

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale



Dispositivo di presa attuato tramite leghe a memoria di forma

Relatore: Prof. Terenziano Raparelli

Co-relatori: Ing. Daniela Maffiodo

Ing. Luigi Lentini

Tesi di laurea di:

Francesco Giuseppe Scardino Matr. 215062

Anno accademico 2018/2019

Ringraziamenti

Alla mia famiglia e alle persone a me vicine che mi hanno sostenuto e incoraggiato durante questo percorso

Abstract

I meccanismi di afferraggio (gripper) rappresentano da sempre elementi fondamentali nel campo della robotica e dell'automazione dei processi. Lo studio del sistema di attuazione e la cinematica del meccanismo di presa sono gli aspetti fondamentali alla base della progettazione di un gripper.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di valutare e classificare le già esistenti tipologie di gripper al fine di proporre una nuova soluzione tecnologica che possa risultare allo stesso tempo compatta, efficace ed economica. La soluzione proposta è un gripper monolitico realizzato tramite stampa 3D che viene attuato tramite fili in leghe a memoria di forma (shape memory alloy). Il moto del meccanismo è ottenuto grazie alla presenza di cerniere virtuali. Per la progettazione di tale meccanismo è stato necessario effettuare un'analisi cinematica e un'analisi statica. L'analisi cinematica è servita per effettuare una progettazione preliminare e decidere la forma del meccanismo e il numero e la posizione delle cerniere virtuali da utilizzare. A seguito del dimensionamento iniziale è stata eseguita l'analisi statica del meccanismo. Questa parte del lavoro è servita a rifinire la geometria del prototipo iniziale e, soprattutto, a dimensionare le cerniere virtuali in base a quelle che sono le caratteristiche funzionali del sistema di attuazione scelto. Nella parte finale della fase di progettazione sono poi stati selezionati il numero e il diametro di fili a memoria di forma per attuare il gripper. Dopo essere stato progettato, il prototipo è stato realizzato tramite laser sintering e caratterizzato sperimentalmente. I test sperimentali hanno permesso di valutare le prestazioni del meccanismo per quel che riguarda la ripetibilità, il rapporto di amplificazione e la rigidità calcolata come rapporto della forza applicata come ingresso e il conseguente spostamento ottenuto in uscita.

Indice

<i>INTRODUZIONE</i>	10
CAPITOLO 1: CLASSIFICAZIONE E TIPOLOGIE DI ORGANI DI PRESA	12
<i>1.1 Introduzione e concetti base</i>	12
<i>1.2 Classificazione in base al tipo di presa</i>	14
1.2.1 Impactive Gripper	16
1.2.2 Ingressive Gripper	21
1.2.3 Astrictive Gripper	24
1.2.4 Contigutive Gripper	35
<i>1.3 Classificazione in base al tipo di applicazione</i>	40
<i>1.4 Classificazione in base al sistema di attuazione</i>	40
1.4.1 Azionamento pneumatico	42
1.4.2 Azionamento idraulico	43
1.4.3 Azionamento elettrico	44
1.4.4 Sistemi di attuazione non convenzionali: azionamento tramite Leghe a Memoria di Forma (SMA)	46
CAPITOLO 2: LEGHE A MEMORIA DI FORMA	52
<i>2.1 Introduzione</i>	52
<i>2.2 Trasformazione martensitica</i>	53
<i>2.3 Temperature di trasformazione</i>	57
<i>2.4 Effetto memoria di forma (SME)</i>	59
<i>2.5 Super elasticità</i>	61
<i>2.6 Meccanismi di recupero della forma: a una via, a due vie</i>	63
<i>2.7 Comportamento meccanico</i>	66
<i>2.8 Applicazioni</i>	68

CAPITOLO 3: ANALISI STATO DELL' ARTE	73
3.1 Introduzione	73
3.2 Pinze attuate tramite Fili SMA	74
3.3 Pinze con Meccanismi Cedevoli	77
3.4 Pinze con Cerniere Cedevoli e azionate tramite Fili SMA	80
CAPITOLO 4: PROGETTAZIONE DEL GRIPPER	88
4.1 Specifiche di Progetto	88
4.2 Progettazione unità cedevole	90
4.2.1 Modello semplificato	92
4.2.2 Calcolo analitico equazione $\Delta X_B = f(\Delta Y_C, \alpha)$	93
4.2.3 Determinazione dei parametri geometrici R e α_0	96
4.2.4 Modello Pseudo-Rigido Equivalente	100
4.2.5 Analisi cinematica	102
4.2.6 Calcolo rigidezza cerniera cedevole	108
4.3 Dimensionamento in base al valore della rigidezza	112
4.3.1 Sistema a parametri concentrati	112
4.3.2 Rigidezza teorica della pinza (K_p)	114
4.3.3 Rigidezza Fili SMA (K_{HOT} , K_{COLD})	119
CAPITOLO 5: PROTOTIPAZIONE E PROVE SPERIMENTALI	121
5.1 Prototipazione	121
5.2 Allestimento banco prova e taratura dei sensori	123
5.3 Misure sperimentali	128
5.4 Confronto dei risultati	131
5.5 Considerazioni	135
5.6 Scelta dei fili in funzione del valore di rigidezza reale	136
5.7 Analisi statica	138
5.8 Conclusioni e prospettive future	142
Bibliografia	143

Indice delle Figure

Figura 1: Esempio di robot automatico	12
Figura 2: Esempi di sistemi cinematici trattati.....	17
Figura 3: Esempi di tipi di presa Force-lock e Form-lock	17
Figura 4: Confronto tra prese Force-fit e Form-fit.....	18
Figura 5. Esempi di gripper Paralleli: a) gripper a due griffe con superficie piana; b) gripper a due griffe opportunamente sagomata; c) gripper a tre griffe autocentranti	19
Figura 6. Esempi di Gripper Angolari e Radiali: a) gripper a due griffe con superficie piana; b) Gripper a due griffe con singola griffa mobile; c) Gripper a due griffe con superficie sagomata; d) Gripper Angolare a due griffe.....	20
Figura 7. a) Intrusive Gripper per la separazione dei tessuti; b) Intrusive Gripper a doppio pistone	22
Figura 8. Caratteristica forza-inclinazione per un Intrusive Gripper	22
Figura 9. Esempi di Ingressive Gripper	24
Figura 10. Esempi di Astrictive Gripper	24
Figura 11. Confronto tra i diversi sistemi di generazione del vuoto	26
Figura 12. Ventose a vuoto	28
Figura 13. Controllo meccanico del flusso magnetico.....	29
Figura 14. Gripper elettromagnetico	30
Figura 15. Sezione trasversale di un gripper elettrostatico con circuito elettrico equivalente	33
Figura 16. Gripper a nastro adesivo	37
Figura 17. Esempio di gripper a cella di Peltier.....	39
Figura 18. Tipologie di attuatori pneumatici.....	42
Figura 19. Tipologie di attuatori oleodinamici.....	43
Figura 20. Tipologie di attuatori elettrici	44
Figura 21. Micromanipolatore con attuazione PZT e particolare delle sue cerniere flessionali.	47
Figura 22. dimensioni di massima del micromanipolatore	47
Figura 23. elettrodi a pettine (sinistra) e sistema di sospensione a trave (destra).....	48
Figura 24. Esempio di microgripper attuato termicamente.....	48
Figura 25. Micromanipolatore con attuazione elettromagnetica.....	49
Figura 26. Dispositivo di presa attuato tramite SMA.....	50
Figura 27. Confronto tra i rapporti Potenza/peso per i diversi tipi di attuatori	51
Figura 28. Andamento dell'energia interna dell'austenite e della martensite	54
Figura 29. Passaggio austenite martensite e ritorno alla forma precedente per mezzo del riscaldamento	55
Figura 30. Avanzamento interfaccia martensitica.....	56
Figura 31. Temperature caratteristiche nella trasformazione diretta e inversa	57
Figura 32. Intervallo di trasformazione(isteresi): A_s Austenite Start; A_f Austenite Finish ; M_s Martensite Start; M_f Martensite Finish	58
Figura 33. Celle cristalline martensite austenite per lega Ni-Ti.....	59
Figura 34. Schematizzazione effetto memoria di forma	59
Figura 35. Curva stress-strain	60
Figura 36. Confronto tra i meccanismi SME e superelasticità.....	62
Figura 37. Super elasticità.....	62
Figura 38. Meccanismo “a una via”	63
Figura 39. Meccanismo “a due vie”	64
Figura 40. Diagramma allungamento%-temperatura per i due meccanismi	65

Figura 41. Diagramma allungamento%-temperatura per i due meccanismi	66
Figura 42. Confronto tra le rigidzze delle fasi martensitica ed austenitica	67
Figura 43. Applicazioni in campo biomedico e odontoiatrico	68
Figura 44. Protezione filtro dell'acqua. (a) By-pass per acqua calda (b) By-pass per acqua fredda nel filtro.....	69
Figura 45. Miscelatore	69
Figura 46. un occhiale realizzato in SMA che viene severamente deformato e che recupera la forma iniziale all'atto della rimozione della sollecitazione	70
Figura 47. Esempio di applicazione dei file in SMA per variare il profilo alare	70
Figura 48. Applicazione in ambito aerospaziale	71
Figura 49. Polpo robotico realizzato da Scuola Superiore Sant'Anna.....	71
Figura 50. Applicazione automotive	71
Figura 51. Isolatore sismico	72
Figura 52. Elemento di connessione trave-colonna in una struttura in acciaio.....	72
Figura 53. Fratturazione della roccia utilizzando elementi in SMA	72
Figura 54. Braccio robotico con pinza a due griffe.....	74
Figura 55. Assieme dell'attuatore.....	75
Figura 56. Modello della pinza per interventi chirurgici non invasivi.....	75
Figura 57. Curva deformazione- resistenza elettrica del filo($d=0,381$)	76
Figura 58. Modello del microgripper proposto	77
Figura 59. Configurazione aperta e chiusa del microgripper	78
Figura 60. Soluzione studiata da Dalibor Petkovic	79
Figura 61. Micropinza proposta M.C. Carrozza.....	79
Figura 62. Disegno schematico della pinza. (a) movimento parallelo , (b) movimento angolare.....	80
Figura 63. : Struttura cedevole. (a) quadrilatero , (b) cerniera cedevole.....	81
Figura 64. Prototipo del gripper.....	81
Figura 65. Modello concettuale del microgripper.....	82
Figura 66. (a) Configurazione aperta; (b) Configurazione chiusa della pinza	82
Figura 67. Confronto tra il modello precedente e quello ottimizzato	83
Figura 68. Gripper proposto dal prof. Raparelli e Ing. Maffiodo.....	84
Figura 69. Geometria finale ottimizzata.....	85
Figura 70. Modello schematico e modello CAD del dito	86
Figura 71. Schema della pinza a due dita.....	86
Figura 72. Gripper di Lael U. Odhner.....	87
Figura 73. Gripper con accoppiamenti cinematici tradizionali	89
Figura 74. Gripper con cerniere flessionali.....	89
Figura 75. Unità cedevole considerata.....	91
Figura 76. Geometria della pinza	91
Figura 77. Unità cedevole, a) modello reale; b) schema semplificato	92
Figura 78: Meccanismo nella configurazione iniziale e in una configurazione generica	93
Figura 79. a) Andamento Spostamento in uscita in funzione di α_0 ; b) andamento del RA in funzione di α_0	97
Figura 80. Inclinazione critica.....	98
Figura 81. Andamento di RA in funzione di α_0	99
Figura 82. a) unità cedevole reale; b) modello pseudo-rigido equivalente	100
Figura 83. Modello del meccanismo gripper	102
Figura 84. gradi di libertà associati ad ogni elemento trave.....	103
Figura 85. Sistema di equazioni associate alla struttura.....	106
Figura 86. Cerniera flessionale con profilo circolare.....	108

Figura 87. Elemento SHELL63 : a) tensioni associate all'elemento ; b) geometria elemento	109
Figura 88. Condizioni di carico e vincolo	110
Figura 89. Configurazione deformata	110
Figura 90. Nodo di riferimento	111
Figura 91. Valore della rotazione nodo di riferimento.....	111
Figura 92. Sistema a parametri concentrati.....	112
Figura 93. Modello 2D del gripper	114
Figura 94. Condizioni di carico e vincolo	116
Figura 95. Entità dello spostamento all'estremità del dito.....	116
Figura 96. Diagramma Forza-Spostamento uscita del dito	117
Figura 97. Processo di selective laser sintering.....	121
Figura 98. Prototipo	122
Figura 99. Grandezze coinvolte nelle misurazioni.....	123
Figura 100. Banco prova allestito per le misurazioni.....	124
Figura 101. Disposizione dei sensori in prossimità del modello.....	124
Figura 102. Cella di carico a bottone	125
Figura 103. Campioni di massa nota.....	125
Figura 104. Sensore di spostamento laser	125
Figura 105. Caratteristica del sensore di spostamento laser.....	126
Figura 106. Parametri della retta inseriti	126
Figura 107. Schema banco prova	127
Figura 108. Dati ottenuti dalle misurazioni.....	128
Figura 109. Andamenti ottenuti dai dati associati alle tre misurazioni	129
Figura 110. Curva dei valori medi delle tre misurazioni.....	129
Figura 111. Valori medi delle tre misurazioni	130
Figura 112. Confronto tra il <i>Rapporto di Amplificazione</i> teorico e quello sperimentale	132
Figura 113: Confronto tra la <i>Rigidità</i> teorica e quella sperimentale	133
Figura 114. Differenti valori di rigidità equivalgono a differenti pendenze	134
Figura 115. Condizioni di carico a) Fase Attiva ; b) Fase di Afferraggio.....	138
Figura 116. Componente elettronico da manipolare	139
Figura 117. Stato di tensione Fase di Chiusura.....	140
Figura 118. Stato di tensione Fase di Presa.....	140
Figura 119. Incremento del valore di tensione.....	141

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Classificazione delle pinze in base al tipo di funzionamento e adattabilità con diversi materiali.....	14
Tabella 2. Altri metodi di presa normalmente non classificati.....	15
Tabella 3. Principali vantaggi e svantaggi sistemi di attuazione pneumatici, elettrici e idraulici.....	45
Tabella 4. Principali leghe SMA e relativi intervalli di isteresi.....	58
Tabella 5. Cinque modelli CAD con diversi parametri associati alle cerniere virtuali.....	114
Tabella 6. Proprietà meccaniche PA2200Balance1.0.....	115
Tabella 7. Proprietà meccaniche implementate nel software.....	117
Tabella 8. Valori di F-Ux.....	117
Tabella 9. Valori di rigidità dei 5 modelli di pinza.....	118
Tabella 10. Proprietà dei fili forniti dalla Dynalloy.....	119
Tabella 11. Parametri di processo utilizzati.....	141
Tabella 12. Valori di F-Ux.....	149

INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi la stragrande maggioranza dei prodotti presenti nel mercato è costituita da una parte elettronica che è in grado di migliorare e gestire il funzionamento del dispositivo.

Un chiaro esempio del ruolo dell'elettronica nello sviluppo dei sistemi moderni è offerto dall'ambiente automobilistico dove il contenuto elettronico negli autoveicoli è aumentato enormemente negli ultimi anni e ha consentito di ottenere veicoli con prestazioni più elevate in termini di efficienza, sicurezza e migliore controllo. Dato che l'industria dell'elettronica ha assunto un ruolo fondamentale nella realizzazione dei prodotti, anche di uso quotidiano, nasce l'esigenza di affiancare alle linee di produzione dei sistemi in grado di svolgere operazioni di assemblaggio (o disassemblaggio) o semplice movimentazione dei componenti elettronici presenti in un generico prodotto.

In questo elaborato si propone la progettazione e la realizzazione di un gripper impiegato nella movimentazione di dispositivi elettronici. L'obiettivo è quello di ottenere un organo di presa semplice, leggero, compatto e in grado di svolgere una manipolazione agile e sicura di componenti elettronici con dimensioni dell'ordine dei mm.

Per riuscire a ottenere queste caratteristiche si è scelto di realizzare un gripper costituito da un meccanismo deformabile e che utilizza, come sistema di attuazione, dei fili in lega a memoria di forma.

Questo tipo di attuazione si discosta dai sistemi convenzionali (pneumatici, elettrici e oleodinamici) in quanto questi ultimi richiedono un certo numero di componenti ausiliari (come ad esempio impianto di compressione o una centrale oleodinamica, sensori, molle etc.) per convertire il segnale in ingresso in un movimento meccanico in uscita. Al contrario, i fili in SMA sono in grado di trasformare direttamente il segnale in ingresso (elettrico) in uno spostamento in uscita senza la necessità di ulteriori elementi consentendo di ottenere dispositivi di presa semplici e allo stesso tempo efficaci.

La struttura della pinza è stata realizzata come un unico monoblocco sfruttando l'uso di cerniere virtuali ottenendo così un gripper elastico, preciso e compatto.

Nella prima parte è stata effettuata una classificazione dei diversi dispositivi di presa in base alla tecnica di afferraggio, di attuazione e in base a quelle che sono le applicazioni a livello industriale. È stato necessario effettuare un'analisi dello stato dell'arte dei dispositivi di presa con attuazione SMA e/o cerniere virtuali con lo scopo di valutare lo stato tecnologico attuale, i punti di forza e di debolezza di queste tipologie di dispositivi.

La seconda parte descrive la progettazione del gripper e dimensionando opportunamente la geometria delle cerniere in base a quelle che sono le forze di attuazione esercitate dai fili in SMA. Il dimensionamento delle cerniere flessionali è stato effettuato mediante analisi FEM ripetute con l'obiettivo di ricavare un valore ottimale di rigidità tale da garantire il corretto funzionamento del sistema.

Il passo finale è stato realizzare il prototipo della pinza tramite una tecnica di fabbricazione additiva con lo scopo di valutare la cinematica e le prestazioni del dispositivo di presa.

CAPITOLO 1: CLASSIFICAZIONE E TIPOLOGIE DI ORGANI DI PRESA

1.1 Introduzione e concetti base

Al giorno d'oggi l'automazione industriale ricopre un ruolo fondamentale nello sviluppo di molte aziende dato che sistemi di produzione automatici consentono di aumentare la produttività. Per automazione si intende la tecnologia che usa sistemi di controllo per gestire macchine e processi, riducendo o eliminando la necessità dell'intervento dell'uomo. In molti casi, il lavoro svolto da un essere umano viene sostituito da un robot, ovvero strutture meccaniche flessibili e programmabili.

Secondo una definizione maggiormente ricorrente il robot è “*un manipolatore multifunzionale riprogrammabile, progettato per movimentare materiali, pezzi, utensili o attrezzi speciali*”. Quindi la principale funzione di un robot è quella di manipolare e/o spostare oggetti, anche se in alcuni casi può svolgere, entro certi limiti, delle lavorazioni meccaniche come saldature, sbavature, taglio e tutte quelle operazioni che non richiedono elevate sollecitazioni.

Ogni tipologia di robot è costituita da un insieme di corpi rigidi interconnessi tramite dei giunti meccanici che formano una catena cinematica che consente un certo grado di articolazione. Ogni manipolatore termina con un polso meccanico sul quale vengono installati gli organi terminali per consentire la manipolazione di oggetti oppure per eseguire delle operazioni su pezzi di lavorazione. Gli organi terminali o *end-effector* possono essere distinti in due categorie: gli utensili di lavoro (*tools*) e gli organi di presa (*gripper*). Gli utensili

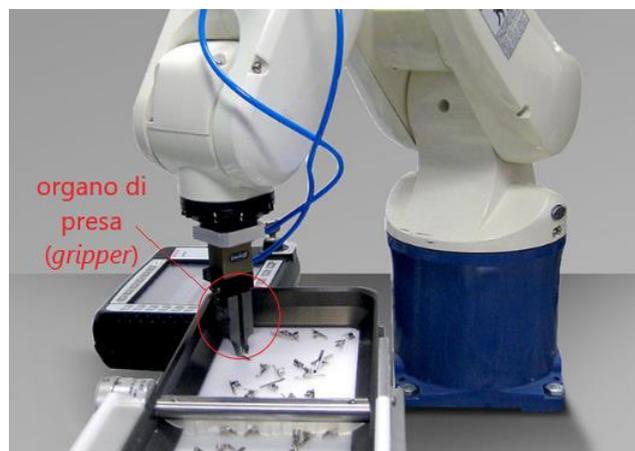


Figura 1: Esempio di robot automatico

sono organi costruiti per svolgere delle determinate lavorazioni (ad es. verniciatura, incollaggio, taglio laser etc.). In questo studio saranno trattati e analizzati gli organi di presa.

