sistema e un nuovo segnale elettrico, che ha l'utilità di confermare l'avvenuta chiusura del blocco stesso.

I bloccoporta hanno subito una rapida evoluzione sfruttando le nuove tecnologie sviluppate nel corso degli anni e adeguandosi alle nuove normative sempre più esigenti e restrittive.

Possiamo raggruppare i diversi bloccoporta in quattro tipologie principali:

- Cere e paraffine
- PTC
- Bimetallo/PTC
- Soledoide

1.1 Bloccoporta con cere e paraffine (MBL)

Questo bloccoporta, il primo in assoluto realizzato per la specifica funzione di sicurezza oblò lavabiancheria, ha la particolarità che il sistema d'attuazione è realizzato sfruttando la dilatazione termica di una miscela di cere e paraffine.

Il calore necessario per permettere la dilatazione è scaturito da una resistenza (**12**), che avvolta sul tubetto (**4**) contenente la miscela (**5**), muove il gruppo frizione (**13**) il quale entrando nella feritoia del cursore (**21**) ne impedisce il movimento, trattenendo il gancio che vi si era preventivamente alloggiato.

Per evitare che per effetto dell'alimentazione elettrica la resistenza si bruci, un sistema di contatto-lamina mobile permette di ottenere una dilatazione ottimale con una stabilizzazione termica.

Infatti, il contatto (**14**) vincolato tramite la molla (**15**) sulla frizione (**13**) è soggetto allo spostamento che il perno tubetto (**7**) imprime al gruppo frizione (**13**).

Per effetto di questo spostamento, il terminale (**14**) si allontana dalla molla contatto (**11**) sino a staccarsi, avendo in questo modo l'interruzione della resistenza con il conseguente raffreddamento.

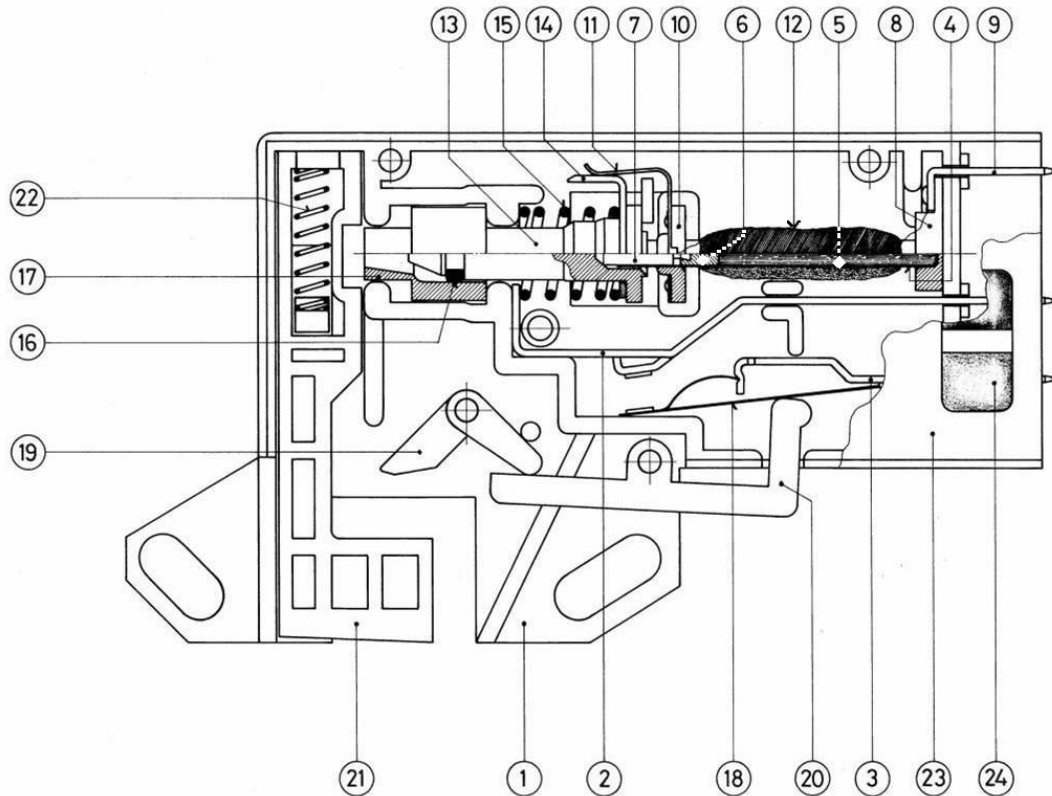


Fig.1.1: schema del sistema bloccoporta MBL con cera e paraffine.

La chiusura del circuito della resistenza si riavrà quando per effetto del raffreddamento la molla (15) ricompattando la miscela (5) permette l'arretramento del terminale (14) sino a toccare la molla contatto (11).

A fine ciclo quando il timer toglie corrente alla macchina il tempo di raffreddamento della miscela (5) consente di svincolare il fermo-cursore (17) dalla feritoia del cursore (21) dopo che le masse inerziali in movimento della lavabiancheria si sono fermate.

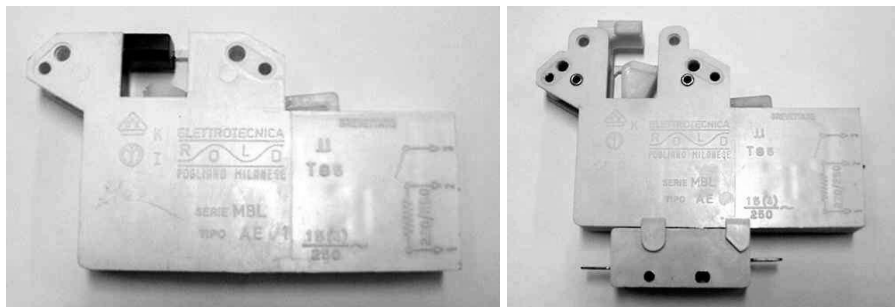


Fig.1.2: rappresentazione reale del sistema bloccoporta MBL.

1.2 Pastiglia PTC e bimetallo

L'introduzione di differenti innovazioni ha consentito l'evoluzione del bloccoporta portando ad un aumento di prestazioni, una maggior affidabilità e soprattutto una diminuzione del costo di produzione.

Due, tra le innovazioni principali introdotte, sono la pastiglia PTC e il bimetallo.

Dato il forte impatto che questi due dispositivi hanno avuto nella progettazione dei bloccoporta di nuova generazione, di seguito sono riportate le loro principali proprietà e caratteristiche.

1.2.1 PTC

Il PTC (Positive Temperature Coefficient) è un semiconduttore policristallino ceramico dopato con titanio e bario, sulle cui superfici sono depositi due elettrodi d'argento (Fig.1.3).



(b)

CARATTERISTICHE PTC	
Diametro	7,8 mm
Spessore	3,2 mm
Elettrodi	Ag-Zn + Ag
Resistenza a 20°C	500 , 1500 Ohm
Temp. superficiale	max 230°C

Fig.1.3: pastiglie PTC (a) con le relative proprietà (b).

È un componente nato e utilizzato inizialmente come protettore per motori elettrici, infatti, il passaggio di corrente tra i due poli, se superiore a quanto consentito fa sì che il PTC aumenti la sua resistenza e raggiunga il proprio punto di switch togliendo di fatto l'alimentazione all'utilizzatore.

Ovviamente all'aumentare della resistenza e al persistere del passaggio di corrente, si ha un notevole aumento di temperatura raggiungendo anche i 230°C (Fig.1.4).

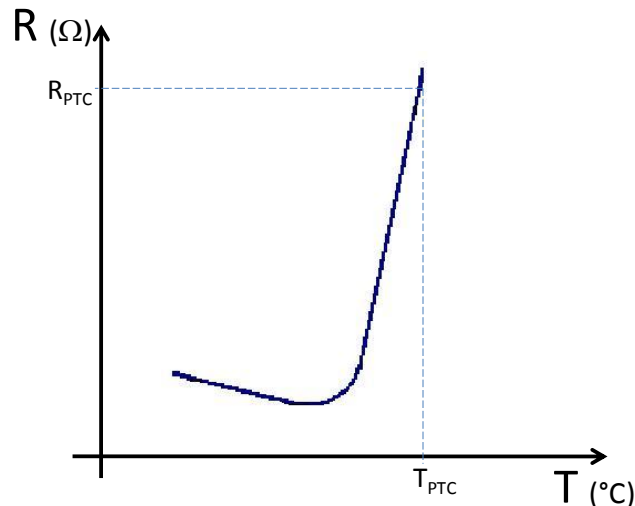


Fig.1.4: il grafico mette in evidenza l'andamento della resistenza e la conseguente temperatura raggiunta: si può notare che alla massima temperatura del PTC (T_{PTC}) corrisponde una resistenza che tende all'infinito (R_{PTC}).

Una delle caratteristiche principali del PTC è che ogni punto di switch corrisponde una specifica temperatura.

E' evidente quindi che, realizzando un PTC con una temperatura o punto di switch prestabiliti, una volta che lo stesso ha raggiunto tale punto, vi rimane fino a quando è attraversato dalla corrente: il periodo che può essere lasciato sotto tensione è da considerarsi nell'ordine di migliaia di ore.

1.2.2 Bimetallo

Una proprietà tipica delle sostanze ed in particolar modo dei metalli, è quella di variare le proprie dimensioni lineari all'aumentare della temperatura.

L'entità di questa variazione è definita dal coefficiente di dilatazione termica il quale dipende unicamente dalle proprietà fisiche del materiale.

La tecnologia del bimetallo sfrutta proprio questo principio: unendo due metalli con differente coefficiente di dilatazione termica lineare, si osserverà un effetto di curvatura e non più una dilatazione lineare (Fig.1.5).

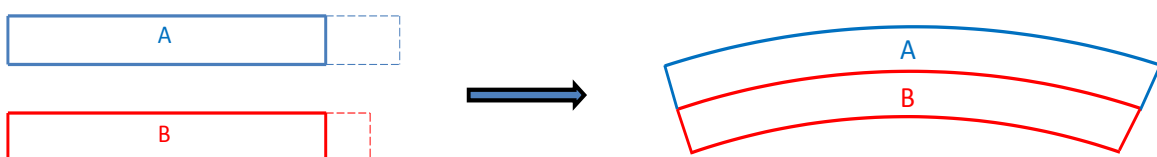


Fig.1.5: effetto dell'accoppiamento di due metalli con differenti coefficienti di dilatazione termica lineare.

La scelta dei tipi di metallo ed il loro spessore, determinano la specifica deflessione e la relativa forza di lavoro.

A titolo di esempio si riporta una sezione ingrandita di un bimetallo, in questo caso formato da tre strati di metallo, usato per il DS88 (Fig.1.6).

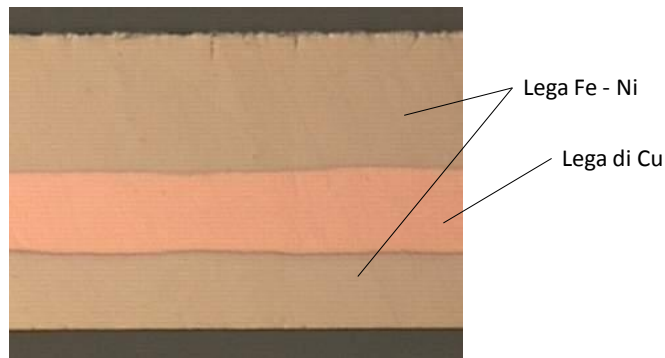


Fig1.6: sezione trasversale di un tipico bimetallo e i relativi materiali utilizzati.

1.2 Bloccoporta con PTC (ML80)

Alla fine degli anni '70, con la scoperta e l'introduzione del PTC, si è potuto eliminare la resistenza con il relativo contatto strisciante e, grazie allo sviluppo di processi produttivi automatizzati, è stato inoltre possibile studiare e industrializzare un nuovo sistema bloccoporta (Fig.1.7).

Nel 1980 le normative di sicurezza sulle lavabiancheria rendevano obbligatorio l'utilizzo del bloccoporta.

Quest'ultimo è montato in modo che il gancio dell'oblò, durante la chiusura, sposti il cursore (4) mettendo in corrispondenza la propria fessura col fermocursore (5).

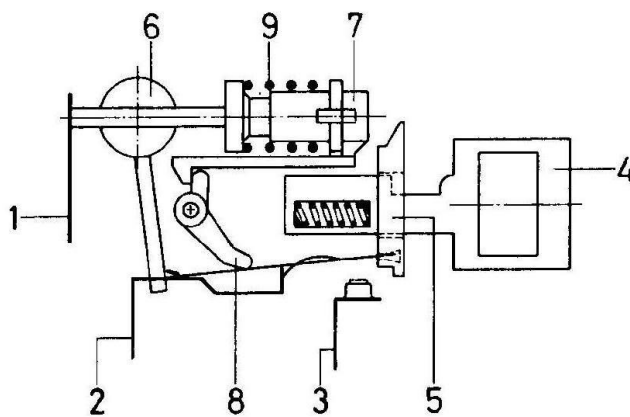


Fig.1.7: rappresentazione schematica del sistema bloccoporta ML80

Con l'avviamento della lavabiancheria si ha il riscaldamento del PTC (6) tramite il passaggio di corrente e la conseguente dilatazione della paraffina contenuta nel tubetto.

Questo spostamento, tramite il gruppo frizione (7), comanda la leva d'azionamento (8) permettendo la chiusura dei contatti elettrici (2)-(3).

Contemporaneamente alla chiusura dei contatti si ha lo spostamento del fermo-cursore (5), comandato dalla stessa lamina, che entrando nella fessura del cursore (4) mantiene l'oblò bloccato per tutto il ciclo di lavaggio.

A ciclo ultimato, la posizione di stop del timer toglie corrente alla lavabiancheria e di conseguenza al PTC che, raffreddandosi, permette alla paraffina di solidificarsi e di ritornare in posizione di riposo grazie all'azione della molla (9) del gruppo frizione (7).

A questo punto si ha l'apertura dei contatti (2)-(3) e la conseguente fuoriuscita del fermo-cursore (5) dalla fessura del cursore (4), permettendo l'apertura dell'oblò.

Essendo il PTC comandato direttamente dall'interruttore generale della lavabiancheria, si può verificare l'eventualità dell'accensione della macchina senza l'avvenuta chiusura dell'oblò.

In questo caso la mancata corrispondenza della fessura del cursore (4) con il fermo-cursore (5), impedirà la chiusura dei contatti (2)-(3) e il conseguente avviamento della lavabiancheria.

In queste condizioni sarà sufficiente chiudere l'oblò per avere il bloccaggio istantaneo, la chiusura dei contatti (2)-(3) e l'avviamento della lavabiancheria.

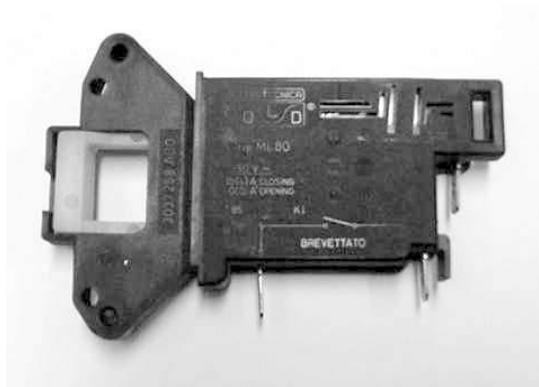


Fig.1.8: rappresentazione reale del bloccoporta ML80

In fase di progettazione si è dovuto pensare ad una modularità che permettesse di diversificare gli interventi d'applicazione dalla parte funzionale del bloccoporta.

In figura 1.9 si vede che la parte d'attacco al mantello della lavabiancheria può essere variata rispetto alla parte contenente il meccanismo funzionale.

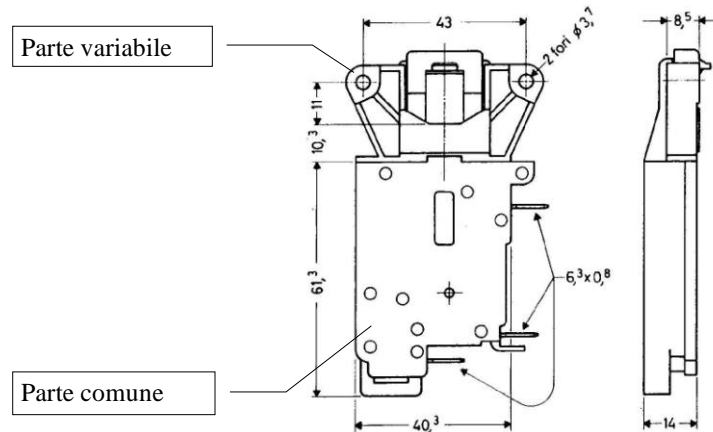


Fig1.9: assemblaggio della componente variabile dell' attacco al mantello della lavabiancheria con quella comune per tutti i sistemi.

Questa modularità è stata ricavata dallo stampo del corpo bloccoporta, intervenendo a sostituire dei moduli in rapporto alla richiesta del tipo di attacco (Fig.1.10).

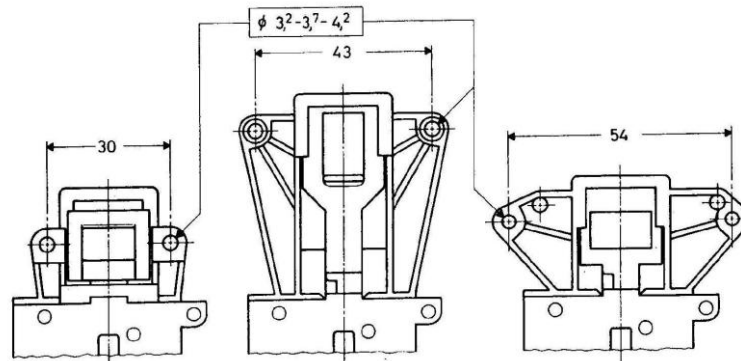


Fig.1.10: esempi di applicazioni specifiche richieste dai clienti.

1.3 Bloccoporta con bimetallo/PTC (DS88)

Nuove tecnologie applicate alla fabbricazione delle lavabiancheria e le maggiori esigenze da parte dell'utilizzatore hanno portato i progettisti di lavatrici a formulare delle specifiche per il bloccoporta sempre più complesse dal punto di vista sia funzionale che qualitativo.

Per realizzare un prodotto rispondente a quanto richiesto, e più precisamente per motivi legati all'utilizzo del bloccoporta a temperature ambiente abbastanza elevate, si è dovuto abbandonare il sistema con il tubetto a cera e introdurre il comando interruttore mediante la dilatazione di un bimetallo il quale, collegato ad una levetta (sempre metallica), consente la fuoriuscita del fermo-cursore consentendo il bloccaggio del gancio dell'oblò.

Il bimetallo viene quindi appoggiato sulla pastiglia di PTC la quale, a seguito del passaggio di corrente, aumenta la propria temperatura causando la dilatazione, e quindi l'inflexione, del bimetallo (Fig.1.11).

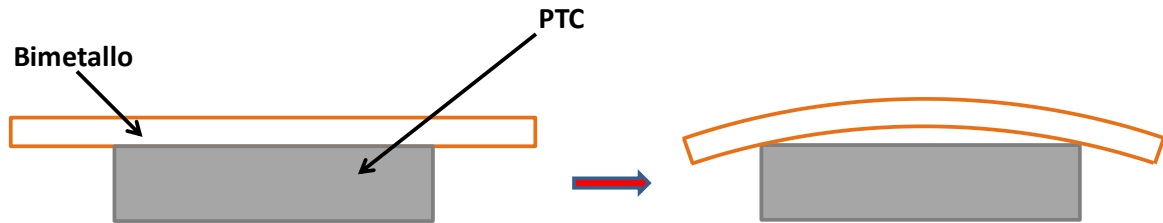


Fig.1.11: effetto della pastiglia di PTC sul bimetallo.

La deformazione meccanica del bimetallo provoca lo scatto dell'interruttore, con il conseguente blocco meccanico della porta per mezzo del fermo-cursore e quindi la chiusura del contatto d'inizio ciclo.

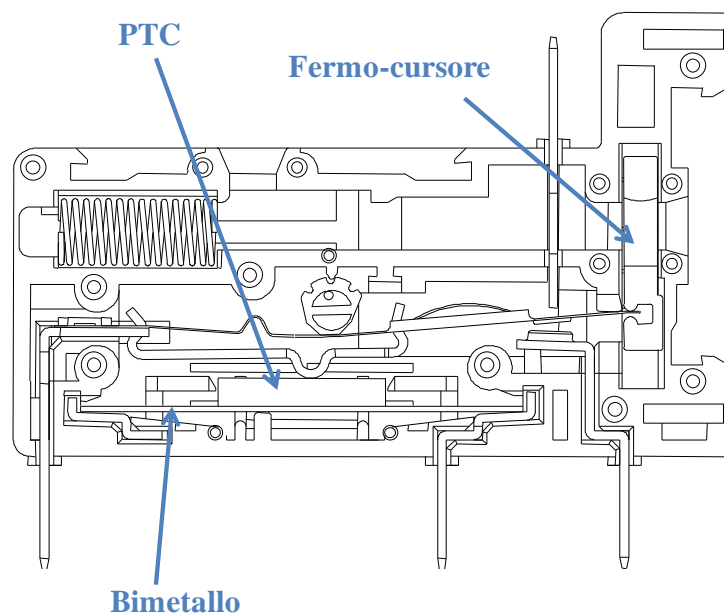


Fig.1.12: sezione del modello bloccoporta DS88

Togliendo tensione, l'inerzia termica presente nel sistema, garantisce la sicurezza di chiusura dell'oblò sino ad arresto degli organi in movimento (per il tempo minimo stabilito).

Questo sistema però presenta qualche inconveniente, legato soprattutto alla dilatazione metallica; infatti, per riaprire l'oblò bisogna aspettare che il bimetallo si raffreddi tornando nella posizione iniziale e questo può durare svariati secondi.

Inoltre, la maggior parte dei metalli soggetti a flessione presenta un punto di switch: prendendo una levetta e sottoponendola a un momento flettente si arriva ad un punto, detto di switch, oltre il quale la levetta scatta e passa direttamente dall'altro lato (Fig.1.13).

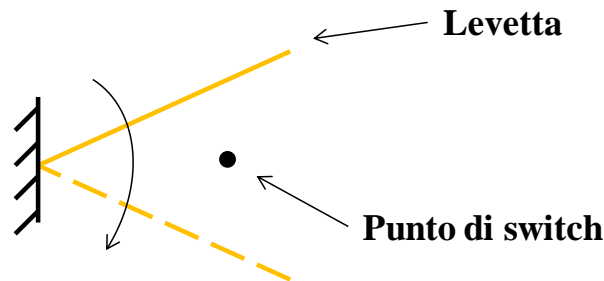


Fig.1.13: rappresentazione schematica del punto di switch in una levetta metallica.

Il problema è che esiste un'isteresi dello switch, vale a dire che il punto in cui scatta in andata non è detto che sia lo stesso durante il ritorno e questo crea non poche complicazioni in fase di progettazione.

Un altro inconveniente è dettato dal fatto che il bimetallo, essendo sempre a contatto col PTC ad alta temperatura, continua ad incurvarsi nel tempo aumentando l'isteresi della levetta e quindi il tempo di sblocco una volta terminato il ciclo di lavaggio.

Per ovviare a questi inconvenienti si è pensato di ricorrere all'utilizzo di un doppio bimetallo (v.par.1.4.1).

Una successiva evoluzione della modularità d'applicazione ha richiesto la creazione di un nuovo metodo di realizzazione bloccoporta, sdoppiando il frutto base dalla parte d'interfaccia gancio/oblò.

In figura 1.14a si può vedere il frutto base sul quale può essere agganciato l'attacco specifico modulare per il fissaggio alla lavabiancheria ed un eventuale interruttore supplementare, mentre nella figura 1.14b si vede il modello DS88 completamente assiemato.

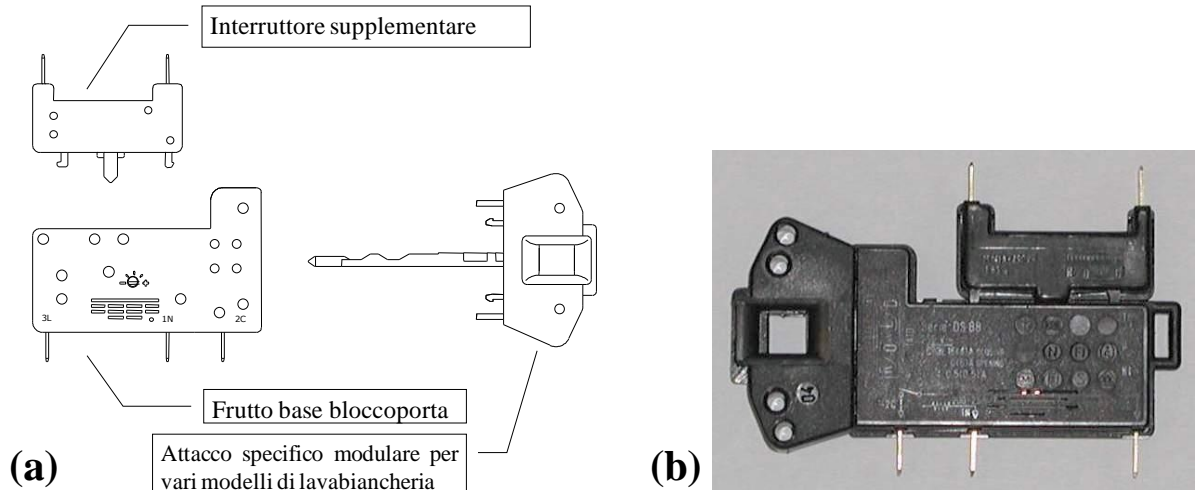


Fig.1.14: rappresentazione dello spezzato delle varie componenti del bloccoporta (a), assembly del modello DS88 (b).

Agli inizi degli anni '90 utilizzando la modularità del DS88 è stata soddisfatta la richiesta di alcuni clienti d'avere un bloccoporta che potesse essere montato su oblò senza la maniglia e poterlo comandare per l'apertura tramite un tasto in posizione remota (Fig. 2.15).

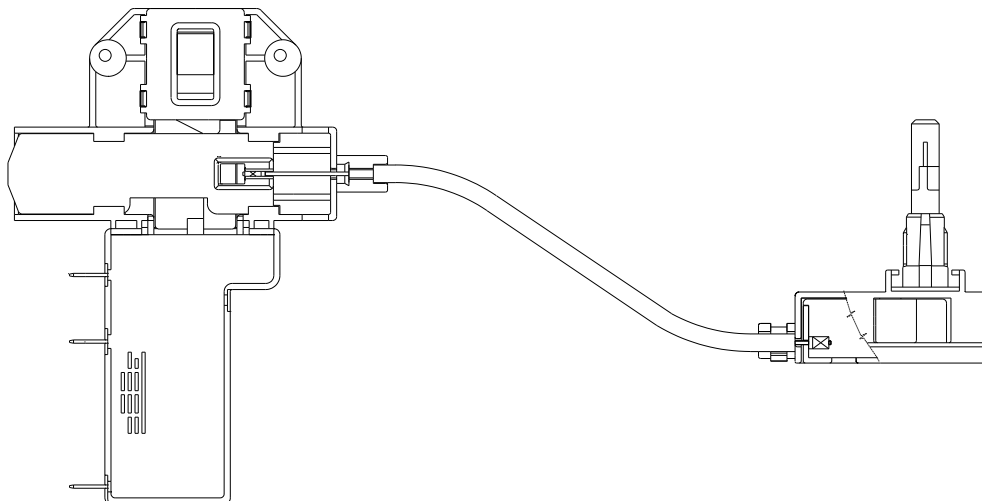


Fig.1.15: modello bloccoporta DS88 con pulsante per consentire l'apertura di oblò senza maniglia.

Questa applicazione di bloccoporta ha permesso di realizzare delle lavabiancheria che, senza adottare i costosi e complicati blocchi elettromagnetici, aprono tramite un pulsante posizionato nella zona della pulsanteria e un cavetto di rinvio, l'oblò senza maniglia.

1.4 Bloccoporta DA

Verso la fine degli anni '90, per essere competitivi in un mercato dove le richieste di prestazioni sempre più esasperate, unite a uno standard qualitativo pari a 0 p.p.m. (parti per milione) ed ad un prezzo di vendita in costante diminuzione, si è pensato di realizzare un bloccoporta che comprendesse, oltre a quanto di corretto realizzato con i bloccoporta precedenti, le seguenti caratteristiche:

- Racchiudere in un solo componente le specifiche richieste dai vari clienti.
- Abbassare in modo drastico l'incidenza della materia prima sul costo del componente.
- Industrializzare il bloccoporta in modo da racchiudere in un solo frutto la parte funzionale da utilizzare per le varie applicazioni sia frontali che a carica dall'alto.
- Progettare la qualità del bloccoporta in modo da soddisfare le richieste di 0 p.p.m.

E' evidente che gli obiettivi fissati per la realizzazione del nuovo bloccoporta hanno richiesto, oltre ad un elevato impegno finanziario, il coinvolgimento di tutte le esperienze e le sinergie mirate al raggiungimento di quanto prefissato.

Dopo una serie di studi e sperimentazioni è nato il bloccoporta DA.

Dalla figura 1.16 si osserva come il frutto base può essere alloggiato su di un attacco che opportunamente realizzato è utilizzato per qualsiasi applicazione richiesta.

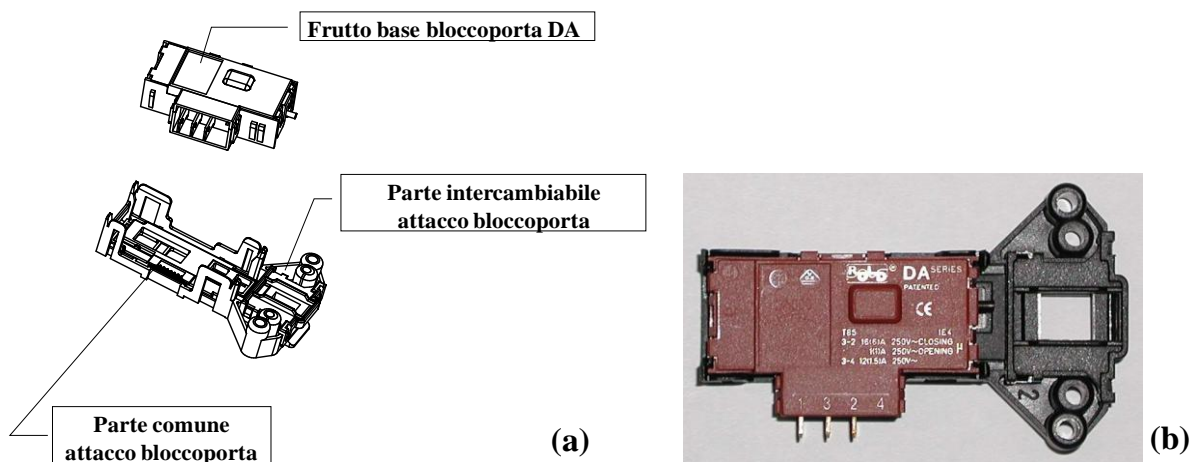


Fig. 1.16: spezzato(a) e assembly (b) del bloccoporta DA.

1.4.1 Principio di funzionamento

Come già citato in precedenza, per ovviare alle problematiche correlate all'utilizzo del singolo bimetallo, si è pensato di utilizzarne due: grazie a questo espediente è stato possibile ridurre l'isteresi del punto di switch della levetta.

Infatti, il bimetallo superiore, sotto l'azione di riscaldamento del PTC, inizia a dilatarsi e lo stesso accade per quello inferiore il quale, grazie alla particolare geometria utilizzata, consente al bimetallo superiore di scivolare verso il basso diminuendo l'elevata isteresi tipica della tecnologia del singolo bimetallo (Fig.1.17).

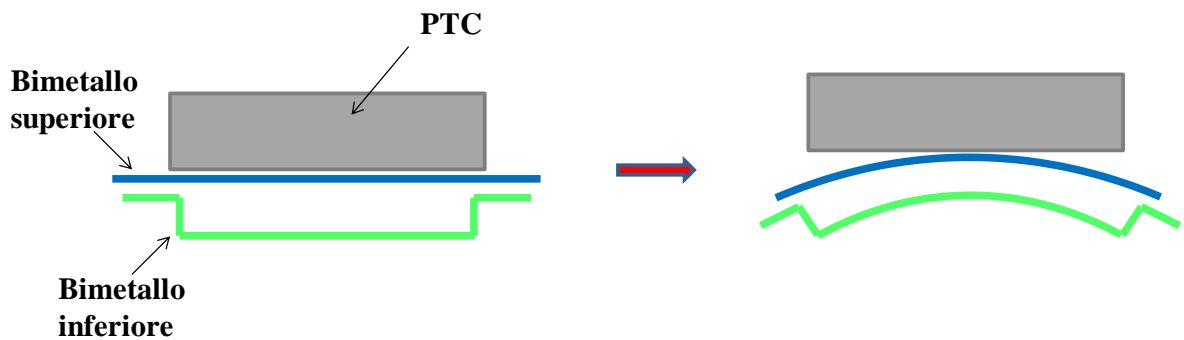


Fig.1.17: tecnologia del doppio bimetallo utilizzato nel modello di bloccoporta DA.

Il concetto funzionale del frutto bloccoporta DA, quindi, è basato sull'utilizzo di un PTC che, riscaldando i due bimetalli consente l'azionamento di un interruttore, il quale oltre a chiudere un circuito elettrico, trascina un chiavistello utilizzato per il bloccaggio di un cursore (Fig.1.18).

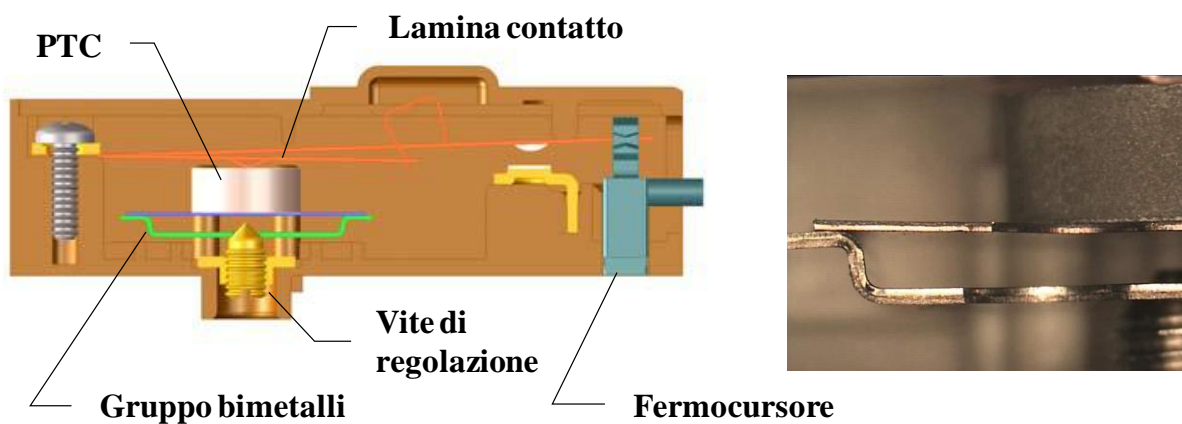


Fig.1.18: configurazione iniziale del bloccoporta DA.

Quando viene data alimentazione al PTC, la dilatazione del bimetallo superiore sposta la molla centrale della lamina contatto in modo che, per l'effetto elastico della molla ad omega, si ha lo scatto dell'interruttore con conseguente chiusura dei contatti e fuoriuscita del fermo cursore (Fig.1.19).

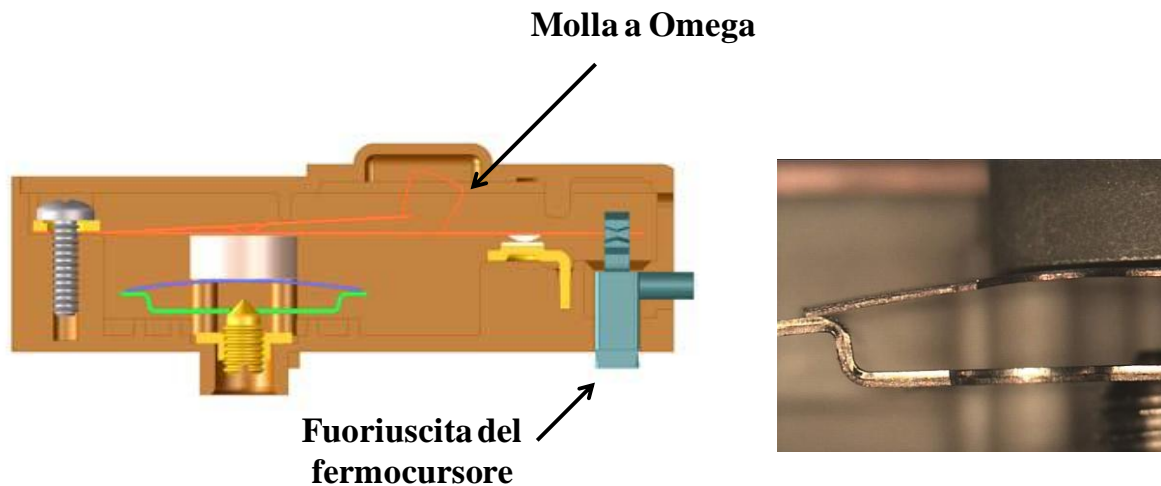


Fig.1.19: configurazione di blocco avvenuto.

Lo spostamento della molla centrale della lamina contatto è determinata dalla deflessione specifica del bimetallo superiore.

Come si può facilmente intuire, la giusta posizione del gruppo PTC/bimetalli rispetto alla lamina contatto determina una ripetitività dei tempi di chiusura e apertura contatti: questo è possibile solo mediante l'utilizzo della vite di regolazione.

Continuando ad alimentare il bloccoporta si ha la massima incurvatura del bimetallo superiore e l'incurvatura del bimetallo inferiore di compensazione che consente uno spostamento lineare verticale verso il basso di 0.2-0.3 mm, sufficiente per contenere i tempi di ritardo.

A fine ciclo di lavaggio, quando il programmatore della lavabiancheria toglie corrente a tutta la macchina, il PTC, non essendo più alimentato, comincia a raffreddarsi e a dissipare il calore immagazzinato.

Di conseguenza anche i due bimetalli raffreddandosi cominciano a raddrizzarsi per riportarsi nella condizione di riposo iniziale.

Essendo di spessore più basso il bimetallo superiore si raffredderà con maggior velocità, permettendo il ritorno della molla centrale della lamina contatto, in modo d'avere lo scatto dell'interruttore con conseguente apertura dei contatti nei tempi prestabiliti dalla specifica.

1.5 Bloccoporta con solenoide (DF)

Un ulteriore sviluppo è stato apportato con l'introduzione del solenoide.

Quest'ultimo quando riceve l'impulso, mette in movimento una slitta che consente la fuoriuscita del fermo-cursore; un secondo impulso ne permette il rientro.

Il vantaggio dell'utilizzo di un solenoide, consiste nel fatto che i tempi di chiusura e di apertura sono pressoché istantanei eliminando l'inconveniente delle relativamente lunghe attese dettate dai tempi di raffreddamento dei bimetalli.

