

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



Caratterizzazione ed implementazione di un attuatore realizzato in lega a memoria di forma in una valvola per applicazioni fluidodinamiche

Relatore Interno: Prof. Gaetano Cascini

Relatore Esterno: Ing. Francesco Butera

Tesi di laurea di:

Marco GHILARDI Matr. 819275

Matteo SCHIAVI Matr. 823328

Anno accademico 2014/2015

Ringraziamenti

Capisci che stai diventando Ingegnere quando i ringraziamenti diventano la parte più difficile da scrivere. Nonostante ciò ci teniamo a menzionare chi più ha contribuito a rendere possibile il raggiungimento di questo traguardo.

Il primo sentito ringraziamento va al Professor Cascini, relatore di questo lavoro, per averci fornito costantemente spunti di riflessione utili per muoverci all'interno di questa nuova esperienza, e per averci guidato con pazienza, disponibilità e conoscenza durante la stesura della tesi.

Questo lavoro non sarebbe stato possibile senza il supporto materiale e professionale di Fluid-o-Tech, in particolare un grazie agli Ingegneri Francesco Butera, Andrea Coccia e Francesco Pucillo, oltre a tutti i ragazzi dello studio F-Lab.

Un ringraziamento va anche a tutte le persone che in questi mesi hanno frequentato il laboratorio HAPRE del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, con cui abbiamo avuto modo di confrontarci, o anche semplicemente scambiare due parole nei momenti di pausa. In particolare un grazie ad Alessandro Mansutti per i preziosi consigli e il sostegno che ci ha fornito.

Grazie agli amici che ci hanno supportato anche nei momenti più difficili di questi anni e ai compagni di corso con i quali abbiamo condiviso gioie e dolori durante il percorso di studi, rendendolo più facilmente affrontabile.

Il ringraziamento più grande va sicuramente ai nostri genitori e ai familiari, senza i quali non sarebbe stato possibile arrivare alla fine di questo arduo progetto.

Sommario

Il lavoro presentato in questo elaborato nasce dalla collaborazione con Fluid-o-Tech, azienda innovatrice nel settore di valvole e pompe, e in particolare il suo scopo è di ottenere un prodotto innovativo che possa essere competitivo sul mercato. Nei giorni nostri il settore delle valvole ha raggiunto un progresso tale da rendere necessario un salto innovativo per procedere ulteriormente nello sviluppo di tale tecnologia. Fluid-o-Tech si è già mossa in tale direzione, puntando sulla sostituzione dell'attuazione tramite solenoide con una più efficiente basata sull'utilizzo delle leghe a memoria di forma (SMA). Il passo successivo consiste nel miniaturizzare ulteriormente il sistema di attuazione in modo da ottenere un corpo valvola d'ingombro ridotto pur mantenendo elevate le prestazioni. A tal proposito, grazie al lavoro di tesi dell'ingegner Carlo Blu Steiner, sempre in collaborazione con Fluid-o-Tech, sono stati progettati a livello teorico, tramite simulazioni agli elementi finiti, diversi tipi di attuatori che potessero essere integrati in una valvola di dimensioni ridotte. Questi attuatori sono stati in seguito prodotti dall'azienda tedesca Acquandas tramite il processo di deposizione di film di NiTi, in cui è specializzata. Il caso studio che verrà in seguito documentato consiste nella caratterizzazione, tramite prove sperimentali, degli attuatori prodotti da Acquandas per capire se le prestazioni che essi forniscono sono sfruttabili all'interno di una valvola che possa essere messa in commercio e, in generale, verificare quale fra essi sia il più performante. Tali prove sperimentali verranno inoltre sfruttate per realizzare uno strumento di dimensionamento rapido di attuatori con questa geometria. Le conclusioni tratte da queste prove faranno da punto di partenza per gettare le basi di un ulteriore studio atto a confrontare più nel dettaglio le prestazioni reali con quelle simulate dall'Ing. Steiner in modo da validare il modello per applicazioni di questo tipo. A conclusione di questo lavoro, è stato progettato un corpo valvola innovativo che sfruttasse gli attuatori a disposizione.

Abstract

The work presented in this research is a collaboration with Fluid-o-Tech, a leading company in the field of valves and pumps, and its aim is to obtain an innovative product that can be competitive on the market. Nowadays, the valve industry has reached a progress such as to make necessary an innovative jump to further proceed in the development of this technology. Fluid-o-Tech has already moved towards this direction, focusing on the replacement of the actuation through a solenoid with a more efficient one based on the use of shape memory alloys. The next step is to further miniaturize the actuation system in order to obtain a valve body of reduced size while maintaining high performance. In this regard, thanks to the thesis of the engineer Carlo Blu Steiner, also in collaboration with Fluid-o-Tech, different types of actuators that could be integrated into a small valve are designed at a theoretical level, through finite element simulations. Prototypes of these actuators were then produced by the German company Acquandas through the process of NiTi film sputtering, in which it is specialized. The case study that will later be documented is the characterization, through experimental tests, of the actuators produced from Acquandas to see if their performances can be used to design a competitive microvalve and check which one of them has the highest performances. The experimental data will also be used to realize a simple tool which allows sizing actuators with the same geometry of the ones discussed in this thesis. The information given by those tests will then be a base for ulterior studies in which the results of the experimentations can be confronted with the data obtained from Eng. Steiner's simulations, in order to define if the analytical model he used is suited for this kind of applications. To conclude this work, an innovative microvalve implementing this kind of actuators was designed.

Indice

Ringraziamenti.....	ii
Sommario.....	iv
Abstract.....	v
Indice delle figure	ix
Indice delle tabelle	xiv
Introduzione	1
Capitolo 1: Stato dell'arte e riepilogo del lavoro svolto dall'ing. Steiner	3
1.1: Attuatori a memoria di forma realizzati per deposizione di strati successivi di NiTi.....	3
1.1.1: Panoramica SMA.....	3
1.1.2: Processo di deposizione per la realizzazione di SMA.....	8
1.1.3: Caratteristiche dei film ottenuti per deposizione	11
1.1.4: Possibili applicazioni di film di NiTi.....	14
1.2: Riepilogo del lavoro svolto dall'Ing. Steiner.....	20
1.2.1: Evoluzione del design.....	20
1.2.2: Modello meccanico.....	23
1.2.3: Confronto tra i modelli	24
1.2.4: Ottimizzazione.....	28
1.2.5: Verifica di tenuta	33
1.2.6: Posizionamento nella valvola	34
1.3 Riepilogo attuatori a disposizione.....	35
Capitolo 2: Prima fase sperimentale	37
2.1: Descrizione della strumentazione iniziale	37
2.2: Scelta del set-up ottimale per la sperimentazione tramite Rete di Problemi ..	40

2.2.1: Termosoffiatore industriale e bilanciere	41
2.2.2: Resistenza a filo e bilanciere	49
2.2.3: Resistenza a filo e bilancia a due piatti.....	54
2.2.4: Rete di Problemi complessiva	60
2.3 Prove sperimentali	61
2.3.1: Risultati delle prove	62
2.3.2: Possibili cause di errore ed introduzione ad un nuovo set up sperimentale	68
Capitolo 3: Simulazioni analitiche e nuova sperimentazione	72
3.1: Analisi agli elementi finiti	73
3.1.1: Prove preliminari	73
3.1.2: Affinamento dell'analisi	75
3.1.3: Risultati delle simulazioni	77
3.2: Nuova fase sperimentale.....	80
3.2.1: Modifiche al banco, definizione della nuova configurazione e modalità di sperimentazione	80
3.2.2: Risultati della campagna sperimentale	85
3.3: Confronto con le simulazioni svolte in fase di concepimento	93
3.4: Realizzazione di un strumento semplificato atto alla progettazione.....	97
3.4.1: Descrizione della procedura di realizzazione	97
3.4.2: Metodo di applicazione del nuovo strumento di simulazione e verifica delle sue prestazioni.....	106
Capitolo 4: Validazione del modello e prototipazione di una valvola innovativa...	109
4.1: Validazione del modello	111
4.1.1: Scelta della molla e del collegamento elettrico	114
4.1.2: Progettazione del nuovo banco prova.....	118
Capitolo 5: Conclusioni	122
Bibliografia e Sitografia.....	126
Appendice	128

Appendice A	128
Appendice B	129
Appendice C	130
Appendice D	132
Appendice E.....	134
Appendice F.....	135
Appendice G	137

Indice delle figure

Figura 1 Fasi del materiale e disposizioni del reticolo cristallino [2].....	5
Figura 2 Shape Memory Effect [3].....	6
Figura 3 Isteresi termica, in ascissa è indicata la temperatura mentre in ordinata è indicata la percentuale di martensite [4].....	7
Figura 4 Schema di funzionamento di una macchina per la deposizione [1]	9
Figura 5 processo di deposizione [5].....	10
Figura 6 Immagini di film di NiTi ottenute tramite FESEM depositati alle temperature di (a) 623 K; (b) 723 K; (c) 823 K e (d) 923 K [7].....	12
Figura 7 Distribuzione della dimensione del grano su film di vari spessori [8].....	13
Figura 8 Posizione relativa dei grafici di rigidità/temperatura del polimero e curva di isteresi termica di uno SMA [9].....	15
Figura 9 Attuatore bistabile in seguito a riscaldamento fino a temperatura di 433 K (a) per la configurazione piegata e di 363 K (b) per la configurazione piatta [9]	16
Figura 10 Tipici cicli di isteresi di due SMA accoppiati [9]	16
Figura 11 Micropompa con membrana elastica (a) e micropompa con attuatore complementare in SMA [10]	17
Figura 12 Configurazioni delle valvole NO e NC (a) e vista schematica degli attuatori SMA implementati (b) [5].....	18
Figura 13 Vista complessiva di una microvalvola e del relativo sistema di controllo [5].....	18
Figura 14 Sezione schematica della valvola [11]	19
Figura 15 Prototipo di microvalvola a gas realizzato [11].....	19
Figura 16 Configurazione con trave a sbalzo [1].....	20
Figura 17 Posizioni della valvola alle diverse temperature [1]	21
Figura 18 Deformazione imposta tramite una molla [1].....	21

Figura 19 Curva Sforzi-Deformazioni del modello superelastico di ABAQUS [13]	25
Figura 20 Configurazione indeformata del modello [1]	27
Figura 21 Posizione del punto considerato nella posizione deformata [1]	28
Figura 22 Migliori risultati per ciascuno spessore per la configurazione a stella con tre travi [1]	30
Figura 23 Andamento di R , R_s e F per la configurazione a cinque travi [1]	31
Figura 24 Andamento del parametro R in relazione alla larghezza delle travi [1]	31
Figura 25 Andamento del parametro F in relazione alla larghezza delle travi [1]	32
Figura 26 Posizione dell'attuatore nella valvola [14]	34
Figura 27 Prototipo di attuatore SMA	36
Figura 28 Banco prova	38
Figura 29 Dettaglio alloggiamento dell'attuatore	39
Figura 30 NoP-1: Primi livelli della rete	40
Figura 31 Dettaglio degli scavi realizzati sul tappo	41
Figura 32 Disco isolante in legno	42
Figura 33 Vista in sezione con disco isolante montato	42
Figura 34 NoP-2: Analisi del calo imprevisto	43
Figura 35 NoP-3: Scelta del filo	45
Figura 36 Risultati della prima prova sperimentale	47
Figura 37 NoP-4: Problematiche legate al riscaldamento ad aria	48
Figura 38 Scelta del metodo di riscaldamento	49
Figura 39 Circuito utilizzato per testare l'effetto Joule	50
Figura 40 Attuatore con avvolgimenti di costantana	51
Figura 41 NoP-6: Resistenza a filo	53
Figura 42 NoP-7: Scelta del metodo di carico	55
Figura 43 Variazione della posizione dello spot laser sul bilanciere	56
Figura 44 Bilancia a due piatti con meccanismo a quadrilatero articolato	57

Figura 45 Schema della configurazione semplificata	58
Figura 46 Configurazione finale del banco prova	59
Figura 47 NoP Complessiva	60
Figura 48 Recupero in funzione del carico attuatore D2, singole prove	63
Figura 49 Recupero in funzione del carico attuatore D2, interpolazione dei risultati	63
Figura 50 Recupero in funzione del carico attuatore D3, singole prove	64
Figura 51 Recupero in funzione del carico attuatore D3, interpolazione dei risultati	64
Figura 52 Recupero in funzione del carico attuatore D5 singole prove	65
Figura 53 Recupero in funzione del carico attuatore D5, interpolazione dei risultati	65
Figura 54 Recupero in funzione del carico attuatore D6, singole prove	66
Figura 55 Recupero in funzione del carico attuatore D6, interpolazione dei risultati	66
Figura 56 Modellazione Funzionale	69
Figura 57 Vincoli della simulazione e punto di applicazione della Forza.....	73
Figura 58 Parametri della mesh	74
Figura 59 Impostazioni della convergenza	75
Figura 60 Dettaglio della mesh affinata.....	76
Figura 61 Esempio di deformazione equivalente e livello di convergenza per uno degli attuatori	77
Figura 62 Esempio di spostamento e livello di convergenza per uno degli attuatori	78
Figura 63 Esempio di sollecitazione di Von Mises e di livello di convergenza per uno degli attuatori	78
Figura 64 Nuova disposizione del disco superiore del banco prova.....	80
Figura 65 Interfaccia RealTerm: configurazioni per il collegamento con il sensore.	81
Figura 66 Interfaccia RealTerm: impostazioni di acquisizione e di visualizzazione dei dati	82
Figura 67 Retta di calibrazione del sensore	82
Figura 68 Banco prova: nuovo set up con bilancia collegata ad una seconda slitta nanometrica.....	83

Figura 69 Banco prova: vista d'insieme con alimentatore, terminale e caldaia.....	84
Figura 70 Risultati delle prove per l'attuatore senza circuiti di riscaldamento.....	86
Figura 71 Risultati delle prove per l'attuatore con circuiti di riscaldamento.....	87
Figura 72 Visione di insieme dei risultati delle prove (1).....	89
Figura 73 Visione di insieme dei risultati delle prove (2).....	90
Figura 74 Grafici Recupero su Carico per attuatori con travi a snellezza 2,5.....	91
Figura 75 Grafici Recupero su Carico per attuatori con travi a snellezza 3,2.....	91
Figura 76 Grafici Recupero su Carico per attuatori con travi di Lunghezza pari a 2 mm.....	92
Figura 77 Grafici Recupero su Carico per attuatori con travi di Lunghezza pari a 2,5 mm.....	92
Figura 78 Differenza di comportamento tra i due metodi di carico.....	95
Figura 79 Esempi di diagrammi Recupero su Snellezza (in questo caso per 200 grammi).....	98
Figura 80 Andamento di K in funzione di Lunghezza e Carico.....	101
Figura 81 Relazione fra la pendenza di K e la lunghezza della trave.....	102
Figura 82 Modulo di Young in funzione del carico.....	103
Figura 83 Recupero in funzione della snellezza.....	104
Figura 84 Recupero in funzione della larghezza.....	104
Figura 85 Confronto fra i risultati sperimentali ed il nuovo modello.....	107
Figura 86 Differenze tra valori reali e stimati.....	108
Figura 87 Rappresentazione CAD del prodotto finale.....	110
Figura 88 Vista in sezione del prodotto finale.....	110
Figura 89 Schema del set-up nella configurazione iniziale.....	112
Figura 90 Schema del set-up dopo il riscaldamento.....	113
Figura 91 Catalogo con i risultati ottenuti dalla ricerca [18].....	115
Figura 92 Definizione dei parametri riportati a catalogo [18].....	116
Figura 93 Molla scelta [18].....	116

Figura 94 Alloggiamento dell'attuatore	118
Figura 95 Coperchio del banco prova	119
Figura 96 Visione d'insieme del nuovo banco prova	120
Figura 97 Dettaglio della vite filettata e della molla	120
Figura 98 Messa in tavola finale della valvola prototipata	125

Indice delle tabelle

Tabella 1 Proprietà della lega NiTi fornita da Acquandas [1].....	26
Tabella 2 Configurazioni prodotte [1]	35
Tabella 3 Configurazioni alternative [1].....	36
Tabella 4 Pesi a disposizione e combinazioni scelte	62
Tabella 5 Risultati attuatore D2	63
Tabella 6 Risultati attuatore D3	64
Tabella 7 Risultati attuatore D5	65
Tabella 8 Risultati attuatore D6	66
Tabella 9 Risultati analisi FEM	79
Tabella 10 Rapporti tra i recuperi nelle due configurazioni	88
Tabella 11 Recuperi per i vari attuatori durante le prove con il vapore	88
Tabella 12 Nuove configurazioni di carico.....	89
Tabella 13 Valori di K al variare di larghezza, lunghezza e carico	100
Tabella 14 Valori del modulo di Young ottenuti.....	103
Tabella 15 Intervalli di applicabilità del modello.....	105
Tabella 16 Risultati finali	123

Introduzione

Il lavoro trattato in questo elaborato è stato proposto dal gruppo Fluid-o-Tech, azienda innovativa operante nel settore fluidodinamico tramite lo studio e la realizzazione di valvole e pompe. In particolare deriva dalla relazione tra F-Lab, azienda di ricerca ed innovazione di tale gruppo, e l'azienda Dolphin Fluidics, che si occupa di sviluppare e produrre piattaforme integrate di fluidica intelligente.

Le basi di questo lavoro risiedono nello studio dell'ing. Steiner [1]. Egli è partito da una ricerca brevettuale in cui ha dimostrato che l'evoluzione tecnologica nel campo delle valvole a solenoide raggiungerà la saturazione nei prossimi anni, ciò significa che tale settore è pronto a compiere un salto innovativo. In particolare, identificando come principali parametri la portata volumetrica e il volume complessivo della valvola, un salto innovativo potrebbe consistere nel diminuire significativamente quest'ultimo mantenendo inalterato il primo. A tal proposito l'Ing. Steiner decide, in accordo con Fluid-o-Tech, di studiare una valvola in cui venga sostituito il solenoide con un sistema di attuazione più compatto basato sui materiali a memoria di forma. In tal modo si elimina il volume occupato dal solenoide e si riduce l'energia necessaria all'attuazione pur mantenendo invariate le prestazioni standard in termini di portata.

La scelta ricade su tali materiali per la loro capacità di ritornare alla forma originale, impressa in fase di produzione, in seguito ad un aumento di temperatura. Ciò è dovuto a un cambiamento di fase, da martensite ad austenite, che avviene a temperature ragionevolmente basse, che variano secondo la composizione del materiale e che nel caso di questo studio sono attorno ai 80°C. Tale cambiamento di fase provoca inoltre una variazione della rigidità del materiale che è fondamentale per l'applicazione studiata.

In questa valvola innovativa si vuole implementare una lamina in lega a memoria di forma in grado di regolare il passaggio del fluido agendo sulla deformazione tramite un controllo in temperatura.

L'Ing. Steiner si è inoltre occupato di definire la geometria ottimale degli attuatori che garantissero le migliori prestazioni all'interno della valvola attraverso simulazioni analitiche del comportamento del materiale tramite l'utilizzo di software per il calcolo agli elementi finiti. Grazie alla collaborazione con l'azienda Acquandas sono stati realizzati dei prototipi di attuatori che avessero geometria uguale o simile a quella ottimale.

Questo lavoro di tesi si propone di riprendere e portare avanti tale studio andando, in prima battuta, a testare e caratterizzare gli attuatori prodotti per verificarne l'effettivo funzionamento e per confrontare i risultati sperimentali con quelli analitici previsti dalle simulazioni svolte dall'ing. Steiner. Siccome per studiare il comportamento dell'attuatore è necessaria una precisione al centesimo di millimetro, il settaggio sperimentale ha subito un processo di evoluzione, rispetto al concept iniziale, volto a eliminare progressivamente le diverse fonti d'imprecisione che si sono riscontrate. I cambiamenti in questione hanno riguardato sia il metodo di riscaldamento sia quello d'imposizione della deformazione. Nel primo caso si è passati dall'utilizzo di un termosoffiatore industriale all'impiego dell'effetto Joule generato dal passaggio di corrente in una resistenza a filo avvolta attorno all'attuatore, nel secondo caso si è partiti con l'utilizzo di un bilanciere appeso alla lamina SMA per arrivare a utilizzare un metodo di carico basato sul funzionamento di una bilancia a due piatti.

Essendo stati i risultati di questa prima campagna non soddisfacenti, è stata dunque svolta una nuova campagna in cui, con il supporto di Fluid-o-Tech, è stato sfruttato il vapore come metodo di riscaldamento, ottenendo così dei risultati analizzabili.

Sono state in seguito sfruttati i dati ottenuti per la messa a punto di uno strumento di progettazione basato sull'adattamento di simulazioni agli elementi finiti semplificate alle prove reali, in modo da consentire un più rapido studio di attuatori con questa geometria in futuro. Inoltre sono state tratte delle conclusioni sui comportamenti di attuatori di questo tipo e sono state gettate le basi per un ulteriore studio in cui, tramite specifiche prove sperimentali, sia possibile validare i modelli analitici più complessi con cui tali attuatori sono stati progettati dall'Ing. Steiner.

Al termine della campagna sperimentale è stato inoltre scelto l'attuatore più performante per proseguire con la progettazione di un corpo valvola che ne permettesse l'integrazione.

Capitolo 1: Stato dell'arte e riepilogo del lavoro svolto dall'ing. Steiner

In questo capitolo viene svolta una sintesi sui principi alla base del funzionamento dei materiali a memoria di forma, ci si sofferma quindi sulla tecnologia di fabbricazione tramite deposizione di strati successivi per poi andare ad analizzare brevemente l'influenza dei vari fattori, micro e macroscopici, sul comportamento di tali materiali. Viene dunque fatta una breve panoramica sulle applicazioni già esistenti per l'utilizzo di attuatori realizzati con tale tecnologia.

Nella seconda parte del capitolo viene invece ripresi i passaggi principali del lavoro dell'Ing. Steiner che ha portato alla realizzazione della serie di attuatori che verranno poi studiati nel prosieguo del lavoro.

1.1: Attuatori a memoria di forma realizzati per deposizione di strati successivi di NiTi

Per questo lavoro ci si è concentrati in particolare su un attuttore ottenuto per deposizione di strati successivi quindi, dopo una breve introduzione generale sul comportamento dei materiali a memoria di forma, si passa ad uno studio più approfondito sulle modalità di realizzazione, sulle proprietà e sulle applicazioni, già esistenti o in via di sviluppo, che questi sottilissimi film di materiale possono avere.

1.1.1: Panoramica SMA

I materiali a memoria di forma (SMA) sono una classe di materiali di nuovo concepimento in grado di cambiare le proprie caratteristiche fisiche una volta sottoposti ad uno stimolo non meccanico proveniente dall'esterno, come un aumento di temperatura o una variazione del campo magnetico.

In particolare per quanto riguarda gli SMA che si attivano in seguito ad un cambio di temperatura, si registra un cambiamento di fase solido-solido reversibile da una martensitica a bassa temperatura ad una austenitica ad alta temperatura,. Durante questo cambio di fase si riscontra l'effetto a memoria di forma (*shape memory effect*)

ovvero la capacità del materiale di tornare ad una forma predeterminata e fissata tramite un trattamento termico successivo alla fabbricazione.

La trasformazione di fase è un risultato della variazione della struttura cristallina del materiale che passa da una configurazione cubico a corpo centrato per la fase austenitica ad una esagonale a corpo centrato per la fase martensitica. La martensite può a sua volta presentarsi in due configurazioni differenti: una configurazione “impaccata” (*twinned martensite*) che si ottiene dal raffreddamento dell’austenite senza carico applicato e una configurazione “stirata” (*detwinned martensite*) che è la conseguenza dell’applicazione del carico. Quanto appena spiegato è riassunto in Figura 1, in particolare si può notare che il materiale in questione è composto da Nichel e Titanio che è una delle composizioni chimiche più diffuse per i materiali a memoria di forma, nonché quello che utilizzeremo per il nostro lavoro.

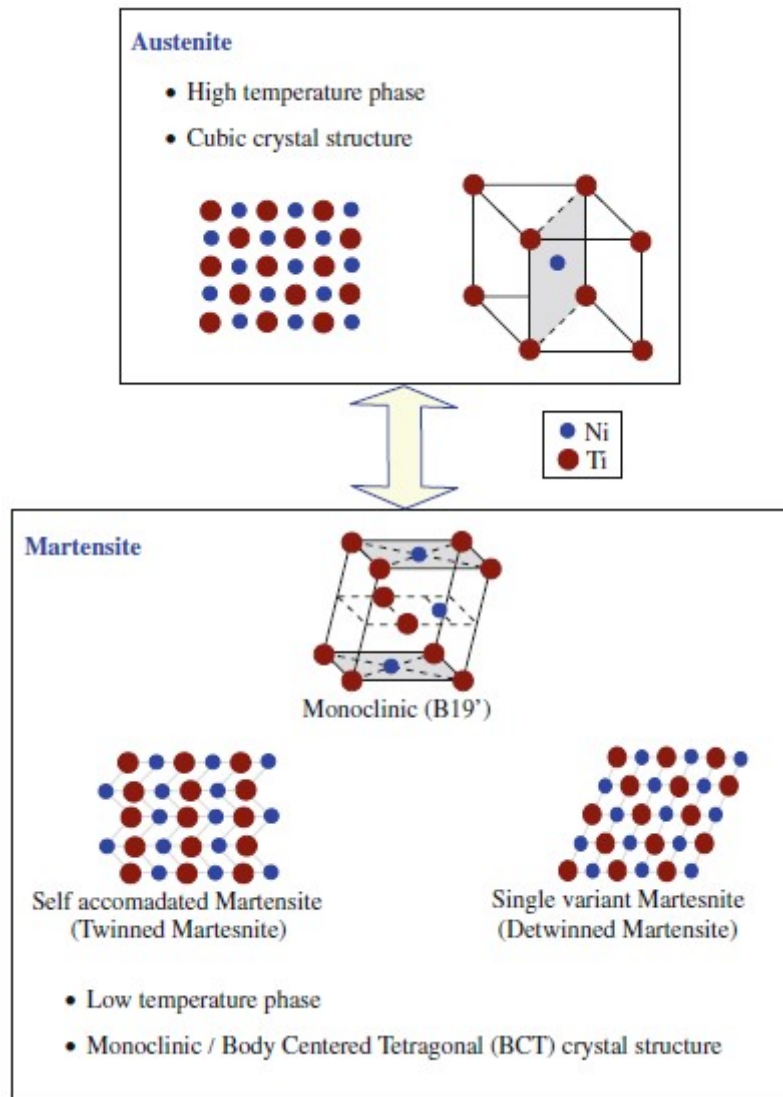


Figura 1 Fasi del materiale e disposizioni del reticolo cristallino [2]

In Figura 2 è invece visibile l'effetto a memoria di forma. In particolare, partendo dall'origine degli assi quindi in fase di martensite “impaccata”, si distingue:

- Fase di stiramento (detwinning) in cui viene applicato il carico al materiale e si nota il consistente aumento della deformazione dovuta allo “stiramento” della martensite;
- Rimozione del carico, lo sforzo va a zero e si ha un conseguente minimo recupero elastico del materiale;

- Riscaldamento: in questa fase il materiale viene scaldato e si ha il passaggio da martensite “stirata” ad austenite, come si può notare si ha un recupero totale della deformazione;
- Raffreddamento: il materiale, che si trova allo stato di austenite, viene raffreddato e torna alla configurazione iniziale.

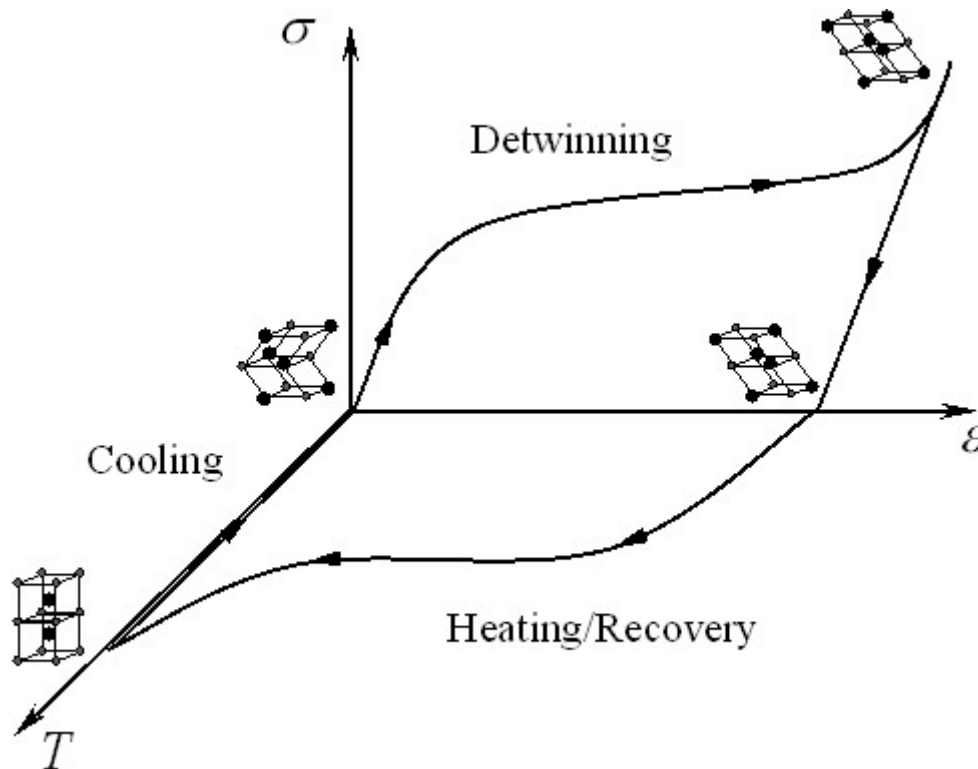


Figura 2 Shape Memory Effect [3]

È anche utile andare a considerare il ciclo di isteresi di un materiale a memoria di forma che consiste in una differente temperatura tra il passaggio da martensite ad austenite e quello da austenite a martensite, questa differenza di temperatura è detta appunto isteresi termica ed assume valori tra i 10°C e i 50°C a seconda della composizione chimica del materiale.

Posto questo fenomeno è quindi possibile distinguere le 4 temperature principali caratterizzanti il ciclo di isteresi, come possibile vedere in Figura 3:

- Martensite finish (Mf): è la temperatura in cui tutto il materiale è allo stato di martensite;

- Austenite start (A_s): è la temperatura in cui tutto il materiale si trova ancora allo stato di martensite, in cui però si inizia a formare il primo accenno di austenite
- Austenite finish (A_f): è la temperatura in cui tutto il materiale si trova allo stato di austenite
- Martensite start (M_s): è la temperatura in cui tutto il materiale si trova ancora allo stato di austenite, in cui però si inizia a formare il primo accenno di martensite

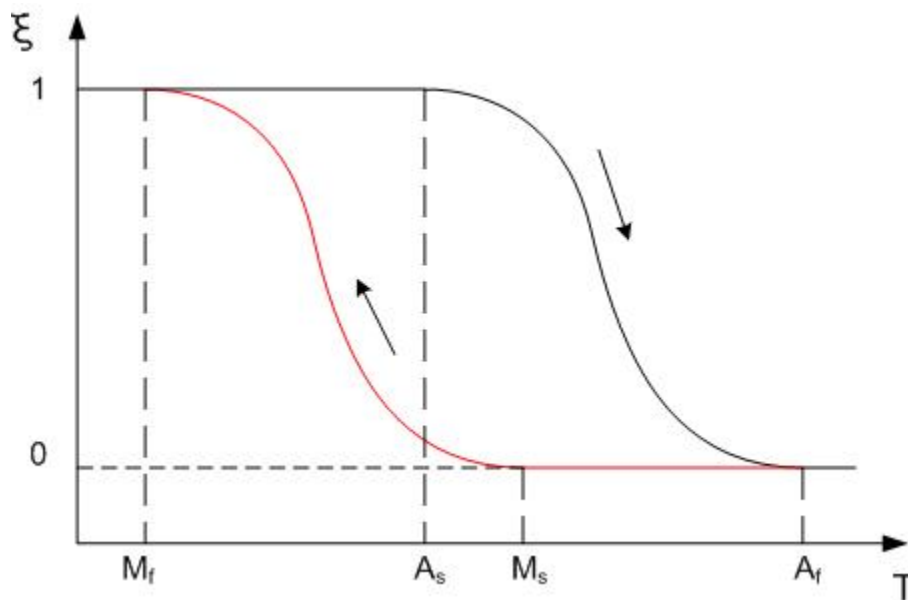


Figura 3 Isteresi termica, in ascissa è indicata la temperatura mentre in ordinata è indicata la percentuale di martensite [4]

1.1.2: Processo di deposizione per la realizzazione di SMA

Il processo di deposizione (o polverizzazione anodica) consiste nella rimozione di atomi da un blocco di materiale e, attraverso il gas di assistenza, la condensazione degli stessi in vari substrati a formare un sottile film su un wafer di poliammide silicone o vetro. Successivamente, attraverso un processo di litografia e successivo attacco chimico viene definita rispettivamente la geometria desiderata e rimosso il materiale in eccesso.

Sono quindi distinguibili tre fasi principali del processo:

- Deposizione dello strato di materiale;
- Impressione della geometria desiderata
- Rimozione del materiale in eccesso

La macchina che rende possibile il primo processo è formata da 4 elementi principali che sono anche distinguibili in Figura.4:

- Una camera isolata contenente argon;
- Il blocco di metallo da cui asportare atomi (che si trova in corrispondenza dell'anodo);
- Un substrato di materiale su cui si andrà a formare il film di SMA (che si trova in corrispondenza del catodo), tale substrato può essere formato da un wafer di silicone, poliammide o vetro. Tra il substrato e il film SMA è interposto uno strato di materiale sacrificale che permette il distacco del film una volta finite le operazioni;
- Un generatore in grado di creare un campo magnetico tra catodo e anodo che delimitano la camera.

Il principio di funzionamento di questa macchina consiste nell'applicare una differenza di potenziale necessaria a ionizzare l'argon ovvero portarlo allo stato di plasma. Il campo magnetico generato forza gli ioni di argon ad impattare contro il blocco di metallo con un'energia sufficiente a rimuovere degli atomi dallo stesso che

andranno poi a condensarsi sul substrato a formare un sottile film di materiale deposto. [1]

Nel caso di film di NiTi il substrato non viene precedentemente riscaldato e la temperatura di condensazione è mantenuta costante nel processo ed è la massima temperatura cui lo SMA può cristallizzare, questo permette di avere una migliore struttura cristallina del materiale, cosa che ne influenza molto le caratteristiche. [1]

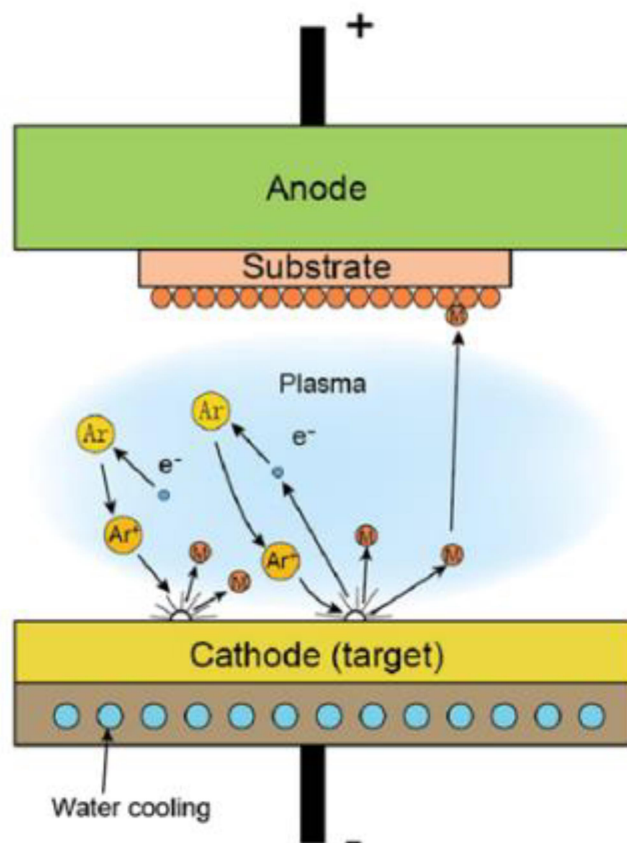


Figura 4 Schema di funzionamento di una macchina per la deposizione [1]

Solitamente, sopra il film di SMA viene anche depositato uno strato di materiale che funge da maschera e protezione per lo SMA vero e proprio, solitamente viene usato l'oro per questo scopo.

Come seconda fase applicato un fotoresistore sullo strato di materiale depositato e il tutto viene sottoposto all'azione di raggi ultravioletti che quindi andranno ad agire solo sulla porzione di materiale non protetta dai fotoresistori (i raggi UV andranno quindi ad intaccare il materiale che andrà rimosso).

Una volta fatto ciò, è possibile procedere con la terza operazione. Viene quindi rimosso chimicamente tutto lo strato di protezione e successivamente, tramite un bagno acido idrofluorico, acido nitrico e acqua deionizzata, viene rimossa la porzione di materiale investita dai raggi UV.

Come ultimo passaggio si effettua un riscaldamento del substrato atto a sciogliere lo strato di materiale scarificale interposto tra esso e il film SMA in modo da staccare quest'ultimo dalla macchina. [5]

In Figura 5 sono sintetizzati tutti i passaggi precedentemente illustrati:

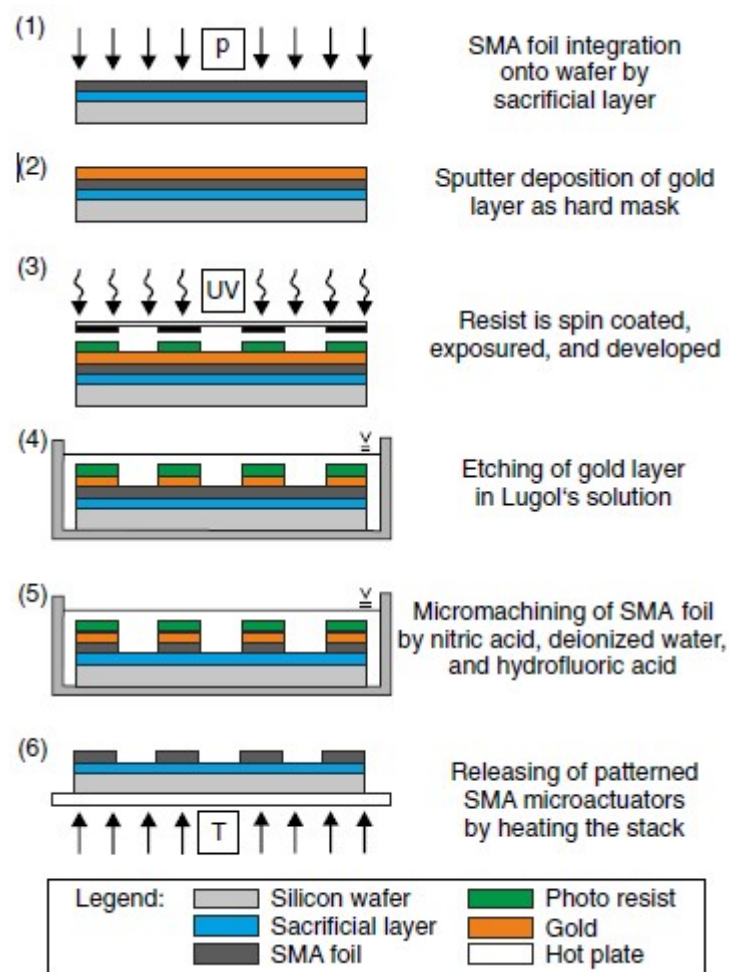


Figura 5 processo di deposizione [5]

1.1.3: Caratteristiche dei film ottenuti per deposizione

Uno degli aspetti più importanti nelle applicazioni di film di NiTi è il preciso controllo della loro composizione. I film realizzati per deposizione hanno una più bassa concentrazione di titanio nel substrato rispetto a quella del blocco di metallo che funge da target (quello da cui viene asportato materiale), questo può portare a significativi cali della temperatura di transizione. Per compensare questa perdita di titanio durante la deposizione, esistono vari metodi quali l'utilizzo di target a maggior concentrazione di titanio o l'utilizzo di lamine o reti di titanio posizionate sopra il target. Dopo la deposizione, i film sono in genere amorfi, pertanto è necessario procedere con un trattamento termico di ricottura per portare alla riorganizzazione del grano cristallino. [6]

Siccome le temperature di transizione di materiali a memoria di forma in NiTi sono molto sensibili al rapporto stechiometrico tra nichel e titanio, si verifica l'uniformità di tale rapporto lungo tutto il raggio del depositato. Si nota che la presenza atomica di titanio al centro del depositato è di circa il 2% maggiore di quella periferica, ciò comporta una variazione della temperatura di transizione nelle varie regioni.

Il passaggio a martensite dei film di NiTi dipende dalla temperatura di deposizione, da quella di fine ricottura e dalla durata di tale processo. I film depositati a temperatura ambiente sono in genere di natura amorfa, pertanto sono richieste deposizioni ad alte temperature o in seguito a ricottura per renderli cristallini. [7] Ciò è dovuto al fatto che variando le condizioni sopracitate si varia anche la dimensione del grano cristallino e, di conseguenza, cambiano le temperature di transizione. In particolare esiste una dimensione critica del grano al di sotto della quale si ha una significativa inibizione della trasformazione martensitica. La temperatura necessaria a far avvenire la trasformazione in martensite nelle leghe NiTi diminuisce al diminuire della dimensione del grano, questo effetto diventa significativo per grani di dimensione inferiore ai 50-100 nm.

Prove effettuate su campioni di NiTi mostrano come grani di dimensione maggiore di 150 nm sono soggetti ad una trasformazione in fase martensitica a temperature attorno ai 50°C, mentre grani limitrofi di dimensione inferiore ai 50 nm non si trasformano in martensite. [6]

In Figura 6 sono mostrati ingrandimenti ottenuti tramite microscopio elettronico a emissione di campo (FESEM) che mostrano il cambio di microstruttura di film sottili

di NiTi depositati rispettivamente a temperature di 623, 723, 823 e 923 K: si nota come la dimensione del grano di questi film aumenti all'aumentare della temperatura. [7]

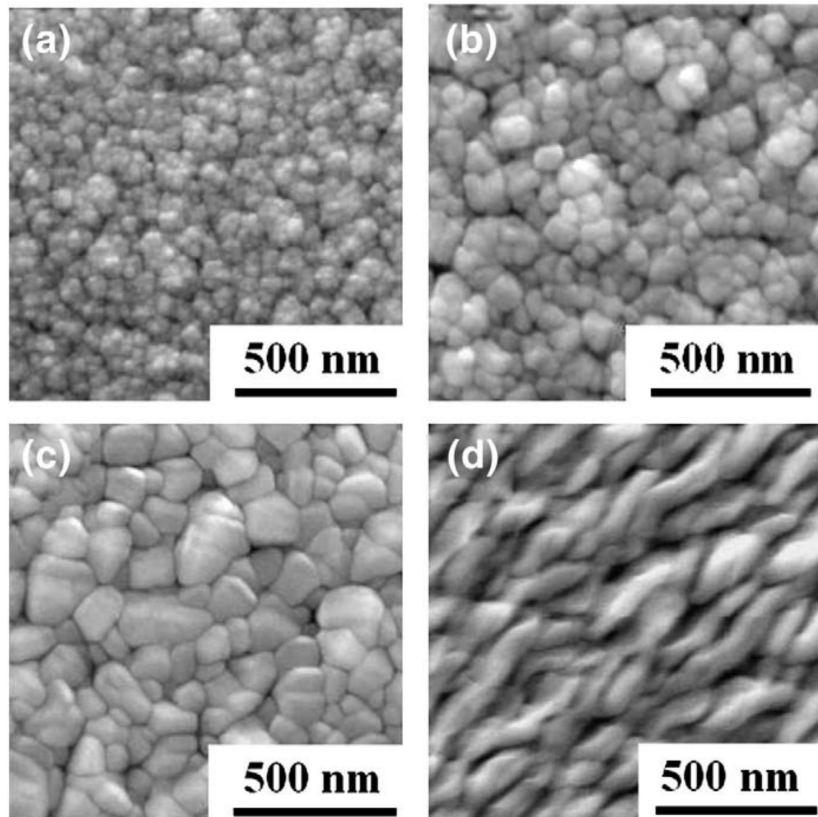


Figura 6 Immagini di film di NiTi ottenute tramite FESEM depositati alle temperature di (a) 623 K; (b) 723 K; (c) 823 K e (d) 923 K [7]

In Figura 7 è invece mostrato come l'andamento della dimensione dei grani sia ben rappresentata da una distribuzione Gaussiana. La dimensione media del grano, ottenuta stimandola dalla Gaussiana stessa, si dimostra essere proporzionale allo spessore del film, in quanto spessori maggiori danno maggior grossolanità del grano. Ciò dimostra la possibilità di scegliere il percorso di trasformazione di fase controllando lo spessore del film. Tale possibilità può giocare un ruolo importante per l'ampliamento degli orizzonti di applicazione di film di NiTi. [8]

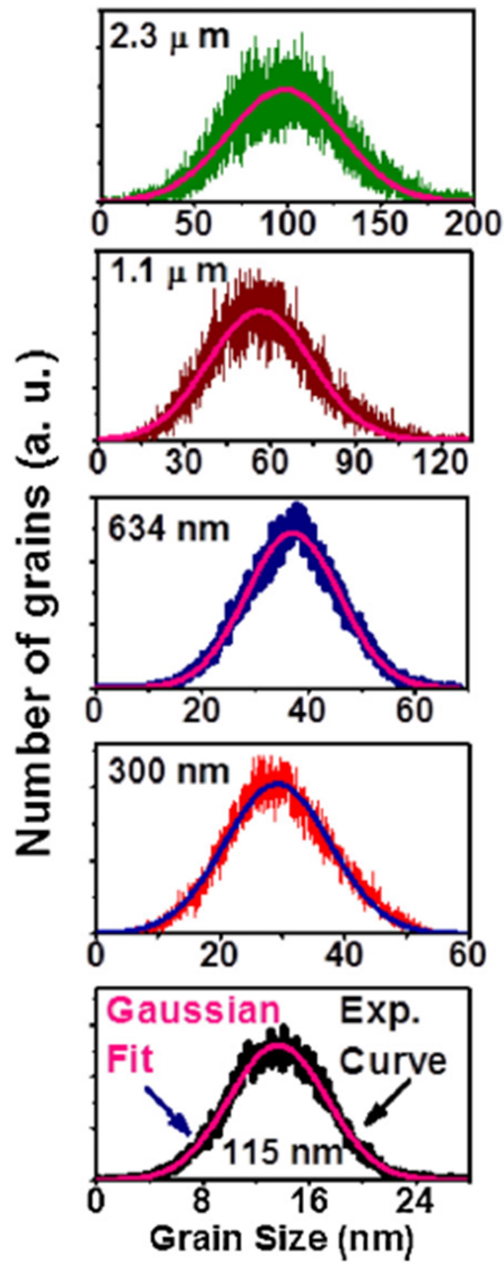


Figura 7 Distribuzione della dimensione del grano su film di vari spessori [8]

1.1.4: Possibili applicazioni di film di NiTi

I materiali a memoria di forma sotto forma di film sottili di NiTi sono particolarmente indicati per essere sfruttati nella miniaturizzazione di sistemi. In particolare, la sempre maggiore diffusione di sistemi che implementano materiali a memoria di forma (per esempio micropompe, microvalvole e microgripper) sottolinea ancora di più l'importanza di rivolgere l'attenzione verso lo sviluppo di SMA in forma di film sottili.