Gli organi di presa robotici, più comunemente chiamati gripper, sono la parte terminale della catena cinematica di un robot industriale ovvero l'effettivo collegamento tra robot e l'oggetto da manipolare.

Una definizione di gripper è stata data da *G.J. Monkaman*¹:

“I gripper sono sottosistemi dei meccanismi di presa che forniscono un contatto temporaneo con l'oggetto da afferrare, assicurandone posizione e orientamento durante la manipolazione. La presa è ottenuta per mezzo di forze prodotte da appositi elementi”.

Le funzioni principali che un gripper deve svolgere sono:

- Assicurare temporaneamente una definita posizione e orientamento dell'oggetto relativamente a un sistema di riferimento.
- Mantenere in condizioni statiche e/o dinamiche determinate forze e momenti.
- Permettere la variazione di posizione e orientamento dell'oggetto in relazione a un sistema di riferimento.
- Consentire operazioni tecniche specifiche richieste dalla particolare applicazione

Le pinze robotiche per manipolatori industriali sono costituite da organi prensili (*dita / finger*) che permettono di afferrare saldamente l'oggetto mediante l'apertura e la chiusura delle stesse. Per poter raggiungere un qualunque punto dello spazio, un dispositivo necessita di tre assi di movimento. Per realizzare i movimenti secondo i singoli assi, in genere, vengono impiegati dei sistemi di azionamento tradizionali (elettrico, pneumatico e oleodinamico) che saranno descritti nel proseguo di questo capitolo. Tuttavia, la ricerca è orientata all'impiego di sistemi di azionamento non convenzionali a causa della crescente esigenza di realizzare pinze robotiche più leggere e compatte in grado di effettuare movimenti versatili e decisi. Esistono molte tipologie di pinze le cui caratteristiche variano in base all'applicazione in cui esse sono impiegate. Nei successivi paragrafi viene effettuata una classificazione delle diverse tipologie di pinze robotiche in base ad alcuni elementi caratteristici delle pinze stesse.

¹ G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, H. Schunk, “Robot Grippers”. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 2007., pag 2.

1.2 Classificazione in base al tipo di presa

In letteratura si possono trovare diversi metodi per la classificazione delle pinze. Una prima classificazione delle pinze può essere effettuata in base al tipo di presa. Il testo ^[5] identifica quattro tipologie di gripper:

- **Impactive:** una forza meccanica è direttamente impressa sull'oggetto da due o più direzioni.
- **Ingressive:** la presa avviene tramite l'inserimento dell'organo di presa nell'oggetto, attraverso una o più superfici.
- **Astrictive:** una forza o un campo attrattivo vincola l'oggetto consentendo la presa.
- **Contigutive:** il sostegno dell'oggetto avviene attraverso una forza unidirezionale sviluppata dopo il contatto diretto non impattivo.

Queste quattro tipologie di pinze, insieme ai tipici esempi, sono elencate nella tabella 1 seguente:

METODO DI PRESA	TIPO DI GRIPPER	ESEMPI TIPICI	TIPO DI MATERIALE
<i>Impactive</i>		Pinze, mani, morse	Oggetti rigidi
<i>Ingressive</i>	Intrusive	Aghi, perni, chiodi	Oggetto flessibile: tessile, fibra di carbonio e vetro
	Non-Intrusive	Ganci, velcro	Oggetto flessibile: tessile, fibra di carbonio e vetro
<i>Astrictive</i>	Aspirazione	Aspiratori	Oggetti non porosi, materiali rigidi
	Magneto-adesione	Campo elettrico	Materiali ferromagnetici
	Elettro-adesione	Campo-elettrico	Materiali leggeri in fogli e microcomponenti
<i>Contigutive</i>	Termici	Congelamento, fusione	Oggetto flessibile: tessile, fibra di carbonio e vetro
	Chimici	Adesivi Permatack	Fibre di carbonio con impregnazione di colla
	A Fluido	Azione capillare, tensione superficiale	Oggetti piccoli e leggeri (microcomponenti)

Tabella 1: Classificazione delle pinze in base al principio di funzionamento e adattabilità con diversi materiali.

La maggior parte delle pinze industriali sono di tipo Impactive oppure Astrictive (aspirazione o elettromagnetici) grazie alla maggiore flessibilità e al minor costo. Le altre tipologie vengono impiegate principalmente in specifici settori, come l'industria tessile, alimentare o elettronica.

I gripper di tipo Ingressive possono essere suddivisi in due ulteriori categorie (come mostrato dalla tabella precedente): *Intrusive* e *Non-Intrusive*, i primi penetrano attraverso il materiale mentre i secondi in genere si limitano ad unirsi al pezzo stesso o ad agganciarlo.

Allo stesso modo gli Astrictive gripper possono essere suddivisi in tre sottogruppi: ad *Aspirazione*, *Magneto-Adesione* e *Elettro-adesione*. Sebbene l'elettro-adesione è adatto con quasi tutti i materiali, sia conduttori che non conduttori, è limitata ad oggetti molto leggeri a cause della modesta forza di attrazione. I sistemi ad aspirazione sono anche adatti per qualsiasi tipo di materiale e fornisce una forza di presa molto più grande rispetto a quelli a Elettro-adesione e questo consente di afferrare oggetti più pesanti. Però è necessario che ci sia un'adesione quasi perfetta tra organo di presa e oggetto da manipolare. Anche i sistemi a Magneto-adesione forniscono una forza di presa non irrilevante ma il suo campo di utilizzo è limitato ai soli materiali ferromagnetici (acciaio, ferro, nichel e cobalto).

GRIPPER	TIPO DI MATERIALE	ESEMPIO DI APPLICAZIONE
A cucchiaio	Rigid	Materiali sfusi come dadi e bulloni
	Flexible	Polveri e fluidi viscosi
Uncino	Rigid	Topologia determinata ad esempio i getti
	Flexible	Raccolta differenziata di materiali

Tabella 2: Altri metodi di presa normalmente non classificati

Altri schemi di classificazione proposti, ad esempio in [6] contengono solo 3 metodi di presa. In genere in molte classificazioni i metodi a cucchiaio o a uncino sono assenti. La tabella 1 elenca i metodi e le possibili applicazioni per tali tipologie di pinze. Di seguito sono approfondite le quattro categorie di gripper elencate in precedenza.

1.2.1 Impactive Gripper

Rappresentano la tipologia di gripper più utilizzata a livello industriale, grazie alla larga varietà di prodotti commerciali, alla loro versatilità e al loro costo ridotto rispetto alle altre tipologie. Questa tipologia di pinze si basa sulle leggi della meccanica classica (Newtoniana). Un movimento primario generato da un attuatore produce in un movimento delle griffe della pinza tramite una catena cinematica.

La trasmissione del moto dall'attuatore alle griffe, secondo [1] e [2], può essere realizzata da diversi sistemi, in particolare:

- Sistemi articolati a leve;
- Ingranaggi a vite e madrevite;
- Meccanismi di guida a cuneo (Wedge-Hook)
- Sistemi a camme;
- Meccanismi a pignoni e cremagliera;
- Sistemi a cinghia e puleggia.

I sistemi a leva sono costituiti da aste rigide collegate tramite degli accoppiamenti o giunti. I giunti possono garantire diversi tipi di movimento, ad esempio rotazionale, traslazionale (accoppiamento prismatico), sferico o elicoidale. Ogni tipo di accoppiamento è caratterizzato da un certo numero di gradi di libertà. Ad esempio, i giunti sferici presentano 3 g.d.l. (ovvero le tre rotazioni), mentre l'accoppiamento prismatico presenta solo 1 g.d.l. (solo una traslazione in un'unica direzione). La Figura 2 mostra i diversi sistemi cinematici impiegati per la trasmissione del moto alle griffe.

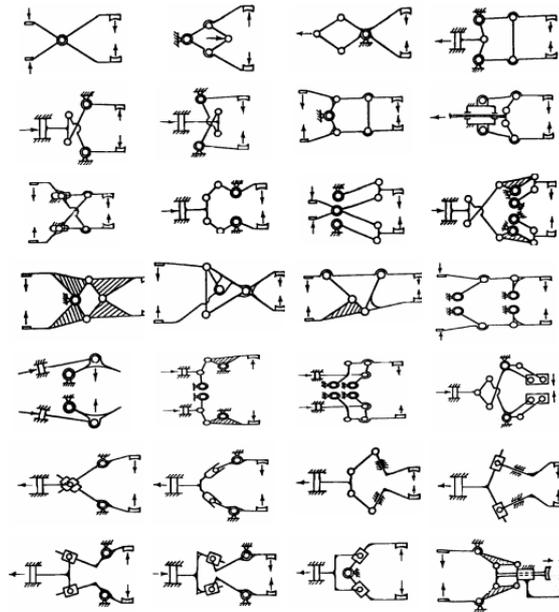


Figura 2: Esempi di sistemi cinematici trattati

Tutti i giunti meccanici hanno un problema comune. Il loro principio di funzionamento, infatti, richiede un certo gioco tra gli elementi accoppiati in modo da consentirne il loro movimento relativo. Maggiore è il gioco e minore sarà la precisione meccanica e la ripetibilità delle operazioni. Il gioco meccanico è direttamente proporzionale al numero di giunti del sistema. Secondo *H. Schunk* nel testo [3] esistono due tecniche di presa principali: *Force-lock* e *Form-lock*, alcuni esempi sono illustrati in tabella di Figura 3.

	principle of function	force lock	form lock
gripping with one contact surface	adhesive grip		
	reverse grip		
gripping with more than one contact surface	force-fit		
	force-fit/form-fit		
	form-fit		

Figura 3: Esempi di tipi di presa Force-lock e Form-lock

La forza di presa e la sicurezza del serraggio sono fortemente influenzati dal lasco introdotto dal gioco, dalla dinamica e dalla forma delle dita di presa (come mostrato dalla Figura 4).

force-fit gripping	form-fit gripping	
		
$F = \frac{m \cdot g}{2\mu} \left(1 + \frac{a}{g}\right) \sin \frac{\alpha}{2} \cdot S$	$F_0 = m \cdot (a+g) \cdot S$	$F_0 = m \cdot (a+g) \cdot \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{2}$
$F_0 = \frac{5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2}{2 \cdot 0,1} \left(1 + \frac{6 \text{ m/s}^2}{10 \text{ m/s}^2}\right) \sin \frac{90^\circ}{2} \cdot 2$	$F_0 = 5 \text{ kg} \cdot (6 \text{ m/s}^2 + 10 \text{ m/s}^2) \cdot 2$	$F_0 = 5 \text{ kg} \cdot (6 \text{ m/s}^2 + 10 \text{ m/s}^2) \cdot \frac{\tan 45^\circ}{2} \cdot 2$
$F_0 = 565,7 \text{ N}$	$F_0 = 160 \text{ N}$	$F_0 = 80 \text{ N}$

Figura 4: Confronto tra prese Force-fit e Form-fit

Nella presa **Force-lock** (o *Force-fit*) il sostegno avviene esclusivamente grazie alle forze di attrito che si sviluppano tra l'oggetto e le griffe della pinza. Per questo è necessario che le dita siano realizzate con un materiale che presenta un elevato coefficiente di attrito. La presa **Form-lock** (o *Form-fit*) invece si ottiene con dita adattate alla forma dell'oggetto grazie alle quali la forza si distribuisce lungo tutta la superficie di contatto. In questo caso la forza necessaria per la presa risulta minore rispetto una corrispondente presa force-lock.

Come dimostrato, il valore della forza varia molto nelle diverse condizioni di presa. Tuttavia in [1] viene fornita una formula generale che può essere adattata ad ogni tipologia di pinza di tipo Impactive per avere una stima della forza iniziale di presa:

$$F_G = \frac{m \cdot g \cdot f_s}{\mu \cdot n} \quad [N] \quad (1)$$

Dove:

- m massa dell'oggetto [Kg];
- g accelerazione di gravità [m/s²];
- f_s fattore di sicurezza;
- μ coefficiente di attrito;
- n numero di griffe.

In genere gli Impactive Gripper sono costituiti da due o più griffe che si muovono simmetricamente rispetto all'asse centrale. Tuttavia, esistono delle pinze in cui il movimento è limitato solo ad un'unica griffa (pinze a singola griffa mobile). Le pinze possono essere classificate in base al **tipo di movimento delle griffe**. A tal proposito si distinguono in pinze ad:

- Accostamento parallelo
- Accostamento angolare o radiale

Nelle pinze ad accostamento parallelo le griffe rimangono sempre perpendicolari alla base, il movimento è lineare lungo tutta la corsa. Esistono gripper paralleli ad una sola griffa mobile, a due griffe con movimento, sincrono o indipendente, ma anche a tre o quattro griffe concentriche autocentranti. Le pinze con un numero maggiore di griffe sono utilizzate per l'assemblaggio di O-Ring e guarnizioni. Le pinze ad accostamento parallelo possono essere a singolo effetto e a doppio. Quelle a singolo effetto consentono di afferrare il pezzo solo nella fase di apertura o chiusura, mentre le a doppio effetto possono operare sia in apertura che in chiusura, rispettivamente compiendo una presa interna o esterna. La superficie e la geometria delle griffe deve essere progettata in base al tipo di oggetto che si deve afferrare. Di seguito si riportano alcuni esempi di gripper ad accostamento parallelo.



Figura 5. Esempi di gripper Paralleli: a) gripper a due griffe con superficie piana; b) gripper a due griffe opportunamente sagomata; c) gripper a tre griffe autocentranti

I gripper ad accostamento angolare sono caratterizzati da un movimento delle griffe lungo un percorso curvilineo, attorno ad un punto fisso detto fulcro. L'apertura angolare massima può arrivare fino a 180° , in questo caso la pinza prende il nome di gripper radiale. Queste pinze generano un movimento puramente rotatorio di facile implementazione, sono affidabili e hanno costi decisamente più bassi della versione a griffe parallele. Anche per i gripper ad accostamento angolare esistono le versioni a doppio effetto, per prese interne o esterne e a singolo effetto con molla di sicurezza. L'apertura può essere simmetrica o asimmetrica ad una, due o tre griffe mobili autocentranti.

Grazie alla loro apertura massima di 180° , i gripper ad accostamento radiale sono particolarmente adatti per le operazioni di montaggio e per la presa di oggetti su tavoli rotanti o nastri trasportatori. In queste applicazioni, l'utilizzo di gripper ad accostamento radiale consente di ridurre il numero di movimenti necessari per l'afferraggio in quanto, l'apertura fino a 180° consente di evitare la retrazione del manipolatore.

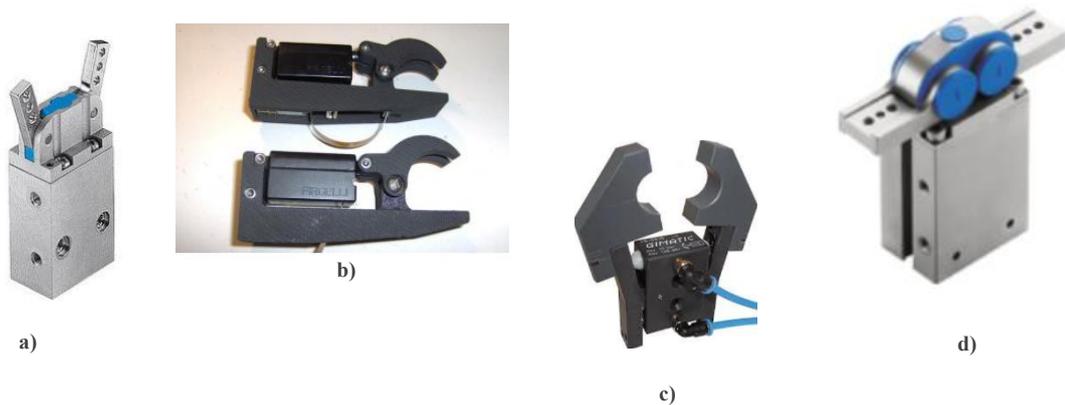


Figura 6. Esempi di Gripper Angolari e Radiali: a) gripper a due griffe con superficie piana; b) Gripper a due griffe con singola griffa mobile; c) Gripper a due griffe con superficie sagomata; d) Gripper Angolare a due griffe

1.2.2 Ingressive Gripper

Questa categoria di pinze è progettata in modo che il meccanismo di presa possa penetrare nella superficie dell'oggetto da manipolare. Infatti, con il termine *Ingressive* è usato per riferirsi a quei metodi di presa che penetrano la superficie dell'oggetto da manipolare ad una data profondità oppure che “agganciano” l'oggetto in uno o più punti garantendone la presa. Ovviamente questa tipologia di organi di presa è adatta a materiali flessibili morbidi, porosi e fibrosi come tessuti o pannelli di fibra di vetro o carbonio.

I principali requisiti che devono avere queste tipologie di gripper sono:

- Fornire la forza necessaria per il sostegno dell'oggetto senza danneggiare il materiale
- Flessibilità in modo tale da gestire un'ampia gamma di oggetti di varia forma e dimensione
- Alta precisione e affidabilità
- Alta frequenza di lavoro

La loro storia in realtà precede la robotica in quanto il loro primo utilizzo era in combinazione con i vecchi sistemi di tessitura, in molti casi come semplice aiuto per l'operatore addetto all'assemblaggio dell'indumento.

Questi sistemi applicano una forza di presa solo su una superficie dell'oggetto, a differenza delle tecniche impactive in cui la presa si realizza su più superfici. Un'altra differenza sostanziale di questi gripper è che consentono di trattenere l'oggetto senza la necessità di mantenere una forza applicata, mentre nel caso di impactive gripper la forza di presa viene raggiunta e mantenuta tale per tutta la fase di movimentazione.

Gli Ingressive gripper possono essere suddivisi in due ulteriori sottogruppi, in particolare:

- Intrusivi
- Non-Intrusivi

La prima categoria è quella più diffusa e più interessante. Utilizza mezzi intrusivi come aghi, perni o chiodi che attraversano il materiale. Le più recenti tecnologie consistono in una distribuzione più o meno fitta di aghi fissati su una piattaforma piana, cilindrica o su un nastro. Il movimento opposto di due o più di queste strutture su un materiale permette agli aghi di penetrarlo consentendone la presa. Le pinze intrusive tipiche impiegano dai 10 a 40 aghi sottile e levigati orientati in diverse direzioni. Gli aghi hanno in genere un diametro compreso tra 0,5 e 2 mm con una profondità di penetrazione tipicamente compresa tra 0 e 5 mm. Le punte degli aghi sono leggermente arrotondate in modo tale da evitare che danneggino il materiale.

Da [1] è stato possibile osservare che esistono due principali movimenti per effettuare la presa di un materiale. Gli aghi possono essere allontanati mantenendo il materiale in tensione oppure fatti scorrere verso l'alto.

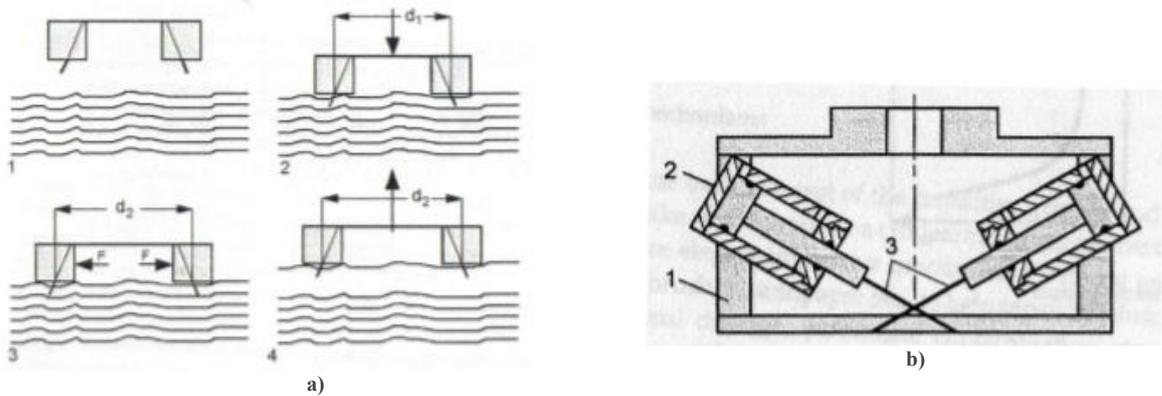


Figura 7. a) Intrusive Gripper per la separazione dei tessuti; b) Intrusive Gripper a doppio pistone

La Figura 7.b illustra un esempio di un gripper intrusivo con azionamento pneumatico. Il movimento lineare del pistone viene convertito, tramite un sistema cinematico a cuneo, nell'uscita degli aghi. Interrompendo l'alimentazione una molla consente il rientro degli aghi.