Questo sistema presenta però una problematica non indifferente: infatti, se durante il funzionamento della lavabiancheria, dovesse venire a mancare corrente non è più possibile fornire il secondo impulso e quindi permettere lo sgancio del blocco.

Proprio per questo motivo al solenoide viene accoppiato il sistema bimetallo/PTC: in questo caso infatti, in caso di mancanza di corrente, il raffreddamento del bimetallo permette lo sblocco del gancio.

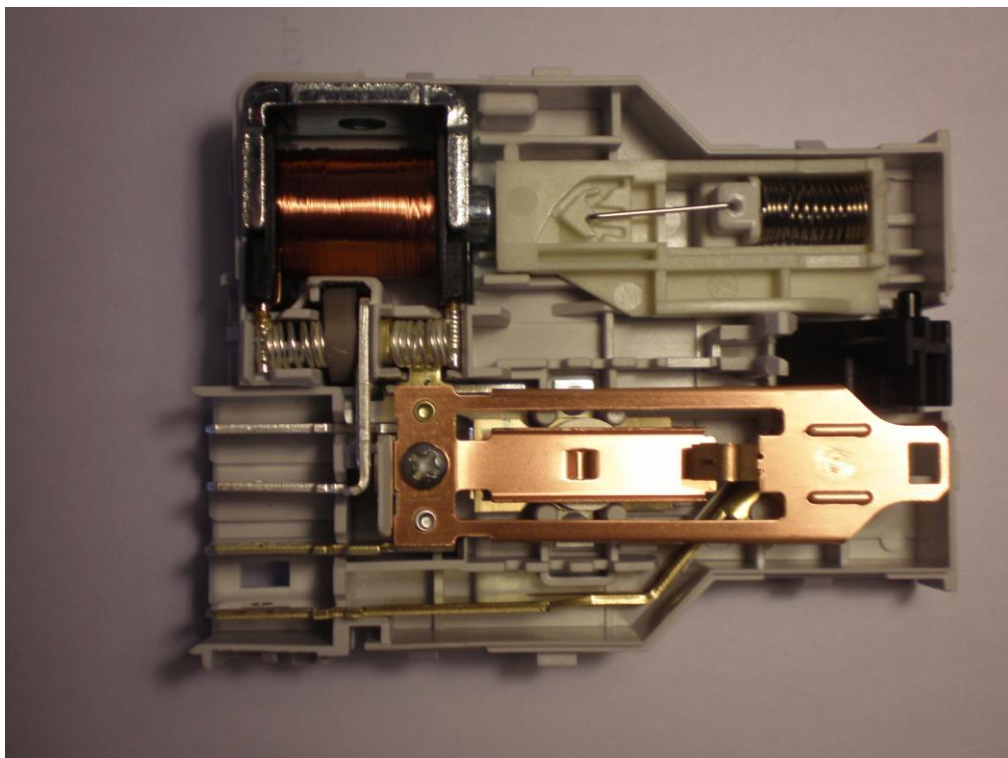


Fig.1.20: modello bloccoporta DF.

1.6 Requisiti richiesti

I bloccoporta appena descritti costituiscono oramai una base solida del mercato grazie alla loro affidabilità e all'esperienza nella produzione.

Infatti, trattandosi di sistemi di sicurezza, è necessaria la più assoluta certezza del corretto funzionamento lungo l'intero ciclo di vita del singolo bloccoporta.

Le case costruttrici di macchine lavabiancheria richiedono requisiti sempre più stringenti e rigorosi al fine di garantire la totale sicurezza dell'operatore durante l'utilizzo della macchina.

I bloccoporta di oggi lavorano tutti a una tensione di 220 Volt con correnti di poco più di 1 Ampere.

Dalle norme di sicurezza (CEI EN 60730-1) si evince che con l'utilizzo di materie plastiche a contatto con correnti superiori a 0.2 Ampere, sia necessario utilizzare polimeri con proprietà autoestinguenti tali da ridurre i rischi di eventuali incendi in caso di anomalie nel funzionamento.

Infatti, uno dei pericoli principali è quello del contatto tra l'acqua e la corrente che passa nel bloccoporta: l'umidità che si raggiunge in prossimità del dispositivo varia da 30% a 80% UR a seconda del programma di lavaggio utilizzato o della posizione della lavabiancheria (incassata all'interno di un mobile, sotto il sole in località molto calde, condizioni di trasporto, ecc...).

Per ovviare, almeno in parte, a questa problematica è posta una copertura sulla parte superiore del bloccoporta che permette alla condensa di scivolare a lato e non entrare in contatto con il corpo del dispositivo e quindi di penetrarvi all'interno.

Una delle priorità più importanti nella progettazione inoltre, è rivolta all'eventualità che l'operatore (in modo particolare se si tratti di bambini) entri in contatto con il bloccoporta: lavorando quest'ultimo in alta tensione il pericolo è molto elevato e tutte le precauzioni necessarie diventano fondamentali.

Anche da un punto di vista meccanico i requisiti sono molto stringenti: infatti, la resistenza minima del cursore nel punto in cui il gancio viene bloccato varia da 50 a 70 Kg a seconda della casa costruttrice.

In realtà, anche quest'aspetto è regolato dalla normativa sopra citata e in particolare prevede una resistenza del cursore pari alla forza necessaria per aprire normalmente l'oblò moltiplicato per un fattore 10: se ad esempio sono necessari 3 chili, il cursore dovrebbe resistere almeno fino a 30 chili.

Ogni casa costruttrice di macchine lavabiancheria tuttavia, regola il valore minimo secondo le proprie esigenze.

1.6.1 Materiali d'impiego

Fin dai primi anni di produzione, per questo tipo di applicazioni, il polimero comunemente utilizzato è stata la poliammide, più conosciuta con il marchio commerciale di Nylon, la quale presenta ottime caratteristiche meccaniche, basso coefficiente d'attrito, resistenza agli urti e all'usura e discreto isolamento elettrico.

Nonostante tutte le sue buone proprietà, una delle problematiche principali che caratterizzano questo polimero è l'elevato assorbimento di umidità: ecco perché è preferibile utilizzare la poliammide caricata vetro, in genere fibra al 30% (tabella 1.1), che consente di ridurre l'assorbimento di acqua rendendo questo materiale il miglior candidato per tale tipo di applicazione.

Tab.1.1: schema riassuntivo delle proprietà della poliammide caricata con 30% di fibra vetro.

PROPRIETA'	METODOLOGIA		CONDIZIONE	UNITA' MISURA	VALORI TIPICI
FISICHE					
Peso specifico	ASTM D792	ISO 1183	Secco	gr/cm ³	1,35
Punto di fusione (DSC)		ISO 3146		°C	255 ± 260
Assorbimento d'acqua a saturazione (in aria a 23°C, u.r. 50%)				%	ca 1,9
Ritiro allo stampaggio (longitudinale)	Metodo interno			%	0,3 ± 0,9
Contenuto carica/rinforzo	Metodo interno		Secco	%	30
MECCANICHE					
Resistenza a trazione : carico a snervamento ⁽¹⁾ o a rottura ⁽²⁾	ASTM D638	ISO R527	Secco/Cond.	MPa	175 ⁽²⁾ / 130 ⁽²⁾
allungamento a snervamento ⁽¹⁾ o a rottura ⁽²⁾	ASTM D638	ISO R527	Secco/Cond.	%	3 ⁽²⁾ / 5 ⁽²⁾
modulo elastico	ASTM D638	ISO R257	Secco/Cond.	MPa	9000 / 6500
Modulo elastico a creep dopo 1000 h, a 23°C, allungam. ≤ 0.5%		ISO 899	Condizionato	MPa	4500
Carico massimo a flessione	ASTM D790	ISO 178	Secco/Cond.	MPa	260 / 210
Resistenza all'urto IZOD con intaglio spessore 3,2 mm 23°C	ASTM D256	ISO 180/4a	Secco/Cond.	J/m	60 / 90
Resistenza all'urto IZOD con intaglio spessore 3,2 mm -30°C	ASTM D256	ISO 180/4a	Secco	J/m	45
Durezza Rockwell scala L	ASTM D785	ISO 2039/2	Secco/Cond.	-	115 / 95
TERMICHE					
Temp. distorsione HDT a 0,45 MPa	ASTM D648	ISO 75		°C	210
Temp. distorsione HDT a 1,82 MPa	ASTM D648	ISO 75		°C	200
Resistenza termica alla biglia	BS 3456	IEC 335		°C	240
Temperatura limite d'impiego : 5000 ore	VDE 0304/P2-1	IEC 216		°C	115
20000 ore	VDE 0304/P2-1	IEC 216		°C	105
ELETTRICHE					
Resistività di superficie	ASTM D257	IEC 93	Secco/Cond.	Ohm	10 ¹² / 10 ¹⁰
Rigidità dielettrica	ASTM D149	IEC 243	Secco/Cond.	KV/mm	90 / 75
Costante dielettrica 10 ⁶ Hz	ASTM D150	IEC 250	Secco/Cond.	-	3,3 / 5,5
Fattore di dissipazione tang δ -10 ⁶ Hz	ASTM D150	IEC 250	Secco/Cond.	-	0,015 / 0,2
Resistenza alle correnti striscianti (soluzione A, CTI)	VDE 0303-PI	IEC 112	Secco/Cond.	V	550
REAZIONE AL FUOCO					
Comportamento al fuoco (spessore 3,2 mm)	UL 94			Classe	HB
Comportamento al fuoco (spessore 1,6 mm)	UL 94			Classe	HB
Comportamento al filo incandescente (spessore 3,2 mm)	VDE 0471/P2-4	IEC 695		°C	750
Comportamento al filo incandescente (spessore 2 mm)	VDE 0471/P2-4	IEC 695		°C	750

L'utilizzo di polimeri reticolati risolverebbe il problema dell'elevato assorbimento di umidità mantenendo inalterate le proprietà meccaniche richieste; risulterebbe però problematico, dal

punto di vista aziendale, la produzione e la lavorazione di questa tipologia di materiale. Infatti, se per esempio tutta la materia plastica necessaria viene lavorata all'interno dell'azienda stessa, l'utilizzo di polimeri reticolati comporterebbe la lavorazione della materia anche al di fuori dello stabilimento incrementando le tempistiche d'impiego e, inevitabilmente, anche i costi.

Inoltre i granuli di polimero, essendo additivati con reticolanti che presentano scadenze d'impiego ridotte, avrebbero tempi di rotazione molto rapidi e si dovrebbero far coincidere tempi di approvvigionamento (non necessariamente corti) con cicli di rotazione del materiale molto brevi, causando notevoli disagi.

Nei bloccoporta che prevedono l'utilizzo della pastiglia di PTC, un'altra problematica è dettata dalle alte temperature che si raggiungono all'interno del sistema di sicurezza.

Infatti, per le particolari proprietà del PTC si raggiungono temperature dell'ordine dei 200°C che vanno ad accelerare il processo di degradazione del polimero in particolar modo sulle quattro torrettine di sostegno della pastiglia (fig.1.21).

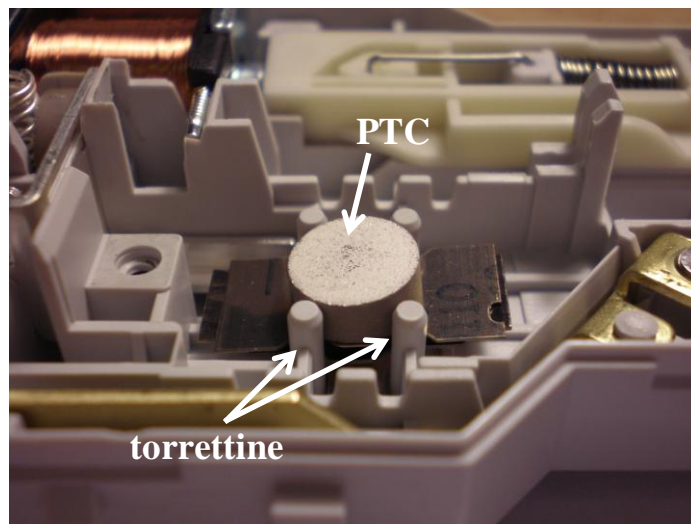


Fig.1.21: particolare del bloccoporta DF dove si possono notare le quattro torrettine che sostengono la pastiglia PTC.

Questo, ovviamente, influisce sul corretto funzionamento del sistema di bloccaggio andando a variare i tempi chiusura e apertura.

È chiaro che anche in questo caso, l'utilizzo di un polimero reticolato andrebbe ad aumentare la resistenza alla degradazione, ma bisognerebbe comunque tener conto di tutte le problematiche sopra citate.

Data la vasta gamma di tipologie di polimeri, e quindi di differenti proprietà sia fisiche che meccaniche ed elettriche, ci si è domandati se non fosse possibile utilizzare polimeri differenti, come ad esempio:

- Poliammide caricata con silicone: questo permetterebbe una diminuzione di assorbimento di acqua, ma si è osservato che dopo qualche periodo di utilizzo il silicone tende ad affiorare in superficie compromettendo in modo marcato le proprietà meccaniche;
- Polipropilene: è un materiale che presenta delle ottime proprietà meccaniche, specialmente se ad “alta densità”. Il limite invalicabile è dettato dalla sua bassa temperatura di transizione vetrosa (addirittura di -10°C);
- PBT: acronimo di polibutadientereftalato, presenta buona resistenza all'abrasione, inerzia chimica e basso assorbimento d'umidità (inferiore alla PA), che ne permette l'utilizzo per la realizzazione di manufatti che lavorano in ambienti molto umidi. Si sconsiglia tuttavia l'impiego con contatto continuo o prolungato in ambienti umidi con temperature sopra i 50°C per la scarsa resistenza all'idrolisi della resina di base.

È facilmente osservabile come ogni materiale presenta vantaggi e svantaggi a seconda dell'applicazione in cui sono richiesti; è necessario quindi essere in grado di valutare correttamente l'importanza delle proprietà e valutare se possono essere consone all'applicazione. Proprio per questo, la scelta del polimero per i bloccoporta non può che non ricadere sull'ormai familiare poliammide caricata vetro che, nonostante le problematiche di assorbimento, rimane ancora il miglior materiale per questo tipo di applicazione.

Generalità sulle leghe a memoria di forma

Nella progettazione di un sistema di sicurezza, come del resto nella progettazione di un qualsiasi dispositivo, le problematiche che s'incontrano sono svariate e complesse.

Alcune delle più evidenti si riescono a risolvere prima della realizzazione di un prototipo e del lancio in produzione ma, con altre meno evidenti causate da problematiche sulle macchine, dagli operatori oppure da errori di progetto, ci si potrebbe scontrare dopo qualche periodo che il prodotto è già sul mercato.

Proprio per questo è necessario un continuo controllo su tutti i passaggi che contribuiscono alla realizzazione del prodotto e, soprattutto, è essenziale essere pronti per eventuali cambiamenti necessari al fine di una maggiore ottimizzazione del suo funzionamento.

Una delle motivazioni per cui alcune aziende s'impongono sul mercato, consta proprio nella loro continua ricerca all'ottimizzazione ed evoluzione, sempre attente alle esigenze di mercato e alle innovazioni che vi si presentano.

Ecco perché si è pensato di avviare lo studio di un bloccoporta innovativo che sfruttasse le ottime e peculiari proprietà meccaniche ed elettriche del filo a memoria di forma, comunemente chiamato SMA (Shape Memory Alloy).

La principale motivazione che ha guidato lo studio di questa nuova tecnologia applicata ai sistemi di sicurezza, è stata la possibilità di poter lavorare con basse tensioni e basse correnti.

L'obiettivo del progetto è proprio questo: utilizzare un filo SMA con un diametro da 76 μm , che consenta di lavorare con correnti al di sotto dei 0.2 Ampere, permettendo così di utilizzare materiali con proprietà meccaniche ed elettriche inferiori rispetto a quelli utilizzati oggi, riducendo quindi i costi.

L'utilizzo del filo, consentirebbe inoltre di eliminare la problematica del surriscaldamento all'interno dei bloccoporta che utilizzano la tecnologia della pastiglia PTC: di fatto, questa, raggiungendo temperature dell'ordine dei 200°C, genera delle condizioni di lavoro molto onerose e la degradazione del materiale è notevolmente accelerata.

Un altro vantaggio portato dall'impiego del filo sarebbero i tempi di chiusura e apertura della meccanica del bloccoporta: come nel caso del solenoide, sono istantanei.

Infatti, la durata dell'impulso elettrico che comanda la meccanica è di qualche frazione di secondo, evitando quindi all'utilizzatore della lavabiancheria le relativamente lunghe attese prima di poter riaprire l'oblò una volta terminato il ciclo di lavaggio, necessarie nei bloccoporta con PTC.

Un ulteriore vantaggio del filo a memoria di forma sarebbe la sua silenziosità: i bloccoporta con solenoide, infatti, quando vengono azionati provocano l'urto tra due componenti metallici causando un rumore che le case costruttrici vorrebbero limitare.

Risulta evidente che si tratterebbe di una problematica di secondaria importanza, ma che ad ogni modo rispecchierebbe una ulteriore esigenza che le case costruttrici vorrebbero limitare (se non addirittura eliminare) e di fatto, questa necessità assume per i fornitori di sistemi di sicurezza una sua importanza.

Per capire meglio le caratteristiche del filo a memoria di forma, di seguito si propone un intero capitolo dedicato all'approfondimento delle sue proprietà fisiche e meccaniche.

2.1 Cenni storici [3]

Il fenomeno della memoria di forma fu osservato per la prima volta nel 1932 su una lega Oro-Cadmio ad opera di Chang e Read.

Nel 1962, in modo del tutto casuale, l'effetto a memoria di forma fu trovato anche su una lega equiatomica di Nichel – Titanio, per opera di Buehler presso il Naval Ordnance Laboratory (NOL) di White Oak della US Navy in Maryland, e fu da allora che iniziò la ricerca vera e propria, la produzione in notevoli quantità e le applicazioni pratiche di questa classe di materiali.

Con l'approfondirsi delle ricerche, furono analizzate molte altre leghe che presentassero le proprietà "shape memory" ma tra tutte, le più interessanti ed utili dal punto di vista applicativo si sono rivelate quelle del gruppo Nichel - Titanio, chiamate Nitinol (Nichel Titanio NOL), e le leghe del Rame.

Le altre leghe a memoria di forma studiate sono quelle di:

- Rame - Alluminio - Nickel
- Rame - Zinco - Alluminio
- Ferro - Manganese - Silicio

La prima grande applicazione di questa nuova tecnologia fu lanciata nel 1971 dalla Raychem Corporation per la fabbricazione di giunti per l'accoppiamento di tubi in titanio utilizzati sulla Grumman F-14° (caccia della Marina Militare Americana).

Intorno al 1970, le leghe a memoria di forma cominciarono a trovare impiego, anche nel campo medico, dove mostrarono delle ottime proprietà di biocompatibilità. Tra gli impieghi più comuni si possono citare fili di sutura, apparecchi ortodontici, cateteri e, più recentemente, stent.

Le leghe a memoria di forma, grazie alle loro enormi potenzialità, trovano ai giorni d'oggi svariati impieghi ad esempio come attuatori elettrici o termici, nel campo automobilistico o anche nella produzione di montature per occhiali.

2.2 Proprietà e caratteristiche [2]

Le leghe a memoria di forma rappresentano una classe di materiali metallici dalle inusuali proprietà meccaniche. Infatti, la loro caratteristica principale è quella di essere in grado di recuperare una forma macroscopica preimpostata per effetto del semplice cambiamento della temperatura o dello stato di sollecitazione applicato.

Come già accennato le leghe a memoria di forma che trovano il maggior impiego, nonostante siano più costose e difficili da lavorare, sono quello di Nichel e Titanio (Nitinol), in quanto sono caratterizzate da:

- Maggiore resistenza meccanica
- Migliore stabilità
- Migliore resistenza all'ambiente
- Disponibilità in fili e lamine sottili
- Biocompatibilità (fondamentale per applicazioni biomediche)

In sostanza, nella lega Nitinol (50% Ni e 50% Ti circa) è presente una trasformazione di fase allo stato solido, cioè in cui sia la fase di partenza che quella di arrivo sono strutture solide anche se con arrangiamenti cristallografici differenti.

Questo fenomeno prende il nome di “trasformazione martensitica termoelastica”.

2.2.1 Trasformazione martensitica termoelastica [6]

La capacità di un materiale di presentare l'effetto della memoria di forma è principalmente dipendente dalla possibilità di tale materiale di presentare due differenti configurazioni microscopiche, chiamate:

- fase austenitica (γ), cristallograficamente più ordinata e stabile alle alte temperature
- fase martensitica (α'), cristallograficamente meno ordinata e stabile alle basse temperature.

A causa della minor simmetria, in fase martensitica possono coesistere diverse orientazioni chiamate varianti. Tali varianti sono ventiquattro e in uno stato privo di sforzo sono tutte presenti; questo tipo di stato è detto di martensite *twinned* perché orientazioni dello stesso tipo sono accoppiate tra loro.

Quando invece esiste uno stato di sforzo la lega si deforma e restano solo le varianti che si adattano maggiormente allo sforzo; in questo caso la martensite è detta *detwinned* o martensite indotta da sforzo (SIM).

Le proprietà di una SMA dipendono dalla quantità con cui una fase è presente; bisogna studiare quindi come avviene la trasformazione austenite - martensite.

La prima cosa che va osservata è che la trasformazione martensitica è di tipo non diffusivo.

Questo significa che il moto degli atomi avviene in modo cooperativo, ossia si assiste al movimento coordinato di un certo numero di atomi che dà luogo alla nuova fase. Questa differenza è molto importante, perché ha come conseguenza che la trasformazione non avviene in maniera isoterma ossia non si ha una dipendenza dal tempo, come invece accade per le trasformazioni diffusive.

La forza motrice della trasformazione da $\gamma \rightarrow \alpha'$ è guidata, quindi, da una variazione di energia libera ΔG .

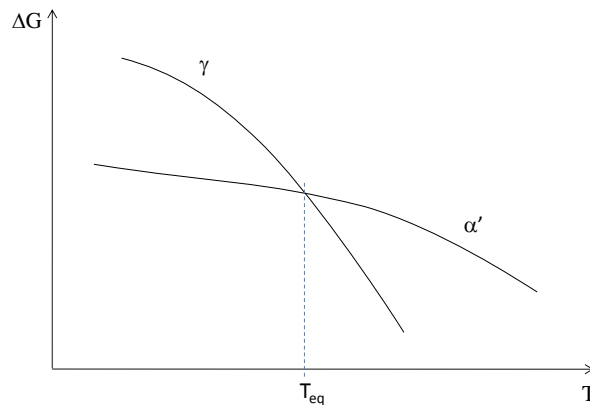


Fig. 2.1: andamento dell'energia interna dell'austenite e della martensite

Come osservabile dalla figura 2.1, esiste una temperatura T_{eq} dove il ΔG si annulla: a temperature più basse la trasformazione è spinta verso α' , mentre a temperature maggiori è stabile γ .

La trasformazione $\gamma \rightarrow \alpha'$ avviene con la formazione di placchette lenticolari all'interno del grano austenitico. Dato che la trasformazione non è diffusiva e non è presente una variazione di composizione chimica, essa dipende solo dal continuo raffreddamento. Abbassando la temperatura inoltre non si avrà un accrescimento delle placchette presenti bensì la nucleazione di nuove. Il 100% di martensite si otterrà quindi solo per una determinata temperatura che prende il nome di martensite finish (M_f). Questa temperatura non è intrinseca del materiale ma dipende dalla modalità con cui il materiale ha subito il raffreddamento: se questo non è stato continuo si ha una stabilizzazione termica della martensite, ossia ricominciando a raffreddare occorre un certo ΔT affinché la trasformazione continui ad avanzare, abbassando così anche M_f . La causa di questa stabilizzazione è da ricercare nella diffusione degli interstiziali che

formano le atmosfere di Cottrell¹ indurendo la matrice di austenite e sfavorendo quindi la formazione delle placchette di martensite.

Il moto cooperativo di atomi che portano alla trasformazione di fatto causa una deformazione reticolare.

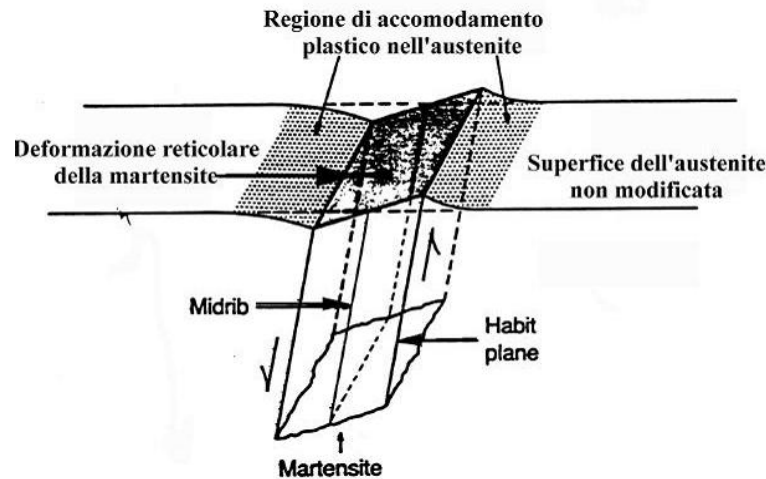


Fig. 2.2: deformazione plastica nell'austenite causata dalla trasformazione in martensite

Come si può notare dalla figura 2.2, tra α' e γ è presente una zona di accomodamento plastico della martensite nell'austenite.

Esistono comunque due vincoli che governano questa deformazione:

1. Durante la trasformazione esiste un piano che prende il nome di “habit plane” che rimane indeformato e non ruotato ed è proprio su questo piano che la martensite si genera.
2. Austenite e martensite sono caratterizzate da due reticoli cristallini ben distinti, con parametri di cella definiti. L'austenite ha un reticolo FCC mentre la martensite è un BCT (tetragonale a corpo centrato) o un BCC.

Esiste però un'analogia tra questi due reticoli cristallini; osservando la figura 2.3 si può immaginare di vedere dentro alle due celle FCC una cella BCT. Quest'ultima è però più alta di quella che forma la martensite.

¹ Le atmosfere di Cottrell sono rappresentate dagli atomi di soluto che, attratti dai campi elastici generati dalle dislocazioni, le circondano e le stabilizzano. In questo modo la dislocazione risulterà ancorata dalla propria atmosfera di Cottrell e lo sforzo per innescare il moto sarà superiore rispetto a quello richiesto per una dislocazione libera.

Si può pensare di trasformare questa BCT virtuale in quella martensitica applicando una trazione (chiamata trazione di Bain) e successivamente un taglio ed una rotazione per ripristinare l'habit plane.

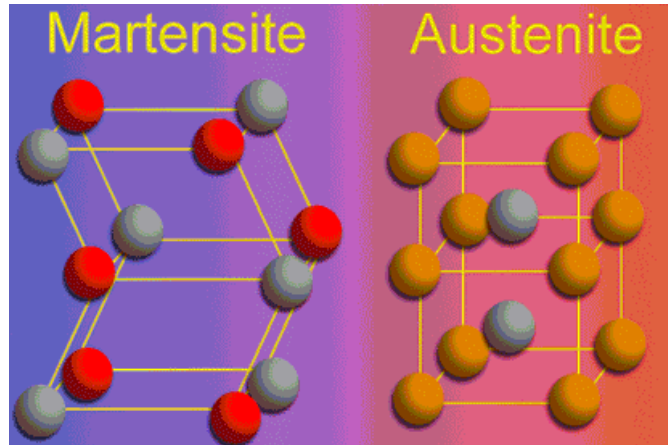


Fig. 2.3: rappresentazione delle celle cristalline della martensite e dell'austenite.

Applicando uno sforzo è quindi probabile che questo abbia una componente di taglio su un habit plane favorendo quindi la trasformazione martensitica.

Esiste comunque una temperatura, che prende il nome di Martensite Start per Deformazione (M_d), sopra la quale la trasformazione in martensite per deformazione non avviene; il perché è facilmente intuibile dalla figura 2.4 dove è rappresentato l'andamento dello sforzo di taglio in funzione della temperatura per far avvenire la trasformazione martensitica per deformazione (τ_{sit}) e l'andamento dello sforzo di taglio per deformare il materiale (τ_{np}).

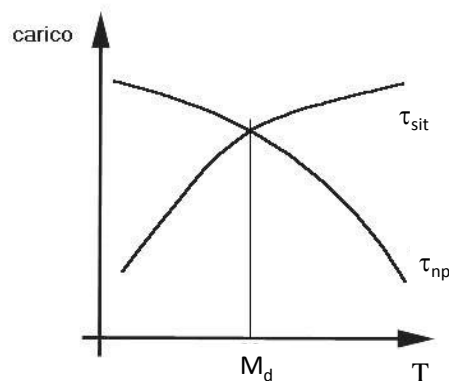


Fig.2.4: andamento degli sforzi di taglio con la temperatura

L'andamento crescente della τ_{sit} , è dovuta al fatto che maggiore è la temperatura, minore sarà il ΔG a disposizione del sistema per fare avvenire la trasformazione e quindi maggiore dovrà essere l'energia introdotta con lo sforzo di taglio.

Si definisce M_d come la temperatura sopra la quale un carico applicato induce una deformazione plastica, mentre sotto di essa si può avere trasformazione martensitica per deformazione.

Va osservato infine, che compiendo un intero ciclo di trasformazione si ha un'isteresi caratterizzata dai seguenti parametri (Fig. 2.5):

- M_s (martensite start) = temperatura di inizio trasformazione della martensite
- M_f (martensite finish) = temperatura di fine trasformazione della martensite
- A_s (austenite start) = temperatura di inizio trasformazione dell'austenite
- A_f (austenite finish) = temperatura di fine trasformazione dell'austenite

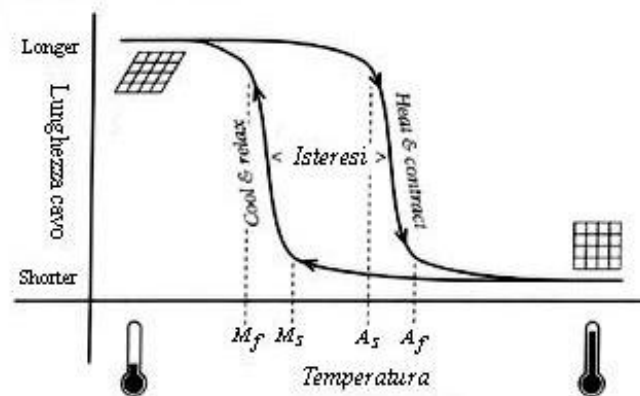


Fig. 2.5: ciclo d'isteresi che si sviluppa con la trasformazione martensitica

Tutti questi parametri sono influenzati dalla composizione del materiale; infatti, aggiungendo un terzo elemento di lega è possibile [7]:

- Aumentare (Nb) o diminuire (Cu) l'isteresi,
- Abbassare (Fe, Cr, Co, Al) le temperature di transizione,
- Alzare (Zr, Pd, Au, Zr) le temperature di transizione

Le leghe a memoria di forma attuali sono limitate da temperature di trasformazione relativamente basse. Infatti, la richiesta di mercato tende a spostarsi su leghe SMA che presenta più alte temperature di trasformazione, come ad esempio nel campo della robotica.

Purtroppo però, tali leghe presentano proprietà inferiori rispetto alle comuni SMA a causa della decomposizione della martensite o della fase genitrice e alla formazione di una fase fragile [7,8].

2.2.2 Trasformazione martensitica termoelastica per le leghe a memoria di forma

Non tutte le leghe che presentano trasformazione martensitica hanno l'effetto memoria di forma.

La temperatura di trasformazione martensitica M_s ha un'alta dipendenza dalla composizione della lega, com'è ben visibile osservando la tabella 2.1 dove con un cambio di composizione solo del 5% di zinco in una lega di rame, si ha una grossa variazione di M_s .

Tab. 2.1: variazione di M_s in funzione della composizione chimica

Contenuto (in %)				M_s (°C)
Cu	Zn	Ni	Si	
58	40	2		-169
59.5	40	0.5		-128
60.5	39.5			-126
61.1	38.9			- 50
63.5	35		1.5	- 18

Ovviamente le leghe SMAs sono state studiate affinché la trasformazione martensitica avvenga a temperature vicino a quella ambiente sia per facilitarne la produzione, sia soprattutto per utilizzare l'effetto memoria di forma in applicazioni comuni.

Il primo segno che la trasformazione martensitica è iniziata, è la formazione di placchette aciculari, le quali però non sono visibili ad occhio nudo ma si possono osservare solo dopo un attacco acido della superficie del materiale.

Nelle leghe a base di rame, al diminuire del tenore di zinco presente, tali placchette martensitiche sono più difficili da osservare.

Questa trasformazione procede finché finisce tutta la fase γ e termina alla temperatura di M_f .

In questo processo ci sono grosse dipendenze tra le orientazioni della matrice e della martensite; le placchette con orientazione preferenziale crescono a spese delle altre aumentando di numero e spessore.

La prima condizione che una lega presenti memoria di forma è che questa trasformazione sia termoelastica in natura. Osservando la deformazione che la trasformazione martensitica induce nel reticolo cristallino, come si vede in figura 2.6, si avrebbe la tendenza a passare dalla configurazione (a) a quella (d).

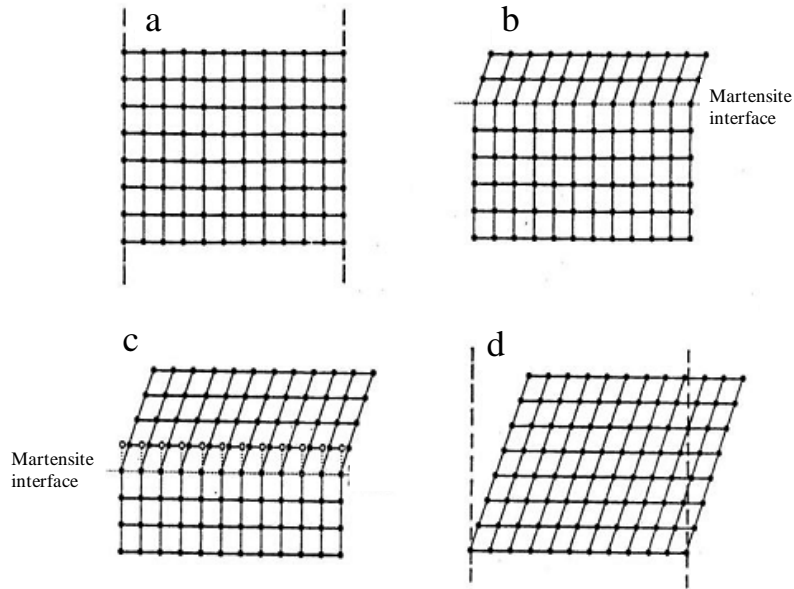


Fig. 2.6: Orientazione ideale del reticolo durante la trasformazione martensitica.

Nella realtà questa configurazione non è raggiungibile poiché la matrice di austenite circostante vincola la deformazione del reticolo, costringendolo a mantenere la posizione originale del cristallo. La trasformazione martensitica introduce quindi uno stato di sforzo che porta a una deformazione locale applicando due possibili meccanismi (Figura 2.7): scorrimento (slip) e geminazione (twinning).

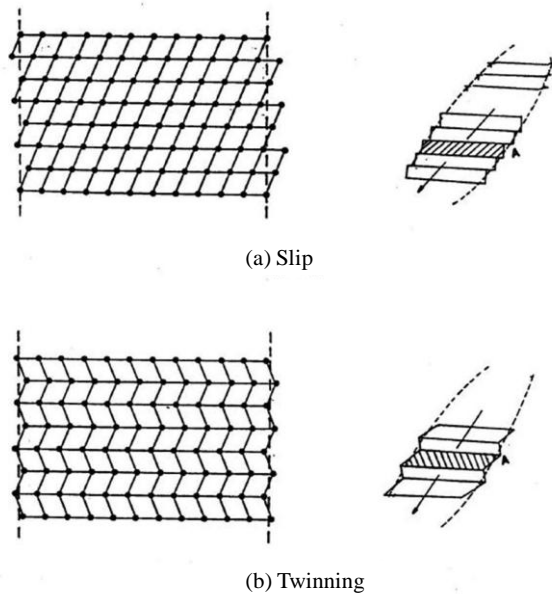


Fig. 2.7: meccanismi di deformazione martensitica

Con il meccanismo di scorrimento (slip) ottengo una deformazione plastica per moto delle dislocazioni che è quindi irreversibile, mentre con la geminazione (twinning) si formano delle placchette con orientazione cristallina diversa dalla matrice.

Dato che con quest'ultimo meccanismo non ho rottura di legami atomici, ma solo un accomodamento, la deformazione per twinning è reversibile e in questo caso la trasformazione viene definita termoelastica.

In alcune leghe questo è possibile solo per alcune configurazioni della matrice e della martensite, o può dipendere dalla formazione di geminati.

Applicando uno sforzo di taglio in presenza di martensite termoelastica è possibile mettere in moto il bordo dei geminati ottenendo una variazione di forma netta con un meccanismo chiamato detwinning.

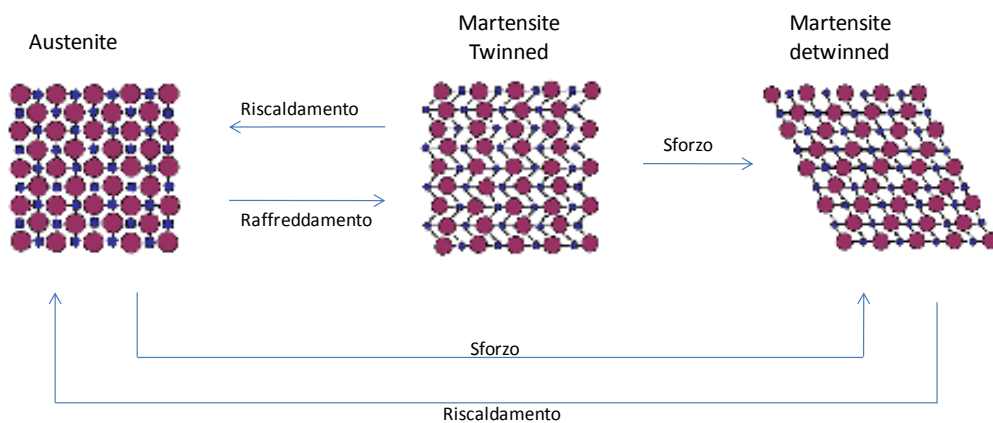


Fig. 2.8: Possibili trasformazioni tra le varie fasi delle leghe a memoria di forma.

2.2.3 Memoria di forma a una via

Come già spiegato nel paragrafo precedente, la trasformazione dalla fase austenitica a quella martensitica è un processo che si verifica progressivamente nel materiale e inoltre, per ciascun elemento in fase di trasformazione, è imposto il mantenimento delle caratteristiche dimensionali; questo è ottenuto mediante un processo di accomodamento che comporta la disposizione del materiale in strati con varianti ad orientamento alternato del reticolo (twinning).

L'applicazione di una sollecitazione esterna può generare una deformazione permanente provocando un orientamento preferenziale (detwinning) degli strati; questo meccanismo di riarrangiamento permette la deformazione con bassi livelli di sollecitazione applicata.

Se il materiale viene portato ad una temperatura adeguata, ha luogo la trasformazione nella fase austenitica che è associata ad una sola struttura e quindi riporta il materiale nella forma originaria.