Attuatori SMA bistabili

Gli attuatori a memoria di forma a doppio effetto, ovvero quelli a cui viene impressa una forma sia per la fase austenitica che per la fase martensitica, vengono spesso rifiutati per il loro elevato consumo di energia, tuttavia, nei microsistemi, ciò risulta essere un problema solo nel caso di strutture adiacenti che siano sensibili al calore. Per tale motivo, gli attuatori devono essere sviluppati in modo tale da richiedere energia unicamente per il cambiamento di posizione dell'attuatore stesso, ossia non dovrebbe essere richiesta alcuna energia per mantenere in posizione quest'ultimo. Tale obiettivo può tuttavia essere raggiunto soltanto tramite sistemi meccanici complessi, difficilmente implementabili in microsistemi tradizionali. Tuttavia un nuovo metodo di risoluzione di questo problema è in via di sviluppo, esso si basa su una combinazione di strati polimerici e SMA che portano a raggiungere un comportamento bistabile degli attuatori. [9]

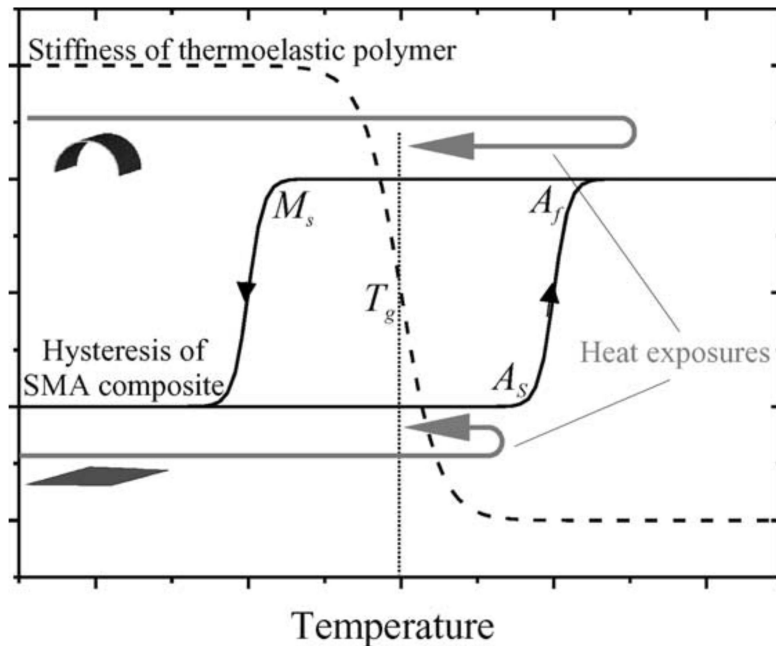


Figura 8 Posizione relativa dei grafici di rigidezza/temperatura del polimero e curva di isteresi termica di uno SMA [9]

In Figura 8 si mostra il principio di funzionamento di un attuatore bistabile: si nota come vi sia sovrapposizione tra il ciclo di isteresi termica tipico degli SMA e l'andamento della rigidezza di un polimero in funzione della temperatura. In particolare si può osservare come la temperatura di transizione vetrosa del polimero si trovi al centro del range di temperature coinvolte nel ciclo di isteresi dello SMA. Si ha dunque che se entrambi vengono riscaldati ad una temperatura pari o superiore a quella di fine trasformazione austenitica, lo SMA si irrigidisce mentre il polimero è viscoso, allo stesso modo dopo il raffreddamento il polimero si indurisce prima che lo SMA passi a martensite. Ciò significa che si riesce a mantenere il composito in configurazione piegata anche a temperatura ambiente. Se invece si riscalda ad una temperatura compresa tra quella di transizione vetrosa e quella di inizio trasformazione austenitica, il polimero diventa molle, permettendo allo SMA di tornare in configurazione piatta dopo il raffreddamento. In pratica, è possibile passare da una configurazione all'altra tramite esposizione alla temperatura, quindi l'energia è necessaria solamente alla transizione e non per mantenere la posizione, quindi il consumo è drasticamente ridotto. [9]

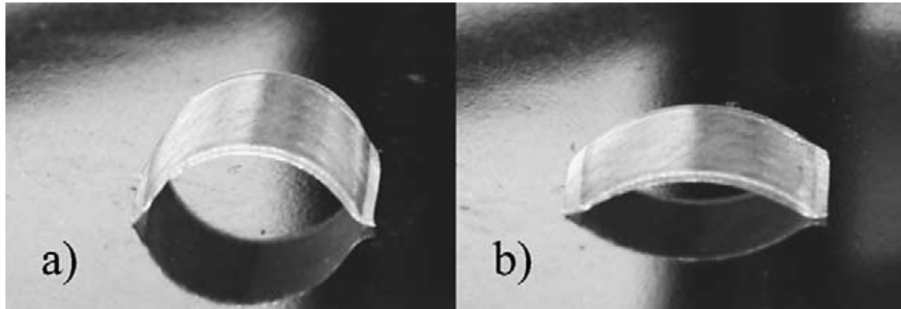


Figura 9 Attuatore bistabile in seguito a riscaldamento fino a temperatura di 433 K (a) per la configurazione piegata e di 363 K (b) per la configurazione piatta [9]

Phase coupled SMA

Questo tipo di attuatore viene ottenuto unendo due materiali a memoria di forma con differenti temperature di transizione. Da tale unione, siccome possono essere entrambi o martensitici o austenitici, nascono quattro possibili combinazioni di fase. Un particolare caso di questo tipo è quello riportato in Figura 10 in cui uno degli SMA ha un ciclo di isteresi più stretto e contenuto nel ciclo del secondo SMA. Attuatori di questo tipo vengono sfruttati per creare comportamenti “a onda” o “a verme”, che vengono per esempio utilizzati per far camminare o nuotare dei robot. Questo tipo di SMA può anche essere utilizzato per generare un movimento ondulatorio, tale tipo di applicazione è per esempio in via di sviluppo come metodo di riduzione dell’effetto di drag sulle superfici. [9]

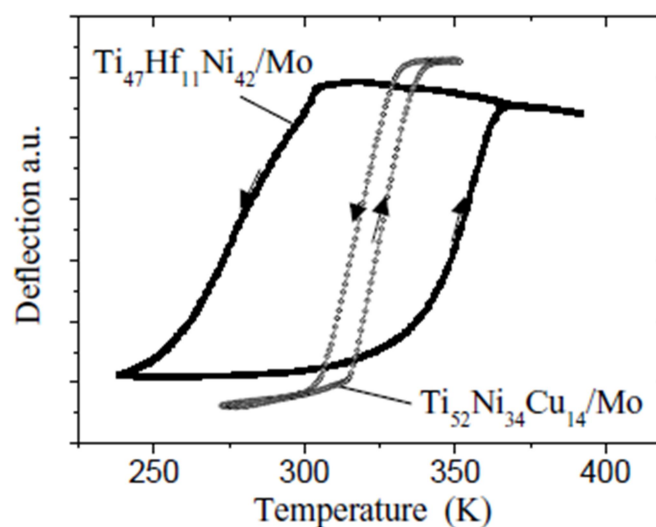


Figura 10 Tipici cicli di isteresi di due SMA accoppiati [9]

Micropompe

Un'ulteriore esempio applicativo riguarda la realizzazione di micropompe, poiché la resistività degli SMA consente di sfruttare il riscaldamento tramite effetto Joule, e quindi un controllo diretto dell'attuatore. In Figura 11 sono mostrati due esempi di pompe che implementano questo tipo di attuatore.

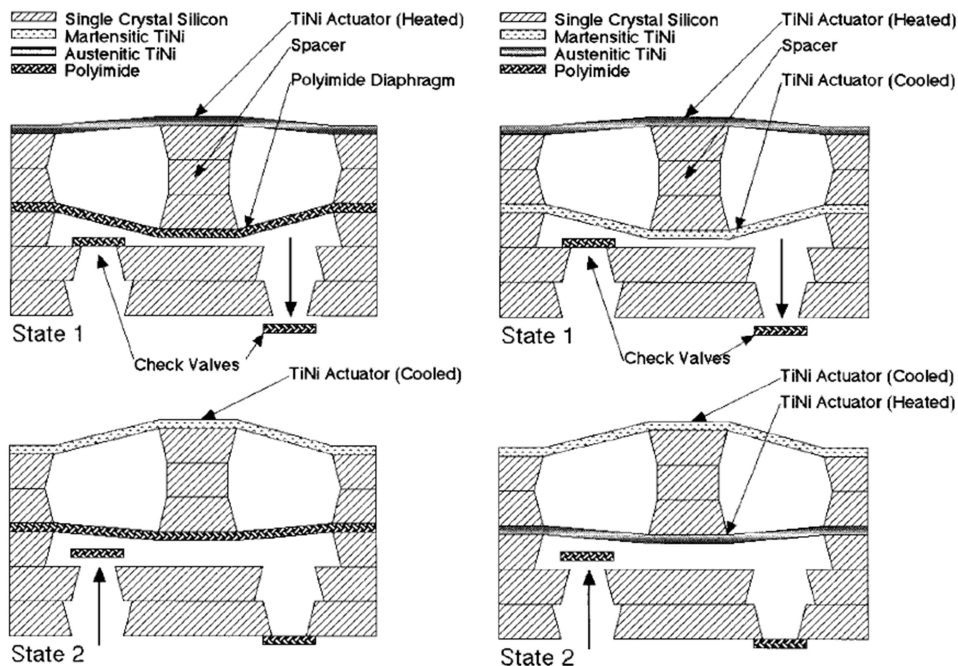


Figura 11 Micropompa con membrana elastica (a) e micropompa con attuatore complementare in SMA [10]

Nel caso (a) a contrastare l'attuatore SMA è l'elasticità di una membrana, nel caso (b) è un posto secondo attuatore che viene mantenuto in una fase opposta a quello principale.

Microvalvole fluidodinamiche

Esistono già modelli di valvole che implementano attuatori in memoria di forma, come visibile in Figura 12. Nella configurazione *Normally Open* (NO) l'effetto a memoria di forma viene sfruttato per chiudere il condotto, l'apertura viene invece garantita dalla pressione del fluido che genera una forza maggiore di quella necessaria a deformare l'attuatore; nella configurazione *Normally Closed* (NC) si ha invece che l'effetto a memoria di forma viene utilizzato per vincere la forza di compressione di una molla che normalmente tiene in posizione chiusa la valvola.

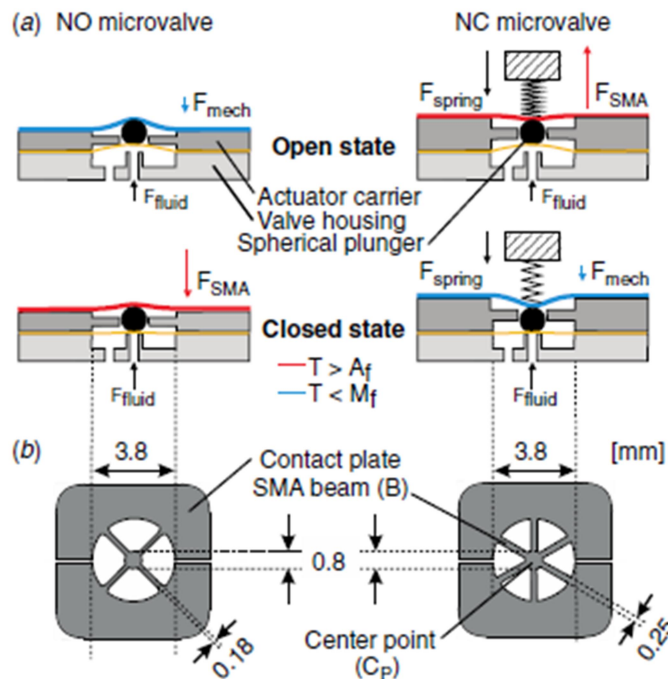


Figura 12 Configurazioni delle valvole NO e NC (a) e vista schematica degli attuatori SMA implementati (b) [5]

Questi attuatori hanno spessori nell'ordine dei 20 μm e operano per portate di circa 20 ml/min. Come si può vedere in Figura 13 queste valvole hanno ingombro molto ridotto, nell'ordine dei 40x40x40 mm^3 .

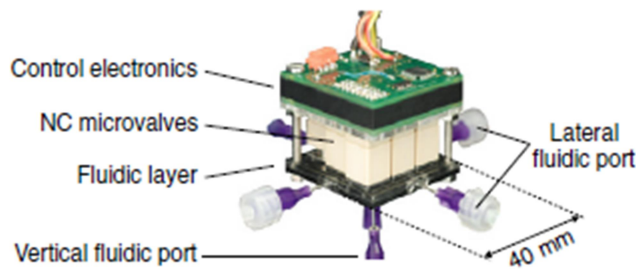


Figura 13 Vista complessiva di una microvalvola e del relativo sistema di controllo [5]

Microvalvole a gas

Lo stesso principio di funzionamento può essere utilizzato per implementare film sottili di NiTi in microvalvole a gas. Queste valvole hanno la caratteristica di poter raggiungere ingombri estremamente ridotti, fino a 3x3x5 mm^3 . In Figura 14 è riportato uno schema dei componenti della valvola, mentre in Figura 15 si mostra un prototipo di valvola realizzato.

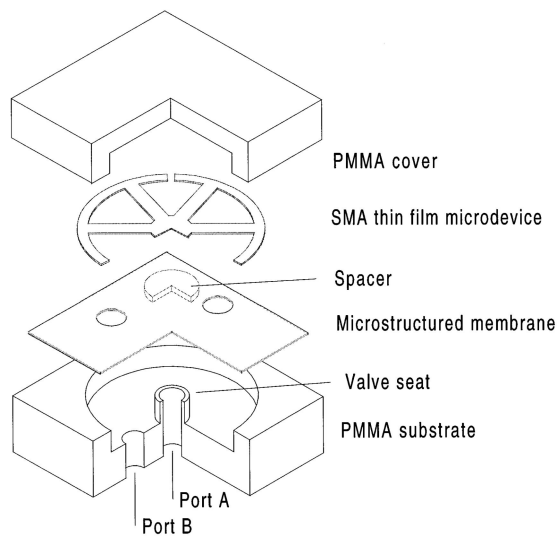


Figura 14 Sezione schematica della valvola [11]

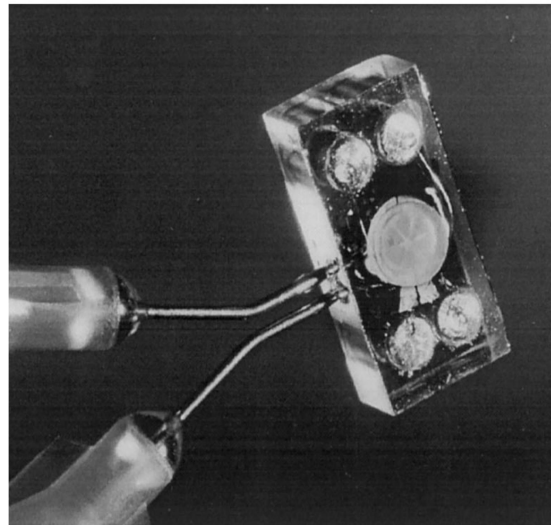


Figura 15 Prototipo di microvalvola a gas realizzato [11]

1.2: Riepilogo del lavoro svolto dall'Ing. Steiner

In questa sezione è ripreso e sintetizzato il lavoro svolto dall'ing. Steiner volto a definire il design ottimale dell'attuatore, in modo da avere una panoramica su quali sono state le scelte compiute in fase di ottimizzazione e quali saranno i parametri che dovranno essere confrontati con quelli ottenuti durante i test sperimentali.

1.2.1: Evoluzione del design

Le simulazioni sono partite dal design più semplice consistente in una trave a sbalzo e si è proceduto con l'incrementare la complessità di quest'ultima andando a ottimizzare un parametro alla volta; in particolare numero e larghezza delle travi e spessore complessivo di queste ultime. Inoltre, nelle varie simulazioni i parametri della lega saranno i più simili possibili a quelli definiti dall'azienda.

Come già anticipato, questo studio deriva dalla necessità di aprire/chiedere un canale della valvola, il movimento da realizzare sarà quindi uno spostamento assiale alla direzione del tubo. La prima configurazione ipotizzata, quella della trave a sbalzo, è subito accantonata poiché sarebbe molto difficile realizzare il vincolo a pattino su un film più sottile di un foglio di carta perciò sarebbe più semplice adottare una struttura simmetrica. Pertanto si è subito passati alla configurazione a "stella", in particolare il passo successivo è stato quello di ottimizzare lunghezza, spessore, numero e posizione di ogni razza.

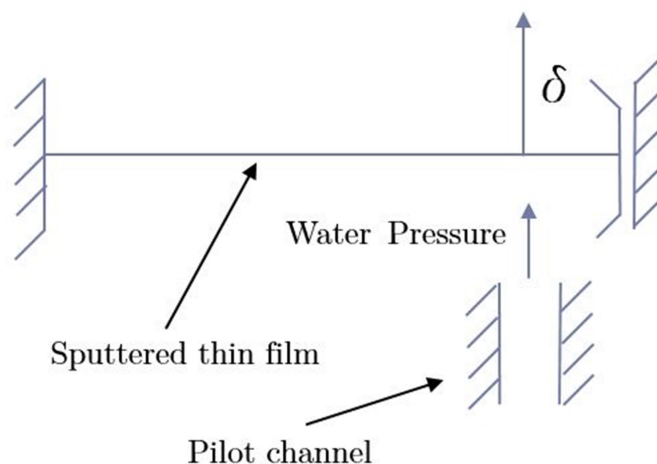


Figura 16 Configurazione con trave a sbalzo [1]

È stabilito che la posizione a bassa temperatura sia quella che mantenga chiuso il canale, questo perché nel caso manchi la corrente la valvola rimanga chiusa.

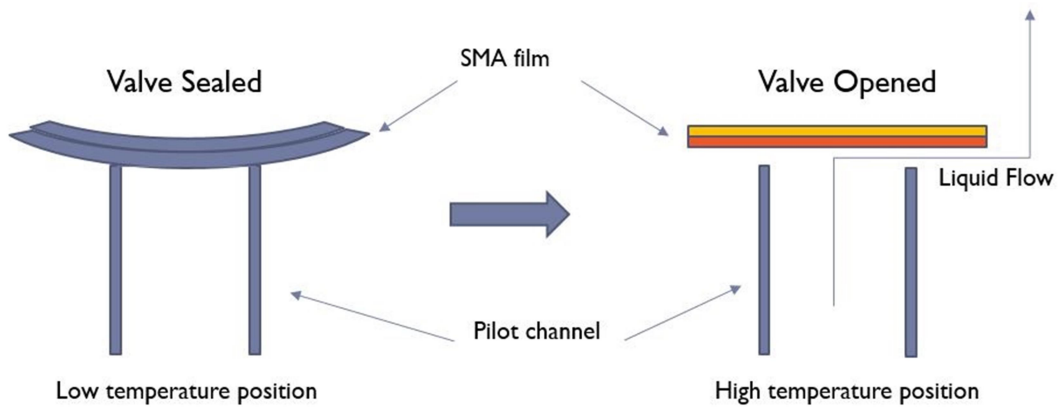


Figura 17 Posizioni della valvola alle diverse temperature [1]

Per avere un recupero è necessario imporre una deformazione, ciò si può fare o tramite una molla oppure depositando sulla lamella uno strato di materiale superelastico già deformato. Si sceglie di adottare la prima configurazione che è molto più semplice poiché non è conveniente pensare subito all'ottimizzazione.

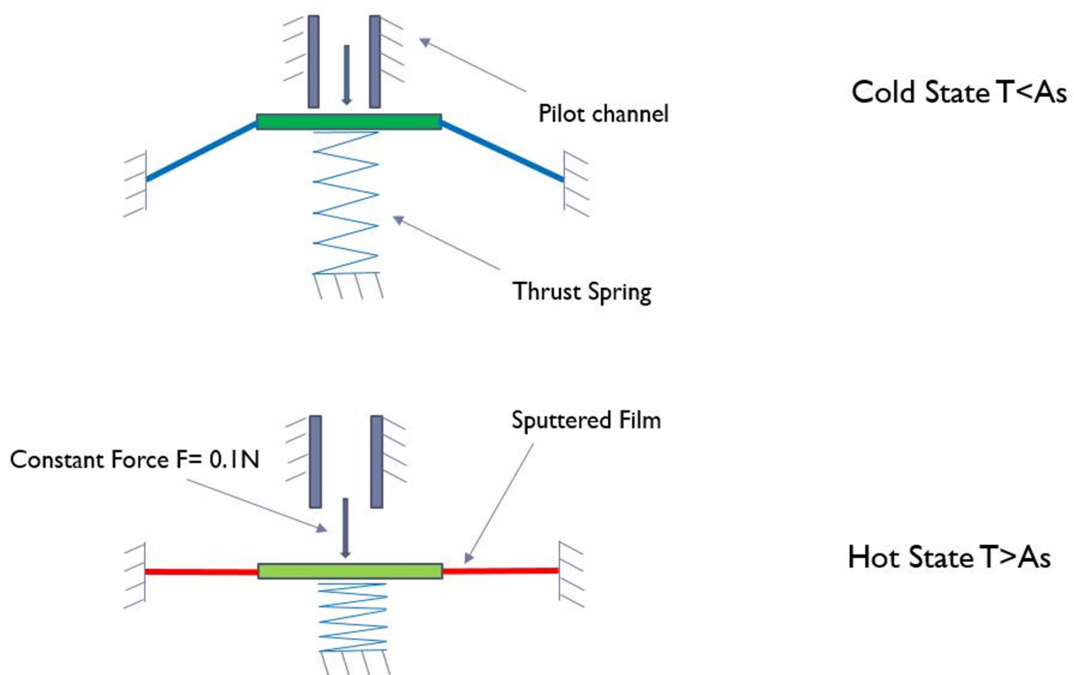


Figura 18 Deformazione imposta tramite una molla [1]

Per facilitare la chiusura del condotto al centro dell'attuatore è posto un elemento circolare con la funzione di sigillare il tubo evitando dei trafiletti, questo comporta un limite sul numero massimo di razze che sarà dettato dallo spazio

angolare disponibile. L'obiettivo dell'ottimizzazione geometrica è quello di ottenere il massimo spostamento verticale tra le due fasi dello SMA in modo da permettere il massimo passaggio di liquido.

1.2.2: Modello meccanico

Per questo tipo di analisi viene considerata la molla come una trave dotata unicamente di rigidità verticale.

L'obiettivo, che prevede sempre lo spostamento verticale di 1mm alla base della molla, è quello di conoscere la rigidità K_s della molla stessa in modo da ottenere una data deformazione iniziale della trave. Per far questo sono definite la rigidità trasversale della trave (1) e la rigidità assiale della molla (2), che è la nostra incognita.

$$E_B = \frac{12El}{l^3} \quad (1)$$

Dove E rappresenta il modulo di Young della lamina, I è il momento d'inerzia quadratico e l è la lunghezza della trave.

$$K_S = \frac{AE_S}{l_S} \quad (2)$$

Definendo poi le varie deformazioni imposte è possibile imporre un equilibrio delle forze.

$$\eta_B \frac{12E_B J}{l_B^3} = (\eta_B - \eta_S) \frac{E_S A_S}{l_S} \quad (3)$$

Da tale formula sarà possibile andare a ricavare la nostra incognita.

$$E_S = \frac{12E_B J l_S}{l_B^3 A} \quad (4)$$

1.2.3: Confronto tra i modelli

Per lo studio agli elementi finiti si prendono in considerazione tre modelli:

- Un modello lineare basato sulla variazione della rigidità tra le temperature di transizione;
- Un modello superelastico di Abaqus;
- Un modello tridimensionale che descrive le trasformazioni in fase solida indotte da sforzi e temperatura.

Quest'ultimo modello è un modello pre-implementato in Abaqus del Professor Ferdinando Auricchio dell'università di Pavia [12].

La differenza tra i modelli è che i primi due sono in grado di prevedere solo comportamenti pseudo elastici mentre il terzo è in grado di prevedere il comportamento durante il cambio di fase nei materiali a memoria di forma.

In particolare il primo è quindi un'approssimazione poiché richiede unicamente in entrata la rigidità delle due fasi della lega imponendo una transizione lineare tra la prima e la seconda.

Nel modello superelastico sono svolte solo delle simulazioni a temperature costanti, definendo delle curve sforzi-deformazioni e sforzi-temperatura. Questo modello prevede l'input di due moduli elastici due coefficienti di Poisson (riferiti alla fase austenitica e a quella martensitica), una deformazione di trasformazione e cinque sforzi chiave (inizio e fine trasformazione durante carico e scarico più quello d'inizio trasformazione in compressione).

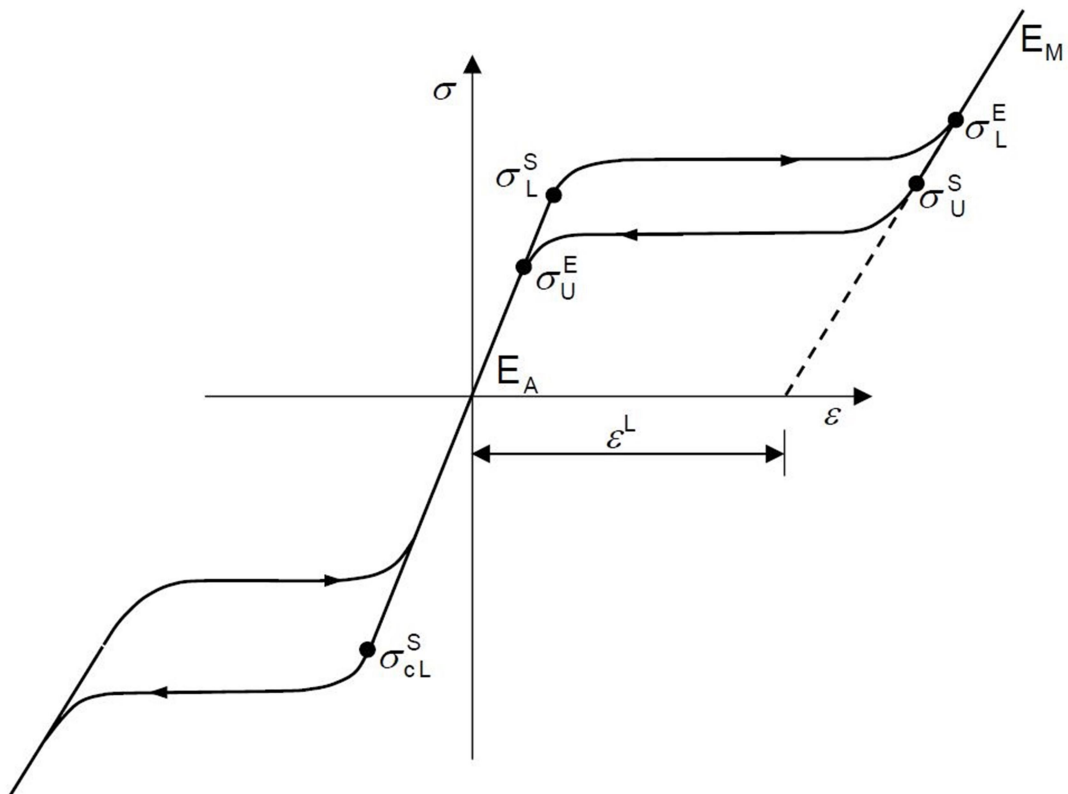


Figura 19 Curva Sforzi-Deformazioni del modello superelastico di ABAQUS [13]

Infine c'è il modello tridimensionale in grado di prevedere l'effetto di memoria di forma, ciò è fondamentale poiché permette di prevedere la corsa e le forze ottenibili dall'attuatore. Il modello è basato sul calcolo della funzione di energia libera e in particolare delle sue componenti: Energia di deformazione elastica, Energia chimica, Energia di deformazione di trasformazione, Energia libera e di un indicatore introdotto per soddisfare il vincolo posto dalla legge di deformazione della trasformazione. Dopo aver calcolato la funzione di energia libera è possibile calcolare la parte volumetrica e deviatorica degli sforzi, l'entropia e la forza termodinamica associata alla deformazione di trasformazione. È quindi fornito il modello continuo in cui sono definiti questi quattro parametri che dovrà essere discretizzato nel tempo per essere introdotto in una funzione in cui sarà iterato step by step. Dopo aver discretizzato va scelto un algoritmo solutivo che faccia convergere l'equazione in un risultato. Confrontando i modelli è utile sapere che il primo modello non considera la dipendenza dalla temperatura dello sforzo critico di trasformazione, mentre nel secondo è possibile impostare la temperatura della trasformazione degli sforzi come condizione iniziale. Il terzo modello non solo è in grado di simulare il comportamento pseudo elastico ma anche quello a memoria di

forma, tuttavia i modelli precedenti tengono in considerazione il differente modulo di Young tra le due fasi mentre in questo si considera un'unica rigidità e pertanto nelle simulazioni che usano questo modello viene impostato un valore di rigidità pari alla media tra quelle delle due fasi.

Tenendo conto delle considerazioni appena fatte, i tre modelli sono implementati utilizzando i parametri forniti da Acquandas.

Tabella 1 Proprietà della lega NiTi fornita da Acquandas [1]

	UdM	Austenite	Martensite
Conduttività termica	W/mK	18	8.6
Calore specifico	J/gK	0.45	0.45
Coeff. di dilatazione termica	10 ⁻⁶ /K	11	6.6
Clausius-Clapeyron	MPa/K	8	8
Modulo di Young	GPa	75	30
Coeff. di Poisson		0.3	0.3
Modulo di taglio	GPa	28.8	10.8
Densità	g/cm ³	6.45	6.45
Tensione di snervamento	MPa	550	100
Carico di rottura	MPa	1100	1100

Va considerato che, a seconda del modello implementato, saranno utilizzati solo alcuni dei dati forniti in Tabella 1.

È stata svolta una prima analisi con i tre modelli, impostando le seguenti condizioni al contorno:

- Sull'estremità di sinistra sono bloccati gli spostamenti verticali e orizzontali per creare una trave a sbalzo.
- Sull'estremità destra è permesso soltanto lo spostamento verticale per creare un vincolo di tipo pattino.
- L'estremità della trave e il corpo rigido sono vincolati tra loro in modo che non ci sia spostamento relativo.
- L'estremità superiore della molla è accoppiata al corpo rigido tramite un vincolo MPC, al piede della molla è concesso solo lo spostamento verticale.

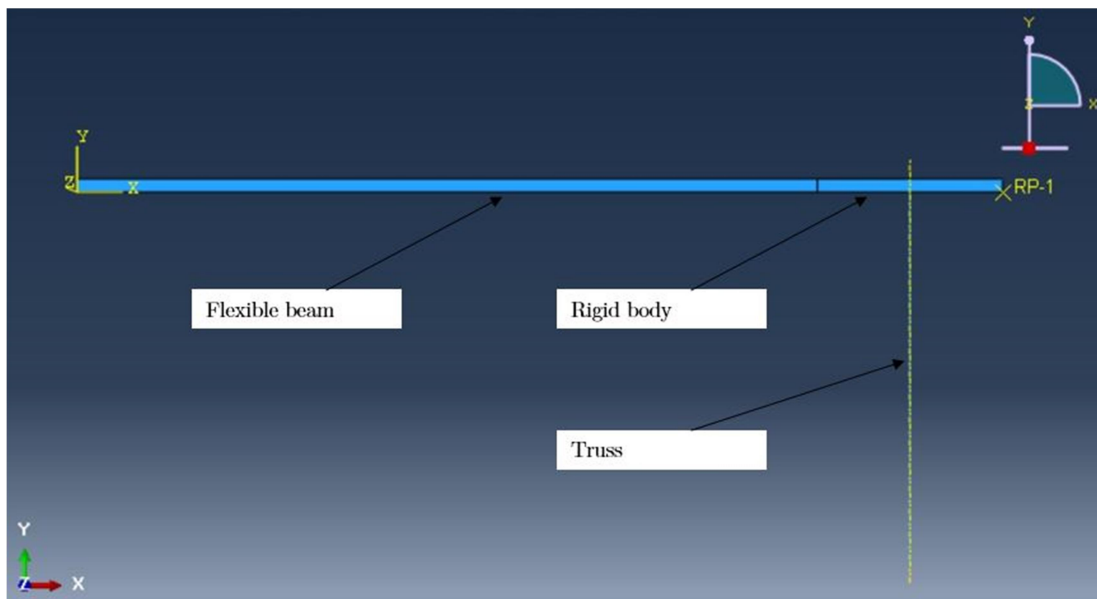


Figura 20 Configurazione indeformata del modello [1]

La simulazione viene dunque svolta imponendo una deformazione ai piedi della molla di 1mm e aumentando la temperatura. I risultati ottenuti mostrano solo piccole differenze ma in ogni caso quello di Auricchio Souza risulta essere quello più verosimile e pertanto è utilizzato nelle simulazioni successive.

1.2.4: Ottimizzazione

Per prima cosa viene ottimizzata la lunghezza della trave facendola variare tra 0,5mm e 5mm, un altro parametro fissato è il massimo spessore ottenibile tramite deposizione che è pari a 80 micron. Una volta ottimizzata la lunghezza della trave, il design è modificato in una versione con tre travi a stella dell'attuatore e ne sono testati spessore e prestazioni, infine è testata anche la configurazione a cinque travi per aumentare la prestazione e per vedere quali sono le variazioni in funzione di un cambiamento della larghezza delle stesse. Tra queste, il design con le migliori prestazioni viene scelto e testato per verificare che non vi siano spostamenti verticali (o che essi siano di un ordine di grandezza inferiore rispetto al recupero R del materiale) dovuti all'applicazione della pressione di lavoro (5 bar), inoltre è verificata la miglior modalità di inserimento nella valvola.

Ottimizzazione della singola trave

Lo scopo del processo di ottimizzazione è di ottenere non solo la lunghezza ottimale della trave ma anche la miglior configurazione iniziale intesa come spostamento prima del riscaldamento, questo perché il recupero è influenzato dalla presenza di deformazioni nel materiale a bassa temperatura. Per fare ciò si varia la rigidezza della molla mantenendo fissato e pari a 1mm il suo spostamento alla base in modo da ottenere, per ogni lunghezza della trave, spostamenti a basse temperature tra 0,1mm e 1mm. Viene sempre considerato lo stesso punto per avere uniformità di risultati, in particolare il punto considerato è quello all'estremità destra della trave.

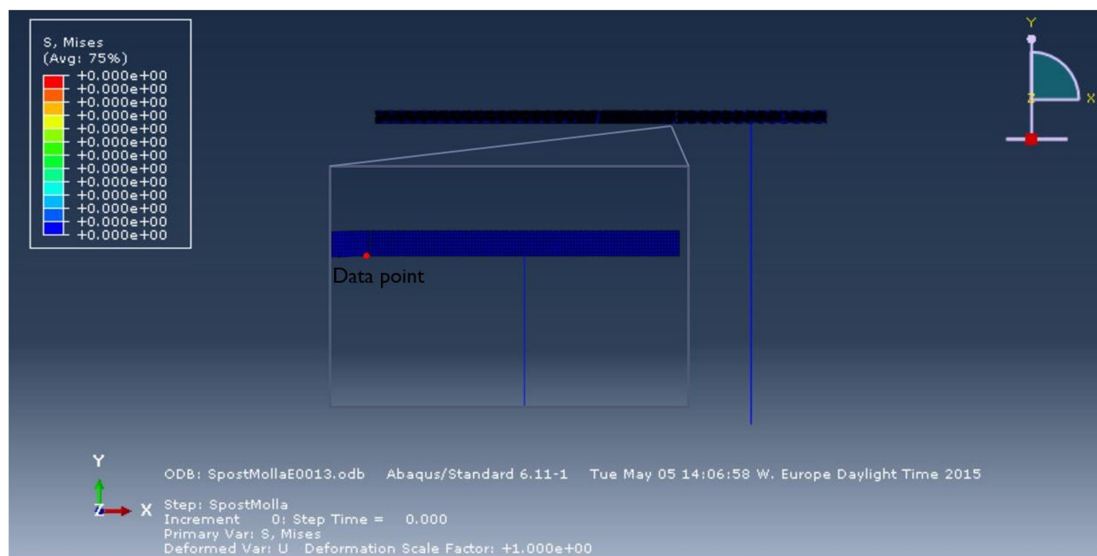


Figura 21 Posizione del punto considerato nella posizione deformata [1]

Dallo studio delle configurazioni si ottiene che quelle con maggior recupero (R) sono le travi di lunghezza 2mm e 2,5mm. Per considerare però anche gli sforzi all'interno di questo processo di ottimizzazione è introdotto un nuovo parametro (R_s) definito come.

$$R_s = \frac{U_c - U_H}{\sigma_c} \quad (5)$$

Dove U_c e U_H sono gli spostamenti verticali riscontrati rispettivamente al di sotto e al di sopra della temperatura di trasformazione, mentre σ_c è lo sforzo a cui è sottoposto il materiale al di sotto della temperatura di transizione una volta deformato.

Studiando il suo comportamento si nota che anche la lunghezza di 3mm restituisce dei valori competitivi pertanto d'ora in avanti saranno studiate queste tre lunghezze.

Ottimizzazione della configurazione con tre travi a stella

Una volta trovate queste tre lunghezze si passa allo studio dell'attuatore con tre travi disposte a 120 gradi, anche in questo caso sarà effettuato un processo di ottimizzazione della configurazione iniziale andando a variare la rigidità della molla e ottimizzando anche lo spessore dell'attuatore. A tal proposito sono testati tre spessori pari a 60, 70 e 80 micron, a parità di risultati converrebbe adottare o quella a spessore più basso in modo da velocizzare il processo di deposizione o quella a spessore maggiore in modo da poter conferire una rigidità maggiore all'attuatore. A questo punto sono ripetute le prove con tutte le combinazioni lunghezza-spessore andando a variare lo spostamento iniziale a freddo tra 0,1mm e 0,7mm. Isolando i migliori risultati per ciascuno spessore si ottiene il seguente grafico:

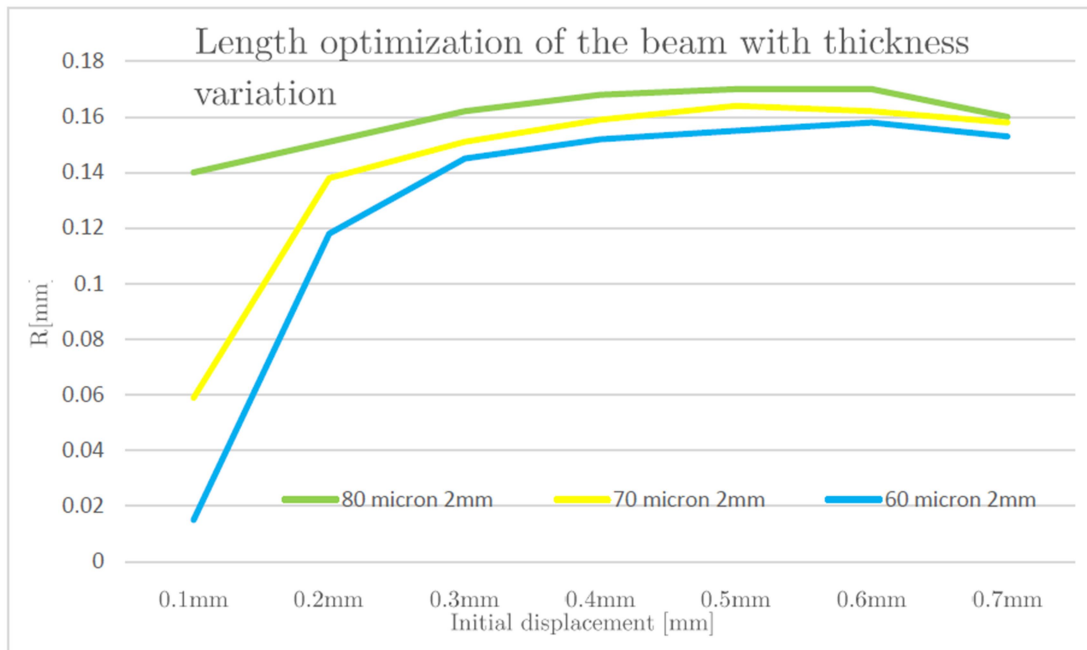


Figura 22 Migliori risultati per ciascuno spessore per la configurazione a stella con tre travi [1]

Come si può notare i migliori risultati sono quelli ottenuti con uno spessore di 80 micron anche perché, come detto in precedenza ha una maggior rigidezza e quindi questo aiuta a prevenire il trafilamento. Anche in questo caso è introdotto un parametro che va a misurare la differenza di Forza riscontrata al piede della molla tra lo stato caldo e quello freddo della lamella, dallo studio di quest'ultimo s'identifica come configurazione ottimale quella che prevede una trave di lunghezza 2mm e spessore 80 micron.

Ottimizzazione della configurazione a cinque travi a stella

Per verificare la capacità dell'attuatore a sviluppare una forza maggiore, è testata una configurazione a stella con cinque travi. Viene ripetuto lo stesso processo variando lo spostamento iniziale solo tra 0,4 e 0.6 millimetri poiché è l'intervallo che contiene i dati più significativi, mentre la lunghezza della trave è già stata ottimizzata e fissata a 2mm.

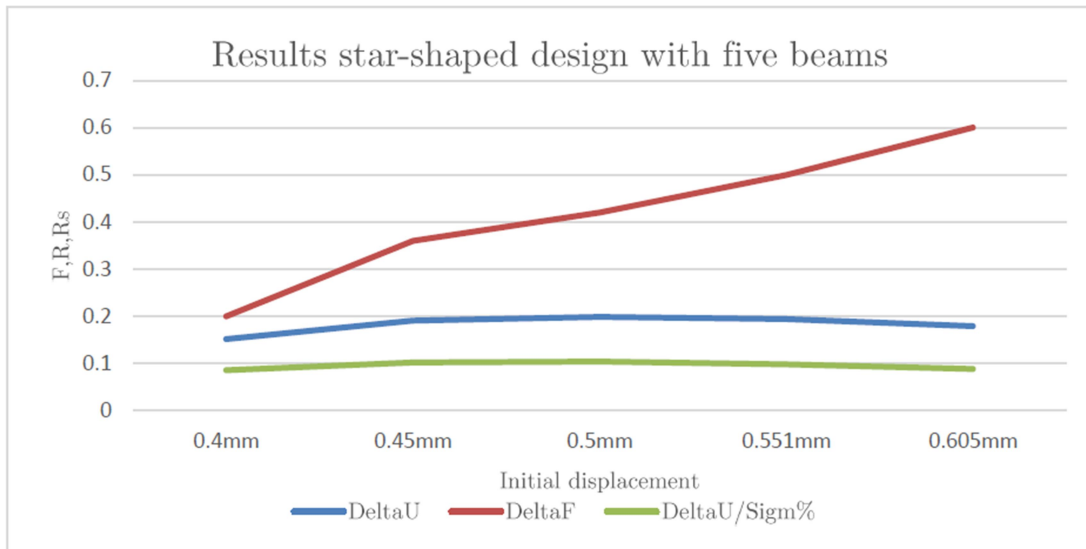


Figura 23 Andamento di R, R_s e F per la configurazione a cinque travi [1]

Un nuovo parametro da andare a verificare è la larghezza della trave di cui sono scelti tre valori: 0,6mm, 0,8mm e 1mm, tali valori sono scelti poiché per una larghezza minore di 0,6mm la rigidezza risulterebbe non essere sufficiente mentre valori maggiori di 1mm obbligherebbero a incrementare la dimensione del diametro interno spreco di materiale e rendendo l'attuatore troppo rigido.

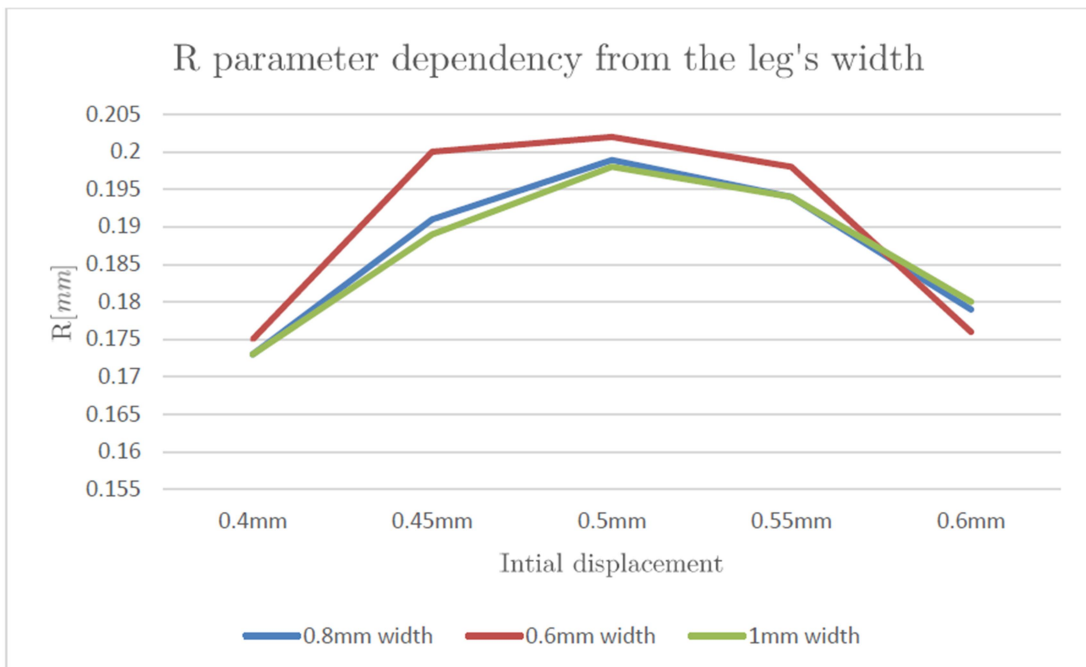


Figura 24 Andamento del parametro R in relazione alla larghezza delle travi [1]

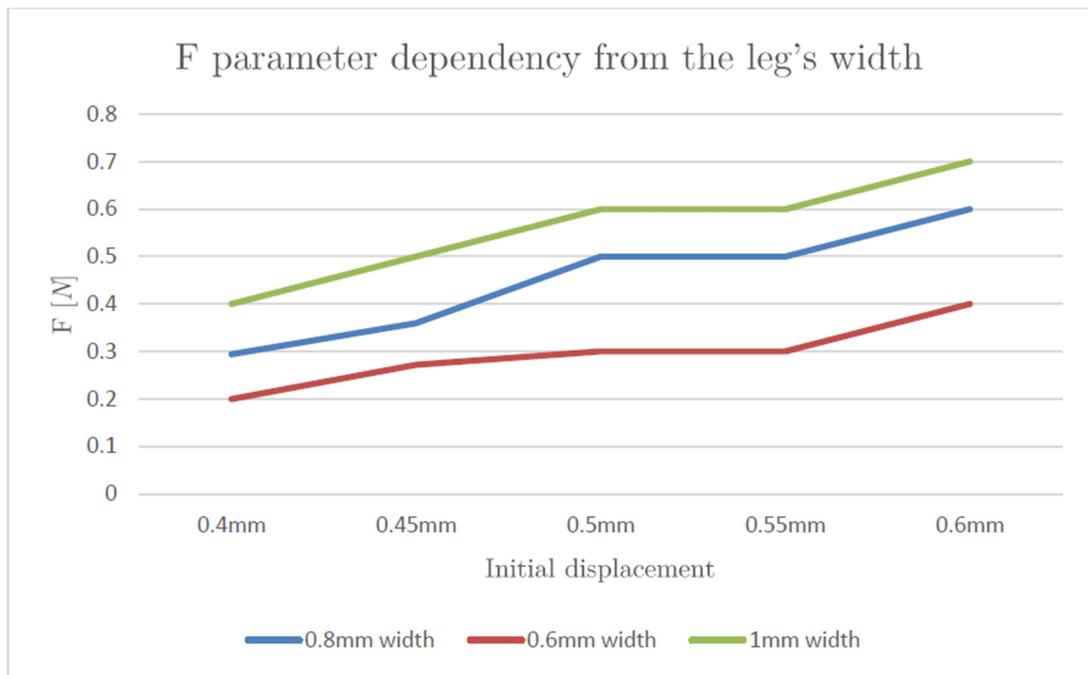


Figura 25 Andamento del parametro F in relazione alla larghezza delle travi [1]

Come si evince dalle Figure 8 e 9 si ha il miglior recupero (R) nel caso di larghezza uguale a 0,6mm e miglior forza (F) nel caso di larghezza pari a 1mm. Nonostante l'attuatore da 0,6mm di larghezza presenti il miglior recupero, esso viene considerato troppo poco rigido per cui viene scartato. Tra gli altri due, poiché presentano recuperi molto simili viene scelto per le simulazioni successive, quello da 0,8mm in modo da avere un attuatore che non risulti troppo rigido.