La forza di presa dipende dal numero di aghi, dalla loro distribuzione e soprattutto dall'inclinazione. Il grafico di Figura 8 mette in relazione la forza di presa con l'inclinazione degli aghi. Come si può osservare, la forza aumenta al diminuire dell'angolo e quindi con aghi molto inclinati.

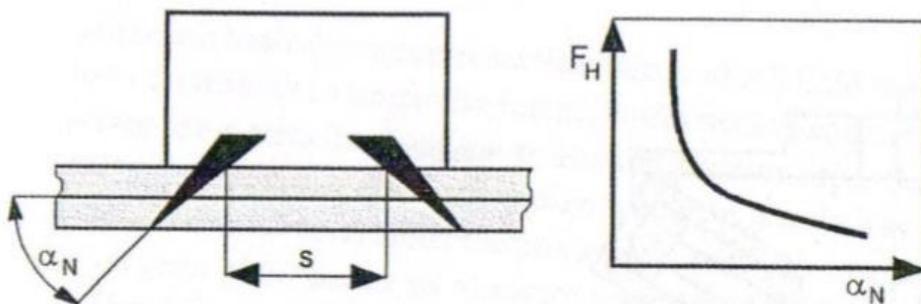


Figura 8. Caratteristica forza-inclinazione per un Intrusive Gripper

La forza di presa può essere valutata anche per via analitica. Con l'aiuto del diagramma in Figura 8, la forza di presa (F_H) può essere calcolata tramite le seguenti equazioni:

$$F_H = \sigma * A_N * n_N \quad [N] \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{E_{z6\%} * d}{2 * s * \sin \alpha_N} \quad [MPa] \quad (3)$$

$$A_N = \frac{d^2 * \tan^2 \frac{\gamma}{2}}{\sin \alpha_N} \quad [m^2] \quad (4)$$

dove:

- σ sollecitazione meccanica (pressione) [N/m²];
- A_N area della sezione trasversale di un ago [m²];
- $E_{z6\%}$ modulo di Young effettivo del materiale tessile al 6% della deformazione meccanica [N/m²];
- d spessore dello strato [m];
- s distanza tra gli aghi [m];
- n_N numero di aghi;
- α_N angolo di penetrazione degli aghi;
- γ angolo di apertura dell'ago.

La seconda categoria di Ingressive Gripper utilizza elementi non-intrusivi come ganci o velcro. Per dettagli sui gripper non-intrusivi consultare [1].



Figura 9. Esempi di Ingressive Gripper

1.2.3 Astrictive Gripper

Come suggerisce il nome stesso, gli astrictive gripper hanno la proprietà di fornire una forza di tenuta continua senza la necessità dell'applicazione di sforzi di compressione sull'oggetto da manipolare (come nel caso degli impactive gripper). Un'altra differenza sostanziale di questa tipologia di gripper, che li distingue dai sistemi descritti in precedenza, risiede nel fatto che pinze di questo tipo necessitano un approvvigionamento energetico continuo portando quindi ad elevati costi operativi che ne limitano il loro impiego. Fanno parte di questa categoria di pinze i **sistemi ad aspirazione, magneto-adesivi ed elettro-adesivi**.



Figura 10. Esempi di Astrictive Gripper

Sistemi di presa ad aspirazione

La tipologia di sistemi *astractive* maggiormente usata negli impianti industriali è quella che sfrutta la tecnologia del vuoto (vacuum suction). I gripper che utilizzano questa tecnologia sono detti *suction gripper* (Figura 10) e si possono distinguere in base al metodo di presa: una tipologia utilizza generatori del vuoto (*vacuum suckers*), l'altra invece aderisce tramite ventose (*passive suction cups*)[5]. I gripper ad aspirazione sono molto versatili in quanto possono essere utilizzati per la manipolazione di oggetti grandi e sia oggetti di piccole dimensioni come nell'industria dei semiconduttori o nel microassemblaggio. Il principio di funzionamento è molto semplice, una calotta flessibile (*suction cap*) viene compressa ermeticamente sulla superficie dell'oggetto. All'interno della calotta viene generata una pressione negativa e di conseguenza si sviluppa la forza necessaria per il sostegno dell'oggetto. I vacuum suckers generano il vuoto attraverso dei sistemi elettro-meccanici. La calotta flessibile del gripper a contatto diretto con l'oggetto è detta *suction head* e tipicamente è di materiale elastomerico. Teoricamente il vuoto può essere prodotto con uno dei seguenti metodi:

- pompe (*vacuum pumps*)
- generatori ad effetto Venturi (*ejectors*)
- soffiatori (*vacuum blowers*)
- cilindri pneumatici (*pneumatic cylinders*)

L'uso delle **pompe** per la generazione del vuoto consente di ottenere il massimo vuoto possibile, basso rumore e bassi costi operativi. Gli svantaggi sono legati agli alti costi iniziali e la necessità di altri accessori come ad esempio serbatoi d'aria. Inoltre, la dimensione e il peso della pompa rendono difficile il montaggio diretto della testa della pinza. I **generatori ad effetto Venturi** sono facili da installare, con bassi costi iniziali e hanno inoltre il vantaggio di non avere parti in movimento e possono essere direttamente integrati nel gripper. Tuttavia presentano degli elevati costi operativi a causa del continuo consumo di aria compressa. I **soffiatori** sono facilmente controllabili ma producono bassi valori di vuoto e questo li rende adatti per la presa di oggetti porosi. La Figura 11 mostra un confronto tra diversi metodi di generazione del vuoto sopra elencati. Per quanto riguarda i sistemi ad aspirazione **pneumatici** sono usati specialmente per applicazioni di assemblaggio. Non dipendono direttamente da un flusso di aria compressa ma producono alternativamente un'aspirazione e un'espulsione in base alla corsa del pistone.

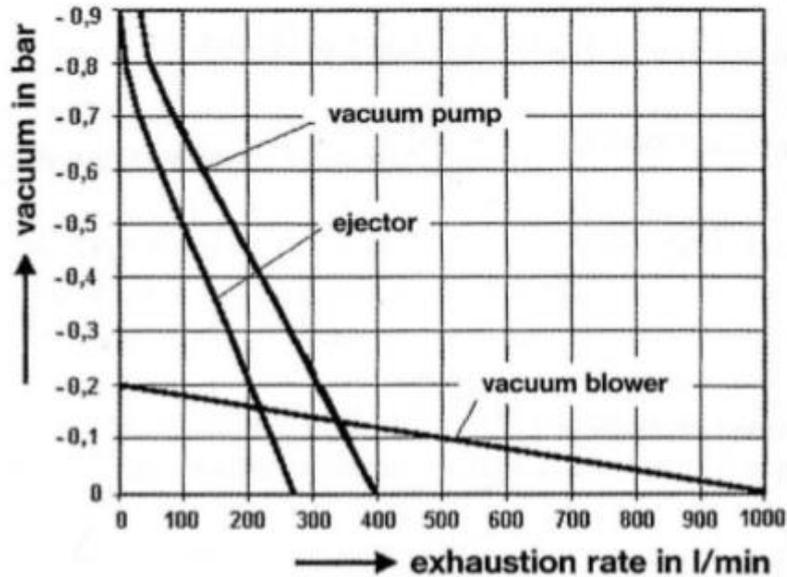


Figura 11. Confronto tra i diversi sistemi di generazione del vuoto

La pressione esercitata sull'oggetto è data dal rapporto tra la forza di presa (F) e la superficie attiva (A). Tenendo in considerazione gli effetti della gravità (g) e dell'accelerazione del robot (a) su un oggetto di massa (m), la pressione di ritenuta (σ) si ottiene dall'equazione 5 .

$$\sigma = \frac{F - m \cdot (g + a)}{A} \quad [MPa] \quad (5)$$

Per un tipico gripper ad aspirazione, la forza iniziale statica di presa è data approssimativamente da:

$$F = (\sigma_0 - \sigma_u) \cdot A \quad [N] \quad (6)$$

dove:

$-\sigma_0$ pressione atmosferica [Pa];

$-\sigma_u$ pressione del vuoto applicata [Pa];

- A area della superficie di contatto tra la ventosa e l'oggetto [m^2];

Come già detto in precedenza, gli astrictive gripper necessitano di un'alimentazione continua di conseguenza il consumo di potenza avviene sia durante la prensione e sia durante la fase di ritenuta. Facendo il rapporto tra la potenza assorbita (P) e la pressione di ritenuta (σ) è possibile ricavare la portata volumetrica (Q).

$$Q = \frac{P}{\sigma} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (7)$$

L'efficienza energetica della pinza diminuisce all'aumentare della portata volumetrica.

Generalmente il vuoto che si riesce a produrre è compreso tra il 10% (-0.101 bar) e il 90% (-0.912 bar). Tuttavia, pressioni negative oltre il 60% sono costose da realizzare (dati forniti da [1]). Non appena viene effettuata la presa e il robot inizia a muoversi entrano in gioco alcuni effetti negativi. Infatti, tutte le teste di aspirazione, in particolare i sistemi a ventosa o calotta deformabile, possono deformarsi eccessivamente. Questo, insieme alle perdite, contaminanti superficiali etc., può portare ad una riduzione della forza di aspirazione.

Per tenere conto di tutti questi effetti negativi l'equazione (6) assume la seguente forma:

$$F = (\sigma_0 - \sigma_u) \cdot A \cdot n \cdot \eta \cdot z \cdot \frac{1}{f_s} + mg \quad [N] \quad (8)$$

dove:

- n coefficiente di deformazione (0.9 ÷ 0.6)

- η rendimento del sistema

- z numero di ventose

- f_s fattore di sicurezza (2 ÷ 3)

La forza di presa è funzione dell'area attiva che a sua volta è determinata dalla geometria della calotta. In condizioni statiche o lentamente variabile il diametro (d) di una suction cap circolare può essere calcolato (approssimativamente) tramite la seguente relazione:

$$d = 11.3 \sqrt{\frac{m \cdot g}{\sigma_u \cdot z}} \quad [mm] \quad (9)$$

Nelle ventose il vuoto viene creato semplicemente comprimendo la calotta di materiale morbido contro una superficie liscia o leggermente curva dell'oggetto. La compressione può essere manuale, meccanica, ad azionamento pneumatico oppure elettrico. In questo caso la presa non dipende da nessuna fonte di alimentazione quindi viene considerata sempre sicura anche se eventuali perdite non possono essere compensate. Il rilascio dell'oggetto può essere realizzato tramite una valvola sulla calotta che permette la compensazione con la pressione atmosferica. Il limite principale di queste tipologie di organi di presa è la necessità di avere una superficie piana o con una leggera curvatura. Oggetti con geometrie complesse o intrigate non possono essere trattati da questi dispositivi.

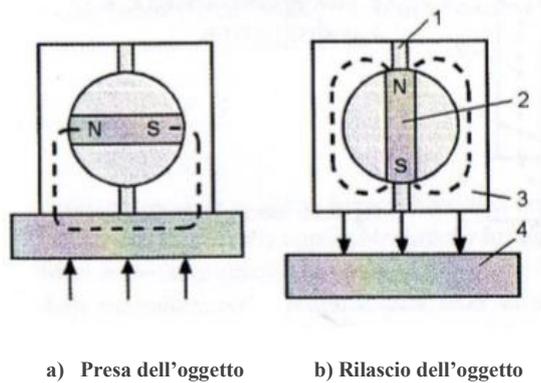


Figura 12. Ventose a vuoto

Magnetoadesione

I gripper ad azione magnetica possono essere utilizzati solo per la manipolazione di oggetti ferromagnetici. Esistono due tipologie distinte: a *magnete permanente* (forma passiva) ed a *elettromagnete* (forma attiva)[1].

La Figura 13 mostra il principio di funzionamento di un gripper a magneti permanenti. Il magnete viene avvicinato o posto a contatto con l'oggetto consentendone la presa. Il procedimento di rilascio avviene meccanicamente attraverso il distanziamento forzato dei componenti. Una possibile soluzione può essere quella di deviare il flusso magnetico ruotando la calamita come descritto in Figura 13 oppure mediante un sistema pneumatico a leve, che agisce sul pezzo o sul magnete consentendo il distacco.



1. materiale non magnetico
2. magnete permanente
3. alloggiamento ferromagnetico
4. oggetto

a) Presa dell'oggetto b) Rilascio dell'oggetto
 Figura 13. Controllo meccanico del flusso magnetico

Per i magneti permanenti appositamente progettati, la pressione di ritenuta si aggira tra 100 a 200 [kN/m²]

Il punto di forza principale di questa tipologia di gripper è la capacità di mantenere la forza di presa in modo continuo anche in assenza di alimentazione. Sussiste però il problema della magnetizzazione residua sull'oggetto che può causare l'attrazione di altri materiali ferromagnetici. Questa attrazione può essere limitata rivestendo la superficie magnetica della pinza con un sottile strato di materiale polimerico. Un altro problema può derivare dal fatto che la presa effettiva non comincia a contatto avvenuto, come per i gripper elettromagnetici, ma il magnete attira l'oggetto prima dell'effettivo contatto. Questo causa un impatto tra oggetto e gripper che in alcuni casi può provocare danni ai componenti. Il magnete permanente mantiene le sue proprietà magnetiche indefinitamente, tuttavia, ad elevate temperature (oltre il punto di Curie tipico del materiale) si ha un drastico deterioramento del campo magnetico e di conseguenza una riduzione delle prestazioni. Ad esempio, i magneti ceramici possono sopportare temperature vicine ai 100°C mentre i magneti AlNiCo possono operare fino ad una temperatura di 450°C.

Un campo magnetico può essere anche generato elettricamente come mostrato in Figura 14. In questo caso si parla di *pinze elettromagnetiche*. Esse sono costituite da una o più bobine avvolte su nuclei ad alta permeabilità magnetica. La forza di prensione può essere calcolata (nella sua forma più semplice) usando le formule elettromagnetiche convenzionali.

$$F = B \cdot I \cdot l \quad [N] \quad (10)$$

dove:

- B densità del flusso magnetico [T];

- I densità di corrente [A];

- l lunghezza del conduttore [m];

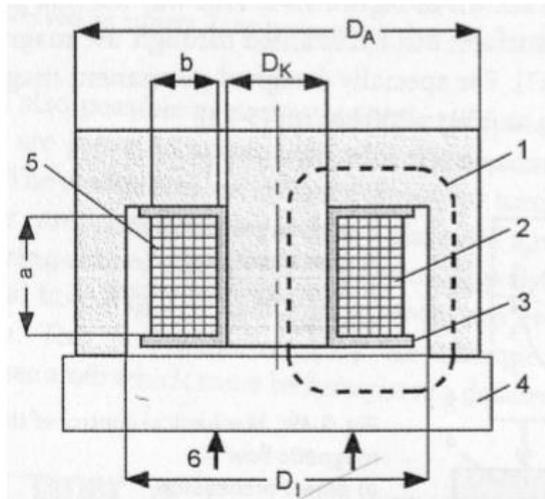


Figura 14. Gripper elettromagnetico

1. percorso di flusso magnetico
2. bobina con n-avvolgimenti
3. bobina precedente
4. oggetto di materiale ferromagnetico o metallico
5. sezioni trasversali dell'avvolgimento $a \cdot b$
6. forza di prensione

Ricordiamo che la densità di flusso magnetico è data dalla relazione:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \frac{\Phi}{A_m} \quad [T] \quad (11)$$

dove:

$-\mu_0$ permeabilità magnetica del vuoto [$4\pi \cdot 10^{-7} H/m$]

$-\mu_r$ permeabilità relativa

$-H$ campo di intensità magnetica [amps/metre]

$-\Phi$ flusso magnetico [Weber]

$-A_m$ area del percorso magnetico [m^2]

Come si può osservare dalla equazione (11), la densità di flusso magnetico (B) è direttamente proporzionale al campo di intensità magnetica (H). Nella realtà si dovrebbe tenere conto della saturazione del mezzo ferromagnetico. L'equazione 12 permette di calcolare il campo di intensità magnetica (H) conoscendo il numero di avvolgimenti N , la corrente I e la lunghezza del percorso magnetico nel nucleo p .

$$H = \frac{N \cdot I}{p} \quad [A/m] \quad (12)$$

Combinando opportunamente le formule 10, 11 e 12 può esplicitare la forza di presa in funzione della corrente e di parametri di forma.

$$F = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot I^2 \cdot l}{2p} \quad [N] \quad (13)$$

Dividendo per l'area è possibile ottenere la pressione esercitata sull'oggetto.

$$\sigma = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot I^2 \cdot l}{2p \cdot A} \quad [N/m^2] \quad (14)$$

Si evince che per avere un'alta forza di presa bisogna aumentare l'intensità del campo magnetico, ad esempio aumentando il numero di avvolgimenti N , questo però comporta un aumento del tempo di risposta in quanto si ha un aumento della costante di tempo legata alla legge di carica della corrente.

Il tempo di reazione del gripper infatti, dipende dal tempo che ci impiega la corrente ad arrivare al suo valore di regime. Sappiamo che per un circuito *Resistivo-Induttivo* (RL) l'equazione di carica della corrente è una relazione esponenziale del tipo:

$$i(t) = I_s \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad [A] \quad (15)$$

mentre per la fase di scarica si ha:

$$i(t) = I_s \cdot e^{-t/\tau} \quad [A] \quad (16)$$

dove τ è la costante di tempo data da:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [s] \quad (17)$$

con L induttanza della bobina e la resistenza complessiva degli avvolgimenti, entrambi dipendenti dai parametri di forma. È più chiaro adesso che, aumentando il numero di avvolgimenti N ,

aumenta il valore dell'induttanza L , della costante di tempo τ e di conseguenza aumento il tempo di risposta.

I gripper elettromagnetici possono lavorare sia in corrente continua e sia in corrente alternata. In entrambi i casi, dopo il rilascio, sull'oggetto rimane una magnetizzazione residua che può provocare ritardi nei tempi di risposta o problemi nelle successive lavorazioni, ad esempio l'oggetto magnetizzato potrebbe attrarre altri oggetti ferromagnetici o polveri. Questo fenomeno si può ridurre utilizzando corrente alternata ad alta frequenza ma sorgono altri fattori da tenere in considerazione.

I punti di forza dei gripper elettromagnetici sono principalmente:

- facile costruzione, senza parti in movimento
- controllo reciso e semplice alimentazione
- assenza di predite per attrito
- alta forza di presa
- utilizzabili per oggetti con forme e dimensioni variabili

mentre gli svantaggi sono:

- possono trattare solo materiali ferromagnetici
- magnetizzazione residua
- un'improvvisa mancanza di alimentazione causa l'immediato rilascio dell'oggetto
- il peso e le dimensioni sono direttamente proporzionali alla forza di presa
- non è possibile effettuare il centraggio dell'oggetto all'interno della pinza
- la separazione degli oggetti di fogli sottili l'uno dall'altro è difficile a causa degli effetti di permeazione del campo magnetico
- nel caso di alimentazione in corrente continua l'oggetto può diventare leggermente magnetizzato. Ciò può comportare dei costi aggiuntivi qualora fosse necessario smagnetizzare le parti in una fase successiva.

Elettroadesione

L'elettroadesione sfrutta i campi elettrostatici per sviluppare una forza di tipo attrattivo. Il metodo attivo più semplice si basa sulla forza prodotta all'interno di un dielettrico sottoposto ad un campo elettrico esterno. In questa versione di gripper è il campo elettrico a fornire la forza necessaria per la presa di un oggetto. A differenza dei sistemi a magneti permanenti, la forza attrattiva, sviluppata dai campi elettrostatici, è difficile da quantificare. Tuttavia, è possibile eseguire alcuni calcoli per dare una stima delle forze coinvolte in questi sistemi.