Questo fenomeno è detto di memoria di forma ad una via (One Way Shape Memory Effect, OWSME) in quanto si verifica una sola volta nel passaggio dalla fase martensitica a quella austenitica.

Affinché il processo possa essere ripetuto è necessario, dopo aver riportato il materiale mediante raffreddamento nella fase martensitica, applicare una sollecitazione capace di indurlo la deformazione.

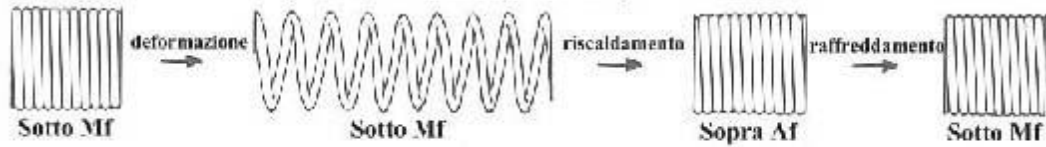


Fig. 2.9: One Way Shape Memory Effect

Per una maggiore comprensione si riporta il grafico (Fig.2.10) in cui è illustrato il comportamento a memoria di forma a una via del NiTiNOL.

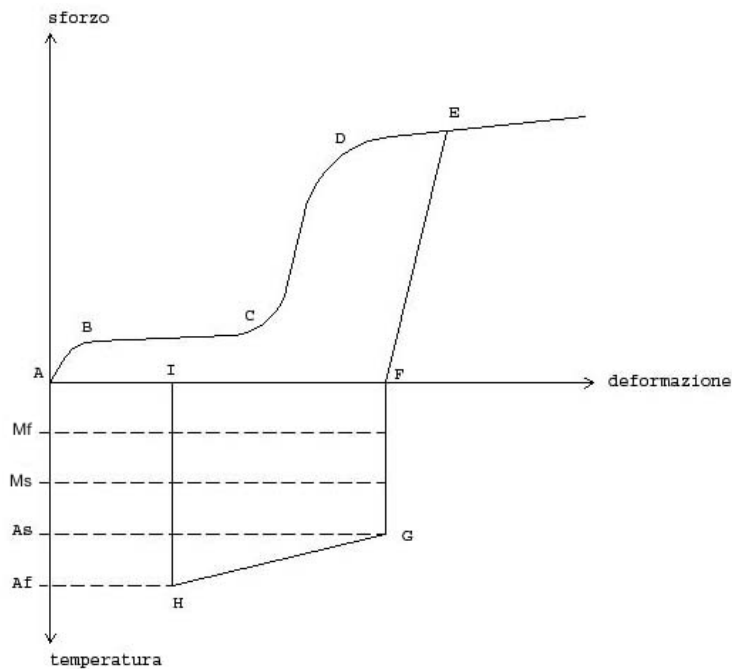


Fig.1.10: OWSME in funzione di sforzo, deformazione e temperatura

Partendo da una temperatura inferiore a M_f ed applicando uno sforzo crescente il materiale percorre il tratto elastico della martensite twinned (tratto A-B) fino ad avere una riorientazione dei grani in direzione dello sforzo stesso con il conseguente passaggio dalla martensite twinned a quella detwinned (B-C). In questa fase si genera una deformazione plastica che non sarebbe recuperabile nel momento in cui lo sforzo dovesse cessare. Terminata la riorientazione ci si trova in 100% martensite detwinned e ad un'ulteriore crescita dello sforzo si va a percorrere il tratto elastico della martensite detwinned (C-D). Giunti ad un certo livello di sforzo si entra poi nel campo plastico della martensite detwinned (DE).

Infine, annullando lo sforzo, si ha il recupero elastico relativo alla martensite detwinned che porta il materiale a uno stato di deformazione individuato dal punto F. A questo punto è sufficiente aumentare la temperatura per vedere l'effetto della memoria di forma; superando la temperatura A_s (F-G) inizia la trasformazione austenitica che si completa solo col raggiungimento di una temperatura superiore ad A_f (G-H).

Durante il ciclo termo-meccanico appena visto si è recuperata tutta la deformazione imposta al materiale in fase martensitica, fatta eccezione per la sola deformazione plastica (D-E) che, in quanto tale, risulta irrecoverabile. Una volta raffreddato, il materiale effettua infine una trasformazione di fase martensitica durante la quale, mantenendo uno sforzo nullo, non si ottiene alcuna variazione di forma. [6]

2.2.4 Memoria di forma a due vie

Con alcune leghe è possibile ottenere l'effetto memoria di forma sia della fase austenitica, sia della fase martensitica, in cui un materiale cambia automaticamente forma in dipendenza con la temperatura. Questo effetto, che prende il nome di effetto di memoria di forma a due vie (Two Ways Shape Memory Effect, TWSME), non è comunque una proprietà intrinseca del materiale, ma è un comportamento che il materiale deve 'apprendere' attraverso appositi trattamenti termici.

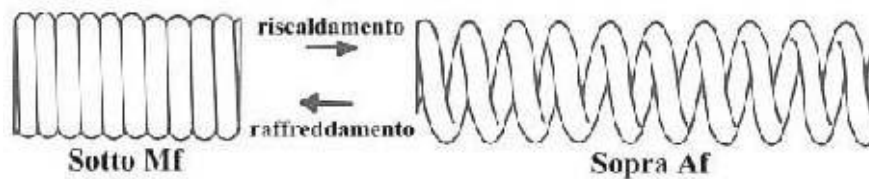


Fig.2.11: Two Ways Shape Memory Effect

Si agisce introducendo concentrazioni di dislocazioni per stress nella martensite in direzioni preferenziali in modo che la trasformazione $\gamma \rightarrow \alpha'$ porti ad una forma ben precisa.

Il trattamento termico che viene utilizzato prende il nome di *ciclaggio termico forzato della martensite*: il pezzo viene deformato sotto la M_f ed immobilizzato in maniera che non modifichi mai il suo stato deformato durante i successivi trattamenti termici condotti a temperature maggiori di A_f e successivamente inferiori ad M_f .

Si può ottenere così un materiale che cambia automaticamente forma in dipendenza con la temperatura. Il grosso limite dell'effetto di memoria di forma a due vie risiede nel fatto che esiste un numero finito di cicli che può compiere prima di tornare a comportarsi come una lega OWSME, che dipende dal trattamento di ciclaggio termico forzato. Inoltre la percentuale di forma che viene recuperata passando da austenite e martensite è inversamente proporzionale al numero massimo di cicli massimi richiesti al materiale.

Tab. 2.2: effetto della deformazione massima sul numero di cicli

Numero cicli	Massima deformazione reversibile		
	NiTi	CuAlNi	CuZnAl
10^2	6	1.2	1
10^5	2	0.8	0.8
10^7	0.5	0.6	0.5

Altro limite è rappresentato dall'esistenza di una temperatura critica oltre la quale la lega perde la sua caratteristica di effetto di memoria di forma a due vie, vanificando così il trattamento di ciclaggio termico forzato.

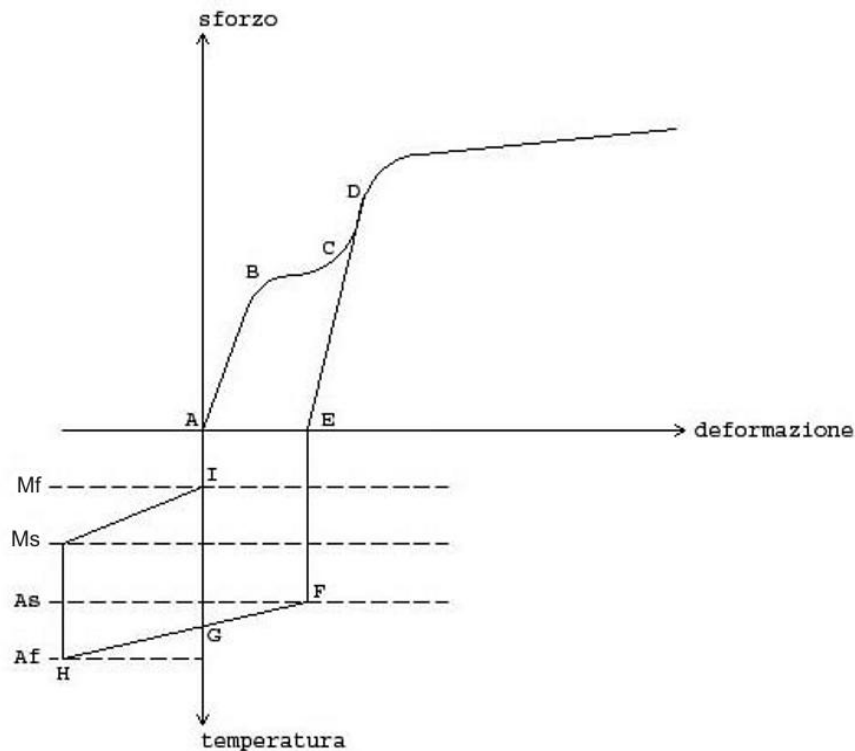


Fig.2.12: TWSME in funzione di sforzo, deformazione e temperatura.

Alla fine dell'allenamento il materiale si trova in martensite parzialmente orientata, cioè allo stato iniziale coesistono una percentuale di martensite twinned e una di martensite detwinned. Applicando uno sforzo crescente si percorre il tratto elastico del materiale misto (tratto A-B) finchè lo sforzo non è tale da orientare tutti i grani (B-C) fino ad ottenere esclusivamente martensite detwinned (punto C). Incrementando ancora lo sforzo si va a percorrere tutto il tratto elastico della martensite detwinned (C-D). Se a questo punto annullo lo sforzo ho il recupero elastico della deformazione associata alla martensite detwinned (E).

Aumentando la temperatura fino ad A_s (E-F) si dà inizio alla trasformazione martensitica reverse e una volta raggiunta la A_f , a trasformazione completata, si è ottenuto il recupero di deformazione generato precedentemente nel passaggio da martensite twinned a martensite detwinned.

Questa deformazione è composta dal tratto F-G, ossia dalla deformazione ottenuta nel passaggio da detwinned a parzialmente detwinned, e dal tratto G-H, cioè dalla deformazione ottenuta dal passaggio da parzialmente detwinned a twinned. Ora, raffreddando il materiale al di sotto di M_s si dà inizio alla trasformazione martensitica forward durante cui si ha passaggio da martensite twinned a parzialmente detwinned, ossia alla condizione di partenza.

2.2.4 Effetto pseudoelastico (o superelastico) [1]

Come già detto esiste una temperatura M_d sotto la quale posso aver formazione di martensite per deformazione meccanica. Se una lega a memoria di forma presenta la temperatura di fine trasformazione austenitica A_f più bassa della temperatura M_d , si può avere un altro fenomeno molto importante che prende il nome di pseudoelasticità o superelasticità, cioè la capacità di un materiale a memoria di forma di immagazzinare e recuperare totalmente grandi deformazioni (anche del 6 - 8%), in gran parte a sforzo costante.

Nel corso della deformazione imposta, il materiale forma progressivamente la struttura martensitica (detta martensite indotta da stress) e questa istantaneamente si deforma permettendo di nuovo di accomodare grandi deformazioni senza danneggiare in maniera permanente la struttura cristallografica del materiale. Poiché però tale procedura viene condotta in un intervallo di temperature ($A_f < T < M_D$) in cui la martensite formatasi non potrebbe esistere (in quanto a quella temperatura la fase stabile dovrebbe essere l'austenite) nel momento in cui la forza esterna viene rimossa essa si trova in una condizione di instabilità

termodinamica e tende a ritrasformarsi istantaneamente promuovendo un immediato recupero di forma prescindendo quindi dalla fase di riscaldamento.

La curva carico-deformazione, per una lega NiTi è riportata in figura 2.13.

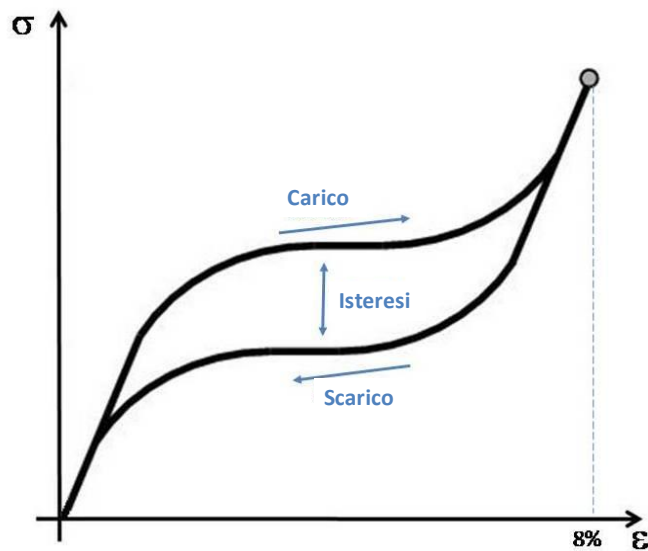


Fig.2.13: Comportamento superelastico

Come si può notare dal grafico, nella fase di carico si osserva un punto di pseudosnervamento coincidente con l'inizio della trasformazione martensitica che procedendo all'aumentare della deformazione giustifica la presenza del tratto di deformazione a sforzo costante (plateau). L'ampia deformazione imposta viene recuperata immediatamente nella fase di scarico in cui si osserva un ulteriore regione di deformazione a sforzo costante associata con la trasformazione inversa da martensite ad austenite.

Tre sono gli aspetti salienti del comportamento superelastico di questi materiali, sfruttabili nelle applicazioni commerciali:

- si possono avere grandi deformazioni a sollecitazione praticamente costante durante il processo di martensite indotta da sforzo, recuperabili durante il processo di riconversione;
- le deformazioni impresse sotto sforzo sono interamente recuperabili anche per deformazioni del 6-8%;
- lo sforzo per indurre martensite e quello per riconvertirla in fase genitrice dipendono

linearmente dalla temperatura secondo la legge di Clausius-Clapeyron $\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{T \times \Delta V}$

che in metallurgia diventa $\frac{d\sigma}{dM_s} = -\frac{\Delta H}{T \times \varepsilon_0}$ per unità di volume, dove ΔH è il calore

latente di fusione e ε_0 è la deformazione risultante nella direzione della sollecitazione.

Il fenomeno della superelasticità non è altro che un effetto di memoria meccanica del materiale: esso, sotto l'azione di uno stato di sollecitazione, assume una configurazione deformata, ben oltre il limite elastico, che può essere ripristinata togliendo lo stato di sollecitazione.

Nel comportamento superelastico il materiale immagazzina energia, che può, anche se non totalmente, essere restituita nel processo inverso: è stato mostrato che è possibile immagazzinare fino a 42 MJm^{-3} in NiTi, entità da 5 a 40 volte quella immagazzinabile negli acciai.

La possibilità offerta dai metalli a memoria di forma di immagazzinare grandi deformazioni che possono essere integralmente recuperate sono impensabili nei materiali convenzionali e ciò spiega il successo di tali leghe in molte applicazioni comuni.

Si riporta di seguito il comportamento di una lega a memoria di forma a tre differenti temperature:

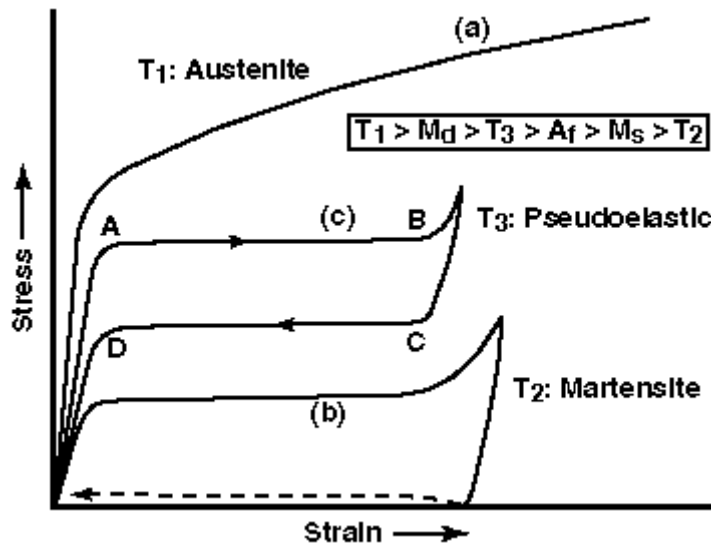


Fig.2.14: comportamenti differenti a tre differenti temperature

Come si nota dal grafico, a temperature superiori sia ad A_f che a M_d , il comportamento del materiale è dettato dalla presenza della fase austenitica, presentando un comportamento tipici degli acciai tradizionali.

Alle basse temperature, essendo in presenza della fase martensitica, il comportamento è tipico di una lega a memoria di forma ad una via, dove il recupero completo della deformazione residua è realizzato mediante un aumento di temperatura (effettuato tramite un riscaldamento o tramite passaggio di corrente).

A temperature intermedie si osserva il comportamento pseudoplastico, dove il recupero totale della deformazione avviene semplicemente togliendo il carico applicato.

2.2.5 Due esempi pratici [5]

Le trasformazioni di fase fra austenite e martensite sono la chiave per spiegare l'effetto memoria di forma e quello superelastico. Nel semplice caso di sforzo di trazione monoassiale, se ne dà nel seguito una breve spiegazione.

Per una migliore comprensione, viene riportato un diagramma (Fig.2.15) in cui sono rappresentate le trasformazioni di fase in funzione dello sforzo e della temperatura.

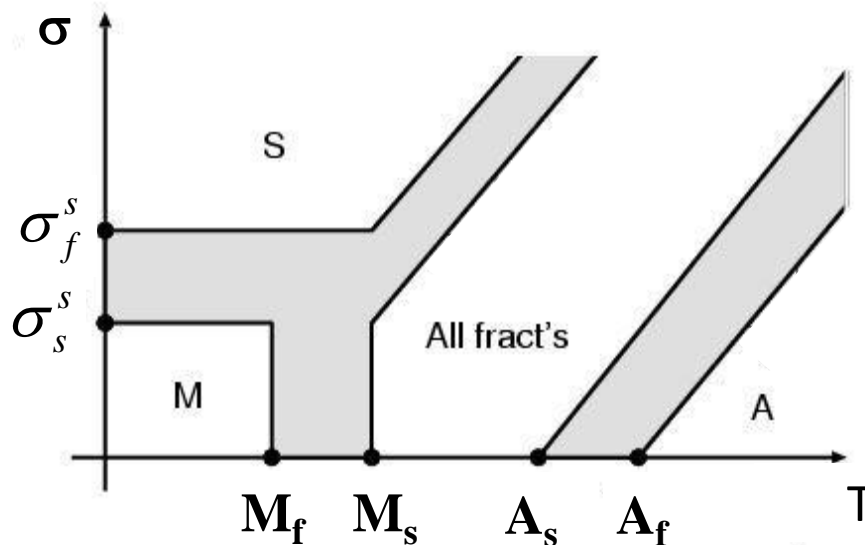


Fig.2.15: trasformazioni di fase in funzione dello sforzo e della temperatura

Dalle prove sperimentali si è potuto osservare che, per gran parte delle applicazioni, le zone in cui le transizioni di fase possono avvenire sono delimitate con buona approssimazione da rette (nel diagramma, le zone rimarcate).

La regione indicata con "M" rappresenta la zona di coesistenza della martensite twinned e detwinned.

Mentre in quella indicata con "S" è stabile la martensite detwinned ed infine, le zone di stabilità dell'austenite sono indicate con la lettera "A".

Nella zona centrale si ha la coesistenza di tutte e tre le differenti fasi.

Effetto memoria di forma

Si consideri un provino in fase martensitica e a temperatura inferiore a M_f ; quindi, a sforzo nullo solo la martensite è stabile o nella composizione twinned o in quella detwinned. Durante la fase di carico, il materiale ha un comportamento non lineare AB (Fig.2.16) dovuto alla conversione, indotta dallo sforzo, da martensite twinned in martensite detwinned. Durante la fase di scarico BC si manifesta una deformazione residua. La deformazione (apparentemente inelastica) può comunque essere recuperata (recupero della forma) scaldando il materiale a una temperatura superiore ad A_f , così da indurre una conversione da martensite in austenite. Infine, raffreddandosi, l'austenite si trasforma in martensite twinned.

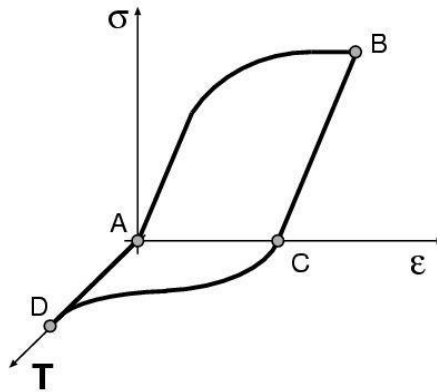


Fig.2.16: comportamento a memoria di forma in funzione di sforzo - deformazione - temperatura.

Un esempio pratico di questo meccanismo è illustrato in figura 2.17, in un filo di NiTi è stata memorizzata la forma di un piccolo gadget natalizio. Una volta deformato a temperatura ambiente esso recupera la forma memorizzata per semplice riscaldamento a circa 60°C.



Fig.2.17: effetto memoria di forma su un fili NiTi.

Effetto pseudoelastico

Si consideri un provino in fase austenitica a temperatura superiore ad A_f ; quindi, a sforzo nullo solo l'austenite è stabile. Se il provino è caricato, mantenendo la temperatura costante, il materiale presenta un comportamento non lineare ABC dovuto alla conversione indotta dallo sforzo, da austenite a martensite detwinned. Allo scarico, rappresentato dalla linea CDA, mantenendo ancora costante la temperatura, si ha una trasformazione inversa da martensite detwinned ad austenite, a seguito dell'instabilità della martensite a sforzo nullo. Alla fine del processo di carico e scarico non sono presenti deformazioni permanenti e il percorso sforzo-deformazione presenta un ciclo di isteresi.

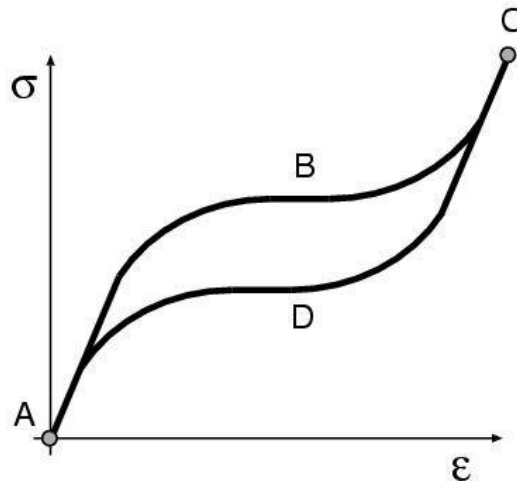


Fig.2.18: Effetto pseudoelastico

Anche in questo caso viene riportato un esempio di proprietà pseudoelastiche della lega NiTi (Fig.2.19). Un occhiale realizzato in lega a memoria di forma viene severamente deformato e recupera istantaneamente la forma iniziale all'atto della rimozione della sollecitazione.

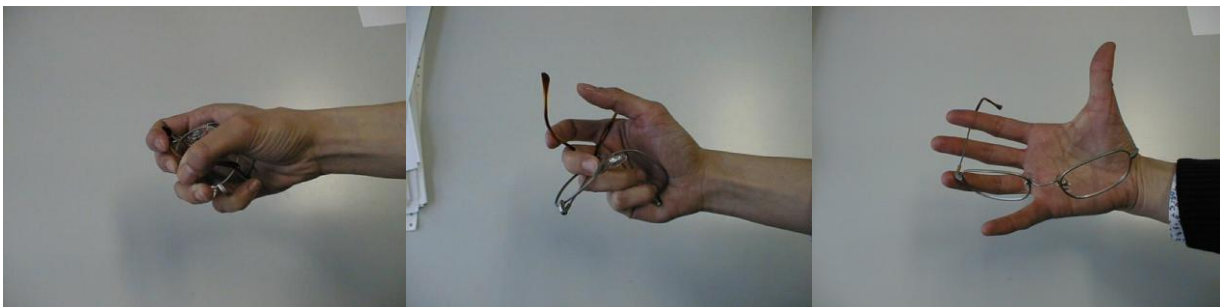


Fig.2.19: effetto pseudo elastico su un occhiale realizzato in lega a memoria di forma.

2.2.6 La transizione di fase R

È stata osservata per le leghe NiTi quasi equiatomiche un'inusuale trasformazione di fase dopo un trattamento di invecchiamento a bassa temperatura. Questa trasformazione è particolare in quanto si ottiene un materiale che quando viene riscaldato presenta martensite ed austenite, mentre quando viene raffreddato appare anche una terza fase chiamata fase *R* caratterizzata da un lieve aumento della resistività e da un'isteresi termica particolarmente ridotta.

Osservazioni sperimentali hanno dimostrato che questa trasformazione segue due strade distinte a seconda della percentuale di Ni presente:

- con la prima via seguita, verificata per una lega Ti-51,14 at % Ni, si ha la trasformazione da austenite a fase *R* ($A \rightarrow R$) seguita dalla formazione di due separate trasformazioni martensitiche dalla fase *R* ($R \rightarrow M_1$ e $R \rightarrow M_2$).
- la seconda via, verificata per una lega Ti-50,2 at % Ni con identico trattamento di invecchiamento, presenta una trasformazione parziale $A \rightarrow R$, seguita dalla trasformazione $R \rightarrow M_1$ in competizione con la trasformazione $A \rightarrow M_2$.

Ciò che accade, infatti, è che a seguito del trattamento di invecchiamento si ha la formazione di precipitati di Ni_4Ti_3 all'interno della matrice austenitica i quali generano sforzi che agiscono in modo resistente sulle deformazioni del reticolo cristallino, in particolare su quelle associate alla formazione di martensite.

Poiché gli sforzi di resistenza che si generano hanno maggior effetto sulle deformazioni legate alla trasformazione martensitica B19' (circa 10%) piuttosto che su quelle legate alla trasformazione di fase-R (1% circa), l'iniziale formazione di fase-R a partire da austenite può ridurre l'energia totale del sistema.

Per questo motivo la presenza di particelle favorisce la formazione di fase-R che diminuisce l'energia totale del sistema. Da come si può osservare nella Figura 2.19 le particelle di Ni_4Ti_3 fanno in modo che, in fase di raffreddamento da austenite, la prima curva che interseca quella dell'energia libera di Gibbs dell'austenite B2 sia quella della fase-R. Successivamente questa si trasforma in martensite poiché quest'ultima è una fase termodinamicamente più stabile.

In assenza di precipitati si nota poi che la fase B19' ha sempre energia libera di Gibbs minore a quella della fase-R ed è quindi la fase che minimizza tale energia, di conseguenza l'unica trasformazione possibile è quella da austenite B2 a martensite B19' a singolo step.

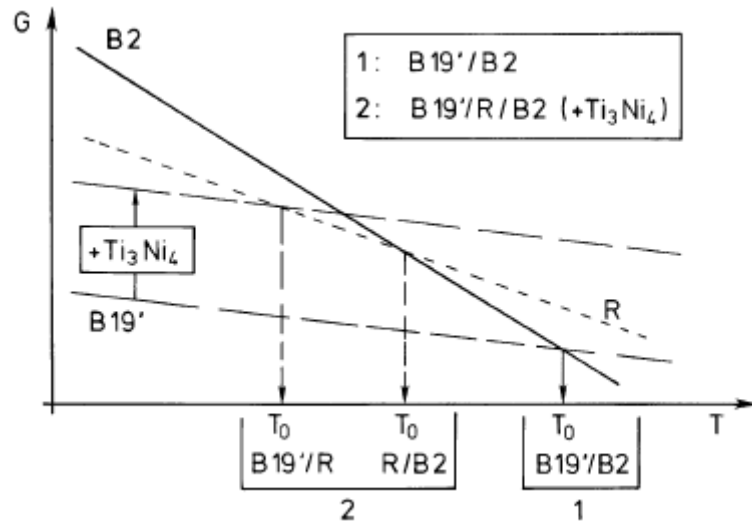


Fig.2.19: rappresentazione dell'energia libera di Gibbs in presenza o in assenza della fase R durante la trasformazione martensitica.

Quello che rende estremamente interessante questa trasformazione è il comportamento della lega sotto condizioni di carico ciclico. In particolare osservando la figura 2.20 riferita ad una lega Ti50Ni47Fe3, si osserva che la variazione dell'isteresi dopo 500.000 cicli termici è molto piccola.

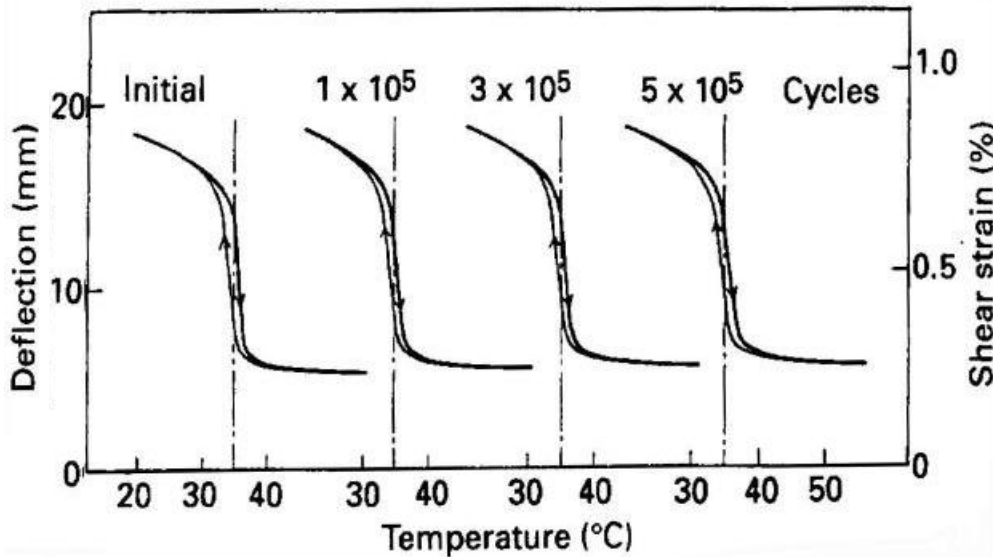


Fig.2.20: isteresi presentata dalla lega Ti50Ni47Fe3 in presenza della fase R.

Questo risultato indica che la stabilità dell'effetto memoria di forma della fase R è molto maggiore che quello della fase martensite, rendendo estremamente interessanti queste leghe per lo sviluppo di microattuatori termici.

2.2.6 Vita a fatica [8]

Un parametro fondamentale da tener presente durante la progettazione di un dispositivo che utilizza le leghe a memoria di forma è la vita a fatica.

Infatti, tali leghe, proprio grazie alle loro caratteristiche, vengono utilizzate per applicazioni cicliche e questo comporta l'affaticamento del filo e quindi la diminuzione delle proprietà meccaniche.

La vita a fatica dipende da molteplici fattori quali ad esempio il carico applicato, la deformazione imposta, la microstruttura (presenza o meno di precipitati) e anche, a differenza che dei comuni acciai, dal diametro del filo SMA.

Infatti, i risultati ottenuti da prove sperimentali condotte a carico e deformazione costante hanno dimostrato che la resistenza a fatica dei fili SMA aumenta al diminuire del diametro.

È possibile inoltre stimare il numero di cicli massimi in funzione dello sforzo e della deformazione imposta su un filo NiTiNOL (Fig.2.21).

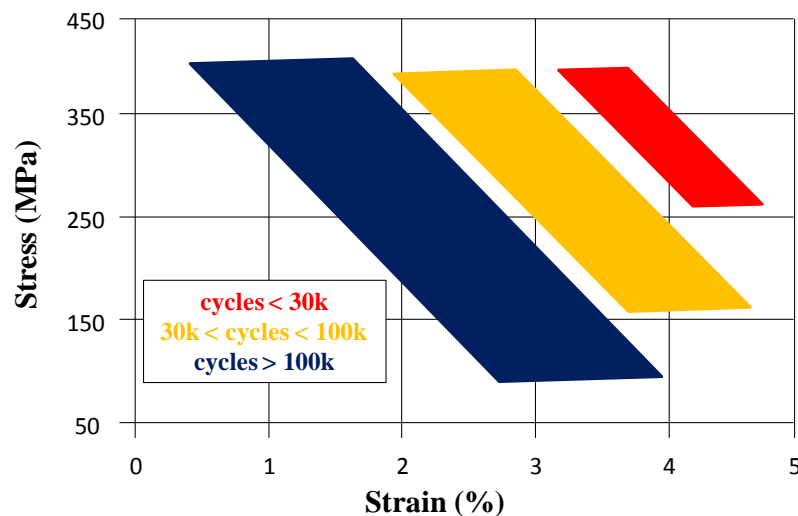


Fig.2.21: vita a fatica in funzione di sforzo e deformazione.

Ad ogni modo, nonostante siano state effettuate svariate prove a differenti condizioni operative, va riconosciuto il fatto che non è possibile fornire un'accurata stima della vita a fatica di un filo NiTiNOL; ogni prodotto, materiale e parametri di processo devono essere testati individualmente.

2.3 Trattamenti termici

Come per tutte le tipologie di metalli, molto importanti sono i trattamenti termici che vengono eseguiti al fine di conferire particolari proprietà al manufatto.

Esistono svariate tipologie di trattamenti termici come tempra, rinvenimento, ricottura ma per quanto riguarda l'applicazione alle leghe a memoria di forma si fa riferimento a due categorie principali.

Il primo trattamento riguarda il ciclaggio termico forzato della martensite per ottenere l'effetto *Two Ways Shape Memory Effect* e può essere applicato a tutte le leghe che presentano memoria di forma.

Il secondo trattamento termico considerato è l'invecchiamento per ottenere la transizione di fase *R*; è quindi un trattamento termico riservato unicamente alle leghe NiTi.

2.3.1 Ciclaggio termico forzato della martensite

Il trattamento termico principale di una lega a memoria di forma è il *ciclaggio termico forzato della martensite*. Questo trattamento, utilizzato per ottenere un effetto memoria a 'due vie', è un passaggio molto delicato che necessita solitamente di essere determinato sperimentalmente per ogni singolo pezzo.

Normalmente i pezzi vengono austenitizzati utilizzando temperature maggiori di 500 °C e tempi di circa cinque minuti in maniera da ottenere una fase omogenea; successivamente vengono raffreddati bruscamente tramite getti di aria fredda oppure in acqua vincolandoli in modo tale da mantenere la forma impartitagli. Questo brusco raffreddamento introduce stress termici molto elevati, soprattutto se il pezzo non è di piccole dimensioni, creando delle dislocazioni localizzate.

Grazie a questa localizzazione la martensite si formerà seguendo direzioni preferenziali. In questa maniera è possibile ottenere un effetto di memoria di forma anche nella trasformazione austenite - martensite.

Utilizzare tempi o temperature maggiori consente di ottenere temperature di trasformazione più alte e con uno sviluppo maggiore di forza; di contro si ha un netto abbattimento dell'abilità del pezzo di resistere a deformazione permanente.

Un'ultima peculiarità che è possibile osservare, è che queste leghe impiegano parecchio tempo a raggiungere la temperatura di processo desiderata, specialmente se il trattamento avviene in un forno ad aria. La forma e le proprietà desiderate vengono impartite alla lega

soprattutto dal tempo che questa rimane alla temperatura massima; con pezzi di grosse dimensioni bisogna quindi riscaldare molto lentamente per evitare di avere un materiale con proprietà non omogenee.

2.3.2 Effetto dell'invecchiamento sulla fase R

Per studiare l'effetto dell'invecchiamento sulla fase R vengono analizzate le curve (Fig.2.22) ottenute tramite DSC (calorimetria differenziale a scansione) per una lega Ti-50,2at%Ni, che ha subito uno specifico trattamento termico di invecchiamento a 598 K per tempi diversi.

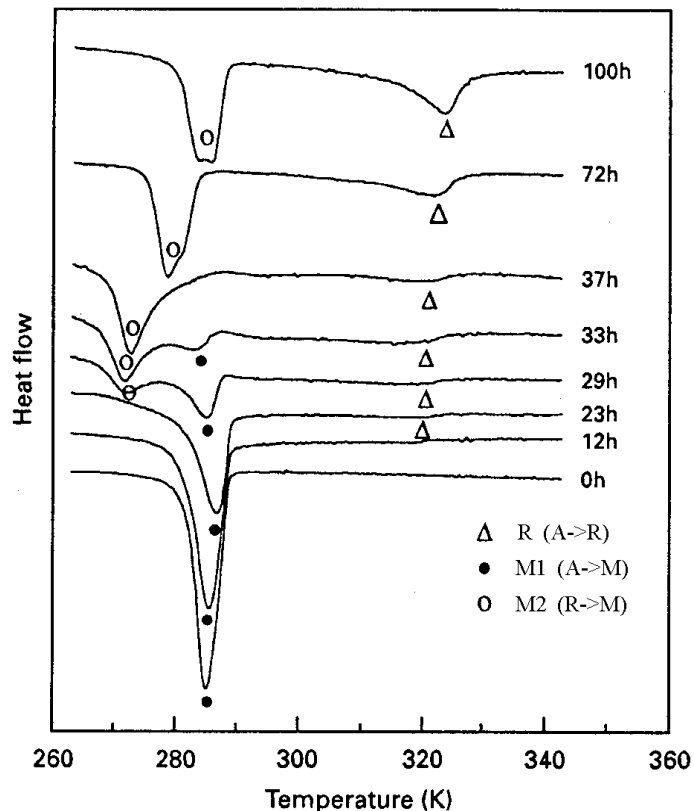


Fig.2.22: analisi tramite DSC di una lega Ti-50,2at%Ni dopo invecchiamento a 598 K per i tempi riportati.

Con l'aumento dei tempi di invecchiamento, la trasformazione al raffreddamento passa dalla trasformazione singola $A \rightarrow M$ alla trasformazione complessa $A \rightarrow R \rightarrow M$. Per tempi di invecchiamento intermedi si comincia a notare l'esistenza della trasformazione di una seconda martensite M_2 , che aumenta con l'invecchiamento alle spese della martensite M_1 . La presenza di questa seconda martensite è legata all'apparire della fase R.

In figura 2.23 vengono mostrati gli effetti della temperatura di invecchiamento sulle temperature di trasformazione.

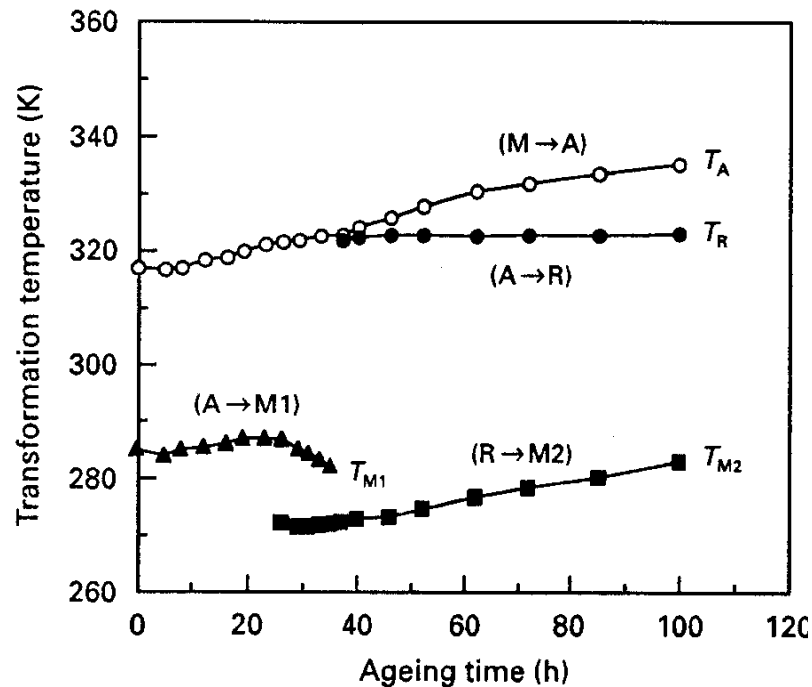


Fig.2.23: effetti della temperatura di invecchiamento sulle temperature di trasformazione.