1.2.5: Verifica di tenuta

La verifica di tenuta viene eseguita simulando che l'attuatore sia sottoposto alla massima pressione di esercizio di 5bar. L'obiettivo è verificare che la lamella non si muova sotto l'effetto della pressione, ossia è necessario che lo spostamento verticale sia di un ordine di grandezza inferiore del parametro di recupero R.

Le cinque travi sono incastrate nelle rispettive estremità, la molla è posta sotto il centro dell'attuatore e la pressione agisce in verso contrario rispetto alla forza generata dalla molla. Vengono valutati tutti e tre i modelli sopra descritti in cui, tra l'istante zero e 1sec si ha l'applicazione del precarico, tra il tempo 1sec e il tempo 2sec si ha l'aumento lineare della pressione fino al valore di 0,5MPa e, solo per il terzo modello, tra il tempo 2sec e il tempo 3sec viene aumentata linearmente la temperatura fino a 100°C. Da queste prove si ottiene che:

- Il modello elastico semplice è il meno accurato poiché non descrive il comportamento non lineare del precarico;
- Il modello superelastico, seppur in grado di rappresentare tale comportamento non riesce a simulare l'effetto memoria di forma;
- Il modello di Souza Auricchio risulta invece essere il più accurato poiché è in grado sia di simulare il comportamento non lineare, che l'effetto memoria di forma.

Una volta stabilito che il modello più adatto a descrivere il sistema è quello di Souza Auricchio, viene rifatta la prova di tenuta sui tre valori di larghezza delle travi. Come era prevedibile, all'aumentare della larghezza aumenta la rigidità del sistema migliorando la tenuta ma peggiorando la capacità di recupero. Siccome le differenze tra le tre configurazioni non sono rilevanti, è scelto il valore di 0,8mm poiché è un buon compromesso.

1.2.6: Posizionamento nella valvola

È inizialmente previsto il bloccaggio dell'attuatore tra due lamine metalliche in aggiunta ad appositi fori posti alle estremità delle travi. È anche aggiunto un anello esterno di materiale per rendere l'assemblaggio e il posizionamento dell'attuatore più immediati. Siccome questo va a modificare la geometria ottimale studiata in precedenza, è necessario verificare queste modifiche con nuove simulazioni, in particolare viene testata la configurazione con i soli fori e la configurazione con anche l'anello esterno. Tali test vengono svolti unicamente su quello che è stato individuato come design ottimale, ossia quello con spessore pari a $80\mu\text{m}$ e cinque travi di lunghezza 2mm e larghezza 0.8mm.

Siccome incastrare tutto l'anello porta a valori di recupero nettamente maggiori, si sceglie di percorrere questa strada e con questa configurazione sono testate le larghezze di 0,8mm e 1mm e la prima risulta essere la migliore poiché ha una resistenza leggermente peggiore al trafilamento in favore di un notevole miglioramento nel recupero.

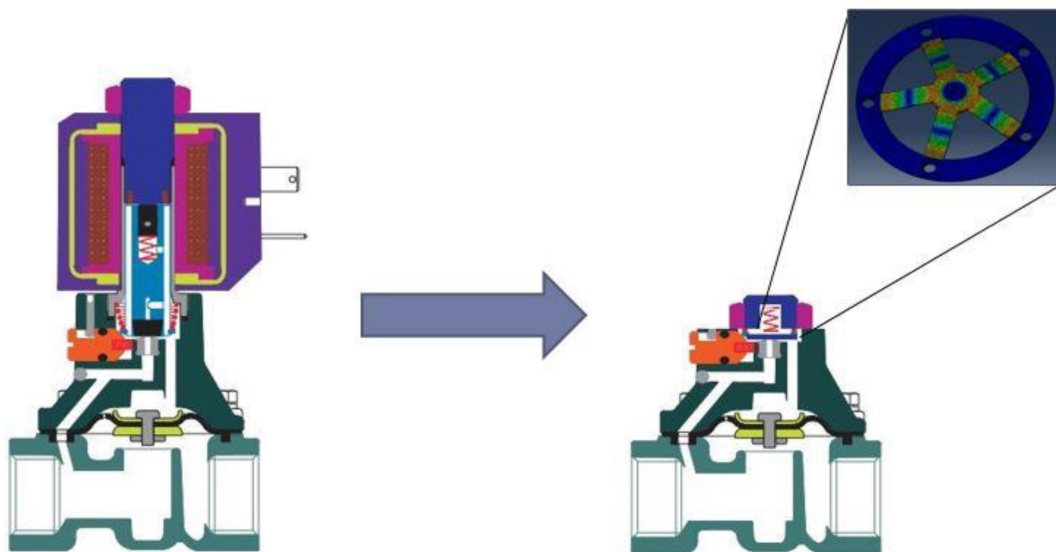


Figura 26 Posizione dell'attuatore nella valvola [14]

1.3 Riepilogo attuatori a disposizione

La fase finale del lavoro dell'ing. Steiner è consistita nella produzione di una prima serie di prototipi, tramite l'azienda Acquandas, su cui è stato ipotizzato un set-up sperimentale atto a testare le performance degli stessi.

Dovendo tener conto del fatto che le simulazioni sono state svolte con parametri che non rispecchiano perfettamente le proprietà reali del materiale e nell'ipotesi che queste stesse simulazioni potessero essere imprecise, si è scelto di produrre non solo la configurazione ottimale ma anche quelle che si ottengono diminuendo di circa il venti per cento le prestazioni migliori. Per quanto riguarda lo spessore, esso viene posto pari a 80 micron per ogni configurazione in quanto è risultata la scelta migliore in ogni simulazione svolta. Basandosi sul miglior recupero si ottiene una lunghezza della trave pari a 2mm, che è quella della configurazione ottimale, ma variando tale valore del 20% si ottengono anche le lunghezze di 1.5mm e 2.5mm. Variando la forza (parametro F) si ottiene una larghezza di 0.8mm. Combinando questi risultati, si ottengono le quattro configurazioni principali che sono infine prodotte:

- La configurazione ottimale, che corrisponde ad una lunghezza della trave di 2mm e a una larghezza di 0.8mm.
- La configurazione che fornisce il miglior recupero, ossia quella con una lunghezza di 2mm ed una larghezza di 0.6mm.
- Due ulteriori configurazioni che corrispondono al valore di recupero diminuito secondo quanto detto in precedenza, che per la lunghezza di 2.5mm consiste in una larghezza di 0.8mm e 1mm.

Tabella 2 Configurazioni prodotte [1]

Configurazione	Lunghezza (mm)	Larghezza (mm)
D2	2	0.6
D3	2	0.8
D5	2.5	0.8
D6	2.5	1

Nel caso in cui i risultati sperimentali siano molto distanti da quelli ottenuti nelle simulazioni, si può pensare di produrre e testare anche la configurazione più rigida e quella più flessibile:

Tabella 3 Configurazioni alternative [1]

Configurazione	Lunghezza (mm)	Larghezza (mm)
D1	1.5	1
D4	2.5	0.6



Figura 27 Prototipo di attuatore SMA

Inoltre prevedendo per la valvola effettiva un riscaldamento tramite corrente elettrica, per ogni attuatore realizzato, ne è stata realizzata una copia su cui sono stati depositati alcuni strati di rame puro finalizzati a facilitare il passaggio di corrente e l'aumento di temperatura.

Purtroppo non ci sono molti dati riguardo alle caratteristiche dello strato di rame depositato, ma si è portati a pensare che questo possa indurre un'ulteriore rigidità al sistema andando ad influenzarne il recupero massimo ottenibile.

Va sottolineato come la geometria finale, rispetto a quella del modello virtuale, presenti dei raccordi di 0,05mm sui bordi delle travi per migliorarne la resistenza a fatica. Inoltre si nota, tramite misurazione di Acquadant in seguito alla produzione, che lo spessore reale è di $88 \pm 1 \mu\text{m}$.

Capitolo 2: Prima fase sperimentale

In questo capitolo è descritta la fase sperimentale nella quale i vari tipi di attuatore prodotti sono stati testati in modo da poter avere dei termini di confronto con i risultati delle simulazioni.

Inizialmente vi è stata una fase di messa a punto del settaggio sperimentale volta a eliminare progressivamente tutte le fonti di errore non considerate durante la fase di progettazione del banco prova. Come ausilio a questa fase di trial and error è stata stilata una *Rete di Problemi* in modo di avere una miglior visione d'insieme della situazione e per poter isolare i problemi e affrontarli uno per volta.

In seguito, una volta ottenuto un set-up che garantisse una precisione adeguata, si è proceduto con la sperimentazione tramite due campagne di prove che però, avendo restituito risultati poco significativi, hanno reso necessaria la presa in considerazione di una nuova definizione del set-up.

2.1: Descrizione della strumentazione iniziale

Il banco prova utilizzato è formato da due dischi sagomati uniti tra loro tramite quattro colonne. Il disco superiore, in cui è alloggiato l'attuatore, è provvisto di un tappo che, andando in battuta sulla corona circolare esterna dello stesso, rende il vincolo assimilabile a un incastro.

Con riferimento alla Figura 28, gli elementi che contraddistinguono il banco prova sono:

1. Tappo sagomato;
2. Attuatore;
3. Supporto;
4. Bilanciere;
5. Sensore di misura;

6. Vista in sezione del sistema montato;

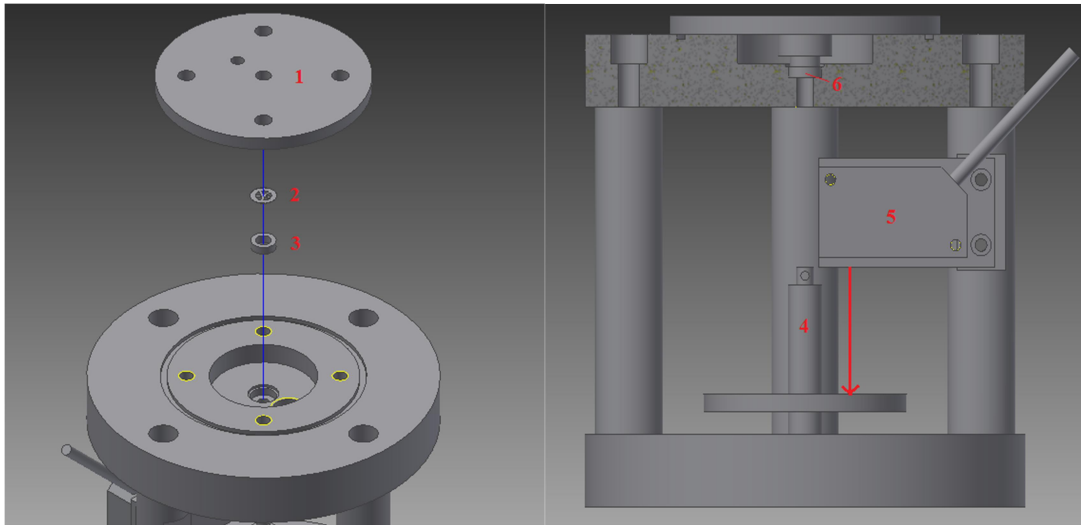


Figura 28 Banco prova

In particolare, nel disco superiore, è presente una serie di scavi concentrici di profondità e diametri differenti: lo scavo più stretto e profondo (C) è pensato per alloggiare i diversi supporti (3 in Figura 28, B in Figura 29) su cui andranno posti i vari attuatori (2 in Figura 28, A in Figura 29) in modo che essi si adattino alla geometria e si deformino solo lungo le travi. Tale scavo è inoltre dotato di un foro passante concentrico all'attuatore in modo che il bilanciere possa essere collegato allo stesso tramite un filo. Il secondo scavo (D), leggermente più largo e meno profondo è progettato in modo che si trovi alla stessa altezza dei supporti, una volta che essi sono posizionati all'interno del primo scavo, ed è quello in cui sono collocati i vari attuatori. Il terzo e ultimo scavo (E), di diametro molto maggiore e profondità minore, è quello attraverso cui fluisce l'aria calda che va a scaldare l'attuatore. Anche questo scavo presenta un foro passante filettato non concentrico in cui avvitare un apposito ugello che sarà collegato al tubo necessario a introdurre aria calda nel sistema.

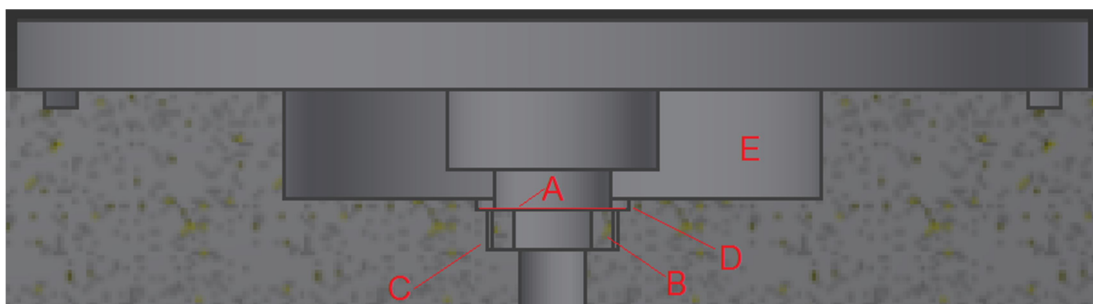


Figura 29 Dettaglio alloggiamento dell'attuatore

Sul coperchio è presente un foro di sfiato dell'aria calda, da porre a 180° rispetto a quello d'immissione per garantire un riscaldamento omogeneo, e un foro centrale di servizio utile per compiere delle eventuali misurazioni. Esso è fissato al disco principale tramite quattro viti standard, tra il coperchio e il disco è presente una guarnizione, alloggiata in un'apposita fuga, tale da garantire l'assenza di trafile. Per misurare lo spostamento si utilizza un sensore laser a triangolazione Panasonic HG-C 1050-P (le cui specifiche sono riportate in Appendice A), fissato a una delle colonne preventivamente lavorata in modo tale da puntare il piatto del bilanciere, come mostrato in Figura 28. I pesi sono stati fatti in modo che il baricentro sia concentrico al supporto del bilanciere in modo da non inclinarlo alterando la misura. Per collegare il bilanciere all'attuatore è stato previsto l'utilizzo di filo di nylon poiché non presentava problemi evidenti di dilatazioni termiche ed era sufficientemente sottile per quest'applicazione. In particolare per rendere più veloci le fasi di montaggio/smontaggio del sistema è stato realizzato un gancio a forma di S con cui poter appendere il bilanciere al filo. Il disco inferiore presenta uno scavo che funge da guida per il bilanciere.

Come metodo di riscaldamento iniziale è previsto l'utilizzo di un termosoffiatore a resistenze della Bosch modello GHG 660 LCD collegato a un tubo di silicone in modo da convogliare l'aria calda nella camera di alloggiamento dell'attuatore (E, Figura 29), mentre per verificare il raggiungimento della temperatura di transizione è stata sfruttata una termocoppia di tipo K.

2.2: Scelta del set-up ottimale per la sperimentazione tramite Rete di Problemi

La Rete di Problemi (*NoP*, dall'inglese *Network of Problems*) è uno strumento di Problem Solving che consente di scomporre un problema complesso in diversi sottoproblemi di più semplice soluzione. [15]

In particolare, si basa sulla realizzazione di uno schema gerarchico in cui si evidenziano le relazioni di causa e effetto tra problemi e soluzioni parziali. I nodi che costituiscono la Rete possono essere:

- Problemi (identificati dal colore giallo).
- Soluzioni Parziali (identificati dal colore verde).
- Domande agli esperti (identificati dal colore viola).
- Vincoli imposti (identificati dal colore blu).

In Figura 30 sono riportati il problema principale (che costituisce lo scopo di questo lavoro) e i suoi primi sottoproblemi con le relative soluzioni parziali.

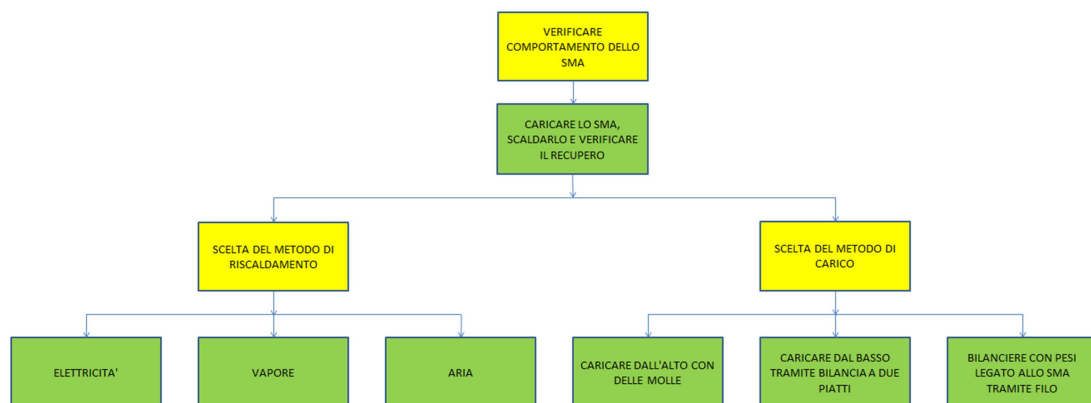


Figura 30 NoP-1: Primi livelli della rete

Tra le possibili soluzioni parziali individuate, si è scelto come primo approccio di procedere mediante l'utilizzo di un metodo di riscaldamento ad aria e di un metodo di carico basato su bilanciere e pesi.

2.2.1: Termosoffiatore industriale e bilanciere

In questo primo tipo di set-up l'attuatore è caricato facendo passare a cavallo del centro un filo di nylon che sostiene il bilanciere su cui sono applicati i pesi. Il calore necessario al cambiamento di fase è fornito dall'aria proveniente dal termosoffiatore, settato a una temperatura di 130°C, che è collegato al banco prova tramite un tubo di silicone. Per limitare il più possibile le perdite di carico è stata minimizzata la lunghezza di tale tubo di collegamento. Una volta all'interno della camera di riscaldamento (E, Figura 29) l'aria va a scaldare, per convezione, l'attuatore trasmettendo calore al suo anello esterno.

Nonostante ciò non si è riusciti ad ottenere un aumento di temperatura sufficiente ad avviare il cambiamento di fase nell'attuatore poiché le dissipazioni termiche del banco di alluminio risultano essere troppo elevate. La temperatura ottenuta è stata tuttavia sufficiente a portare al cedimento del filo, ciò si ritiene sia dovuto non tanto all'effetto del calore su quest'ultimo, ma ad un'azione meccanica di taglio dell'attuatore riscaldato sul sottile filo di nylon. A tal proposito si è deciso di adottare del filo di cotone come nuovo mezzo di sostegno del bilanciere. Per cercare di limitare le perdite e ottimizzare la fase di riscaldamento è stata concordata con Fluid-o-Tech un'asportazione di materiale dal cilindro che tiene in battuta l'attuatore in modo da permettere un notevole aumento della superficie di scambio termico.

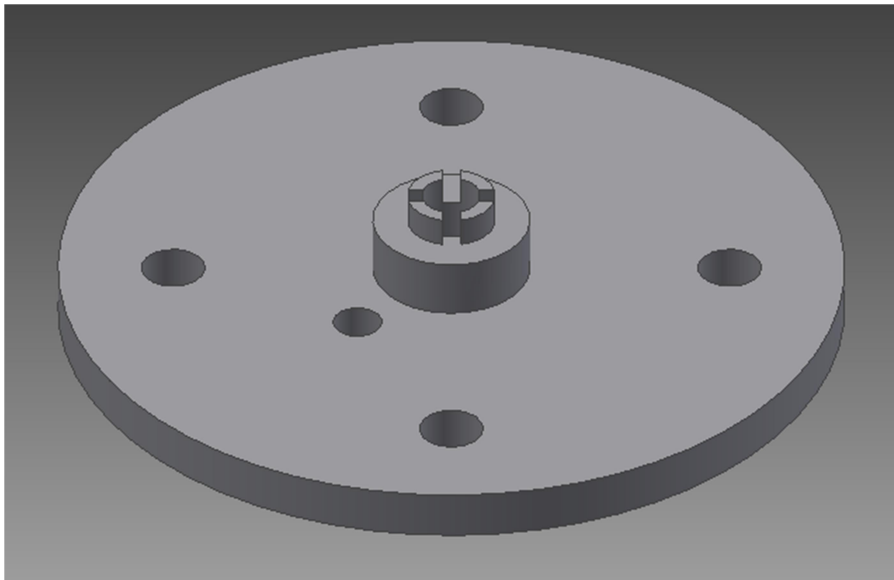


Figura 31 Dettaglio degli scavi realizzati sul tappo

Essendo ora presente un nuovo sfiato per l'aria, non è più necessaria la camera di riscaldamento, pertanto si è cercato di isolare il più possibile il resto del banco dalla zona calda inserendo all'interno della camera stessa un disco di legno appositamente sagomato.

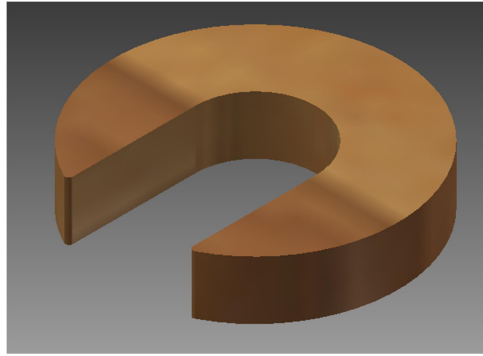


Figura 32 Disco isolante in legno

Questo disco, oltre a prevenire il trasferimento di calore tra aria immessa dal termosoffiatore e pareti del banco, ha anche la funzione di costringere l'aria a fluire attraverso il nuovo sfiato e quindi andare direttamente a contatto con l'attuatore.

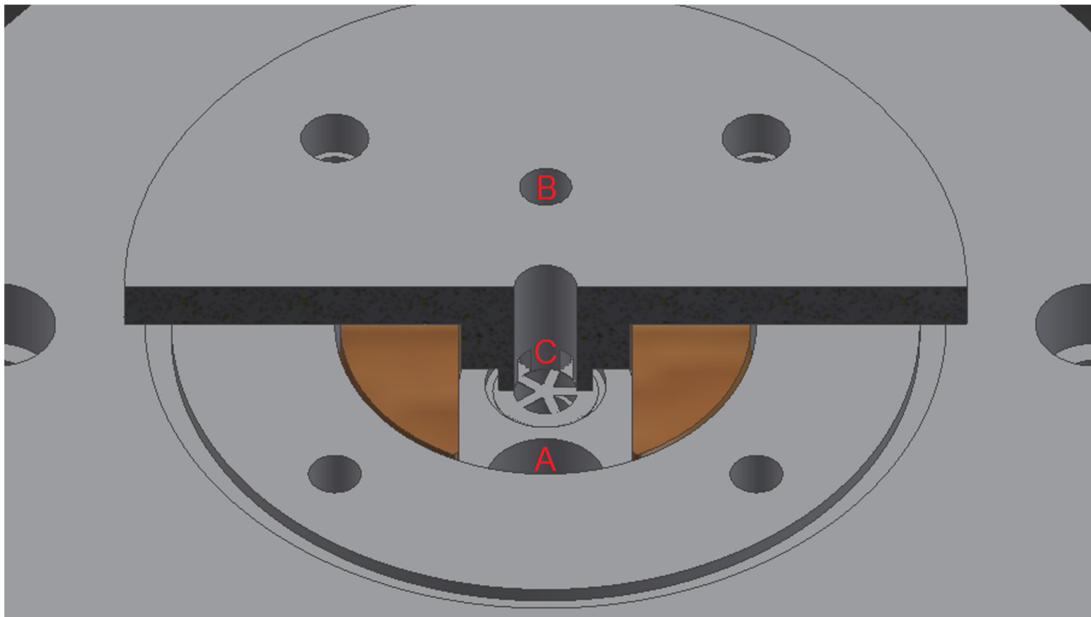


Figura 33 Vista in sezione con disco isolante montato

Con riferimento a Figura 33, si identifica:

- A. Foro di ingresso aria.

B. Foro di sfiato precedentemente utilizzato, ora ostruito dal disco di legno.

C. Nuovo sfiato dell'aria.

Con questa nuova configurazione sono state svolte delle prove sperimentali preliminari per testare il comportamento di massimo dell'attuatore. Tali prove prevedono il montaggio dell'attuatore nella sua sede, il caricamento dei pesi sul bilanciere e l'accensione del termosoffiatore alla temperatura di 180°C, per un tempo sufficiente a portare il sistema alla temperatura necessaria a far compiere alla lega a memoria di forma la transizione di fase. Durante queste prove non si è notato alcun recupero della deformazione da parte dell'attuatore anzi, una volta avviato il riscaldamento, la distanza letta dal sensore aumenta di alcuni decimi di millimetro.

Siccome questo comportamento si discosta di molto da quello atteso, poiché una volta applicato il precarico non si dovrebbero avere ulteriori deformazioni, si è indagato sulle possibili cause richiamando la Rete di Problemi

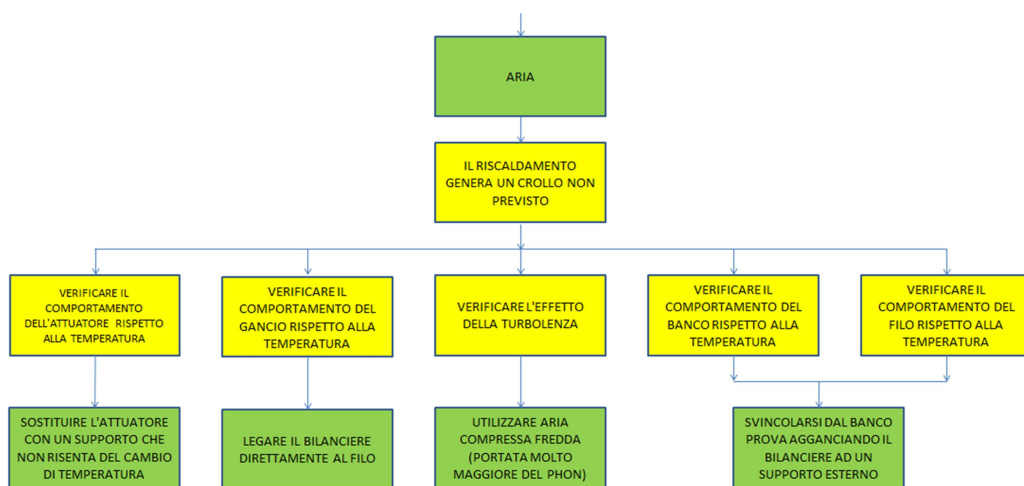


Figura 34 NoP-2: Analisi del calo imprevisto

Sono state prese in considerazione le soluzioni parziali individuate tramite il ramo del NoP riportato in Figura 34, con i seguenti risultati:

- Per accertarsi del fatto che il fenomeno non fosse legato ad un comportamento anomalo dell'attuatore, esso è stato sostituito con un supporto sagomato in legno che non risente dell'effetto del calore. Dopo aver svolto una prova analoga alle precedenti, poiché si è registrato lo stesso problema si è potuto escludere l'attuatore dalle possibili cause;

- Sospettando potesse avere delle dilatazioni termiche, si è provato ad eliminare il gancio metallico interposto tra il filo e il bilanciare andando a collegare gli stessi in modo diretto tra loro. Tuttavia anche in questo caso è stata riscontrata la deriva dello spostamento letto dal sensore;
- Il passo successivo è stato quello di indagare su eventuali effetti della turbolenza provocata dal flusso di aria circolante nel sistema, per fare ciò è stato sostituito il termosoffiatore con un compressore in grado di fornire una portata d'aria nettamente maggiore. Si è riscontrato che con esso si ha un calo di massimo 3 centesimi di millimetro contro i circa 40 centesimi che si hanno durante le prove svolte con una portata minore ma un temperatura molto maggiore;
- Si è quindi testata l'incidenza del banco prova per essere sicuri che non entrassero in gioco fenomeni di dilatazione termica del banco stesso dovuti agli elevati transitori presenti durante le prove. Per fare ciò il filo di sostegno del bilanciare è stato vincolato ad un supporto esterno posto in asse con il foro centrale in modo che il filo passasse attraverso la camera senza avere alcun contatto con il banco. Anche in questo caso tale soluzione non ha portato ad eliminare il problema indagato;
- Come unica possibile causa da analizzare rimane il filo di sostegno. Si è deciso di svolgere delle prove con fili di materiale diverso dal cotone, come per esempio il rame. Ciò che si è ottenuto è stato un calo simile a quelli già riscontrati, anche se di entità minore, e soprattutto che veniva per la maggior parte recuperato al termine della prova, una volta spento il termosoffiatore.

Una volta riscontrato che il problema in questione è legato alla natura del filo di sostegno, si è ritornati sulla Rete di Problemi per studiare le possibili soluzioni da applicare.

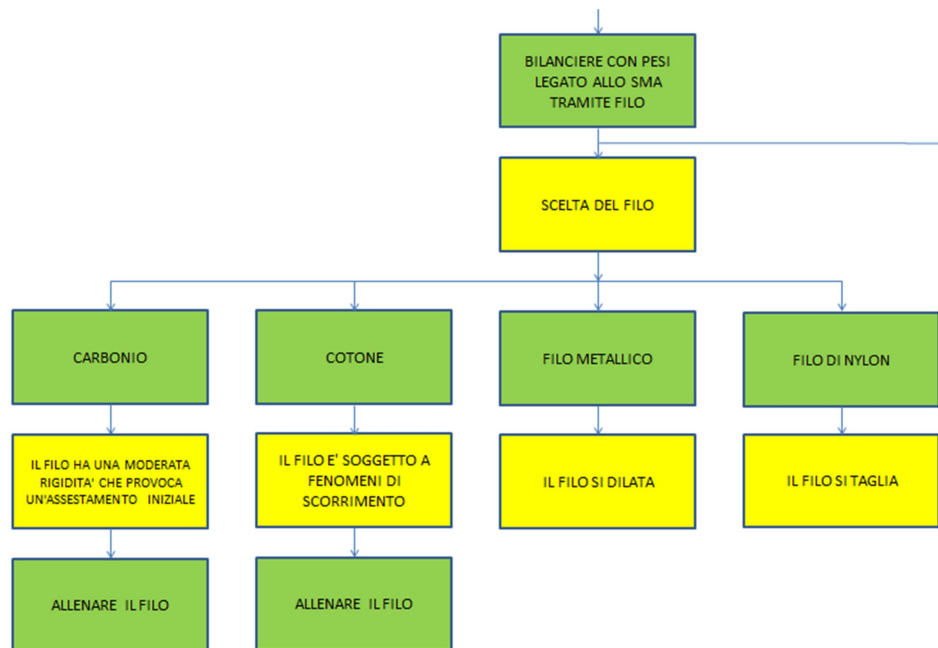


Figura 35 NoP-3: Scelta del filo

Non potendosi trattare di dilatazione termica, il fenomeno è stato interpretato come una sorta di scorrimento delle fibre tessili, di difficile interpretazione e modellazione. Si è inoltre osservato che una volta spento il termosoffiatore si verifica un ulteriore calo repentino del bilanciere nell'ordine dei 10-15 centesimi di millimetro. Tale calo viene però interamente recuperato in tempi brevi nel caso di nuova accensione. Ciò ha portato alla conclusione che, dopo un transitorio iniziale, fosse possibile osservare il comportamento a memoria di forma dell'attuatore. Pertanto, per gestire tale transitorio, si è ipotizzato di sottoporre il filo ad allenamento imponendo un ciclo di riscaldamento preliminare alle prove fino a portare lo stesso ad un valore stabile di lunghezza.

Per mettere in mostra il comportamento dell'attuatore è necessario essere sicuri che esso superi la sua temperatura di transizione, si è quindi deciso di impostare il termosoffiatore a 250°C. Ciò tuttavia costituisce un problema poiché il tubo di silicone non resiste a lungo a tali temperature, pertanto si è scelto di svolgere le prove alternando fasi di accensione a fasi di spegnimento, fissate in modo arbitrario della durata di 40 secondi ciascuna, tempo sicuramente sufficiente a far avvenire il cambiamento di fase sia in accensione che in spegnimento, ma non eccessivamente lungo in quanto altrimenti porterebbe ad un surriscaldamento del banco, imponendo

un'inerzia termica eccessiva al transitorio di raffreddamento, per un totale di dieci minuti a prova.

Da tali prove è stato osservato che:

- Dopo una prima fase di deriva, il filo si stabilizza permettendo una buona osservazione del comportamento tipico degli SMA. Ciò significa che il filo è sottoponibile ad allenamento, quantomeno all'interno della singola prova;
- Un sistema di carico di questo tipo è difficilmente bilanciabile, sia a causa della non perfetta geometria di componenti quali i pesi, il gancio e il bilanciere, sia a causa dei problemi legati all'imprecisione data dalla modalità di aggancio del filo all'attuatore. Questi fattori causano inoltre un effetto pendolo di torsione durante gli spostamenti dovuti alle transizioni di fase;
- All'interno delle fasi di accensione sono state notate delle variazioni anomale della distanza letta, ciò è stato attribuito alla natura del termosoffiatore a resistenze, le quali si accendono e si spengono in continuazione al fine di mantenere, in modo grossolano, la temperatura costante.
- Si è notato che verso la fine di ogni prova, in particolare negli ultimi due o tre cicli, si ha una diminuzione del recupero. Ciò è stato attribuito al fatto che, scaldandosi tutto il banco prova, i transitori risultano molto rallentati non consentendo quindi all'attuatore di cambiare completamente fase.

I grafici riportanti i risultati delle prova sopra descritte, sono mostrati in Figura 36.

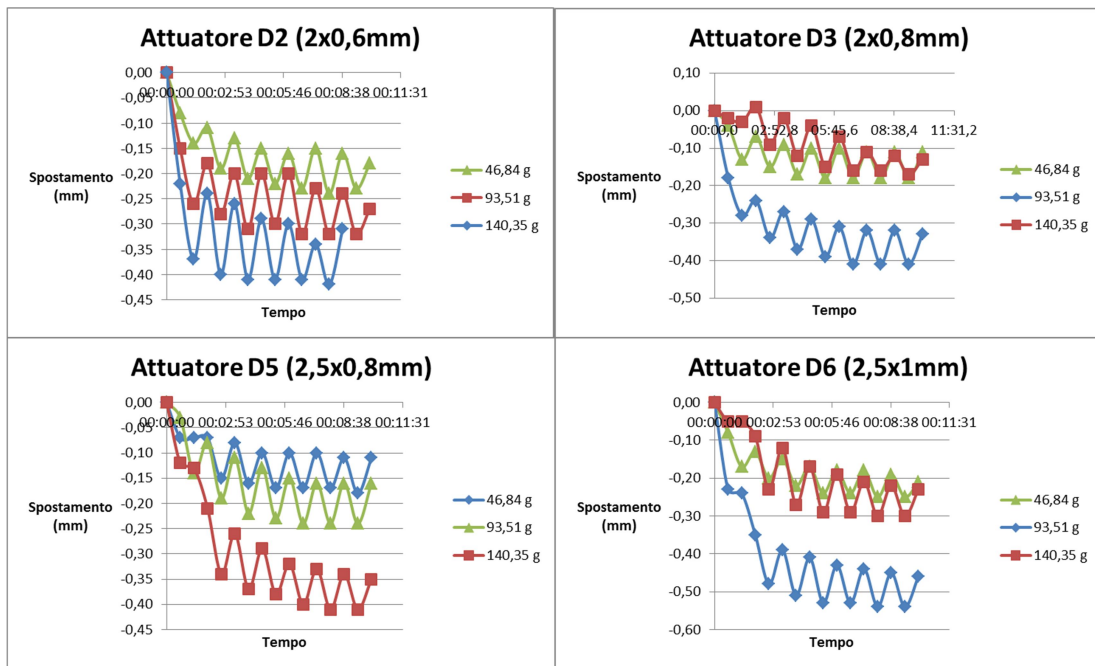


Figura 36 Risultati della prima prova sperimentale

Per quanto riguarda i dati numerici dell'intera sessione di prove si rimanda all'Appendice B.

Questi dati risultano essere poco significativi per diversi motivi, per esempio non si notano grandi differenze fra i vari attuatori o i vari pesi, inoltre la deriva iniziale rende impossibile quantificare lo spostamento iniziale dovuto al precarico. Tuttavia, si registra, da parte dell'attuatore D2, un recupero tendenzialmente maggiore rispetto a quello ottenuto con gli altri.

Inoltre, questa prima sperimentazione, è servita a identificare i fattori di disturbo che influenzano maggiormente le misure:

- Il metodo di riscaldamento tramite termosoffiatore è troppo incerto, poiché non fornisce temperature stabili e soprattutto riscalda in modo generalizzato tutto il banco, creando inerzie termiche che influenzano le misure in prove successive;
- Il metodo di carico tramite filo di cotone e bilanciere è impreciso sia a causa dello sfibramento del cotone che genera un crollo nella misura letta, sia a causa dell'effetto pendolo di torsione che si verifica alla presenza del minimo

sbilanciamento. Inoltre con questo metodo non è possibile andare a leggere la deformazione dovuta al carico.

Infine si è deciso di studiare la possibilità di imporre un allenamento permanente al filo di cotone, in modo da poter eliminare la fase iniziale di assestamento presente in ogni prova. Per farlo sono state svolte in successione diverse prove con la stessa configurazione del sistema: inizialmente si sono svolte tre prove scaricando l'attuatore tra una prova e l'altra e aspettando il completo raffreddamento del banco prova; successivamente queste prove sono state ripetute lasciando l'attuatore montato con il carico applicato. In entrambi i casi si è notato che tale allenamento, pur avendo qualche effetto sul filo, non è sufficiente ad ottenere la precisione richiesta da questo lavoro, che è nell'ordine del centesimo di millimetro.

I dati ottenuti e le osservazioni fatte in questa fase sono state inserite nel NoP, proseguendo l'analisi con questo strumento si è giunti alla conclusione che la soluzione migliore è quella di cambiare il metodo di riscaldamento.

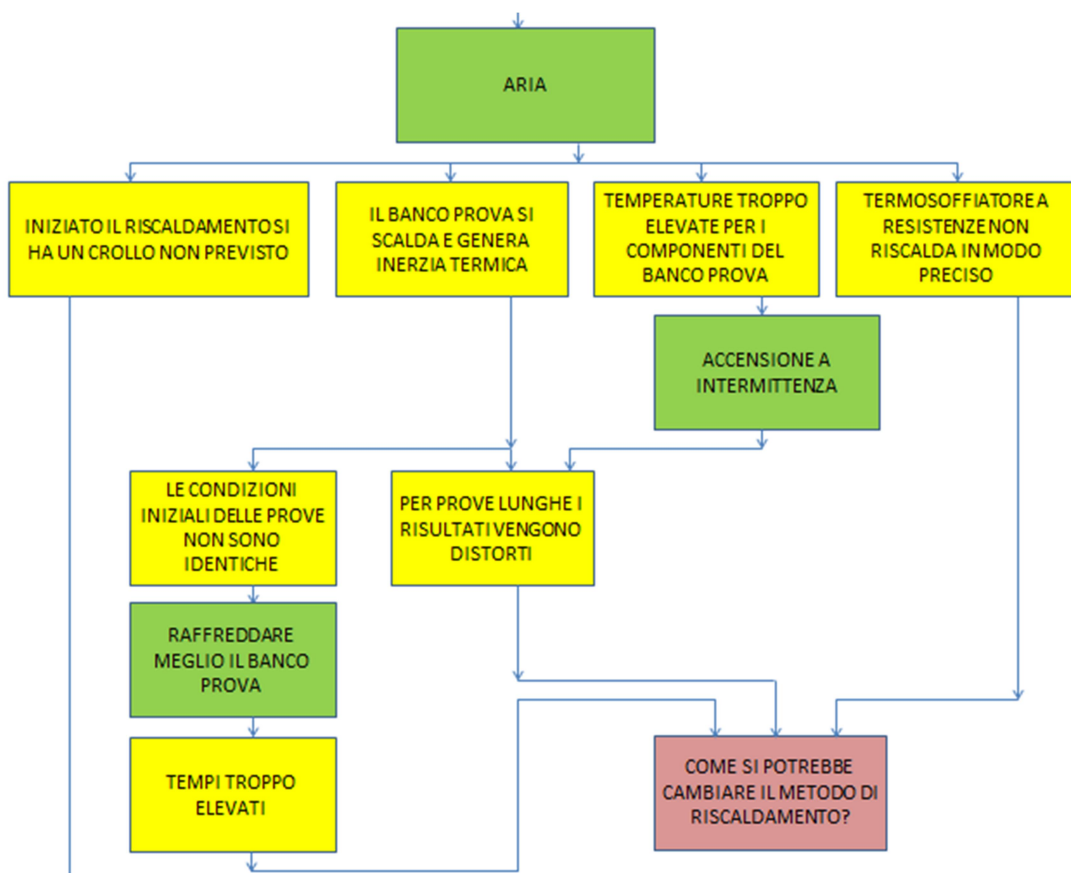


Figura 37 NoP-4: Problematiche legate al riscaldamento ad aria

2.2.2: Resistenza a filo e bilanciere

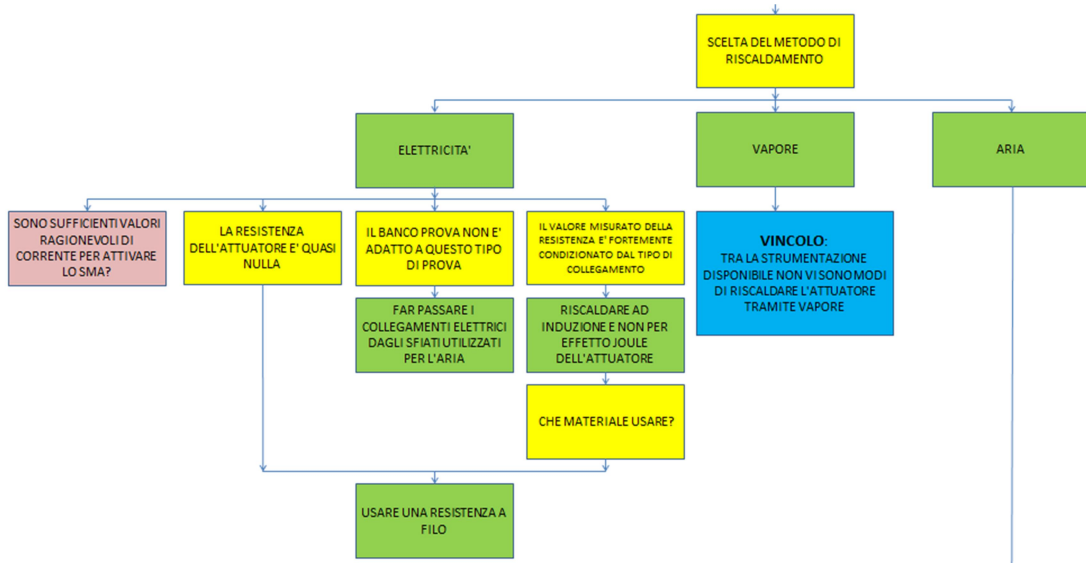


Figura 38 Scelta del metodo di riscaldamento

Sfruttando la Rete di Problemi, sono stati individuati due metodi di riscaldamento alternativi che prevedono l'utilizzo di vapore o l'utilizzo di elettricità. Il primo metodo è stato in un primo momento escluso in quanto con la strumentazione inizialmente disponibile non era attuabile, oltre che essere difficilmente gestibile e soprattutto, non essendo implementabile nella valvola finale, poco utile ai fini pratici.

Si è quindi deciso di esplorare le alternative fornite dalla possibilità di sfruttare energia elettrica. Come prova preliminare si è voluto verificare che fosse possibile attivare la transizione di fase facendo passare la corrente elettrica direttamente attraverso l'attuatore, perciò dopo aver collegato in serie lo SMA e due resistenze note è stata fornita corrente tramite un generatore con controllo del potenziale. Da questa esperienza si è potuto constatare che l'attuatore ha una resistenza praticamente nulla e che una corrente di 100mA è sufficiente ad attivarlo e a fargli recuperare completamente una deformazione imposta, anche se in tempi abbastanza lunghi. Aumentando la corrente fino a 170 mA il recupero aumenta notevolmente di velocità.

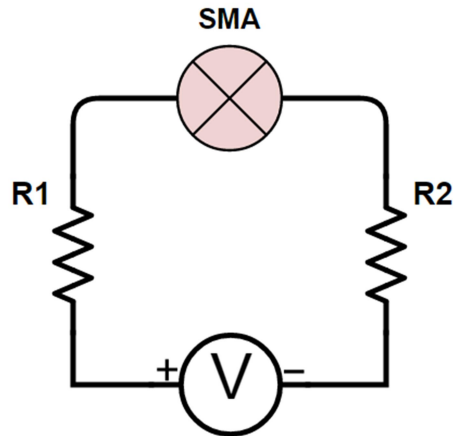


Figura 39 Circuito utilizzato per testare l'effetto Joule

L'utilizzo di questo tipo di collegamento non è tuttavia efficace per gli scopi di questo lavoro sia poiché risulta difficilmente inseribile nel banco prova a disposizione, sia perché la corrente circolante dipende fortemente dal modo in cui i morsetti vengono applicati alle resistenze e dal modo in cui queste ultime sono a contatto con l'attuatore.

Tuttavia i buoni risultati dati da questo metodo, uniti al fatto che già l'ingegner Steiner nel suo lavoro di tesi ha individuato nel passaggio di corrente il metodo migliore di attivazione del comportamento a memoria di forma, hanno portato ad insistere nella ricerca di una soluzione in queste direzioni. In seguito ad un consulto con Fluid-o-Tech e con il Professor Cascini è stata individuata l'utilizzo di una resistenza a filo come valido metodo di riscaldamento per la fase di caratterizzazione degli attuatori.

In particolare si è scelto di realizzare una serie di avvolgimenti attorno alle travi dell'attuatore attraverso un filo di costantana rivestito con materiale isolante del diametro di $80\mu\text{m}$ e con resistenza pari a $100\Omega/\text{m}$. Questo materiale, composto al 60% di rame e al 40% di nichel, è stato scelto per la sua proprietà di mantenere pressoché invariata la resistività all'aumentare della temperatura, motivo per cui viene spesso utilizzato per operazioni di riscaldamento mediante induzione.

Questo metodo di riscaldamento sfrutta l'effetto Joule della resistenza a filo percorsa da corrente per generare calore che verrà trasferito all'attuatore tramite induzione. Il calore trasferito è legato alla temperatura raggiunta dal filo, che è proporzionale all'intensità di corrente che attraversa il filo stesso. Quindi, essendo fissata la

lunghezza totale dell'avvolgimento, per ottenere un certo valore di intensità di corrente (e di temperatura) è necessario imporre tramite il generatore un determinato valore di potenziale (Legge di Ohm).

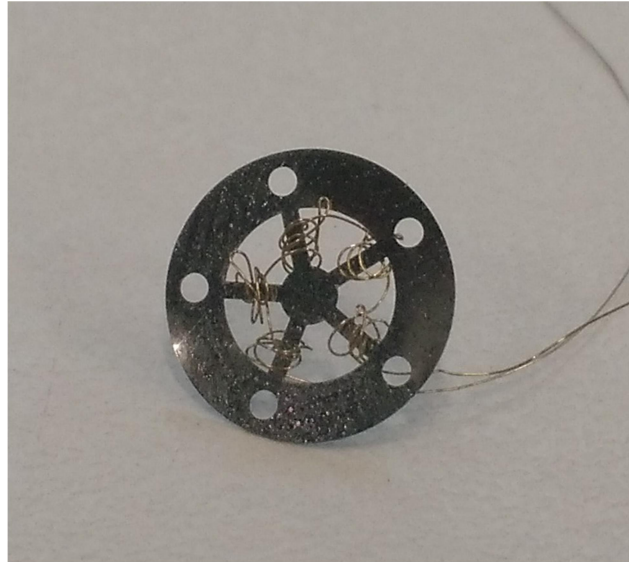


Figura 40 Attuatore con avvolgimenti di costantana

La resistenza a filo viene alimentata collegando i morsetti alle sue estremità, dopo aver adeguatamente rimosso lo strato isolante che la ricopre. Il processo di rimozione del rivestimento, tramite contatto diretto con una fiamma, porta ad un infragilimento del filo, rendendolo soggetto a rottura. Per facilitare l'operazione di collegamento, l'estremità del filo è stata avvolta attorno a una vite accoppiata ad un dado su cui verranno fissati i morsetti.