Dagli anni '90 l'elettroadesione è stata ampiamente utilizzata, in particolare negli Stati Uniti e in Giappone, per la ritenzione dei wafer² di semiconduttori durante la lavorazione (mandrini elettrostatici).

I gripper elettroadesivi, a confronto con quelli ad aspirazione, sono in grado di sollevare wafer contenenti fori e possono lavorare in ambienti dove è stato creato il vuoto[5]. Per questi motivi è cresciuto l'interesse di questa tipologia di gripper soprattutto tra i produttori di chip.

La Figura 15 mostra un tipico esempio di gripper elettrostatico e il suo circuito elettrico equivalente.

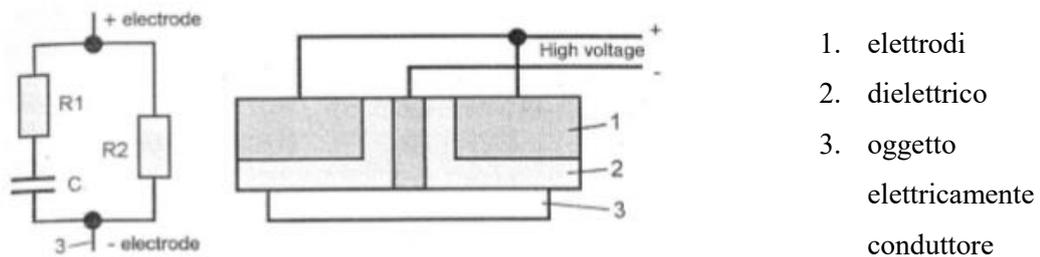


Figura 15. Sezione trasversale di un gripper elettrostatico con circuito elettrico equivalente

In questo caso l'oggetto stesso è collegato direttamente a un lato dell'alimentazione, attraverso l'elettrodo centrale della pinza, che naturalmente deve essere collegato a terra per motivi di sicurezza. Il circuito è costituito da due resistenze e un condensatore e questa configurazione permette di massimizzare la forza di attrazione sviluppata da questo dispositivo di presa. La tensione applicata (EHT) è in genere di diverse migliaia di Volt. Dalla teoria elettrostatica sappiamo che il valore della capacità di un condensatore piano con armature di area A distanti d con costante dielettrica relativa ϵ_r è data da:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad [F] \quad (18)$$

dove ϵ_0 è la permittività dielettrica del vuoto ($\epsilon_0 = 8.854 \dots \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$), A area di contatto tra gripper e l'oggetto e d spessore dielettrico. Sostituendo l'equazione 15 nell'equazione fisica dell'energia 16

$$e = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = F \cdot d \quad [N \cdot m] \quad (19)$$

² Wafer: piastrina di materiale semiconduttore che serve da base per la realizzazione dei circuiti integrati.

si può calcolare la forza di presa in funzione unicamente della differenza di potenziale applicata e dei parametri di forma:

$$F = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot d^2} \quad [N] \quad (20)$$

Infine, per ottenere la pressione esercitata sull'oggetto è sufficiente riarrangiare le relazioni 15 e 17.

$$\sigma = \frac{c \cdot V^2}{2 \cdot A \cdot d} \quad [N/m^2] \quad (21)$$

Dalle relazioni si evince che è possibile incrementare la forza di presa aumentando la differenza di potenziale ai capi del condensatore o aumentando la capacità. Tuttavia l'aumento della differenza di potenziale è limitato dalla tensione di rottura del dielettrico. La capacità può essere aumentata agendo sul materiale (ε_r) oppure sulle dimensioni (A o d). Come nei gripper magnetici il tempo di reazione dipende dalla costante di tempo τ che in questo caso, per un circuito *Resistivo-Capacitivo* (RC) assume la forma:

$$\tau = R \cdot S \quad [s] \quad (22)$$

anche in questo caso quindi un alta forza di presa si ottiene a discapito della prontezza del sistema. In genere la forza dei gripper elettroadesivi è minore di quelli magnetici, però questa tecnologia consente la presa di materiali ferromagnetici e metalli non ferromagnetici. Il principio di funzionamento rimane più o meno lo stesso tuttavia cambia il tipo di polarizzazione del materiale usato.

Questa tipologia di gripper è adatta a oggetti di dimensioni e peso contenuti, oggetti non ferromagnetici delicati e porosi. Presentano un'elevata efficienza a causa del ridotto consumo di potenza.

Gli svantaggi principali sono:

- forza di presa direttamente proporzionale alle dimensioni
- perdita di efficienza in ambienti molto umidi
- ritardo nel rilascio dell'oggetto dovuto alla scarica non istantanea del condensatore
- elevata tensione di alimentazione

1.2.4 Contigutive Gripper

In genere gli organi di presa fanno affidamento ad un contatto diretto, questa tipologia di gripper crea una continuità tra la superficie attiva del gripper e quella dell'oggetto attraverso l'apporto di materiale specifico. A seconda del tipo di materiale congiuntivo impiegato si possono distinguere due principali tipologie di prese: adesione chimica e la termoadesione.

Adesione Chimica

I sistemi ad adesione sono utilizzati con lo scopo di ottenere un legame permanente o temporaneo tra superfici. Per l'applicazione di manipolazione industriale solo l'ultimo scenario è interessante. L'adesione chimica utilizza strati di materiale adesivo creato appositamente per la specifica applicazione. Esistono numerosi materiali che possono essere utilizzabili come adesivi. Ai fini dell'applicazione nella presa robotizzata, essi devono soddisfare due importanti requisiti: fornire un'adeguata forza di adesione ed essere facilmente e velocemente sostituibili quando le proprietà di adesione vengono meno. I recenti progressi nella chimica dei polimeri hanno portato allo sviluppo di un materiale riutilizzabile (*Permatack*) con elevata forza adesiva in grado di mantenere le sue proprietà per centinaia di operazioni prima di necessitare di una pulizia o della sostituzione.

Uno studio eseguito sulla presa di materiali tessili ha dimostrato che il deterioramento delle proprietà adesive e quindi della capacità di presa, comincia dalla prima operazione ed è stata quantificata da Hall in "*Feeding and Handling Aspects of an Automated System for Garment Manufacture*" con l'equazione:

$$F = a \cdot N^{-k} \quad [N] \quad (23)$$

dove a è una costante dipendente dalla superficie di contatto e dalla contaminazione del materiale, N è il numero di operazioni di rilascio e k è una costante dipendente dal materiale. Chiaramente, per una superficie pulita e in assenza di polvere k tende a zero e la forza di presa rimane costante. Ovviamente la pressione dipende fortemente dal tipo di superficie (liscia o ruvida), anche se in tutti i casi è necessario un valore di pressione superiore a 3 kN/m^2 . Anche il

tempo di ritenzione influenza il valore della pressione e quindi della forza di presa. Questo concetto può essere quantificato prendendo in considerazione che la pressione iniziale σ_i decresce in modo esponenziale in funzione del tempo di adesione t_0 . La pressione σ_0 quindi dipende dal tempo di adesione tramite la relazione del tipo:

$$\sigma_0 = \sigma_i \cdot e^{-N \cdot t_0} \quad [N/m^2] \quad (24)$$

dove:

- e costante esponenziale (2,7182)
- σ_0 pressione di contatto dipendente dal tempo di ritenzione $[N/m^2]$
- σ_i pressione di contatto iniziale $[N/m^2]$
- t_0 tempo di ritenzione $[s]$

La potenza sarà spesa solo durante la fase iniziale di contatto. La pressione applicata σ_i si ottiene dal rapporto tra la forza F e l'area A .

$$\sigma_i = \frac{F}{A} \quad [N/m^2] \quad (25)$$

La pressione iniziale causa una deformazione d dello strato iniziale. Il volume della massa adesiva è dato dal prodotto $A \cdot d$, la cui deformazione porta alla dissipazione di potenza data dalla relazione 26.

$$P = \frac{A \cdot d \cdot \sigma_i}{t_i} \quad [Watt] \quad (26)$$

Dividendo la potenza per la pressione data nell'equazione 21 si ottiene, ancora una volta, un valore analogo alla portata volumetrica Q .

$$Q = \frac{P}{\sigma_0} = \frac{A \cdot d \cdot e^{N \cdot t_0}}{t_i} \quad [m^3/s] \quad (27)$$

Per un'adesione perfetta σ_i è zero e di conseguenza anche Q sarà zero. Chiaramente, tanto maggiore è la durezza (elevato modulo di Young) del materiale adesivo e tanto minore sarà il valore di Q . L'uso di nastri adesivi nella movimentazione della carta o nel settore tessile ha una lunga storia durante il quale sono stati depositati molti brevetti. I nastri adesivi hanno due svantaggi:

- è necessario un meccanismo grande e costoso per incrementare il nastro dopo ogni ciclo
- il nastro deve essere periodicamente sostituito e questo richiede l'interruzione completa del sistema di produzione con una conseguente perdita della produttività

Un'alternativa è quella di prevedere un nastro alloggiato all'interno di un'unità a cassette che consente una sostituzione automatica o almeno un rapido scambio. Tuttavia, questo sistema è più costoso e il problema legato alle dimensioni fisiche e al numero di parti mobili rimane ancora. In Figura 16 è mostrato un esempio di gripper a nastro adesivo.

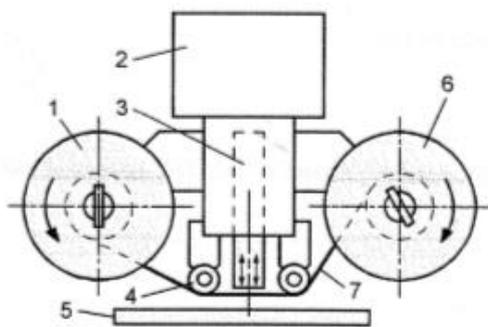


Figura 16. Gripper a nastro adesivo

1. bobina di alimentazione con molla
2. attuatore
3. slitta
4. guida a nastro
5. oggetto piatto
6. avvolgimento robotizzato
7. nastro adesivo

Una volta posizionato sopra l'oggetto da afferrare, una piccola porzione di nastro viene pressata sulla superficie mediante una slitta in metallo azionata da un solenoide, cilindro pneumatico o un altro tipo di attuatore. Nella fase di rilascio, la slitta si retrae e la rotazione della bobina per l'avvolgimento del nastro provoca la separazione del nastro adesivo dalla superficie dell'oggetto.

Termoadesione

La termoadesione viene realizzata inserendo piccole gocce di acqua tra la superficie attiva del gripper e la superficie dell'oggetto e successivamente viene congelata tramite l'applicazione di azoto o biossido di carbonio liquido. Si ha la formazione di uno strato di ghiaccio che funge da strato adesivo (ice bridge); la superficie congelata è mantenuta in genere ad una temperatura di circa -10° C. Il rilascio dell'oggetto viene realizzato sciogliendo lo strato di ghiaccio tramite riscaldamento. Questa tecnologia è adatta per la presa di materiali tessili i quali non soffrono per variazioni di temperatura. Qualche problema si ha con materiali ceramici o materiali che hanno subito cotture. La forza di presa per unità di superficie varia da circa 1 N/mm^2 fino anche a 100 N/mm^2 . La forza effettiva di presa per adesione termica può essere calcolata con l'equazione:

$$F_{ad} = \frac{W_{sl}^{ad} \cdot A_r}{\delta} = \frac{\sigma_{lg}(1 + \cos \theta) \cdot A_r}{R_z} \quad [N] \quad (28)$$

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{gs} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lg}} \quad (29)$$

dove:

- W_{sl}^{ad} lavoro di adesione [J/m^2]
- δ spessore dello strato di materiale termico [m]
- θ angolo di contatto al punto triplo (dove coesistono la fase solida liquida e gassosa)
- A_r area effettiva di contatto [m^2]
- R_z profondità media delle asperità della superficie [m]
- $\sigma_{gs}, \sigma_{sl}, \sigma_{lg}$ stress meccanici delle interfacce [N/m^2]

Anche per questa tipologia di gripper il tempo di ritenzione è legato al tempo di sosta attraverso diverse costanti che dipendono dall'adesivo impiegato e dal tipo di materiale da manipolare. Di conseguenza è possibile, attraverso le corrispondenti proprietà termodinamiche, trovare una relazione simile per le testine di presa termica. In Figura 17 sono raffigurati due esempi di un esempio di Congiuntive gripper termoadesivo per microcomponenti che utilizza *celle di Peltier*.

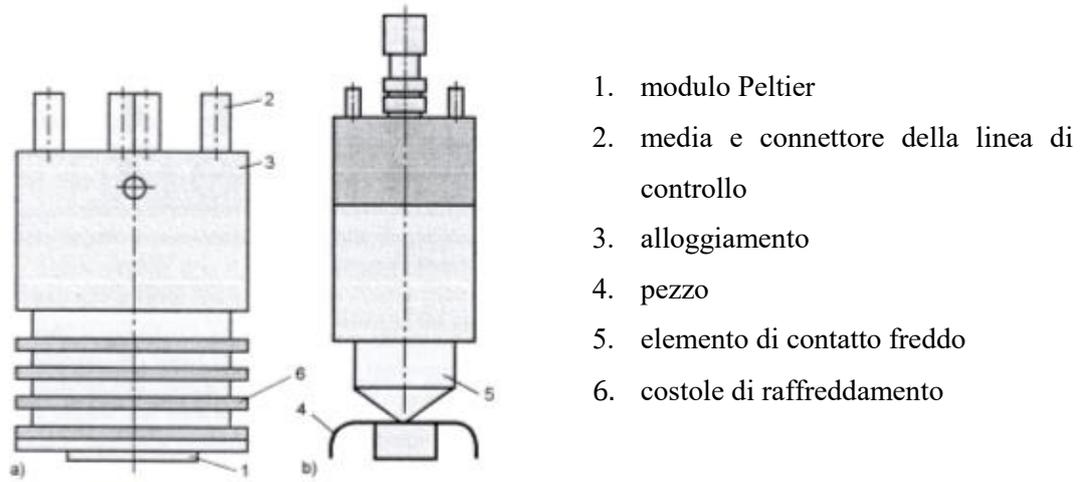


Figura 17. Esempio di gripper a cella di Peltier

Il congelamento di piccole quantità d'acqua è completato in meno di un secondo. La fase di rilascio avviene in tempi più brevi in quanto vengono utilizzati elementi riscaldanti che favoriscono lo scioglimento del ghiaccio e quindi il distacco del pezzo. Anche se sono dispositivi lenti hanno il vantaggio di avere un'unica unità di riscaldamento/raffreddamento.

1.3 Classificazione in base al tipo di applicazione

Una prima classificazione delle pinze può essere realizzata sulla base del tipo di operazione che devono svolgere. A tal proposito si distinguono:

- **Pinze per la manipolazione**: la pinza è adatta alla movimentazione di pezzi da un punto ad un altro. In questo caso la pinza deve esercitare la forza di serraggio necessaria alla ree del pezzo senza danneggiare sé stessa né il pezzo manipolato. La forza esercitate sul pezzo in manipolazione deve essere tale da provocare un attrito che impedisca la caduta per effetto del peso e delle forze d'inerzia dovute alle accelerazioni durante la movimentazione.
- **Pinze per l'assemblaggio**: nell'assemblaggio è necessaria una maggior precisione nella giusta presa del pezzo e nella sua deposizione in loco. La pinza in questo caso è dotata di particolari sensori in modo che, durante l'assemblaggio, vi possono essere degli adattamenti per la riuscita dell'operazione.

1.4 Classificazione in base al sistema di attuazione

L'azionamento è il dispositivo atto a trasformare l'energia in ingresso di vario tipo in energia meccanica sulla base di segnali di comando in bassa potenza.



Normalmente è detto azionamento il sistema costituito dai componenti impiegati per imprimere un movimento pilotato ad un organo meccanico. L'azionamento è caratterizzato dalla natura

dell'elemento che, in funzione del segnale di comando, agisce sul flusso della potenza destinata ad ottenere il moto richiesto: tale elemento è detto *Amplificatore di Potenza*. L'elemento terminale che utilizza la potenza fornita dall'amplificatore per realizzare il movimento richiesto è detto *Attuatore*. Proprio quest'ultimo elemento andrà a conferire il movimento delle dita della pinza. Una prima distinzione delle pinze robotiche può essere fatta proprio in base del sistema di attuazione utilizzato. Come già detto in precedenza le pinze robotiche sono azionate tramite tre principali sistemi di attuazione che sono:

- azionamento pneumatico;
- azionamento oleodinamico o idraulico;
- azionamento elettrico;

Da questi tre tipi di azionamento discende tutta una vastissima serie di soluzioni combinate come ad esempio gli azionamenti pneumatico-oleodinamici, oppure varianti che si diversificano per le caratteristiche dei componenti adottati, ad esempio i diversi tipi di motori pneumatici, le diverse caratteristiche dei motori elettrici ecc. Limiteremo le nostre considerazioni solo alle principali caratteristiche dei tre sistemi di azionamento sopraelencati senza approfondire i sistemi di azionamento combinati.

1.4.1 Azionamento pneumatico

L'energia impiegata è in questo caso sotto forma di aria compressa., disponibile ormai in praticamente ogni officina o complesso industriale. Gli attuatori possono essere lineari o rotativi ed eventualmente occorrono meccanismi capaci di trasformare un moto rotatorio in moto rettilineo o viceversa. Normalmente gli attuatori lineari sono costituiti da cilindri pneumatici (come mostrato in Figura 18). L'attuatore pneumatico è utilizzato dalla maggior parte dei robot industriali, poiché è semplice da utilizzare e controllare, ed è pulito. Altri vantaggi sono il costo ridotto e le minime esigenze di manutenzione. Tuttavia, il sistema di attuazione pneumatico presenta molti svantaggi. In primo luogo, è necessario di un impianto di compressione dell'aria che è fonte di rumorosità; dato che l'aria è fortemente comprimibile essa risente fortemente di sollecitazione esterne che causano una drastica riduzione della precisione; il modesto valore della pressione alla quale l'aria compressa viene utilizzata, per ottenere sforzi di una certa entità, sono necessari cilindri o motori di dimensioni relativamente notevoli. L'azionamento pneumatico viene impiegato esclusivamente nei manipolatori molto semplici ad uno o due gradi di libertà e per l'esecuzione ripetitive semplici di tipo "pick and place".



Figura 18. Tipologie di attuatori pneumatici

1.4.2 Azionamento idraulico

L'azionamento idraulico è sicuramente molto più dispendioso e costoso rispetto a quello pneumatico ma in compenso garantisce delle prestazioni maggiori in termini di capacità di carico, precisione e dinamica nei sistemi di posizionamento. Infatti, grazie a elevati valori di pressione che si riescono a raggiungere con olio in pressione è possibile sviluppare forze e coppie notevoli anche con organi motori di dimensioni ridotte. Potendosi ritenere l'olio incompressibile, gli attuatori idraulici garantiscono movimenti regolari e controllabili con precisione. Altri vantaggi sono la possibilità di utilizzo in ambienti esplosivi, semplice regolazione della forza e della velocità e la possibilità di gestire carichi elevati. Anche in questo caso è necessario un impianto di compressione e una rete di distribuzione dell'olio che fa lievitare i costi, rende l'impianto più complesso ed è fonte di rumorosità. Inoltre, l'olio è fortemente inquinante e questo rende la gestione complessa. Questa tipologia di azionamento è destinata a robot di notevoli dimensioni che devono manipolare oggetti pesanti. Per questo motivo vengono ampiamente utilizzati su macchine movimento terra, industriali, agricole, meccaniche, negli impianti per la regolazione delle acque e lavorazioni forestali.



Figura 19. Tipologie di attuatori oleodinamici

1.4.3 Azionamento elettrico

I motori elettrici sono utilizzati sia nell'automazione e sia nell'azionamento di organi di macchina. Il motore elettrico è l'elemento che trasforma l'energia elettrica, proveniente dal convertitore statico, nell'energia meccanica necessaria per imprimere il moto alla macchina o elemento azionato.