Si può notare che la temperatura della trasformazione $M \rightarrow A$ aumenta in maniera lineare con il tempo. La fase R emerge ad una temperatura di 321 K dopo 23 ore di invecchiamento; è quindi evidente che la transizione di fase R è in competizione con la trasformazione martensitica. Per sfruttare al meglio l'effetto memoria di forma di una o dell'altra è necessario quindi sottoporre il materiale ad un adeguato trattamento termico.

In particolare, per inibire la trasformazione martensitica ed ottimizzare la transizione di fase R è consigliabile un trattamento di precipitazione ed invecchiamento ad una temperatura tra i 400 e 500 °C con tempi abbastanza lunghi.

È possibile altrimenti impedire la trasformazione in martensite introducendo una certa difettosità nel reticolo cristallino. Questo si può fare attraverso l'aggiunta di un terzo elemento in lega, ad esempio Fe o Al, oppure tramite una lavorazione a freddo e ricottura a 400 °C.

2.4 Misura delle temperature di trasformazione

Per l'utilizzo delle leghe a memoria di forma il conoscere le temperature di trasformazione, dette anche TTRs, è fondamentale.

Le TTRs sono le temperature alle quali la lega subisce il cambiamento di fase da austenite a martensite e viceversa. Ci sono svariati metodi per determinare queste temperature, ma i più usati, soprattutto per le leghe NiTi, sono:

- deformazione a carico costante,
- DSC,
- A_F attiva.

Nel caso di *deformazione a carico costante* si applica un carico al sistema e si misura contemporaneamente la deformazione e il ritorno di forma in funzione della temperatura quando il materiale è raffreddato e riscaldato nell'intervallo delle TTRs.

Ad esempio in figura 2.24 è rappresentato l'allungamento e la contrazione di un provino a memoria di forma che viene prima raffreddato e successivamente riscaldato e a cui è applicato un carico di trazione costante.

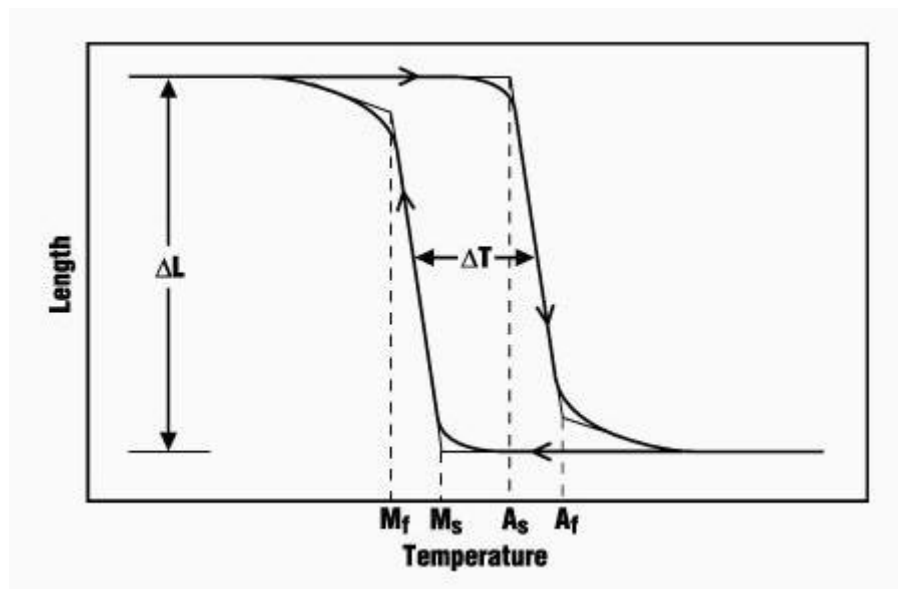


Fig.2.24: Trasformazione tipica in funzione della temperatura di un campione sottoposto a carico costante durante un ciclo di raffreddamento e riscaldamento.

Il carico applicato è studiato in modo che sia simile a quello che sarà applicato al pezzo una volta in opera. Calcolando le tangenti alle linee dell'isteresi si possono così definire le temperature di inizio e fine trasformazione martensitica ed inizio e fine trasformazione austenitica.

Bisogna tenere in considerazione che le temperature trovate attraverso questo metodo dipendono dal livello di carico applicato.

Per riuscire a determinare le TTRs senza carichi applicati, bisogna ottenere più curve tipo quella di Figura 2.24 a vari livelli di carico e riportare le temperature di interesse e lo sforzo applicato in un grafico. Si può in questo modo estrapolare le varie temperature di trasformazione con un carico nullo.

Il test di deformazione a carico costante appena analizzato, è usato generalmente per le applicazioni che utilizzano la memoria di forma mentre, per studiare la superelasticità, si preferisce utilizzare metodi più precisi come ad esempio la *calorimetria differenziata* o DSC (Differential Scanning Calorimeter).

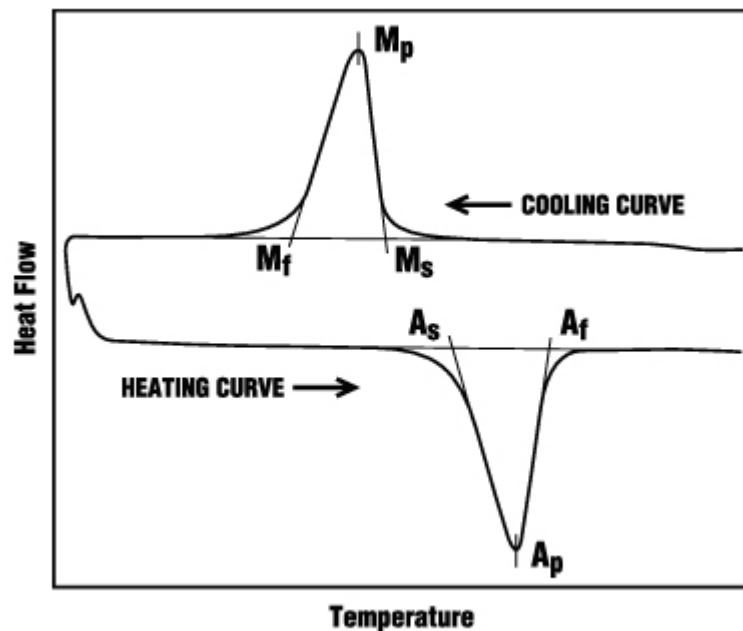


Fig.2.25: calcolo delle TTRs attraverso il DSC.

Attraverso il DSC si misura la quantità di energia che viene rilasciata o assorbita da un campione raffreddato e riscaldato nell'intervallo delle temperature di trasformazione. Per studiare un materiale si prepara un campione di partenza sottoponendolo ad un trattamento di ricottura completa a circa $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ in modo che non siano presenti tensioni interne.

Viene poi eseguito un ciclo termico di raffreddamento e riscaldamento, tipicamente con una velocità di 20°C al minuto, e viene misurata la variazione del calore specifico C_p . Si identifica un picco al raffreddamento alla temperatura M_p , mentre quando si riscalda si trova un altro picco alla temperatura A_p .

Tracciando poi le tangenti come da figura 2.25 si calcolano le TTRs.

Un importante inconveniente dello studio tramite DSC è che questo metodo porta a pochi risultati se viene compiuto su un campione parzialmente trasformato.

Questo è molto importante perché molte volte per ottimizzare la superelasticità si preferisce non avere 100% martensite ma avere anche una percentuale di austenite. Lo stesso inconveniente si ha nel caso in cui si vuole studiare un materiale che sia stato trattato termicamente in un intervallo di temperature tra i 400 e i 600 °C.

L'analisi tramite DSC implica una ricottura completa e viene compiuta spesso sul materiale grezzo per distinguere le proprietà di base dei materiali senza che queste siano state modificate da trattamenti termici o da lavorazioni a freddo.

Per i materiali che hanno subito lavorazioni è necessario fare allora uno studio detto A_f attiva, ossia vedere come varia A_f applicando carichi costanti.

Quest'analisi, che è chiamata anche test di 'bagno in acqua' oppure di 'bagno in alcool' a seconda di dove viene effettuata, è condotta semplicemente incurvando un filo di campione della lega ad una temperatura minore di M_s e misurando il ritorno di forma quando viene riscaldato. Ad esempio se il filo è piegato con la semplice pressione delle dita a formare un angolo di 180°, prendendo quindi una forma tipo 'molletta', e successivamente immerso in un bagno di temperatura nota, l'effetto memoria di forma tenderà a raddrizzare nuovamente il filo.

Si misura quindi l'angolo che viene recuperato per quella determinata temperatura e si formano dei grafici tipo in figura 2.26.

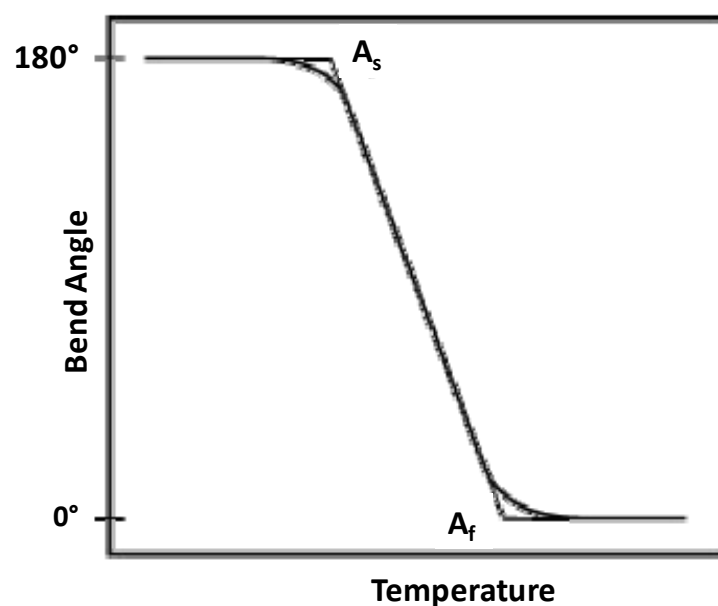


Fig.2.26: analisi delle TTRs attraverso il metodo A_f attiva

Si vede che il recupero totale dell'angolo di curvatura si ottiene quando la temperatura del bagno è pari ad A_f . Per non introdurre dislocazioni è importante che il raggio di curvatura del filo quando viene piegato di 180° , sia maggiore di 10 volte il diametro del filo. Questo metodo, che non richiede apparecchiature particolarmente complicate e costose, si rivela sorprendentemente accurato; bisogna considerare però che per analizzare una lega superelastica sia necessario partire da temperature attorno ai -50°C .

Esistono altri metodi per misurare le TTRs, ad esempio considerando la variazione di resistività, ma i risultati così ottenuti hanno una precisione inferiore di quelli ottenuti utilizzando i metodi sopra descritti.

2.5 Leghe a memoria di forma di utilizzo commerciale

Le uniche due leghe che hanno raggiunto un certo successo commerciale sono le leghe Ni-Ti e quelle a base di rame. Le proprietà di questi due gruppi sono molto differenti.

Le leghe Ni-Ti hanno deformazioni recuperabili dall'effetto di memoria di forma maggiori, nell'ordine dell'8% rispetto al 4-5% di quelle a base rame, possiedono un'eccellente resistenza alla corrosione ed alla stress corrosion ed infine hanno una più alta duttilità.

Dal canto loro, le leghe a base di rame sono più economiche, possono essere fuse ed estruse in aria più facilmente e possiedono un range più ampio di potenziali temperature di trasformazione.

I due sistemi di leghe presentano quindi vantaggi e svantaggi che devono essere valutati attentamente nella fase di un'eventuale applicazione all'interno di un progetto.

2.5.1 Leghe Ni-Ti

La base del sistema di leghe del nichel-titanio sta nel composto intermetallico binario ed equiatomico NiTi. Questo composto intermetallico mostra un moderato range di solubilità verso eccessi di nichel o titanio, così come verso la maggior parte degli altri elementi metallici, ed inoltre esibisce una duttilità comparabile a quella delle leghe più comuni. Questa solubilità permette di aggiungere in lega molti elementi, al fine di modificare sia le caratteristiche meccaniche che le proprietà della trasformazione martensitica.

Un eccesso di nichel, nell'ordine dell'1%, è l'aggiunta in lega più comune ed ha l'effetto di far calare notevolmente il range di temperature di trasformazione e di incrementare la resistenza a snervamento dell'austenite.

Altri elementi usati di frequente sono il ferro ed il cromo, per abbassare la temperatura di trasformazione e per favorire la transizione di fase *R*, ed il rame per diminuire l'isteresi e lo sforzo necessario per deformare la martensite.

Siccome elementi contaminanti comuni, come l'ossigeno ed il carbonio, possono variare le temperature di transizione e peggiorare le proprietà meccaniche, si deve minimizzare la loro presenza.

Le principali proprietà fisiche del sistema binario NiTi ed alcune caratteristiche meccaniche della lega allo stato ricotto sono mostrate nella tabella 2.3. Si noti che questi valori si riferiscono alla lega equiatomica con un valore di A_f pari circa a 100 °C.

Tabella 2.3: caratteristiche meccaniche della lega Ni-Ti

Temperatura di fusione		1300	°C
Densità		6,45	g/cm ³
Resistività	Austenite	100	μΩ*cm
	Martensite	70	
Conducibilità termica	Austenite	18	W*cm*°C
	Martensite	8,5	
Calore latente		167	KJ/Kg*atoms
Modulo di young	Austenite	83	GPa
	Martensite	28	
Yield Strength	Austenite	da 195 a 690	MPa
	Martensite	da 70 a 140	
Ultimate Tensile Strength		895	MPa
Resistenza alla corrosione		Simile agli acciai inossidabili della serie 300 o alle leghe di titanio	
Temperature di trasformazione		da -200 a 110	°C
Shape memory strain		max 8,5	%

Un indurimento per deformazione selettiva ed un opportuno trattamento termico, possono migliorare di molto la facilità con cui si può deformare la martensite, portando ad un'austenite molto più tenace e creando un materiale con caratteristiche di memoria di forma a due vie. Lo sviluppo di queste procedure, al fine di ottenere le proprietà desiderate, rappresenta la possibilità di un maggior successo per questa famiglia di materiali.

A causa della reattività del titanio in queste leghe, la fusione deve sempre avvenire sotto vuoto o in atmosfera inerte.

Dopo la fusione dei lingotti, per una prima fase di lavorazione, possono essere usati i tipici metodi di lavorazione a caldo come la forgiatura, la laminazione o l'estrusione. Le leghe reagiscono lentamente con l'aria, cosicché le lavorazioni a caldo si possono fare con successo in atmosfera normale.

Queste leghe possono essere sottoposte anche alla maggior parte delle lavorazioni a freddo, tuttavia incrudiscono molto rapidamente e sono quindi necessarie frequenti ricotture. La filatura è probabilmente la tecnica più usata, e si riescono ad ottenere comunemente diametri fino a 76 μm con eccellenti proprietà superficiali.

La fabbricazione di articoli in NiTi si può fare prestando però una certa attenzione, infatti, alcuni processi comuni diventano particolarmente difficoltosi. Le lavorazioni alla macchina utensile, come la fresatura o la tornitura, risultano molto difficili se non con attrezzi speciali e molta esperienza. Anche i vari metodi di saldatura sono particolarmente difficoltosi. Tuttavia il materiale risponde bene alla rimozione per abrasione, come la molatura, ed inoltre si riesce a tagliare con la cesoia a patto di mantenere sezioni piccole.

2.5.2 Leghe a base Rame

Sono disponibili come leghe ternarie CuZnAl e CuAlNi, o nelle loro varianti quaternarie con l'aggiunta di manganese. Elementi come boro, cerio, cobalto, ferro, titanio, vanadio e zirconio sono generalmente aggiunti per affinare la grana. Le proprietà principali sono elencate nella tabella 2.4.

Tabella 2.4: proprietà meccaniche delle leghe a base di Rame

	CuZnAl	CuAlNi	
Temperatura di fusione	950-1020	1000-1050	°C
Densità	7,64	7,12	g/cm^3
Resistività	8.5 to 9.7	11 to 13	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$
Conducibilità termica	120	30 to 43	$\text{W}\cdot\text{cm}^{\circ}\text{C}$
Capacità termica	400	373 to 574	$\text{KJ/Kg}\cdot\text{atoms}$
Modulo di young	72 (fase β)	85 (fase β)	GPa
	80 (martensite)	80 (martensite)	
Yield Strength	350 (fase β)	400 (fase β)	MPa
	80 (martensite)	130 (martensite)	
Ultimate Tensile Strength	600	500 to 800	MPa
Temperature di trasformazione	< 120	< 200	°C
Shape memory strain	4	4	%

La fusione delle SMAs a base rame viene fatta per induzione. Sono necessari un flusso protettivo di azoto o gas inerti sul fuso, specialmente durante la colata, per prevenire l'evaporazione dello zinco e l'ossidazione dell'alluminio.

Sono inoltre usate procedure di rapida solidificazione per produrre leghe a grana fine, evitando così l'utilizzo di affinatori. Queste leghe possono essere lavorate a caldo, in aria, senza problemi.

Le leghe CuZnAl contenenti un basso tenore di alluminio (meno del 6% in peso) possono sottostare alle lavorazioni finali a freddo intervallate da procedimenti di ricottura; passando invece a tenori d'alluminio più elevati non si riesce a lavorarle a freddo facilmente.

Le leghe CuAlNi sono invece fragili a basse temperature e possono essere lavorate solo a caldo, anche nelle ultime fasi.

L'aggiunta di manganese diminuisce le temperature di trasformazione sia per CuZnAl che per CuAlNi, e spesso viene sostituito all'alluminio per migliorare la duttilità.

Siccome le SMAs a base rame sono metastabili a temperatura ambiente a causa della presenza della fase β (la fase stabile ad alta temperatura), si rende necessario un trattamento termico di solubilizzazione ad alta temperatura e un conseguente raffreddamento controllato al fine di riuscire ad avere fase β ritenuta per gli effetti di memoria di forma. Tuttavia è deleterio prolungare troppo questi trattamenti ad alte temperature perché possono causare la precipitazione a bordo grano dello zinco ed anche l'ingrossamento del grano.

La tempra in acqua è generalmente usata per contenuti elevati di alluminio mentre può essere sufficiente un semplice raffreddamento in aria sia per CuZnAl che per CuAlNi.

E' necessario inoltre un trattamento di invecchiamento, dopo tempra, a temperature superiori ai normali valori di A_f , al fine di rendere stabili i valori delle temperature di trasformazione, le quali dopo la tempra risultano di solito instabili.

La stabilità termica delle leghe a base rame è infine limitata dalla cinetica di decomposizione. Per questa ragione devono essere evitate esposizioni prolungate di CuZnAl e CuAlNi a temperature rispettivamente superiori ai 150°C e 200°C. Persino procedure di invecchiamento a temperature inferiori possono causare variazioni ai valori delle temperature di trasformazione.

Comunque la lega CuAlNi ha una stabilità maggiore della CuZnAl se esposta ad alte temperature. Indispensabile quindi tenere presenti questi effetti, in fase di progettazione e di scelta della lega, specialmente se è richiesta una notevole precisione e stabilità alle temperature di transizione.

2.6 Applicazioni commerciali

Le applicazioni delle leghe a memoria di forma sono ormai presenti nei campi più diversificati: dalle connessioni nei circuiti idraulici degli aerei, ai dispositivi di fissaggio dei circuiti stampati, agli interruttori elettrici in dispositivi di sicurezza, ai sensori e/o attuatori.

Non ultime, tutte le applicazioni in campo biomedicale, dagli impianti dentali e ortopedici alla strumentazione biomedicale.

Si citano qui di seguito le applicazioni più consolidate, distinguendo quelle che sfruttano l'effetto memoria di forma, catalogate sotto le dizioni recupero vincolato e attuatori, da quelle che sfruttano la superelasticità.

2.6.1 Recupero vincolato

In questo tipo di applicazioni viene sfruttata la capacità dei materiali a memoria di forma di generare una forza di notevole intensità quando il ritorno alla forma ad alta temperatura e' meccanicamente impedito.

Il giunto viene realizzato con dimensioni tali da presentare, quando si trova nella forma ad alta temperatura, una adeguata interferenza con le parti da fissare.



Fig.2.27: anelli di giuntura

Per consentire il montaggio, il giunto viene portato nella fase martensitica mediante refrigerazione e dilatato opportunamente. Una volta montato, il giunto viene lasciato ritornare

alla temperatura ambiente; in tal modo ha luogo la trasformazione di fase ed il giunto tende a ritornare alla forma ad alta temperatura; dato che questo recupero è impedito dalla interferenza con le parti da fissare, viene generata una tensione che realizza l'azione di fissaggio.

La principale differenza dei giunti in SMA rispetto a quelli convenzionali è rappresentata dal persistere dell'azione attiva di serraggio anche dopo la messa in opera.

Naturalmente la temperatura di transizione della lega utilizzata deve risultare inferiore a quella minima di impiego previsto, per evitare che, a bassa temperatura, possa verificarsi un indesiderato allentamento del giunto.

Questo tipo di giunti è utilizzato da tempo, ad esempio, nell'industria aerospaziale per l'accoppiamento di tubi di impianti idraulici; la diffusione è limitata prevalentemente dal costo elevato e dai limiti del campo termico ammesso (tipicamente da -20°C a $+200^{\circ}\text{C}$).

Fili sottili di Nitinol possono poi essere intrecciati per formare dei cilindri a maglie che possono essere utilizzati in vari modi.

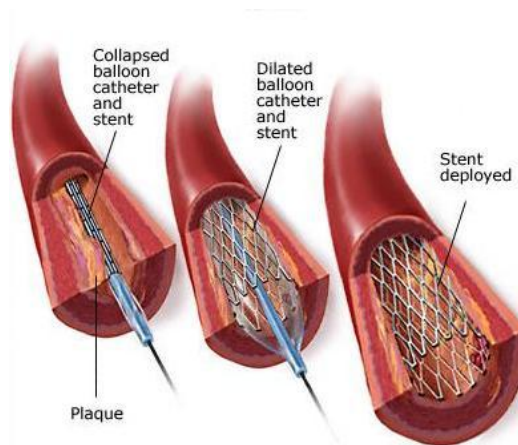


Fig.2.28: stent per applicazioni biomediche

Uno molto importante è in campo medico, per la produzione di stent. In questo caso il cilindro ha la funzione di rinforzo di vene ed arterie; lo stent è raffreddato e portato in forma compressa in modo da ridurre le dimensioni e renderne possibile l'inserimento in posizione mediante catetere; una volta rilasciato, per effetto della temperatura corporea, lo stent si espande applicando in modo progressivo una forza radiale sulla parete del vaso.

Il Nitinol, in campo medico, può essere utilizzato anche per la costruzione di ancore di suture utilizzate per la frattura delle ossa.

2.6.2 Attuatori [4]

L'uso di attuatori in leghe a memoria di forma è sempre stato ritenuto il mercato più interessante.

Una molla a memoria di forma può essere attuata termicamente o elettricamente (riscaldamento per effetto Joule), consentendo l'azionamento di un dispositivo.

Gli attuatori elettrici hanno un grande potenziale nelle applicazioni in robotica, come ad esempio nella mano artificiale.

Gli attuatori termici hanno sinora avuto molto più successo degli attuatori elettrici: un esempio è il caso di un sistema di protezione termica per i rubinetti dotati di filtro. E' risaputo che questi elementi filtranti vengono notevolmente danneggiati se esposti ad acqua ad alta temperatura; ecco allora che un sistema come in figura 2.29 protegge il filtro.

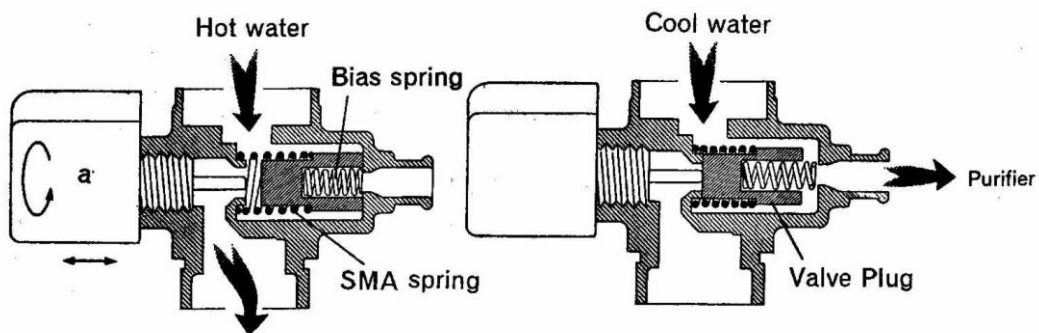


Fig.2.29: quando l'acqua calda vuole passare per il filtro, essa riscalda la molla in SMA che chiude l'entrata dell'acqua nel filtro a destra; viceversa nel caso dell'acqua fredda. Nel caso in cui si voglia che l'acqua non passi nel filtro è sufficiente girare la manopola (a) per disattivare la SMA.

Un altro esempio di dispositivo molla-contromolla dove vengono applicate le leghe a memoria di forma, riguarda l'azionamento di deflettori nei condizionatori: a seconda della temperatura dell'aria in uscita, le molle muovono i flap per indirizzarne il flusso.

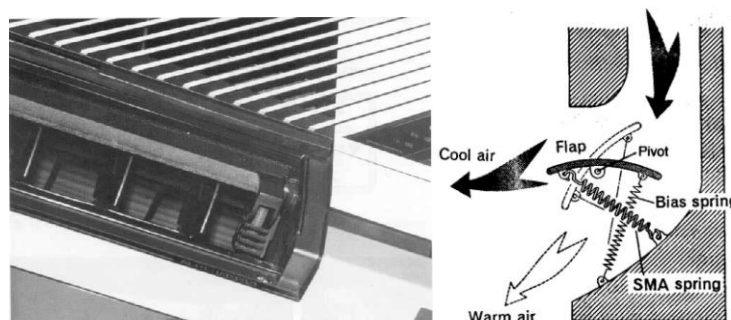


Fig.2.30: applicazione delle leghe SMA come attuatori nel caso di deflettori per condizionatori.

L'uso di attuatori a memoria di forma può talvolta semplificare un meccanismo o un dispositivo, riducendo il numero di pezzi complessivo, aumentando l'affidabilità e quindi riducendo i costi associati.

Tra i principali vantaggi presentati dagli attuatori basati sull'impiego di elementi a memoria di forma si possono citare:

- Semplicità del meccanismo: il dispositivo può essere progettato in modo da sviluppare direttamente l'azione richiesta, senza richiedere elementi di trasmissione e collegamento.
- Funzionamento senza attrito, pulito, silenzioso, e senza generazione di scintille: gli attuatori a memoria di forma non richiedono l'uso di componenti ausiliari basati su fenomeni di attrito (ad es. ingranaggi), e quindi escludono la generazione di polveri, inoltre permettono un funzionamento silenzioso e senza vibrazioni; l'assenza della possibilità di generazione di scintille li rende adatti all'impiego in presenza di sostanze infiammabili.
- Elevato rapporto potenza/peso: soprattutto per attuatori di piccole dimensioni e pesi (<100g).

Per conto le principali limitazioni degli attuatori a memoria di forma risultano:

- Bassa efficienza energetica: l'efficienza energetica degli attuatori a memoria di forma risulta fortemente dipendente dalla configurazione adottata e dal tipo di deformazione utilizzata; il caso più favorevole si ha con elementi filiformi caricati a tensione, in quanto questa configurazione consente un ottimale utilizzo del materiale che opera in condizioni di sollecitazione uniformi.
Configurazioni che ingenerano una distribuzione dello stress non uniforme realizzano un peggiore utilizzo del materiale e quindi risultano meno efficienti.
- Limitata banda passante (di attuazione): questa limitazione deriva principalmente dalla durata della fase di raffreddamento, infatti, mentre il riscaldamento può essere ottenuto in modo abbastanza rapido, ad esempio applicando una corrente elettrica al materiale, il raffreddamento è limitato dalle capacità di smaltire il calore nell'ambiente, generalmente per conduzione e convezione.
- Deterioramento e fatica: l'applicazione di sollecitazioni di elevata entità e di deformazioni di elevata ampiezza possono generare alterazioni nella struttura cristallina; quindi, dove sia richiesto poter realizzare un numero elevato di cicli, risulta necessario operare con livelli di deformazione e sollecitazione ridotti.

Sono stati inoltre messi a punto dei processi per produrre film sottili di NiTi. Utilizzando la tecnica dello sputtering è possibile depositare un film di lega Nickel-Titanio su una varietà di substrati e con un'ampia gamma di spessori, da 0,2 a 50 micron. Lo strato risultante, una volta staccato dal supporto, presenta la stessa caratteristica di memoria di forma del Nitinol massivo. Il film può essere usato come attuatore e mostra una velocità di raffreddamento molto alta avendo un'ampia superficie di scambio ed uno spessore sottile; è interessante quindi il suo utilizzo nei meccanismi di precisione, ad esempio microattuatori, valvole, interruttori e sistemi integrati elettromeccanici.

2.6.3 Applicazioni della superelasticità

Le applicazioni di maggiore successo della superelasticità sono quelle in cui la temperatura è ben controllata: tra queste, l'utilizzo di fili Nitinol in campo ortodontico ha aperto strade del tutto nuove nella terapia ortodontica.

Il vantaggio rispetto all'uso di fili in acciaio inossidabile è costituito dal fatto che, dopo una deflessione iniziale imposta, essi ritornano alla configurazione di partenza, esercitando una forza continua e leggera, la cui entità è controllabile a priori. Ciò si traduce in un minor disagio per il paziente, in uno spostamento dentario più efficace, con risparmio di sedute di controllo e anche di materiale.

Nella strumentazione biomedicale, un filo di NiTi superelastico a temperatura corporea è utilizzato come sonda guida cateteri (Fig.2.31) per la sua flessibilità ed elevata resistenza a subire piegature che consentono enormi vantaggi rispetto a fili in acciaio inossidabile.

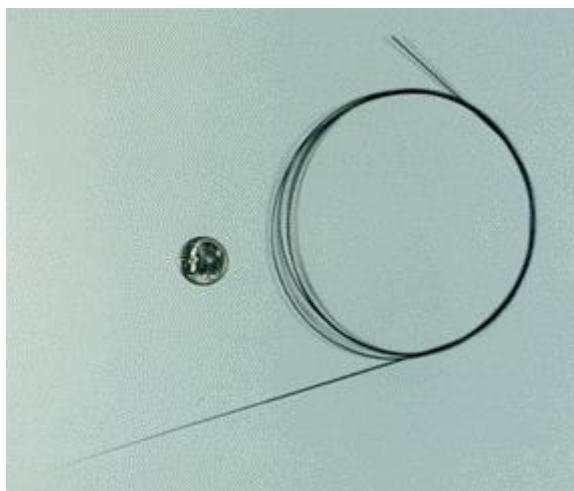


Fig.2.31: applicazione biomedicale del filo SMA come sonda guida cateteri.

Un campo in rapida crescita è quello della strumentazione chirurgica non invasiva, che utilizza le proprietà superelastiche di NiTi: sono state realizzate sonde di localizzazione e prelievo di tessuti, anche seguendo cammini complessi.

Un altro esempio in cui le proprietà di superelasticità trovano impiego, è nella produzione di montature di occhiali, garantendo comfort e durabilità.

Progetto preliminare

Dopo una breve ma dettagliata introduzione sulle caratteristiche e sulle peculiarità delle leghe a memoria di forma, atte a fornire al lettore una maggiore comprensione del presente lavoro di tesi e una panoramica sintetica relativa ai differenti sistemi bloccoporta commercializzati, in questo capitolo ci si propone di trattare e di spiegare molto accuratamente il progetto preso in considerazione in questo lavoro di tesi che ha come obiettivo l'applicazione del NiTiNOL a sistemi di chiusura applicato a bloccoporta per lavabiancheria.

Diverse sono state le idee che giorno dopo giorno sono nate, alcune più semplici e altre più complesse, molte delle quali sono state tuttavia abbandonate in corso d'opera, alcune per ragioni progettuali, legate a un'ambizione quasi surreale o quantomeno poco praticabile nell'ambito in oggetto, altre sia per motivi di produzione che di sicurezza e normative.

Infatti, a differenza di quanto possa sembrare, nella progettazione di un bloccoporta sono numerose le variabili da prendere in considerazione e alcune delle quali discordanti tra loro,

obbligando quindi pensieri ed energie a incanalarsi nella consueta direzione del compromesso.

Tutto questo va poi racchiuso e contenuto nel capostipite degli obiettivi di qualunque progetto, quello che determina e che comanda ogni singola novità e innovazione: il costo.

Sarebbe infatti alquanto inutile insistere su un progetto che porterebbe ad avere un prodotto più costoso dei precedenti, anche se si potesse considerare il più innovativo fra tutti.

Trattandosi però di un'applicazione totalmente innovativa (ci si è infatti occupati per la prima volta di dispositivi che vedono il NiTiNOL applicato a sistemi di sicurezza per lavabiancheria), l'obiettivo primario è stato quello di realizzare un sistema funzionante da un punto di vista meccanico, dal quale poi si potesse successivamente sviluppare un prodotto conforme alle normative e alle esigenze di ogni cliente.

Di seguito si ripropone l'evolversi dei passaggi che hanno portato alla realizzazione del primo prototipo di bloccoporta con la tecnologia del filo a memoria di forma.

3.1 Nascita ed evoluzione del progetto

Nella Figura 3.1 è riportata la bozza sulla quale è stata concepita la prima idea di un bloccoporta con la tecnologia SMA.

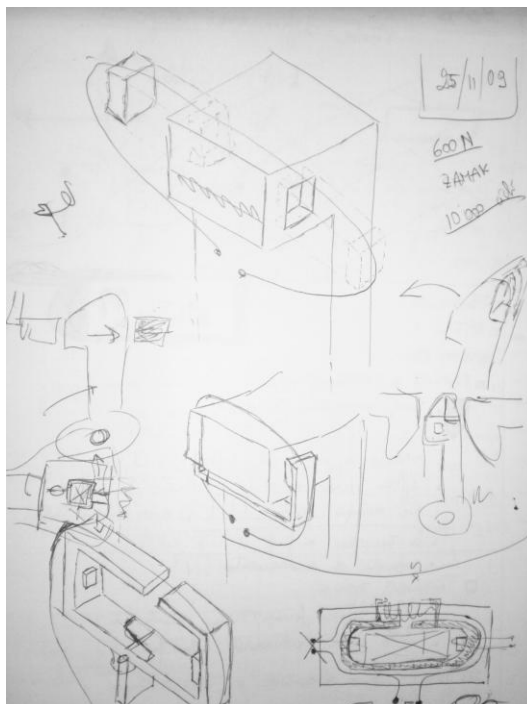


Fig.3.1: immagine del foglio che rappresenta la prima bozza dei quello che sarebbe stato il bloccoporta SMA.

Si trattava semplicemente di una sorta di ghiera rettangolare aperta, avvolta dal filo a memoria di forma. Quest'ultimo, una volta attivato, accorciandosi portava due chiavistelli in corrispondenza di due cave presenti sul gancio dell'oblò impedendone il movimento.

Risulta evidente che un sistema del genere avrebbe comportato la modifica del gancio dell'oblò, cosa che le case costruttrici di lavabiancheria non avrebbero accettato.

Ma la cosa più importante che questa prima bozza rappresentava, è stata l'idea: infatti, è proprio da questa intuizione che si è arrivati poi a sviluppare il sistema di cui si è anche realizzato il primo prototipo, il sistema a ganasce (vedi di seguito).

I bloccoporta attuali si basano tutti sul movimento lineare di un cursore, causato dal gancio dell'oblò, con un foro che si colloca in corrispondenza del punto in cui, grazie all'attivazione del frutto del bloccoporta, vi è la fuoriuscita di un chiavistello che impedisce il movimento del cursore stesso (Fig.3.2).

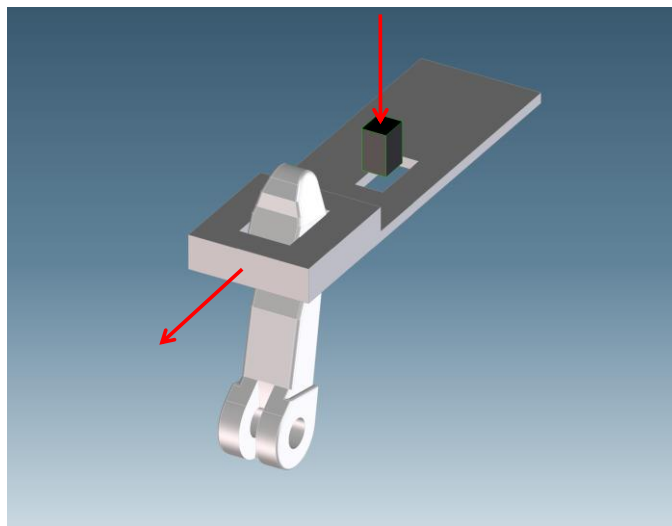


Fig.3.2: rappresentazione schematica del funzionamento degli attuali bloccoporta.

Con il sistema a doppia ganasce si è cercato di rivoluzionare il meccanismo a cursore, introducendo l'idea di impedire il movimento direttamente dal retro del gancio.

Una prima bozza di questa tipologia di dispositivo comprendeva i seguenti componenti (Fig.3.3):

- Due ganasce (destra e sinistra) fissate nel loro centro di rotazione
- Sistema a camma per il “bloccaggio” meccanico delle ganasce
- Una molla che apre le ganasce una volta sbloccate
- Un sistema di ancoraggio SMA
- Una contro-molla che riporta la SMA nella posizione iniziale.

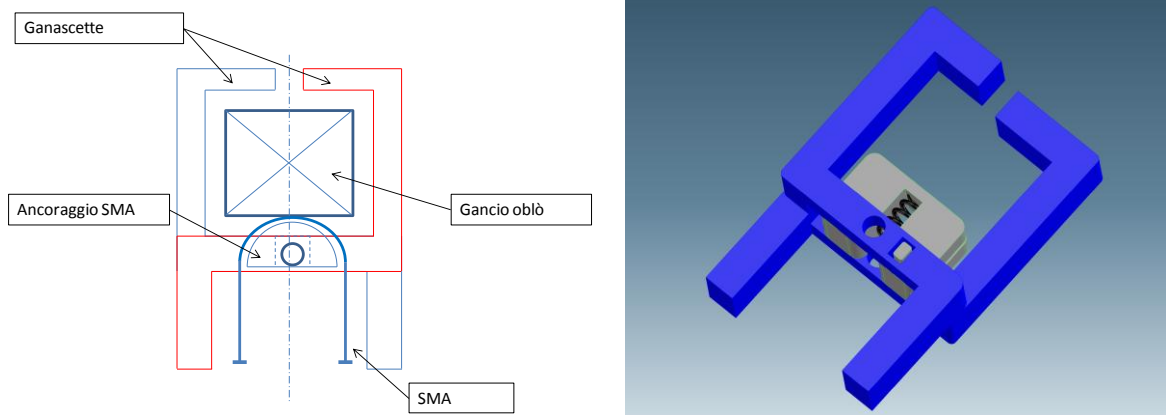


Fig.3.3: vista dall'alto semplificata del sistema a doppia ganascia nella configurazione di blocco porta attivo.