Il potenziale richiesto per ottenere una determinata corrente non è lo stesso in tutte le prove poiché il filo ha una resistenza dipendente dalla lunghezza perciò, a seconda della dimensione dell'avvolgimento, varierà il potenziale necessario ad ottenere una determinata intensità di corrente. Inoltre, a parità di fattori imposti tramite il generatore, non è detto che il riscaldamento dell'attuatore avvenga nello stesso modo, poiché, come già detto, il calore scambiato è legato al numero di avvolgimenti.

È stata quindi svolta un'effettiva prova di carico ricavando le seguenti considerazioni:

- La costantana ha il grande vantaggio di accorciare drasticamente i transitori sia in fase di riscaldamento che in fase di raffreddamento senza scaldare tutto il sistema;
- Il calo iniziale del filo di cotone è nettamente minore di quello che si riscontrava con il termosoffiatore, pur attestandosi attorno al decimo di millimetro, quindi ancora non ancora trascurabile;
- Questo calo di scorrimento del filo si ritiene sia dovuto al fatto che esso non venga più scaldato uniformemente dal flusso d'aria, ma localmente per conduzione dall'attuatore, e quindi solo nel breve tratto di contatto tra i due.

Sono invece state riscontrate le seguenti nuove problematiche:

- Il danneggiamento dello strato isolante può portare, in caso di contatto tra due tratti danneggiati, ad un corto circuito che va ad escludere una parte di avvolgimento dal riscaldamento. Nel caso in cui la porzione di avvolgimento esclusa sia rilevante non si ottiene un riscaldamento uniforme dell'attuatore e si registra un notevole aumento della corrente circolante nel restante tratto;
- In modo analogo, se due tratti con rivestimento danneggiato entrano in contatto con il banco prova, essendo quest'ultimo di alluminio e con resistenza praticamente nulla, la corrente circola attraverso quest'ultimo senza passare attraverso la costantana.

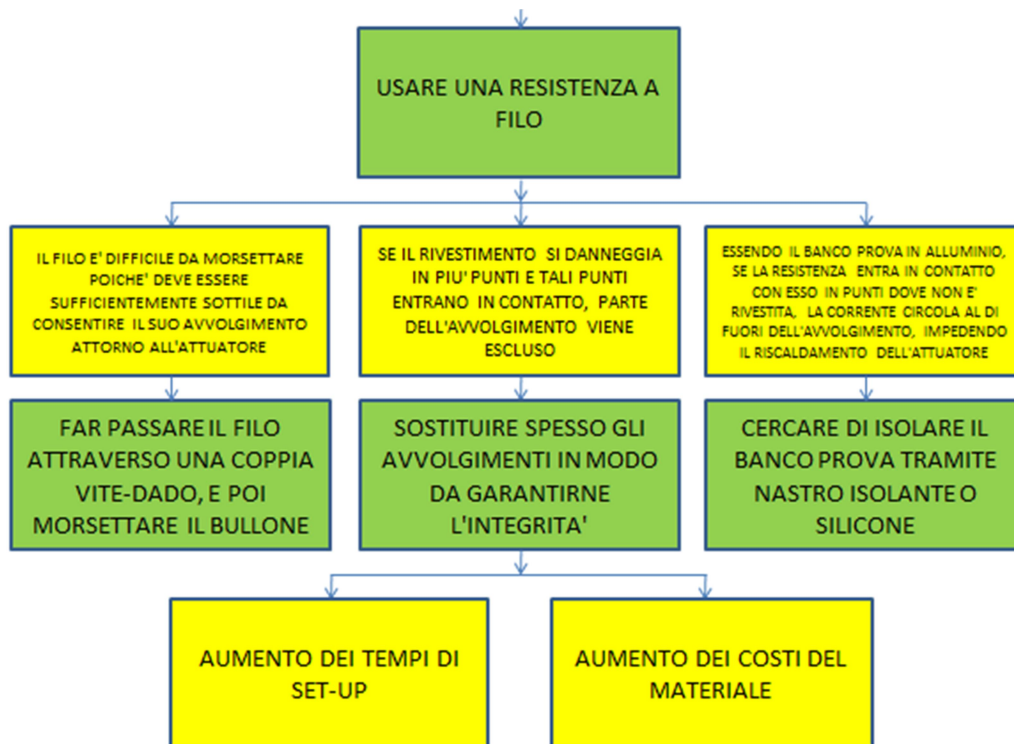


Figura 41 NoP-6: Resistenza a filo

Le possibili soluzioni ai due problemi sopracitati consistono nel cercare di mantenere il più possibile l'integrità del circuito, per esempio isolando il banco prova tramite nastro isolante o silicone, e programmando la sostituzione degli avvolgimenti di ciascun attuatore poiché, durante le fasi di attrezzaggio e smontaggio, è inevitabile che col tempo il rivestimento venga danneggiato.

2.2.3: Resistenza a filo e bilancia a due piatti

È stato provato che l'attivazione dell'attuatore tramite induzione è migliore rispetto a quella ad aria pertanto d'ora in avanti si agirà in questa direzione.

Per raggiungere l'obiettivo di svolgere una campagna sperimentale che fornisca una serie di dati precisi e affidabili al punto da poter fare delle considerazioni sull'effetto che le varie configurazioni, intese come combinazioni di lunghezza e larghezza delle travi, hanno sul comportamento dell'attuatore, è necessario rimuovere ogni fonte di imprecisione. Pertanto il passo successivo consiste nel misurare il reale movimento dell'attuatore. Non essendo possibile puntare il laser direttamente su di esso, è necessario pensare ad un metodo di carico alternativo, dato che quello fino ad ora utilizzato presenta imprecisioni non trascurabili poiché dello stesso ordine di grandezza dello spostamento che si vuole misurare. In particolare i fattori che influiscono in modo negativo sono:

- Comportamento del filo rispetto alla variazione di temperatura che è difficile da prevedere e quindi da modellare in modo tale da poterlo escludere;
- Presenza di un sistema filo/gancio/bilanciere in cui non è garantito il perfetto allineamento del bilanciere su cui è puntato il sensore di misura, ciò può portare ad avere un carico non baricentrato che causa problemi durante le prove. In particolare, se il bilanciere non rimane perfettamente in asse dopo l'applicazione del carico, risulta impossibile leggere lo spostamento dato dal precarico.

Sono pertanto stati presi in considerazione metodi alternativi di carico che possano garantire una lettura dell'effettivo spostamento dell'attuatore. In particolare si è pensato a tre diversi metodi, come mostrato nel ramo di NoP in Figura 42.

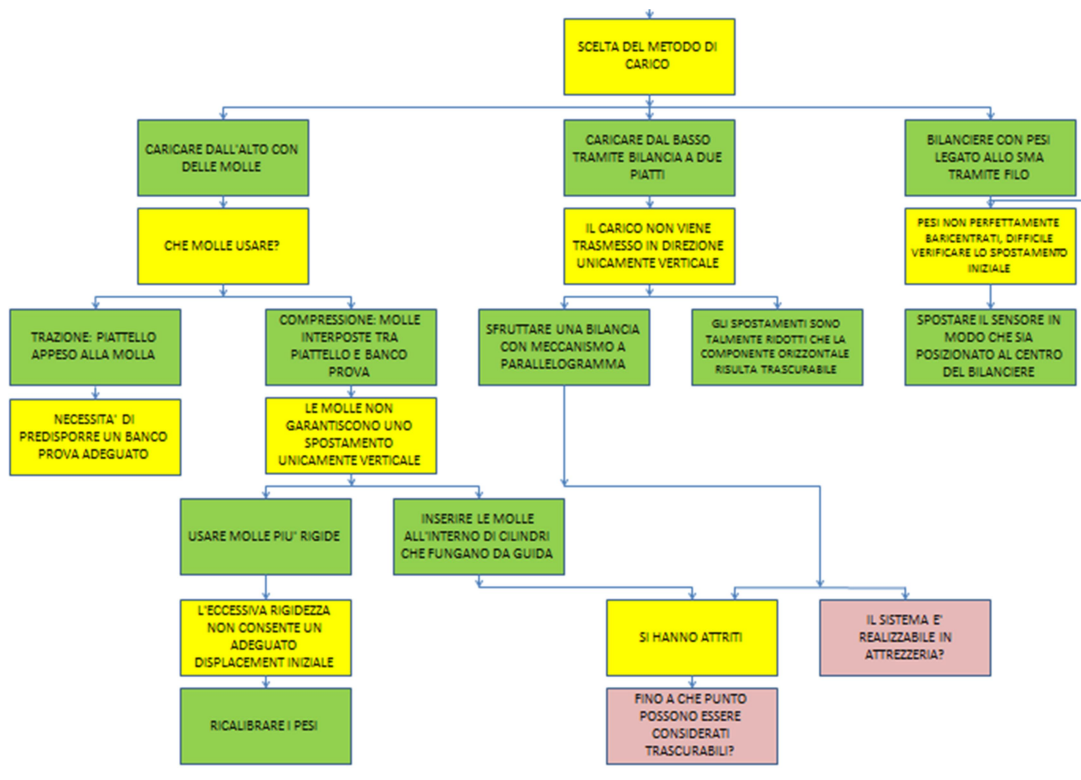


Figura 42 NoP-7: Scelta del metodo di carico

Le soluzioni riguardanti le configurazioni che prevedono l'utilizzo di molle (sia in trazione che in compressione) sono state da subito abbandonate per questioni di fattibilità del sistema. In particolare si è deciso, finché possibile, di non apportare modifiche invadenti al banco prova in dotazione, inoltre l'utilizzo comporta delle controindicazioni legate alla necessità di studiare le caratteristiche delle molle per capire quale sia l'effettiva forza che viene percepita dall'attuatore sotto l'effetto del carico.

Un metodo di carico che consente di mantenere l'attuale impostazione del banco prova consiste nel cambiare il punto di lettura del laser puntandolo non più sul bordo esterno del bilanciere ma, dal basso verso l'alto, al centro esatto dello stesso e sostituire il filo di cotone con uno di carbonio a maggiore resistenza. Per quanto riguarda il filo, esso è stato testato con esito positivo, in quanto si è notato che dopo una fase di assestamento dovuta alla rigidità maggiore rispetto a quello di cotone, esso fornisce risultati costanti durante le prove. Spostare il punto di lettura del sensore va però a mitigare solo i problemi dovuti allo sbilanciamento e non quelli dovuti all'impossibilità di leggere lo spostamento dovuto al carico iniziale in quanto comunque il bilanciere scarico ha un peso non trascurabile avendo massa pari al

12.5% del carico massimo e al 50% del carico minimo totale applicato all'attuatore in fase di test.

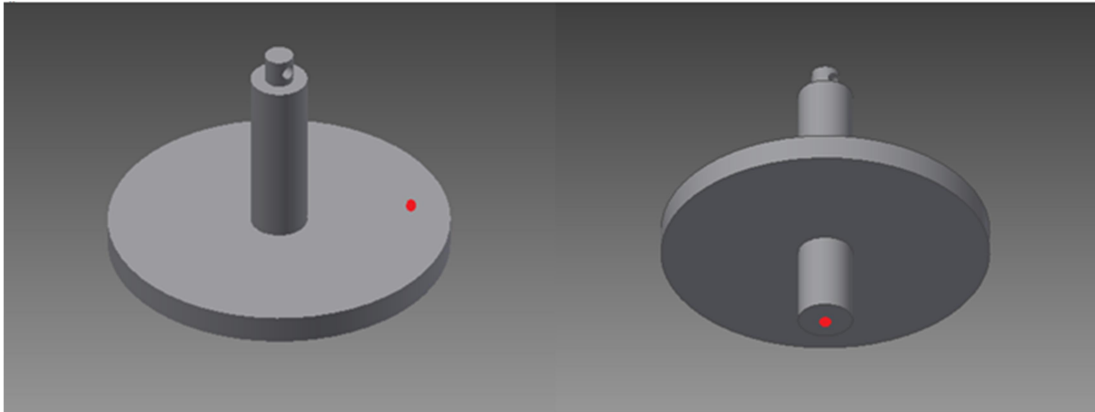


Figura 43 Variazione della posizione dello spot laser sul bilanciere

L'ultimo sistema analizzato è quello che sfrutta una bilancia a due piatti su cui, in uno di essi, viene fissato un cilindro di diametro sufficientemente ridotto in modo tale da riuscire ad andare a sollecitare il centro dell'attuatore senza andare a toccare le travi mentre sul secondo vengono sistemati i pesi necessari a garantire il precarico voluto sull'attuatore. Sfruttando un sistema simmetrico si ha la garanzia che la forza peso del carico viene trasmessa in egual misura sull'attuatore. Il sistema deve essere calibrato in modo tale da far sì che, quando il piatto è scarico, il cilindro sia in battuta sull'attuatore senza però trasmettergli alcuna forza che possa portare a delle deformazioni. Questo metodo di carico presenta tuttavia alcuni problemi, in particolare fissando il cilindro di carico tramite un vincolo ad incastro si ha che la forza che va a sollecitare l'attuatore non è più unicamente verticale. Per risolvere questo problema si è pensato di sfruttare un meccanismo contenente un quadrilatero articolato: ciò va ad eliminare la rotazione del cilindro a fronte di una traslazione verticale che tuttavia è talmente ridotta da potersi ritenere trascurabile in questa applicazione.

È stata realizzata una rappresentazione della bilancia ideale tramite il software Autodesk Inventor, come visibile in Figura 44. Da tale Figura si può notare come i piatti della bilancia sono stati progettati in modo simmetrico rispetto al fulcro per favorire il bilanciamento automatico del sistema.

In particolare si distinguono:

- A. Cilindro di carico che nella configurazione scarica è in battuta sull'attuatore senza deformato. Ciò consente di eliminare il problema del peso proprio del bilanciere nel precedente metodo di carico, consentendo un'adeguata lettura dello spostamento iniziale;
- B. Piatto su cui vengono caricati i pesi, essendo il sistema simmetrico

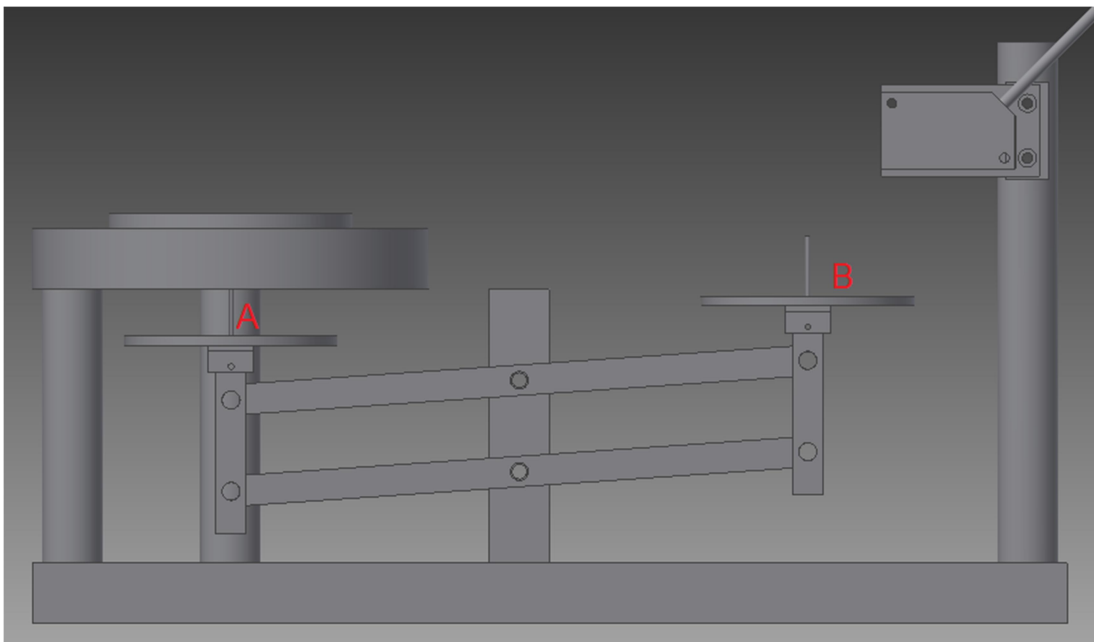


Figura 44 Bilancia a due piatti con meccanismo a quadrilatero articolato

Nei fulcri si è previsto di inserire dei cilindri sagomati lasciando il gioco necessario a favorire la rotazione. Questo sistema risulta essere particolarmente affidabile, anche grazie al fatto che gli attriti in gioco sono veramente ridotti. Nel caso si vogliano ridurre ulteriormente, si può prevedere di calettare dei cuscinetti in ciascuno dei sei fulcri, con un conseguente aumento dei costi.

Sebbene questo sistema sembra affidabile, sono stati sollevati dei dubbi riguardo la sua realizzabilità, come riportato nel NoP di Figura 42 sotto forma di domanda agli esperti, soprattutto per quanto riguarda le tempistiche ed i costi complessivi di realizzazione.

A tal proposito, dopo un consulto con l'azienda si è deciso di semplificare il sistema abbandonando la configurazione a quadrilatero articolato e mantenendone una più

basilare. Tale scelta è stata compiuta partendo dall'ipotesi che si possa trascurare la componente orizzontale della forza generata dalla rotazione della bilancia.

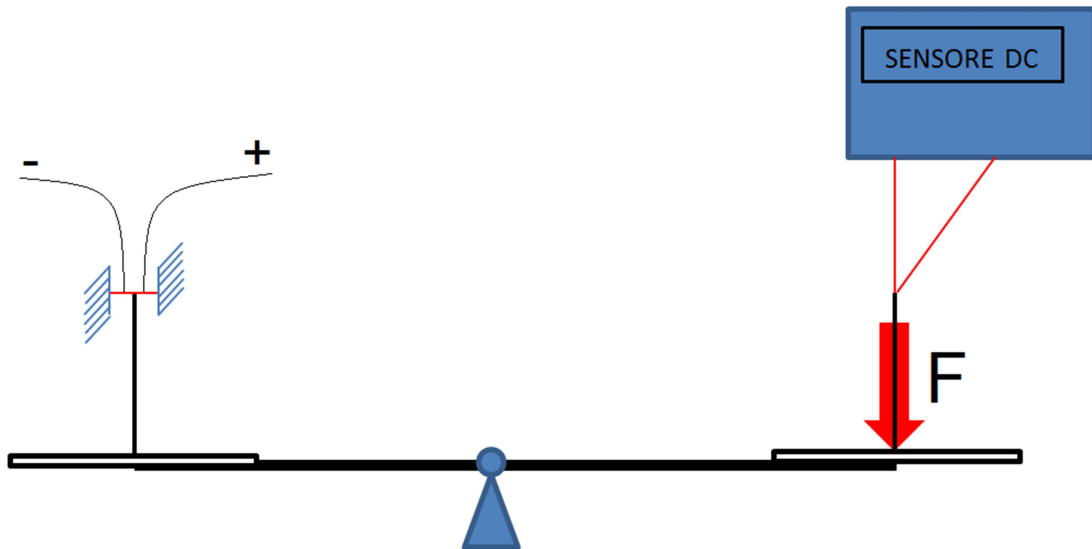


Figura 45 Schema della configurazione semplificata

Il sostegno della bilancia è stato fissato ad un ripiano su cui poi sono stati posizionati anche sensore e banco prova, tale sostegno consente una regolazione in altezza del fulcro nel quale è incernierato il braccio della bilancia. Una volta posizionata la bilancia il sensore è stato fissato su una slitta nanometrica che a sua volta è stata vincolata al piano di lavoro in modo da facilitare la centratura dello spot. Il sensore è stato posizionato in modo da essere a una distanza di 5cm (ossia al centro del suo intervallo di lettura) dal centro del perno contrapposto a quello che sollecita l'attuatore, come visibile nello schema riportato Figura 29.

Si è cercato di regolare l'altezza del fulcro della bilancia in modo che il perno che va a sollecitare l'attuatore fosse il più vicino possibile a quest'ultimo nella configurazione scarica, è stato poi aggiunto un peso minimo (una rondella da 0.27g) sul piatto di carico in modo da creare uno sbilanciamento che portasse tale perno in battuta senza costituire un vero precarico in grado di generare una deformazione. Il perno a contatto con l'attuatore è stato smussato sulla punta in modo da essere sicuri che il carico fosse applicato unicamente al centro senza andare a contatto anche con le travi.

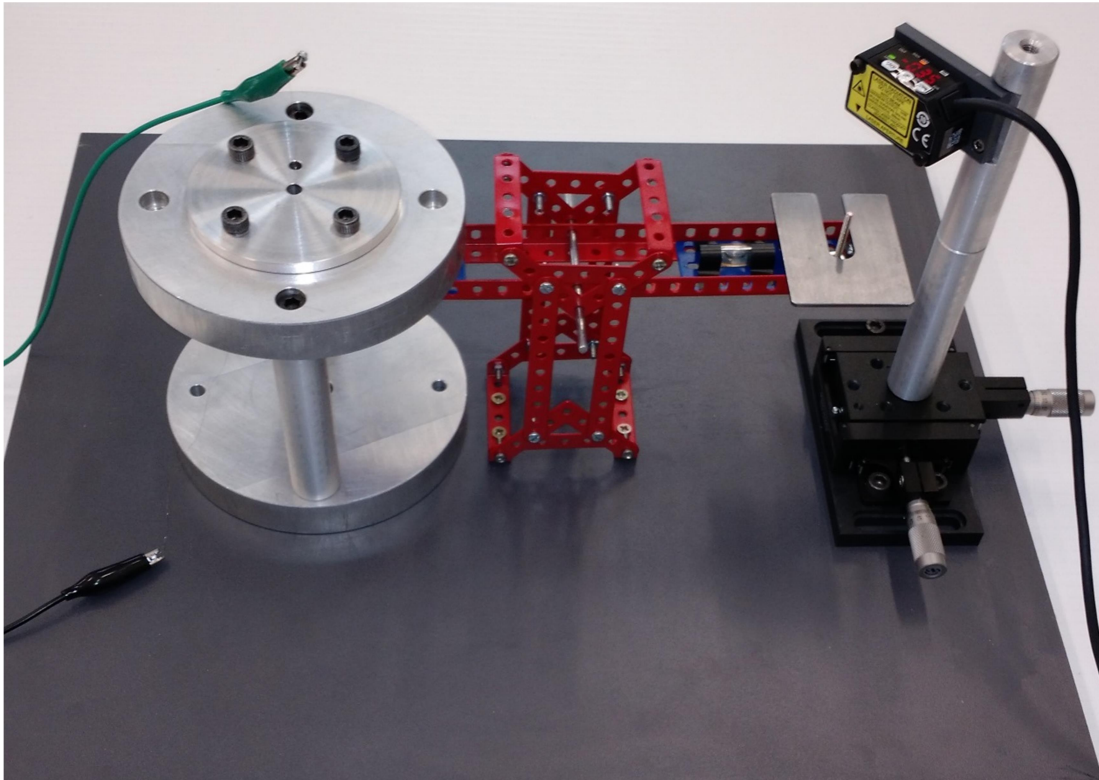


Figura 46 Configurazione finale del banco prova

2.2.4: Rete di Problemi complessiva

In questo paragrafo è riportata una visione d'insieme delle Rete di Problemi ottenuta. Essa è realizzata unendo le singole aree già mostrate nei capitoli precedenti, in particolare, con riferimento a Figura 47, esse sono:

1. Primi livelli della rete (Figura 30);
2. Analisi del calo imprevisto (Figura 34);
3. Scelta del filo (Figura 35);
4. Problematiche legate al riscaldamento ad aria (Figura 37);
5. Scelta del metodo di riscaldamento (Figura 38);
6. Resistenza a filo (Figura 41);
7. Scelta del metodo di carico (Figura 42);

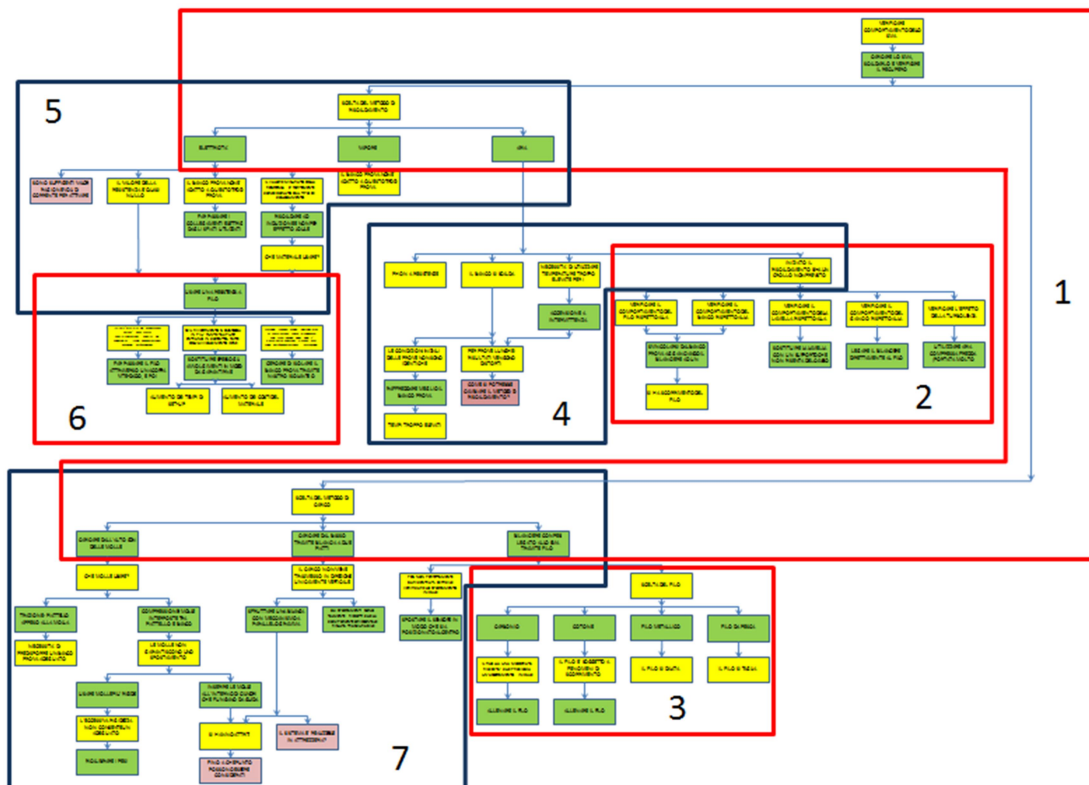


Figura 47 NoP Complessiva

2.3 Prove sperimentali

In questo paragrafo sono descritte le due campagne sperimentali effettuate con il settaggio del banco prova descritto nel sottocapitolo precedente. Lo scopo di queste prove è quello di verificare i seguenti dati:

- inizio e fine spostamento iniziale, che costituiscono di quanto si deforma l'attuatore una volta caricato;
- inizio e fine recupero, dato che anche con questo sistema di carico si è notato che sono necessari un paio di cicli di assestamento prima di ottenere valori stabili. Tali valori sono stati considerati validi una volta che l'attuatore ha oscillato per cinque volte tra gli stessi due valori;
- per vedere se era possibile trarre qualche altra conclusione sul comportamento degli attuatori, sono stati segnati anche i valori letti una volta rimosso il carico e quelli letti dopo un riscaldamento, sempre ad attuatore scarico (in pratica la deformazione residua e il recupero ad attuatore scarico).

Sono state preliminarmente svolte delle prove atte a verificare il comportamento del banco prova e la sua efficacia. Questo nuovo sistema di carico permette una lettura della deformazione iniziale, anche se tali valori sono sensati solo all'interno di uno stesso campione di prove. Ciò è dovuto alla scarsa ripetibilità delle condizioni iniziali a causa del gioco che il braccio della bilancia possiede e che è difficile da ridurre senza andare ad aumentare gli attriti in modo compromettente.

Per tale motivo si è deciso di affrontare la campagna sperimentale nel seguente modo: per ottenere dei dati significativi ogni attuatore viene montato e caricato per 3 volte non consecutive in ordine casuale (realizzata tramite l'ausilio del software MiniTab) ma, una volta montato un attuatore, esso viene testato consecutivamente con tutti i pesi previsti nella campagna sperimentale scelti anch'essi in ordine casuale. La scelta di procedere in questo modo, ossia di testare tutti i carichi consecutivamente in ogni settaggio, è stata presa poiché si è notato che a causa delle forti labilità della bilancia il settaggio stesso può influire sui dati, specialmente sullo spostamento dato dal carico. Infine abbiamo verificato che scaricato l'attuatore e riscaldato un'ultima volta, esso ritorna sempre a valori molto vicini allo zero.

Per avere un maggior numero di dati da analizzare, la campagna sperimentale sopra descritta è stata ripetuta due volte, per un totale di sei test su ciascun tipo di attuatore.

In Tabella 4 sono riportati i tre pesi utilizzati e le quattro combinazioni di carico con cui essi sono stati impiegati durante le prove.

Tabella 4 Pesi a disposizione e combinazioni scelte

Tabella dei Pesi		Carico	
	Peso (g)		Reale (g)
Precarico	0,27	50	47,11
Peso 50	46,84	100	93,78
Peso 100	93,51	150	140,62
Peso 200	188,99	200	189,26

2.3.1: Risultati delle prove

Per avere una visione di insieme, i dati raccolti sono stati riportati su dei grafici: per ciascuna campagna sono stati realizzati dei grafici che mostrassero, per ogni attuatore, i risultati delle tre prove sia sotto forma di recupero in funzione del carico applicato sia di recupero in funzione dello spostamento, ed infine sono stati realizzati anche dei grafici che mostrassero, sempre per ogni attuatore, l'interpolazione di tutti i dati raccolti nel corso delle due campagne. I grafici del recupero in funzione del displacement, sia quelli delle singole prove che quelli interpolati, risultano confusi e poco significativi per i già citati problemi legati alle labilità del sistema di carico.

Sono riportati in seguito i risultati riguardanti il recupero ottenuto in funzione del carico applicato. Sono quindi mostrati i relativi grafici delle singole prove divisi in due grafici da tre prove ciascuno per motivi di chiarezza (prima e seconda campagna sperimentale). Infine è mostrato un grafico di interpolazione che raccoglie i dati di tutte le prove al fine di generare una linea di tendenza, nello specifico si è scelto di generare una linea di grado due in quanto ritenuto quello che meglio rappresenta l'andamento dei dati raccolti.

Per quanto riguarda i valori della deformazione iniziale ottenuti, con i relativi grafici deformazione/recupero, ed i valori di deformazione residua si rimanda alle Appendici C, D ed E.

Tabella 5 Risultati attuatore D2

CONFIGURAZIONE		RECUPERO (mm)					
Attuatore	Carico (g)	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4	Prova 5	Prova 6
D2 (2x0,6mm)	47,11	0,07	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06
	93,78	0,10	0,09	0,09	0,11	0,12	0,10
	140,62	0,11	0,12	0,15	0,11	0,15	0,15
	189,26	0,13	0,17	0,17	0,18	0,16	0,17

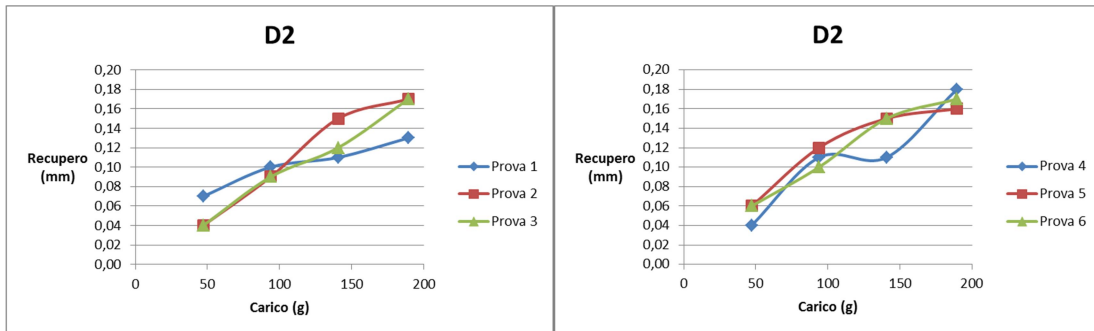


Figura 48 Recupero in funzione del carico attuatore D2, singole prove

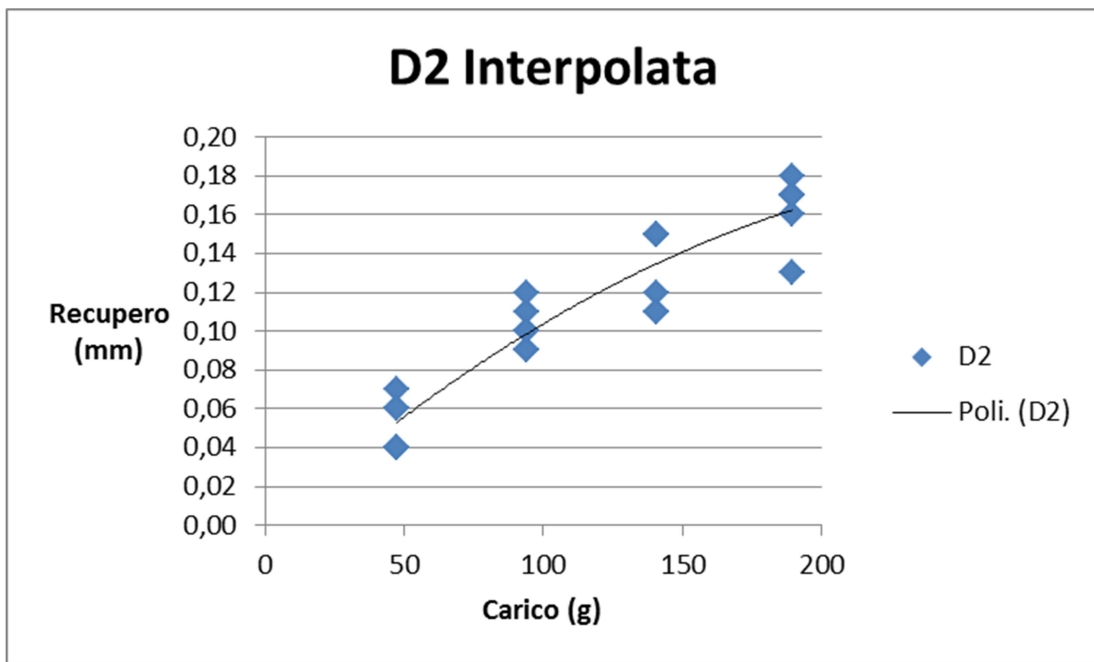


Figura 49 Recupero in funzione del carico attuatore D2, interpolazione dei risultati

Tabella 6 Risultati attuatore D3

CONFIGURAZIONE		RECUPERO (mm)					
Attuatore	Carico (g)	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4	Prova 5	Prova 6
D3 (2x0,8mm)	47,11	0,05	0,04	0,06	0,04	0,08	0,05
	93,78	0,05	0,07	0,08	0,05	0,09	0,07
	140,62	0,05	0,08	0,11	0,05	0,12	0,10
	189,26	0,08	0,06	0,08	0,07	0,10	0,10

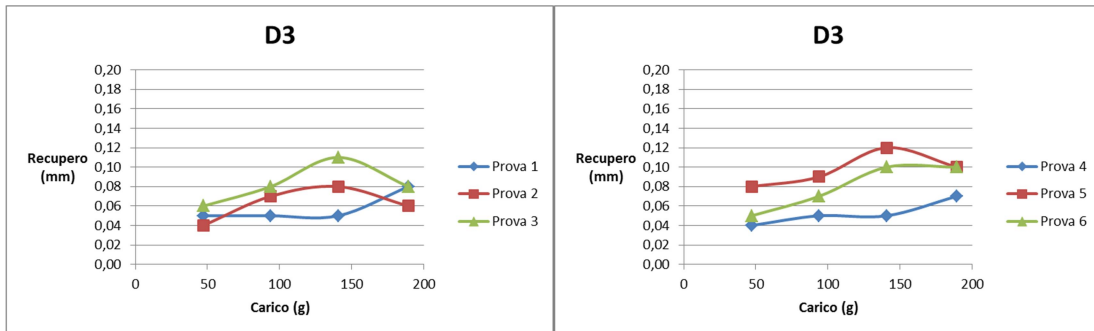


Figura 50 Recupero in funzione del carico attuatore D3, singole prove

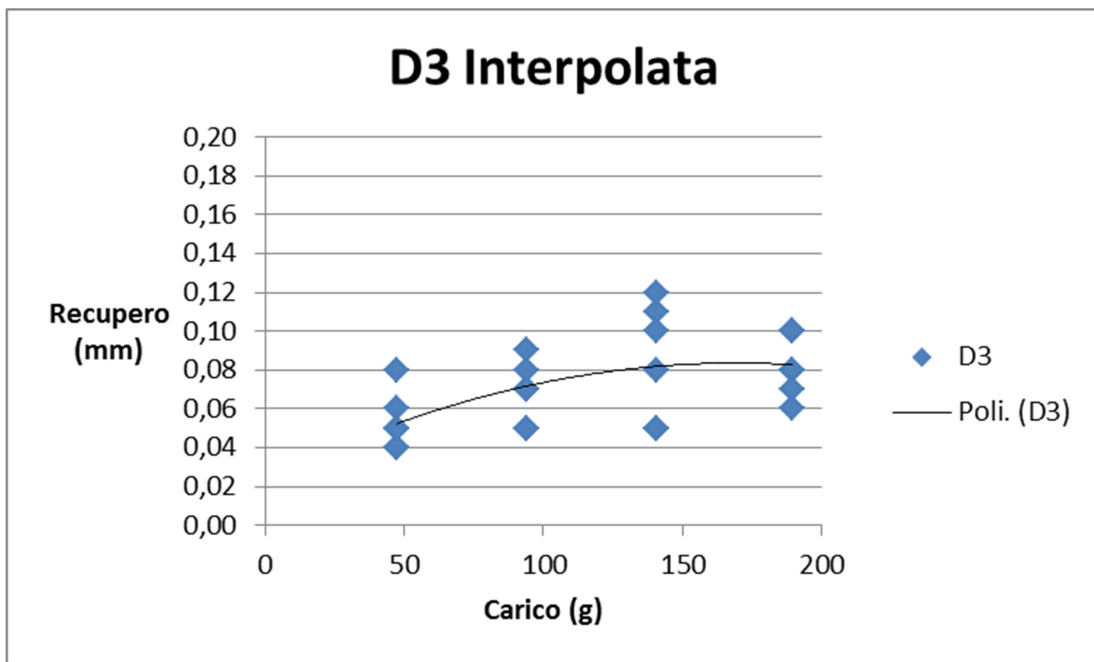


Figura 51 Recupero in funzione del carico attuatore D3, interpolazione dei risultati

Tabella 7 Risultati attuatore D5

CONFIGURAZIONE		RECUPERO (mm)					
Attuatore	Carico (g)	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4	Prova 5	Prova 6
D5 (2,5x0,8mm)	47,11	0,04	0,10	0,05	0,05	0,06	0,05
	93,78	0,08	0,10	0,09	0,07	0,10	0,07
	140,62	0,06	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08
	189,26	0,09	0,12	0,15	0,14	0,12	0,10

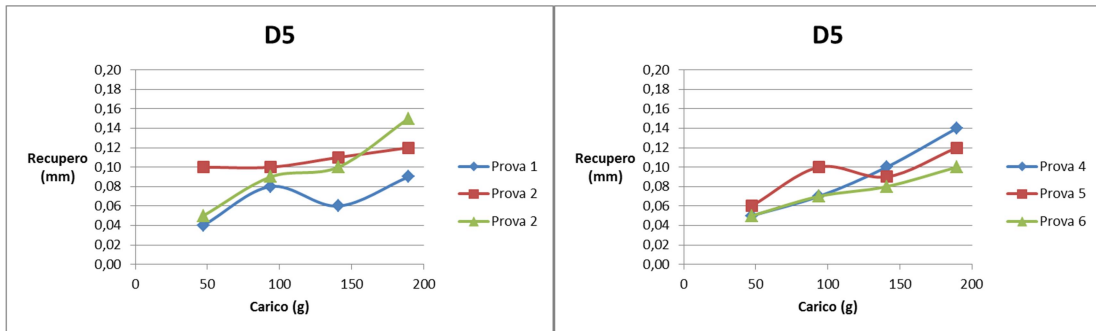


Figura 52 Recupero in funzione del carico attuatore D5 singole prove

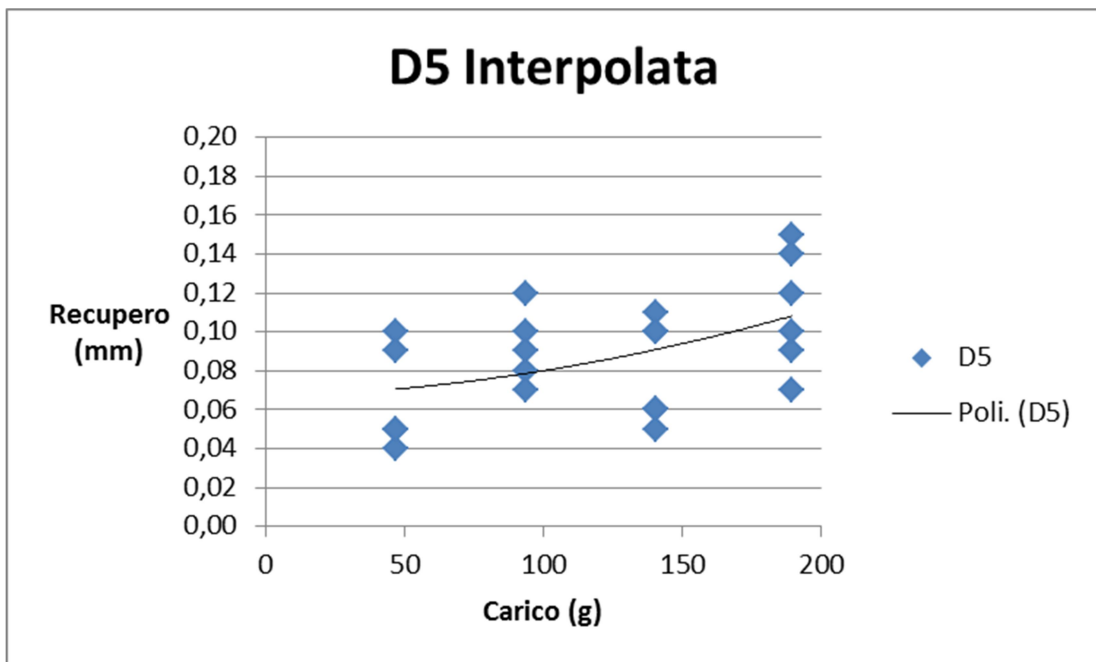


Figura 53 Recupero in funzione del carico attuatore D5, interpolazione dei risultati

Tabella 8 Risultati attuatore D6

CONFIGURAZIONE		RECUPERO (mm)					
Attuatore	Carico (g)	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4	Prova 5	Prova 6
D6 (2,5x1mm)	47,11	0,05	0,02	0,09	0,03	0,03	0,08
	93,78	0,06	0,07	0,10	0,08	0,08	0,10
	140,62	0,06	0,09	0,07	0,08	0,12	0,10
	189,26	0,13	0,09	0,10	0,09	0,13	0,10

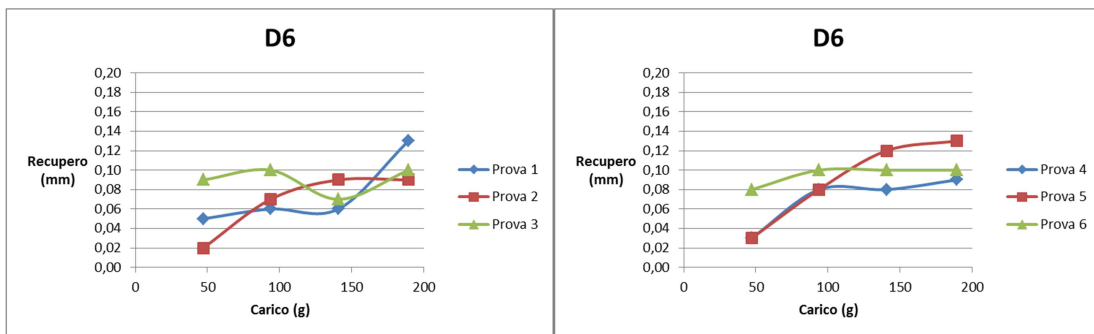


Figura 54 Recupero in funzione del carico attuatore D6, singole prove

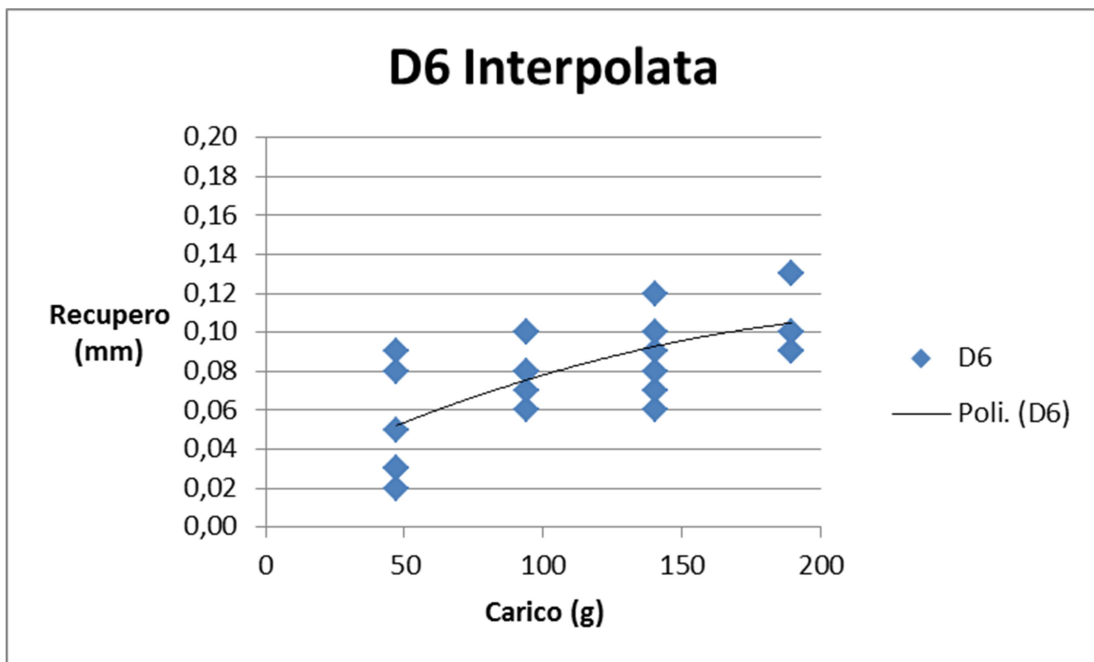


Figura 55 Recupero in funzione del carico attuatore D6, interpolazione dei risultati

Come si può notare dai grafici, nella maggior parte dei casi vi è un certa dispersione dei dati. Tra essi, quelli relativi all'attuatore D2 risultano essere i migliori, sia perché è quello che ottiene i più alti valori di recupero, sia perché è quello le cui prove si sono mostrate più simili tra loro.

Tuttavia l'eccessiva variabilità delle prove e la loro scarsa ripetibilità, unite al fatto che i valori di recupero ottenuti sono troppo scarsi per ipotizzare l'implementazione di questo tipo di attuatori in una valvola ha reso necessario, per questo lavoro, un'ulteriore fase di sperimentazione nel tentativo di caratterizzare meglio gli attuatori.

2.3.2: Possibili cause di errore ed introduzione ad un nuovo set up sperimentale

Prima di procedere con la nuova fase di sperimentazione si è deciso di eseguire un'analisi delle possibili cause di errore, al fine di identificare delle possibili azioni correttive che consentano di ottenere una migliore ripetibilità dei dati e quindi una più robusta caratterizzazione degli attuatori.

Per fare ciò è stata svolta una Modellazione Funzionale [16] del sistema.