A seconda del tipo di moto si distinguono:

- motori rotanti
- motori lineari

I primi, più usuali, rendono disponibile il moto come rotazione attorno ad un asse; i secondi, producono un movimento in direzione lineare all'asse.

Si tratta dell'azionamento più diffuso per ragioni di precisione, ripetibilità, semplicità di controllo e semplicità di interfacciamento con l'unità di governo. Altri vantaggi sono: facilità di alimentazione e trasmissione dell'energia, assenza di perdite inquinanti collegamenti semplici e ottima dinamica nei sistemi di posizionamento. Al contempo si ha una complessa regolazione della forza e della velocità, necessitano di un riduttore per ottenere coppie elevate e il loro utilizzo è limitato in quanto non possono operare in ambienti esplosivi o deflagranti. Vengono utilizzati azionamenti con: motore passo -passo (sistemi semplici e poco precisi); servomotore a c.c.; motori Brushless; motori asincroni con inverter.



Figura 20. Tipologie di attuatori elettrici

La tabella 3 riassume i principali vantaggi e svantaggi delle tre tipologie di attuatori discussi in precedenza.

TIPO	VANTAGGI	SVANTAGGI
Pneumatico	<ul style="list-style-type: none"> • Funzionamento semplice e affidabile specialmente nei sistemi di controllo discreto; • Completa compatibilità in ambienti esplosivi e deflagranti; • Assenza di perdite inquinanti; • Elevata velocità di rotazione e di movimento lineare; • Semplice regolazione della forza e della velocità; • Collegamenti molto semplici 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessità di un impianto di compressione e rete di distribuzione; • Rumorosità; • Forza e coppie massime limitate; • Necessità di un riduttore per ottenere coppie alte; • Bassa precisione e dinamica nei sistemi di posizionamento
Idraulico	<ul style="list-style-type: none"> • Potenza specifica molto alta; • Forza e coppie massime elevate • Possibilità di utilizzo in ambienti esplosivi e deflagranti; • Buona precisione e dinamica nei sistemi di posizionamento; • Semplice regolazione della forza e della velocità 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessità di centrale oleodinamica e collegamenti complessi; • Rumorosità; • Perdite inquinanti; • Bassa velocità di rotazione e di movimento lineare
Elettrico	<ul style="list-style-type: none"> • Facilità di alimentazione e trasmissione dell'energia; • Elevata velocità di rotazione e di movimento lineare • Buona precisione e ottima dinamica nei sistemi di posizionamento; • Assenza di perdite inquinanti; • Collegamenti semplici 	<ul style="list-style-type: none"> • Complessa regolazione della forza e della velocità; • Necessità di un riduttore per ottenere coppie elevate; • Limitazioni di utilizzo in ambiente esplosivo

Tabella 3: Principali vantaggi e svantaggi degli attuatori elettrici, pneumatici e idraulici

1.4.4 Sistemi di attuazione non convenzionali: azionamento tramite Leghe a Memoria di Forma (SMA)

Oltre ai sistemi di attuazione tradizionali descritti nei precedenti paragrafi esistono altri tipi di sistemi che si prestano abbastanza bene per l'attuazione dei dispositivi di presa in ambito industriale e non. Tra i principali sistemi di attuazione non convenzionale si distinguono:

- attuazione piezoelettrica
- attuazione elettrostatica
- attuazione termica
- attuazione elettromagnetica
- attuazione mediante SMA

L'attuazione piezoelettrica richiede l'utilizzo di materiale piezoelettrico ovvero di materiali in grado di produrre uno spostamento o una vibrazione a seguito dell'applicazione di una corrente elettrica. È un tipo di attuazione affidabile, precisa con un'elevata efficienza. L'unico inconveniente degli attuatori piezoelettrici è il loro spostamento limitato.

È possibile costruire alcune parti specifiche del manipolatore utilizzando del materiale piezoelettrico (PZT). La Figura 21 mostra una struttura monolitica in grado di manipolare componenti le cui dimensioni oscillano tra pochi micron e alcune centinaia di micron; i bracci della zona di presa risultano sempre allineati in quanto si muovono parallelamente sfruttando la deformabilità elastica di cerniere flessionali al posto di cuscinetti, giunti e/o ingranaggi. Quest'ultimo aspetto consente di utilizzare il dispositivo in ambienti puliti privi di lubrificanti o di altri contaminanti.

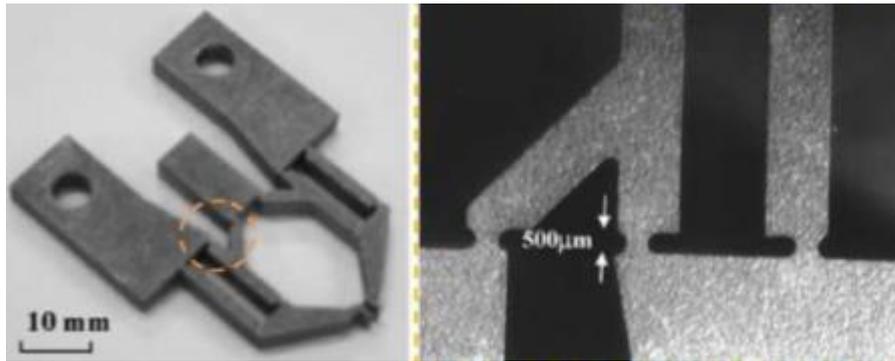


Figura 21. Micromanipolatore con attuazione PZT e particolare delle sue cerniere flessionali.

L'attuazione elettrostatica sfrutta la forza elettrostatica sviluppata da un condensatore con armatura mobile su cui viene applicata una differenza di potenziale. Il micromanipolatore in Figura 21 consiste in un microattuatore attuato elettrostaticamente il cui movimento lineare è convertito nel moto rotazionale dei bracci di presa mediante un sistema di cerniere. Questo microattuatore consiste in una navetta mobile dotata di elettrodi a pettine che è supportata da un sistema flessibile di molle a trave e in un sistema di contro elettrodi statici ancorati alla piastra di terra. La navetta mobile e gli elettrodi statici sono isolati elettricamente. Applicando una tensione tra gli elettrodi statici e la navetta viene generata una forza motrice. Il sistema di afferraggio è connesso alla navetta mobile del microdispositivo mediante due travi di tiro; quando la navetta si sposta verso il basso, la zona di afferraggio del micromanipolatore si chiude.

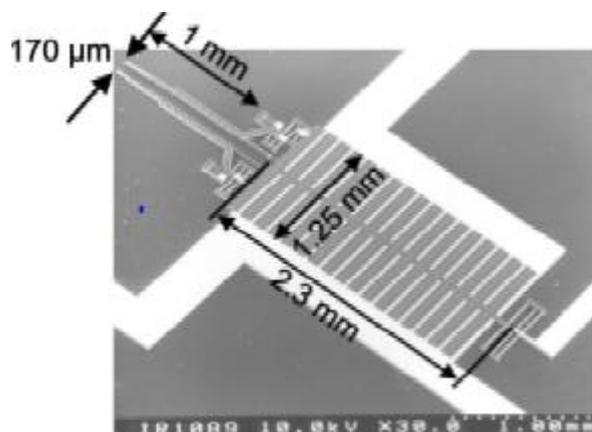


Figura 22. dimensioni di massima del micromanipolatore

Le forze elettrostatiche sono generate negli elettrodi a pettine (vedi parte sinistra della Figura 23) che sono considerati dei condensatori a piastre parallele.

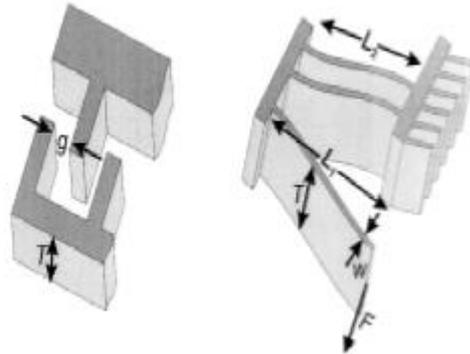


Figura 23. elettrodi a pettine (sinistra) e sistema di sospensione a trave (destra)

Le forze di ripristino sono create da un sistema flessibile di sospensioni a trave (vedi parte destra della Figura 23).

L'attuazione termica si basa sull'espansione termica di un cosiddetto "braccio caldo" riscaldato elettricamente e collegato ad un meccanismo di leve. Sono solitamente fatti in SU-8 con sottili strati metallici che fungono da conduttori di corrente elettrica. Possono operare in atmosfera, nel vuoto, così come in ambienti polverosi. La Figura 24 mostra un esempio di micromanipolatore attuato termicamente:

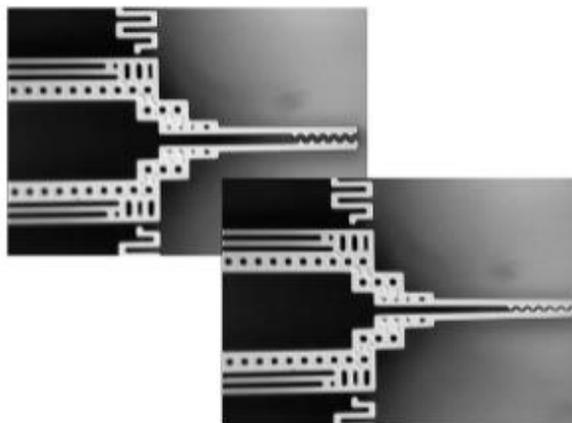


Figura 24. Esempio di microgripper attuato termicamente

L'attuazione elettromagnetica è un altro sistema di attuazione utilizzato nei dispositivi di manipolazione. La Figura 25 mostra un microdispositivo con attuazione elettromagnetica posizionato su un supporto in acciaio inossidabile montato a sua volta su un sistema di posizionamento x, y, z in controllo automatico.

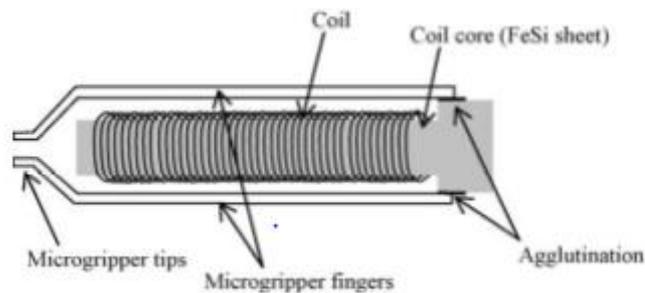


Figura 25. Micromanipolatore con attuazione elettromagnetica

L'attuatore consiste in una bobina a doppio strato posizionata attorno ad un sottile strato di FeSi cristallino. Il nucleo della bobina è stato ottenuto mediante la tecnologia EDM. L'apertura e la chiusura del dispositivo sono controllate dall'applicazione di una corrente elettrica.

L'attuazione tramite SMA (*Shape Memory Alloy*) è ampiamente utilizzata nell'attuazione di pinze grazie alle elevate prestazioni in termini di elevato rapporto potenza/peso, leggerezza e dimensioni ridotte. La Figura 26 in basso mostra un esempio di pinza attuata tramite le leghe in memoria di forma.

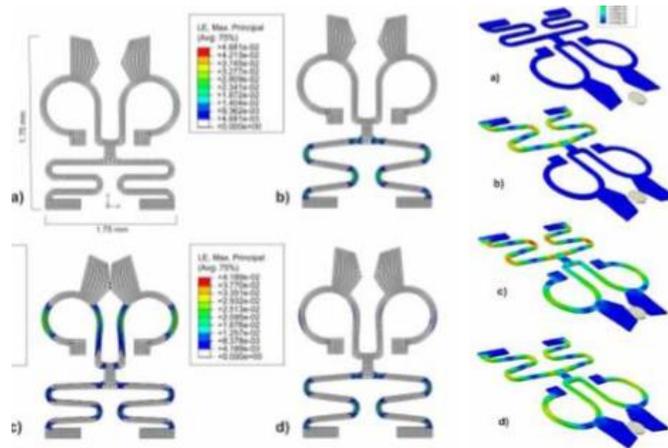


Figura 26. Dispositivo di presa attuato tramite SMA

Le leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys, SMA's) sono leghe metalliche scoperte abbastanza recentemente che hanno la capacità di ritornare ad una determinata forma quando vengono riscaldate. Questa proprietà, unica nel suo genere, è sfruttata in moltissimi campi che spaziano da quello medico a quello meccanico fino a quello microelettrico. L'uso di attuatori a memoria di forma può talvolta semplificare un meccanismo o un dispositivo, riducendo il numero di elementi, aumentando l'affidabilità con una conseguente riduzione dei costi. I principali vantaggi degli attuatori con leghe a memoria di forma sono:

- **semplicità meccanica e compattezza;** infatti un attuttore SMA utilizza solo il recupero della forma della lega e può essere azionato direttamente tramite effetto Joule. Inoltre non richiede alcun sistema di riduzione né altre parti in movimento.
- **elevato rapporto di potenza/peso** (o potenza/volume) rispetto ai sistemi di attuazione tradizionali, il cui peso non è comparabile a quello di un attuttore a memoria di forma. Questa caratteristica rende l'attuazione con SMA adatta per le applicazioni in miniatura.
- **condizioni di lavoro pulite e silenziose** poiché essi non generano attrito tra i meccanismi in azione come ingranaggi di riduzione, inoltre si evita la produzione di particelle di polvere, scintille o rumore.
- **leggerezza e facilità di miniaturizzazione.** Un componente SMA può essere utilizzato come “*attuatore lineare direct drive*” i quali richiedono poca o nessuna riduzione di movimento o amplificazione hardware.
- **dimensioni ridotte.**
- **funzionamento regolare** anche in presenza di disturbi elettromagnetici;

- **basso costo.**

Nonostante i numerosi vantaggi, gli attuatori SMA non sono esenti da limitazioni e svantaggi:

- **ampia lunghezza del filo** necessaria per creare uno spostamento significativo (la variazione di lunghezza è in generale pari al 3% della lunghezza totale).
- **eccessivo degrado a fatica.** Le prestazioni a lungo termine e l'affidabilità di questi dispositivi dipende da una serie di fattori, tra cui la massima temperatura, tensione, deformazione e numero di cicli di trasformazione.
- **effetti non lineari** come i fenomeni di isteresi. L'ampio ciclo di isteresi, così come la caratteristica non lineare delle trasformazioni di fase, possono rendere l'attuatore difficile da controllare con precisione.
- **bassa efficienza energetica.** Un attuatore SMA è molto simile a un motore termico solo che in questo caso la maggior parte dell'energia termica viene dissipata nell'ambiente quindi la conversione di calore in lavoro meccanico è molto inefficiente. Quindi le applicazioni SMA devono essere limitate in quelle aree dove l'efficienza energetica non è un problema.
- **bassa velocità e imprecisioni.** Questi attuatori presentano una risposta lenta a causa delle restrizioni di riscaldamento e raffreddamento e anche a causa dell'isteresi intrinseca. Il metodo comune di attuazione è il riscaldamento elettrico. Aumentando la tensione applicata si ha un aumento della velocità di azionamento, tuttavia eccessivi valori di tensione potrebbero danneggiare il dispositivo.

La Figura 27 mostra il confronto tra i rapporti Potenza/Peso per i diversi tipi di sistemi di attuazione.

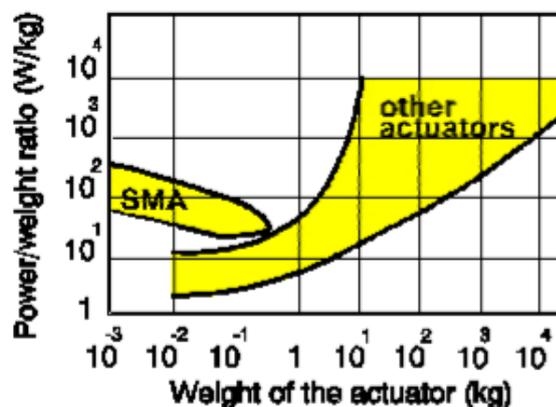


Figura 27. Confronto tra i rapporti Potenza/peso per i diversi tipi di attuatori

CAPITOLO 2: LEGHE A MEMORIA DI FORMA

2.1 Introduzione

Le leghe a memoria di forma sono delle leghe metalliche capaci però, per mezzo di un semplice cambiamento di temperatura, di modificarsi tra due forme come se le avessero memorizzate e da qui il nome di “leghe a memoria di forma”.

La prima registrazione del fenomeno risale al 1932, quando Chang e Read analizzando una lega di oro e cadmio, notarono che il materiale, facilmente deformabile fino ad una certa temperatura, subiva oltre quella una modifica della struttura cristallina, con conseguente riacquisizione della forma originaria. Nel 1963 William Buehler osservò la stessa caratteristica nella lega Nichel-Titanio successivamente ribattezzata Nitinol.

Dalla scoperta dell'effetto di memoria di forma sono stati individuati svariati altri sistemi, sia binari, sia ternari, caratterizzati da tale effetto. Ricordiamo tra questi i sistemi Cu-Al, Cu-Zn, Ni-Al, Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Sn, Cu-Al-Ni, etc.

Dal punto di vista fenomenologico l'effetto di memoria di forma si manifesta come la capacità di tali materiali di variare con continuità ed in modo reversibile, al variare della temperatura, la loro forma esterna (memoria a due vie), passando da una forma “stabile” ad alta temperatura ad una forma “stabile” a bassa temperatura, attraverso una trasformazione martensitica.

Altri effetti tipici di questi materiali, collegati alla succitata trasformazione di fase, sono l'effetto “pseudo-elastico” o “super-elastico” e l'assai elevata capacità di smorzamento (specie nelle leghe Cu-Zn-Al).

Il crescente interesse per i materiali a memoria di forma si concentra sugli aspetti fisico-strutturali che lo accompagnano, sia sulla molteplicità delle possibili applicazioni pratiche dell'effetto stesso.

Le applicazioni realizzate o previste sono di varia natura; esse possono essere di tipo sostitutivo (realizzazione di dispositivi volti a conferire maggiore affidabilità o prestazioni superiori rispetto ai dispositivi già esistenti), di tipo semplificativo o di tipo innovativo (quali ad esempio, le applicazioni biomedicali delle leghe Ni-Ti).

Nell'area dei materiali funzionale, le leghe metalliche a memoria di forma possiedono le peculiarità sia di sensore che di attuatore. Consentono cioè di ottenere un'unità in grado di attuare uno spostamento e/o compiere un lavoro rendendo intelligente un dispositivo o una struttura.

Nei successivi paragrafi si vogliono approfondire i motivi che portano all'effetto memoria di forma studiandone le trasformazioni cristallografiche a cui sono sottoposte queste particolari leghe metalliche e le loro caratteristiche accennate in precedenza.

2.2 Trasformazione martensitica

Per comprendere il modo con cui avviene l'effetto della memoria di forma, è indispensabile capire la struttura cristallina delle SMA. Tutte le leghe a memoria sono caratterizzate dall'aver due fasi cristalline ben distinte. L'esistenza di una fase o di un'altra dipende dalla temperatura e dallo sforzo a cui il pezzo è sottoposto; la fase più stabile a bassa temperatura è la *martensite* (a') mentre quella presente ad alta temperatura è l'*austenite* (g). La prima cosa che va osservata è che la trasformazione martensitica è di tipo non diffusivo, questo significa che il modo degli atomi avviene in modo cooperativo (un movimento coordinato di un certo numero di atomi), su piani e direzioni cristalline ben definite, dando origine a una nuova fase. Questo implica che la trasformazione non avviene in maniera isoterma e quindi non si ha una dipendenza dal tempo come spesso accade per trasformazioni non diffusive. La forza motrice della trasformazione da $g \rightarrow a'$ è guidata da una variazione di energia libera ΔG . Come si può osservare in Figura 28 esiste una particolare temperatura, detta *Temperatura di equilibrio* (T_0), per il quale $\Delta G = 0$; a temperature più basse la trasformazione è spinta verso a' mentre a temperature più alte è stabile g .