Il principio del funzionamento meccanico è molto semplice: una volta che l'oblò viene chiuso, il gancio entra tra le due ganascie ancora aperte. Attivando il filo SMA, queste si chiudono impedendo al gancio di sfilarsi e quindi di aprire l'oblò durante la fase di lavaggio della lavabiancheria.

3.2 Parametri di progettazione

Trattandosi di un progetto ancora in fase embrionale, sono state considerevoli le modifiche da apportare e gli studi da compiere prima di raggiungere un certo livello di funzionalità e di affidabilità.

Infatti, per lo sviluppo del progetto di un blocco porta, ma in particolare di un blocco porta SMA, si devono prendere in considerazione differenti vincoli e parametri di progetto.

Diventa quindi fondamentale mettere alla luce e aver ben chiari i punti di partenza imprescindibili che non possono essere assolutamente modificati per evitare che il nuovo prodotto sia già fuori dal mercato prima ancora di entrarci.

Tra le principali condizioni cui ci si è dovuti attenere nella maturazione del progetto, si trovano:

- *Tensione e corrente*: questi sono i due parametri fondamentali dai quali partire per lo sviluppo del progetto. Infatti, è necessario che la corrente di utilizzo sia inferiore a 0.2 Ampere e la tensione, possibilmente, inferiore a 6 Volt. Questo perché, come già accennato in precedenza, così facendo la normativa permetterebbe di utilizzare materiali che non presentino proprietà di autoestinguenza, consentendo di far ricadere la scelta su materiali meno costosi.

- *Temperatura di lavoro*: a seconda del programma selezionato dall'utilizzatore e della posizione della lavabiancheria, le temperature di esercizio variano dai 40°C ai 65°C. Ecco quindi che, ponendosi nelle peggiori condizioni possibili al fine di una maggiore sicurezza, la temperatura di progetto utilizzata è stata di 65°C.
- *Cicli di vita*: la richiesta delle case costruttrici riguardo questa voce, è che il bloccoporta debba essere in grado di resistere a 10.000 lavaggi vale a dire un numero di cicli superiore, o almeno pari, a 20.000 (dove per ciclo s'intende un impulso per l'azionamento e uno per il disazionamento). Il che significa che, considerando un ciclo al giorno, la vita del dispositivo deve essere almeno di 20 anni. Oggigiorno, da laboratorio sono richiesti almeno 30.000 cicli.
- *Resistenza meccanica*: come già discusso in precedenza, i carichi di resistenza richiesti dalle case costruttrici possono variare da 20 Kg a 35 Kg. Anche in questo caso, immaginando di lavorare sempre nelle peggiori condizioni, si è scelto come parametro di progetto 35 Kg, vale a dire circa 345 N.
- *Terminali elettrici*: un altro vincolo imposto dalle case costruttrici di lavabiancheria è l'utilizzo di non più di tre terminali in uscita dal bloccoporta. Questo perché la scheda madre della macchina è progettata per ricevere ed elaborare solo tre segnali, ed anche il cablaggio, attualmente utilizzato, non prevede l'uso un numero di contatti superiori a tre.

Arrivati a questo punto, dove si ha una visione più concreta e delineata dei vincoli iniziali imposti, è possibile addentrarsi nello sviluppo vero e proprio del progetto. Per fare questo, però, è necessario studiare il problema lungo due strade parallele, e che riguardano:

- lo studio del comportamento del filo nelle condizioni di lavoro nello specifico campo dei sistemi di sicurezza per lavabiancheria;
- lo studio di una meccanica che sia funzionale al comportamento del filo.

3.3 Studio del comportamento del NiTiNOL

SAES Getters è una società italiana costituita nel 1947, che si è caratterizzata per lo studio e il progressivo sviluppo del settore dei *getters*, ovvero componenti utilizzati nella tecnologia del vuoto e nella produzione di gas ad alta purezza, la cui prima applicazione è stata nella produzione di tubi catodici per televisioni.

Azienda leader del settore, *SAES (Società Apparecchi Elettrici e Scientifici)* oggi ha ampliato le sue competenze cimentandosi nello studio e nello sviluppo di materiali innovativi come, appunto, le leghe a memoria di forma.

A questo proposito, la collaborazione con SAES Getters è stata determinante; la problematica principale del progetto, infatti, è stata proprio la determinazione e l'interpretazione del comportamento del filo nelle condizioni di lavoro del blocco porta.

Proprio grazie ad essa, è stato possibile andare a fondo nelle problematiche riscontrate durante lo sviluppo del progetto tramite lo svolgimento di diverse tipologie di prove, atte a fornire maggior luce sulle proprietà del NiTiNOL.

In particolare sono state eseguite principalmente due tipologie di prove:

- Deformazione imposta;
- In forza.

3.3.1 Prova a deformazione imposta

Con questa tipologia di prova s'impone la deformazione massima desiderata sul filo per determinare il valore della corrente, della corsa effettuata e della durata dell'impulso.

I parametri di settaggio iniziali sono riportati in tabella 3.1: come si può notare, sono state eseguite tre differenti prove, dove l'unico parametro variabile è stato quello della tensione.

Tab.3.1: valore dei parametri di settaggio delle prove a "deformazione imposta".

	<i>PROVA 1</i>	<i>PROVA 2</i>	<i>PROVA 3</i>
<i>Carico iniziale [MPa]</i>	330	330	330
<i>Lunghezza filo [mm]</i>	100	100	100
<i>Deformazione imposta [%]</i>	3	3	3
<i>Corrente massima [mA]</i>	250	250	250
<i>Tensione [V]</i>	6	4	3

Il valore del **carico iniziale** è stato scelto così elevato poiché, dovendo immaginare di lavorare a una temperatura di circa 65°C, era necessario che lo sforzo di contrasto sul filo fosse sufficiente da impedirne un'attivazione preventiva non voluta.

Questo concetto è più comprensibile se si analizzano i diagrammi d'isteresi a carico costante in Figura 3.4: prendendo come riferimento la temperatura di 65°C e, ad esempio, come carico costante 150 MPa, si osserva che la corsa effettuata dal filo è già superiore al 4%.

Dovendo impedire l'attivazione preventiva del filo, si rende quindi necessario fornire un precarico di almeno 300 MPa.

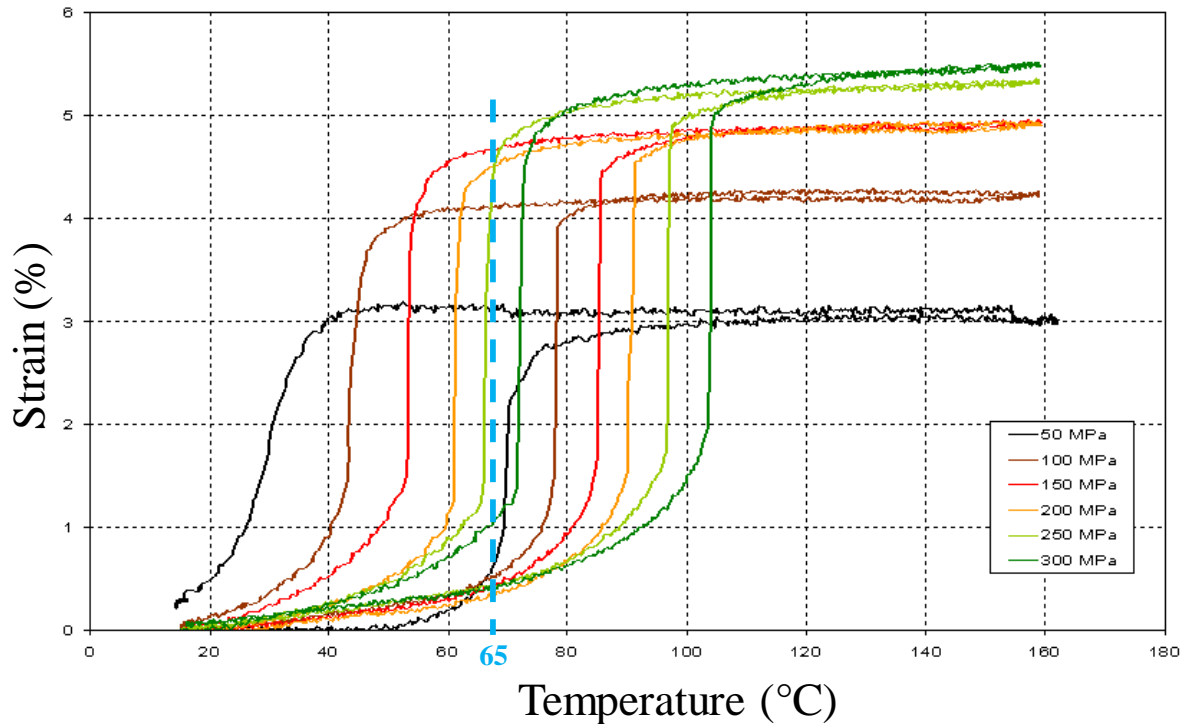


Fig.3.4: isteresi a carico costante. Sono prove effettuate in camera climatica dove il filo, vincolato a un'estremità, e caricato con carico costante all'altra, subisce una variazione lenta a graduale di temperatura con lo scopo di determinare le TTR's.

Nonostante nella progettazione si fosse pensato di utilizzare un filo di **lunghezza** pari a 40 mm, per facilitare l'esecuzione della prova il filo sottoposto ai test è stato di lunghezza pari a 100 mm; tuttavia ai fini dei risultati ultimi delle prove non ha costituito nessuna differenza. Questo perché il filo non è altro che una resistenza: per ottenere quindi, lo stesso valore della corrente e di conseguenza della corsa effettuata, è sufficiente diminuire il valore della tensione, ovviamente in proporzione alla lunghezza del filo stesso.

Per quanto riguarda la **deformazione** invece, si è deciso di prendere come valore limite il 3%. Analizzando il diagramma della vita a fatica (Fig.3.5) si osserva che, avendo imposto un carico iniziale di 330 MPa e dovendo mantenere un numero di cicli superiore a 30.000, la deformazione massima da impartire al filo non debba essere superiore al 3%.

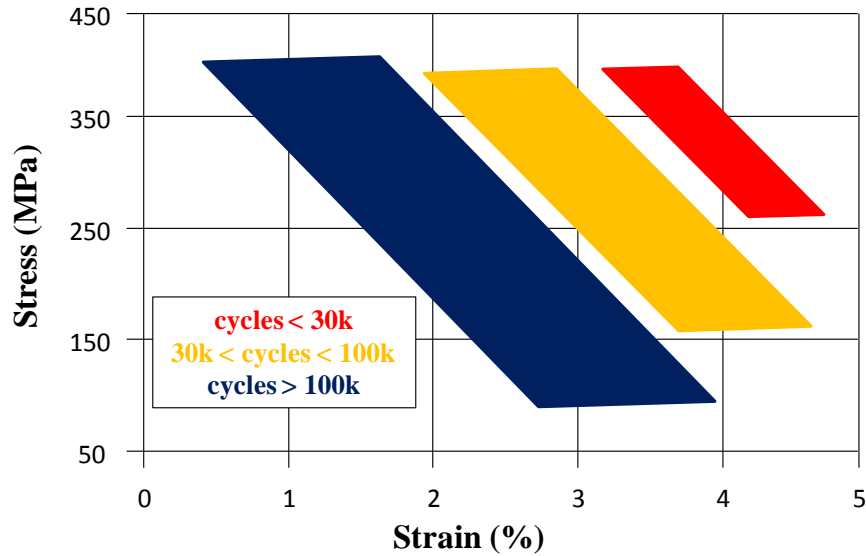


Fig.3.5: vita a fatica in funzione di sforzo e deformazione.

La **corrente massima** riportata in tabella è semplicemente un limite imposto dallo strumento utilizzato per eseguire le prove, per impedire che nel filo passi una corrente troppo elevata che porti alla “bruciatura” del filo stesso.

Un altro dato fondamentale che non è riportato in tabella, è il valore del **diametro del filo**: per tutte e tre le prove è stato utilizzato il filo da 76 μm .

A questo punto, una volta chiarite le motivazioni che hanno portato alla scelta dei parametri iniziali riportati sopra, è possibile analizzare i risultati ottenuti dalle singole prove.

Prova 1

Una volta montato il filo, assegnati tutti i parametri e avviata la prova, il filo ha raggiunto una deformazione di 4.2 mm, addirittura superiore a quella imposta.

Questo fenomeno si è verificato poiché si è utilizzata una tensione troppo elevata rispetto la lunghezza del filo considerato: infatti tale evento ha portato ad un passaggio di corrente superiore ai 250 mA, confermato dallo stesso macchinario che ha interrotto la corrente una volta raggiunta la deformazione massima del 3% e nonostante questo limite, il filo ha continuato a deformarsi per inerzia meccanica.

Prova 2

I risultati ottenuti sono stati i seguenti:

Corsa effettuata [mm]	Corrente [mA]	Durata impulso [ms]
3,3	180	470

Diminuendo la tensione, la corsa effettuata dal filo è stata circa uguale a quella imposta, il che ha significato che la corrente non fosse troppo elevata evitando così un eccessivo surriscaldamento del filo.

Inoltre, come si può osservare, la corrente necessaria per l'azionamento del filo è stata di 180 mA, inferiore al limite imposto ma sufficiente per permettere al filo di raggiungere la deformazione del 3%.

Prova 3

I risultati ottenuti in quest'ultima sessione sono stati i seguenti:

Corsa effettuata [mm]	Corrente [mA]	Durata impulso [s]
2,99	130	2

Anche in questa prova la corsa effettuata dal filo è stata uguale a quella imposta. La differenza sostanziale rispetto alle altre prove è stata la durata dell'impulso: un tempo così elevato è stato infatti dovuto dalla tensione e, di conseguenza, anche dalla corrente. Si è dimostrato che fossero troppo basse rispetto la lunghezza del filo, portando ad una elevata dissipazione di energia.

È evidente, analizzando i risultati delle prove effettuate, che i parametri più idonei per il progetto in studio in questo lavoro di tesi, sono quelli della seconda prova, dove con una corrente di 180 mA si riesce ad ottenere una deformazione sul filo del 3% senza grosse perdite energetiche.

3.3.2 Prova “in forza”

Questa tipologia di prova si pone l’obiettivo di misurare la forza acquisita dal filo durante la fase di riscaldamento, vale a dire quando avviene il passaggio di corrente.

Si ritiene opportuno fin da subito segnalare che la modalità con la quale sia stato eseguito questo test non sia stata propriamente utile, fedele e attendibile per lo scopo da raggiungere in questo lavoro di tesi.

Ad ogni modo, si è pensato utile riportare i risultati ottenuti per fornire al lettore una completa panoramica sulle proprietà e peculiarità del filo a memoria di forma al fine di permettere una maggiore comprensione.

Grazie alle prove effettuate in precedenza, è stato possibile adottare come parametri di settaggio iniziali quelli rilevati dalla seconda prova a “*deformazione imposta*” e cioè:

Carico iniziale [MPa]	Lunghezza filo [mm]	Durata impulso [ms]	Tensione [V]
330	100	450	4

Per eseguire questo tipo di prova è stata utilizzata una strumentazione come quella in Figura 3.6, dove il filo SMA, vincolato ad un estremo e con un peso all’altro, è stato lasciato libero di accorciarsi per una distanza di circa 1 mm; raggiunta questa distanza il filo spinge contro una levetta che misura la forza generata dal filo.

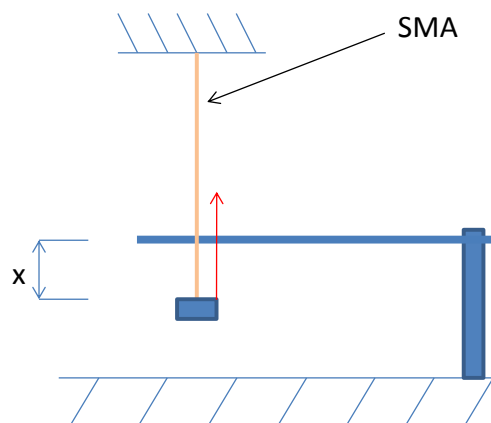


Fig.3.6: rappresentazione schematica della strumentazione utilizzata per effettuare la prova “in forza”.

Ed ecco i risultati ottenuti:

Corsa effettuata [mm]	Corrente [mA]	Forza [N]
1*	180	0,289

*poiché vincolato dalla levetta.

Come si può notare dal grafico lo sforzo sentito dal filo è passato da 330 MPa a 394 MPa che trattandosi del filo con diametro da 76 μm , si traduce in un delta di forza di 0.289 N (la forza generata dal filo a 394 MPa è di 1,786459 N).

Ma questo è accaduto perché è stato lasciato 1 mm di corsa al filo prima di entrare in contatto con la levetta; lasciando, ad esempio, 0.5 mm lo sforzo sentito dal filo sarebbe stato maggiore.

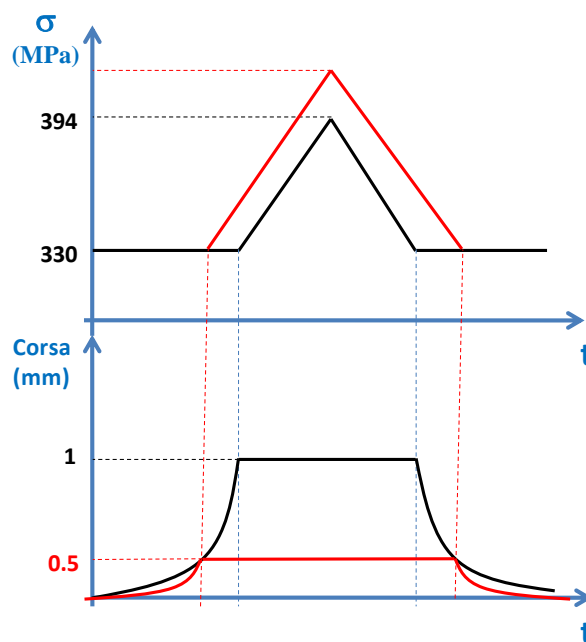


Fig.3.7: rappresentazione schematica della prova "in forza".

Come già accennato in precedenza, questa tipologia di prova non fa fede al progetto in esame: infatti, in quest'ultimo caso, il filo non ha alcun vincolo ed è libero di muoversi; esiste solo una forza di contrasto generata dalla contro-molla necessaria a riportare il filo nella posizione iniziale.

Tutto ciò ha portato alla seguente considerazione: il filo a memoria di forma è in grado di sottoporsi alle più gravose condizioni di lavoro, come ad esempio lo è stato per questa prova (ovviamente in proporzione alla dimensione del diametro).

Il problema sopraggiunge nel momento in cui è fondamentale garantire una certa vita a fatica: all'aumentare del carico cui il filo è sottoposto e a parità di deformazione percentuale, il numero di cicli effettuati dallo SMA tende a diminuire (vedi Fig.3.5 al paragrafo 3.3.1).

3.3.3 Prove di fatica e affidabilità

Arrivati a questo punto, dove la conoscenza del filo è maggiore e i suoi pregi e limiti risultano sempre più chiari, è sembrato importante effettuare delle prove a fatica atte a simulare il più possibile le condizioni di progetto e quindi quelle reali.

Grazie alla disponibilità dei tecnici di laboratorio della *SAES Getters*, è stato possibile usufruire degli strumenti da loro utilizzati per eseguire lo studio della vita a fatica su tre fili di diametro di 76 μm , con i seguenti parametri di settaggio:

Carico iniziale [MPa]	Deformazione imposta [%]	Corrente [mA]	Tensione [V]
330	3	200	4

I risultati sono riportati in Figura 3.8:

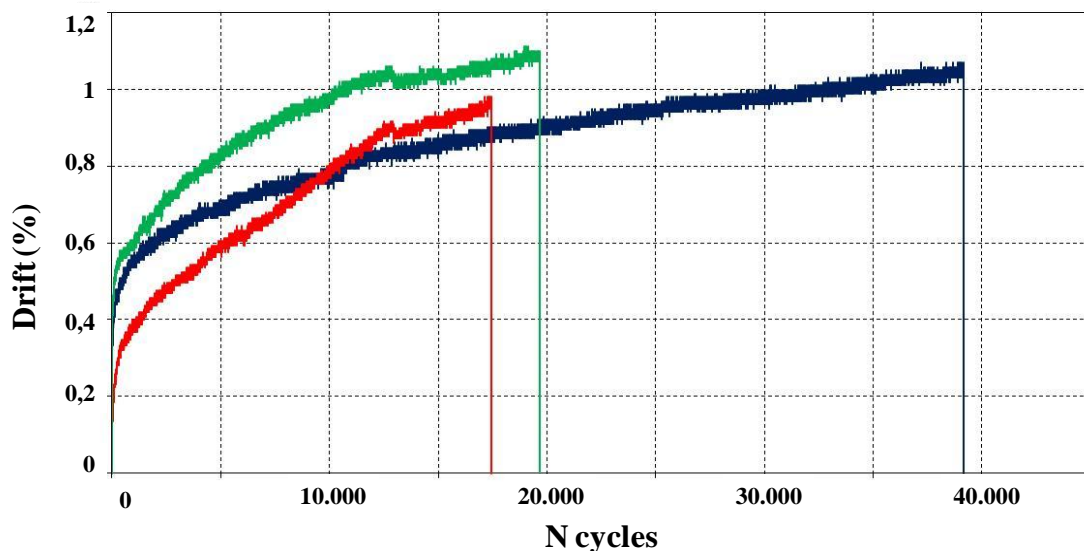


Fig.3.8: numero di cicli in funzione della deriva del filo.

Come si può notare dal grafico, i fili presentano comportamenti visibilmente differenti. Infatti, su tre campione testati, solo uno supera la soglia dei 30.000 cicli mentre gli altri due campioni non raggiungono neppure i 20.000 cicli.

Nonostante la capacità di condurre una lunga serie di cicli fosse l'obiettivo primario del test, emerge analizzando i risultati ottenuti, un'importante indicazione del fenomeno della deriva: in tutti e tre i casi si raggiunge a fine vita un drift di oltre 0.8%, in un caso addirittura sopra l'1%.

Questo dato emerge maggiormente ad assumere un rilievo ancor più importante considerando già i primi 5.000 cicli: la deriva infatti è già dello 0.4 – 0.6 %

Questo significa che nella fase di progettazione bisogna tenere in considerazione anche dell'effetto della deriva, ovvero della perdita di risposta del filo: a parità di tutte le condizioni di lavoro (carico iniziale, tensione, corrente e durata dell'impulso) l'affaticamento del filo porterà a una diminuzione della sua corsa, e quindi non riuscirà a mantenere il 3% effettivo di deformazione.

Quanto descritto e analizzato finora, consente di introdurre un argomento del quale fino a questo momento non si è fatto cenno: l'affidabilità del filo a memoria di forma.

Sulla base dei pochi dati raccolti, si può osservare una scarsa costanza del comportamento del filo passando da una vita a fatica di 20.000 cicli a una di 40.000. Non è pertanto pensabile sviluppare un progetto su di un sistema di sicurezza sperando che il filo utilizzato sia quello più resistente, ma al contrario c'è bisogno di totale certezza sul suo comportamento.

D'altro canto gli studi effettuati in queste condizioni di lavoro non sono stati molti e fare considerazioni su tre prove non è il massimo della garanzia, ma perlomeno è stato utile per capire che condizioni troppo onerose di lavoro, oltre che a diminuire la vita a fatica, la rendono anche imprevedibile e scostante impedendo di tracciare un filo conduttore sulle proprietà del NiTiNOL utili ai fini del presente lavoro di tesi.

Queste considerazioni hanno spinto a pensare che il filo SMA da 76 μm non fosse il candidato ideale perché non idoneo in queste condizioni di lavoro, non garantendo la sicurezza necessaria per ottemperare ai suoi doveri, specialmente se posto in un sistema di sicurezza.

Sospetti che saranno poi confermati nella pratica (vedi paragrafo 4.3).

Da queste considerazioni nasce l'esigenza di capire come poter migliorare le prestazioni del filo.

L'affidabilità è legata alla vita a fatica che a sua volta dipende dal carico iniziale: quest'ultimo è stato imposto così elevato dovuto al fatto che la temperatura di lavoro è di 65°C (vedi paragrafo 3.2).

A questo punto ci si è trovati di fronte a un bivio: abbandonare il progetto, oppure cambiare le condizioni di lavoro con il solo scopo di portare a termine il lavoro iniziato e perfezionarlo solamente in un secondo tempo.

Si è andati avanti con lo sviluppo del progetto cambiando però la temperatura di lavoro: si è passati da 65°C a 40°C e questo ha significato l'applicazione di un carico iniziale di 100 MPa, vale a dire condizioni di lavoro meno onerose e quindi vita a fatica più lunga (Fig.3.9).

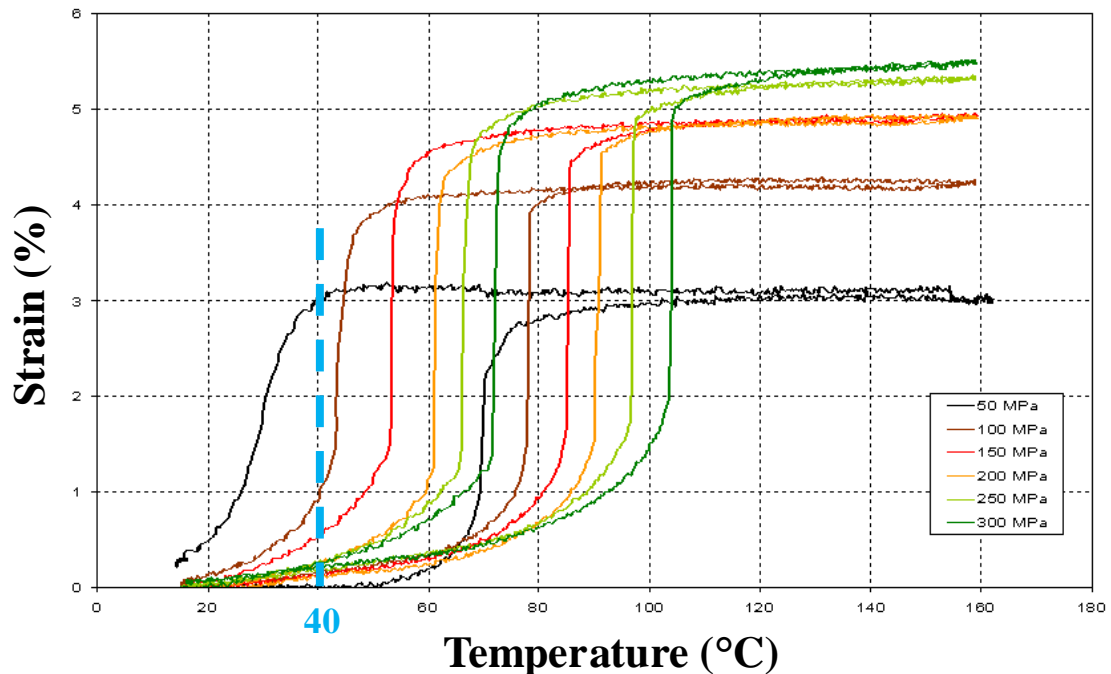


Fig.3.9: isteresi a carico costante. Prendendo come temperatura di riferimento 40°C, è possibile imporre come carico iniziale 100 MPa.

Per avere una maggiore garanzia sull'affidabilità, si è pensato inoltre di passare dal filo di diametro 76 μm e quello di 150 μm .

3.4 Studio della meccanica

Giunti a questo punto, resta da capire e da ideare una meccanica che sia in grado di sfruttare al massimo le potenzialità attribuite, e verificate, al filo a memoria di forma.

La struttura a doppia ganascia è sembrata fin da subito un sistema valido ed innovativo nel campo della progettazione dei sistemi di sicurezza per elettrodomestici, e proprio per questo si è deciso di partire da questa intuizione per sviluppare l'intero progetto. Tuttavia, una delle principali motivazioni per le quali si sarebbe voluto utilizzare il filo a memoria di forma, era la possibilità di studiare un sistema meccanico in grado di garantire una riduzione delle dimensioni, e quindi dei componenti, che attualmente caratterizzano i bloccoporta oggi in commercio. Partendo dunque da questo principio, si è subito capito che sarebbe stato ancora

più vantaggioso passare da un sistema a doppia ganascia ad un sistema a ganascia singola, che mantenesse comunque le adeguate funzionalità meccaniche.

Ecco dunque che il bloccoporta sviluppato, e di cui si è realizzato un prototipo, viene riportato nella Figura 3.10.

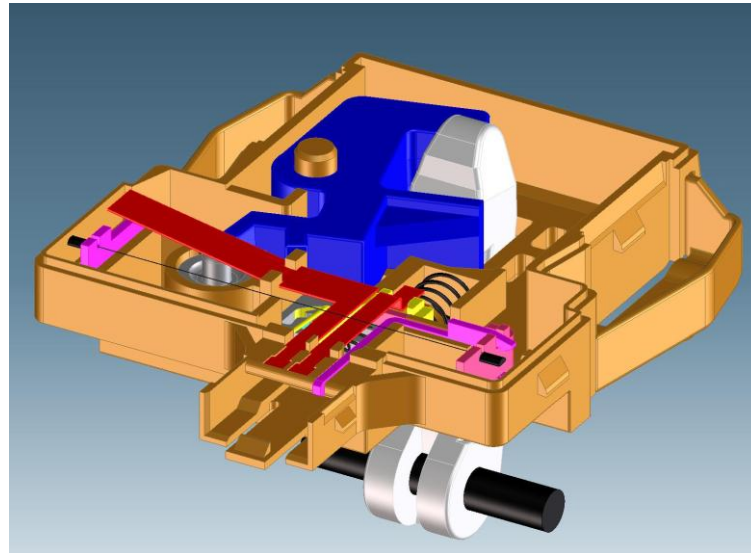


Fig.3.10: immagine raffigurativa del bloccoporta SMA. È possibile osservare il gancio (grigio chiaro), la ganascia (blu), le linguette (rosso), i contatti elettrici (violetto), il sensing (grigio scuro), il filo SMA (nero) e, nascosti dai contatti elettrici, la camma con la sicurezza per il filo (grigio e giallo).

Il principio di funzionamento è molto semplice: il gancio, quando entra nel bloccoporta, mette in rotazione la ganascia la quale, tramite il meccanismo del sensing, permette alla linguetta laterale di appoggiarsi sul contatto chiudendo il circuito che consente il passaggio di corrente all'interno del filo.

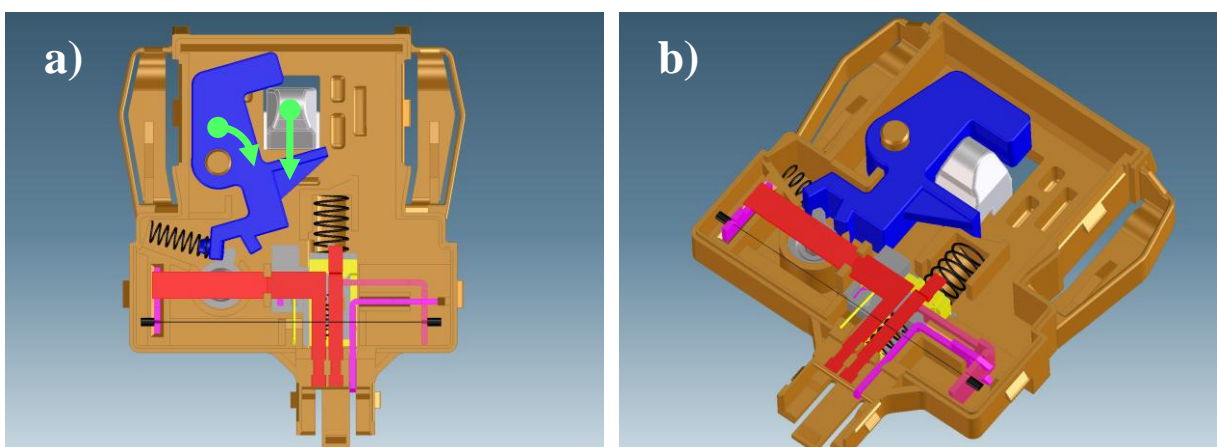


Fig.3.11: a) rappresentazione del bloccoporta nella fase di chiusura dell'oblò, b) il gancio è all'interno del bloccoporta promuovendo la rotazione della ganascia.

A questo punto, una volta dato l'impulso al filo questo si accorcia e, tramite un sistema a leva, consente lo spostamento della camma e l'inserimento del chiavistello tra la ganascia e una

spalla presente sul lato opposto impedendo alla ganascia di muoversi e quindi al gancio di sfilarsi.

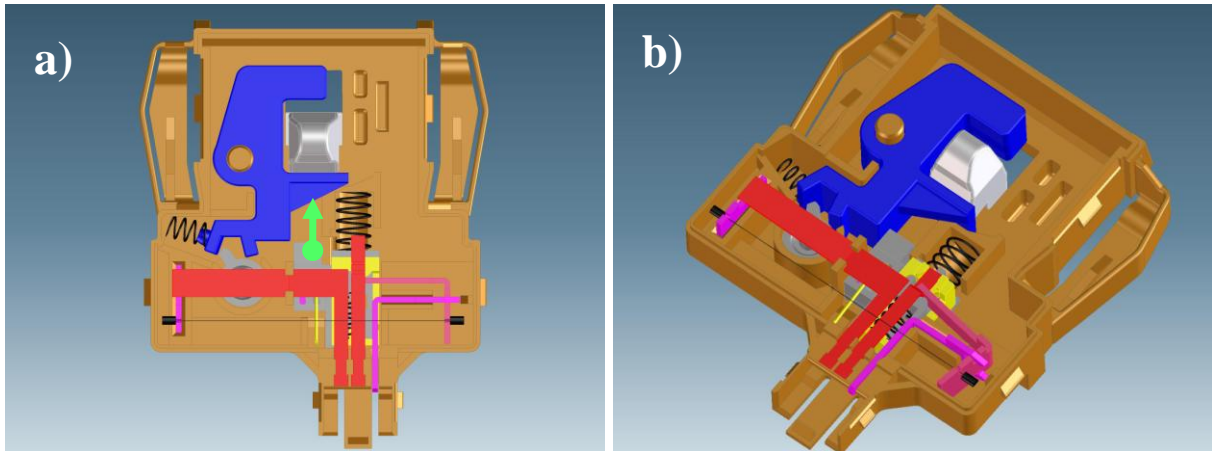


Fig.3.12: a) movimento della camma in posizione di blocco grazie all'attivazione del filo, b) configurazione del bloccoporta nella fase di blocco avvenuto.

Data la prima infarinatura generale sul bloccoporta con filo SMA e sul suo “ideale” (giacché per ora trattasi di una semplice idea) funzionamento meccanico, si ritiene opportuno spingersi all’interno del progetto e analizzare nel dettaglio le funzionalità del singolo componente di cui è costituito questo dispositivo.

Si riporta di seguito la lista di tutti le parti presenti:

- Ganascia;
- Sensing;
- Molle di compressione;
- Slitta;
- Sicurezza;
- Linguette;
- Contatti elettrici;
- Filo SMA.
- Corpo e coperchio.

Ognuno di questi componenti ha la sua importanza e contribuisce a garantire il corretto funzionamento del sistema di sicurezza per tutta la sua durata.

Per una maggiore comprensione si analizzano uno ad uno le singole parti.

3.4.1 Ganascia

Inizialmente la ganascia è stata pensata solo per accompagnare il gancio quando entra nel bloccoporta e, con la spalla posteriore, per bloccare il gancio stesso una volta che il blocco fosse effettuato.

L'evoluzione del progetto ha poi portato a pensare di sfruttare il movimento della ganascia per introdurre una sicurezza all'interno del bloccoporta: infatti, sulla coda della ganascia sono presenti due denti che hanno lo scopo di guidare il sensing.

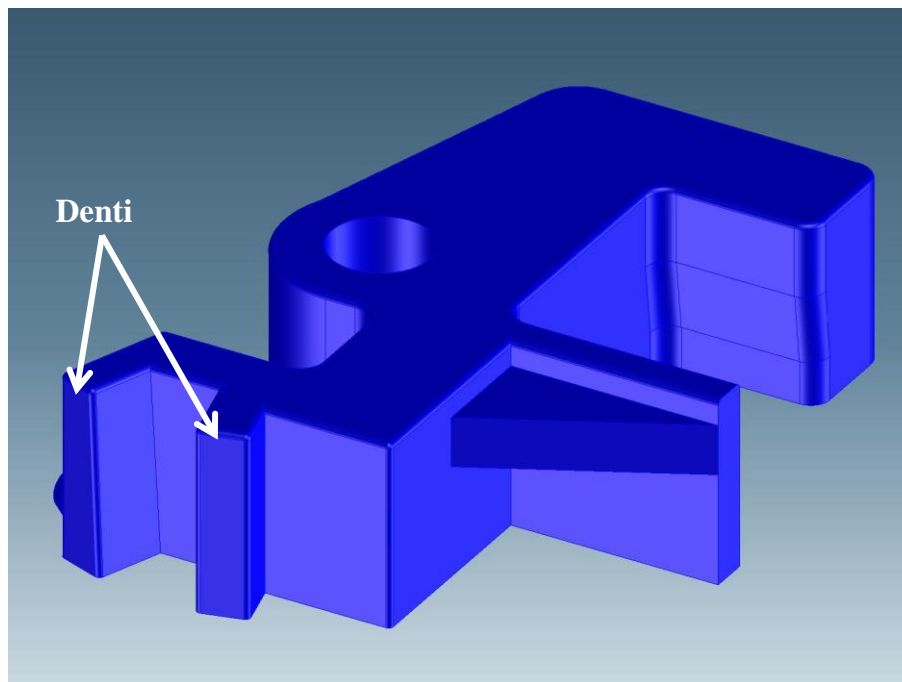


Fig.3.13: ganascia

Come si può osservare dalla figura, uno dei due denti (quello sul lato sinistro) è rastremato verso il basso; in questo modo si facilita il contatto in movimento tra ganascia e sensing.

3.4.2 Sensing

Si potrebbe definire la “sicurezza nella sicurezza”; ha come scopo infatti quello di far sì che la linguetta laterale non poggi direttamente e costantemente sul contatto su cui è cablato il crimp del filo SMA impedendo l’attivazione accidentale del filo.

Solo quando l’oblò è chiuso, allora è possibile avviare il programma della lavabiancheria.

Esso compie un movimento rototraslatorio, dove la componente rotatoria è fornita dalla ganascia mentre quella traslatoria verso il basso è fornita dalla linguetta laterale precaricata che vi poggia sopra.

Nel movimento traslatorio, esso si abbassa di circa un millimetro in modo da consentire la chiusura del circuito; questo movimento è inoltre garantito dai due dentelli che si trovano nella parte interna e inferiore del sensing i quali scorrono lungo due rampe presenti sul corpo del bloccoporta.