0. Fase di definizione:

0.1. Sistema: attuatore posizionato nel banco prova con bilancia.

0.2. Scenario: test attuatore SMA.

1. Fase di riconoscimento:

1.1. Goal: verificare il recupero riscaldando lo SMA carico (coincide con il MUF).

1.2. Object: attuatore scarico indeformato.

1.3. Product: attuatore carico e scaldato.

1.4. Tool: costantana e bilancia a due piatti.

2. Mappa Funzionale:

2.1. Elementi: banco prova, coperchio, anello di supporto, attuatore, costantana, bilancia, fulcro.

2.2. Disegno:

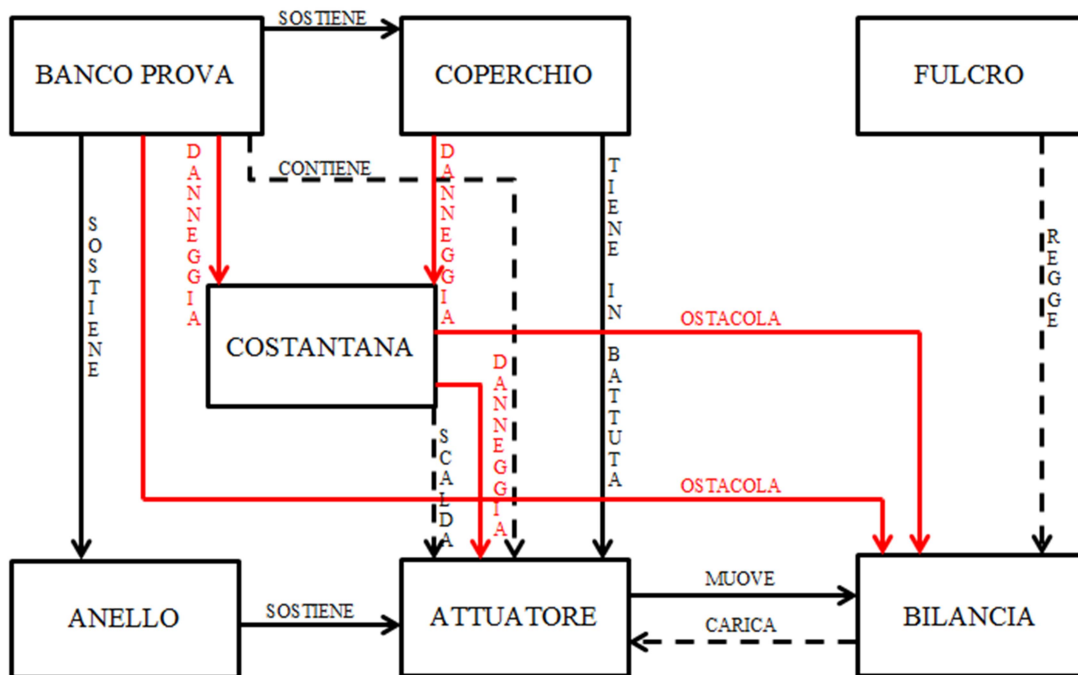


Figura 56 Modellazione Funzionale

Da questa mappa funzionale emergono i seguenti problemi, per i quali si possono trarre alcuni spunti per migliorare l'efficienza del banco prova:

- Il riscaldamento dell'attuatore da parte della resistenza a filo è stato considerato insufficiente in quanto il rivestimento che la ricopre è molto sensibile all'usura ed all'aumento eccessivo della temperatura; entrambi questi fattori portano ad un malfunzionamento dell'avvolgimento, in particolare generando dei cortocircuiti che rendono non omogeneo il riscaldamento dell'attuatore. Inoltre un riscaldamento di questo tipo non permette un controllo preciso della temperatura; ciò significa che non si ha la certezza né del raggiungimento delle temperature richieste né dell'uniformità di tale riscaldamento attraverso tutto l'attuatore. Si può pensare di procedere facendo passare la corrente direttamente attraverso l'attuatore, per esempio tramite una molla che al tempo stesso fornisca il precarico desiderato.
- L'azione di contenimento del banco prova nei confronti dell'attuatore è stata considerata anch'essa insufficiente in quanto la sede è stata progettata in modo da ospitare gli attuatori di tutti i diametri, pertanto quelli di diametro inferiore possono risultare non perfettamente centrati in essa a causa del

gioco presente. Per risolvere questo problema si potrebbe pensare di realizzare un anello simile a quello di supporto, ma che funga da contenimento impedendo agli attuatori più piccoli di scorrere lungo il piano orizzontale.

- Il fulcro regge in modo non sufficiente la bilancia poiché, per non rendere eccessivo l'attrito in gioco, certi gradi di libertà della struttura non sono stati vincolati. Ciò può essere risolto calettando dei cuscinetti nei punti che presentano componenti in rotazione relativa fra loro, questo bloccherebbe lo spostamento orizzontale di tali componenti fornendo una maggiore precisione all'intero sistema
- La bilancia carica in modo insufficiente l'attuatore poiché con la configurazione attuale del banco prova risulta difficile centrare in modo preciso il perno della bilancia con il centro dell'attuatore. Questo problema è particolarmente legato al precedente in quanto la labilità della bilancia impedisce il fissaggio a terra del banco prova dato che non è possibile prevedere la posizione esatta del perno della bilancia. Pertanto, risolvendo tale problema, risulterebbe automaticamente risolto anche questo.
- Le azioni di danneggiamento della costantana, da parte di banco prova e coperchio, sono dovute al fatto che, essendo il rivestimento particolarmente fragile, il semplice sfregamento fra le parti che si ha nella fase di set-up è sufficiente a rimuovere lo strato isolante, portando ad un malfunzionamento della resistenza a filo. Anche questo problema verrebbe risolto con la soluzione descritta nel primo punto.
- La costantana ostacola la bilancia in quanto talvolta, se parte dell'avvolgimento passa sopra il centro dell'attuatore, impedisce al perno di andare correttamente in battuta. Inoltre, dal momento che il passaggio di corrente con conseguente riscaldamento della resistenza a filo porta quest'ultima a stabilizzarsi, essa va a falsare le prime misure relative ad ogni singola prova. Ancora una volta sostituire il metodo di riscaldamento sarebbe sufficiente a risolvere il problema.
- La costantana danneggia l'attuatore in quanto, osservando gli attuatori attraverso un microscopio elettronico, sono state notate tracce evidenti di bruciatura sulle travi, in corrispondenza dei punti di passaggio degli

avvolgimenti. Ciò è imputabile alle già citate difficoltà nel controllo della temperatura che hanno portato al raggiungimento, in certe circostanze, di picchi di temperatura eccessivi per il materiale.

- Anche il banco prova ostacola la bilancia in quanto le dimensioni ridotte del foro attraverso il quale passa il perno possono rendere difficoltoso l'applicazione del carico. Una possibile soluzione sarebbe quella di svasare il foro in questione, anche se a tale lavorazione ci sono dei limiti poiché sul bordo di tale foro è situato l'anello di supporto. Inoltre questo problema è legato a quello della labilità della bilancia, infatti procedendo con la soluzione proposta al terzo e quarto punto si risolverebbe anche quest'ultimo.

Come si può notare da questa analisi, la resistenza a filo è coinvolta nella maggior parte dei problemi individuati, pertanto si è deciso di cambiare il metodo di riscaldamento. In particolare, si è deciso in un primo momento di preferire una corretta caratterizzazione degli attuatori ad un eventuale implementazione di questi ultimi in una valvola, in modo da ottenere dei dati che siano confrontabili con le simulazioni dell'ing. Steiner per rendere possibile un'eventuale nuova taratura del modello sulla base di questi ultimi.

Pertanto si è deciso di svolgere i test riscaldando tramite vapore, pur conoscendone i limiti applicativi.

Come fase preliminare alle prove tramite vapore si è deciso di svolgere nuove analisi agli elementi sfruttando un modello lineare semplificato per andare ad identificare lo stato di sforzo e di deformazione di tutte le configurazioni degli attuatori in entrambe le fasi, per eventualmente poterle caricare in modo più consistente.

Capitolo 3: Simulazioni analitiche e nuova sperimentazione

Su consiglio di Fluid-o-Tech ,per avere un'idea dello stato di sforzo di tutte le configurazioni dell'attuatore testate, sono state svolte delle nuove analisi agli elementi finiti con un modello lineare semplificato. Queste sono state svolte con l'intenzione di capire al meglio fin quanto potesse essere caricato l'attuatore. In secondo luogo, tali simulazioni sarebbero state utili per avere un'indicazione delle deformazioni e delle frecce massime attese, in modo da avere un eventuale termine di paragone con le prove sperimentali, pur sapendo che la forte linearità del modello avrebbe reso difficile quest'ultimo passaggio.

Tale tentativo è stato realizzato poiché, se si dovesse notare una corrispondenza tra tale modello semplificato e il comportamento reale, questo strumento fornirebbe un ottimo supporto all'analisi in quanto le simulazioni dell'ing. Steiner si fermano allo studio della configurazione ottimale, non sono quindi presenti dati relativi alle altre configurazioni testate in questo lavoro.

Per queste simulazioni è stato sfruttato l'Ambiente di Analisi delle Sollecitazioni del software Autodesk Inventor 2015.

Successivamente è stato messo a punto il nuovo set-up sperimentale del banco prova in cui si sono rese necessarie alcune piccole modifiche per permettere l'afflusso di vapore senza andare ad ostacolare la bilancia e per consentire una lettura più accurata del recupero tramite acquisizione nel tempo del segnale. Una volta svolta questa operazione, si è potuto procedere con una caratterizzazione degli attuatori ed una successiva fase di analisi e trattamento dei risultati.

Per svolgere tali prove si è sfruttato il gentile supporto dell'azienda Fluid-o-Tech, la quale ha messo a disposizione una caldaia in grado di generare il vapore, cosa non disponibile all'interno del nostro laboratorio

3.1: Analisi agli elementi finiti

3.1.1: Prove preliminari

Come già accennato, queste simulazioni sono semplificate e basate su un modello lineare, pertanto non tengono conto dell'effetto a memoria di forma. Per fare ciò sono stati definiti due materiali, uno avente le proprietà del film NiTi fornito da Acquandas in fase martensitica, l'altro quelle in fase austenitica. Tali proprietà sono mostrate in Tabella 1.

Una volta realizzati i modelli virtuali degli attuatori, sempre tramite Autodesk Inventor, sono stati stabiliti i parametri necessari alla modellazione.

In questa prima fase le simulazioni sono state svolte ponendo come obiettivo di progetto il punto singolo, in modo da ottenere risultati più rapidi a scapito della precisione.

Innanzitutto vanno definiti vincoli, carichi e mesh. Come vincolo è stato imposto che l'anello esterno dell'attuatore fosse fissato, poiché corrisponde alla parte tramite cui quest'ultimo verrà vincolato al corpo valvola.

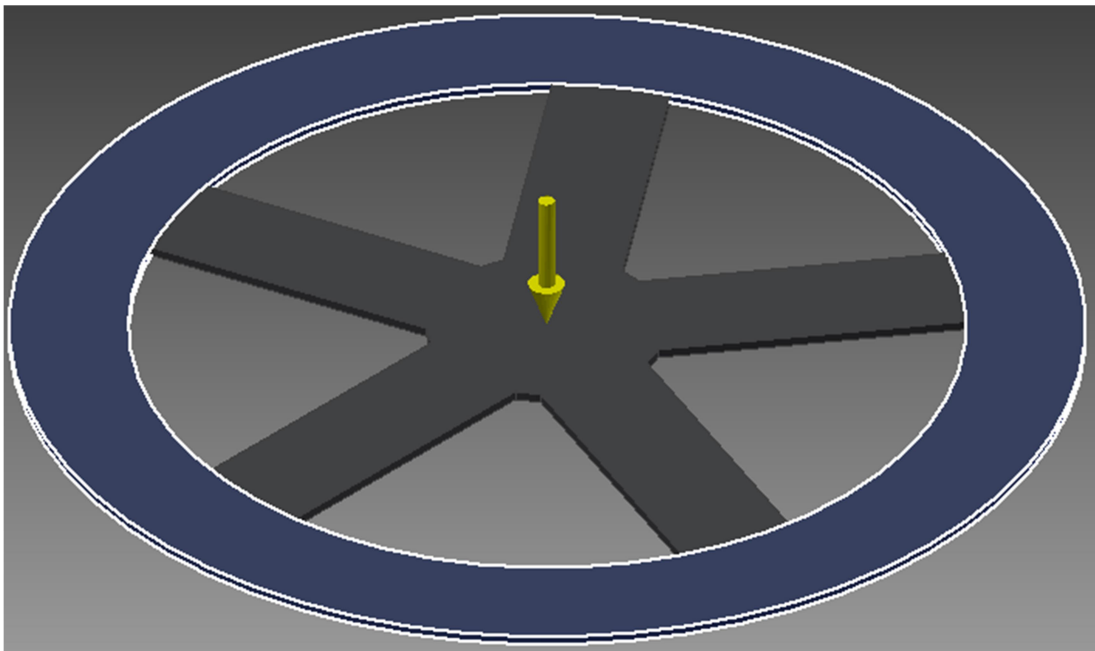


Figura 57 Vincoli della simulazione e punto di applicazione della Forza

Tale anello esterno è stato inoltre escluso dalla simulazione in modo da alleggerire il calcolo computazionale necessario, dal momento che si ha la certezza che gli sforzi in questa zona non saranno i più limitanti.

Successivamente è stato definito il carico da simulare, esso è stato rappresentato come una forza verticale agente sul centro dell'attuatore, come visibile in Figura 57. L'entità di tale forza è stata posta pari a 0,5 N e, a causa della linearità del modello, per ricavare i risultati corrispondenti agli altri carichi (tutti multipli del primo) è bastato moltiplicare i risultati per il multiplo corrispondente.

Infine è stata decisa la mesh da utilizzare, in particolare si è deciso di porre una dimensione media dell'elemento pari a 0.02, una dimensione minima pari a 0.2 volte la dimensione media, e un massimo angolo di rotazione di 60 gradi.

Una volta definite le varie impostazioni sono state lanciate tutte le simulazioni: è stato simulato il comportamento di ogni attuatore, in ciascuna fase, per la configurazioni di carico pari a 50 prevista. Essendo il modello lineare, gli sforzi, le deformazioni e le frecce crescono anch'esse linearmente, pertanto non è stato necessario svolgere altre simulazioni ma semplicemente scalare i dati su i rispettivi carichi.

I risultati di tale simulazione sono consultabili in Appendice F.

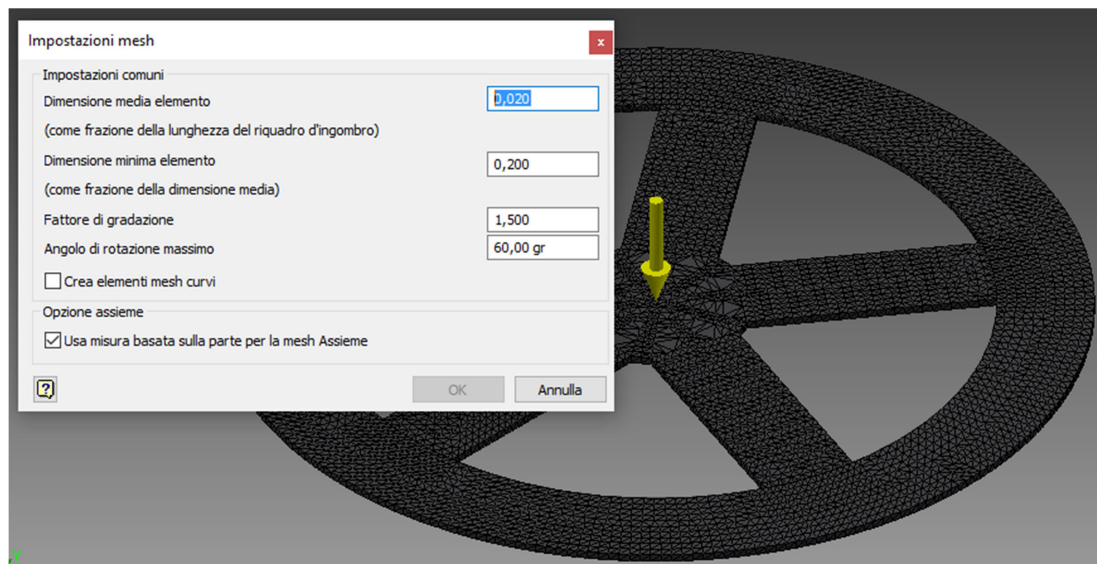


Figura 58 Parametri della mesh

3.1.2: Affinamento dell'analisi

Per verificare se le simulazioni precedentemente descritte fossero sufficientemente accurate, con l'aiuto dell'Ingegnere Pucillo di Fluid-o-Tech è stata provata una nuova simulazione che prevedesse una maggior precisione ad un più alto costo computazionale. Nel caso tale simulazione avesse fornito parametri notevolmente distanti da quelli ottenuti nel capitolo precedente, allora le simulazioni sarebbero state svolte per intero con queste nuove impostazioni.

Si è scelto di procedere con una simulazione che avesse come obiettivo di progetto una quota parametrica, con lo scopo di ottimizzare localmente la mesh in ogni iterazione fino ad ottenere risultati che restassero circa costanti in due iterazioni successive.

Per fare ciò, si è scelto come valore da far convergere lo sforzo equivalente di Von Mises, imponendo che l'affinamento si interrompesse dopo aver raggiunto una differenza tra i valori di sforzo inferiore al 2%, con un limite massimo di cinque iterazioni per evitare che, in caso di mancata convergenza, la simulazione non giungesse a termine. Il valore di "Soglia di affinamento H" è stato lasciato pari a quello di default, ossia 0.75, in modo che siano soggetti ad affinamento gli elementi con errori equivalente che rappresentano il 25% iniziale [17]. Infine sono state escluse dall'affinamento le facce dell'anello esterno che, essendo vincolate, non sono di interesse per la simulazione.

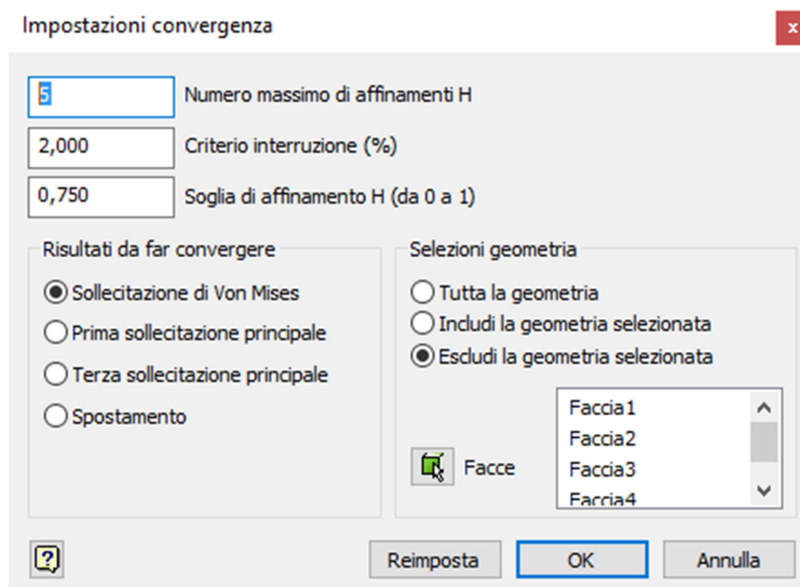


Figura 59 Impostazioni della convergenza

I vincoli ed i carichi imposti sono stati lasciati uguali a quelli definiti nelle simulazioni precedenti.

Dopo una prova preliminare, si è notato che queste nuove impostazioni forniscono risultati che differiscono fino al 20% da quelli ottenuti con parametri semplificati, e dal momento che i tempi di simulazione non sono aumentati in modo eccessivo si è deciso di svolgere tutte le prove con questo metodo.

Come si può notare in Figura 60, la mesh ottenuta tramite gli affinamenti risulta notevolmente più fitta di quella impostata precedentemente.

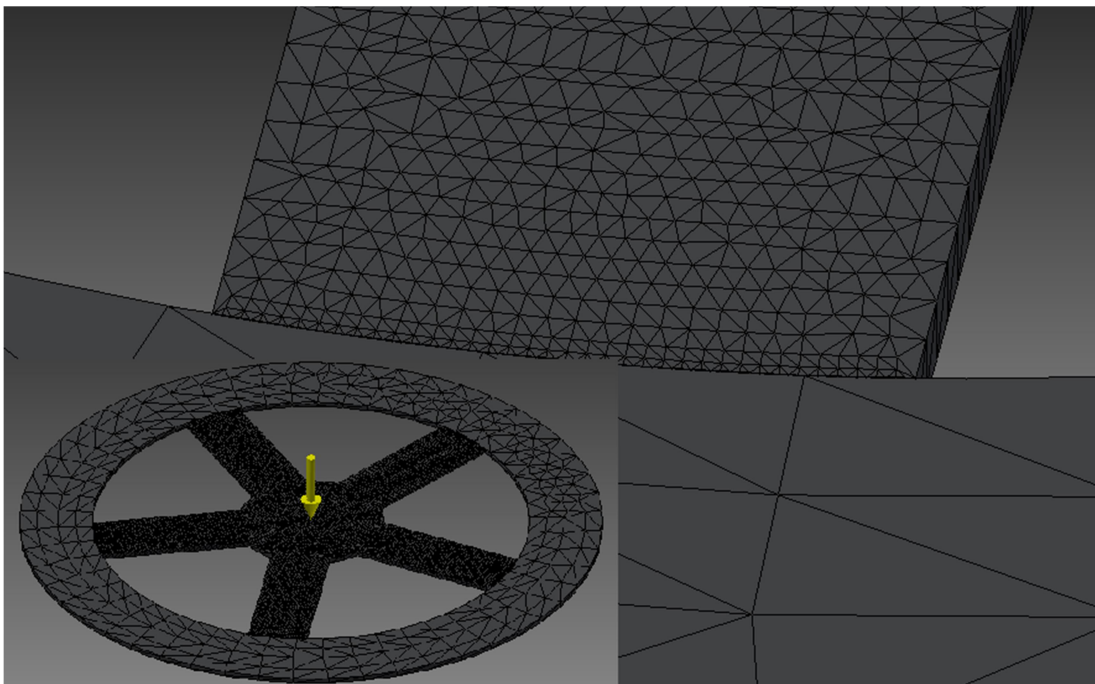


Figura 60 Dettaglio della mesh affinata

3.1.3: Risultati delle simulazioni

In questo capitolo sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni svolte. Come già accennato, ci si è focalizzati in particolare modo su:

- Sforzo equivalente di Von Mises;
- Spostamento (in particolare il valore di freccia massima, che corrisponde a quella al centro dell'attuatore);
- Deformazione.

In tutte le simulazioni si sono ottenuti buoni livelli di affinamento, in quanto si ha sempre avuto l'arresto del processo iterativo per raggiungimento della soglia del 2% e mai per raggiungimento del numero massimo di iterazioni. In media, il livello di convergenza dell'ultima iterazione, come visibile nelle Figure 46, 47 e 48, raggiungeva valori compresi tra lo 0,3 e l'1,5% per ciascuno dei parametri di interesse.

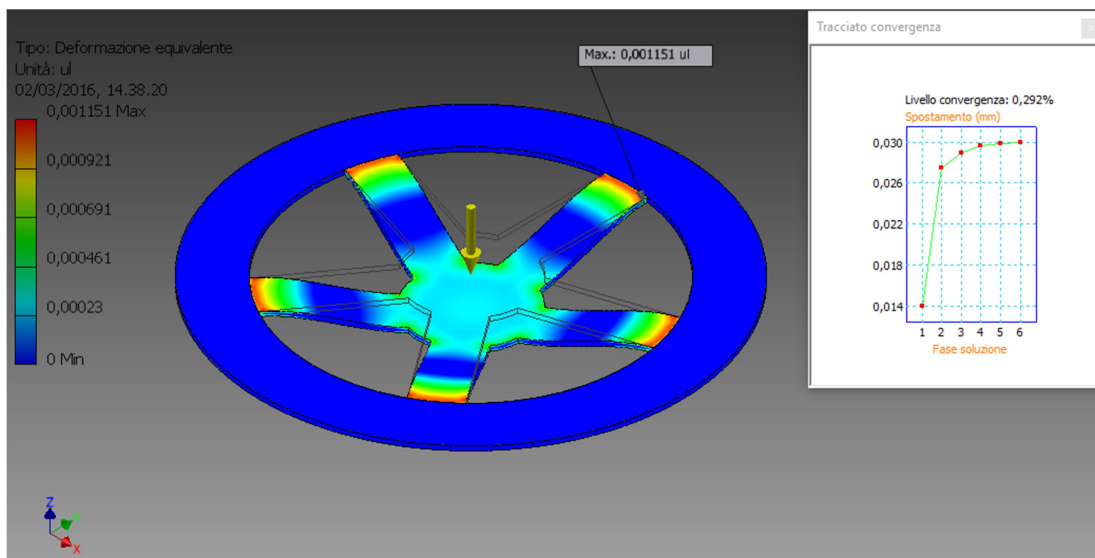


Figura 61 Esempio di deformazione equivalente e livello di convergenza per uno degli attuatori

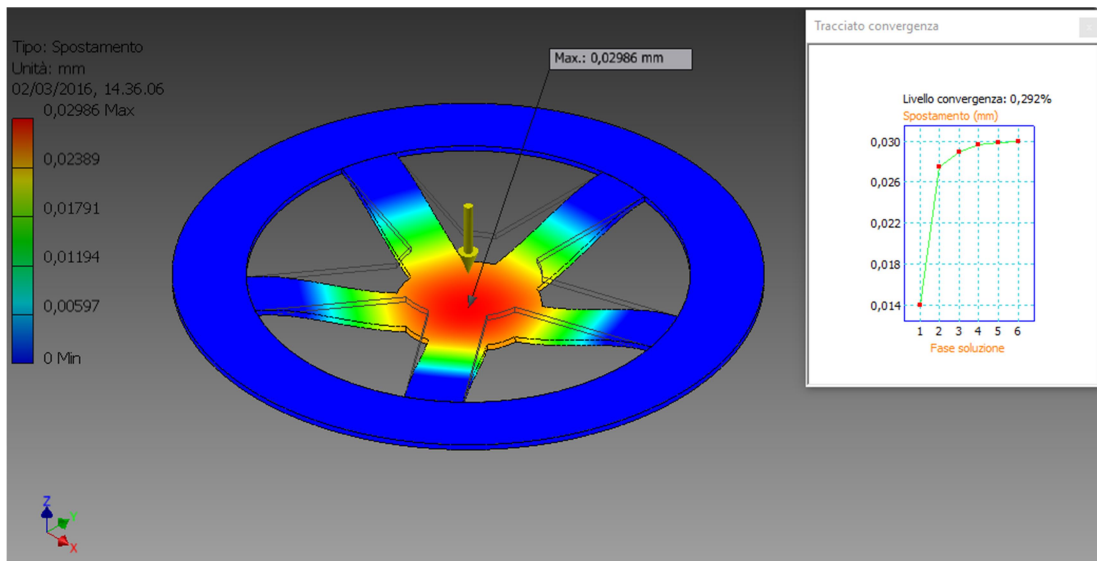


Figura 62 Esempio di spostamento e livello di convergenza per uno degli attuatori

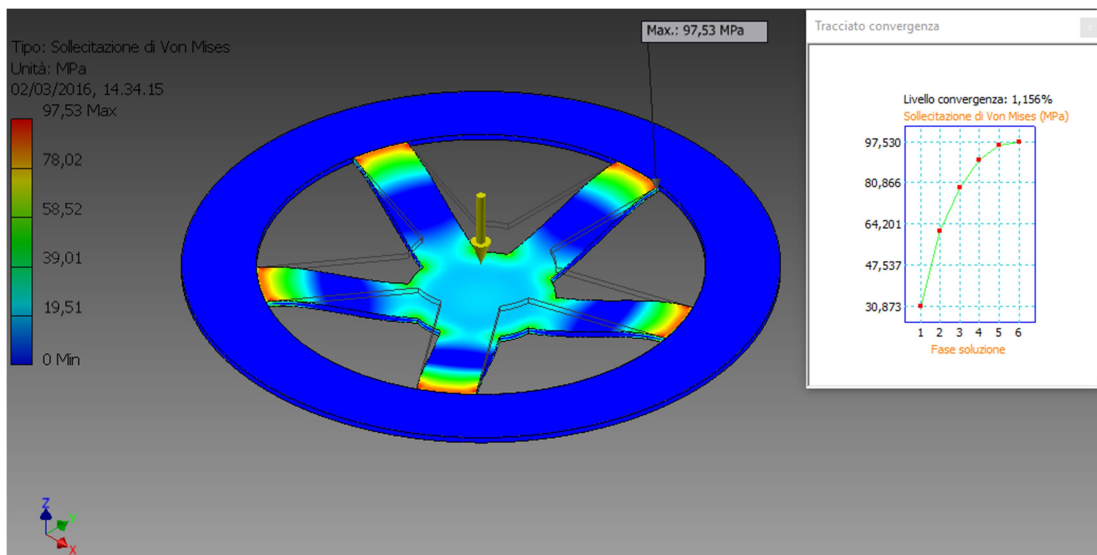


Figura 63 Esempio di sollecitazione di Von Mises e di livello di convergenza per uno degli attuatori

Infine i valori numerici dei tre parametri considerati sono stati riportati in Tabella 9.

Tabella 9 Risultati analisi FEM

Attuatore	Carico (N)	Martensite			Austenite			Recupero stimato (μm)
		σ_{vm} (Mpa)	Deformazione (%)	Spostamento (mm)	σ_{vm} (Mpa)	Deformazione (%)	Spostamento (mm)	
D2	0,5	133	0,403	0,100	133	0,161	0,040	59,80
	1	266	0,806	0,200	266	0,322	0,080	120,00
	1,5	400	1,209	0,299	400	0,483	0,120	179,40
	2	532	1,612	0,400	531	0,644	0,160	240,00
D3	0,5	97,5	0,2878	0,074	97,5	0,1151	0,029	45,00
	1	195	0,5756	0,149	195	0,2302	0,059	90,00
	1,5	292,6	0,8634	0,224	292,6	0,3453	0,090	134,33
	2	390,1	1,1512	0,299	390,1	0,4604	0,119	179,20
D5	0,5	116,3	0,3437	0,123	116,3	0,1375	0,049	74,00
	1	232,6	0,6874	0,247	232,6	0,275	0,099	148,00
	1,5	348,9	1,0311	0,372	348,9	0,4125	0,149	222,90
	2	465,2	1,3748	0,495	465,2	0,55	0,198	297,20
D6	0,5	90,06	0,2861	0,099	90,06	0,1121	0,039	59,21
	1	180,07	0,5722	0,197	180,07	0,2242	0,079	117,72
	1,5	270,05	0,8583	0,295	270,08	0,3363	0,119	176,23
	2	360,09	1,1444	0,393	360,09	0,4484	0,158	234,74

Maggiori considerazioni verranno fatte nei capitoli successivi confrontandoli con i risultati della nuova campagna sperimentale.

3.2: Nuova fase sperimentale

3.2.1: Modifiche al banco, definizione della nuova configurazione e modalità di sperimentazione

Una volta montato il banco prova nell'ultima configurazione sviluppata, con bilancia a due piatti e sensore posizionato sulla slitta nanometrica, e collegato il sistema di trasporto del vapore, si è notata l'esistenza di un conflitto tra l'estremità della bilancia e l'ugello cui viene collegato il tubo che porta il flusso di vapore.

A tal proposito è stato deciso di ribaltare il disco superiore del banco prova in modo che il perno della bilancia a 2 piatti passasse attraverso il foro posto al centro del tappo ed allineato con l'attuatore, e il vapore arrivasse dall'alto come è visibile in Figura.64. Questo ha permesso di separare le due zone in conflitto tra loro eliminando definitivamente quest'ultimo. Ovviamente, posizionando il tappo verso il basso si è reso necessario, per ogni cambio di attuatore, una fase di smontaggio e rimontaggio del disco superiore dalle colonne e questo ha portato ad una dilatazione dei tempi della sperimentazione.

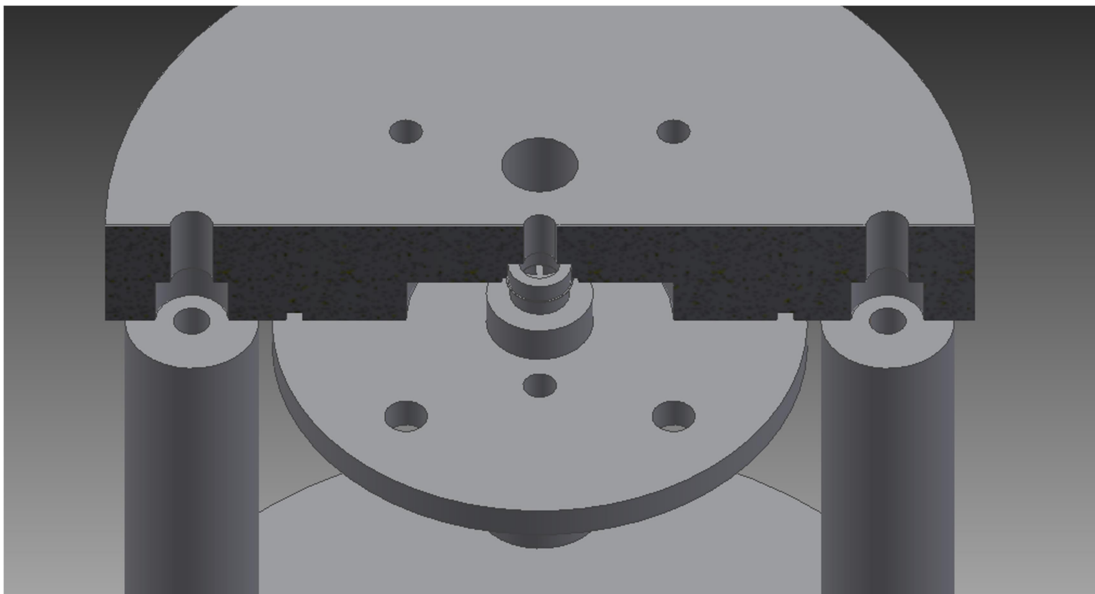


Figura 64 Nuova disposizione del disco superiore del banco prova

Per ottenere una maggior precisione di misura si è deciso anche di fissare il banco prova al piano di lavoro tramite due viti autofilettanti in modo da essere sicuri che non avvenissero movimenti accidentali del sistema. Per permettere questo ulteriore affinamento è stato però necessario rendere controllabile la posizione della bilancia a

due piatti che in origine era fissata al banco di lavoro in quanto, essendo una struttura abbastanza labile, richiede un adattamento continuo al banco tra una prova e l'altra. Per far questo ci è stata fornita una seconda slitta nanometrica su cui è stata fissata la bilancia. Si è quindi giunti ad una configurazione in cui tutti i componenti principali sono fissati al piano di lavoro, con la possibilità di regolare la posizione della bilancia rispetto al banco e, di conseguenza, del lettore di misura rispetto alla bilancia.

Come ultima operazione è stato collegato il sensore al computer in modo da poter ottenere una misurazione in continuo della posizione del fulcro. Come interfaccia di acquisizione dei dati è stato utilizzato il programma *RealTerm* che permette di acquisire i valori di tensione provenienti dal terminale e raccogliarli in un file per essere successivamente importati in programmi funzionali all'elaborazione degli stessi.

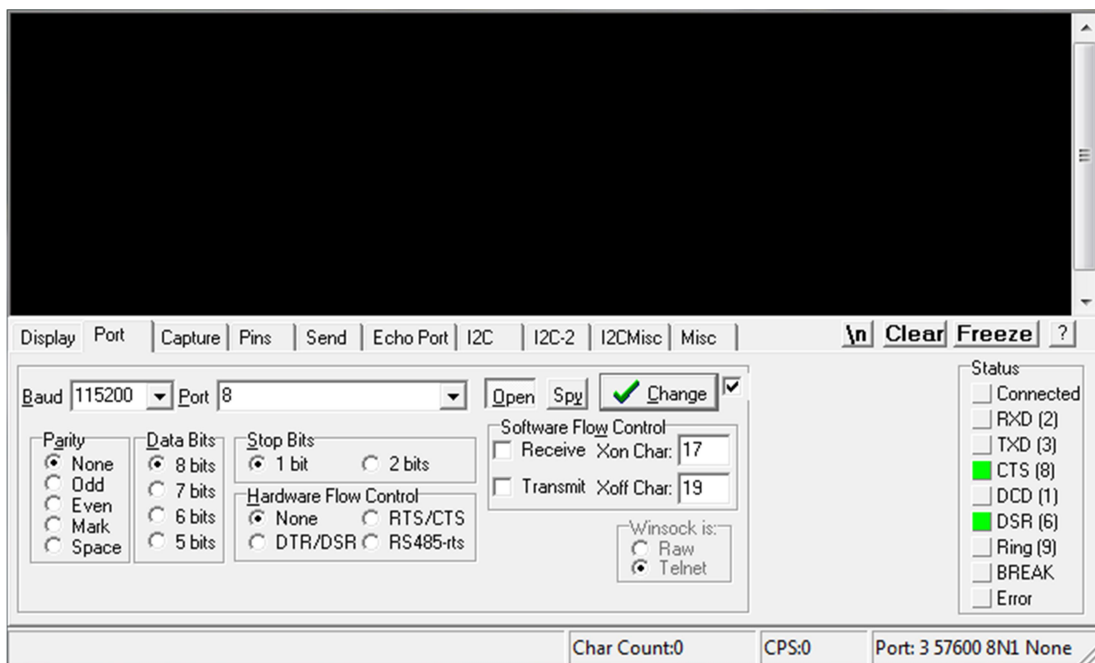


Figura 65 Interfaccia RealTerm: configurazioni per il collegamento con il sensore

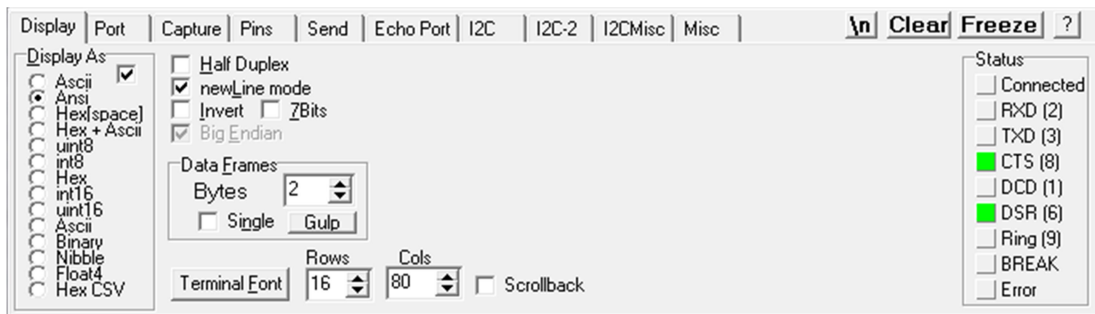


Figura 66 Interfaccia RealTerm: impostazioni di acquisizione e di visualizzazione dei dati

Questo software permette quindi di acquisire i valori di spostamento sotto forma di variazione di tensione letta, per questo è stato necessario procedere con la generazione di una linea di calibrazione ovvero l'identificazione della proporzionalità tra tensione in uscita dal sensore e posizione effettiva. Per fare questo sono stati letti 4 valori di posizione sullo schermo integrato al sensore e, per ognuno di questi è stato letto il corrispondente valore di tensione, è stata quindi generata una retta la cui derivata rappresenta la proporzionalità tra tensione e posizione:

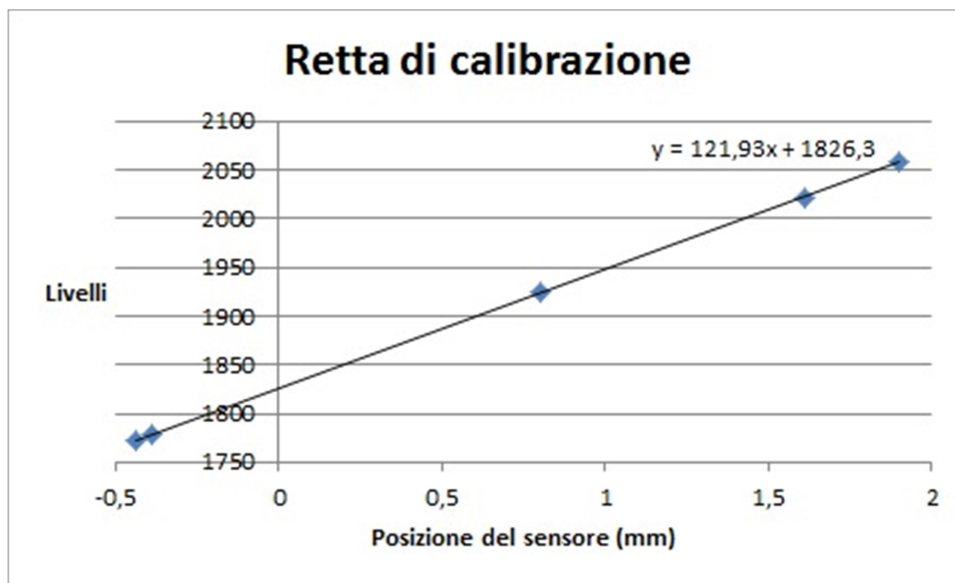


Figura 67 Retta di calibrazione del sensore

Per quanto riguarda la generazione del vapore è stata utilizzata una caldaia, proveniente da una macchinetta per il caffè professionale, in grado di generare vapore saturo alla temperatura di 130°C. L'elevatissima efficienza di tale strumento, unita ad un'elevata conducibilità termica del banco di alluminio, porta ad un notevole riscaldamento dello stesso in pochi secondi e, possedendo anche un'elevata inerzia

termica, allunga notevolmente i tempi di raffreddamento tra un riscaldamento e l'altro. Per sopperire a tale limite è stato deciso di investire il banco con un flusso di aria ed acqua fredde in modo da accelerare notevolmente il raffreddamento. Inoltre, all'atto del cambio dell'attuatore, dovendo smontare il disco superiore, si è colta l'occasione per porlo sotto un forte getto di acqua fredda corrente in modo che la sua temperatura di abbassasse molto velocemente.

Nelle Figure 53 e 54 è mostrata la configurazione finale del banco di lavoro in cui si possono identificare tutte le componenti sopra descritte.

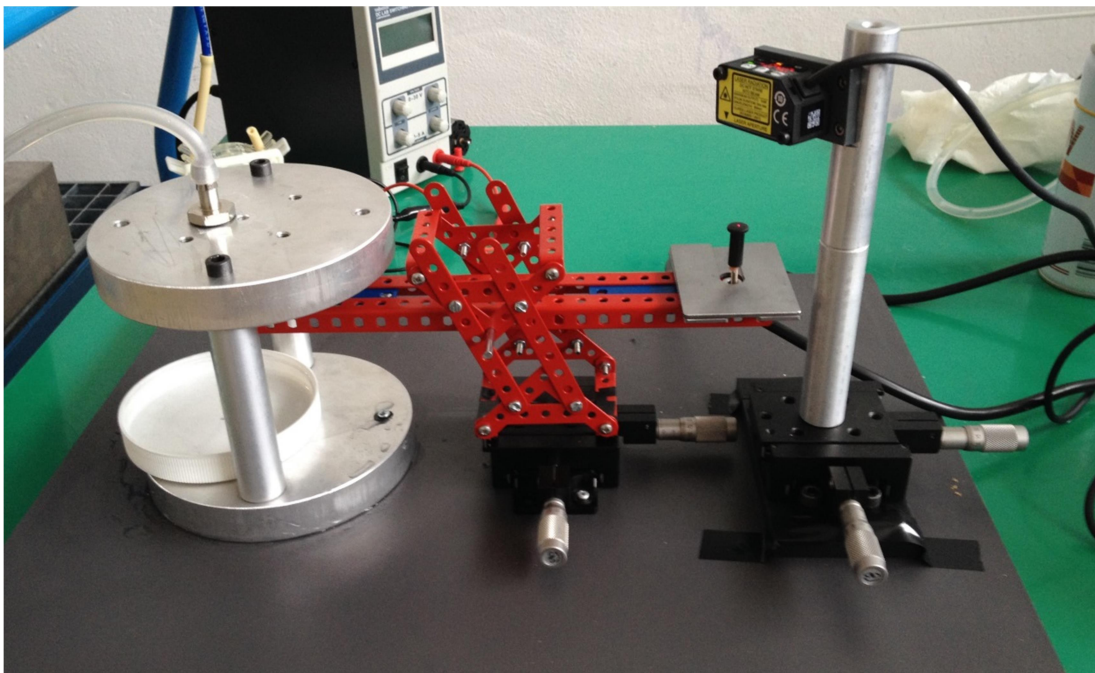


Figura 68 Banco prova: nuovo set up con bilancia collegata ad una seconda slitta nanometrica

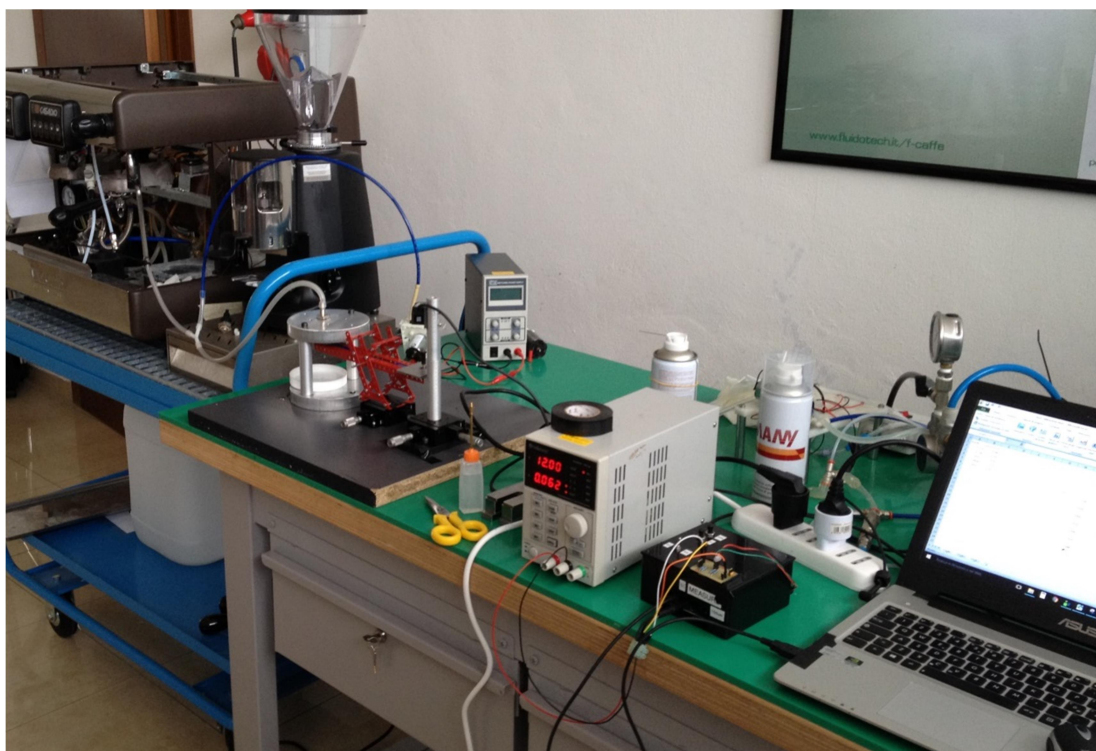


Figura 69 Banco prova: vista d'insieme con alimentatore, terminale e caldaia

A questo punto si è potuto procedere con la realizzazione della campagna sperimentale, anche in questo caso sono stati testati tutti gli attuatori e, per ogni configurazione di peso, si sono ripetuti dai 4 ai 5 riscaldamenti in modo da ottenere un recupero stabile tra due prove.

Al contrario delle precedenti prove si è deciso, a seconda dell'andamento del recupero tra una configurazione di peso e l'altra, di proseguire con l'applicazione del carico oltre la configurazione 200 in modo da arrivare alla determinazione del massimo recupero ottenibile. Pertanto, per alcuni attuatori, si è arrivati ad applicare carico 350 mentre per altri ci si è fermati a carico 200.