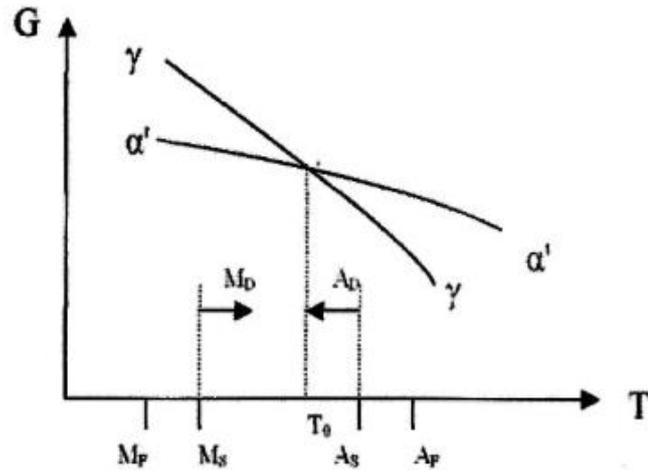


Figura 28. Andamento dell'energia interna dell'austenite e della martensite

Per capire i principi che regolano tale trasformazione ci riferiremo ora alla trasformazione martensitica nelle leghe Fe-C. La presenza di una o dell'altra fase dipende essenzialmente dalla temperatura di esercizio e/o dagli sforzi a cui il materiale è sottoposto. Ricordiamo che alle basse temperature è presente la fase Martensitica, mentre alle alte temperature è presente la fase Austenitica. Dato che le caratteristiche dei materiali a memoria di forma (SMA) dipendono essenzialmente dalla percentuale delle fasi austenitica e martensitica presenti è necessario studiare il modo con cui tale trasformazione avviene. Ricordiamo che la trasformazione martensitica non è una trasformazione diffusiva ma un moto cooperativo di un certo numero di atomi del reticolo cristallino che danno luogo ad una nuova fase. In prima approssimazione la trasformazione martensitica può essere paragonata alla “geminazione”, in cui un certo numero di piani cristallografici subisce una variazione dell'orientamento a seguito di uno sforzo applicato. Non si tratta di uno *slip* di un piano cristallino, ma di un intero microvolume di materia che cambia la sua orientazione spaziale senza cambiare la sua struttura cristallina. L'avanzamento della trasformazione dipende dal tempo e dalla temperatura.

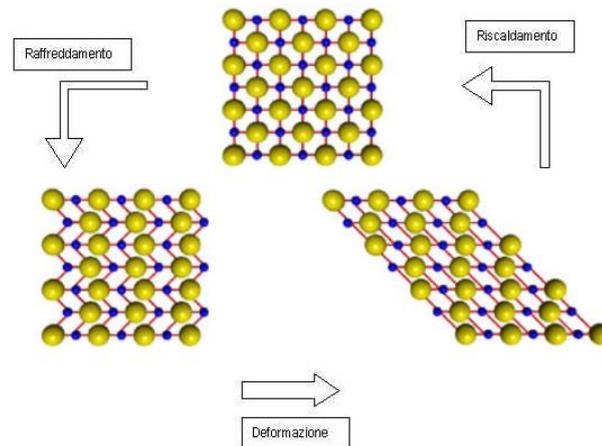


Figura 29. Passaggio austenite martensite e ritorno alla forma precedente per mezzo del riscaldamento

È proprio questa la differenza sostanziale tra la geminazione e la trasformazione martensitica, infatti in questa ultima si ha anche la variazione della struttura cristallina. La fase martensitica coinvolta in tale tipo di trasformazione, di tipo “*twinned*”, è anche detta “*thermoelastica*” e deriva appunto dal raffreddamento di una fase austenitica con ordine di lungo raggio. Essa si presenta tipicamente come un alternarsi di placchette appuntite disposte a spina di pesce. Notiamo un’importante peculiarità delle trasformazioni martensitiche in esame: esse presentano tutte un ciclo di isteresi, un comportamento cioè diverso nella fase di riscaldamento ed in quella di raffreddamento, in cui i percorsi non coincidono.

Cristallograficamente la trasformazione da austenite a martensite viene divisa in due parti: la deformazione di Bain (Bain Strain) e la Lattice-Invariant Shear. La prima è la deformazione della cella cristallina, comprende tutti i movimenti atomici necessari per produrre la nuova struttura.

In Figura 30 è rappresentata la struttura austenitica (a): la progressione verso una struttura completamente martensitica è illustrata da (b) fino al completamento (d). quando l’interfaccia avanza di un piano atomico, ad ogni atomo è richiesto un movimento molto modesto (c). Il risultato finale di tutti questi piccoli spostamenti coordinati è la nuova struttura martensitica, i movimenti coinvolti per generarla sono detti *Bain Strain*.

La seconda fase della trasformazione martensitica, la *Lattice-Invariant Shear*., serve come adattamento: la struttura che si genera ha una forma differente dall’ austenite come si può osservare in Figura 30 (strutture (a) e (d)).

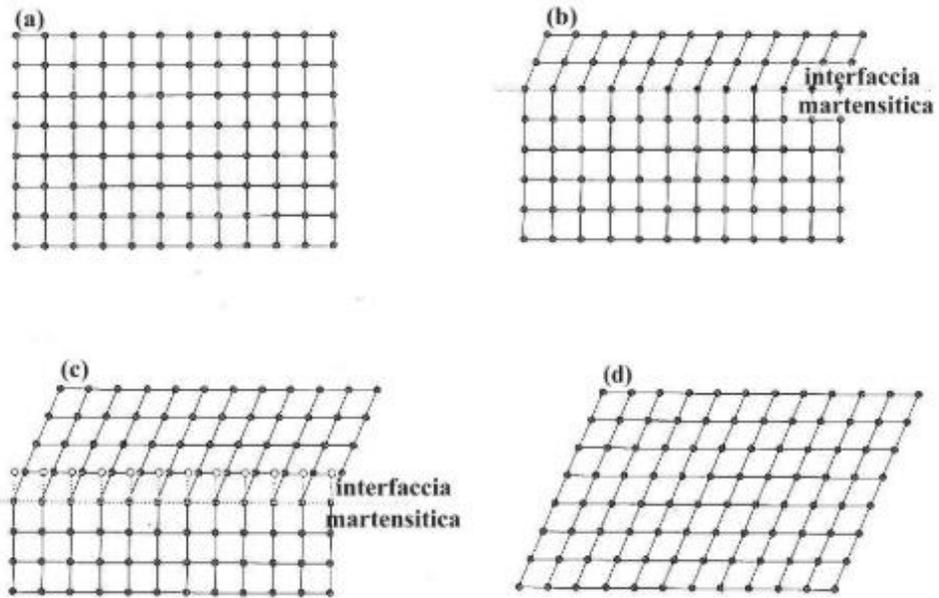


Figura 30. Avanzamento interfaccia martensitica

2.3 Temperature di trasformazione

La trasformazione martensitica avviene solo sotto una certa temperatura più bassa della (T_0) come è possibile osservare dalla Figura 31, quindi è necessario un minimo raffreddamento per far avvenire la trasformazione. Questa trasformazione reversibile è caratterizzata da quattro temperature di trasformazione: M_s , M_f (inizio e fine formazione struttura martensitica) e A_s , A_f (inizio e fine transizione opposta durante il riscaldamento).

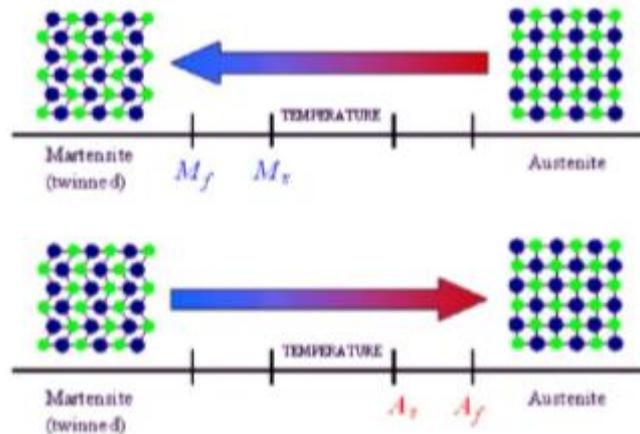


Figura 31. Temperature caratteristiche nella trasformazione diretta e inversa

Le placchette martensitiche si formano e crescono con continuità quando la temperatura si abbassa e si dissolvono progressivamente quando la temperatura viene elevata: la prima placchetta martensitica che si forma in corrispondenza di M_s è l'ultima a dissolversi in corrispondenza di A_f , mentre l'ultima placchetta di martensite che si forma in corrispondenza ad M_f è la prima a dissolversi alla temperatura A_s . Come accennato in precedenza, se il volume percentuale di martensite formata o dissolta viene riportato in funzione della temperatura, si osserva una curva

chiusa di isteresi che caratterizza la trasformazione di fase nei due sensi come mostrato in Figura 32:

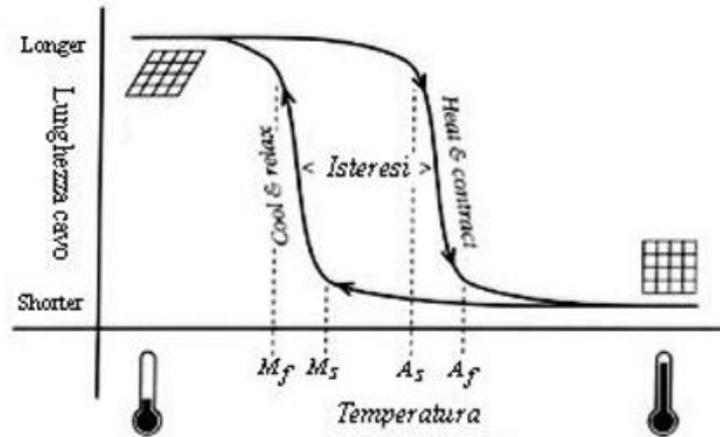


Figura 32. Intervallo di trasformazione(isteresi): A_s Austenite Start; A_f Austenite Finish; M_s Martensite Start; M_f Martensite Finish

L'ampiezza dell'isteresi dipende moltissimo dal materiale considerato: si va da circa 400° per la lega ferro nickel, dove si ha una variazione di volume del 4%, fino a 4° per la lega indio-tallio con una variazione di volume del -0,004%. La tabella 4 mostra le principali leghe a memoria di forma con i corrispondenti intervalli di temperatura all'interno del quale si realizza la trasformazione diretta e inversa.

LEGA	COMPOSIZIONE	INTERVALLO DI TRASFORMAZIONE		ISTERESI	
		°C	deg, F	°C	deg.F
Ag-Cd-	44/49 at. % Cd	-190 to -50	-310 to -60	15	25
Au-Cd-	46.5/50 at. % Cd	30 to 100	85 to 212	15	25
Cu-Al-Ni-	14/14.5 wt. % Al 3/4.5 wt. % Ni	-140 to 100	-220 to 212	35	65
Cu-Sn-	approx. 15 at. % Sn	-120 to 30	-185 to 85		
Cu-Zn-	38.5/41.5 wt. % Zn	-180 to -10	-290 to 15	10	20
Cu-Zn-X (X = Si, Sn, Al)	a few wt. % of X	-180 to 200	-290 to 390	10	
In-Ti	18/23 at. % Ti	60 to 100	140 to 212	4	7
Ni-Al	36/38 at. % Al	-180 to 100	-290 to 212	10	20
Ni-Ti	49/51 at. % Ni	-50 to 110	-60 to 230	30	55
Fe-Pt	approx. 25 at. % Pt	approx. -130	approx. -200	4	7
Mn-Cu	5/35 at. % Cu	-250 to 180	-420 to 355	25	45
Fe-Mn-Si	32 wt. % Mn, 6 wt. % Si	-200 to 150	-330 to 300	100	180

Tabella 4: Principali leghe SMA e relativi intervalli di isteresi

2.4 Effetto memoria di forma (SME)

Gli effetti di memoria sono collegati all'esistenza di una transizione di fase beta-martensite: austenite e martensite sono caratterizzate da due reticoli cristallini ben distinti con parametri di cella definiti. L' austenite ha un reticolo FCC mentre la martensite è un BCT o un BCC. Anche se la struttura molecolare è differente si ha la stessa composizione chimica perché non ci sono fenomeni di diffusione.

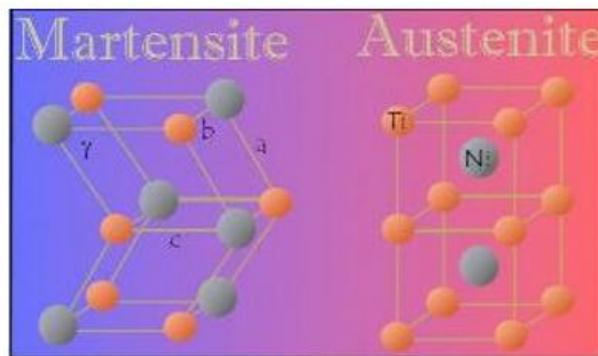


Figura 33. Celle cristalline martensite austenite per lega Ni-Ti

Quando una SMA viene portata a bassa temperatura, assumendo una configurazione di tipo martensitico, possiede basso limite di snervamento ed è facilmente deformabile; in seguito a riscaldamento, la lega si riarrangia in un'altra struttura cristallina, di tipo austenitico, e riassume quindi configurazione iniziale. Questo fenomeno è detto effetto memoria di forma ed è tipico di queste particolari leghe. La temperatura alla quale la lega “ricorda” la sua forma primitiva può essere modificata mediante variazioni della composizione o con appropriati trattamenti termici. Nella lega Ni-Ti, ad esempio, la temperatura può variare anche di 100°C; il processo di recupero della forma avviene in un range di qualche grado.

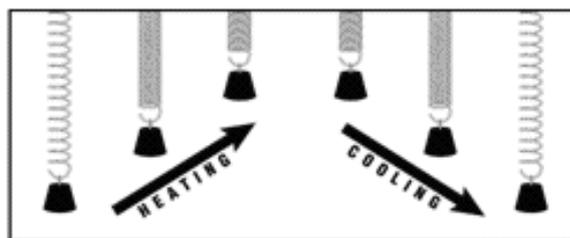


Figura 34. Schematizzazione effetto memoria di forma

Durante il processo possono entrare in gioco forze di entità importante immagazzinate e rilasciate dal materiale. Anche se esistono innumerevoli leghe che presentano la proprietà “shape memory”, sono di interesse commerciale principalmente quelle che recuperano considerevolmente la deformazione o che sviluppano una notevole forza durante la transizione di fase. In Figura 35 è rappresentata la classica curva sforzo-deformazione che mostra l’effetto di memoria di forma per formazione di martensite o riorientazione: (a) stadio di deformazione; (b) recupero di forma durante il riscaldamento del campione.

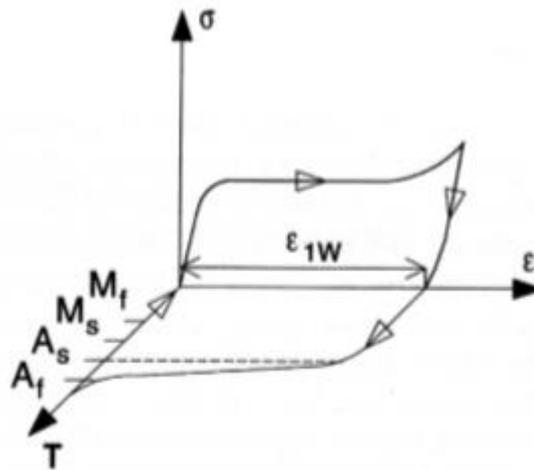
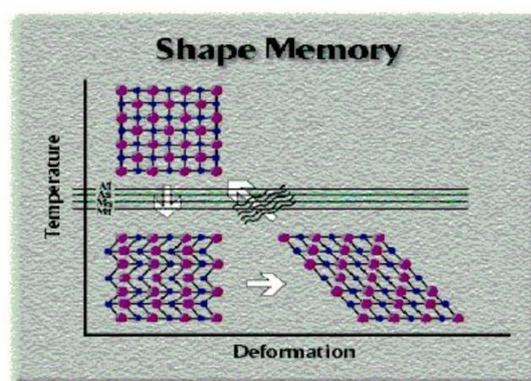


Figura 35. Curva stress-strain

2.5 Super elasticità

È una altra proprietà tipica di queste leghe che si sviluppa allorché la lega venga deformata, applicando un'opportuna forza, sopra la temperatura di trasformazione. Si genera in tal modo una martensite indotta da sforzo (SIM) che si trova a temperatura maggiore, quindi in questi casi, grazie ai contributi energetici di natura elastica, la transizione diretta e inversa può manifestarsi anche in corrispondenza di temperature maggiori di M_s . Si consideri ad esempio un campione metallico SME avente la forma di un elica cilindrica e lo si deforma, per compressione, ad una temperatura superiore ad M_s ; il campione sia successivamente raffreddato, mantenendo la deformazione imposta, ad una temperatura inferiore a M_f (ottenendo la condizione di “stabilità” dello stato strutturale martensitico).

Esso manterrà, dopo questo trattamento, la deformazione imposta anche quando la sollecitazione viene rimossa, fino a quando la temperatura è inferiore ad A_s . Un fatto del tutto simile si produce anche quando il campione venga direttamente compresso, in una situazione strutturale martensitica (in altri termini quando la deformazione venga applicata dopo raffreddamento del campione ad una temperatura minore di M_f). Anche in questo caso la deformazione applicata risulta “congelata” nel materiale, dopo rimozione della sollecitazione, fino quando la temperatura sia mantenuta nel campo di stabilità della struttura martensitica ($<A_s$). La forma iniziale del campione si riottiene, invece, in entrambi i casi per riscaldamento al di sopra di A_f .



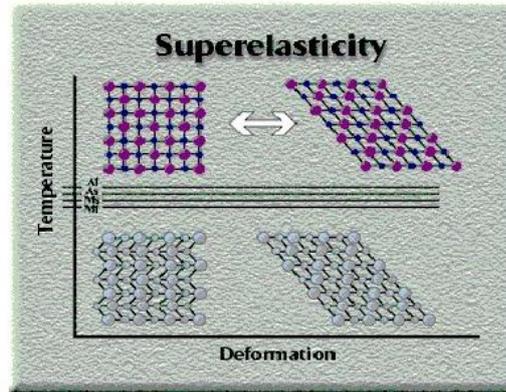


Figura 36. Confronto tra i meccanismi SME e superelasticità

Tale riscaldamento infatti ricostruisce la struttura iniziale, indipendentemente dalle varianti martensitiche indotte in seno a ciascun grano, sia la forma iniziale del campione ad essa associata. Un ulteriore raffreddamento del materiale ad una temperatura minore di M_s (senza applicazione di deformazione) avrà come sola conseguenza la transizione di fase $\beta \rightarrow$ martensite senza alcuna modifica di forma.

Quanto sopra esposto costituisce il cosiddetto effetto di *memoria ad una via*, in quanto una deformazione, opportunamente “congelata” in una struttura martensitica, può essere soppressa, per riscaldamento, con ricostruzione della forma di partenza. La super elasticità della lega si manifesta ad alte temperature in modo che la struttura austenitica sia quella stabile. La Figura 37 mostra l’andamento sigma-epsilon nella fase di carico e scarico:

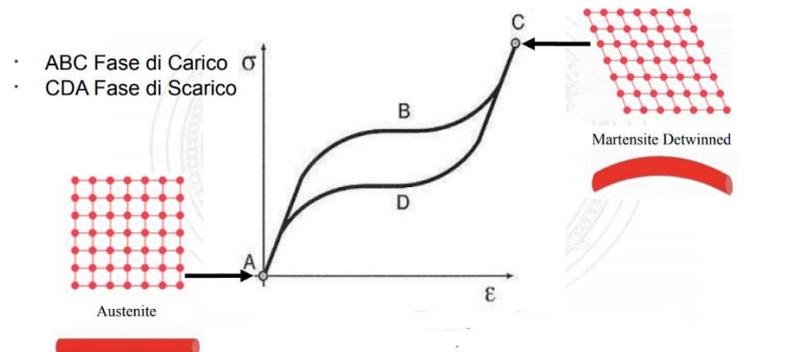


Figura 37. Super elasticità

Come si può osservare al termine del ciclo di carico e scarico non c'è deformazione residua.