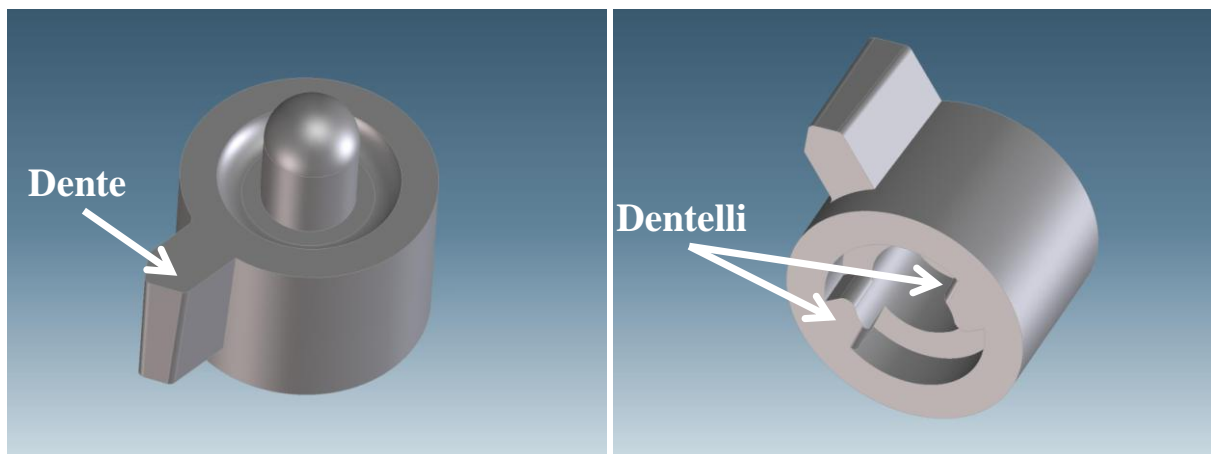
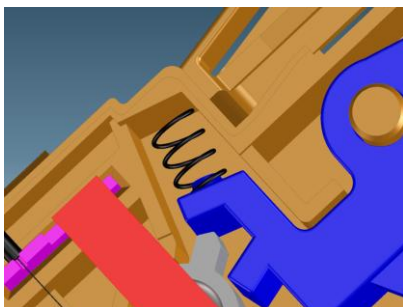


Fig.3.14: sensing.

3.4.3 Molle di compressione

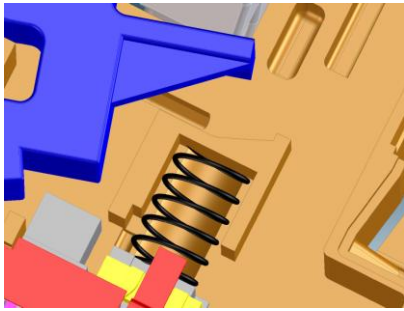
All'interno del bloccoporta si trovano tre molle (Vedi Allegato 1):

- Molla ganascia: ha lo scopo di riportare la ganascia nella posizione iniziale quando l'oblò viene aperto. Non è necessario studiare una molla con un'elevata costante elastica, infatti l'unica forza che deve contrastare è la precarica della linguetta laterale sul sensing e le forze (minime) di attrito.



l'oblò viene aperto. Non è necessario studiare una molla con un'elevata costante elastica, infatti l'unica forza che deve contrastare è la precarica della linguetta laterale sul sensing e le forze (minime) di attrito.

- Molla SMA: è quella più importante del progetto, la molla di contrasto che ha il



compito di riportare il NiTiNOL nella posizione originaria. Per evitare un affaticamento eccessivo del filo è necessario che la costante elastica non sia troppo elevata, in modo che il filo non vada incontro a un eccessivo incremento

dello sforzo. Nel caso in esame la situazione è più complessa poiché il filo SMA e la molla sono connessi tramite una leva; questo dispositivo consente di sfruttare pienamente il minimo spostamento del filo (tant'è che da una deformazione del filo di 1,2 mm, si riesce a spostare la camma di circa 4 mm), ma d'altro canto lo sforzo sentito dal filo è notevolmente maggiore che non nel caso di un sistema lineare. Questo ha portato allo studio di una molla con una bassissima costante elastica introducendo il rischio che, a causa degli attriti faccia fatica a riportare il filo in posizione iniziale.

- Molla sicurezza: è stata introdotta per evitare sovrasollecitazioni o addirittura rottura



del filo. In caso di anomalie, come ad esempio l'impossibilità della camma a compiere il suo spostamento, la molla consente comunque il movimento del filo. La difficoltà di progetto sta nel fatto che questa molla lavora assialmente a quella

SMA e quindi non deve avere una costante elastica troppo vicina a quest'ultima e neanche troppo alta perché altrimenti il filo non riuscirebbe a comprimerla.

3.4.4 Slitta e sicurezza

La slitta è un componente fondamentale del dispositivo ed è costituita:

- Dal chiavistello, elemento grazie al quale si effettua il blocco vero e proprio.
- Una camma con la sua molla di ritegno, i quali costituiscono la parte meccanica che consente la permanenza della slitta in posizione di blocco della ganascia;
- Una sede per la sicurezza;
- Una sede per la "molla sicurezza".

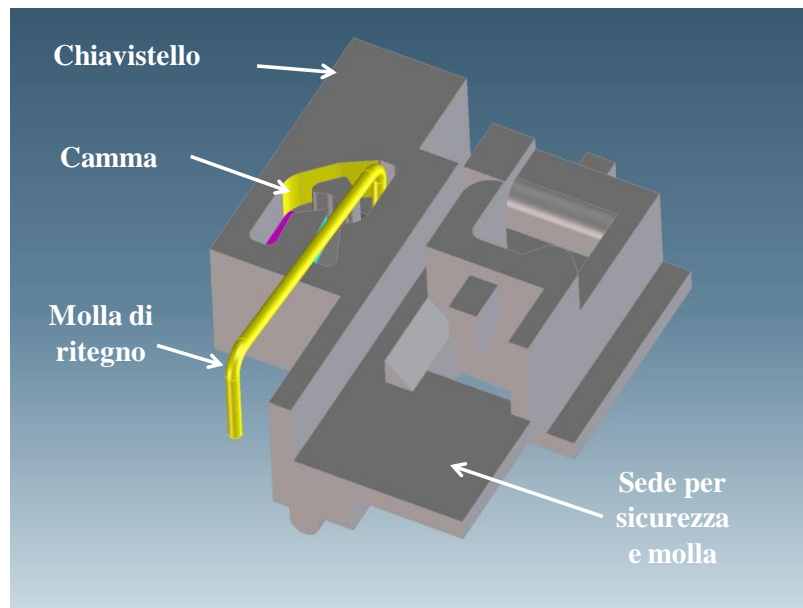


Fig.3.15: slitta

Vi è poi la sicurezza, un piccolo componente polimerico che si muove in sincronia con la slitta, azionata dal contatto mobile. È tuttavia un elemento fondamentale poiché ha lo scopo di impedire la rottura del filo in caso di anomalie di funzionamento: infatti, se per qualunque ragione la slitta fosse impedita nel movimento e il filo venisse azionato, la sicurezza, per mezzo della molla, compierebbe il movimento che farebbe la slitta in condizioni normali di funzionamento.

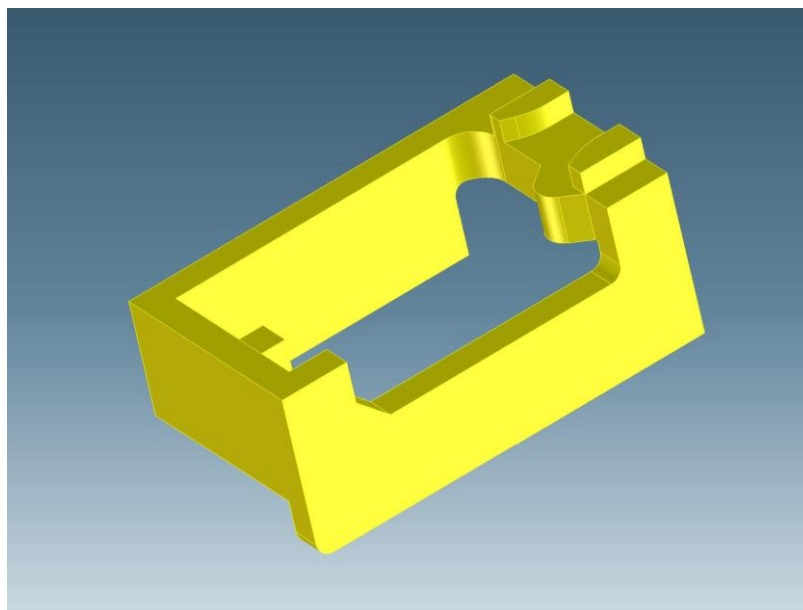


Fig.3.16: sicurezza

Nella figura 3.17 si riporta l'assieme dei due componenti con la molla.

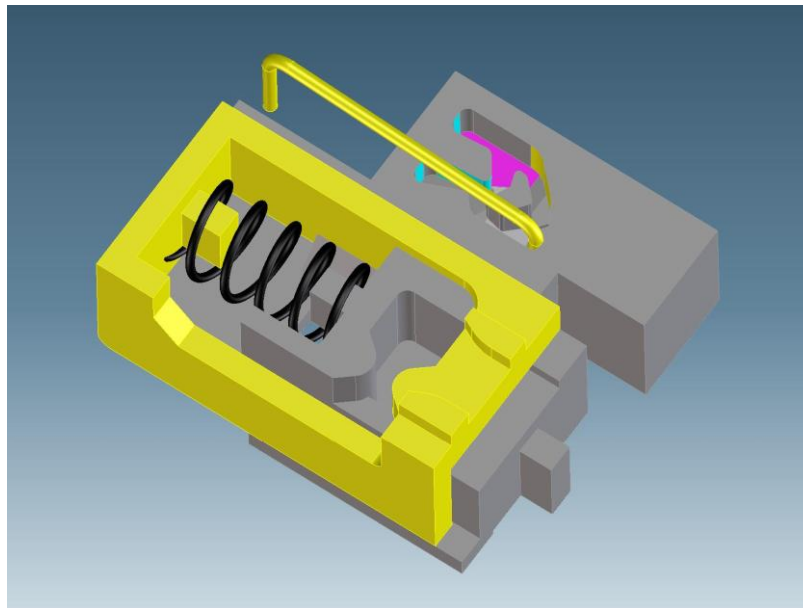


Fig.3.17: assieme slitta-sicurezza

3.4.5 Linguetto e contatti elettrici

Finora si è parlato solo della parte polimerica del dispositivo senza mai far riferimento, se non in piccola parte, alla componente elettrica del progetto.

Questa si può dividere in due categorie:

- Le linguette, laterale e centrale, che vengono ricavate da una lamina di bronzo spessa 0.2 mm.

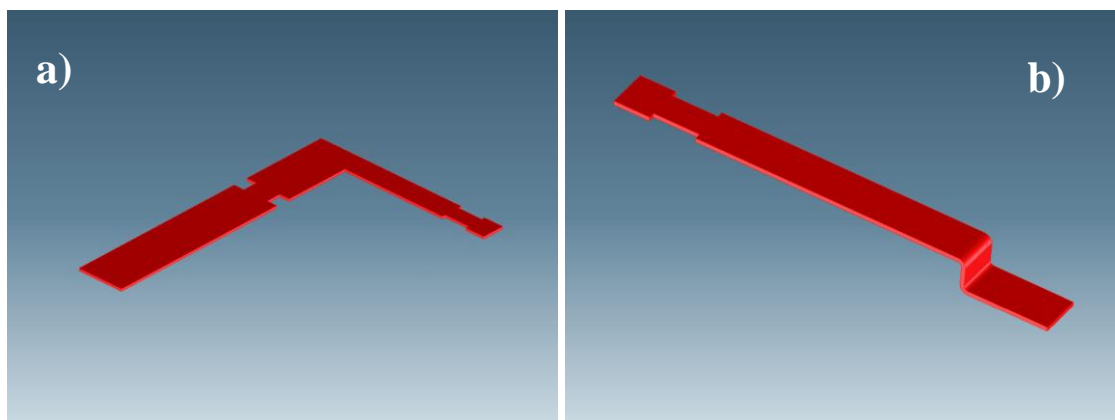


Fig.3.18: (a) contatto laterale, (b) contatto mobile

La linguetta laterale precaricata poggia sulla testa del sensing e ha lo scopo di chiudere il circuito che consente l'azionamento del filo SMA; la linguetta centrale invece ha il compito di inviare il segnale di bloccoporta avvenuto in quanto chiude il circuito con il contatto mobile.

- I contatti elettrici, che sono ricavati da una lamina di ottone spessa 0.8 mm.

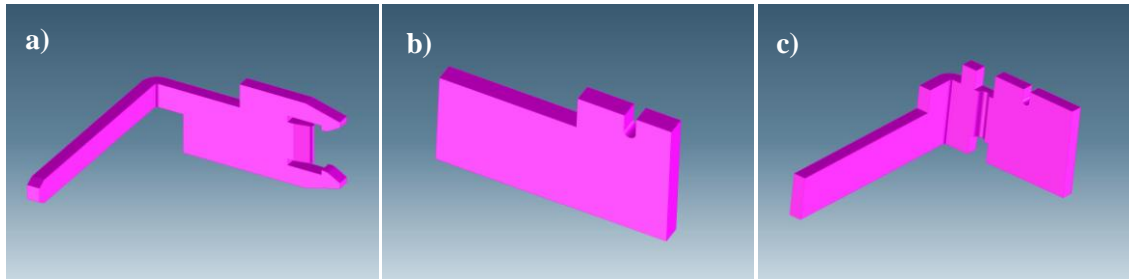


Fig.3.19: a) contratto centrale, b) contatto laterale, c) contatto mobile.

Il contatto centrale ha il compito di fare da “perno” al contatto mobile, la leva a cui si è fatto riferimento in precedenza, sul quale è posizionato il filo SMA;

Il contatto laterale invece ha la semplice funzione d'incastro per il secondo crimp del filo SMA.

Come si è già accennato in precedenza, il collegamento elettrico del bloccoporta con la scheda madre della lavabiancheria è ottenuto per mezzo di tre terminali.

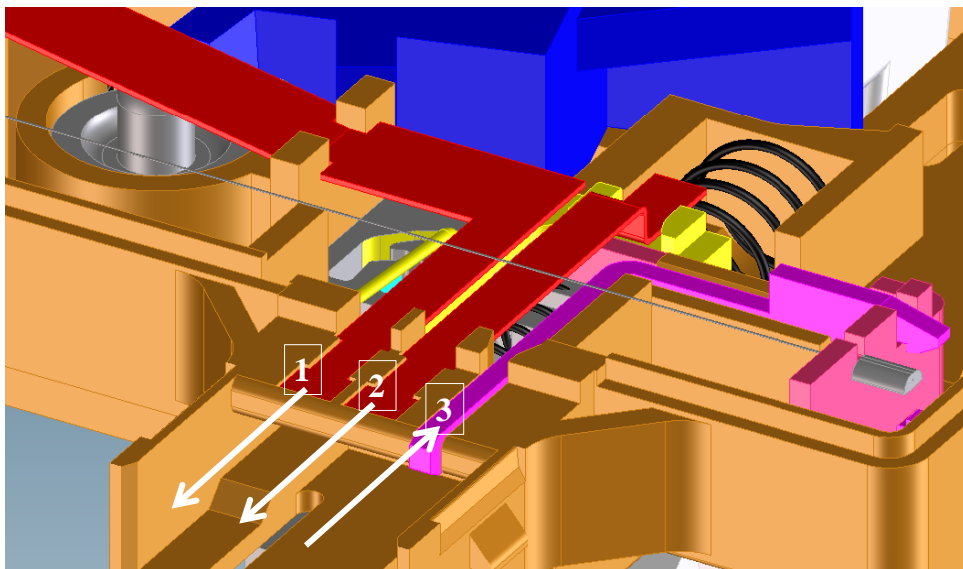


Fig.3.20: particolare dei contatti del bloccoporta.

I punti 1-3 sono i terminali ai quali è applicata la differenza di potenziale necessaria per l'attivazione del filo. Ecco che si capisce l'importanza del sensing: se non ci fosse, sarebbe possibile in qualunque momento attivare il filo giacché il circuito sarebbe sempre chiuso, affaticandolo eccessivamente e diminuendone la vita.

Il punto 2 invece rappresenta il terminale che consente di verificare che il blocco è avvenuto: quando il filo è attivato, il contatto mobile si sposta e si porta in contatto con la linguetta centrale, cioè il secondo terminale, chiudendo il circuito.

Tutto questo si rende necessario in quanto voluto dalle case costruttrici di lavabiancheria che hanno esigenze sempre più costrittive dovute ad una ricerca della sicurezza sempre maggiore.

Le loro principali necessità in campo di sicurezza sono principalmente:

- il segnale tra i terminali 1-3 per impedire che il blocco si attivi anche in caso in cui l'oblò sia aperto
- il segnale del terminale 2 necessario per dare la certezza di blocco avvenuto e quindi poter avviare in sicurezza il programma di lavaggio.

3.4.6 Corpo e coperchio

Rappresentano il guscio, il contenitore di tutti i componenti finora descritti, l'interfaccia con l'esterno. All'interno del corpo sono presenti tutte le sedi e i canali vari, necessari per il posizionamento delle parti costituenti il bloccoporta (Fig. 3.21).

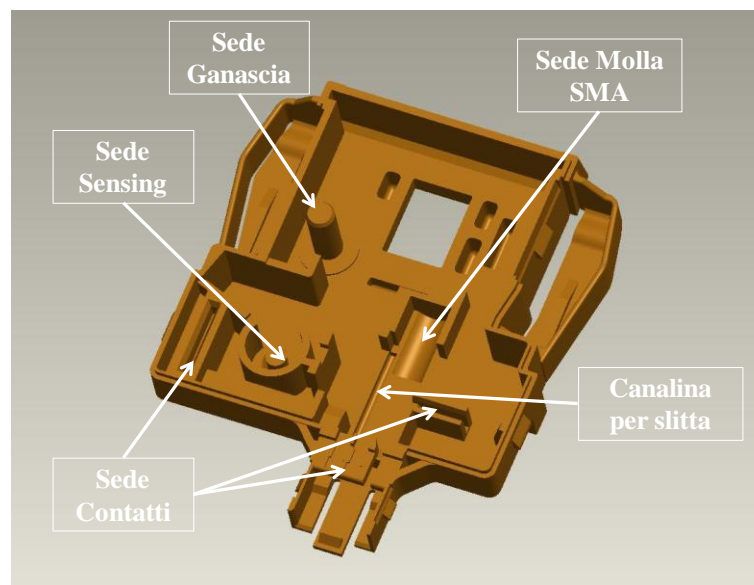


Fig.3.21: lato interno del corpo

Mentre sul lato esterno si possono osservare gli attacchi per il fissaggio al pannello della lavabiancheria.

La tipologia di attacco utilizzata per questo progetto (Fig.3.22) presenta il vantaggio di non dover più utilizzare viti grazie alle due alette laterali elastiche che vengono fissate direttamente sul pannello.

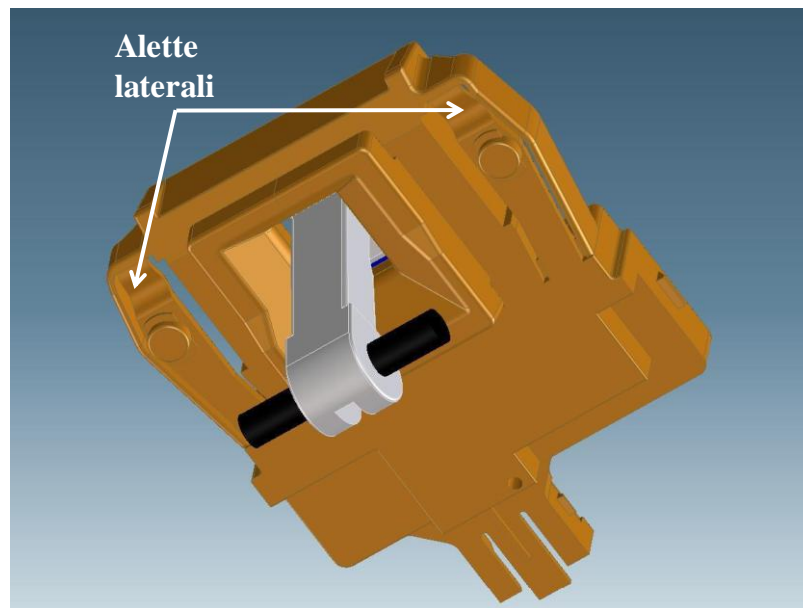


Fig.3.22: attacco meccanico

Il lato interno del coperchio, a differenza di quello esterno che ha una funzione puramente estetica, è disegnato per prevedere eventuali spallamenti che avranno lo scopo di impedire movimenti o scostamenti delle singole parti del bloccoporta non solo durante la sua intera vita di funzionamento, ma anche durante il suo trasporto, i collaudi o test (Fig.3.23): è utile infatti a rendere tutto il più compatto possibile.

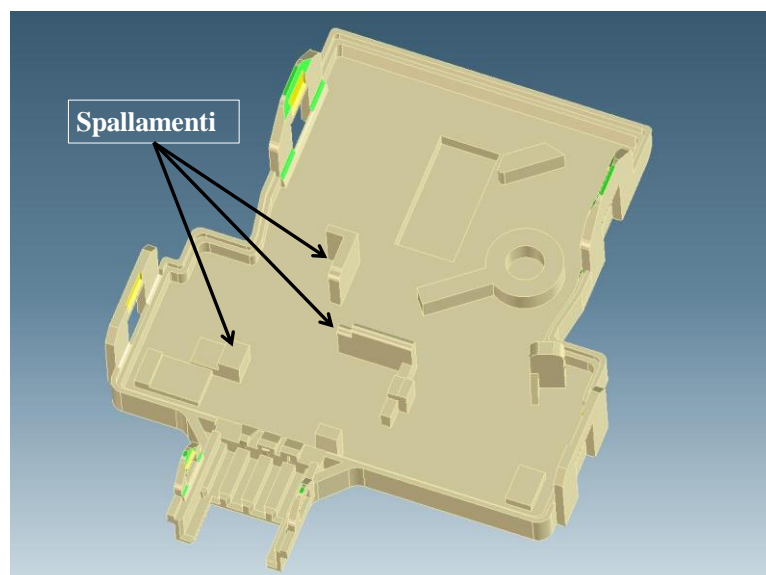


Fig.3.23:lato interno del coperchio dove si possono osservare alcuni spallamenti.

3.5 Analisi FE (Finite Element Analysis)

Ai fini di una maggior completezza del progetto studiato nel presente lavoro di tesi, si è presa in considerazione la possibilità di effettuare l'analisi di resistenza meccanica dei componenti più sollecitati del blocco porta SMA.

Dopo un'analisi qualitativa delle parti costituenti il sistema di sicurezza, si è ritenuto importante effettuare lo studio e l'analisi FE della ganascia e del perno sul quale ruota la ganascia stessa.

Infatti, essendo la ganascia il componente fisico vero e proprio che consente il bloccaggio del gancio dell'oblò è necessario studiare, soprattutto alla temperatura di lavoro, il comportamento e la resistenza del componente durante l'applicazione del carico (vale a dire un ipotetico tentativo di apertura dell'oblò durante il funzionamento della lavabiancheria).

Lo studio FE del perno invece, è dovuto al fatto che trattandosi di un componente fondamentale il cui compito è quello di mantenere la ganascia stabile permettendone solo la rotazione, anch'esso sarà soggetto a condizioni di lavoro simili e quindi si è ritenuto importante effettuare uno studio di resistenza meccanica.

È stata eseguita un'analisi separata per i due componenti.

Ganascia

Nella Figura 3.24 è riportata l'immagine della ganascia in cui si può osservare la scelta effettuata dei vincoli imposti e l'applicazione del carico, in particolare si tratta di una forza pari a 350 N.

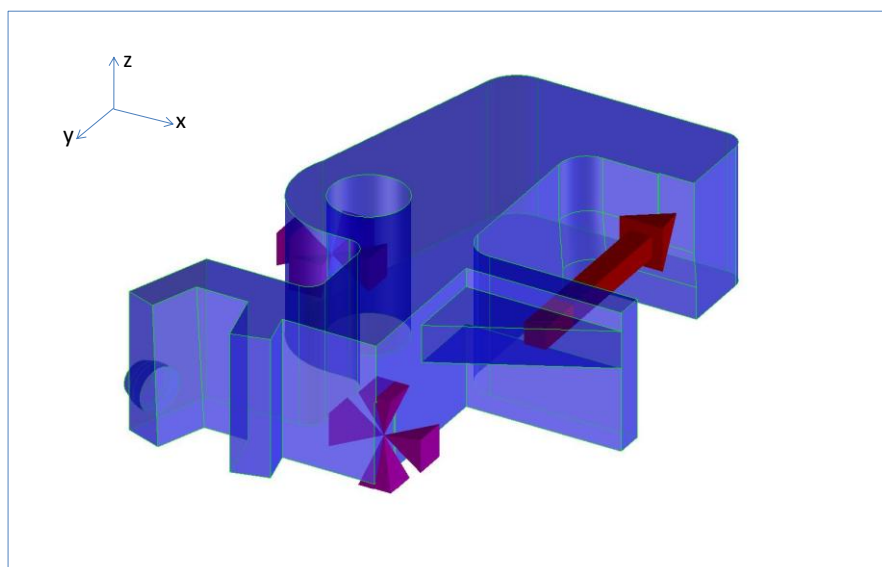


Fig.3.24: rappresentazione della scelta dei vincoli per lo studio FE della ganascia.

Si può osservare che nel punto di ancoraggio della ganascia i vincoli imposti sono in direzione x e y, e, a causa della presenza del chiavistello il componente sarà vincolato in direzione x. Il vincolo in direzione z è generato dalla presenza del coperchio del bloccoporta e quindi si può ipotizzare lungo tutta la superficie superiore della ganascia. La freccia rossa rappresenta il carico applicato quando, nel tentativo di aprire l'oblò, il gancio preme contro la superficie della ganascia.

Dal punto di vista degli elementi finiti, invece, si è pensato di scegliere come elementi dei tetraedri con un infittimento nelle zone repute più sollecitate al fine di ottenere un'analisi più accurata.

Lo studio è stato compiuto su 860 nodi e 426 elementi.

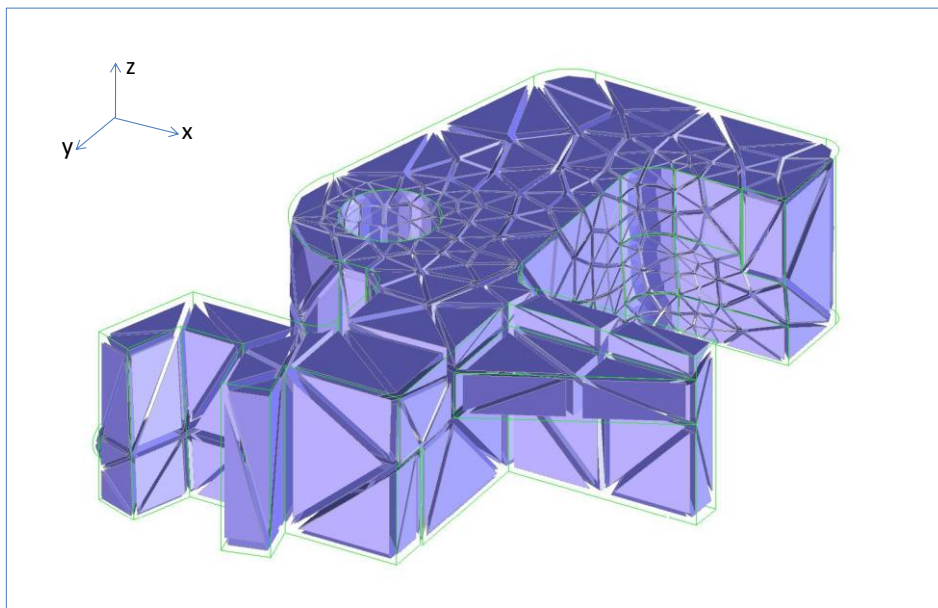


Fig.3.25: rappresentazione della mesh scelta per l'analisi agli elementi finiti.

Terminata la scelta delle impostazioni iniziali, tramite l'elaborazione del software è stata eseguita l'analisi di resistenza meccanica a 65°C.

Si è pensato di sviluppare l'analisi alle alte temperature in modo da porsi direttamente nelle più critiche condizioni di lavoro.

In Figura 3.26 si possono osservare i risultati ottenuti.

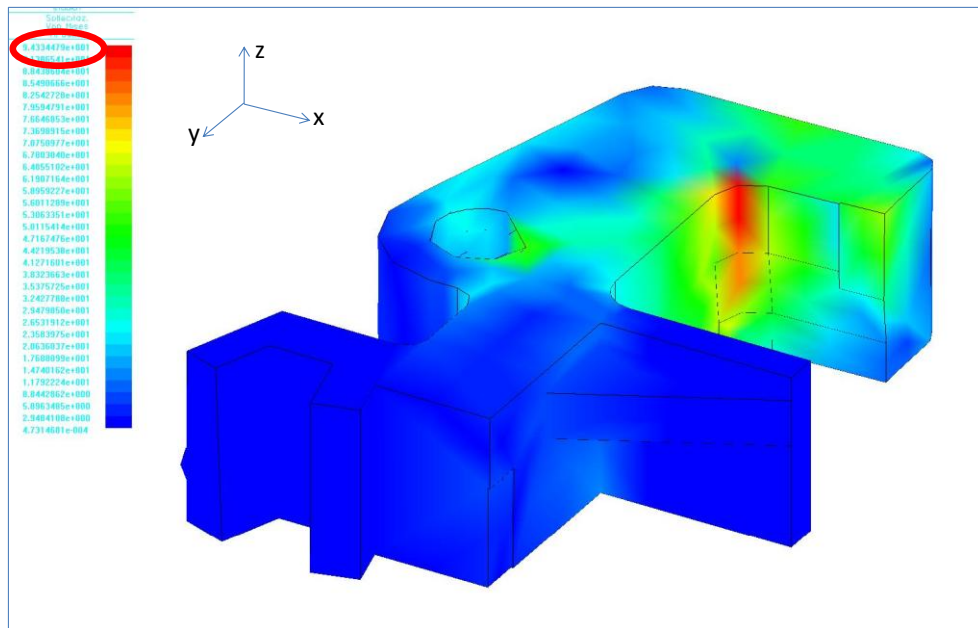


Fig.3.26: risultati dell'analisi FE effettuata tramite software. Evidenziato nel cerchio rosso è il valore massimo ottenuto pari a circa 94 MPa.

Il punto più sollecitato della ganascia si trova, com'era facilmente prevedibile, sullo spigolo interno della parte superiore del componente, zona che entra direttamente in contatto con il gancio dell'oblò.

La sollecitazione massima raggiunta è pari a circa 94 MPa, valore che risulta essere inferiore al carico di rottura a 60 °C pari a 160 MPa.

Inoltre, lo spostamento "s" della spalla della ganascia è stato valutato pari a 0,37 mm.

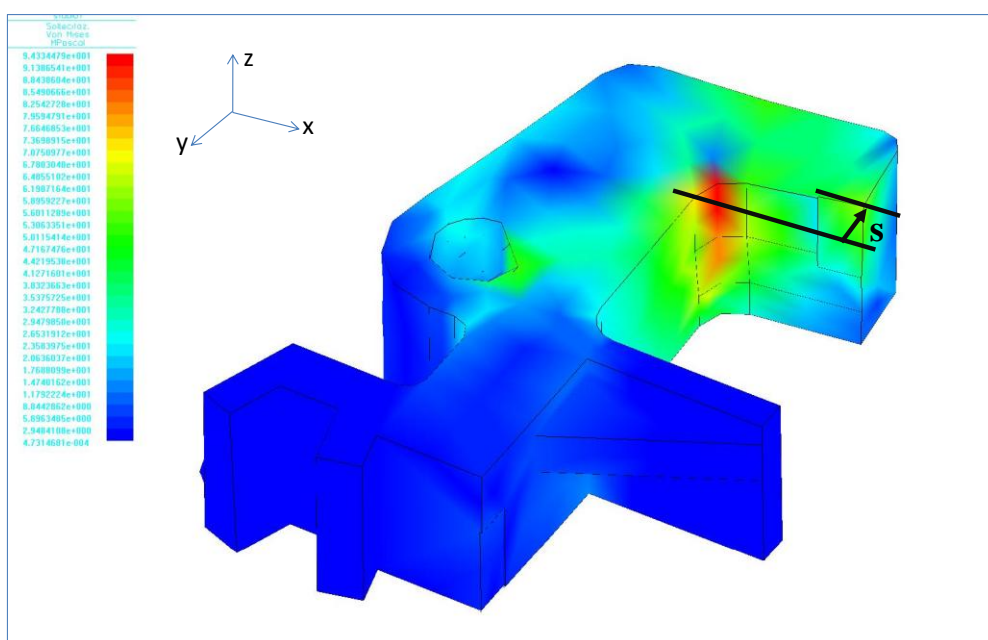


Fig.3.27: visualizzazione dello spostamento della spalla della ganascia in scala 4:1.

Lo spostamento della spalla di 0,37 mm ammette comunque una zona di contatto " s_1 " di circa 1,2 mm tra il gancio e la superficie del corpo del bloccoporta.

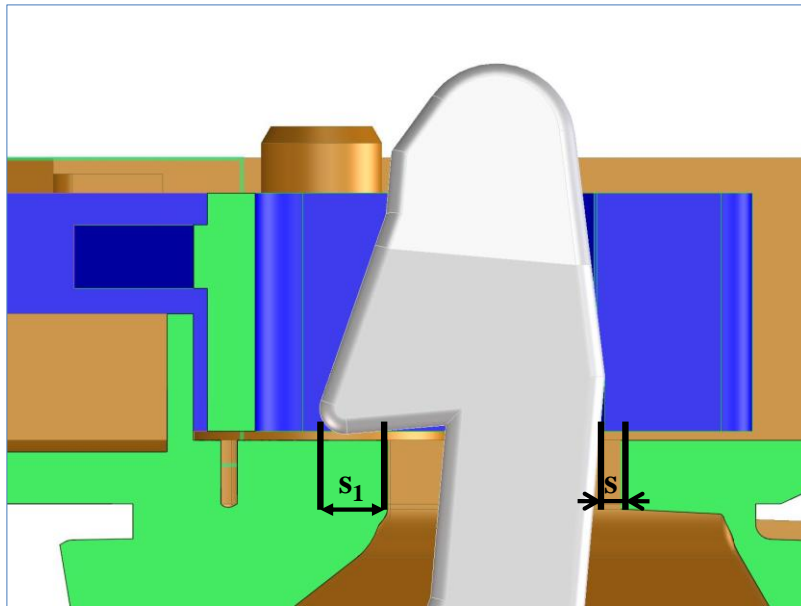


Fig.3.28: sezione trasversale del bloccoporta SMA. Si osserva la zona di contatto s_1 che permette di garantire la buona riuscita del blocco.

Questo fatto, in accordo con l'analisi meccanica sopra riportata, consente di affermare che la ganascia non presenta problematiche rilevanti sia da un punto di vista strutturale che meccanico.

Perno del corpo

Si tratta di un vincolo fisico per la ganascia, con lo scopo di impedirne il movimento in ogni direzione eccetto che per la rotazione.

Si è ipotizzato sottoposto allo stesso carico utilizzato in precedenza per il semplice fatto che una volta che il chiavistello della slitta impedisce il movimento della ganascia, questa potrebbe compiere solo una traslazione nella medesima direzione del carico applicato e quindi, trattandosi di un solido, tutto il carico verrebbe trasferito anche al perno sul quale la ganascia può ruotare.

È evidente che in tale affermazione è implicita una semplificazione della realtà, semplificazione che però comporta una condizione di lavoro più sfavorevole di quella reale permettendo di porsi in condizioni di maggiore sicurezza.

In Figura 3.29 sono riportati i vincoli, i parametri scelti per lo studio e i risultati ottenuti.

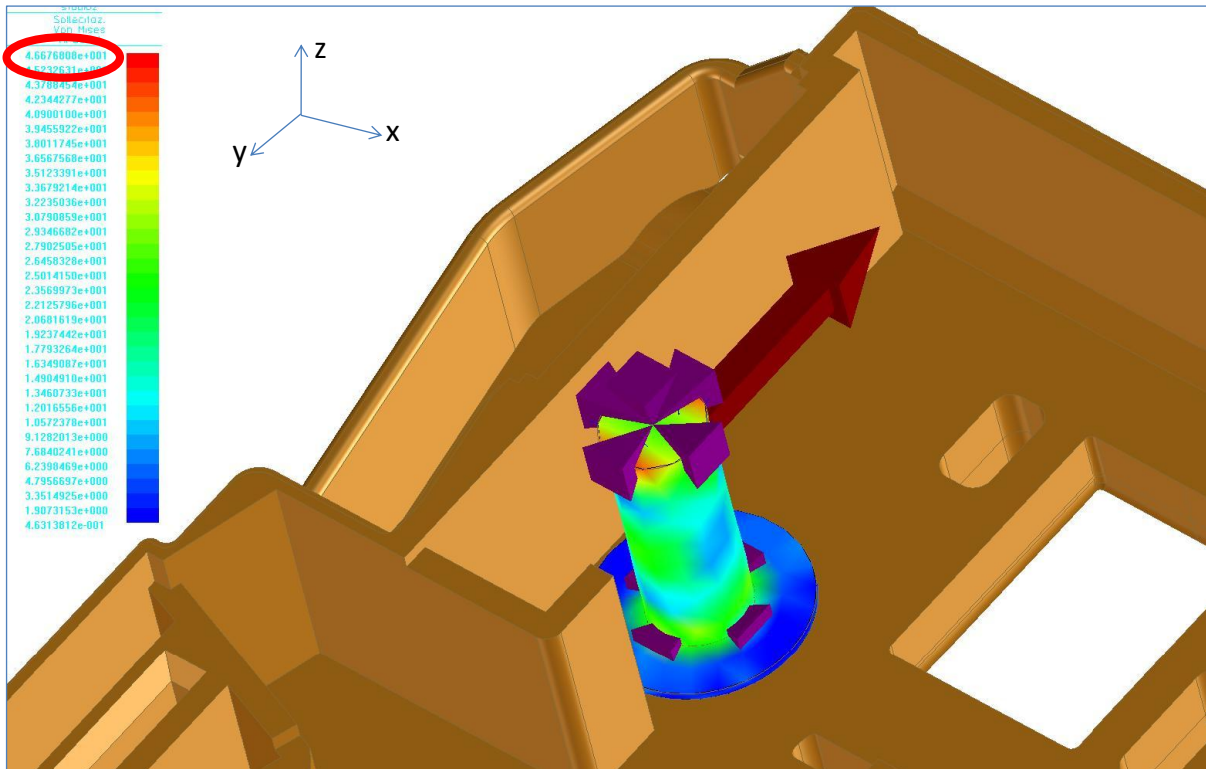


Fig.3.29: la scelta dei vincoli è ricaduta su un incastro nella parte alta (dovuta al coperchio) e uno nella parte bassa.

Il valore massimo di sollecitazione ottenuto risulta essere pari a circa 50 MPa, anche in questo caso decisamente inferiore al valore limite del PA6-30% fibra vetro che vale circa 110 MPa.