Come ultima considerazione è necessario sottolineare che in un primo momento sono stati utilizzati gli stessi attuatori precedentemente avvolti con la resistenza a filo e che questi sono probabilmente stati danneggiati in modo irreparabile dalla stessa, per questo motivo si è deciso anche di effettuare una campagna con l'altra serie di attuatori dotati dello strato di rame depositato.

3.2.2: Risultati della campagna sperimentale

In questo capitolo sono presentati i risultati ottenuti nella campagna sperimentale precedentemente descritta. Come già spiegato, la campagna completa è stata svolta su versioni dell'attuatore dotate di circuito di riscaldamento, e quindi differenti da quelli precedentemente testati, poiché dopo aver osservato questi ultimi tramite microscopio si è notato che alcuni di essi risultano danneggiati.

Per avere un'idea dell'aumento di rigidità portato dalla presenza di tali circuiti, che quindi inevitabilmente influisce sulle prestazioni dell'attuatore in termini di deformazioni e recupero, si è svolto un confronto tra i risultati forniti dalle due versioni dell'attuatore per la configurazione D2 poiché, tra gli attuatori testati nelle precedenti campagne sperimentali, è l'unico che non mostra alcun segno di danneggiamento. Questo spiegherebbe inoltre il fatto che, nella fase sperimentale con riscaldamento tramite costantana, tale attuatore fosse quello che mostrava il maggior recupero unito ad un comportamento molto più ripetibile.

Sono dunque mostrati, rispettivamente in Figura 70 ed in Figura 71, gli andamenti del recupero nel tempo durante la prova, al variare del carico, per attuatori senza e con circuiti stampati.

Va sottolineato che i grafici sono realizzati riportando in funzione del tempo non i segnali forniti direttamente dal sensore, ma una media mobile di periodo 8 di questi ultimi, in modo da eliminare il rumore presente nella lettura dei dati, che forniva un grafico poco leggibile. Anche con queste correzioni, il grafico mostra una certa dispersione dei dati, pertanto essi saranno utilizzati unicamente per avere una rappresentazione grafica dell'andamento dello spostamento durante la prova, ed in particolare per valutare la velocità del transitorio che è la parte di maggior interesse. Si considera solo il transitorio di riscaldamento, poiché quello in raffreddamento è influenzato dall'inerzia termica del sistema e quindi poco indicativo. Per quanto riguarda invece la lettura del recupero, esso non è valutato come massimo punto del grafico, ma viene letto dal display del sensore, come nelle precedenti campagne sperimentali.

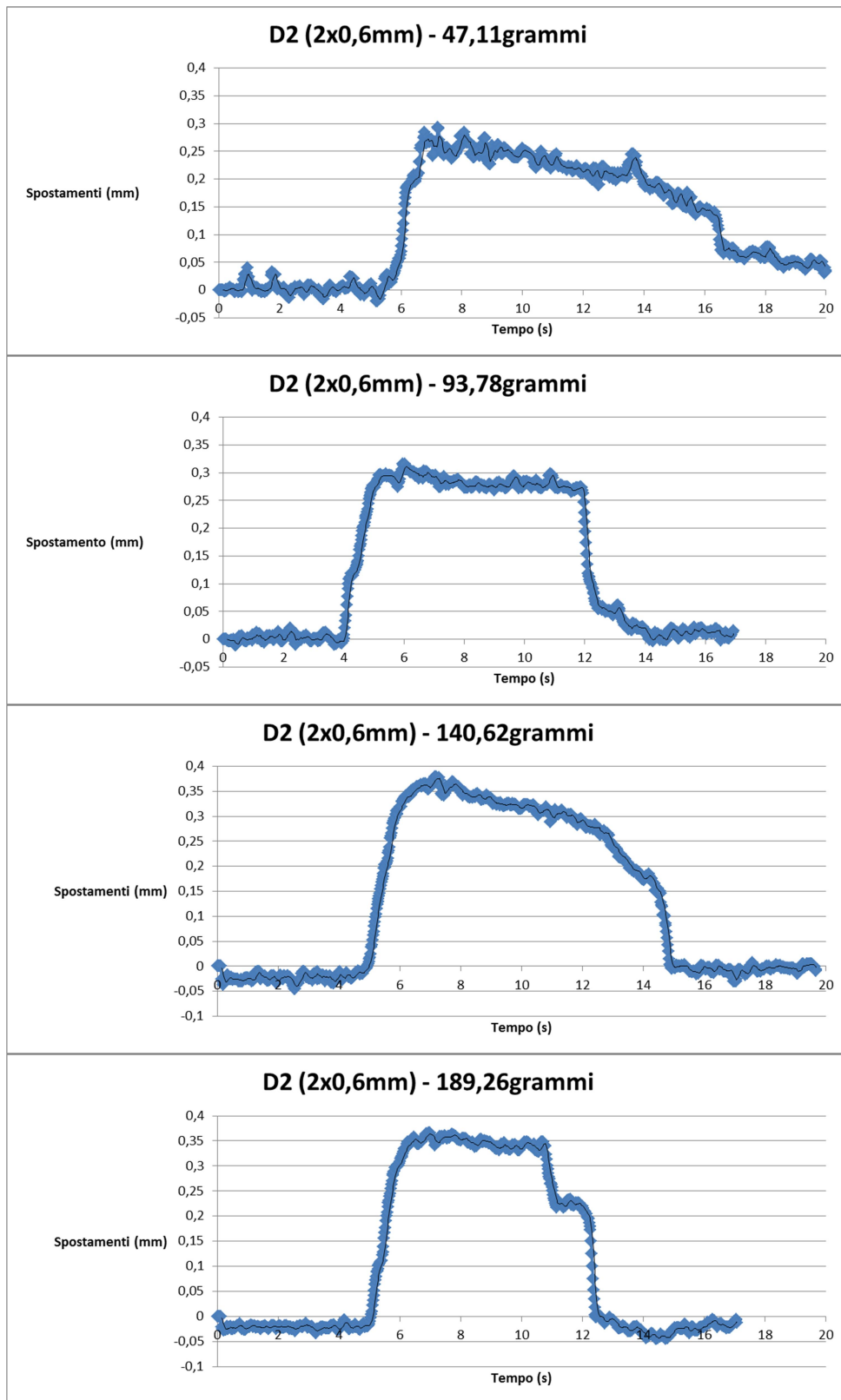


Figura 70 Risultati delle prove per l'attuatore senza circuiti di riscaldamento

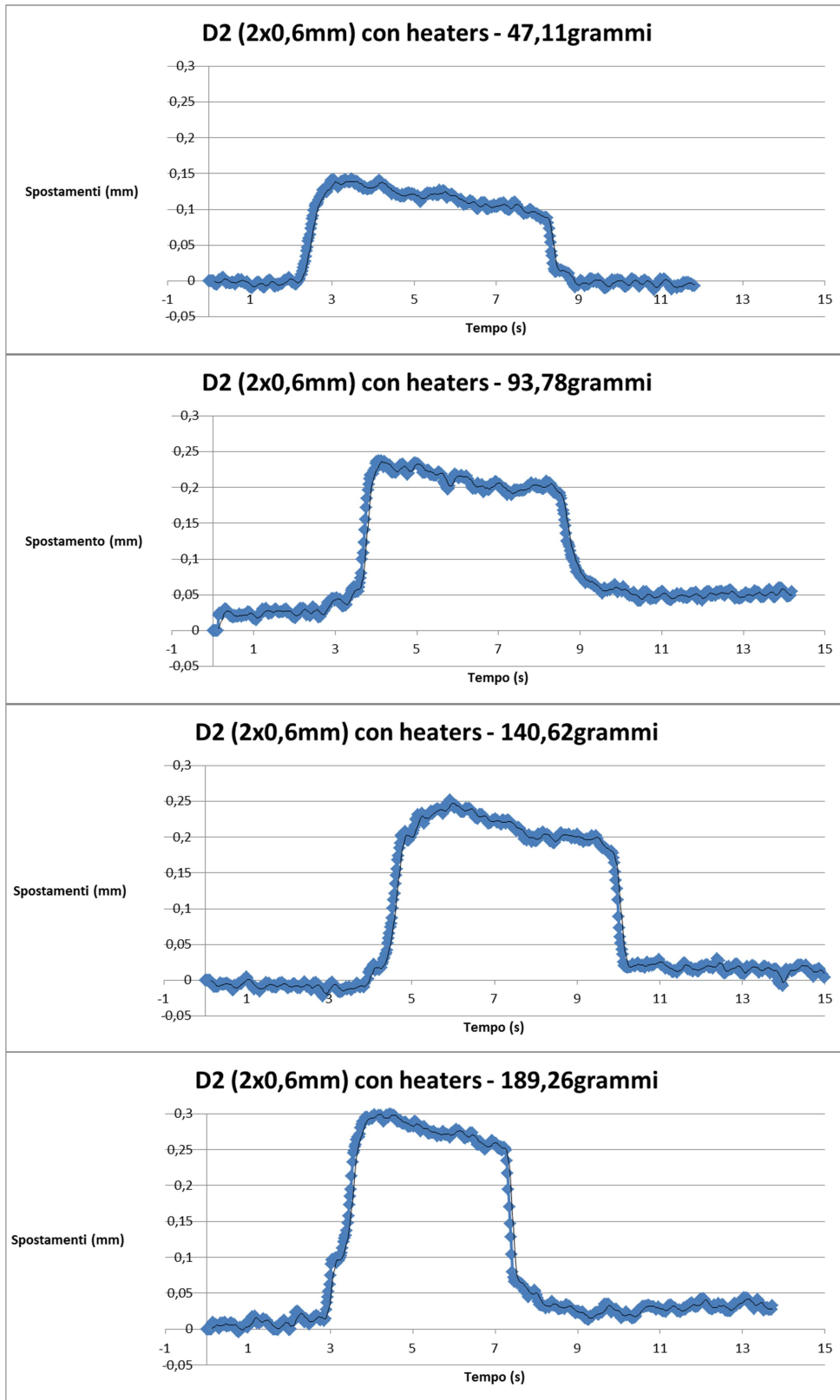


Figura 71 Risultati delle prove per l'attuatore con circuiti di riscaldamento

Come si può notare, è confermata la diminuzione di recupero dovuta all'aumento di rigidità portata dai circuiti stampati. Un ulteriore comportamento che si può dedurre è relativo all'andamento del rapporto tra il recupero nella versione con circuito e quello nella versione senza circuito, mostrato in Tabella 10. In particolare si nota come esso diminuisca al cresce del carico, ciò si ipotizza sia dovuto alla sempre maggiore entità dell'effetto a memoria di forma al crescere del carico: al tendere del carico all'infinito, ipotizzando la possibilità di avere un effetto a memoria di forma sempre crescente, tale rapporto tenderà a 1, ossia diventa sempre più trascurabile il contributo di rigidità fornito dal circuito all'attuatore.

Tabella 10 Rapporti tra i recuperi nelle due configurazioni

Peso (g)	47,11	93,78	140,62	189,26
Recupero senza circuito (μm)	250	310	380	390
Recupero con circuito (μm)	140	200	240	300
Rapporto	0.56	0.65	0.63	0.77

Si è dunque passati allo svolgimento delle prove su tutti i tipi di attuatore, e i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 11.

Tabella 11 Recuperi per i vari attuatori durante le prove con il vapore

Recuperi (μm)		Pesi (g)						
		47,11	93,78	140,62	189,26	235,83	282,5	329,34
Attuatori	D2 (2x0,6mm)	140	200	240	300	260		
	D3 (2x0,8mm)	160	210	220	250	280	290	
	D5 (2,5x0,8mm)	160	210	260	240			
	D6 (2,5x1mm)	170	230	260	280	300	310	320

Come si può notare, in questa campagna sperimentale si è superato il carico di 200, che costituiva il limite massimo nelle precedenti. Ciò è stato fatto in considerazione dell'analisi dello stato di sforzo svolta con le simulazioni FEM, che hanno mostrato come fosse possibile procedere con carichi maggiori. Si è deciso quindi di proseguire con l'aumento del carico fino a notare una diminuzione del recupero, cosa che è avvenuta per gli attuatori D2 e D5, mentre per gli altri due è stato stabilito un limite massimo in accordo con Fluid-o-Tech, in via cautelativa, vista la limitata disponibilità degli attuatori. In ogni caso, analizzando l'andamento del recupero di questi ultimi attuatori, si può ipotizzare che i valori raggiunti non fossero troppo

distanti da quelli massimi, sia studiandone le linee di tendenza, sia notando la progressiva diminuzione dell'aumento di recupero tra i carichi successivi. Si riportano dunque, in Tabella 12, le nuove configurazioni di carico usate. I grafici dello spostamento nel tempo delle varie prove sono riportate in Appendice G.

Tabella 12 Nuove configurazioni di carico

Tabella dei Pesì		Carico	
	Peso (g)		Reale (g)
Precarico	0,27	250	235,83
Peso 50	46,84	300	282,5
Peso 100	93,51	350	329,34
Peso 200	188,99		

Nelle Figure 72 e 73 vengono riportati degli istogrammi comparativi tra le varie prove, in esso sono indicati i valori di recupero per i vari carichi per ogni attuatore.

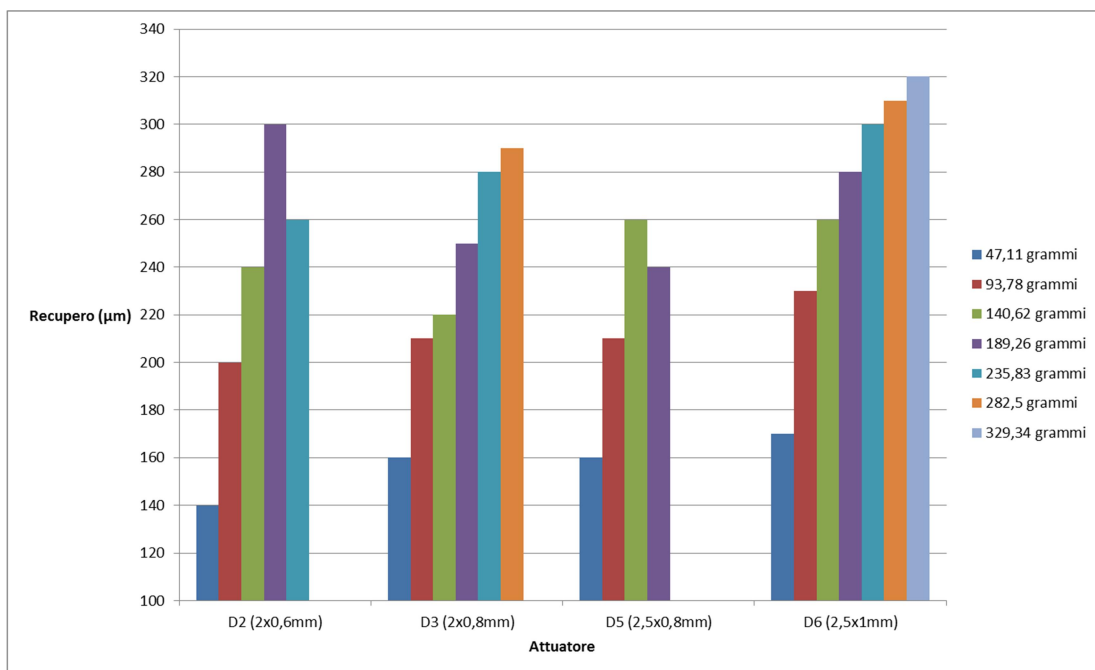


Figura 72 Visione di insieme dei risultati delle prove (1)

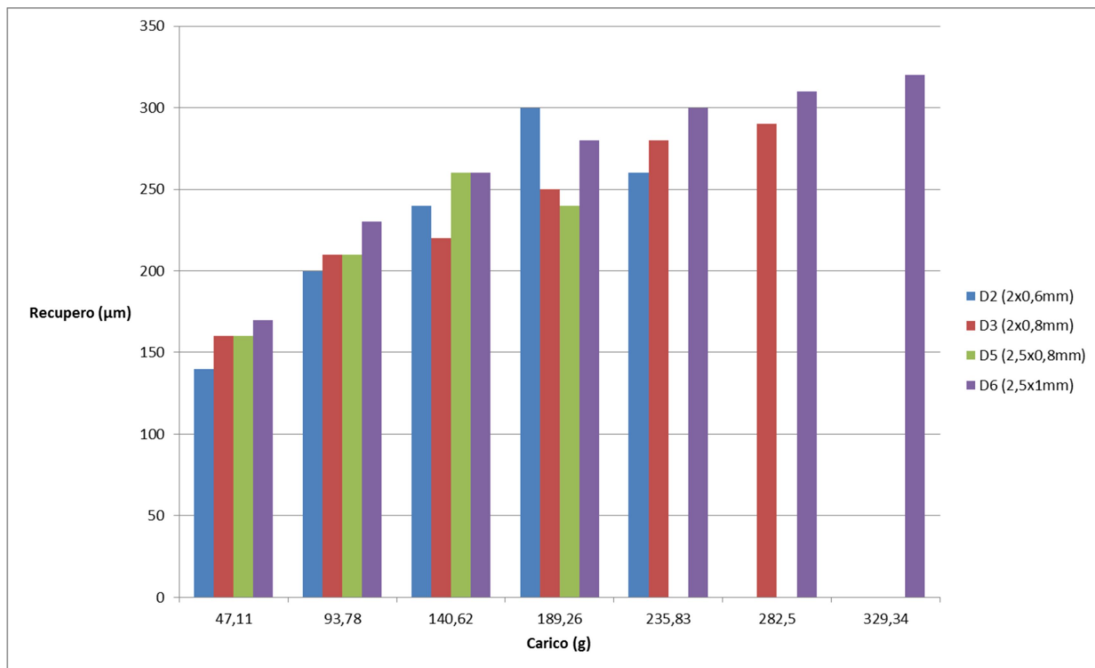


Figura 73 Visione di insieme dei risultati delle prove (2)

Tramite questi grafici si può osservare come le differenze tra i comportamenti siano ridotte per bassi carichi, presumibilmente ciò è dovuto al fatto che l'effetto del carico non è sufficiente a causare variazioni nella struttura martensitica tali da portare a differenze apprezzabili. Al crescere del carico si nota invece che le caratteristiche dei vari attuatori iniziano ad emergere. Come supporto all'analisi, si introduce una grandezza che verrà chiamata *Coefficiente di Snellezza S* della trave, e definita come:

$$S = \frac{L}{W} \quad (6)$$

Con L lunghezza e W larghezza della trave. Si nota che gli attuatori D2 e D5 hanno snellezza circa pari a 3,2, mentre gli attuatori D3 e D6 ne hanno una pari a 2,5.

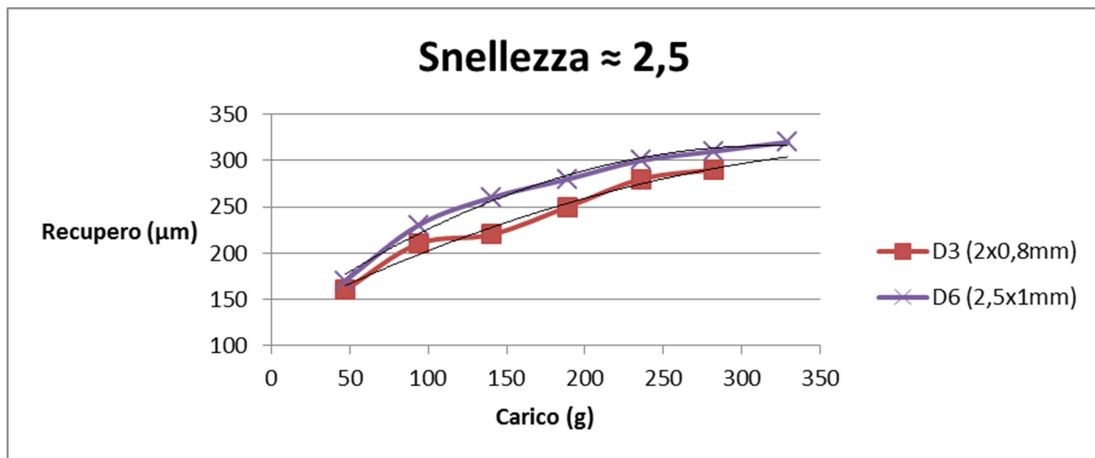


Figura 74 Grafici Recupero su Carico per attuatori con travi a snellezza 2,5

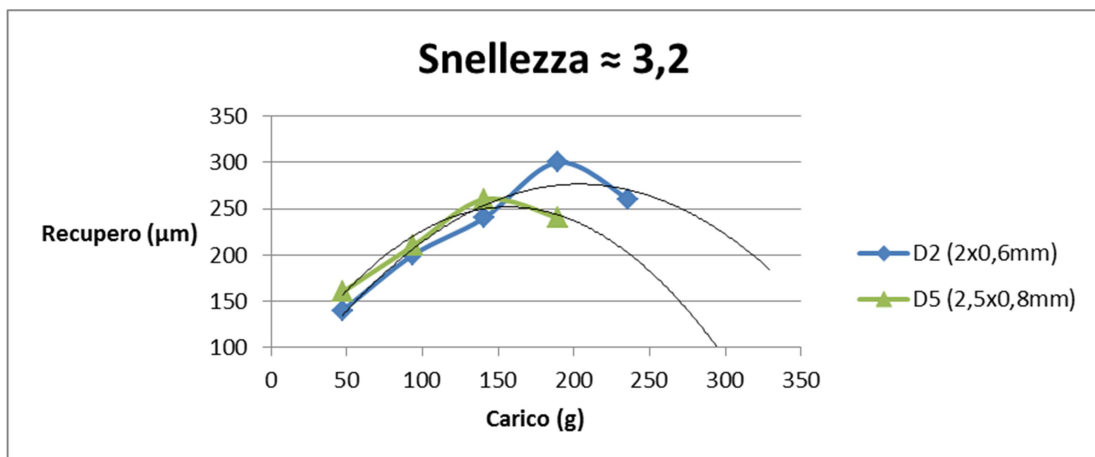


Figura 75 Grafici Recupero su Carico per attuatori con travi a snellezza 3,2

Osservando i grafici sopra riportati, si può notare che a pari snellezza quelle con lunghezza maggiore (ossia la D5 e la D6) raggiungono prima il picco massimo di recupero, che è anche inferiore, ciò è dovuto al fatto che il carico applicato genera un momento flettente che, a parità di peso, aumenta con la lunghezza della trave e risulta quindi più difficile da recuperare (per quelle a snellezza 2,5, di cui non si conoscono i massimi, tali considerazioni sono state riscontrate tramite le linee di tendenza).

È possibile fare considerazioni anche sull'effetto della snellezza a parità di lunghezza.

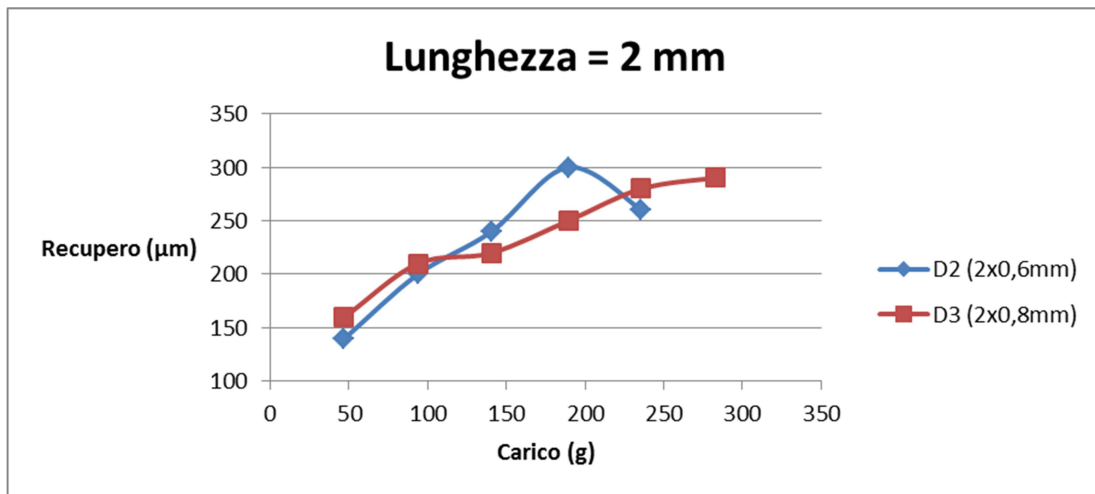


Figura 76 Grafici Recupero su Carico per attuatori con travi di Lunghezza pari a 2 mm

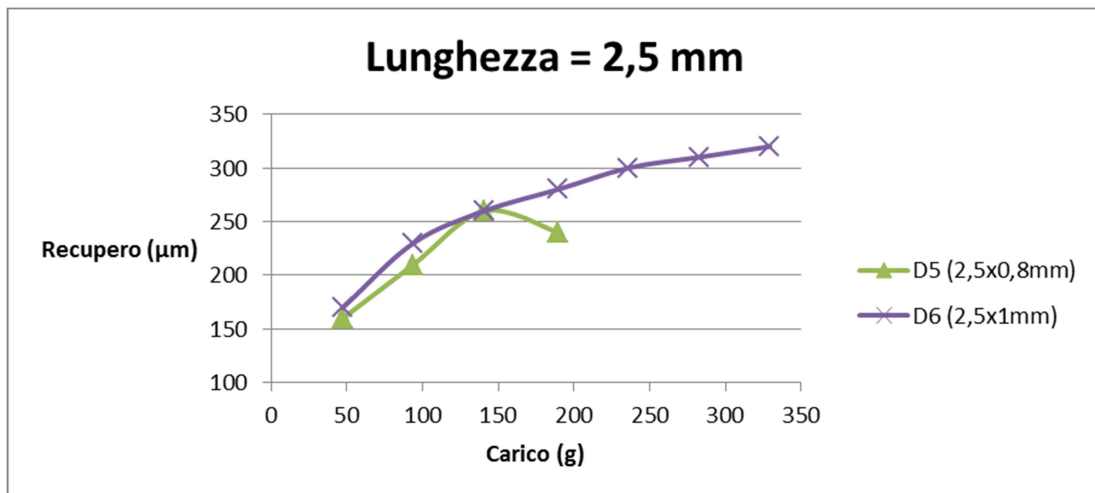


Figura 77 Grafici Recupero su Carico per attuatori con travi di Lunghezza pari a 2,5 mm

Si nota come a pari lunghezza, quelle più snelle raggiungono prima il picco massimo di recupero, che è anche inferiore, ciò è dovuto al fatto che per travi più snelle (quindi meno rigide) è minore il carico necessario a stirare completamente la martensite, che è il carico che fornisce il maggiore recupero. Aumentare il carico porta ad avere che l'effetto di quest'ultimo prevale sul recupero di deformazione dato dal riscaldamento, portando ad una diminuzione del recupero stesso osservato.

3.3: Confronto con le simulazioni svolte in fase di concepimento

In questo paragrafo verrà svolto un confronto tra i risultati della più recente campagna sperimentale e quelli ottenuti dall'Ingegnere Steiner mediante simulazioni agli elementi finiti.

Si è inoltre tentato un confronto tra le prove e l'analisi FEM semplificata (con modello lineare), tuttavia è difficile trarre conclusioni poiché delle prime non si conoscono gli initial displacement dato che non è stato possibile misurarli a causa dei limiti della strumentazione. Ciò impedisce di ricavare l'effettiva freccia nelle due fasi e di conseguenza anche le deformazioni in gioco nelle prove sperimentali. Inoltre il FEM semplificato, per sua stessa natura, non è in grado di modellare fedelmente parametri tipici degli SMA, come il recupero, poiché non adatto a simulare comportamenti come quello a memoria di forma. Infatti, come già citato, tale FEM è stato inizialmente utilizzato solo per verificare lo stato di sforzo e avere indicazioni sulla possibilità di procedere con carichi maggiori di quelli precedentemente testati. Nel paragrafo 3.4, verrà discusso come tale FEM semplificato abbia tuttavia fatto da base alla realizzazione di uno strumento progettuale che consenta di dimensionare attuatori di questo tipo.

Per quanto riguarda invece il confronto con i dati dell'Ing. Steiner si ha che il principale problema sta nel diverso metodo di svolgimento delle prove, ci si riferisca ai sottoparagrafi 1.2.1 e 1.2.2 per un approfondimento sul sistema di carico ipotizzato da lui ipotizzato. Utilizzando una molla in compressione, si ha una forza variabile sull'attuatore durante la prova, dovuta al diverso stato di compressione della molla stessa al variare della posizione dell'attuatore, mentre nelle prove svolte nel corso di questo lavoro si ha una forza peso costante. Gli unici dati riguardanti la forza sono espressi in forma di differenza tra quella a bassa temperatura e quella ad alta temperatura oltre alla massima forza percepita dal design ottimale, pertanto difficilmente confrontabili con quelle di questo elaborato. Riguardo gli altri parametri, si hanno poche informazioni: in particolare sforzi e deformazioni non vengono trattati in modo approfondito, poiché i risultati sono generalmente espressi in forma di recupero su initial displacement o variazione di forza su initial displacement.

Ci si limiterà dunque ad un semplice confronto tra i valori di recupero dati dalle prove e quelli ottenuti in fase di simulazione. Va però sottolineato che quella che l'Ing. Steiner definisce come configurazione ottimale (cioè l'attuatore D3) è stato scelto come tale non per il massimo valore di recupero (che è in realtà associato alla D2, anche se con differenze ridotte) ma per il miglior rapporto tra tale parametro e resistenza ai trafileamenti.

Prima di procedere con i confronti dei dati numerici, si prendono in considerazione quelli che possono essere gli effetti delle diverse modalità di svolgimento delle prove sui risultati, in modo da poter valutare in modo più oggettivo ciò che emergerà dal confronto.

Come già citato, la differenza sta nel diverso andamento della forza: nel caso di questo elaborato è costante all'interno della singola prova e pari alla forza peso del carico applicato mentre nel caso delle simulazioni è variabile con lo stato di compressione della molla, a sua volta legato allo stato di deformazione dell'attuatore.

$$F_p = m * g \qquad F_{el} = k * \Delta L \qquad (7) (8)$$

Si confrontino tali prove:

- Supponendo di applicare lo stesso carico, inteso come forza percepita dal centro dell'attuatore, in fase martensitica (rispettivamente F_{pM} e F_{elM}), si ha uno stesso valore di freccia per i due casi (f_{pM} e f_{elM}).
- Procedendo con il riscaldamento per effettuare il passaggio in fase austenitica, si nota che mentre con la bilancia la forza rimane costante (F_{pA}), con la molla la forza aumenta all'aumentare del recupero (F_{elA}). Ciò porterà ad avere in fase austenitica una forza maggiore di quella che si ha con la bilancia, a tale forza maggiore corrisponderà anche una maggiore freccia (f), ed essendo il recupero la differenza tra le frecce nelle due fasi, ad un minore recupero (R).

$$F_{pM} = F_{elM} \xrightarrow{\text{aumento di Temperatura}} F_{pA} = F_{pM} < F_{elA}$$

$$f_{pM} = f_{elM} \xrightarrow{\text{aumento di Temperatura}} f_{pA} < f_{elA} \iff R_p > R_{el}$$

Tale comportamento è schematizzato in Figura 78.

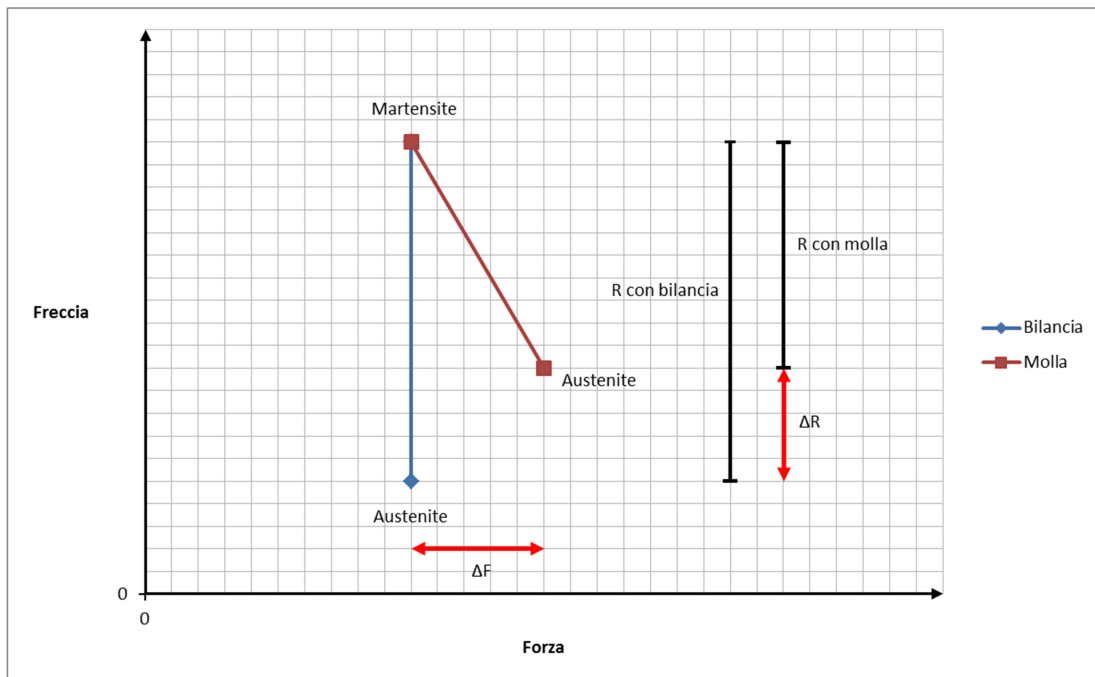


Figura 78 Differenza di comportamento tra i due metodi di carico

Passando al confronto tra i risultati numerici, si nota che il miglior recupero riscontrato nelle simulazioni si attesta sui 0,224mm con l'attuatore che rispecchia le caratteristiche geometriche della D2 descritta in questo lavoro, mentre nelle prove sperimentali il massimo valore di recupero ottenuto risulta pari a 0,328mm ma sull'attuatore di tipo D6 dotato di circuiti di riscaldamento (quindi con maggiore rigidità che porta ad un recupero più limitato, con differenza stimata attorno al 20%).

Confrontando invece le prestazioni della D2 nelle simulazioni con quella delle prove sperimentali (senza circuiti) si nota un recupero circa doppio, 0,224mm contro 0,390mm.

Per avere invece un confronto complessivo che consideri anche le forze in gioco, si può notare che l'attuatore D3 (che come già citato risulta la scelta ottimale dalle simulazioni, con un recupero leggermente minore ma una miglior resistenza ai trafilamenti) recupera di 0,218mm contro i 0,290 ottenuti dalle prove. Tuttavia, mentre nelle simulazioni tale recupero si ottiene con una valore di forza che passa da 1,2N in fase martensitica e 1,9N in fase austenitica, in fase sperimentale il massimo R è dato da una forza costante di 2,8N (corrispondente al carico 300).

Si nota che le forze in gioco reali sono maggiori di quelle stimate dalle simulazioni, questo potrebbe essere dovuto al fatto che le specifiche del materiale inserite nel modello analitico di Abaqus non rispecchino le sue reali caratteristiche, in particolare modo si è portati a pensare che ciò sia dovuto all'approssimazione del Modulo di Young che, nel modello di Auricchio, viene inserito come valore medio tra quello austenitico e martensitico. Inoltre il fatto che lo spessore sia mediamente superiore a quello simulato (come specificato nel paragrafo 1.3) conferma la necessità dell'attuatore di avere una forza maggiore per avere il displacement ottimale ad ottenere il maggior recupero.

Partendo da queste considerazioni, sulle non trascurabili differenze tra le forze nel modello simulato e in quello reale

Sebbene i valori di recupero siano in termini assoluti maggiori di quelli dei modelli analitici, tali risultati non sono sufficienti ad invalidare il lavoro di Steiner. Si nota infatti che a fronte di un aumento di forza all'interno della prova di circa il 50%, si nota una diminuzione di recupero rispetto al caso a forza costante di circa il 50%. Si ritengono pertanto plausibili i risultati delle simulazioni, pur considerando necessario approfondire lo studio del comportamento dell'attuatore tramite prove in presenza di forza variabile.

3.4: Realizzazione di un strumento semplificato atto alla progettazione

In questo paragrafo è stato sfruttato il confronto tra i risultati delle prove reali e quelli delle simulazioni agli elementi finiti semplificate per ottenere uno strumento in grado di modellare il più fedelmente possibile il comportamento di questo tipo di attuatori. L'obiettivo è quello di fornire un supporto alla progettazione nel caso in cui si volessero realizzare attuatori con dimensioni diverse da quelle attualmente presenti pur mantenendo la stessa forma (stella a cinque travi lineari di spessore circa 80 micron), ossia variandone la Snellezza. Si presume tuttavia che tale strumento non sia in grado di modellare qualsiasi possibile dimensione, pertanto l'intenzione è quella di non allontanarsi troppo da quelle già esistenti, come verrà successivamente specificato.

Il principio su cui si basa la realizzazione di questo strumento consiste nell'andare a ritrarre il FEM in modo tale da renderlo il più vicino possibile ai risultati sperimentali. Per fare ciò sono stati rappresentati in diagrammi Recupero su Snellezza le prestazioni di ogni attuatore (reali e FEM) per ogni peso.

Come si potrà notare, i pesi non sono perfettamente coincidenti poiché ciò non era necessario per lo scopo iniziale di queste simulazioni. Dal momento che la differenza è limitata (intorno al 5%) non è stato ritenuto necessario scalare i risultati.

3.4.1: Descrizione della procedura di realizzazione

Siccome questo strumento deve essere valido per ogni combinazione di lunghezza e larghezza, lo si andrà a tarare sull'unico parametro non geometrico che influenza il calcolo della freccia in un'analisi semplificata come quella svolta, ossia il modulo di Young (E).

Per ogni punto, è stata tracciata la retta passante attraverso esso e l'origine, e di tale retta ne è stato valutato il coefficiente angolare (m), come visibile in Figura 79.

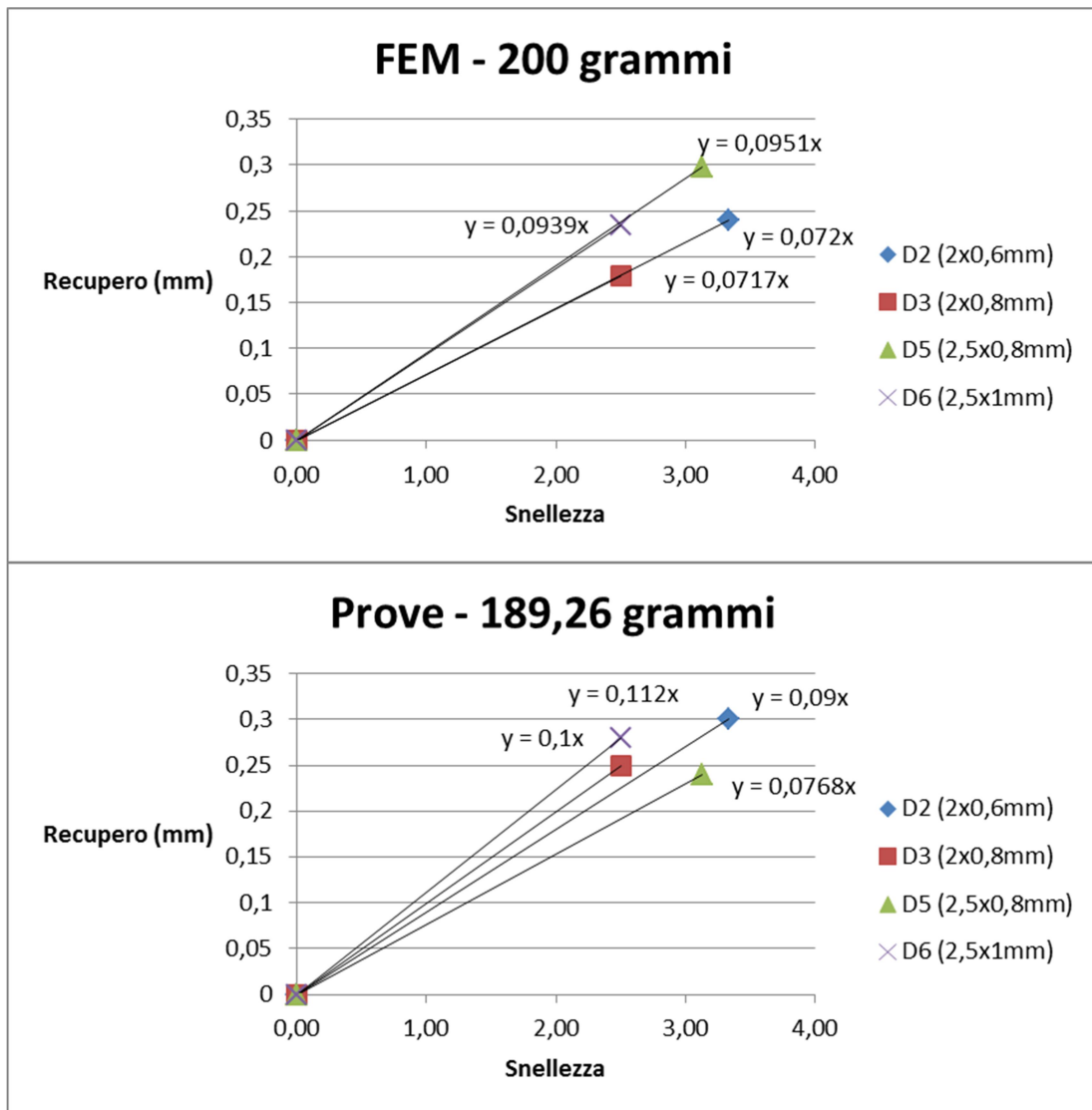


Figura 79 Esempi di diagrammi Recupero su Snellezza (in questo caso per 200 grammi)

Si vuole arrivare a definire m in funzione di E . A tal proposito si realizzano diagrammi analoghi a quelli in Figura 79 per le frecce in fase austenitica e martensitica ottenute con il FEM e vengono quindi valutati i rispettivi coefficienti angolari m_A e m_M .

Da essi si nota che vale la seguente relazione:

$$\frac{m_A}{m_M} = \frac{E_M}{E_A} \quad (9)$$

$$m_A * E_A = m_M * E_M \quad (10)$$

$$m_A = \frac{cost}{E_A} \quad (11)$$

Questa considerazione è supportata dal fatto che la freccia generata in una trave semplice caricata verticalmente al centro (a cui questo caso può essere idealmente ricondotto) è inversamente proporzionale al modulo di Young.

Essendo nel FEM il recupero dato da una differenza lineare tra il valore della freccia in austenite e quella in martensite, si definisce la pendenza della retta Recupero su Snellezza come:

$$m_{Recupero} = \frac{K}{\frac{E_A + E_M}{2}} \quad (12)$$

Per definire K , si ricorda che la freccia f viene definita come

$$f = m * S = m * S = m * \frac{L}{W} \quad (13)$$

E sapendo che

$$f \propto \frac{F * L^3}{E * W * h^3} \xrightarrow{\text{isolando la snellezza}} f \propto \frac{F * L^2}{E * h^3} * S$$

Quindi

$$m \propto \frac{F * L^2}{E * h^3} \quad (14)$$

$$K \propto \frac{F * L^2}{h^3} \quad (15)$$

Si ha infatti che dimensionalmente K è in MPa*mm anche ricavandolo dall'espressione della pendenza.

Note le pendenze tramite il metodo precedentemente descritto e noti i moduli di Young delle due fasi, è stato possibile ricavare il valore di K per ciascun attuatore caricato con ogni peso.

Si può osservare dai dati sperimentali come, a conferma di quanto precedentemente descritto, K aumenti sia all'aumentare del carico a pari lunghezza, sia all'aumentare della lunghezza a pari carico, ma esso non dipenda dalla larghezza, come si può notare anche da Tabella 13.

Tabella 13 Valori di K al variare di larghezza, lunghezza e carico

50 grammi		Larghezza (mm)		
		0,6	0,8	1
Lunghezza (mm)	2	0,9	0,9	
	2,5		1,2	1,2
	3	1,6		1,6
100 grammi		Larghezza (mm)		
		0,6	0,8	1
Lunghezza (mm)	2	1,9	1,9	
	2,5		2,5	2,5
	3	3,1		3,1
150 grammi		Larghezza (mm)		
		0,6	0,8	1
Lunghezza (mm)	2	2,8	2,8	
	2,5		3,7	3,7
	3	4,7		4,7
200 grammi		Larghezza (mm)		
		0,6	0,8	1
Lunghezza (mm)	2	3,8	3,8	
	2,5		5	4,9
	3	6,2		6,2

In tale Tabella è riportato anche l'andamento relativo ad un attuatore di lunghezza pari a 3 mm, che come è noto non è presente in questo lavoro. Tale attuatore è stato modellato tramite software CAD con spessori di 0,6mm e 1mm e successivamente testato tramite il FEM semplificato per verificare ulteriormente le osservazioni fatte relativamente al fattore K . Esso ha permesso di confermare che tale parametro dipende da carico e lunghezza ma non dalla larghezza della trave.

È stato successivamente tracciato il diagramma di K in funzione dei due parametri rispetto a cui è dipendente, esso è riportato in Figura 80.

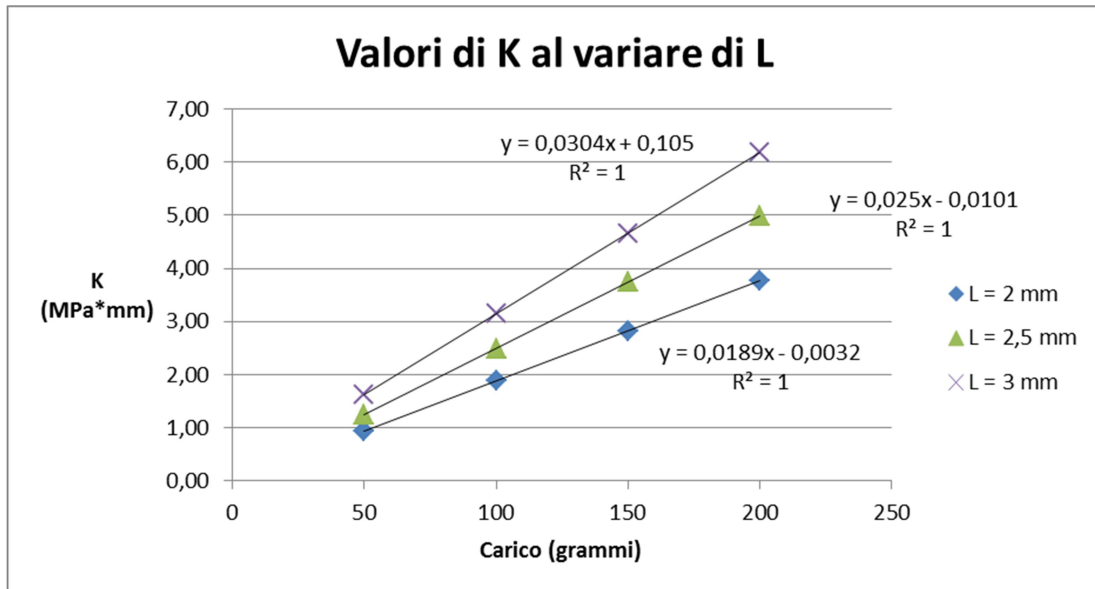


Figura 80 Andamento di K in funzione di Lunghezza e Carico

Per poter ampliare le possibilità di progettazione, si punta a generalizzare la relazione, in modo da poter risalire al K da usare per ogni possibile lunghezza.

A tal proposito si evidenzia, come riportato nella Figura successiva, che esiste una buona relazione tra la pendenza della curva che definisce K e la lunghezza.