2.6 Meccanismi di recupero della forma: a una via, a due vie

Nella maggioranza dei casi, l'effetto a memoria di forma si realizza secondo un meccanismo detto "a una via" (One Way Memory Shape Effect). Il termine ad una via sta a rappresentare il fatto che il materiale riacquista la forma originaria, a seguito del riscaldamento e quindi della sua trasformazione da martensite ad austenite, una volta sola di conseguenza, a seguito di una ulteriore trasformazione in martensite, non si avranno ulteriori variazioni di forma. Molto semplicemente possiamo dire che ci sono diverse strade per formare la martensite, ma solo una per ritornare alla struttura austenitica. Raffreddando la struttura austenitica si ottiene la martensite in una delle sue varianti. Riscaldando fin sopra A_f , indipendentemente dalla variante di martensite, c'è una sola possibile struttura di ritorno, quella austenitica. Si riacquista così la forma originaria.

Non ci sono cambiamenti nella forma di un provino raffreddato da una temperatura superiore ad A_f fin sotto M_f . Il campione viene deformato. Riscaldando, il recupero della forma comincia ad A_s e si completa raggiungendo A_f .

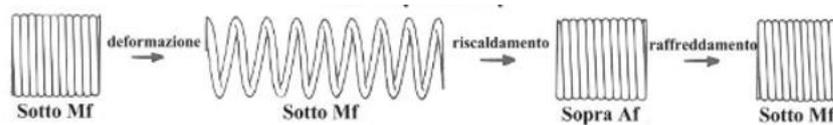


Figura 38. Meccanismo "a una via"

È possibile però indurre in molte SMA un meccanismo diverso denominato “*a due vie*” (Two Ways Memory Shape Effect). In questo caso il cambiamento di forma avviene sia durante il riscaldamento e sia durante il raffreddamento. Per avere tale effetto si sono approntati alcuni trattamenti termomeccanici atti a creare uno stato tensionale nella martensite che si viene a sviluppare durante la fase del raffreddamento, che ne determina una induzione di forma secondo tale stato tensionale indotto. Il materiale ricorda sia la forma ad alta temperatura che quella a bassa temperatura. Nessuna forza esterna è richiesta per attivare il fenomeno. Quindi per riuscire a ottenere il meccanismo a due vie la lega deve essere sottoposta a speciali trattamenti termomeccanici di preparazione.

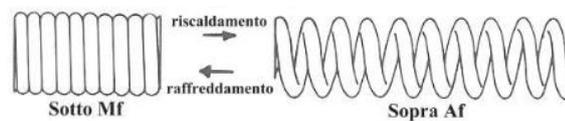


Figura 39. Meccanismo “a due vie”

Di seguito si riporta l’andamento dell’allungamento percentuale in funzione della temperatura associati ai due meccanismi.

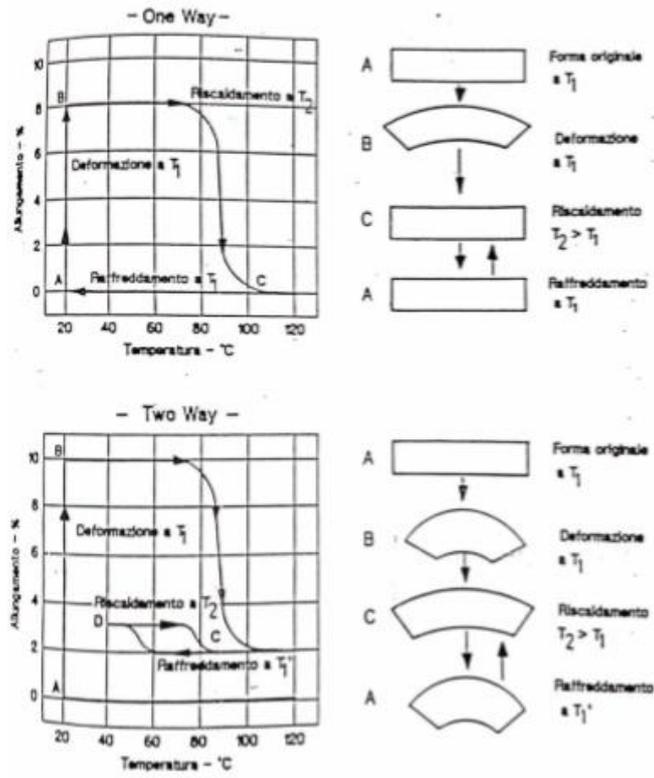


Figura 40. Diagramma allungamento%-temperatura per i due meccanismi

2.7 Comportamento meccanico

Le proprietà meccaniche di una SMA variano molto entro l'intervallo in cui avviene l'intera trasformazione. Le curve riportate in Figura 41 mostrano il comportamento di una lega Ni-Ti sottoposta a tensione nei tre casi:

1. T_3 compresa nell'intervallo di trasformazione
2. T_1 sopra l'intervallo di trasformazione
3. T_2 sotto l'intervallo di trasformazione

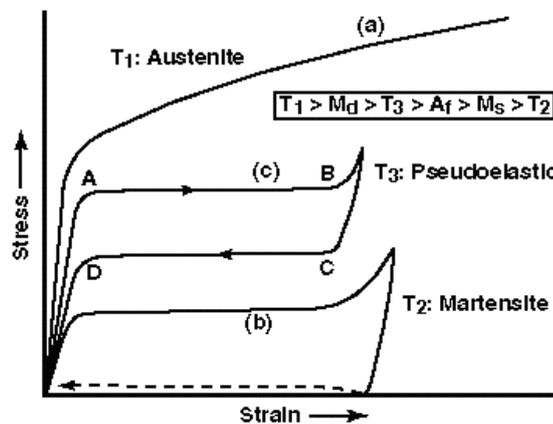


Figura 41. Diagramma allungamento%-temperatura per i due meccanismi

Si osserva che la martensite è facilmente deformabile anche a bassi carichi, mentre l'austenite richiede carichi molto elevati. La linea tratteggiata lungo la curva (b) indica che, dopo riscaldamento e scarico, il campione "ricorda" la sua forma iniziale e la riassume non appena avviene la trasformazione martensite \rightarrow austenite.

Un aspetto interessante del grafico in esame è inoltre rappresentato dalla curva (c), che è stata ottenuta ad una temperatura maggiore della temperatura di trasformazione: è il comportamento superelastico. Notiamo infatti che la martensite, indotta da stress, mostra anche in questo caso aumento di deformazione a carico costante (tratto AB), ma durante lo scarico il materiale torna ad austenite in corrispondenza di uno sforzo più basso (tratto CD); il recupero della forma cioè avviene non per fornitura di calore ma per riduzione del carico. Tale fenomeno, che rende appunto il materiale estremamente elastico, è noto anche come "pseudoelasticità": è una proprietà non

lineare, nel senso che il modulo di Young, ad esempio, è difficile da determinare, essendo dipendente sia dalla temperatura che dalla deformazione. Si deduce che le proprietà meccaniche di una lega a memoria di forma dipendono fortemente dalla temperatura a cui si trova la lega. Ad alta temperatura (fase austenitica) il sistema è più rigido mentre a bassa temperatura (fase martensitica) la lega a memoria di forma è facilmente deformabile a causa della bassa rigidità.

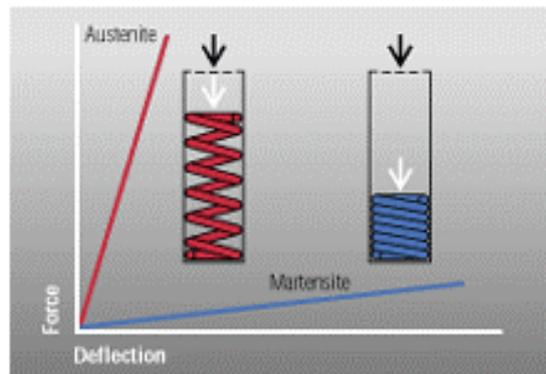


Figura 42. Confronto tra le rigidità delle fasi martensitica ed austenitica

2.8 Applicazioni

Grazie alle principali caratteristiche discusse in precedenza, le leghe a memoria di forma trovano impiego in numerosi campi di applicazione. Ovviamente la scelta del tipo di lega dipende fortemente dalle esigenze e/o caratteristiche richieste dalla specifica applicazione. Quali esempi di realizzazione interessanti ricordiamo che nel campo della sicurezza e protezione, sono stati realizzati elementi SME aventi la funzione di indicatori di temperatura, di interruttori di energia, di rilevatori di incendio e protettori antincendio.

Un altro campo di interesse per queste leghe, in particolare per le leghe Ni-Ti, è quello medico e biomedicale. Il Nitinol è utilizzato ad esempio nelle occlusioni arteriali, infatti, elementi in SME precompressi, chiamati *stent*, vengono inseriti all'interno della arteria ostruita e, una volta rilasciati, si espandono grazie alla proprietà di super-elasticità ripristinando il corretto flusso sanguigno. I fili in Nitinol sono ampiamente utilizzati nella realizzazione di protesi dentarie (ad esempio apparecchi) per il loro elevato ritorno elastico e la bassa rigidità.



Figura 43. Applicazioni in campo biomedico e odontoiatrico

Oltre al campo biomedico, le SMA sono comunemente usate in meccanica. La Figura 44 mostra un sistema di protezione termica per i rubinetti dotati di filtro. Dato che gli elementi filtranti vengono danneggiati se esposti ad alta temperatura il sistema di questo tipo è in grado di proteggere il filtro. Quando l'acqua calda vuole passare per il filtro essa riscalda la molla in SMA che chiude l'entrata dell'acqua nel filtro a destra; viceversa nel caso dell'acqua fredda. Nel caso

quindi subire delle deformazioni eccessive senza che giunga a rottura. Una volta rimosso il carico (semplicemente aprendo la mano) il materiale riacquista la forma iniziale.



Figura 46. un occhiale realizzato in SMA che viene severamente deformato e che recupera la forma iniziale all'atto della rimozione della sollecitazione

I fili e gli attuatori SMA sono anche utilizzati in ambito aeronautico. Un esempio di applicazione in campo aeronautico è illustrato in Figura 47 in cui viene rappresentato un profilo alare a sezione modificabile. Gli elementi in SMA vengono infatti integrati all'interno di strutture, in genere in materiale composito, consentendo di avere un controllo sulla loro geometria. Grazie al controllo della forma è possibile adattare il profilo alare e tutti i parametri in esso associati (portanza, angolo di incidenza, etc.) in base alle diverse condizioni di lavoro.

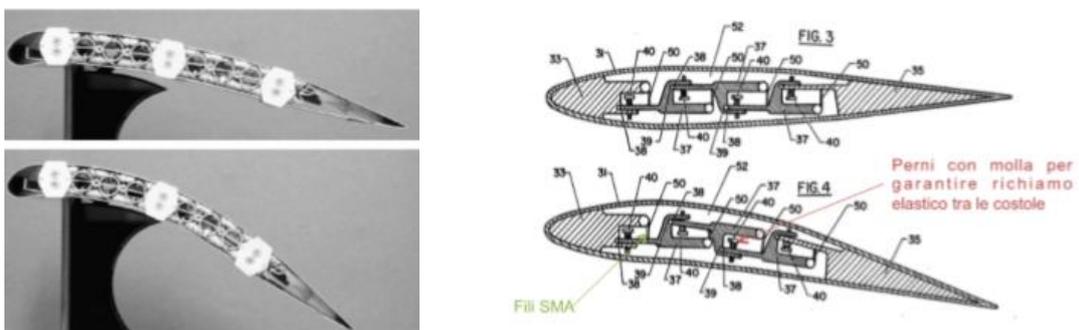


Figura 47. Esempio di applicazione dei file in SMA per variare il profilo alare

La possibilità delle SMA di lavorare in assenza di gravità le rende particolarmente adatte per le applicazioni spaziali. Delle molle di lega a memoria di forma apre e chiude le celle solari montate all'estremità delle batterie solari come mostrato in Figura 48.



Figura 48. Applicazione in ambito aerospaziale

I fili in e gli attuatori sono ampiamente impiegati in robotica, ad esempio nella “Scuola Superiore Sant’ Anna” è stato costruito un braccio robotico di polpo totalmente automatico (Figura 49).

L’industria automobilistica include una grande quantità di applicazioni di SMA. Di seguito si riporta un’illustrazione (Figura 50) che indica le zone di potenziale applicazione di queste leghe in un veicolo.

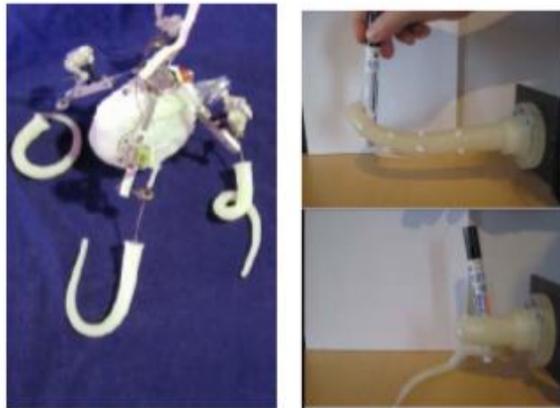


Figura 49. Polpo robotico realizzato da Scuola Superiore Sant'Anna

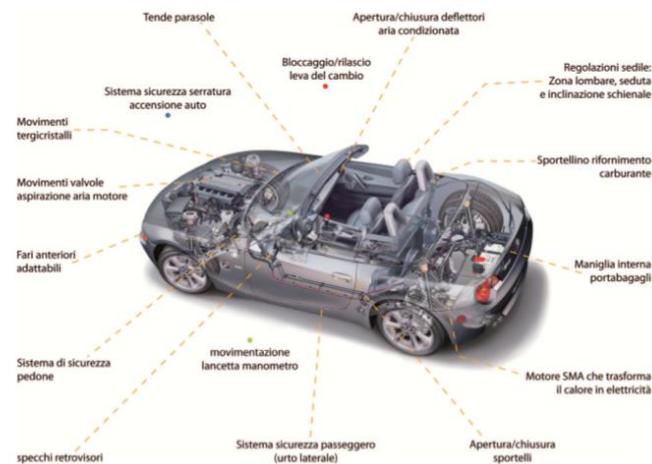


Figura 50. Applicazione automotive

Infine, l'ingegneria civile è uno degli ultimi, in termini di data, campi di applicazione delle SMA. Grazie alla capacità di smorzamento, soprattutto per le leghe Cu-Zn-Al, trovano spazio nella protezione di strutture civili, come edifici e ponti, da possibili danneggiamenti causati dal vento o terremoti.

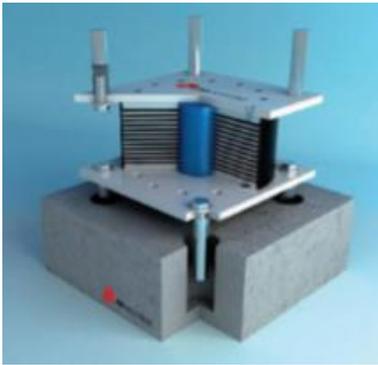


Figura 51. Isolatore sismico



Figura 52. Elemento di connessione trave-colonna in una struttura in acciaio



Figura 53. Fratturazione della roccia utilizzando elementi in SMA

CAPITOLO 3: ANALISI STATO DELL' ARTE

3.1 Introduzione

In questi ultimi decenni, molti ricercatori e ingegneri si sono concentrati sulla possibilità di sostituire sistemi di attuazione tradizionali (pneumatici, oleodinamici ed elettrici) con attuatori di tipo non convenzionali. A causa della crescente esigenza di realizzare dei robot con più gradi di libertà in grado di realizzare movimenti versatili e decisi, è necessario lo sviluppo di un attuatore leggero e di dimensioni ridotte.

Le ricerche nel campo dei robot sono orientate su sistemi di attuazione che utilizzano leghe SMA in quanto, grazie alle loro proprietà e i diversi vantaggi elencati nel precedente paragrafo, rappresentano una valida alternativa agli attuatori convenzionali. I sistemi robotici basati sulle leghe a memoria di forma (in inglese Shape Memory Alloy) sono emersi grazie alla loro capacità di convertire il calore direttamente in lavoro meccanico, per le loro dimensioni ridotte, leggerezza, semplicità ma anche per l'operazione silenziosa, mancanza di prodotti contaminanti o uso e funzionamento regolare, anche in presenza di disturbo elettromagnetico.

Questo lavoro di tesi è centrato sulla progettazione e prototipazione di un gripper cedevole per un robot di manipolazione di componenti elettronici che utilizza queste tipologie di leghe.

L'obiettivo di questo capitolo sarà quello di mostrare lo stato tecnologico attuale dei gripper cedevoli che impiegano fili SMA con lo scopo di sottolineare problematiche, criticità e di cercare possibili soluzioni alternative in modo realizzare un gripper innovativo e funzionale. Per far questo è stata necessaria un'approfondita ricerca di anteriorità che, non solo si è focalizzata su articoli inerenti, ma anche su un'analisi brevettuale dettagliata delle diverse tipologie di pinze esistenti.

3.2 Pinze attuate tramite Fili SMA

In letteratura sono presenti diversi studi associati a pinze che utilizzano come dispositivi di attuazione fili in memoria di forma.

È il caso di (Damien Sallè, 2004) in cui viene proposto un gripper destinato alle applicazioni in medicina e in particolare per eseguire interventi chirurgici di sutura [6]. Dato che le applicazioni mediche richiedono un'elevata precisione, sicurezza, un controllo affidabile e soprattutto leggerezza e ingombro ridotto i progettisti hanno scelto di utilizzare come sistemi di attuazione dei fili in memoria di forma.

mediche è richiesto un'elevata precisione, sicurezza, un controllo affidabile e soprattutto leggerezza e ingombro ridotto ed è proprio per queste particolari esigenze che i progettisti hanno deciso di utilizzare come sistemi di attuazione dei fili in memoria di forma.

In Figura 54 è mostrata la proposta del braccio chirurgico in esame. Per l'azionamento della pinza sono stati utilizzati otto fili in SMA. Quando il filo in SMA viene riscaldato dalla corrente elettrica si passa allo stato austenitico e il filo si contrae.

Il loro accorciamento produce uno spostamento o una forza che viene trasferita alle griffe della pinza consentendo la chiusura della stessa. Nel momento in cui la corrente viene arrestata, la temperatura del filo diminuisce e il materiale SMA torna alla fase martensitica permettendo al sistema di ritornare alla configurazione iniziale (pinza aperta). Una molla di compressione

presente nel meccanismo garantisce che il filo ritorni alla sua lunghezza iniziale. La combinazione dei fili in SMA e della molla di compressione definisce l'attuatore lineare.

In Figura 55 è riportato l'assieme della pinza oggetto di questo studio.

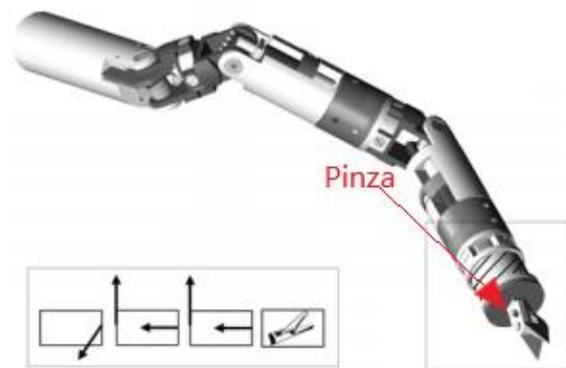


Figura 54. Braccio robotico con pinza a due griffe

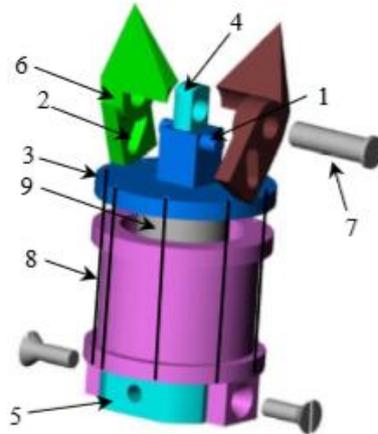


Figura 55. Assieme dell'attuatore

In (Tian-Miao Wang, 2012) è proposto un altro tipo di gripper attuato tramite fili in SMA. Anche in questo caso l'obiettivo è quello di realizzare un gripper agile per eseguire interventi chirurgici e quindi in ambito biomedicale [5]. La Figura 56 mostra il dispositivo di presa proposto in questo studio.