3.6 Fase di montaggio

Un aspetto di fondamentale importanza, e di cui finora non si è fatto riferimento, in previsione di una messa in produzione del progetto elaborato in questo lavoro di tesi, riguarda la fase di montaggio.

Tra tutte le varie sfaccettature che un progetto contiene, questa non è di secondaria importanza poiché è necessario che il prodotto, oltre che essere innovativo ed efficiente, debba essere funzionale e quindi facile da montare.

Uno degli errori commessi durante lo sviluppo del prodotto è stato quello di posizionare in principio il filo SMA sul fondo del corpo: una volta realizzato il prototipo, ci si è resi conto dell'imprecisione a causa della difficoltà di montaggio presentata dal filo stesso.

Nella seguente figura si riportano i passaggi necessari per il montaggio del blocco porta SMA.

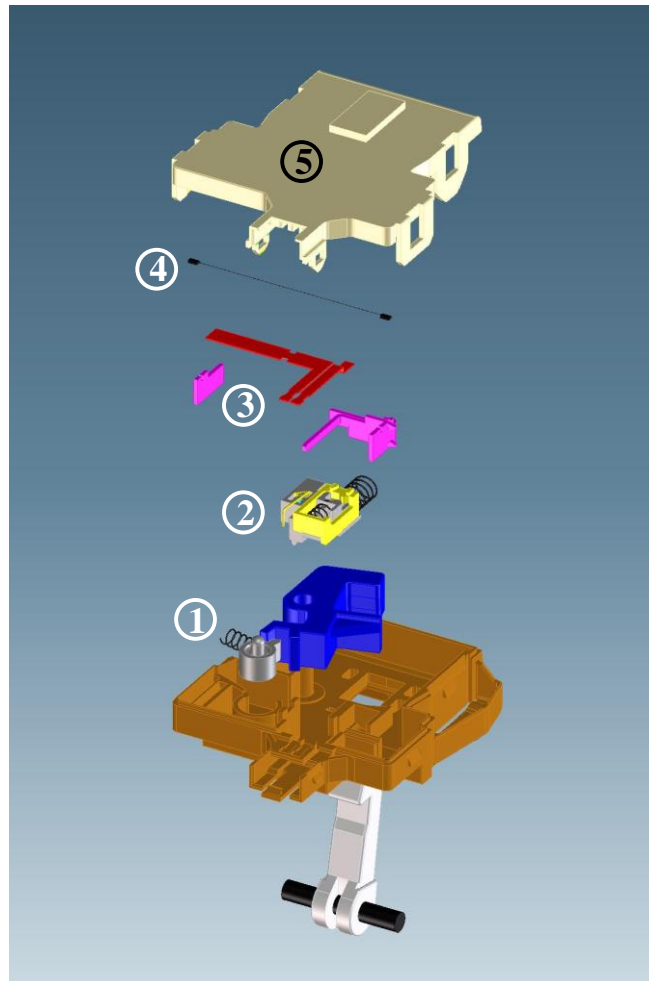


Fig.3.30: fasi del montaggio del bloccoporta SMA. I primi componenti ad essere inseriti sono la ganascia, il sensing e poi la molla per la ganascia. Una volta che il blocco slitta - sicurezza - molla vengono montati a parte, si inseriscono nella sede prestabilita; a questo punto è possibile montare tutti contatti elettrici sui quali verrà cablato il filo SMA. Infine il coperchio per contenere il tutto.

Progetto esecutivo

Nel capitolo precedente si sono espone le principali intuizioni, i vincoli e le problematiche incontrate durante la stesura e lo studio della nuova tipologia di blocco porta, che prevede l'utilizzo, per la prima volta, della tecnologia del NiTiNOL come attuatore. Una volta convinti di un certo considerevole grado di certezza, tuttavia non totale, sulla buona riuscita della realizzazione della progettazione fin qui esposta, proprio perché si è lavorato in ambito sperimentale si è sentita la necessità di concretizzare fisicamente quanto studiato attraverso la realizzazione di un prototipo.

Questo ha permesso, oltre che toccare con mano quanto finora solo pensato, di compiere uno studio ancora più approfondito della ricerca di eventuali errori progettuali o più in generale della possibilità di miglioramento delle problematiche individuate tramite le prove di laboratorio, con l'obiettivo di arrivare a una sicurezza quasi totale sul corretto funzionamento del prodotto.

Si ricorda che il presente lavoro di tesi ha lo scopo di studiare la possibilità di utilizzare il NiTiNOL come attuatore e, trattandosi di un progetto totalmente innovativo in questo campo di applicazione, gli errori, le problematiche e le insicurezze sono sempre presenti e più sentite che non in progetti divenuti ormai noti e non più sperimentali. Ci si è quindi principalmente

focalizzati sullo studio della meccanica e sulla sua funzionalità, punto cardine per un eventuale sviluppo e approfondimento futuro.

In questo capitolo si vogliono esporre tutti i passaggi della fase post-progettuale a partire dalla realizzazione del prototipo con tutte le relative problematiche incontrate e i tentativi di risoluzione apportati.

4.1 Stampante laser per prototipi

Avendo la necessità di voler eseguire dei test preliminari su studi che volgono al termine, diventa fondamentale la possibilità di poter realizzare un prototipo: ciò è possibile tramite l'impiego di una stampante laser (Fig.4.1). Questo ha permesso di evitare l'avvio della produzione di un prodotto che presentava errori che avrebbero causato l'arresto del reparto produttivo, con perdita di tempo e denaro.



Fig.4.1: stampante laser.

Gli organi principali su cui si basa il funzionamento della stampante laser sono due: l'unità di elaborazione del disegno da parte del software e l'unità di realizzazione tramite la componente fisica vera e propria della stampante.

Una volta terminata la fase di progettazione tramite il CAD, questo viene caricato dal software di elaborazione il quale comincia ad eseguire la scansione del disegno 3D su piani

orizzontali paralleli; ognuno di questi, costituirà il piano di lavoro su cui verrà depositata la resina da parte del braccetto mobile.

Infatti, questa stampante lavora su tre assi (Fig.4.2): i primi due sono eseguiti da un braccetto mobile e sono quelli che lavorano nel piano creato in precedenza dal software. Il terzo asse invece è costituito da una piastra sulla quale sarà depositata la resina e che si muove in verticale cambiando il piano orizzontale di lavoro.

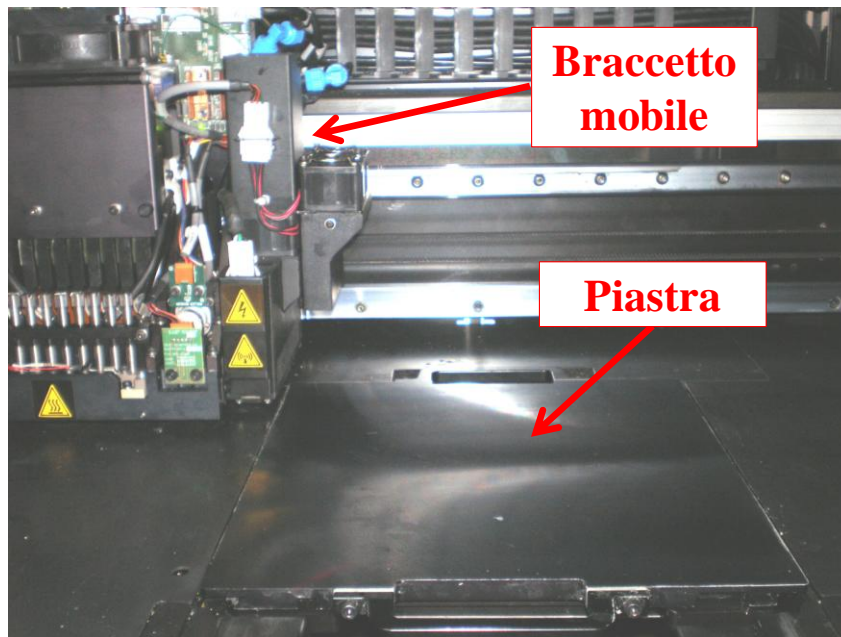


Fig.4.2: particolare della stampante laser. Si possono osservare il braccetto mobile e la piastra.

I materiali utilizzati per la realizzazione del prototipo sono stati due: uno detto di supporto e l'altro è la resina vera e propria.

Il materiale di supporto è una sorta di spugna, utilizzata con l'unico scopo di fornire una base piana sulla quale depositare in seguito la resina.

Questo perché quando la resina viene rilasciata, essendo ancora allo stato liquido, calda e altamente deformabile, necessita di una base che consenta la solidificazione e che possa evitare deformazioni non volute, specie in presenza di cambiamenti repentini nella geometria nel prototipo.

Una volta che la resina liquida è depositata, questa viene investita dal laser che, proprio per le proprietà della resina e del laser stesso, porta a reticolazione e quindi a solidificazione del prodotto.

Terminata anche la fase di solidificazione, è necessario lasciare il pezzo in macchina per qualche minuto in modo da consentirne il raffreddamento.

A questo punto la piastra può essere estratta e, tramite una setola metallica, si staccano i pezzi del prototipo che verranno successivamente ripuliti dal materiale di supporto, inizialmente a mano e, in seguito, per mezzo di un getto d'acqua.

La produzione riguardante la contatteria elettrica, linguette e contatti, subisce un'altra tipologia di prototipazione. Progettati e studiati al CAD vengono successivamente convertiti nel formato particolare “.dxf” che consente l'inserimento all'interno del CAM di una macchina per l'elettroerosione a filo.

Risulta evidente che, trattandosi di un prototipo in fase sperimentale, è conveniente realizzare la contatteria con sistemi pratici e sbrigativi (come l'elettroerosione a filo) per mezzo dei quali è possibile ottenere una buona quantità di materiale utile per le prove di laboratorio.

Nel caso invece di una produzione a livello industriale, ovviamente conviene spostare la produzione su macchine apposite di stampaggio.

4.2 Il prototipo

I pezzi del progetto sono tutti pronti: resta solo montarli.

In realtà, proprio perché trattasi di un prototipo, si osserva su ogni componente la presenza di bave sugli spigoli le quali, tramite un bisturi, devono essere eliminate per impedire degli attriti che in realtà non esisterebbero.

Causa il materiale di cui è composto il prototipo, la sua superficie risulta essere alquanto viscosa al tatto, e per eludere il problema si interpone tra due superfici striscianti del grasso.

Di seguito si riporta una serie di immagini raffiguranti le parti del prototipo realizzato.

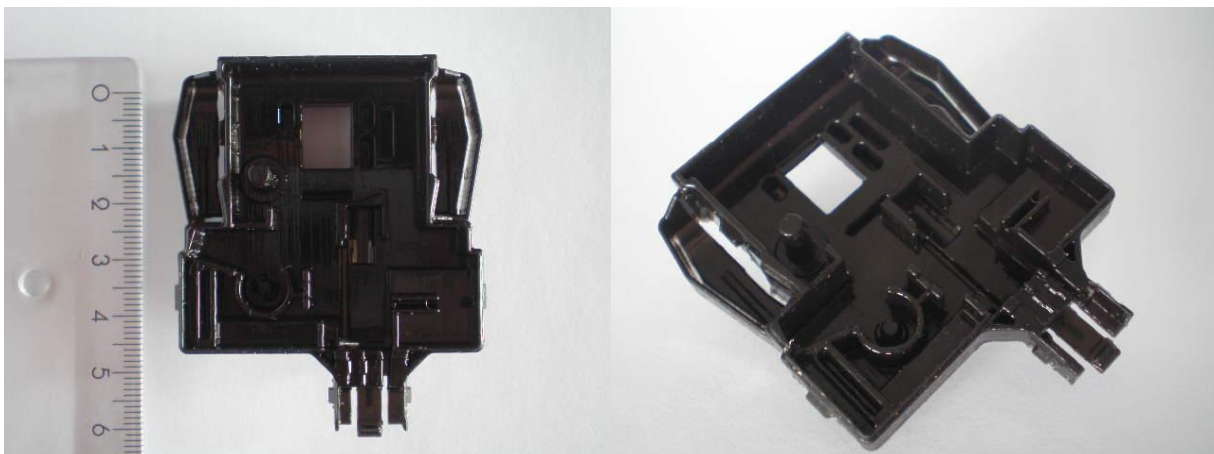


Fig.4.3: corpo.

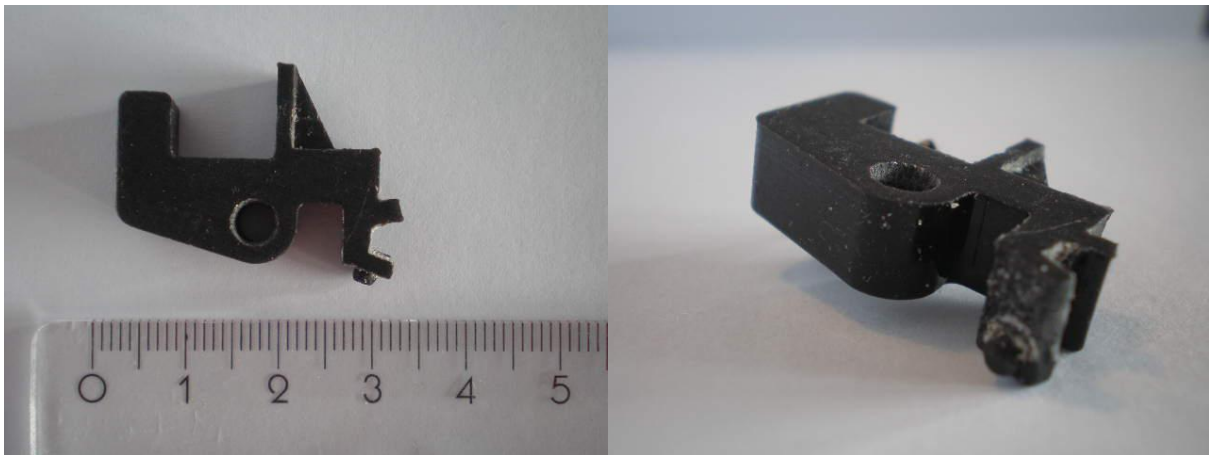


Fig.4.4: ganascia.



Fig.4.5: sensing.

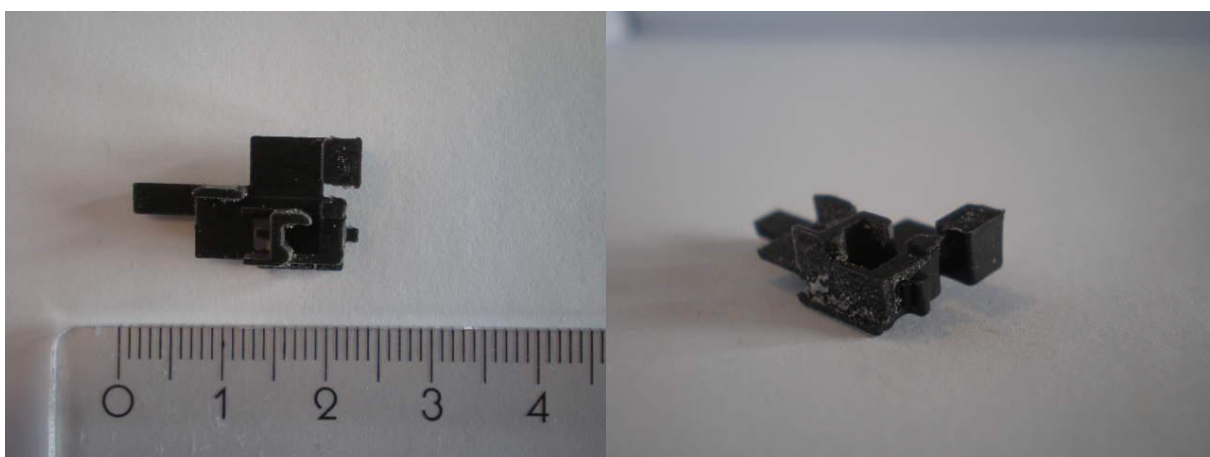


Fig.4.6: slitta.

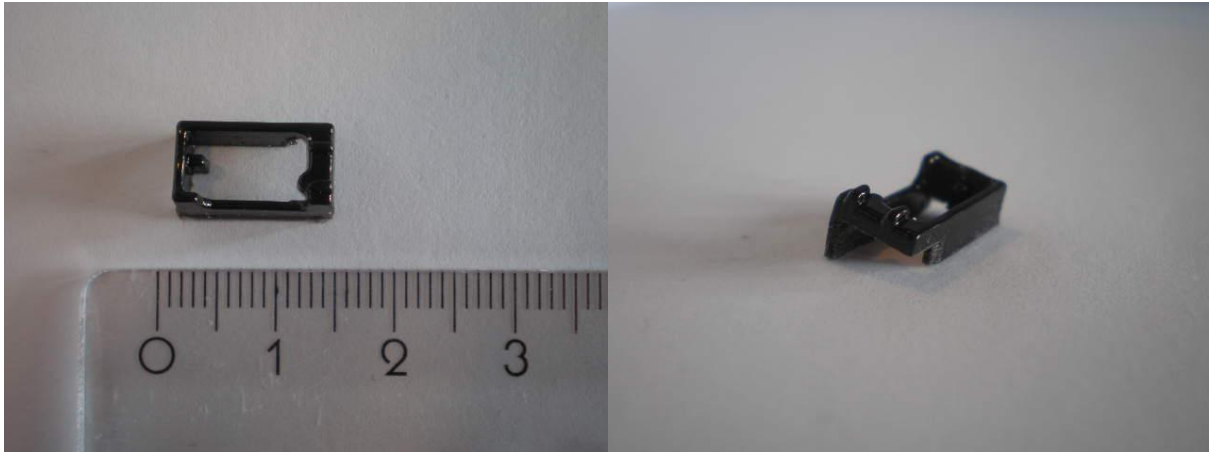


Fig.4.7: sicurezza.



Fig.4.8: slitta e sicurezza.

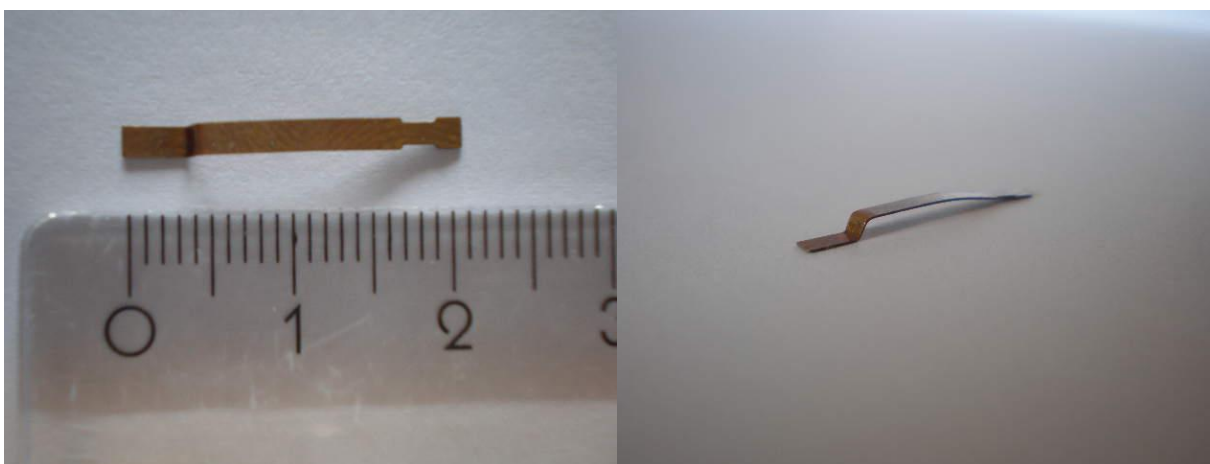


Fig.4.9: linguetta centrale.

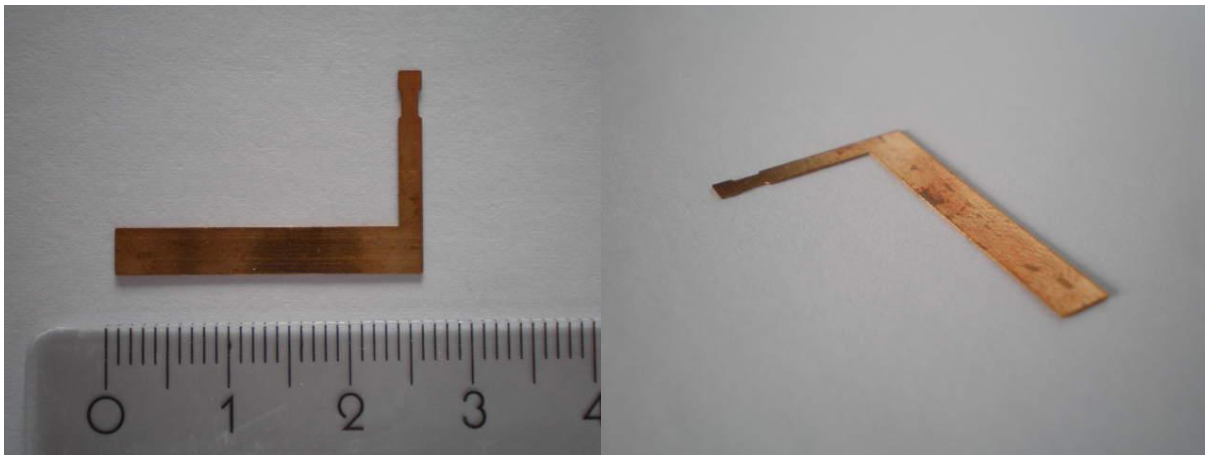


Fig.4.10: linguetta laterale.



Fig.4.11: contatto centrale.

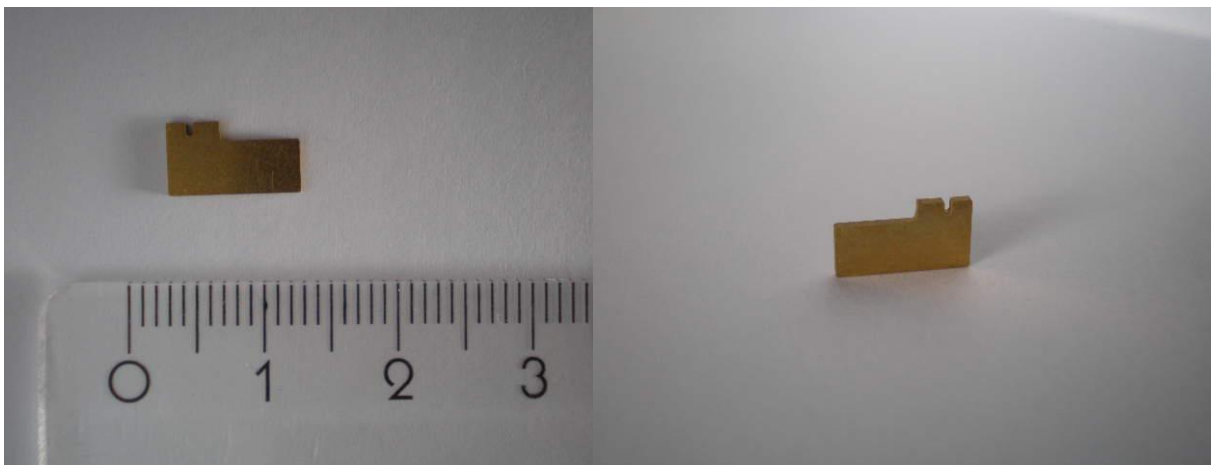


Fig.4.12: contatto laterale.

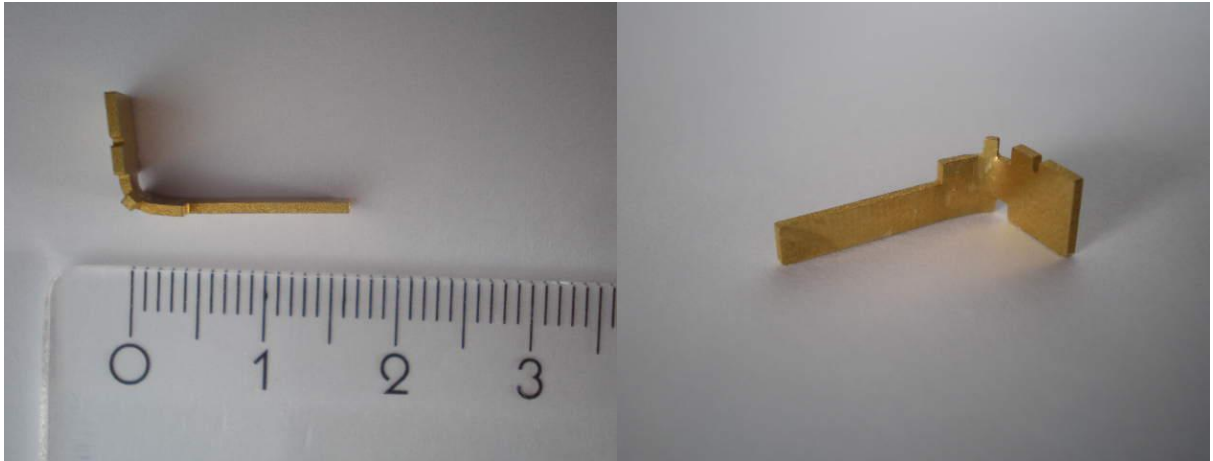


Fig.4.13: contatto mobile.

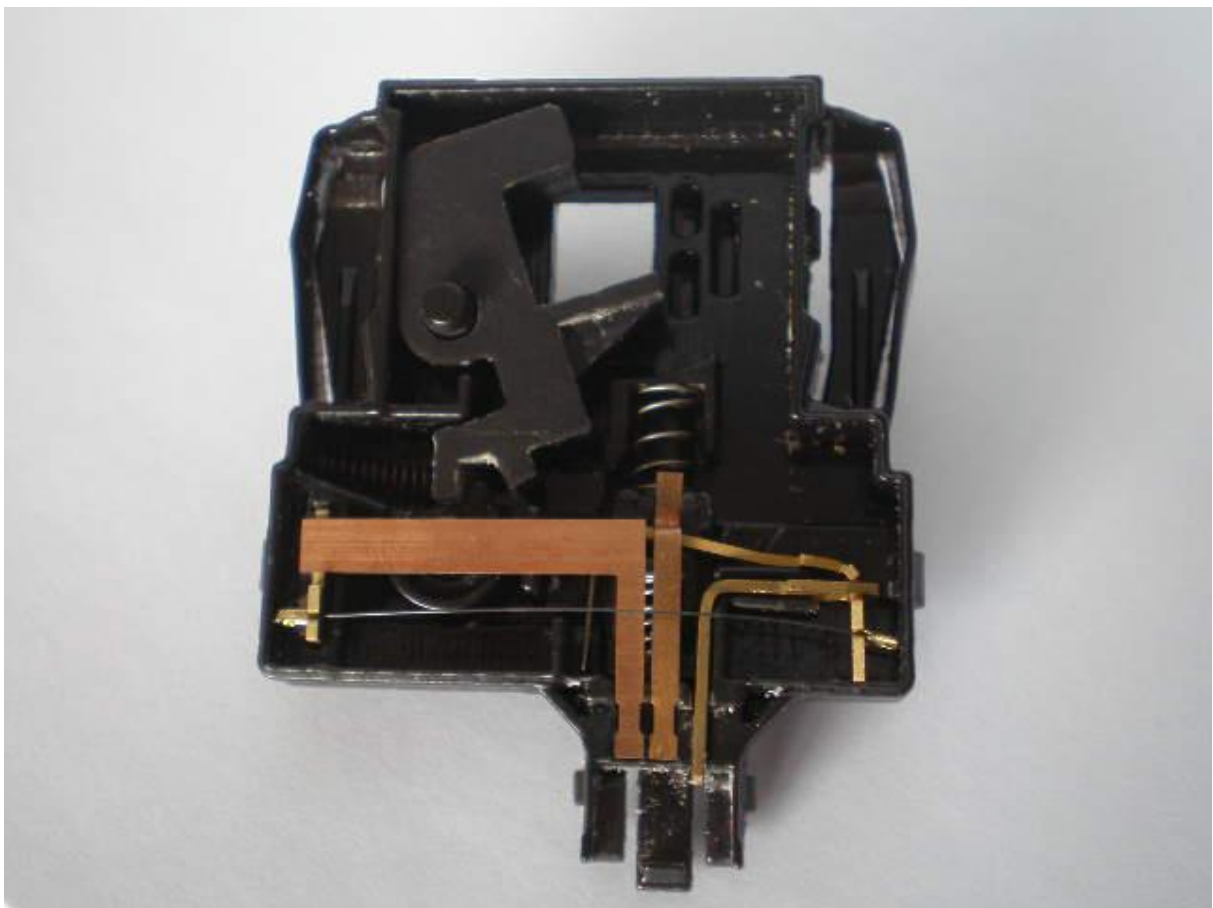


Fig.4.13: bloccoporta SMA.

4.3 Prove di laboratorio

Una volta terminata la realizzazione del prototipo in tutte le sue parti si procede al montaggio dei componenti e all'esecuzione di prove di laboratorio.

Si è deciso di studiare tutte le problematiche di realizzazione "step by step": valutando infatti una problematica alla volta si è cercato di rendere ininfluenti alcune possibili cause che avrebbero potuto fuorviare dalla soluzione.

4.3.1 Filo da 76 μm e contro-molla

Uno dei primi studi effettuati ha riguardato proprio la contro-molla per il filo SMA. A livello teorico, grazie al calcolo semplificato di attriti e di forze in gioco (vedi Allegato 2), si è arrivati alla progettazione di una molla con una costante elastica pari a 0.098 N/mm, notevolmente bassa.

Vi era quindi la certezza che il filo riuscisse a portarsi nella posizione intermedia ma non che, una volta dato il secondo impulso, questo tornasse nella posizione iniziale a causa della molla troppo debole.

Per le prime prove che sono state effettuate con molle che presentavano una costante elastica di circa 0.2 N/mm (quasi il doppio di quella di progetto), sono state utilizzate molle già utilizzate dall'azienda in altri progetti sperimentali.

Tuttavia l'utilizzo di questa molla, una volta montato il filo da 76 μm e settato l'alimentatore ad una tensione di circa 1.5 Volt (in modo da ottenere una corrente di circa 0.2 Ampere), non ha permesso il movimento del filo, risultato prevedibile grazie alla progettazione effettuata in precedenza.

A questo punto non restava che utilizzare una molla con una costante elastica inferiore. Per far ciò, si è chiesta la collaborazione del *Mollificio Rhodense*, il quale ha permesso di realizzare molle "su misura" con una costante elastica di 0.12 N/mm, molto prossima a quella di progetto.

L'utilizzo di questa nuova molla, una volta sostituita alla precedente, ha permesso il movimento del filo portandolo nella posizione intermedia, o di blocco, ma nonostante il secondo impulso, il filo non tornava nella sua posizione iniziale a causa della molla ancora troppo debole.

Grazie alla sperimentazione e al collaudo sul campo del prototipo si è potuto avere conferma che la precisione richiesta dalla costante elastica della molla per questo progetto, utilizzando un filo SMA da 76 μm , è troppo elevata: ottenere una molla che sia funzionale in tutte le circostanze non è facile, soprattutto se si pensi che fino ad ora non si è ancora tenuto conto della deriva del filo.

Ciò ha portato inevitabilmente a concludere che con questa tipologia di meccanica non si riescano a sfruttare al massimo le potenzialità del filo: la soluzione ottimale sarebbe riprogettare un sistema in cui il filo e la molla siano concentrici. Inoltre, sembrerebbe più affidabile progettare una meccanica che consenta al NiTiNOL di ritornare nella sua posizione iniziale per ogni impulso che riceve, senza fermarsi nella posizione intermedia attualmente progettata.

4.3.2 Filo da 150 μm e contro-molla

Date le problematiche riscontrate con l'utilizzo del filo da 76 μm e dopo l'analisi delle prove effettuate in *SAES Getters* riportate nel capitolo terzo, si è deciso di abbandonare la strada fin qui percorsa e utilizzare il filo con un diametro maggiore, cioè di 150 μm .

Risulta immediatamente evidente che mantenendo inalterate le condizioni di lavoro precedentemente messe in luce, lo sforzo sentito da filo è decisamente inferiore (Allegato 2).

Questo ha permesso di utilizzare una molla con una costante elastica maggiore che consentisse al filo di muoversi ma al tempo stesso, desse la certezza di poter permettere il suo ritorno nella posizione iniziale.

La molla campione presa come riferimento, presentava una costante elastica pari a 0.16 N/mm.

Inoltre uno dei fattori maggiormente analizzati e più considerati è stata la corrente di lavoro: si è passati infatti da una corrente di 0.2 Ampere ad una di 0.8 Ampere (con tensione di poco più di 2 Volt), costringendo tuttavia ad abbandonare l'ipotesi di utilizzo di materiali non autoestinguenti.

Si è dunque osservato che il prototipo, in questa sua nuova configurazione, è riuscito a completare alcuni cicli, ed ultimati ulteriori ritocchi progettuali, il NiTiNOL è riuscito a completarne circa 4.000: se si considera che si tratta di un prototipo e di un progetto totalmente innovativo, come prima sperimentazione il risultato non può definirsi totalmente negativo ma, al contrario, incoraggiante.

4.3.3 Crimp e contatti elettrici

Un'ulteriore problematica che ha portato a riflettere sulle carenze della meccanica fin qui utilizzata riguarda il contatto tra i crimp del filo e i contatti elettrici.

Quello che si è più volte osservato, sia nel filo da 76 μm che in quello da 150 μm , è la possibilità di una mancanza di contatto che impediva il passaggio di corrente e quindi di attivazione del filo.

Una volta che il filo viene posto sui contatti elettrici, proprio grazie alla configurazione della leva, nella posizione iniziale si trova ben teso. Dato il primo impulso, il filo si accorciava consentendo di eseguire il blocco. Il problema sorgeva in questa posizione, quella intermedia: con il secondo impulso il filo non dava segni di vita.

Grazie all'utilizzo del rilevatore di corrente presente nell'alimentatore, si è potuto riscontrare che non vi era passaggio di corrente attraverso il filo e questo è stato attribuito al fatto che i crimp e i contatti elettrici non erano più collegati.

Per ovviare a questa complicazione, si è pensato di saldare i crimp ai contatti elettrici e questo ha risolto il problema: infatti, anche in posizione intermedia si è osservato il passaggio di corrente.

4.3.4 Ulteriori problematiche

Si sono riscontrate inoltre altre complicazioni legate però ad attriti o a contatti impreveduti tra le parti in movimento.

La causa di queste problematiche si può ricondurre al fatto che trattandosi di un prototipo prodotto da resina liquida e solidificata tramite laser, le tolleranze dimensionali vengono meno e quindi la precisione su alcune parti del progetto sono vanificate.

È bastato utilizzare una semplice limetta con la quale è stato possibile togliere parte di materiale e consentire un movimento fluido.

4.4 Analisi dei costi

Come per ogni progetto, una volta realizzato il prototipo, l'ultimo test da superare, e forse il più importante di tutti, è quello relativo al costo di produzione del prodotto.

Nonostante un progetto possa ritenersi innovativo e rivoluzionario, il valore economico ad esso attribuito resta sempre il vincolo che ne impedisce la produzione su larga scala oppure, al contrario, ciò che ne giustifica la diffusione e commercializzazione.

Si presenta quindi in questo paragrafo un'analisi indicativa ma accurata dei costi, basata sui prezzi attuali di mercato.

L'analisi dei costi è stata così suddivisa:

- Costo del singolo componente polimerico;
- Costo del singolo componente elettrico;
- Costo del filo;
- Costi di produzione.

4.4.1 Costo del singolo componente polimerico

Il primo passo compiuto, è stato quello di calcolare l'ingombro volumetrico di ogni componente del bloccoporta SMA.

Ci si è inoltre basati su due tipologie di materiali principalmente impiegati per la fabbricazione dei bloccoporta attualmente in commercio:

- PA6, 30% fibra vetro con il quale si realizzeranno il corpo, il coperchio, il sensing e la slitta;
- PA6, 50% fibra vetro con il quale si realizzeranno i componenti più sollecitati come la ganascia e la sicurezza.

Nella tabella sottostante si riportano nel dettaglio tutti i parametri necessari per il calcolo dei costi del singolo componente.

Facendo fede all'ultimo aggiornamento di mercato il costo del polimero era valutato pari a:

- PA6, 30% vetro = 3 Euro/Kg
- PA6, 50% vetro = 3.2 Euro/Kg

Tabella 4.1: riassunto dei costi dei singoli componenti polimerici.

	volume [mm ³]	densità [g/mm ³]	massa [g]	massa [Kg]	PA6 30% [€]	PA6 50% [€]
corpo	5608,811	0,00135	7,57189485	0,007571895	0,022715685	
coperchio	3334,912	0,00135	4,502131172	0,004502131	0,013506394	
ganascia	1925,571	0,00135	2,59952085	0,002599521		0,00831847
sensing	175,872	0,00135	0,237426908	0,000237427	0,000712281	
camma	470,982	0,00135	0,635825712	0,000635826	0,001907477	
sicurezza	120,363	0,00135	0,162490109	0,00016249		0,00051997
Totale Euro =					0,04768027	

4.4.2 Costo del singolo componente elettrico

Una volta stabiliti i materiali (ottone e bronzo) con i quali realizzare i contatti elettrici e le linguette, è stato necessario valutare la migliore distribuzione dei componenti elettrici lungo il passo disponibile sul nastro di materiale prescelto al fine di ridurre al minimo lo sfrido (lo scarto) e quindi i costi.

Per fornire al lettore una maggiore chiarezza, si ritiene opportuno spiegare alcune voci presenti nella tabella sottostante.

Tabella 4.2: riassunto dei costi dei singoli componenti elettrici.

	materiale	costo materiale [€/Kg]	Larghezza nastro [mm]	Spessore [mm]	Numero impronte	Passo [mm]	Densità [Kg/dm ³]	Impiego [Kg]	Costo contatto+sfrido [€]
contatto centrale	Ottone	6	32	0,8	1	7,5	8	0,001536	0,009216
contatto laterale	Ottone	6	26	0,8	2	7,4	8	0,000616	0,00369408
contatto mobile	Ottone	6	25	0,8	1	7,7	8	0,001232	0,007392
linguetta centrale	Bronzo	7,7	33	0,2	1	4	8	0,000211	0,00162624
linguetta laterale	Bronzo	7,7	40	0,2	1	7,9	8	0,000506	0,00389312
Totale Euro =								0,02582144	

Il passo rappresenta il valore dello spostamento del nastro per ogni colpo dello stampo; il numero d'impronte, fornito dallo stampo stesso, rappresenta la quantità dei componenti che vengono realizzati all'interno del passo stabilito in precedenza. Realizzare l'impronta di uno stampo per trincee non significa che ad ogni colpo corrisponda la produzione del componente finito, al contrario, in modo particolare per le trancerie la misura e lo studio del passo risulta indispensabile per la corretta realizzazione dello stampo. L'orizzontalità della lavorazione di

una trancia infatti, permette la realizzazione di prodotti che possano subire anche piegature di oltre 90°, ma proprio per questa caratteristica è necessario che la realizzazione del componente subisca diversi passaggi di produzione. In modo particolare l'avanzamento del passo appunto, caratterizza ogni singolo passaggio che deve subire il prodotto prima di essere definitivamente tranciato. Concettualmente lo stampo rappresenta un negativo del prodotto da realizzare, strutturato in più componenti, che eliminano colpo su colpo i “vuoti” attorno al prodotto che si vuole realizzare, e non al contrario, direttamente il prodotto.