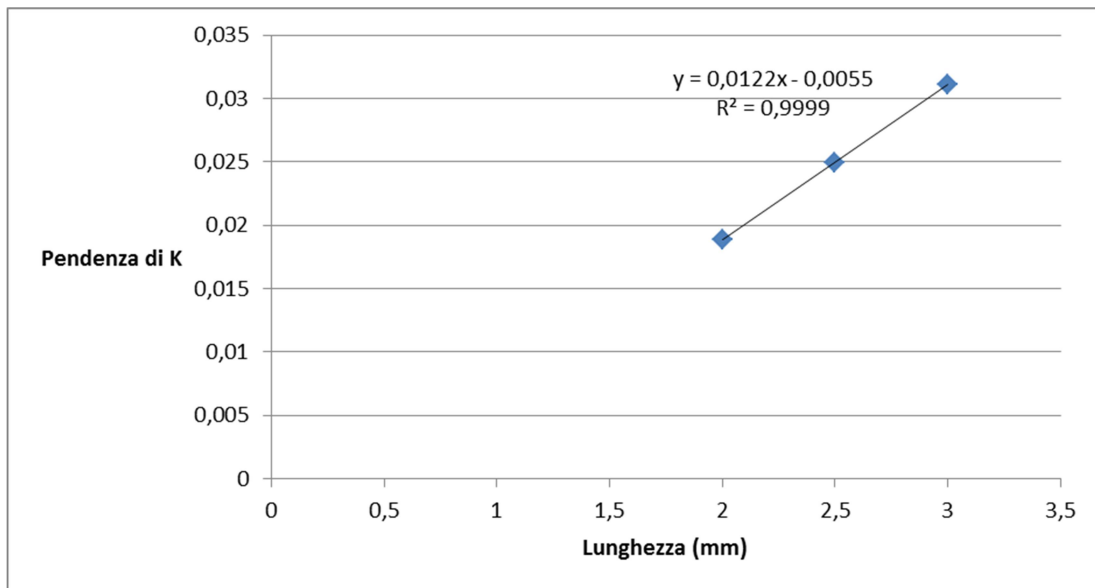


Figura 81 Relazione fra la pendenza di K e la lunghezza della trave

Il valore di R^2 ci indica che l'approssimazione lineare di tale andamento è possibile, pertanto tramite l'equazione

$$m_K = 0,0122 * L - 0.0055 \quad (16)$$

è possibile ricavare la pendenza di K (indicata con m_K) per una qualsiasi lunghezza.

A questo punto si è in grado di esprimere la pendenza unicamente in funzione del modulo di Young, e per determinare il miglior valore di E da utilizzare nel modello analitico è stato applicato il metodo dei minimi quadrati alle differenze tra i recuperi delle prove reali e quelli del FEM tramite un risolutore in Excel.

Tale procedimento è stato svolto per ogni carico, in modo da determinare quale sia il miglior valore di E per ciascun caso.

$$E_i \mid \min(err_i) \quad (17)$$

$$err_i = \sum_{D2}^{D6} (m_{FEM} - m_{reale})^2 \quad i = 50,100,150,200; \quad (18)$$

Si ottengono così i seguenti risultati:

Tabella 14 Valori del modulo di Young ottenuti

Carico (grammi)	E (MPa)
50	19,62
100	29,16
150	38,03
200	47

È possibile definire la funzione che lega il modulo di Young al carico interpolando i quattro punti ottenuti in Tabella 14.

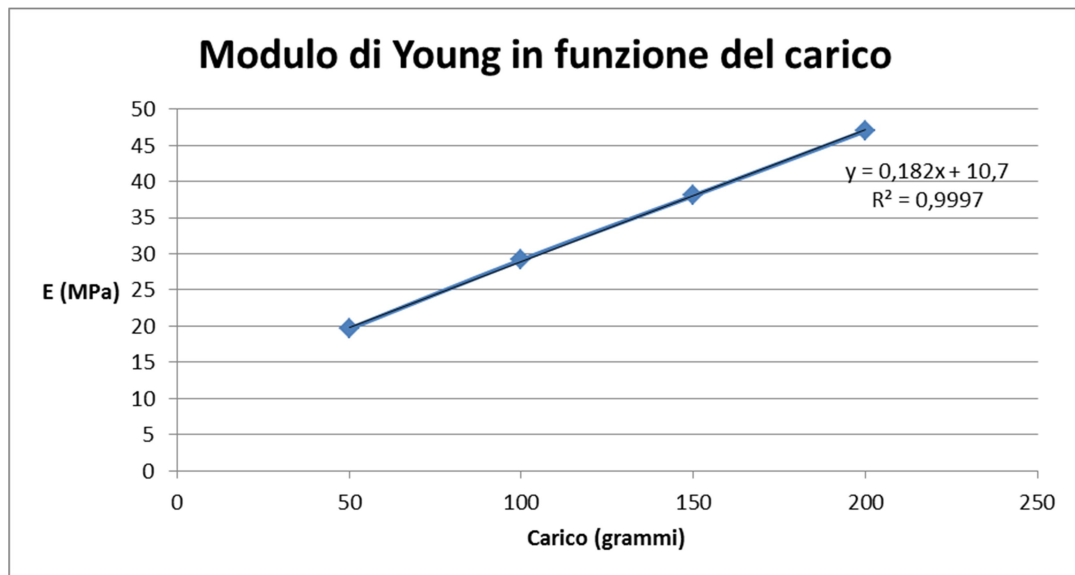


Figura 82 Modulo di Young in funzione del carico

Come per il K , si ottiene quindi un'equazione che definisce il valore di E da considerare per un generico carico C applicato:

$$E = 0,182 * C + 10,7 \quad (19)$$

Definiti K e E , è possibile tracciare la curva del recupero in funzione della snellezza per un attuatore di questo tipo per determinati carichi applicati.

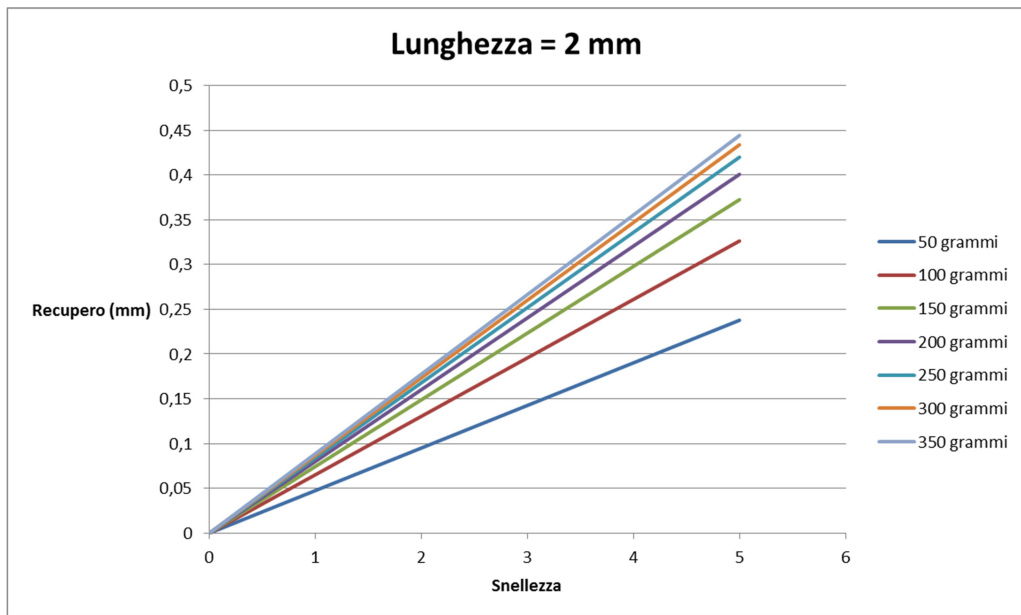


Figura 83 Recupero in funzione della snellezza

Si nota come, essendo il K che definisce la pendenza dipendente dalla lunghezza, questi diagrammi sono ciascuno legati ad un particolare valore di tale parametro.

Essendo la Snellezza definita come $S = \frac{L}{W}$, fissato il valore di L si può dire che questo grafico equivale ad un grafico avente sull'asse delle ascisse la larghezza della trave.

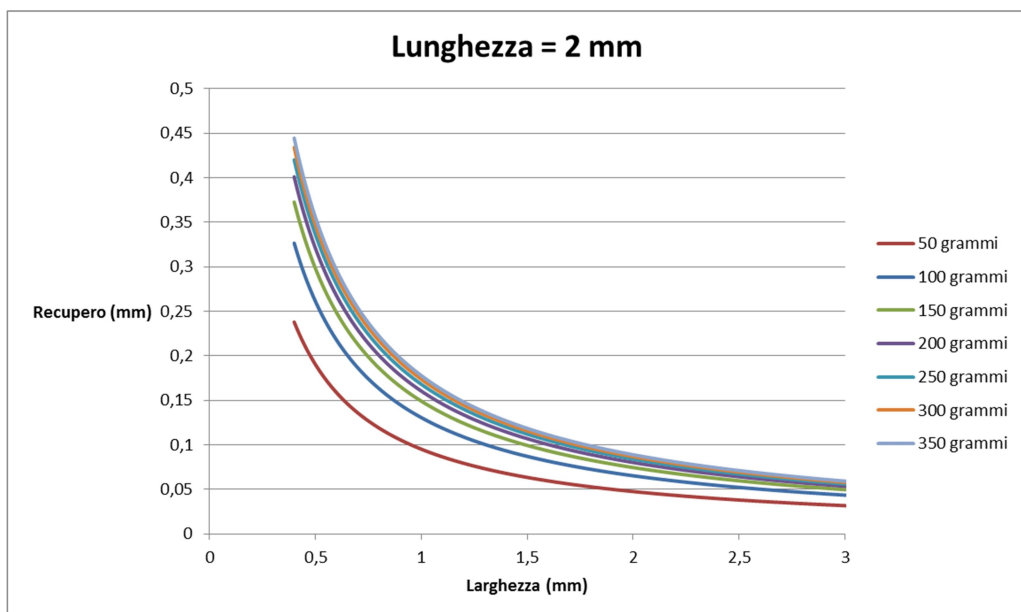


Figura 84 Recupero in funzione della larghezza

Come già specificato all'inizio del paragrafo, si intende applicare questo strumento per la progettazione di attuatori che abbiano dimensioni prossime a quelle testate, e quindi sfruttate per la realizzazione del modello stesso.

A tal proposito si è deciso di definire dei limiti ai range di lunghezza, larghezza e snellezza procedendo in questo modo:

- Limite inferiore del range pari al 30% in meno del minimo valore testato (ossia 2,0mm in lunghezza e 0,6mm in larghezza e 2,5 per la snellezza);
- Limite superiore del range pari al 30% in più del massimo valore testato (ossia 2,5mm in lunghezza e 1,0mm in larghezza e 3.33 per la snellezza).

Si ottengono così, arrotondando, i seguenti intervalli di applicabilità dello strumento:

Tabella 15 Intervalli di applicabilità del modello

	Limite Inferiore	Limite Superiore
Lunghezza (mm)	1,4	3,3
Larghezza (mm)	0,4	1,3
Snellezza	1,7	4,5

Come ultima considerazione si può ragionare sulle uniche dimensioni rimaste che siano eventualmente modificabili (sempre nell'ipotesi di mantenere la geometria attuale a stella a 5 bracci con corona esterna e di essere in condizione di film sottile), ossia i diametri del centro stella e della corona esterna. Riguardo a quest'ultima, dal momento che essa risulta sempre completamente incastrata, eventuali variazioni dimensionali non influenzano le prestazioni dell'attuatore (tant'è vero che nelle analisi FEM non veniva sottoposta ad affinamento). Anche per quanto riguarda il centro stella, le sue dimensioni non influenzano le prestazioni poiché se il carico è uniformemente distribuito su di esso, può essere assimilabile ad un corpo rigido e pertanto lo schema di vincolo del sistema sarà rappresentabile con un incastro tra trave e corona circolare e con un pattino tra trave e centro stella, pertanto le prestazioni dipendono unicamente dalle dimensioni della trave stessa.

3.4.2: Metodo di applicazione del nuovo strumento di simulazione e verifica delle sue prestazioni

Si supponga dunque di voler verificare le prestazioni di un ipotetico attuatore non ancora realizzato, i passi da seguire per l'utilizzo del modello sono:

- Scegliere i carichi che si vogliono testare;
- Tramite tali carichi, definire i valori del modulo di Young da adottare attraverso la formula $E = 0,182 * C + 10,7$;
- Si definiscono inoltre i valori di K corrispondenti a quel carico al variare della lunghezza grazie all'espressione $m_K = 0,0122 * L - 0.0055$, che definisce la pendenza di K ;
- Per le lunghezze considerate, si ricavano le pendenze m date dal rapporto tra K ed E .
- I valori di m consentono di tracciare il diagramma Recupero su Snellezza per tutte le lunghezze e per i carichi considerati.

Essendo tale metodo definito in modo preciso tramite formule matematiche, nel caso non si abbiano indicazioni sulle lunghezze e sui carichi da testare, è possibile testare tutti i valori di tali grandezze presenti in un determinato intervallo tramite un algoritmo iterativo ed eseguire successivamente un confronto per determinare quali siano le configurazioni più performanti.

Infine, per verificarne l'affidabilità, tale metodo è stato applicato alle configurazioni di attuatore di cui sono state svolte le prove sperimentali, ottenendo i seguenti risultati:

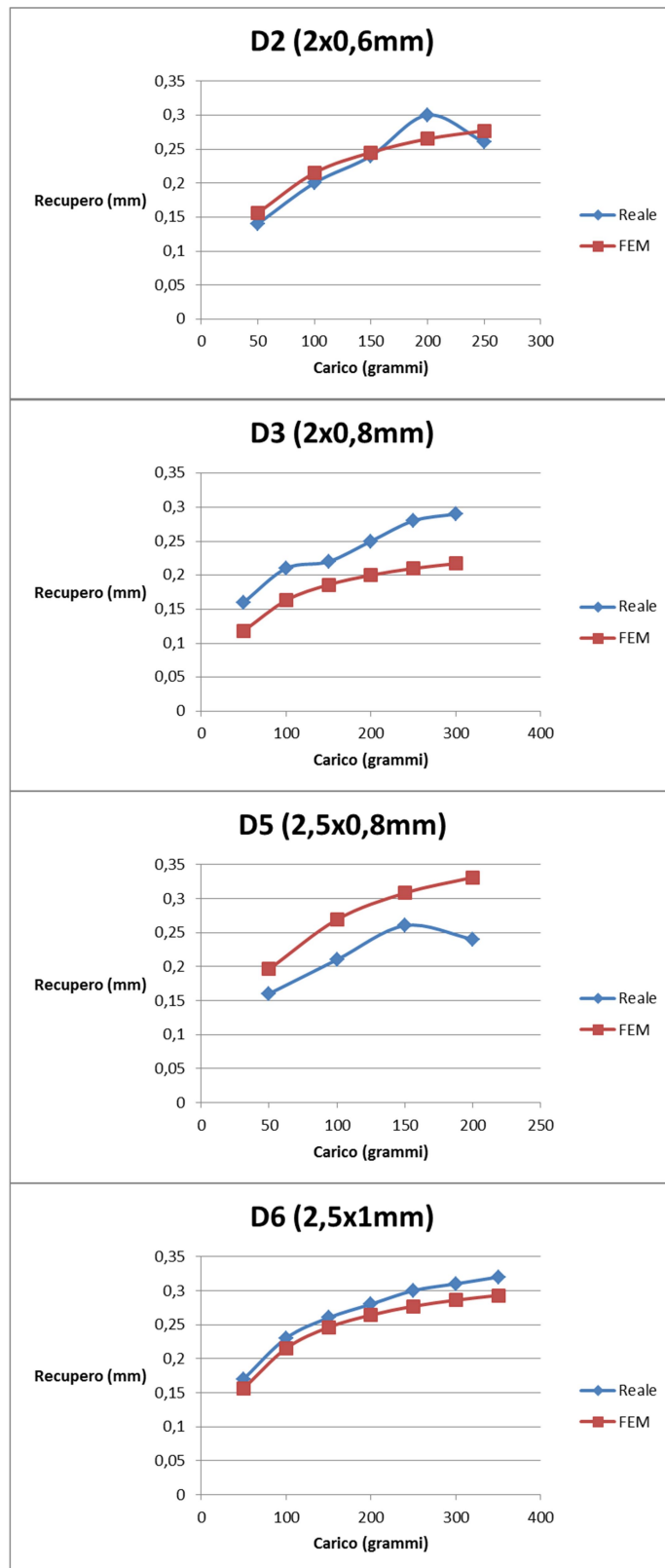


Figura 85 Confronto fra i risultati sperimentali ed il nuovo modello

Si nota come, per gli attuatori D2 e D6 il modello sia affidabile, con errori medi di stima del recupero inferiori al 10%. Per gli attuatori D3 e D5 si osserva invece come, pur modellando in modo fedele l'andamento in funzione del carico, del curve risultino traslate verticalmente, causando errori piuttosto elevati.

Tale problema è individuato nella natura del metodo utilizzato per definire il modello, ossia quello dei minimi quadrati.

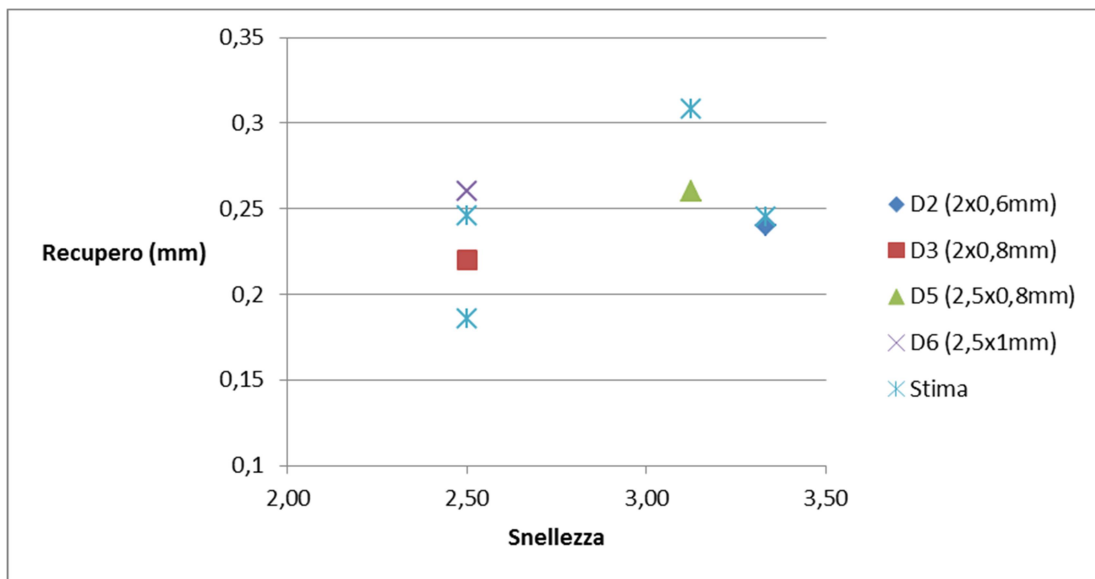


Figura 86 Differenze tra valori reali e stimati

Figura 86 evidenzia come il modulo di Young ottenuto minimizzando le differenze tra i valori sperimentali e quelli del FEM favorisca gli attuatori D2 e D6 penalizzando gli altri due.

Per avere un riscontro sull'effettiva utilità di questo nuovo strumento di dimensionamento, esso è stato sottoposto all'attenzione degli Ingegneri di Fluid-o-Tech che, consci dei limiti derivanti dalla semplicità del modello, l'hanno ritenuto utile ai fini di future fasi preliminari di dimensionamento di attuatori di questo genere atte a indirizzare le scelte progettuali. Tuttavia l'azienda stessa è consapevole del fatto che, allo stato attuale, per conoscere in modo dettagliato il reale comportamento di attuatori di questo tipo sono ancora necessarie prove sperimentali.

Capitolo 4: Validazione del modello e prototipazione di una valvola innovativa

Con il capitolo precedente è stato dimostrato come questo tipo di attuatore sia effettivamente in grado di fornire buone prestazioni, rendendolo quindi adatto allo sviluppo di una valvola innovativa che sia migliore di quelle già esistenti in termini di prestazioni, ingombri e consumo di energia.

In questa nuova parte del lavoro, sono due gli scopi principali:

- Validare i risultati ottenuti dall'Ing. Steiner.
- Fissare le basi per la prototipazione di un corpo valvola che sia in grado di sfruttare tale attuatore.

Con il primo punto si intende verificare quanto le prestazioni reali dell'attuatore, testato nelle stesse condizioni previste da Steiner, siano vicine a quelle simulate. Ciò consentirebbe di capire se il modello utilizzato per l'analisi (il modello di Souza - Auricchio implementato in Abaqus) rappresenta fedelmente il comportamento di un materiale di questo tipo con tali rapporti dimensionali, in modo tale da garantire la possibilità di effettuare nuove simulazioni su eventuali variazioni future della geometria.

Nel secondo punto invece si vuole realizzare un primo prototipo di valvola che implementi l'attuatore trattato in questo lavoro, in modo tale da avere dei riscontri su l'effettiva operatività di uno strumento di questo tipo nelle tipiche condizioni di esercizio. Questa parte del lavoro è stata svolta in Fluid-o-Tech, che per motivi di segretezza si riserva il diritto di non divulgare pubblicamente i dettagli tecnici di ciò che è stato ottenuto in ottica di una futura introduzione del componente sul mercato. L'azienda stessa ha tuttavia concesso la pubblicazione in questo elaborato di uno schema costruttivo non quotato, riportato nelle Figure 87 e 88.

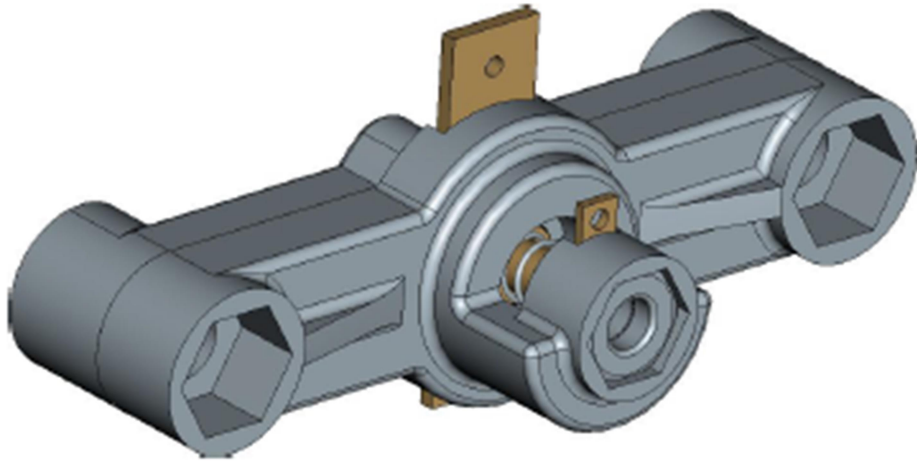
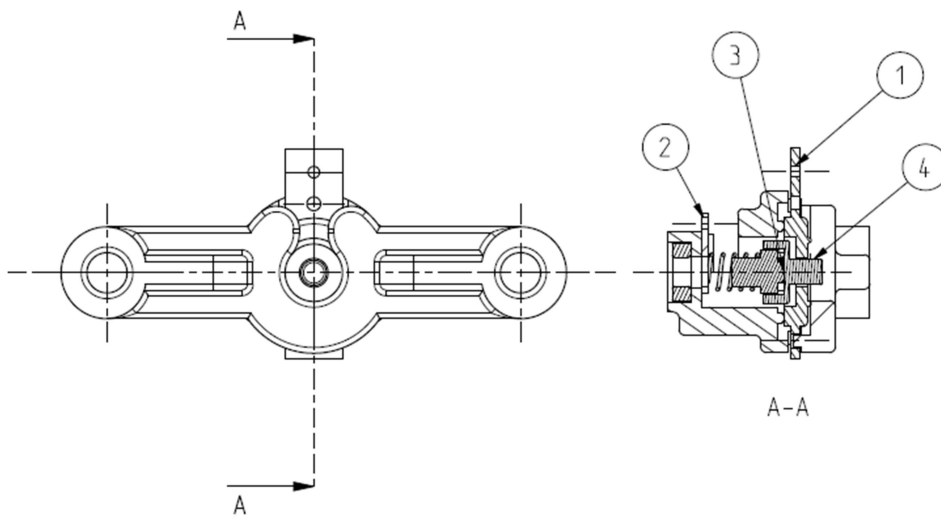


Figura 87 Rappresentazione CAD del prodotto finale



# componente	funzione
1	contatto elettrico
2	contatto elettrico
3	attuatore SMA
4	otturatore valvola

Figura 88 Vista in sezione del prodotto finale

4.1: Validazione del modello

L'obiettivo è dunque quello di svolgere delle prove che siano fedeli a quelle svolte nelle simulazioni in fase di progetto, in modo tale da ottenere risultati maggiormente confrontabili che consentano quindi di trarre delle conclusioni riguardo l'accuratezza del modello.

Si passa dunque alla definizione di un set-up adeguato alle nuove necessità, tale nuovo banco prova dovrà superare i limiti già trattati nel sottoparagrafo 3.3, e quindi essere in grado di:

- Generare una forza variabile nel tempo.
- Garantire un'adeguata lettura dell'initial displacement.
- Permettere un definizione dell'andamento del recupero in funzione dell'initial displacement.

Per quanto riguarda il primo punto, è ovvio che sfruttare una forza come la forza peso data da una opportuna massa consente unicamente un'applicazione costante nel tempo. È dunque necessario procedere con l'utilizzo di una molla in compressione opportunamente calibrata che agisca sul centro dell'attuatore, fornendogli una forza proporzionale alla compressione stessa e che a sua volta dipenderà dalla deformazione dell'attuatore.

Per la lettura adeguata dell'initial displacement si ricorre al puntamento diretto del sensore laser sul centro dell'attuatore, sul lato non ingombrato dalla molla. Per fare ciò è richiesta la progettazione di un banco prova adeguato, in quanto essendo il laser in dotazione a triangolazione, non è in grado di passare attraverso luci troppo strette e lunghe. Tale laser risulta invece adeguato in termini di dimensioni dello spot, in quanto esso è minore del centro dell'attuatore.

Infine per la definizione di un rapporto recupero su initial displacement, si intende realizzare un sistema in cui la molla a compressione agente sull'attuatore sia collegata ad una vite filettata. In questo modo stringendo o allentando la vite si è in grado di aumentare o diminuire il grado di compressione della molla, che quindi modifica la forza agente sull'attuatore nelle condizioni iniziali, ossia l'initial displacement.

Per quanto riguarda invece il metodo di riscaldamento dell'attuatore in grado di consentire il cambiamento di fase si sfrutta il passaggio di corrente tramite la molla attraverso l'attuatore poiché, come già citato, questa soluzione è la più praticabile ed è già sfruttata nelle valvole che prevedono attuatori SMA a filo.

Una versione schematizzata del set-up che si intende realizzare è mostrato in Figura 89 in cui si ha l'applicazione dell'initial displacement desiderato tramite vite.

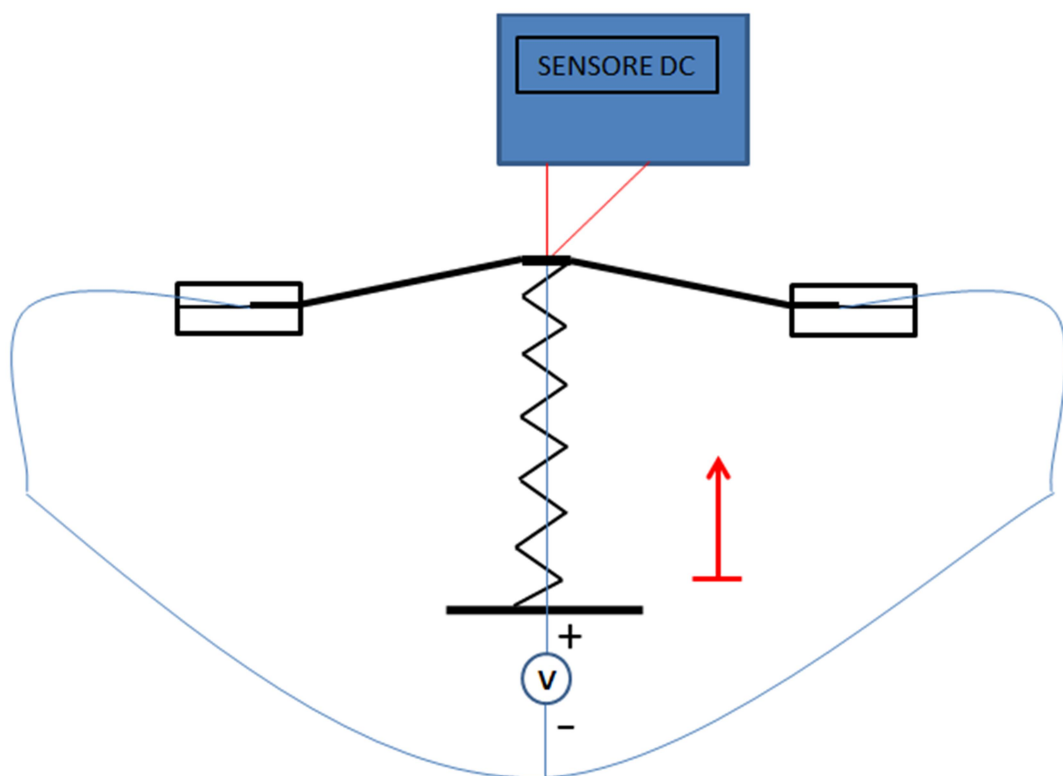


Figura 89 Schema del set-up nella configurazione iniziale

In tale schema riportato in Figura si può notare l'attuatore vincolato tramite incastro su tutta la corona circolare esterna, la molla che agisce al centro dello stesso e sulla vite che viene utilizzata per determinare il grado di compressione iniziale. Viene inoltre riportato in blu lo schema elettrico scelto per riscaldare l'attuatore.

In Figura 90 si ha invece lo schema che raffigura il recupero di deformazione in seguito al riscaldamento che porta la molla ad impaccarsi e aumentare la forza agente sull'attuatore.

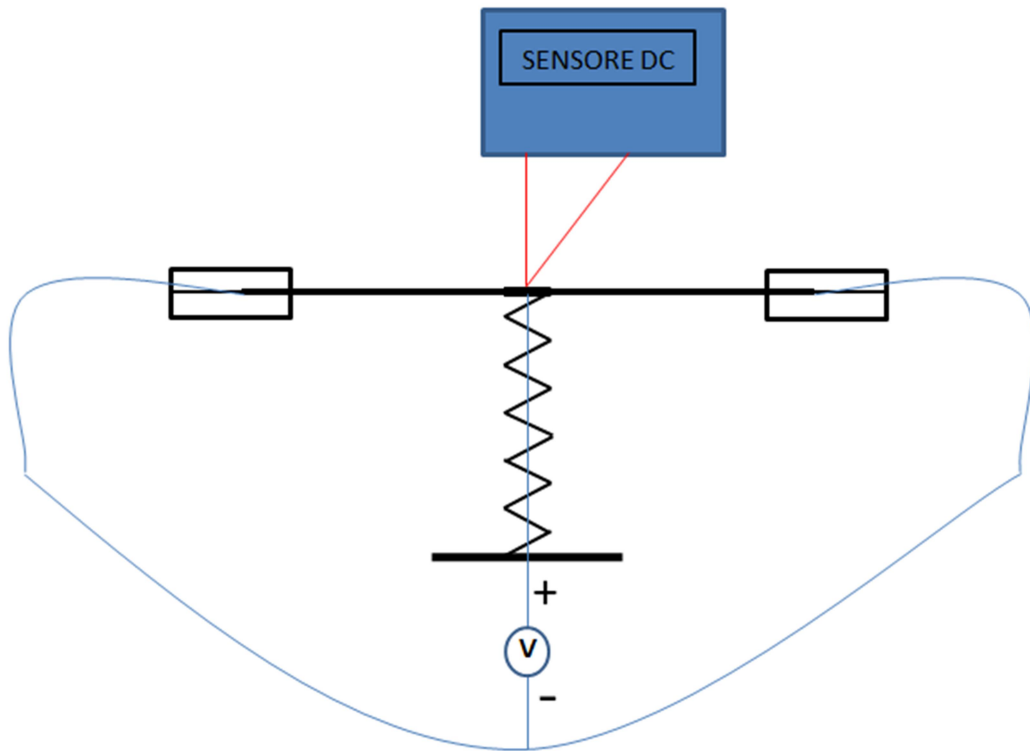


Figura 90 Schema del set-up dopo il riscaldamento

4.1.1: Scelta della molla e del collegamento elettrico

All'interno di questo nuovo banco prova la molla gioca un ruolo fondamentale, è pertanto necessario che essa sia scelta adeguatamente. I requisiti che essa deve soddisfare sono:

- Dimensioni compatibili con l'applicazione
 - Diametro inferiore del centro dell'attuatore
 - Differenza tra lunghezza libera e lunghezza a blocco maggiore del recupero dell'attuatore.
- Rigidezza della molla sufficiente a imporre le deformazioni richieste all'attuatore.

Sono stati dunque svolti alcuni ragionamenti sulle forze e gli spostamenti in gioco atti ad indirizzare la scelta della molla adeguata.

È noto che, collegando la molla all'attuatore, si avrà che da quel momento in poi a parità di posizione dell'estremità della molla collegata alla vite, vale:

$$\Delta L = R \quad (20)$$

Con ΔL variazione di lunghezza della molla e R recupero dell'attuatore. Sapendo che la forza elastica in funzione dell'impaccamento della molla è definita come:

$$F = k * \Delta L \quad (21)$$

Si può scrivere, per questo caso:

$$\Delta F = k * R \quad (22)$$

Come valori indicativi per un primo tentativo, si sceglie di utilizzare i valori ottenuti nelle simulazioni di Steiner, in cui ad un recupero di circa 0,225mm corrispondeva una variazione di forza tra le due fasi pari a 0,7N. Andando a sostituire tali valori nella formula, si ottiene:

$$0,7N = k * 0,225mm \implies k \approx 3,1 \frac{N}{mm} \quad (23)$$

A questo si è passati a consultare il catalogo di un fornitore quale Associated Spring SPEC [18] per la scelta della molla.

Per la ricerca sul catalogo, si è impostato che il diametro esterno della molla fosse compreso tra 1mm (limite inferiore del fornitore) e 2mm (limite massimo per l'applicazione) e si sono poi ordinati i risultati in base alla rigidezza della molla.

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 91: per ogni molla, sono elencati il diametro esterno D_0 , il diametro del filo d , la lunghezza libera L_0 , la lunghezza L_1 data da un carico P_1 , la lunghezza a blocco Sh (*Solid Height*) e la rigidezza R .


Part Number	CAD	\hat{D}_0 (mm)	\hat{d} (mm)	\hat{L}_0 (mm)	\hat{L}_1 (mm)	\hat{Sh} (mm)	\hat{P}_1 (N)	\hat{R} (N/mm)	Qty / Price
D20600		1.92	0.32	3.10	2.30	2.08	5.47	6.55	1 ADD
D20350		1.45	0.25	2.40	1.80	1.63	3.42	5.79	1 ADD
D20610		1.92	0.32	4.40	3.10	2.72	5.47	4.17	1 ADD
D20100		1.20	0.20	2.00	1.40	1.30	2.14	4.09	1 ADD
D20360		1.45	0.25	3.30	2.40	2.13	3.42	3.68	1 ADD
D20620		1.92	0.32	6.30	4.20	3.68	5.47	2.70	1 ADD
D20110		1.20	0.20	2.70	1.90	1.70	2.14	2.60	1 ADD
D20400		1.85	0.25	3.00	1.80	1.63	2.81	2.44	1 ADD
D20370		1.45	0.25	4.70	3.30	2.88	3.42	2.38	1 ADD
D20150		1.40	0.20	2.30	1.50	1.30	1.89	2.36	1 ADD

Figura 91 Catalogo con i risultati ottenuti dalla ricerca [18]

Si noti che in tale catalogo la rigidezza della molla viene indicata con R , mentre in questa trattazione era stata definita come k , essendo già R il recupero dell'attuatore.

I vari parametri elencati sono inoltre mostrati in forma schematica in Figura 92.

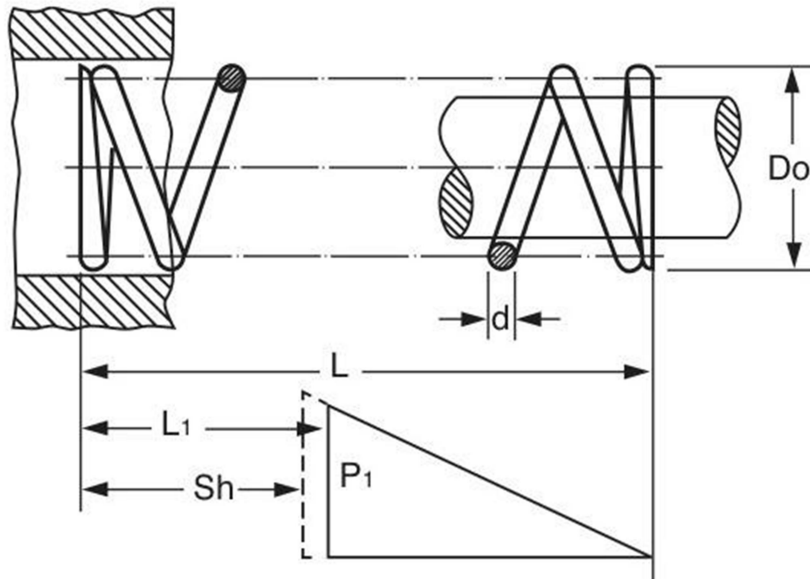


Figura 92 Definizione dei parametri riportati a catalogo [18]

Partendo dal valore di rigidità calcolato di 3,1N/mm, si nota che il valore più vicino a catalogo corrisponde a 2,7N/mm, corrispondente alla molla D20620.

Part Number	CAD	\hat{D}_0 (mm)	\hat{d} (mm)	\hat{L}_0 (mm)	\hat{L}_1 (mm)	\hat{Sh} (mm)	\hat{P}_1 (N)	\hat{R} (N/mm)
D20620		1.92	0.32	6.30	4.20	3.68	5.47	2.70

Figura 93 Molla scelta [18]

Si vuole ora verificare che le deformazioni della molla siano compatibili con i valori di recupero espressi dall'attuatore, per fare ciò ci si basa sulla forza massima utilizzata nelle prove sperimentali con il vapore, approssimata a 3,5N, e si verifica che la deformazione data da tale forza non superi il valore massimo di deformazione consentito dalla molla.

$$F_{Max} = 3,5N = k * \Delta L \quad (24)$$

$$\Delta L = \frac{3,5N}{2,70 \frac{N}{mm}} = 1,30mm < \Delta L_{Max} = L_0 - Sh = 2,62mm \quad (25)$$

Essendo il vincolo rispettato, è confermata la scelta della molla di primo tentativo.

Il passo successivo è quello di definire il collegamento elettrico che fornirà l'alimentazione. Come già citato, verrà condotta della corrente elettrica attraverso l'attuatore in modo da provocarne il riscaldamento sfruttando l'effetto Joule, tale corrente sarà fornita da un alimentatore pilotato in tensione e raggiungerà l'attuatore passando attraverso la molla.

È necessario conoscere la resistenza elettrica sia dell'attuatore che della molla per verificare la necessità di inserire ulteriori resistenze nel circuito. Per quanto riguarda la resistenza dell'attuatore, essa era già stata testata nella fase del lavoro descritta nel sottoparagrafo 2.2.2 ed era risultata trascurabile. Agendo in modo analogo sulla molla, si è verificato che anche essa risulta di resistenza trascurabile, pertanto è necessario inserire delle resistenze in serie nel circuito. Nel sottoparagrafo 2.2.2 si era inoltre verificato che una corrente pari a 170 mA è sufficiente a garantire l'attivazione del comportamento a memoria di forma nell'attuatore con una certa prontezza, pertanto si può prevedere, per esempio, di sfruttare due resistenze in serie da 55Ω , rendendo quindi necessario imporre una tensione pari a 18,7V.

4.1.2: Progettazione del nuovo banco prova

Partendo dalle considerazioni fatte nel paragrafo precedente, si è passati alla progettazione di un banco prova in grado di soddisfare le esigenze elencate.

Durante lo studio, si è tenuto conto della possibilità di realizzare tale banco tramite stampante 3D, in tale modo si avrebbe anche il vantaggio di avere la sede dell'attuatore isolata elettricamente. Per questo motivo si è seguita una progettazione che rendesse il più semplice possibile la realizzazione e l'assemblaggio delle varie parti.

Le parti realizzate sono tre:

- Una prima in cui è presente l'alloggiamento dell'attuatore. (Figura 94)
- Una seconda parte che funge da coperchio che va in battuta sull'attuatore per tenerlo in posizione. (Figura 95)
- Una vite filettata a cui fissare la molla.

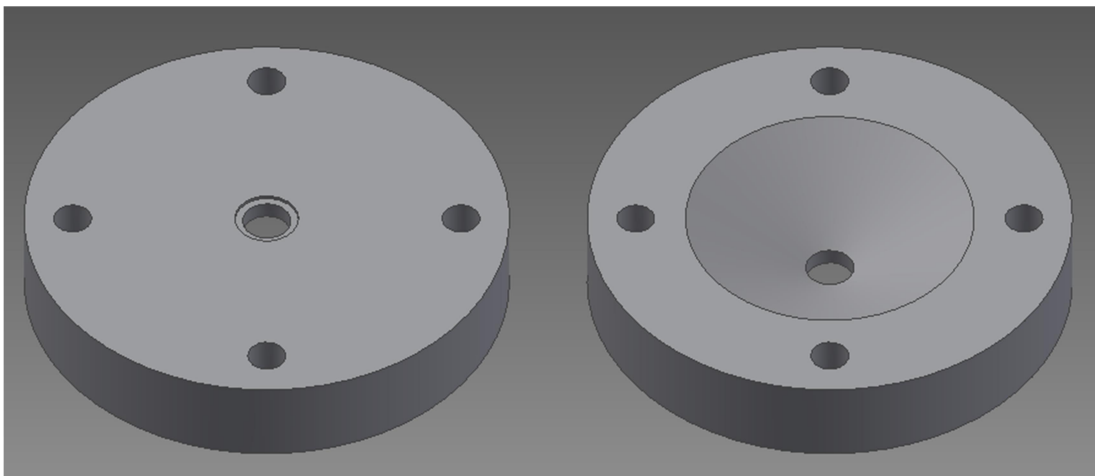


Figura 94 Alloggiamento dell'attuatore

Nella prima parte, oltre alla sede dell'attuatore, è presente uno svasso per consentire il puntamento diretto del sensore di misura sull'attuatore senza che il corpo del banco interferisca. Il foro centrale deve essere esattamente dello stesso diametro dell'interno della corona circolare esterna dell'attuatore, per consentire il completo movimento delle travi. Può dunque rendersi necessario, in caso si volessero testare

attuatori con travi di lunghezze diverse, realizzare diverse versioni di questa parte, i cui varia la dimensione del foro.

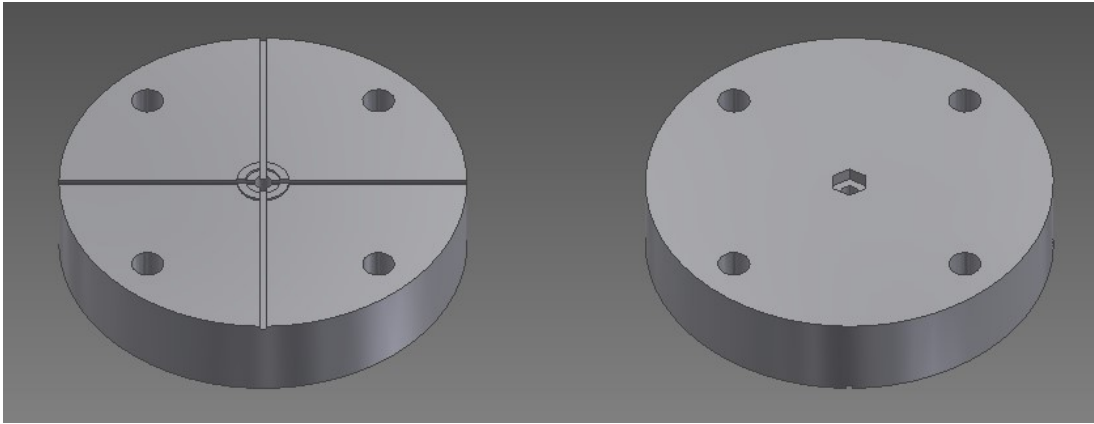


Figura 95 Coperchio del banco prova

Il coperchio presenta su un lato una corona circolare progettata per andare in battuta sull'attuatore e tenerlo in posizione e quattro scavi attraverso cui far arrivare i contatti elettrici all'attuatore, mentre sull'altro lato è presente uno scavo forato in cui andrà alloggiato, e successivamente fissato tramite incollaggio o saldatura, l'apposito dado della vite di regolazione che andrà a precaricare la molla. Molla e vite sono fissate tra loro tramite incollaggio, sfruttando il fatto che le estremità della molla siano appositamente fresate, come visibile in Figura 92.

In particolare è previsto l'utilizzo di una vite di regolazione M3x0,5 fornite dal catalogo online MiSUMi [19]. Questo tipo di vite è appositamente realizzato per garantire resistenza allo svitamento accidentale sfruttando una filettatura più profonda dello standard tale da aumentare la superficie di contatto tra dado e vite e quindi generare maggior attrito.

Una visione di insieme viene fornita in Figura 96, in cui si ha il banco prova assemblato con anche il sensore di misura opportunamente posizionato. Il corpo del banco prova viene sorretto da due colonne in modo da garantire la possibilità di agire manualmente sulla vite, il sensore di misura è puntato dall'alto verso il basso sul centro dell'attuatore.

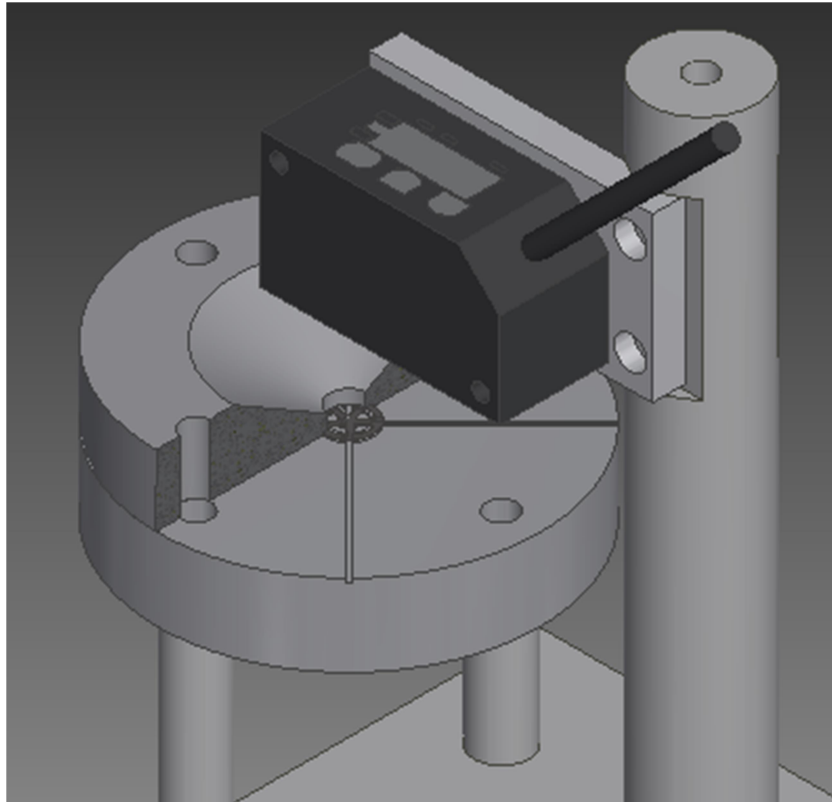


Figura 96 Visione d'insieme del nuovo banco prova

Un dettaglio dell'alloggiamento dell'attuatore è fornito in Figura 97, in cui si può meglio osservare il collegamento fra attuatore, molla e vite filettata.

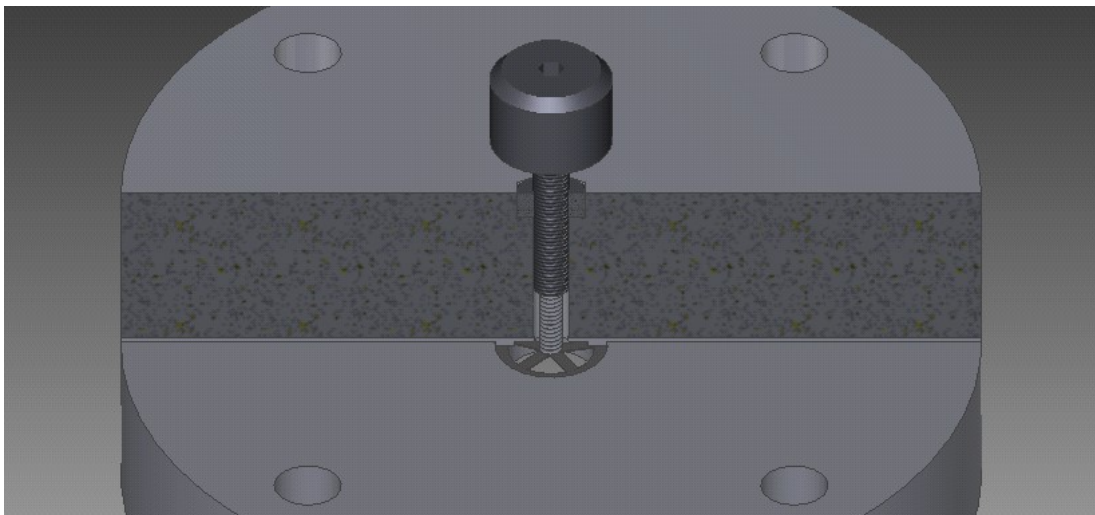


Figura 97 Dettaglio della vite filettata e della molla

Sapendo che la filettatura applicata alla vite è di tipo M3 con passo pari a 0,5mm, è possibile graduare il sistema in modo da tenere traccia del precarico imposto. Si può inoltre pensare di inserire una slitta nanometrica alla base della colonna che sostiene il sensore per rendere più preciso il posizionamento dello spot laser. Infine, per quanto riguarda il passaggio di corrente, essendo la vite in acciaio è possibile sfruttarla come conduttore elettrico per chiudere il circuito.

Questo strumento non è stato tuttavia ancora utilizzato poiché, come già spiegato all'inizio del Capitolo 4, Fluid-o-Tech ha preferito procedere con la prototipazione di una valvola basandosi sulle indicazioni ricevute dai test svolti con il vapore.

Il nuovo banco prova rimane a disposizione nel caso si vogliano realizzare studi futuri volti alla validazione del modello analitico implementato dall'Ing. Steiner. L'utilità di questi studi risiede nella possibilità di avere un modello che sia in grado di riprodurre fedelmente il comportamento di un film sottile di un materiale a memoria di forma, in modo da poter estendere gli studi a geometrie completamente differenti volte ad essere utilizzate anche in applicazioni di altri settori.

Capitolo 5: Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di testare il comportamento di una serie di attuatori costituiti da film sottili in materiale a memoria di forma, realizzati per deposizione. I risultati ottenuti vogliono essere utilizzati sia per implementare questo tipo di attuatori per la prima volta all'interno di una elettrovalvola, realizzando quindi un prototipo innovativo non presente sul mercato, sia per indirizzare eventuali studi futuri in campo fluidodinamico e non.

Per fare ciò è stata necessaria una lunga fase di messa a punto di un set-up sperimentale adeguato a misurare il reale comportamento delle varie configurazioni dell'attuatore. È stato frutto di una combinazione tra l'utilizzo degli strumenti di innovazione sistematica, appresi nel corso degli studi, ed una fase di "try&error" durante la realizzazione delle varie prove. In particolare, lo strumento di innovazione sistematica al centro del nostro processo di messa a punto, è stato la *Rete di Problemi*. Essa ci ha permesso di formulare una serie di ipotesi di messa a punto volte a risolvere le maggiori criticità del sistema (Soluzioni Parziali) e di associare ad esse i nuovi problemi generati (Problemi)

Si è quindi partiti da un semplice bilanciere appeso all'attuatore tramite un filo e riscaldato con un termosoffiatore industriale da cui si è potuto constatare l'effettivo comportamento SME senza però avere alcuna idea dell'effettiva entità del recupero a causa dei fenomeni di instabilità del bilanciere e di stiramento delle fibre del filo. I problemi legati all'elevata inerzia termica del banco hanno quindi portato a variare il metodo di riscaldamento e ad utilizzare dunque una resistenza a filo avvolta attorno alle 5 travi dell'attuatore. Tale soluzione si è dimostrata però inefficace in quanto portava ad un surriscaldamento locale della trave senza renderlo uniforme. Nel frattempo si è anche passati ad un cambio del metodo di carico, è stata infatti progettata e successivamente realizzata una bilancia a due piatti, una soluzione molto efficace in grado di eliminare ogni problema di sbilanciamento e non uniformità del carico, oltre che facilitare la lettura degli spostamenti. Questo è stato possibile grazie ad una separazione spaziale tra la zona di attuazione e il punto di lettura degli spostamenti.

Come ultimo e definitivo accorgimento è stato utilizzato come mezzo di riscaldamento del vapor saturo a 130°C che ha permesso di avere un'efficienza di riscaldamento elevatissima togliendo ogni dubbio sull'effettivo raggiungimento della temperatura di transizione.

Una volta definita quindi la configurazione finale per le prove, è stata fatta una campagna sperimentale atta ad identificare i massimi valori di recupero ottenibili per ogni tipo di attuatore. I risultati di tale campagna, visibili in Tabella 16, hanno dimostrato come questi attuatori siano in grado, in seguito al passaggio di fase, di generare forze molto elevate (nell'ordine dei 3,5N) il che li identifica come potenziali candidati per l'attuazione di una valvola in cui bisogna tener conto sia della forza necessaria all'attuazione che a quella necessaria per la tenuta idraulica.

Tabella 16 Risultati finali

		Snellezza	Recupero massimo (μm)	Carico (g)
Attuatori	D2 (2x0,6mm)	3,33	300	189,26
	D3 (2x0,8mm)	2,50	290	282,5
	D5 (2,5x0,8mm)	3,13	260	140,62
	D6 (2,5x1mm)	2,50	320	329,34

In particolare si è notato come il coefficiente di snellezza (rapporto tra lunghezza e larghezza della trave) influisca molto sull'andamento del recupero privilegiando un attuatore più rigido su uno più snello. Anche la semplice lunghezza della trave ha una discreta influenza sui dati, si nota infatti che il recupero aumenta al diminuire della lunghezza.

Una volta analizzati i dati, il lavoro ha preso due direzioni differenti:

1. Il confronto tra i dati sperimentali e le prove agli elementi finiti ha avuto un doppio ruolo all'interno di questa trattazione:
 - Dal confronto con le simulazioni FEM semplificate realizzate è stato tratto un semplice strumento in grado di stimare il recupero atteso di un attuatore di geometria simile alla nostra, al variare della snellezza dello stesso;
 - Il confronto con le simulazioni dell'Ing. Steiner è stato invece reso poco significativo dal differente metodo di prova utilizzato dello stesso. Ciò ha messo in evidenza la necessità di realizzare un nuovo

semplice banco prova volto a rendere le prove reali più simili a quelle simulate in modo da poter avere un confronto diretto.

2. La realizzazione di un nuovo corpo valvola ha invece permesso il lancio sul mercato di un prodotto dalle elevate prestazioni e dai bassi consumi energetici.

Per concludere, in questo lavoro è stato quindi dimostrato, attraverso una serie di prove sperimentali, come un film sottile ottenuto per deposizione e realizzato in lega a memoria di forma, sia adatto a fungere da attuatore in una valvola innovativa dalle elevate prestazioni. Le caratteristiche dettagliate di tale nuovo strumento non sono riportate integralmente in questo lavoro in quanto Fluid-o-Tech ha preferito mantenere una riservatezza industriale sull'argomento. Una messa in tavola dimostrativa di ciò che è stato realizzato è fornita in Figura 98

In particolare i risultati ottenuti hanno avuto un'importanza rilevante per F-Lab, sezione R&D di Fluid-o-Tech, che ha confermato la possibilità di aprire le porte ad un salto innovativo nel campo delle microvalvole. È inoltre stato realizzato un semplice strumento in grado di dimensionare facilmente attuatori aventi la stessa geometria di quelli studiati ma dimensioni della trave diverse. Grazie ad esso si può definire quale sia il tipo di attuatore migliore a seconda delle prestazioni richieste. Questo strumento è stato presentato all'azienda la quale ne ha riconosciuto l'utilizzabilità per effettuare dimensionamenti preliminari.

Il nuovo banco prova che è stato ideato può rivelarsi utile per la validazione del modello analitico utilizzato per queste simulazioni. Ciò aprirebbe a nuovi scenari di sviluppo per quanto riguarda l'attuazione tramite sottili film SMA, anche in ambiti diversi da quelli microfluidici.

Per questo motivo, se da un lato la parte di progettazione e produzione di valvole innovative è ora interamente in mano all'azienda, dall'altro lato tale validazione potrebbe creare lo spazio per nuove ricerche universitarie.

Bibliografia e Sitografia

- [1] C. B. Steiner, *Design of an innovative shape memory actuator for fluidic applications*, Milano, 2015.
- [2] A. Rao, A. Srinivasa e J. Reddy, *Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuator*, Springer, 2015.
- [3] «SmartLab - Detailed introduction to Shape Memory Alloys,» [Online]. Available: <http://smart.tamu.edu/overview/smaintro/detailed/detailed.html>.
- [4] «Wikiwand - Shape-Memory Alloy,» [Online]. Available: http://www.wikiwand.com/en/Shape-memory_alloy.
- [5] C. Megnin e M. Kohl, «Shape Memory Alloy microvalves for a fluidic control system,» *Journal of micromechanics and microengineering*, n. 24, 2013.
- [6] M. Kabla, H. Seiner, M. L. M. Musilova e D. Shilo, «The relationship between sputter deposition conditions, grain size, and phase transformation temperature in NiTi thin films,» *Acta Materialia*, n. 70, pp. 79-91, 2014.
- [7] A. Kumar, D. Singh e D. Kaur, «Grain size effect on structural, electrical and mechanical properties of NiTi thin films deposited by magnetron co-sputtering,» *Surface & coating technology*, n. 203, pp. 1596-1603, 2009.
- [8] A. Kumar, D. Singh e D. Kaur, «Variation in phase transformation paths of NiTi films as a function of film thickness,» *Sensors and actuators A: Physical*, vol. 178, pp. 57-63, 2012.
- [9] B. Winzek, S. Schmitz, H. Rumpf, T. Sterzl, R. Hassdorf, S. Thienhaus, J. Feydt, M. Moske e E. Quandt, «Recent developments in shape memory thin film

- technology,» *Materials science & engineering A*, n. 378, pp. 40-46, 2004.
- [10] W. L. Benard, H. Kahn, A. H. Heuer e M. A. Huff, «Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps,» *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 7, n. 2, pp. 245-251, 1998.
- [11] M. Kohl, D. Dittmann, E. Quandt, B. Winzek, S. Miyazaki e D. Allen, «Shape memory microvalves based on thin films or rolled sheets,» *Materials science and engineering*, pp. 784-788, 1999.
- [12] F. Auricchio e L. Petrini, «A three-dimensional model describing stress-temperature induced solid phase transformation: solution algorithm and boundary value problems,» *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING*, 2004.
- [13] «ABAQUS User's Manual,» 2004.
- [14] *Rotex Catalogue, Fluid Control System*, 2014.
- [15] G. Cascini, *Slides della lezione "Problem Flow Network" del corso di Metodi e Strumenti per l'Innovazione Sistemica*, Milano, 2008.
- [16] G. Cascini, *Slides della lezione "Functional Modeling" del corso di Metodi e Strumenti per l'Innovazione Sistemica*, Milano, 2008.
- [17] Autodesk, «Autodesk Inventor 2015 - Guida».
- [18] A. S. SPEC, «Compression Springs Stainless Steel,» [Online]. Available: <http://www.assocspring.co.uk>.
- [19] «MiSUMi,» [Online]. Available: <http://it.misumi-ec.com>.

Appendice

Appendice A

Specifiche del sensore HG-C 1050-P.

NPN output	HG-C1030	HG-C1050	HG-C1100
PNP output	HG-C1030-P	HG-C1050-P	HG-C1100-P
Applicable standards	Conforming to EMC Directive and FDA Standard		
Measurement center distance	30mm	50mm	100mm
Measuring range	±5mm	±15mm	±35mm
Repeatability	10µm	30µm	70µm
Linearity	±0.1% F.S.		
Beam diameter	Approx. 50µm	Approx. 70µm	Approx. 120µm
Supply voltage	12 to 24V DC ±10% including ripple max. 10% (P-P)		
Control output	PNP or NPN open-collector transistor		
Output operation	Either Light-ON or Dark-ON		
Short-circuit protection	Incorporated (auto-reset)		
Analog output	Voltage output: 0 to 5V (at alarm: +5.2V) Output impedance: 100Ω		
Response time	Switchable between high speed (1.5ms), standard (5ms), and high precision (10ms)		
Degree of protection	IP67 (IEC)		
Ambient temperature	-10 to +45°C (no dew condensation or icing allowed), storage: -20 to +60°C		
Ambient humidity	35 to 85% RH, storage: 35 to 85% RH		
Ambient illumination	3000lx max. (illumination level of light receiving surface under incandescent light)		
Cable	5-core cable, 2m long		
Material	Casing: aluminum die-cast, front cover: acrylic		

Appendice B

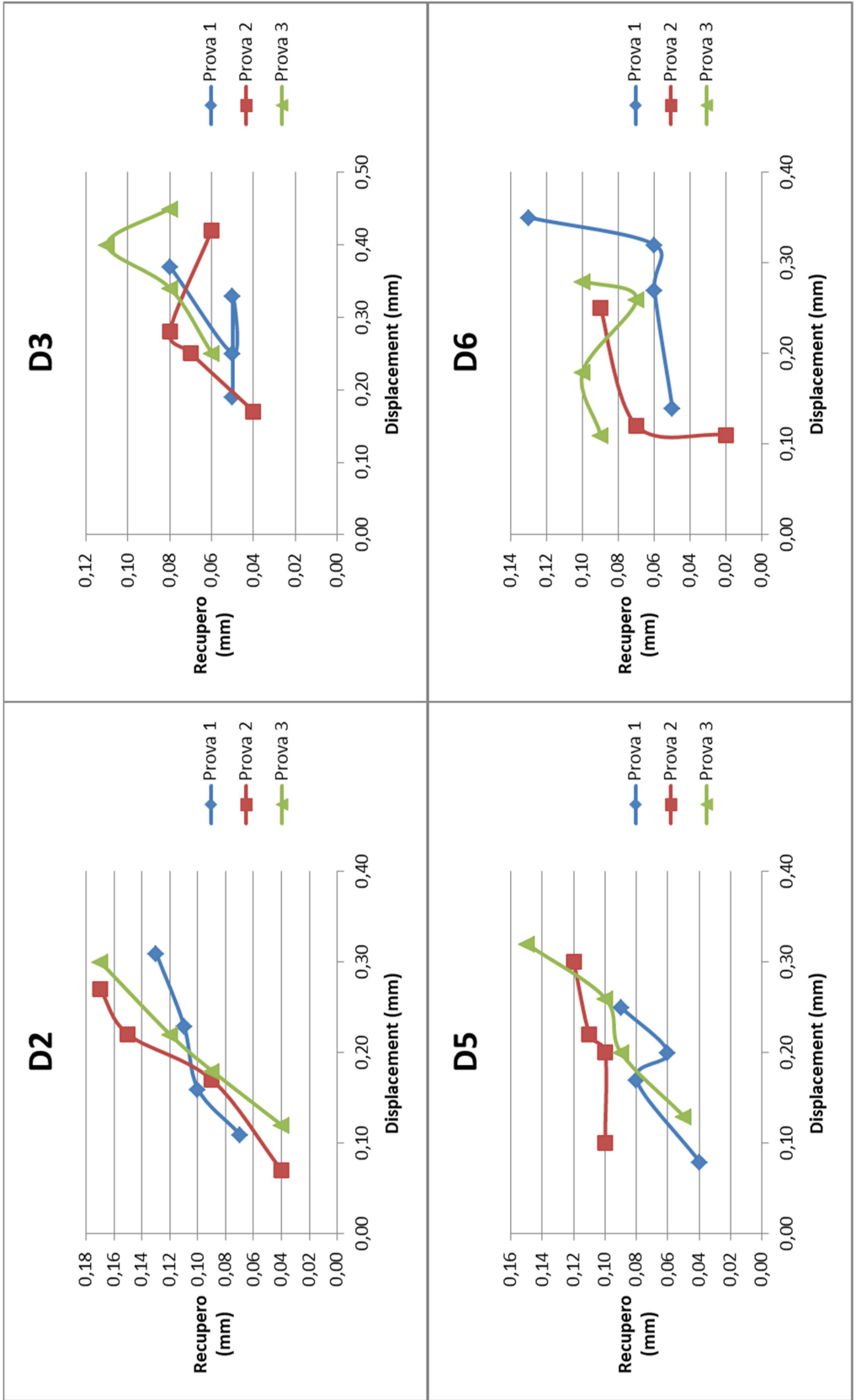
Risultati della prima prova sperimentale.

Campagna sperimentale con phon a intermittenza																																			
T Phon	250°C	t di accensione														t di spegnimento																			
Portata Phon	5x																																		
		Tempo		00:00:00		00:00:40		00:01:20		00:02:00		00:02:40		00:03:20		00:04:00		00:04:40		00:05:20		00:06:00		00:06:40		00:07:20		00:08:00		00:08:40		00:09:20		00:10:00	
Configurazione	SMA D3	Peso (g)	Spostamento (mm)	93,51	S centrato (mm)	0,00	-0,18	-0,28	-0,24	-0,24	-0,24	-0,34	-0,27	-0,37	-0,26	-0,41	-0,37	-0,29	-0,29	-0,39	-0,39	-0,31	-0,41	-0,32	-0,41	-0,32	-0,41	-0,32	-0,41	-0,32	-0,41	-0,32	-0,41	-0,33	
Configurazione	SMA D2	Peso (g)	Spostamento (mm)	-1,14	-1,36	-1,51	-1,38	-1,24	-1,40	-1,54	-1,40	-1,43	-1,55	-1,44	-1,55	-1,44	-1,55	-1,48	-1,56	-1,48	-1,55	-1,44	-1,55	-1,48	-1,56	-1,48	-1,56	-1,45	-1,56	-1,45	-1,56	-1,45	-1,56	-1,45	
Configurazione	SMA D6	Peso (g)	Spostamento (mm)	0,38	0,15	0,14	0,03	-0,10	-0,01	-0,13	-0,03	-0,03	-0,15	-0,05	-0,15	-0,06	-0,16	-0,07	-0,16	-0,06	-0,15	-0,06	-0,16	-0,07	-0,16	-0,07	-0,16	-0,08	-0,16	-0,07	-0,16	-0,08	-0,16	-0,08	
Configurazione	SMA D5	Peso (g)	Spostamento (mm)	-1,48	-1,55	-1,55	-1,63	-1,56	-1,64	-1,56	-1,64	-1,58	-1,65	-1,58	-1,65	-1,58	-1,65	-1,58	-1,65	-1,58	-1,65	-1,58	-1,65	-1,58	-1,65	-1,58	-1,65	-1,59	-1,66	-1,59	-1,66	-1,59	-1,66	-1,59	
Configurazione	SMA D2	Peso (g)	Spostamento (mm)	-1,44	-1,59	-1,70	-1,62	-1,72	-1,64	-1,75	-1,64	-1,75	-1,64	-1,74	-1,64	-1,76	-1,67	-1,76	-1,67	-1,76	-1,67	-1,76	-1,67	-1,76	-1,67	-1,76	-1,68	-1,76	-1,68	-1,76	-1,67	-1,76	-1,68	-1,76	
Configurazione	SMA D5	Peso (g)	Spostamento (mm)	-2,24	-2,36	-2,37	-2,45	-2,58	-2,50	-2,61	-2,53	-2,62	-2,56	-2,64	-2,56	-2,64	-2,57	-2,65	-2,57	-2,65	-2,57	-2,65	-2,57	-2,65	-2,58	-2,65	-2,58	-2,65	-2,58	-2,65	-2,58	-2,65	-2,59	-2,65	
Configurazione	SMA D6	Peso (g)	Spostamento (mm)	-0,36	-0,41	-0,41	-0,45	-0,59	-0,48	-0,63	-0,53	-0,63	-0,55	-0,65	-0,55	-0,65	-0,57	-0,66	-0,57	-0,66	-0,57	-0,66	-0,57	-0,66	-0,58	-0,66	-0,58	-0,66	-0,58	-0,66	-0,58	-0,66	-0,59	-0,66	
Configurazione	SMA D2	Peso (g)	Spostamento (mm)	-1,05	-1,13	-1,19	-1,16	-1,24	-1,18	-1,26	-1,20	-1,27	-1,21	-1,28	-1,21	-1,28	-1,20	-1,29	-1,21	-1,28	-1,20	-1,29	-1,21	-1,28	-1,20	-1,29	-1,21	-1,28	-1,20	-1,29	-1,21	-1,28	-1,20	-1,29	
Configurazione	SMA D3	Peso (g)	Spostamento (mm)	1,29	1,27	1,26	1,30	1,20	1,27	1,17	1,25	1,14	1,22	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	1,18	1,13	
Configurazione	SMA D3	Peso (g)	Spostamento (mm)	0,00	-0,02	-0,03	0,01	-0,09	-0,02	-0,12	-0,04	-0,15	-0,07	-0,16	-0,11	-0,16	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	
Configurazione	SMA D3	Peso (g)	Spostamento (mm)	0,97	0,93	0,84	0,90	0,82	0,88	0,80	0,87	0,79	0,87	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	0,86	0,79	
Configurazione	SMA D6	Peso (g)	Spostamento (mm)	0,86	0,78	0,69	0,73	0,66	0,71	0,64	0,69	0,62	0,68	0,62	0,68	0,62	0,68	0,62	0,68	0,62	0,68	0,62	0,68	0,62	0,68	0,62	0,68	0,61	0,67	0,61	0,67	0,61	0,67	0,61	
Configurazione	SMA D5	Peso (g)	Spostamento (mm)	-2,45	-2,48	-2,59	-2,53	-2,64	-2,56	-2,67	-2,58	-2,68	-2,60	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	-2,61	-2,69	
Configurazione	SMA D5	Peso (g)	S centrato (mm)	0,00	-0,03	-0,14	-0,08	-0,19	-0,11	-0,22	-0,13	-0,23	-0,15	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	-0,16	-0,24	

Appendice C

Risultati della prima campagna sperimentale e grafici Recupero/Displacement.

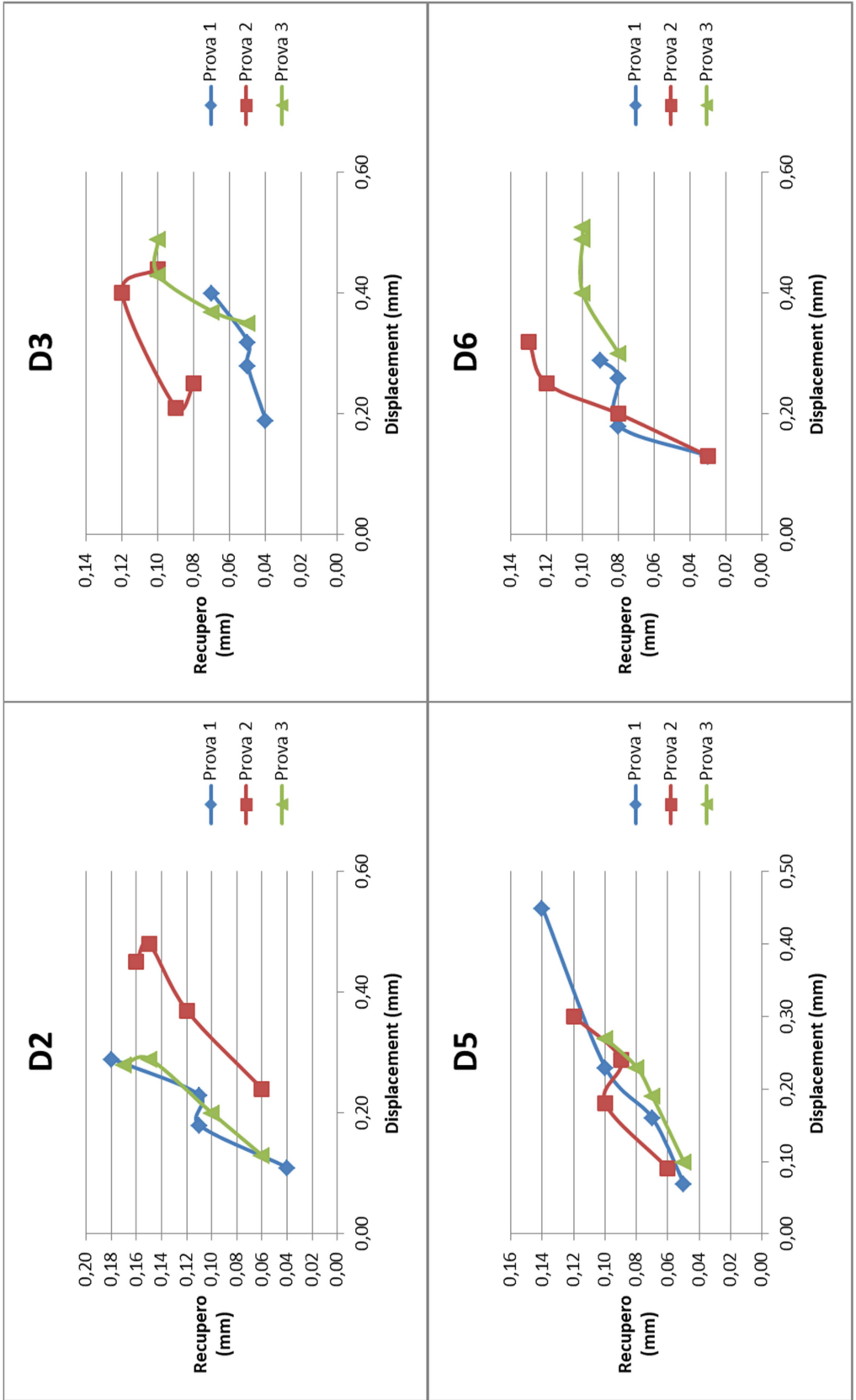
Prima campagna sperimentale con resistenza a filo e metodo di carico tipo bilancia											
Attuatore	Peso	Spostamento iniziale			Recupero			Posizione dopo lo scarico	Riscaldamento dopo lo scarico	V	mA
		Inizio	Fine	Totale	Inizio	Fine	Totale				
D2	47,11	0,00	-0,11	0,11	-0,19	-0,12	0,07			11,00	320,00
	93,78	-0,02	-0,18	0,16	-0,26	-0,16	0,10	-0,12	-0,05	11,00	320,00
	140,62	0,02	-0,21	0,23	-0,30	-0,19	0,11	-0,16	-0,05	11,00	320,00
	189,26	0,00	-0,31	0,31	-0,41	-0,28	0,13	-0,20	-0,04	11,00	320,00
D3	47,11	0,01	-0,18	0,19	-0,23	-0,18	0,05	-0,05	0,03	17,50	360,00
	93,78	0,02	-0,31	0,33	-0,36	-0,31	0,05	-0,14	-0,06	17,50	360,00
	140,62	0,00	-0,25	0,25	-0,34	-0,29	0,05	-0,13	-0,04	17,50	360,00
	189,26	0,01	-0,36	0,37	-0,44	-0,36	0,08	-0,16	-0,04	17,50	360,00
D2	47,11	-0,06	-0,18	0,12	-0,23	-0,19	0,04	-0,21	-0,13	12,00	327,00
	93,78	-0,07	-0,25	0,18	-0,34	-0,25	0,09	-0,26	-0,13	12,00	327,00
	140,62	-0,06	-0,28	0,22	-0,38	-0,26	0,12	-0,31	-0,14	12,00	327,00
	189,26	-0,05	-0,35	0,30	-0,48	-0,31	0,17	-0,34	-0,13	12,00	327,00
D2	47,11	-0,02	-0,09	0,07	-0,16	-0,12	0,04	-0,16	-0,12	12,00	327,00
	93,78	0,00	-0,17	0,17	-0,26	-0,17	0,09	-0,15	-0,07	12,00	327,00
	140,62	-0,01	-0,23	0,22	-0,35	-0,20	0,15	-0,20	-0,10	12,00	327,00
	189,26	0,00	-0,27	0,27	-0,41	-0,24	0,17	-0,04	-0,02	12,00	327,00
D6	47,11	0,01	-0,13	0,14	-0,18	-0,13	0,05	-0,08	0,01	17,00	390,00
	93,78	-0,01	-0,28	0,27	-0,37	-0,31	0,06	-0,25	-0,02	17,00	320,00
	140,62	0,00	-0,32	0,32	-0,40	-0,34	0,06	-0,26	-0,05	17,00	390,00
	189,26	0,00	-0,35	0,35	-0,41	-0,28	0,13	-0,22	0,11	17,00	390,00
D5	47,11	0,00	-0,08	0,08	-0,13	-0,09	0,04	-0,08	-0,02	20,00	380,00
	93,78	-0,01	-0,18	0,17	-0,29	-0,21	0,08	-0,18	-0,02	19,00	370,00
	140,62	-0,01	-0,21	0,20	-0,27	-0,21	0,06	-0,13	0,02	20,00	380,00
	189,26	-0,01	-0,26	0,25	-0,36	-0,27	0,09	-0,19	0,00	20,00	380,00
D5	47,11	-0,01	-0,11	0,10	-0,19	-0,09	0,10	-0,09	0,00	19,00	380,00
	93,78	0,00	-0,20	0,20	-0,29	-0,19	0,10	-0,22	0,02	19,00	380,00
	140,62	-0,01	-0,23	0,22	-0,33	-0,22	0,11	-0,26	0,05	19,00	380,00
	189,26	-0,01	-0,31	0,30	-0,41	-0,29	0,12	-0,29	0,00	19,00	380,00
D3	47,11	0,00	-0,17	0,17	-0,23	-0,19	0,04	-0,11	-0,08	17,50	390,00
	93,78	-0,01	-0,26	0,25	-0,33	-0,26	0,07	-0,14	-0,05	17,50	390,00
	140,62	-0,01	-0,29	0,28	-0,39	-0,31	0,08	-0,12	-0,04	17,50	390,00
	189,26	0,00	-0,42	0,42	-0,51	-0,45	0,06	-0,25	-0,15	17,50	390,00
D6	47,11	0,00	-0,11	0,11	-0,18	-0,16	0,02	-0,10	-0,07	17,00	390,00
	93,78	0,00	-0,12	0,12	-0,18	-0,11	0,07	-0,11	0,02	17,00	390,00
	140,62	0,01	-0,24	0,25	-0,32	-0,23	0,09	-0,22	0,00	17,00	390,00
	189,26	0,00	-0,25	0,25	-0,24	-0,33	0,09	-0,23	-0,05	17,00	390,00
D3	47,11	0,00	-0,25	0,25	-0,34	-0,28	0,06	-0,17	-0,05	17,00	390,00
	93,78	0,01	-0,33	0,34	-0,41	-0,33	0,08	-0,19	-0,02	17,00	390,00
	140,62	0,00	-0,40	0,40	-0,50	-0,39	0,11	-0,28	-0,09	17,00	390,00
	189,26	0,01	-0,44	0,45	-0,50	-0,42	0,08	-0,25	-0,04	17,00	390,00
D5	47,11	-0,01	-0,14	0,13	-0,19	-0,14	0,05	-0,13	-0,05	19,00	380,00
	93,78	-0,03	-0,23	0,20	-0,30	-0,21	0,09	-0,18	-0,09	18,00	370,00
	140,62	-0,02	-0,28	0,26	-0,37	-0,27	0,10	-0,21	-0,09	20,00	380,00
	189,26	0,01	-0,31	0,32	-0,44	-0,29	0,15	-0,22	-0,09	19,00	360,00
D6	47,11	0,02	-0,09	0,11	-0,19	-0,10	0,09	-0,16	0,00	18,00	400,00
	93,78	0,02	-0,16	0,18	-0,26	-0,16	0,10	-0,17	0,02	18,00	400,00
	140,62	0,02	-0,24	0,26	-0,30	-0,23	0,07	-0,22	0,00	18,00	400,00
	189,26	0,02	-0,26	0,28	-0,36	-0,26	0,10	-0,25	0,01	18,00	400,00



Appendice D

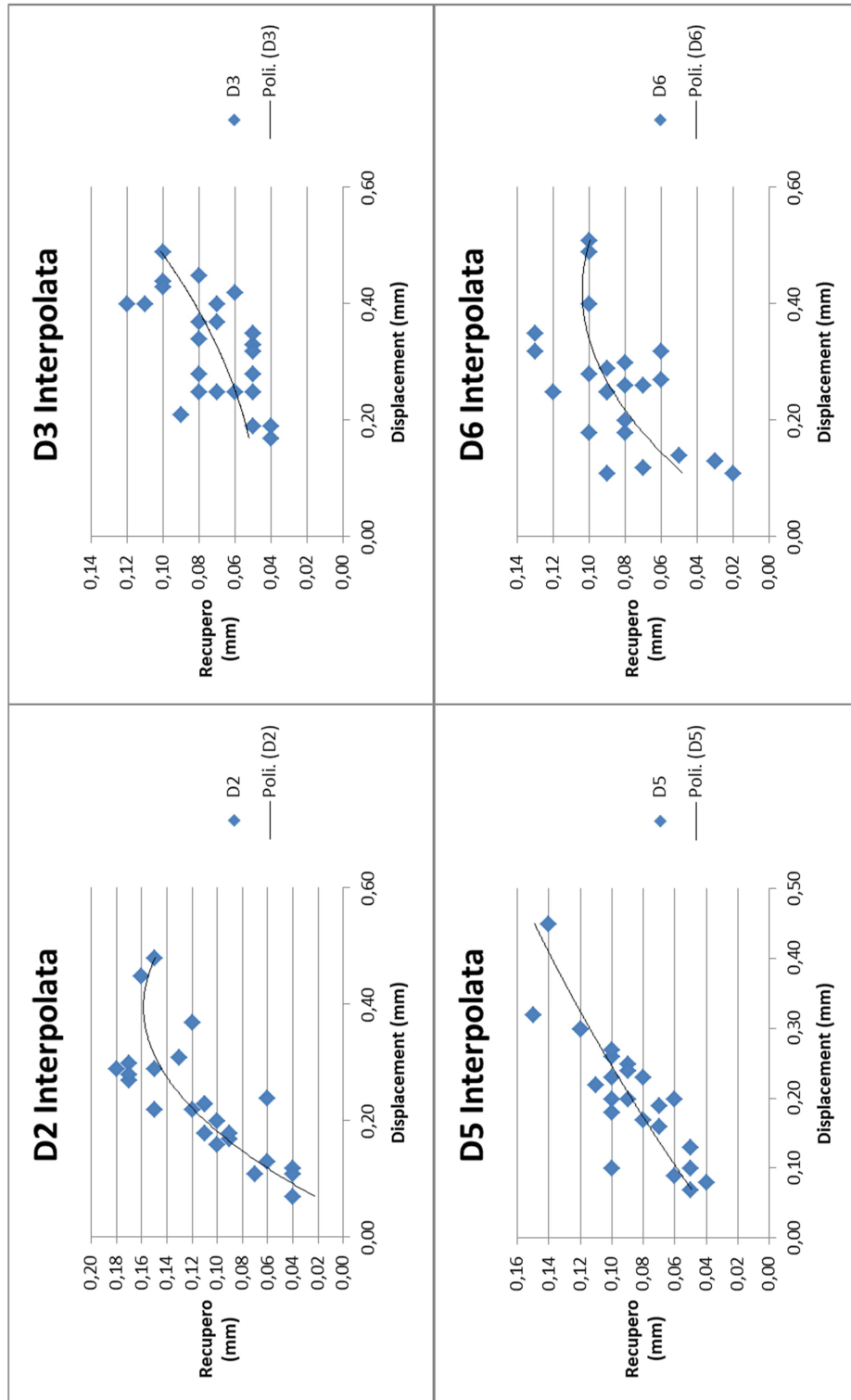
Risultati della seconda campagna sperimentale e grafici Recupero/Displacement.

Seconda campagna sperimentale con resistenza a filo e metodo di carico tipo bilancia											
Attuatore	Peso	Spostamento iniziale			Recupero			Posizione dopo lo scarico	Riscaldamento dopo lo scarico	V	mA
		Inizio	Fine	Totale	Inizio	Fine	Totale				
D6	47,11	-0,02	-0,15	0,13	-0,19	-0,16	0,03	-0,11	-0,03	18,00	400,00
	93,78	0,00	-0,18	0,18	-0,26	-0,18	0,08	-0,19	-0,03	18,00	400,00
	140,62	0,00	-0,26	0,26	-0,34	-0,26	0,08	-0,23	-0,09	18,00	400,00
	189,26	0,00	-0,29	0,29	-0,37	-0,28	0,09	-0,25	-0,04	18,00	400,00
D3	47,11	-0,01	-0,20	0,19	-0,25	-0,21	0,04	-0,07	-0,01	17,50	390,00
	93,78	-0,01	-0,29	0,28	-0,37	-0,32	0,05	-0,15	-0,04	17,50	390,00
	140,62	0,00	-0,32	0,32	-0,37	-0,32	0,05	-0,16	-0,02	17,50	390,00
	189,26	-0,02	-0,42	0,40	-0,49	-0,42	0,07	-0,31	-0,10	17,50	390,00
D6	47,11	0,00	-0,13	0,13	-0,17	-0,14	0,03	-0,13	0,07	18,50	390,00
	93,78	-0,01	-0,21	0,20	-0,28	-0,20	0,08	-0,21	0,05	19,00	405,00
	140,62	-0,01	-0,26	0,25	-0,38	-0,26	0,12	-0,26	0,08	19,00	390,00
	189,26	0,01	-0,31	0,32	-0,43	-0,30	0,13	-0,28	0,06	19,00	405,00
D5	47,11	-0,01	-0,08	0,07	-0,16	-0,11	0,05	-0,08	-0,05	15,00	300,00
	93,78	-0,01	-0,17	0,16	-0,25	-0,18	0,07	-0,13	-0,09	15,00	300,00
	140,62	0,00	-0,23	0,23	-0,32	-0,22	0,10	-0,19	-0,08	15,00	300,00
	189,26	0,00	-0,45	0,45	-0,58	-0,44	0,14	-0,30	-0,23	15,00	300,00
D2	47,11	0,00	-0,11	0,11	-0,18	-0,14	0,04	-0,12	-0,03	16,50	320,00
	93,78	0,01	-0,17	0,18	-0,28	-0,17	0,11	-0,16	-0,03	16,50	320,00
	140,62	0,00	-0,23	0,23	-0,32	-0,21	0,11	-0,18	-0,08	16,50	320,00
	189,26	-0,01	-0,30	0,29	-0,43	-0,25	0,18	-0,23	-0,80	16,50	320,00
D6	47,11	-0,01	-0,31	0,30	-0,37	-0,29	0,08	-0,13	0,02	15,00	400,00
	93,78	0,00	-0,40	0,40	-0,49	-0,39	0,10	-0,22	0,02	15,00	400,00
	140,62	-0,02	-0,51	0,49	-0,59	-0,49	0,10	-0,28	-0,04	15,00	400,00
	189,26	-0,01	-0,52	0,51	-0,61	-0,51	0,10	-0,25	-0,05	15,00	400,00
D3	47,11	0,00	-0,25	0,25	-0,32	-0,24	0,08	-0,01	0,00	19,00	415,00
	93,78	-0,04	-0,25	0,21	-0,33	-0,24	0,09	0,00	0,06	19,00	415,00
	140,62	0,01	-0,39	0,40	-0,49	-0,37	0,12	-0,07	-0,01	19,00	415,00
	189,26	-0,01	-0,45	0,44	-0,56	-0,46	0,10	-0,15	-0,03	19,00	415,00
D2	47,11	-0,02	-0,26	0,24	-0,33	-0,27	0,06	-0,12	-0,10	16,50	320,00
	93,78	0,00	-0,37	0,37	-0,50	-0,38	0,12	-0,12	-0,02	16,50	330,00
	140,62	0,02	-0,46	0,48	-0,60	-0,45	0,15	-0,21	-0,12	16,50	320,00
	189,26	0,00	-0,45	0,45	-0,60	-0,44	0,16	-0,19	-0,08	16,50	320,00
D5	47,11	0,00	-0,09	0,09	-0,18	-0,12	0,06	-0,06	-0,03	15,00	300,00
	93,78	0,00	-0,18	0,18	-0,27	-0,17	0,10	-0,15	-0,08	15,00	300,00
	140,62	0,00	-0,24	0,24	-0,33	-0,24	0,09	-0,17	-0,05	15,00	300,00
	189,26	0,00	-0,30	0,30	-0,40	-0,28	0,12	-0,27	-0,19	15,00	300,00
D3	47,11	0,00	-0,35	0,35	-0,39	-0,34	0,05	-0,03	0,00	15,00	300,00
	93,78	-0,01	-0,38	0,37	-0,45	-0,38	0,07	-0,14	-0,05	15,00	300,00
	140,62	-0,01	-0,44	0,43	-0,53	-0,43	0,10	-0,17	-0,06	15,00	300,00
	189,26	0,00	-0,49	0,49	-0,58	-0,48	0,10	-0,17	-0,04	15,00	300,00
D5	47,11	0,02	-0,08	0,10	-0,14	-0,09	0,05	-0,07	0,00	15,00	340,00
	93,78	-0,01	-0,20	0,19	-0,27	-0,20	0,07	-0,19	-0,10	15,00	340,00
	140,62	0,01	-0,22	0,23	-0,28	-0,20	0,08	-0,14	-0,02	15,00	340,00
	189,26	0,02	-0,25	0,27	-0,35	-0,25	0,10	-0,23	0,06	15,00	340,00
D2	47,11	-0,01	-0,14	0,13	-0,21	-0,15	0,06	-0,17	-0,02	16,00	320,00
	93,78	0,01	-0,19	0,20	-0,29	-0,19	0,10	-0,18	-0,03	16,00	320,00
	140,62	-0,01	-0,30	0,29	-0,39	-0,24	0,15	-0,28	-0,08	16,00	320,00
	189,26	0,02	-0,26	0,28	-0,46	-0,29	0,17	-0,31	-0,08	16,00	320,00



Appendice E

Grafici Recupero/Displacement interpolati.



Appendice F

Risultati della simulazioni agli elementi finiti senza affinamento progressivo della mesh.

D2	Martensite	Austenite	Differenza	D3	Martensite	Austenite	Differenza
Carico applicato (N)	0,462			Carico applicato (N)	0,462		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	108,8	109,4		Sollecitazione Von Mises (MPa)	84,7	84,75	
Deformazione	0,0032	0,0013	0,0019	Deformazione	0,0025	0,0010	0,0015
Freccia (mm)	0,0917	0,0365	0,0552	Freccia (mm)	0,0689	0,0276	0,0413
Carico applicato (N)	0,920			Carico applicato (N)	0,920		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	230,6	224,3		Sollecitazione Von Mises (MPa)	168,7	168,8	
Deformazione	0,0068	0,0027	0,0041	Deformazione	0,0050	0,002	0,0030
Freccia (mm)	0,1833	0,073	0,1103	Freccia (mm)	0,1372	0,0549	0,0823
Carico applicato (N)	1,379			Carico applicato (N)	1,379		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	336,1	336,2		Sollecitazione Von Mises (MPa)	252,8	253	
Deformazione	0,0100	0,004	0,0060	Deformazione	0,0075	0,003	0,0045
Freccia (mm)	0,2736	0,1094	0,1642	Freccia (mm)	0,2056	0,0823	0,1233
Carico applicato (N)	1,857			Carico applicato (N)	1,857		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	452,6	452,8		Sollecitazione Von Mises (MPa)	340,5	340,7	
Deformazione	0,0134	0,0054	0,0080	Deformazione	0,0101	0,0040	0,0061
Freccia (mm)	0,3684	0,1474	0,2210	Freccia (mm)	0,2769	0,1108	0,1661
Carico applicato (N)	2,319			Carico applicato (N)	2,319		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	565,2000	565,4		Sollecitazione Von Mises (MPa)	425,2	425,4	
Deformazione	0,0167	0,0067	0,0100	Deformazione	0,1261	0,0050	0,1211
Freccia (mm)	0,4601	0,184	0,2761	Freccia (mm)	0,3458	0,1383	0,2075
Carico applicato (N)	2,777			Carico applicato (N)	2,777		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	676,8	677,1		Sollecitazione Von Mises (MPa)	509,1	509,4	
Deformazione	0,0201	0,0080	0,0121	Deformazione	0,0151	0,0060	0,0091
Freccia (mm)	0,5509	0,2204	0,3305	Freccia (mm)	0,4141	0,1657	0,2484
Carico applicato (N)	3,239			Carico applicato (N)	3,239		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	789,4	789,8		Sollecitazione Von Mises (MPa)	593,8	594,2	
Deformazione	0,0234	0,0093	0,0140	Deformazione	0,0176	0,0070	0,0106
Freccia (mm)	0,6426	0,257	0,3856	Freccia (mm)	0,483	0,1932	0,2898

D5	Martensite	Austenite	Differenza	D6	Martensite	Austenite	Differenza
Carico applicato (N)	0,462			Carico applicato (N)	0,462		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	100,4	100,4		Sollecitazione Von Mises (MPa)	80,23	80,08	
Deformazione	0,0030	0,0012	0,0018	Deformazione	0,0024	0,0009477	0,0014
Freccia (mm)	0,1145	0,0458	0,0687	Freccia (mm)	0,0907	0,036	0,0547
Carico applicato (N)	0,920			Carico applicato (N)	0,920		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	200	199,9		Sollecitazione Von Mises (MPa)	159,8	159,5	
Deformazione	0,0059	0,0024	0,0035	Deformazione	0,0047	0,001887	0,0028
Freccia (mm)	0,2281	0,0912	0,1369	Freccia (mm)	0,18	0,07223	0,1078
Carico applicato (N)	1,379			Carico applicato (N)	1,379		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	299,8	299,7		Sollecitazione Von Mises (MPa)	242	239	
Deformazione	0,0089	0,0036	0,0053	Deformazione	0,0072	0,002829	0,0043
Freccia (mm)	0,3419	0,1368	0,2051	Freccia (mm)	0,2714	0,1083	0,1631
Carico applicato (N)	1,857			Carico applicato (N)	1,857		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	403,7	403,6		Sollecitazione Von Mises (MPa)	322,5	321,9	
Deformazione	0,0120	0,0048	0,0072	Deformazione	0,009538	0,003809	0,0057
Freccia (mm)	0,4604	0,1842	0,2762	Freccia (mm)	0,36	0,1458	0,2142
Carico applicato (N)	2,319			Carico applicato (N)	2,319		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	504,2000	504		Sollecitazione Von Mises (MPa)	402,7	401,9	
Deformazione	0,01493	0,0059	0,2000	Deformazione	0,0119	0,004757	0,0072
Freccia (mm)	0,575	0,23	0,0090	Freccia (mm)	0,4551	0,1821	0,2730
Carico applicato (N)	2,777			Carico applicato (N)	2,777		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	603,7	603,5		Sollecitazione Von Mises (MPa)	482,2	481,3	
Deformazione	0,01788	0,007151	0,0107	Deformazione	0,01426	0,005696	0,0086
Freccia (mm)	0,6885	0,2754	0,4131	Freccia (mm)	0,545	0,218	0,3270
Carico applicato (N)	3,239			Carico applicato (N)	3,239		
Sollecitazione Von Mises (MPa)	704,2	703,9		Sollecitazione Von Mises (MPa)	562,5	561,4	
Deformazione	0,0209	0,0083	0,0125	Deformazione	0,01664	0,006644	0,0100
Freccia (mm)	0,8031	0,3212	0,4819	Freccia (mm)	0,6357	0,2543	0,3814

Appendice G

Grafici dello spostamento nel tempo delle varie prove.