È intuitivo che l'aumento del numero d'impronte al diminuire del passo, comporta una riduzione dei costi.

Nell'ultima colonna si riporta il costo del singolo contatto, quindi quello che realmente verrà utilizzato, sommato allo sfrido, cioè al materiale di scarto; quest'ultimo però, può essere recuperato e venduto a enti di riciclaggio consentendo una riduzione dei costi (nel presente lavoro di tesi, questo particolare non è stato preso in considerazione).

Di seguito si riporta un esempio delle possibili modalità di fabbricazione della linguetta laterale.

In Figura 4.14 si può osservare un ipotetico punzone in grado, una volta stabilito il passo, di ricavare in due semplici passaggi la linguetta laterale dalla lamina di bronzo.

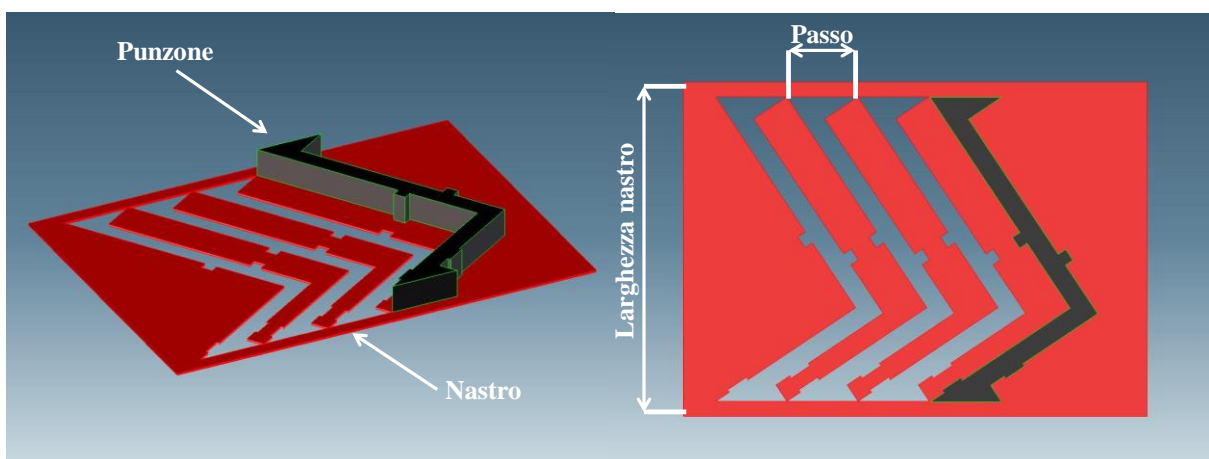


Fig.4.14: rappresentazione di un ipotetico punzone che agisce su un nastro di bronzo per la realizzazione della linguetta laterale.

4.4.3 Costo del filo

È il calcolo più semplice da effettuare.

Oggi giorno, il costo del filo si aggira intorno ai 3 euro al metro; poiché nel progetto si utilizza una quantità di filo pari a 40 mm, il costo del filo risulta essere di 0,12 Euro.

4.4.4 Costi di produzione

Sono i costi necessari per la realizzazione dei componenti, quindi i costi macchina, i costi della corrente, i costi dell'operatore e i costi di montaggio.

Anche in questo caso si è ritenuto opportuno dividere i componenti polimerici da quelli metallici.

Tab.4.3: componenti polimerici

	Numero impronte	Tempo ciclo [sec]	Tempo del singolo componente [sec]	Tempo del singolo componente [h]	Costo orario macchina [€/h]	Costo del singolo componente [€]	Costo stampo [€]
corpo	4	26	6,5	0,001805556	22	0,039722222	60000
coperchio	4	26	6,5	0,001805556	22	0,039722222	60000
ganascia	4	22	5,5	0,001527778	17	0,025972222	35000
sensing	8	22	2,75	0,000763889	17	0,012986111	25000
camma	4	22	5,5	0,001527778	17	0,025972222	25000
sicurezza	8	22	2,75	0,000763889	17	0,012986111	20000
totale =						0,157361111	

Tab.4.4: componenti metallici

	Numero impronte	Tempo ciclo [sec]	Tempo del singolo componente [sec]	Tempo del singolo componente [h]	Costo orario macchina [€/h]	Costo del singolo componente [€]	Costo stampo [€]
contatto centrale	1	0,5	0,5	0,000138889	80	0,011111111	25000
contatto laterale	1	0,5	0,5	0,000138889	80	0,011111111	20000
contatto mobile	1	0,5	0,5	0,000138889	80	0,011111111	20000
linguetta centrale	1	0,5	0,5	0,000138889	80	0,011111111	20000
linguetta laterale	1	0,5	0,5	0,000138889	80	0,011111111	20000
totale						0,055555556	

Sommando tutti i valori ottenuti seguendo i criteri sopra riportati, si ottiene un valore indicativo del blocco porta SMA pari a 0.40 €.

A tutti questi costi bisogna aggiungere però due ulteriori voci:

- Costo di montaggio: per semplicità, nel presente lavoro di tesi si è ipotizzato di effettuare il montaggio manuale. Il blocco porta è costituito da undici componenti; se si ipotizzano circa 6 secondi per ogni operazione a 5 centesimi l'una, il costo del montaggio manuale risulta essere pari a 0.55 €.
- Collaudo e imballaggio: una volta che il pezzo è stato prodotto diventa fondamentale effettuare i test di collaudo al fine di verificare la corretta produzione e garantire il funzionamento. Il costo previsto per questa fase, compreso l'imballaggio, risulta essere pari a 0.1 €.

Complessivamente quindi, il costo del bloccoporta SMA si porta a circa 1 €, in totale accordo con gli attuali prezzi di mercato.

Lo svantaggio principale risiede nel fatto che il progetto realizzato in questo lavoro di tesi, non presenta la modularità dell'aggancio all'oblò e quindi la produzione diventerebbe più complessa perché porterebbe a cambiare stampo a seconda delle richieste del cliente.

Sarebbe quindi più corretto valutare la possibilità di compiere uno studio relativo all'osservazione sopra riportata, che inevitabilmente porterà ad un utilizzo di una maggiore quantità di materiale e quindi ad un costo maggiore, ma in previsione di una produzione su larga scala risulterebbe senza dubbio più conveniente.

Nelle tabelle sopra riportate, tra le voci presenti vi è anche quella riguardante il costo degli stampi: si tratterebbe di un costo d'investimento, quindi molto elevato (la somma risulta essere circa 380.000 €) che però verrà ammortizzato nel corso degli anni a seconda della quantità di pezzi prodotti.

Capitolo quinto

Conclusioni

Un progetto innovativo, si sa, difficilmente alla prima realizzazione può ritenersi completo e affidabile ma, nonostante ciò, lo studio effettuato nel presente lavoro di tesi può ritenersi un'ottima base di partenza per uno sviluppo futuro più approfondito consentendo di ottenere l'affidabilità richiesta nei sistemi di sicurezza.

Partendo dalle specifiche, sempre più restrittive e limitative, richieste dalle case costruttrici di macchine lavabiancheria e dalle proprietà della SMA (Shape Memory Alloy) si è pensato di sviluppare un progetto innovativo con il fine di valutare la possibilità d'impiego del NiTiNOL, il filo a memoria di forma, nei sistemi di sicurezza.

L'obiettivo era di ottenere un oggetto che permettesse di lavorare in bassa tensione e bassa corrente consentendo l'utilizzo di materiali con proprietà non autoestinguenti e quindi con un costo inferiore per la casa realizzatrice. Tuttavia, a causa delle proprietà intrinseche della lega

Nichel - Titanio presa in esame, lo svolgimento del progetto ha portato a comprendere che non sarebbe stato possibile raggiungere tale obiettivo.

Infatti, se inizialmente si pensava di utilizzare il filo di diametro 76 μm , poiché l'unico che consentisse di lavorare a correnti inferiori a 0,2 Ampere, si è dovuto repentinamente modificare la premessa in quanto la meccanica studiata e la temperatura di lavoro comportavano la nascita di forze e di sollecitazioni troppo onerose per il filo.

Questo fatto ha inevitabilmente compromesso l'obiettivo iniziale, ma ciò non ha impedito di portare a termine lo studio del progetto obbligando però ipotesi, idee e impegno a ripiegarsi sull'utilizzo del filo con diametro maggiore, cioè il filo da 150 μm .

La decisione di utilizzare un filo con diametro maggiore ha consentito di diminuire la severità delle condizioni di lavoro, risultando meno onerose, ma non ha permesso di mantenere il valore di tensione al di sotto del limite prefissato di 0,2 Ampere.

Tutto lo studio fin qui compiuto è stato in seguito concretizzato con la realizzazione di un prototipo che ha permesso di eseguire test e prove di laboratorio che hanno consentito di capire limiti, pregi e difetti del progetto realizzato, portando a un continuo miglioramento.

In ultima analisi, si può affermare che lo studio sviluppato nel presente lavoro di tesi possa ritenersi alquanto soddisfacente specie pensando al fatto che si tratti di un prodotto totalmente sperimentale.

Il possibile sviluppo futuro, che potrebbe portare al completamento e al perfezionamento del bloccoporta SMA, risiede nello studio di un filo a memoria di forma per alte temperature poiché proprio quest'ultima costituisce il limite iniziale e invalicabile dal quale insorgono tutte le altre problematiche.

Lo studio di questa tipologia di fili è già in fase di sviluppo da qualche tempo ma, trattandosi di materiali innovativi persino ai giorni nostri, non è considerabile che siano trovate soluzioni economiche e industrialmente sostenibili nel breve periodo, proprio per la caratteristica principale della ricerca e dell'innovazione: il bisogno di tempo e di denaro. Studiare i comportamenti dei materiali, le loro caratteristiche, i vincoli e i pregi che ne derivano, proprio come si apprende da questo lavoro di tesi, richiedono una quantità di tempo e di energie che difficilmente si accostano al campo dell'industria commerciale. Tuttavia la ricerca e l'innovazione sono un bene prezioso e indispensabile per il futuro, senza le quali molte delle scoperte, in qualunque settore, non sarebbero state possibili.

Rimane solo all'uomo la decisione di investire tempo e denaro per il futuro e decidere come utilizzare questo bene prezioso, che è la ricerca, se per il bene comune o per scopi diabolici ed egoistici.

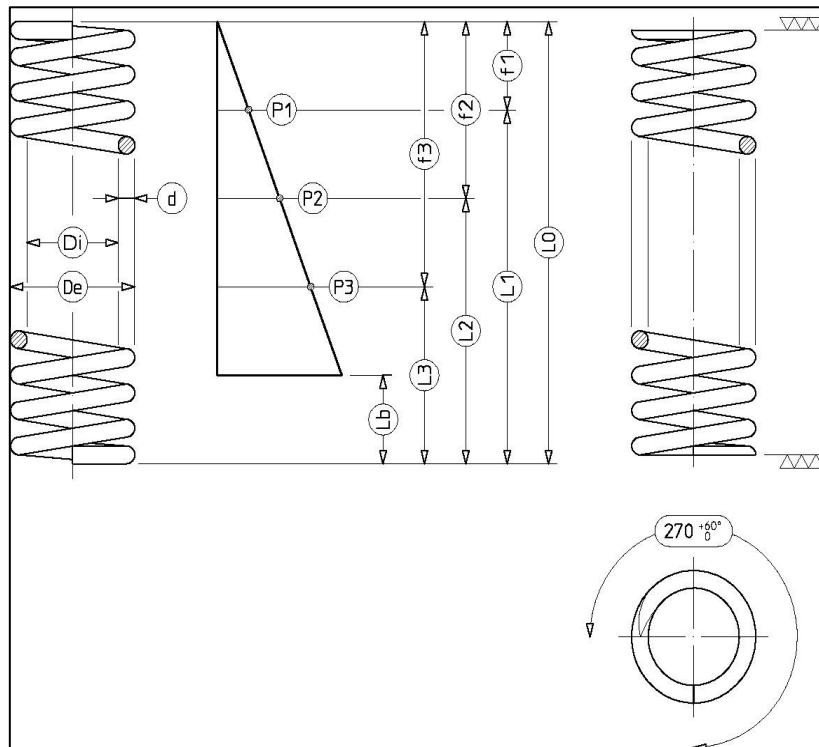
La frenesia e l'impazienza di scoprire e vedere i risultati di qualsiasi sperimentazione nell'immediato, portano a una totale cecità e cinismo che impediscono all'uomo di capire la sua temporanea e affascinante transizione sulla Terra sottovalutando, egoisticamente, l'importanza che questa avrà per le generazioni future.

Bibliografia

- [1] Vincenzo Arrichiello, *Leghe a memoria di forma: caratteristiche ed applicazioni*, Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria, Ottobre 2000
- [2] Colombo Diego, *Teoria ed applicazioni delle leghe a memoria di forma*, Università degli studi di Trento, 1999
- [3] http://it.wikipedia.org/wiki/Memoria_di_forma, Dicembre 2009
- [4] http://www.ing.unitn.it/~colombo/APPLICAZIONE_DELLE_LEGHE_A_MEMORIA_DI_FORMA/41applicazioni%20senso-attua.html, Dicembre 2009
- [5] http://www.ricercaitaliana.it/prin/dettaglio_completo_prin-2004083255.htm#base, Dicembre 2009
- [6] Cucco Jennifer, *Attuatori SMA per laminati intelligenti: problematiche e tecnologie funzionali*, tesi di laurea svolta presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Anno Accademico 2007-2008
- [7] Mel Schwartz, *Enciclopedia of Smart Materials*, Wiley-Interscience, 2002
- [8] Ausonio Tuissi, M.R. Mitchell, Josè San Juan, *SMST-2008*, ASM International, 2008

ALLEGATO 1 - Schede tecniche delle molle

Nell'allegato sono riportate le schede tecniche delle tre molle utilizzate nel bloccoporta SMA. Nella figura sottostante si può osservare una rappresentazione schematica della molla con le relative indicazioni dei simboli utilizzati nelle schede tecniche.



Dove:

- L_0 = lunghezza libera;
- L_1 = lunghezza di lavoro corrispondente alla freccia f_1 e carico P_1 ;
- L_2 = lunghezza di lavoro corrispondente alla freccia f_2 e carico P_2 ;
- L_3 = lunghezza di lavoro corrispondente alla freccia f_3 e carico P_3 ;
- L_b = lunghezza di blocco;
- D_i = diametro interno della molla;
- D_e = diametro esterno della molla;
- d = diametro del filo della molla.

Molla ganascia

Diametro filo	D	mm	0,35	±0.01
Diametro esterno	De	mm	3,35	
Diametro medio	Dm	mm	3,00	
Diametro interno	Di	mm	2,65	
Lunghezza libera	L0	mm	11,50	
N° di spire utili	N		12,00	
N° di spire totali	Nt		14,00	
Lunghezza di lavoro	L1	mm	9,50	20%
Freccia a L1	f1	mm	2,00	
Carico a L1	P1	N	0,84	
Sollecitazione a L1	Kt1	N/mm²	175,12	
Lunghezza di lavoro	L2	mm	6,50	
Freccia a L2	f2	mm	5,00	
Carico a L2	P2	N	2,10	
Sollecitazione a L2	Kt2	N/mm²	437,81	
Lunghezza di lavoro	L3	mm	6,80	
Freccia a L3	f3	mm	4,70	
Carico a L3	P3	N	1,97	
Sollecitazione a L3	Kt3	N/mm²	411,54	
Lunghezza di blocco	Lb	mm	5,25	
Freccia a blocco	fb	mm	6,25	
Carico a blocco	Pb	N	2,62	
Sollecitazione a blocco	Ktb	N/mm²	547,26	
Costante elastica	CE	N/mm	0,420	
Modulo di elasticità	G	N/mm²	72500,00	
Sollecitazione massima	Ktmax	N/mm²	411,54	
Rapporto Dm/D			8,57	
Coefficiente di correzione sollecitazione			1,17	
Lunghezza spire utili		mm	10,80	
Passo tra le spire utili		mm	0,83	
Spazio tra le spire utili		mm	0,48	
Spire terminali accostate		mm	0,35	
Antigrovigliamento	NO	Differenza		

Stabilità della molla

verificare che: $\frac{Z}{\lambda} > 0.382$

dove: $\lambda = \frac{L_0}{D_m}$

$\lambda = 3,83$

$Z = 1,5$ (da tabella)

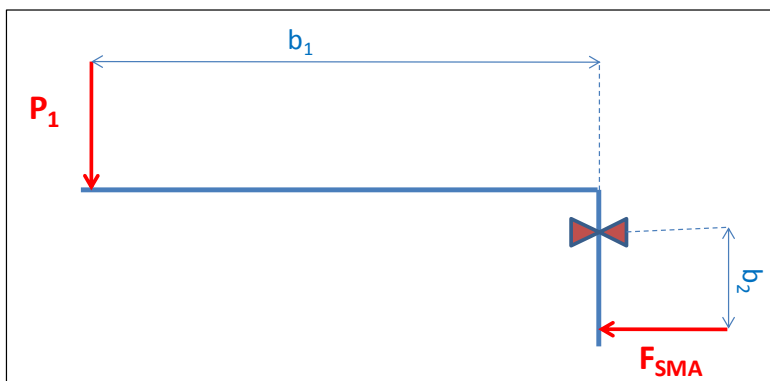
$Z / \lambda = 0,3913$

La molla è stabile

Molla SMA 76 μm

Dal momento che il filo SMA agisce su una leva, diventa importante andare ad analizzare le forze e gli sforzi presenti durante l'azionamento del filo.

Facendo riferimento allo schema riportato qui sotto, e impostando il problema ipotizzando una temperatura di lavoro intorno ai 40 °C, il carico iniziale necessario per permettere il ritorno del filo nella posizione iniziale risulta essere pari a 100 MPa.



DATI:

- $\sigma_{\text{SMA}} = 100 \text{ MPa}$
- $b_1 = 12 \text{ mm}$
- $b_2 = 3 \text{ mm}$
- $D_{\text{SMA}} = 76 \mu\text{m}$

Dal diametro del filo si calcola l'area:

$$\text{➤ } A_{\text{SMA}} = 0,004534 \text{ mm}^2$$

Trovata la sezione è possibile calcolare la forza del filo:

$$\text{➤ } F_{\text{SMA}} = \sigma_{\text{SMA}} * A_{\text{SMA}} = 0,453416 \text{ N}$$

Risolviendo l'equazione:

$$\text{➤ } F_{\text{SMA}} * b_2 = P_1 * b_1$$

Ricaviamo:

$$\text{➤ } P_1 = 0,193354 \text{ N}$$

Dove P_1 rappresenta il carico della molla alla lunghezza di lavoro L_1 .

Di seguito si riporta la scheda tecnica della molla SMA studiata in base al valore dal carico iniziale sopra calcolato.

Diametro filo	D	mm	0,30	±0.01
Diametro esterno	De	mm	5,30	
Diametro medio	Dm	mm	5,00	
Diametro interno	Di	mm	4,70	
Lunghezza libera	L0	mm	11,00	
N° di spire utili	N		6,00	
N° di spire totali	Nt		12,00	
Lunghezza di lavoro	L1	mm	9,00	20%
Freccia a L1	f1	mm	2,00	
Carico a L1	P1	N	0,20	
Sollecitazione a L1	Kt1	N/mm²	100,13	
Lunghezza di lavoro	L2	mm	5,00	
Freccia a L2	f2	mm	6,00	
Carico a L2	P2	N	0,59	
Sollecitazione a L2	Kt2	N/mm²	300,40	
Lunghezza di lavoro	L3	mm	4,00	
Freccia a L3	f3	mm	7,00	
Carico a L3	P3	N	0,69	
Sollecitazione a L3	Kt3	N/mm²	350,47	
Lunghezza di blocco	Lb	mm	3,90	
Freccia a blocco	fb	mm	7,10	
Carico a blocco	Pb	N	0,69	
Sollecitazione a blocco	Ktb	N/mm²	355,48	
Costante elastica	CE	N/mm	0,098	
Modulo di elasticità	G	N/mm²	72500,00	
Sollecitazione massima	Ktmax	N/mm²	350,47	
Rapporto Dm/D			16,67	
Coefficiente di correzione sollecitazione			1,08	
Lunghezza spire utili		mm	9,20	
Passo tra le spire utili		mm	1,31	
Spazio tra le spire utili		mm	1,01	
Spire terminali accostate		mm	0,90	
Antigrovigliamento	NO	Differenza		

Stabilità della Molla

verificare che: $\frac{Z}{\lambda} > 0.382$

dove : $\lambda = \frac{L_0}{D_m}$

$\lambda = 2,20$

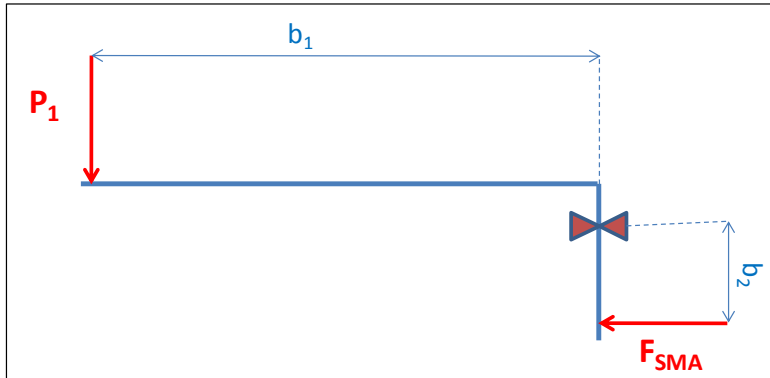
$Z = 1,5$ (da tabella)

$Z/\lambda = 0,68182$

La molla è stabile

Molla SMA 150 μm

Come nel caso del filo SMA da 76 mm, è necessario studiare anche per il filo da 150 mm il carico della molla alla lunghezza L_1 .



DATI:

- $\sigma_{\text{SMA}} = 100 \text{ MPa}$
- $b_1 = 12 \text{ mm}$
- $b_2 = 3 \text{ mm}$
- $D_{\text{SMA}} = 150 \mu\text{m}$

Dal diametro del filo si calcola l'area:

$$\text{➤ } A_{\text{SMA}} = 0,017663 \text{ mm}^2$$

Trovata la sezione è possibile calcolare la forza del filo:

$$\text{➤ } F_{\text{SMA}} = \sigma_{\text{SMA}} * A_{\text{SMA}} = 1,76625 \text{ N}$$

Risolvendo l'equazione:

$$\text{➤ } F_{\text{SMA}} * b_2 = P_1 * b_1$$

Ricaviamo:

$$\text{➤ } P_1 = 0,441563 \text{ N}$$

Dove P_1 rappresenta il carico della molla alla lunghezza di lavoro L_1 .

Di seguito si riporta la scheda tecnica della molla SMA studiata in base al valore dal carico iniziale sopra calcolato.

Diametro filo	D	mm	0,35	±0.01
Diametro esterno	De	mm	4,85	
Diametro medio	Dm	mm	4,50	
Diametro interno	Di	mm	4,15	
Lunghezza libera	L0	mm	11,00	
N° di spire utili	N		7,00	
N° di spire totali	Nt		10,00	
Lunghezza di lavoro	L1	mm	9,00	20%
Freccia a L1	f1	mm	2,00	
Carico a L1	P1	N	0,43	
Sollecitazione a L1	Kt1	N/mm ²	126,62	
Lunghezza di lavoro	L2	mm	5,00	
Freccia a L2	f2	mm	6,00	
Carico a L2	P2	N	1,28	
Sollecitazione a L2	Kt2	N/mm ²	379,87	
Lunghezza di lavoro	L3	mm	6,00	
Freccia a L3	f3	mm	5,00	
Carico a L3	P3	N	1,07	
Sollecitazione a L3	Kt3	N/mm ²	316,56	
Lunghezza di blocco	Lb	mm	3,85	
Freccia a blocco	fb	mm	7,15	
Carico a blocco	Pb	N	1,52	
Sollecitazione a blocco	Ktb	N/mm ²	452,67	
Costante elastica	CE	N/mm	0,213	
Modulo di elasticità	G	N/mm ²	72500,00	
Sollecitazione massima	Ktmax	N/mm ²	316,56	
Rapporto Dm/D			12,86	
Coefficiente di correzione sollecitazione			1,11	
Lunghezza spire utili		mm	9,95	
Passo tra le spire utili		mm	1,24	
Spazio tra le spire utili		mm	0,89	
Spire terminali accostate		mm	0,53	
Antigrovigliamento	NO	Differenza		

Stabilità della Molla

verificare che: $\frac{Z}{\lambda} > 0.382$

dove : $\lambda = \frac{L_0}{D_m}$

$\lambda = 2,44$

$Z = 1,5$ (da tabella)

$Z/\lambda = 0,6136$

La molla è stabile

Molla sicurezza

Diametro filo	D	mm	0,35	±0.01
Diametro esterno	De	mm	3,35	
Diametro medio	Dm	mm	3,00	
Diametro interno	Di	mm	2,65	
Lunghezza libera	L0	mm	8,50	
N° di spire utili	N		10,00	
N° di spire totali	Nt		12,00	
Lunghezza di lavoro	L1	mm	6,50	20%
Freccia a L1	f1	mm	2,00	
Carico a L1	P1	N	1,01	
Sollecitazione a L1	Kt1	N/mm ²	210,15	
Lunghezza di lavoro	L2	mm	4,50	
Freccia a L2	f2	mm	4,00	
Carico a L2	P2	N	2,01	
Sollecitazione a L2	Kt2	N/mm ²	420,30	
Lunghezza di lavoro	L3	mm	6,80	
Freccia a L3	f3	mm	1,70	
Carico a L3	P3	N	0,86	
Sollecitazione a L3	Kt3	N/mm ²	178,63	
Lunghezza di blocco	Lb	mm	4,55	
Freccia a blocco	fb	mm	3,95	
Carico a blocco	Pb	N	1,99	
Sollecitazione a blocco	Ktb	N/mm ²	415,04	
Costante elastica	CE	N/mm	0,504	
Modulo di elasticità	G	N/mm ²	72500,00	
Sollecitazione massima	Ktmax	N/mm ²	178,63	
Rapporto Dm/D			8,57	
Coefficiente di correzione sollecitazione			1,17	
Lunghezza spire utili		mm	7,80	
Passo tra le spire utili		mm	0,71	
Spazio tra le spire utili		mm	0,36	
Spire terminali accostate		mm	0,35	
Antigrovigliamento	NO	Differenza		

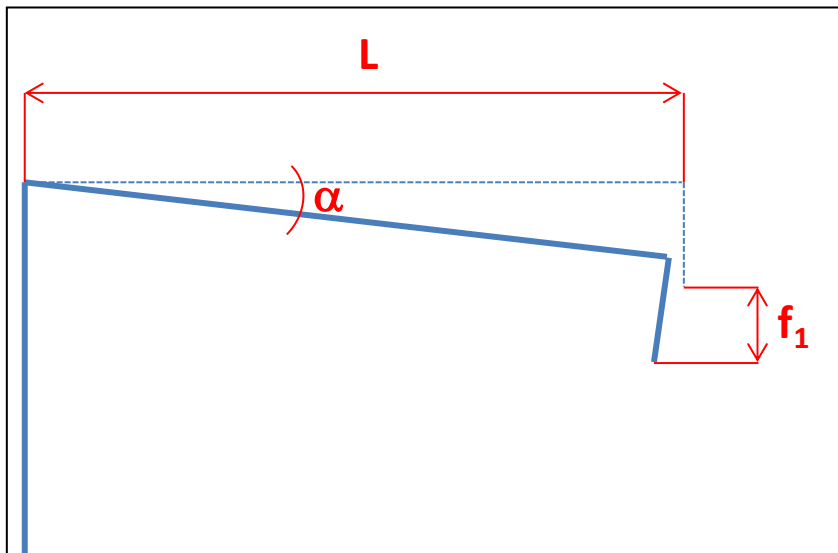
ALLEGATO 2 - Studio semplificato delle forze in gioco

Nell'allegato è riportato lo studio semplificato delle forze presenti all'interno della meccanica del bloccoporta a causa di attriti dovuto a moti relativi tra due componenti.

Si riportano i calcoli effettuati sia per il filo da 76 μm che quello da 150 μm con lo scopo di poter effettuare un confronto e di mettere in luce i passaggi realizzati per arrivare alla soluzione ottimale.

Ai fini di una maggiore comprensione, si riportano per primi i calcoli relativi alla molla di ritegno della camma, in quanto generatrice di forze d'attrito.

Molla di ritegno



DATI

- $L = 10,2 \text{ mm}$
- $\alpha = 3^\circ$
- $E = 205.000 \text{ MPa}$
- $D = 0.45 \text{ mm}$

Data la sezione circolare della molla, il momento d'inerzia lo si può calcolare tramite la seguente espressione:

$$I = 0.0491 * D^4$$

Per il calcolo della freccia, nel caso di un'asta incastrata ad un estremo, si utilizza la seguente espressione:

$$fm = \frac{P * L^3}{3 * I * E}$$

Fase "OFF"

Sapendo che la molla è precaricata con un angolo di 3° , tramite la trigonometria ci calcoliamo la freccia iniziale:

$$f_1 = L \cdot \sin \alpha = 0,5338 \text{ mm}$$

Calcoliamo ora il momento d'inerzia:

$$\text{➤ } I = 0.002 \text{ mm}^4$$

Quindi, ricavando P_1 dalla formula scritta sopra troviamo che:

$$\text{➤ } P_1 = 0.6229 \text{ N}$$

Calcoliamo ora, la forza di attrito statica generata dalla molla sulla camma.

Utilizziamo un coefficiente di attrito pari a:

$$\text{➤ } m = 0.2$$

Si trova che:

$$\text{➤ } F_{\text{attr},1} = P_1 \cdot m = 0.1246 \text{ N}$$

Fase "ON"

La superficie della camma non è tutta sulla stessa altezza, ma vi è la presenza di "gradini". Questo per garantire che la molla di ritegno, una volta raggiunta la posizione intermedia, non torni nella condizione iniziale spontaneamente, ma al contrario venga guidata nella posizione desiderata.

Sapendo quindi della presenza di un gradino alto circa 0,3 mm, è possibile calcolare la forza che la molla di ritegno esercita sulla camma in fase di "on".

In questo caso la freccia f_2 diventa:

$$\text{➤ } f_2 = f_1 + 0,3 = 0,8338 \text{ mm}$$

Quindi il carico diventa:

$$\text{➤ } P_2 = 0,9729 \text{ MPa}$$

Vale a dire una forza di attrito pari a:

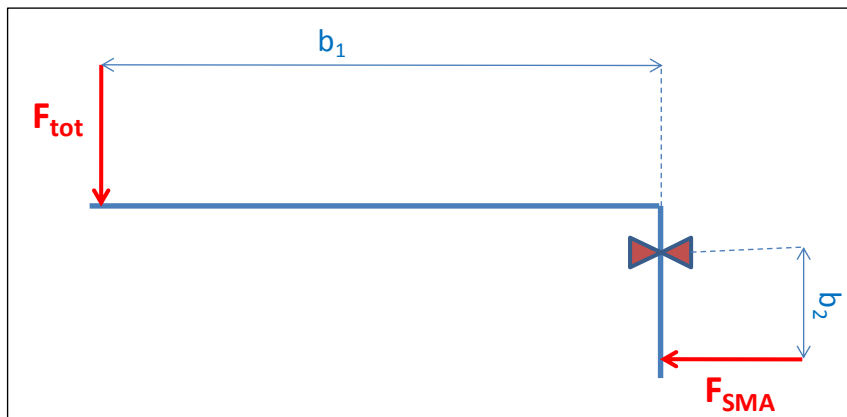
$$\text{➤ } F_{\text{attr},2} = P_2 \cdot m = 0,1946 \text{ N}$$

Smart-flex 76 μm

Terminato il progetto della molla e calcolato le forze di attrito generate dalla molla di ritegno sulla camma, è possibile fare l'analisi delle forze totali presenti tra i vari organi del blocco porta SMA.

Ecco le forze totali in gioco:

- P_1 = forza iniziale della molla in posizione L_1 , necessaria a riportare in posizione il filo SMA una volta disattivato;
- P_2 = forza della molla in posizione L_2 quando il filo SMA è attivato;
- $F_{\text{attr},1}$ = forza di attrito della molla di ritegno sulla camma in posizione "OFF";
- $F_{\text{attr},2}$ = forza di attrito della molla di ritegno sulla camma in posizione "ON";
- F_4 = forza di attrito del cursore-camma sul piano base;
- F_5 = forza di attrito (strisciamento) tra i due contatti elettrici.



DATI:

- $P_1 = 0,19 \text{ N}$
- $P_2 = 0,59 \text{ N}$
- $F_{\text{attr},1} = 0.1246 \text{ N}$
- $F_{\text{attr},2} = 0.1946 \text{ N}$
- $F_4 = 0.02 \text{ N}$
- $F_5 = 0.1 \text{ N}$
- $b_1 = 12 \text{ mm}$
- $b_2 = 3 \text{ mm}$

Tempo $t = 0^+$

Rappresenta l'istante successivo all'azionamento del filo; oltre al carico della molla P_1 , entrano in gioco gli attriti $F_{\text{attr},1}$ e F_4 .

$$\text{➤ } F_{\text{tot}} = P_1 + F_{\text{attr},1} + F_4 = 0,335 \text{ N}$$

E quindi il filo sente una forza pari a:

$$\text{➤ } F_{\text{SMA}} = (F_{\text{tot}} * b_1) / b_2 = 1,338306 \text{ N}$$

Vale a dire:

$$\text{➤ } \sigma_{\text{SMA}} = 295,1608 \text{ MPa}$$

Come si può osservare, risulta essere di gran lunga superiore a quello di progetto.

Tempo t = 1

Una volta che il filo è stato attivato, entreranno in gioco ulteriori attriti e la forza totale diventa:

$$\text{➤ } F_{\text{tot}} = P_2 + F_{\text{attr},2} + F_4 + F_5 = 0,904586 \text{ N}$$

E quindi il filo sente una forza pari a:

$$\text{➤ } F_{\text{SMA}} = (F_{\text{tot}} * b_1) / b_2 = 3,618345 \text{ N}$$

Vale a dire:

$$\text{➤ } \sigma_{\text{SMA}} = 798,0187 \text{ MPa}$$

Notevolmente elevata.

Tempo t = 2

Rappresenta la fase del ritorno nella posizione iniziale del filo.

È necessario quindi verificare che la molla SMA sia in grado di consentire il ritorno nella posizione iniziale di tutto il sistema meccanico.

È possibile quindi scrivere che:

$$\text{➤ } F_{\text{tot}} = P_1 - F_{\text{attr},2} - F_4 - F_5 = -0,12459 \text{ N}$$

Come si può osservare, la forza totale è negativa: questo significa che la costante elastica della molla non è sufficientemente alta da consentire il ritorno nella posizione iniziale del filo SMA.

Bisognerebbe quindi studiare una molla con una costante elastica maggiore.

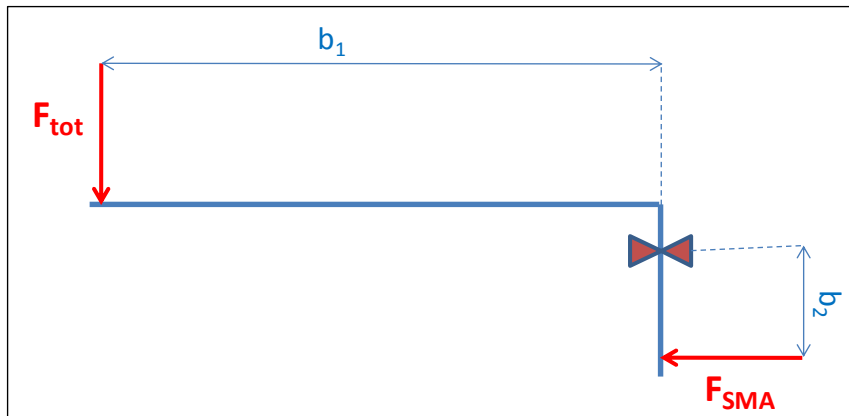
D'altro canto, come è possibile osservare dai calcoli sopra riportati, nonostante la molla sia troppo debole comporta la nascita sul filo di uno sforzo notevole portando ad un elevato affaticamento.

Questo, e la successiva sperimentazione pratica, hanno portato a pensare che il filo da 76 μm non sia l'ideale per questo tipo di meccanica progettata.

Smart-flex 150 μm

Dati i risultati ottenuti con il filo da 76 μm , si è pensato di sviluppare il progetto prendendo in considerazione la possibilità di utilizzare il filo da 150 μm .

Gli attriti in gioco ovviamente sono i medesimi di quelli visti in precedenza ma in particolare si ha:



DATI:

- $P_1 = 0,46 \text{ N}$
- $P_2 = 0,76 \text{ N}$
- $F_{\text{attr},1} = 0,1246 \text{ N}$
- $F_{\text{attr},2} = 0,1946 \text{ N}$
- $F_4 = 0,02 \text{ N}$
- $F_5 = 0,1 \text{ N}$
- $b_1 = 12 \text{ mm}$
- $b_2 = 3 \text{ mm}$

Tempo $t = 0^+$

Rappresenta l'istante successivo all'azionamento del filo; oltre al carico della molla P_1 , entrano in gioco gli attriti $F_{\text{attr},1}$ e F_4 .

$$\text{➤ } F_{\text{tot}} = P_1 + F_{\text{attr},1} + F_4 = 0,605 \text{ N}$$

E quindi il filo sente una forza pari a:

$$\text{➤ } F_{\text{SMA}} = (F_{\text{tot}} * b_1) / b_2 = 2,4183 \text{ N}$$

Vale a dire:

$$\text{➤ } \sigma_{\text{SMA}} = 136,91 \text{ MPa}$$

Come si può osservare, a differenza del filo studiato in precedenza, lo sforzo iniziale sentito dal filo è molto simile a quello di progetto.

Tempo $t = 1$

Una volta che il filo è stato attivato, entreranno in gioco ulteriori attriti e la forza totale diventa:

$$\text{➤ } F_{\text{tot}} = P_2 + F_{\text{attr},2} + F_4 + F_5 = 1,074 \text{ N}$$

E quindi il filo sente una forza pari a:

$$\text{➤ } F_{\text{SMA}} = (F_{\text{tot}} * b_1) / b_2 = 4.298 \text{ N}$$

Vale a dire:

$$\text{➤ } \sigma_{\text{SMA}} = 243,36 \text{ MPa}$$

Anche in questa circostanza, la situazione sembra essere meno grave che non nel caso del filo da 76 μm .

Infatti, nonostante lo sforzo inevitabilmente aumenti, non è così elevato da far presagire un ulteriore fallimento nell'utilizzo del NiTiNOL.

Tempo t = 2

Rappresenta la fase del ritorno nella posizione iniziale del filo.

È necessario quindi verificare che la molla SMA sia in grado di consentire il ritorno nella posizione iniziale di tutto il sistema meccanico.

È possibile quindi scrivere che:

$$\text{➤ } F_{\text{tot}} = P_1 - F_{\text{attr},2} - F_4 - F_5 = 0,1454 \text{ N}$$

La forza è positiva: la molla è sufficientemente forte da permettere il ritorno del filo nella condizione iniziale.

Arrivati a questo punto, è inevitabile pensare che il filo da 150 μm sembri essere la migliore soluzione per questa tipologia di meccanica.