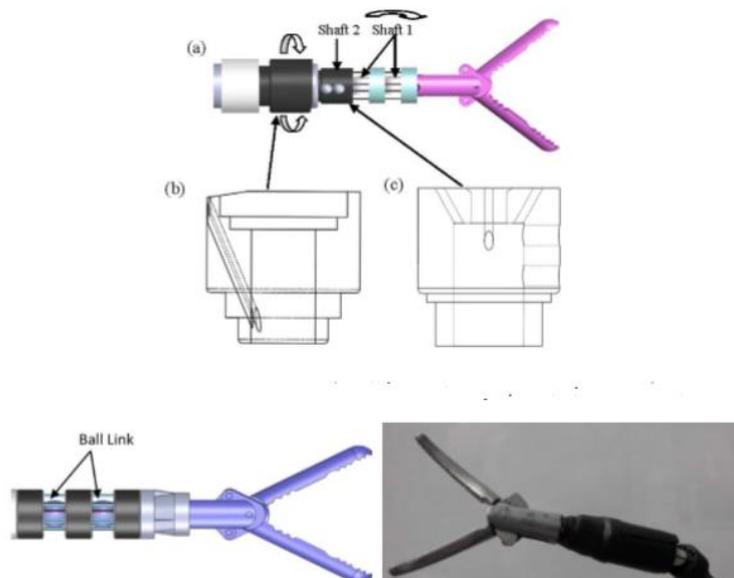


Figura 56. Modello della pinza per interventi chirurgici non invasivi

Come si può osservare il dispositivo è costituito da due alberi di rotazione: il primo albero offre 1 grado di libertà per la rotazione del polso, il secondo albero garantisce la flessione del microgripper. Il secondo albero è composto da due colonne ceramiche e tre dischi. Ogni disco ha otto fori realizzati per ospitare i fili SMA.

La pinza in esame è caratterizzata da un attuatore autosensibile costituito da una coppia di fili SMA antagonisti. Sono stati scelti fili SMA dalla Flexinol®-LT di forma a “V” con una lunghezza di 350 mm e un diametro di 0,381mm.

Lo studio è centrato sul dispositivo di attuazione ed ha evidenziato che per valori piccoli di forza di pre-tensione si ha un'ampia isteresi quindi la differenza tra la fase di riscaldamento e quella di raffreddamento non può essere trascurata (come mostrato in Figura 57).

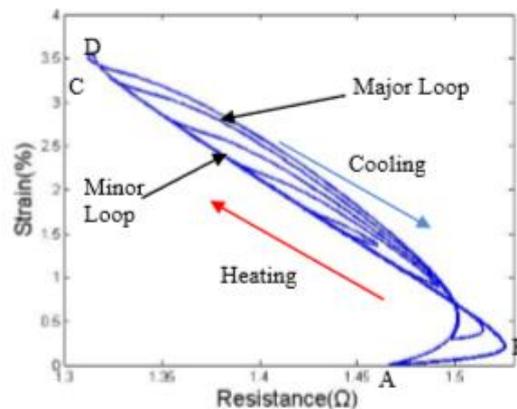


Figura 57. Curva deformazione- resistenza elettrica del filo(d=0,381)

Tuttavia, con un'adeguata forza di pre-tensione potrebbe ridurre il divario tra il percorso di riscaldamento e quello di raffreddamento e quindi l'ampiezza del ciclo di isteresi. Quindi per semplificare il controllo e ridurre il divario tra la fase di riscaldamento e quella di raffreddamento è stato necessario imporre un valore di pre-tensione tra i fili maggiore. Il contributo principale di questo lavoro è stata l'applicazione e il controllo della coppia di fili antagonisti mediante feedback di resistenza. Gli esperimenti hanno dimostrato che l'errore quadratico medio è inferiore al 1,1%. L'applicazione di una coppia adeguata applicata ai fili potrebbe garantire un feedback di resistenza più preciso.

3.3 Pinze con Meccanismi Cedevoli

In questo paragrafo sono descritte le tipologie di gripper realizzate tramite dei particolari sistemi in grado di deformarsi elasticamente che prendono il nome di *Meccanismi Cedevoli*. I Meccanismi Cedevoli sono dei particolari meccanismi che sostituiscono gli accoppiamenti cinematici tradizionali (cerniere, guide etc.) con elementi a bassa rigidità (**cerniere flessibili** o segmenti flessibili) in grado, quindi, di deformarsi elasticamente sotto l'applicazione di carichi. Una descrizione più dettagliata dei meccanismi cedevoli è fornita nel successivo capitolo. L'impiego di cerniere cedevoli consente di facilitare la realizzazione della pinza. Essendo infatti costituita da un unico pezzo non sono necessarie operazioni di assemblaggio e questo limita notevolmente i costi. Un ulteriore vantaggio è dovuto alla limitata usura, infatti, non essendoci accoppiamenti cinematici non si genera attrito e questo limita la degradazione della pinza nonché l'usura della stessa.

La proposta in (M.Kohl, E. Just, 1999) è quella di un microgripper realizzato interamente tramite taglio laser di un foglio in lega a memoria di forma (Ni-Ti) destinato per le applicazioni microrobotiche e per la manipolazione di microparti [6].

Il microgripper proposto ha dimensioni $2 \times 3,9 \times 0,1 \text{ mm}^3$ ed è costituito da due unità di attuazione, di forma opportuna, che si attivano in direzione opposta formando quindi una coppia antagonista. La Figura 58 mostra il modello del microgripper proposto in questo studio.

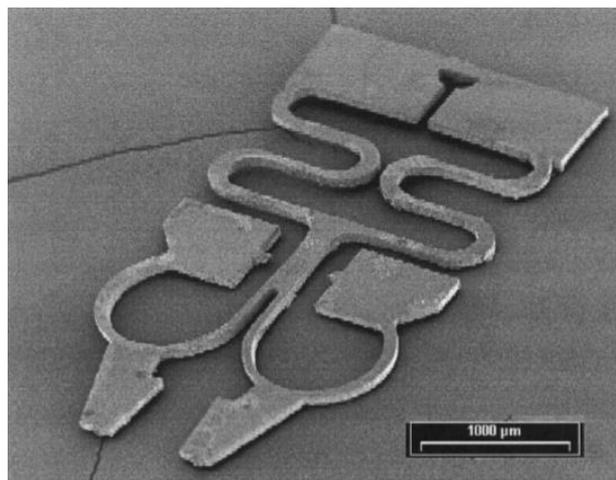


Figura 58. Modello del microgripper proposto

La 1^a unità di attuazione è fissata alla parte inferiore che è fissa, mentre la 2^a unità di attuazione è quella mobile che si occupa della presa e del rilascio degli oggetti da manipolare.

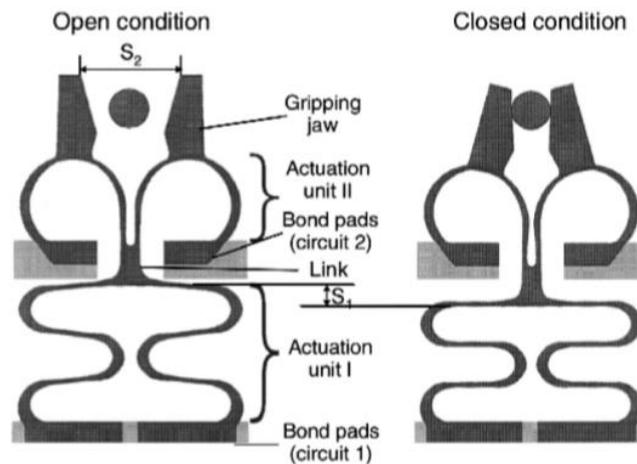


Figura 59. Configurazione aperta e chiusa del microgripper

Quando le unità di attuazione vengono sottoposte a una corrente elettrica la temperatura inizia ad aumentare per effetto Joule. Anche in questo caso, superata la temperatura di attivazione le unità di attuazione si deformano imprimendo il movimento alle griffe del microgripper. Quindi, la chiusura e apertura della pinza è realizzata tramite un riscaldamento selettivo delle due unità di attuazione. Il collegamento tra le due unità di attuazione è progettato in modo tale da fornire un sufficiente isolamento termico.

Lo spostamento massimo delle ganasce di presa (S_2) è di 180 mm, la massima forza di presa è di 17 mN. Con una potenza elettrica di 22 mW si è osservato un tempo di risposta di 32 ms.

I risultati ottenuti dalle analisi soddisfano i requisiti richiesti dal tipo di applicazione a cui la pinza è destinata. La scelta di una struttura cedevole per la realizzazione del microgripper offre una soluzione economica, compatta e silenziosa ideale per le applicazioni microrobotiche.

In (Dalibor Petkovic, 2015) è proposto un ulteriore tipo di gripper con struttura elastica. L'obiettivo è quello di ottenere un gripper versatile in grado di afferrare oggetti di diversa forma e dimensione [7]. In questo studio sono specificate le caratteristiche che un gripper con dita flessibili deve avere, ossia la capacità di rilevare e riconoscere gli oggetti da manipolare e sicurezza nella presa. Si propone anche l'obiettivo di trovare un modello utile alla definizione della forza di contatto in funzione della posizione dei punti in cui esso avviene. Per far ciò è stata impiegata un'analisi cinematica inversa per poter trovare le posizioni delle grandezze di interesse e successivamente viene applicato il principio dei lavori virtuali per uguagliare la potenza in ingresso e quella in uscita con lo scopo di definire la relazione della forza di interesse. Il primo passo è stato quello di definire la matrice Jacobiana per mettere in relazione le velocità dei punti di contatto con le velocità angolari dei membri del gripper. Di seguito si riportano le immagini

che mostrano lo schema del gripper, la posizione dei sensori necessari al riconoscimento dell'oggetto e le posizioni assunte dalle dita al variare dell'oggetto da afferrare:

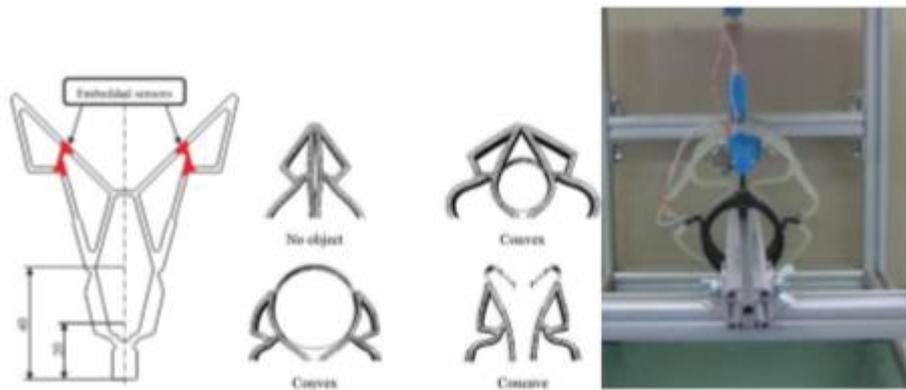


Figura 60. Soluzione studiata da Dalibor Petkovic

In (M.C. Carrozza, 1998) una micropinza fabbricata usando la tecnologia LIGA e azionata tramite attuatori piezoelettrici destinata alla manipolazione di micro-oggetti meccanici e biologici compresi tra 1 mm e 1 μm . In Figura 61 è mostrato il modello di micromanipolatore proposto da M.C. Carrozza.

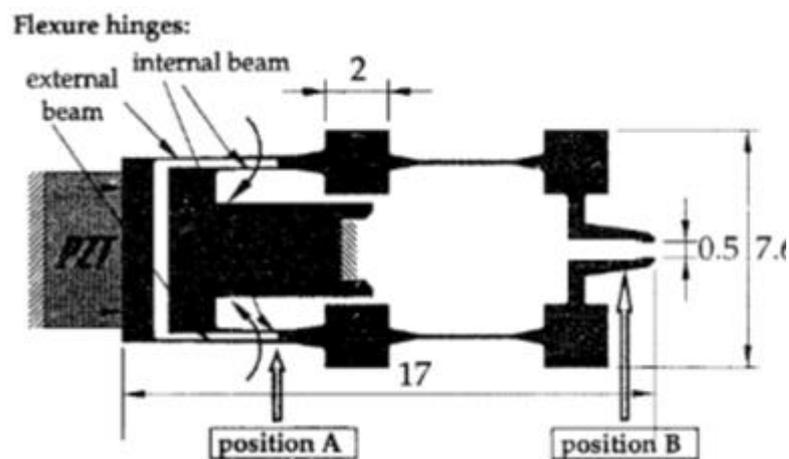


Figura 61. Micropinza proposta M.C. Carrozza

Quando l'attuatore piezoelettrico è azionato da una tensione si allunga e tramite le due coppie di travi sottili parallele, visibili sul lato sinistro della pinza, che fungono da cerniere flessionali si ottiene una rotazione di ciascun braccio della pinza che avvicina le due dita.

3.4 Pinze con Cerniere Cedevoli e azionate tramite Fili SMA

Sono stati trovati in letteratura molte tipologie di gripper che combinano l'attuazione con i fili SMA e l'utilizzo di sistemi cedevoli.

In (A. Manuello, 2003) è stata proposta e realizzata una pinza azionata tramite leghe a memoria di forma in Ni-Ti e realizzata con l'impiego di cerniere flessibili [8]. L'obiettivo è quello di ottenere una pinza monolitica di facile fabbricazione e un basso costo. Il gripper oggetto di questo studio, riportato in Figura 62, è stato progettato in modo tale da ottenere un movimento di chiusura parallelo e angolare.

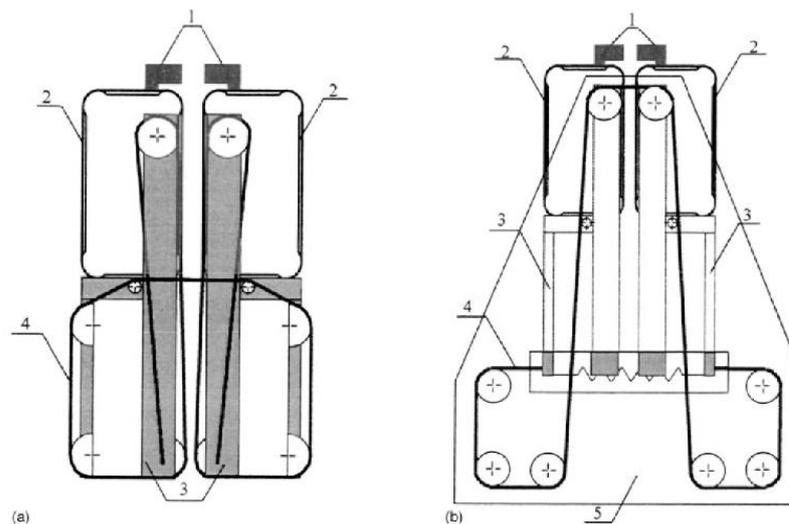


Figura 62. Disegno schematico della pinza. (a) movimento parallelo, (b) movimento angolare

In Figura 63 (a) è rappresentato il percorso del filo SMA dedicato al movimento parallelo, mentre nella Figura 63 (b) è mostrato il percorso del filo SMA per il movimento angolare.

Come si può osservare dalla figura, il gripper è costituito da due strutture quadrilatere cedevoli (elemento 2 in figura) i cui vertici sono delle cerniere flessibili.

Ogni cerniera flessionale è stata opportunamente dimensionata in modo tale da consentire alla struttura che si deformi sotto l'azione di forze esterne e allo stesso tempo di ritornare alla configurazione originale a seguito della rimozione dei carichi. Le cerniere

flessionali sono state realizzate in acciaio ad alta resistenza mentre i rinforzi (elementi di collegamento delle cerniere) sono stati realizzati in alluminio.

Per guidare la cinematica del gripper è stato utilizzato un filo SMA di diametro di 150 μm il cui comportamento è stato determinato tramite delle prove sperimentali. La lunghezza del cavo SMA è di circa 600 mm ed è avvolta attorno ad apposite pulegge fisse che garantiscono lo scorrimento del filo durante il funzionamento. La Figura 64 mostra il gripper oggetto di questo studio.

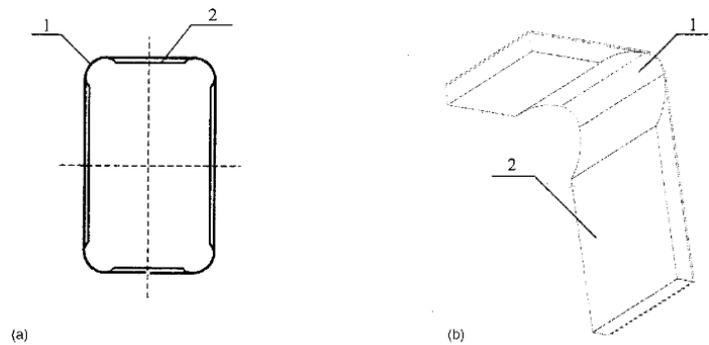


Figura 63. : Struttura cedevole. (a) quadrilatero , (b) cerniera cedevole

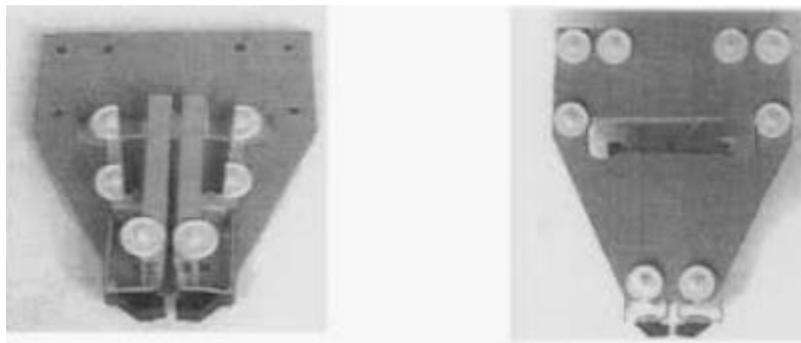


Figura 64. Prototipo del gripper

In (J.H. Kyung e G.J. Chung, 2005) è stato proposto un microgripper per la manipolazione di microcomponenti per l'industria dell'elettronica, dell'informatica e dell'ottica [9]. Anche in questo caso si tratta di un microgripper con struttura cedevole che utilizza elementi di attuazione filiformi in leghe a memoria di forma. La Figura 65 mostra il modello del microgripper proposto in questo studio.

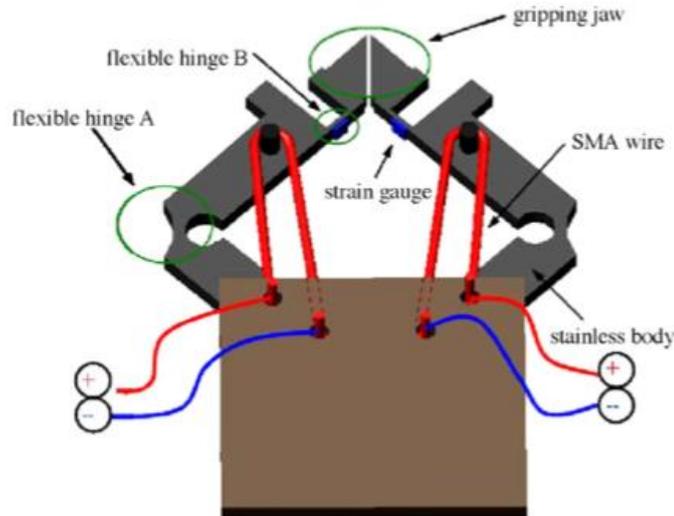


Figura 65. Modello concettuale del microgripper

Il microgripper è costituito da due ganasce per la presa e da due fili SMA che si occupano dell'attuazione. Il corpo è realizzato in acciaio inossidabile (STS 304 con $\sigma_y = 360$ MPa) e presenta due cerniere flessibili (A e B). La cerniera flessibile A ha il compito di convertire lo spostamento lineare esplicato dal filo in una rotazione delle griffe della pinza. La cerniera flessibile B è meno rigida della cerniera A di conseguenza è soggetta a una deformazione maggiore in modo tale da poter concentrare la maggior parte della forza di presa in corrispondenza delle ganasce della pinza. Il filo SMA è composto da una lega in NiTi con un diametro di $100 \mu\text{m}$. La Figura 66 (a) mostra la configurazione aperta in cui i fili si trovano allo stato freddo (fase passiva) mentre nella Figura 66 (b) è rappresentata la configurazione chiusa della pinza a seguito del riscaldamento dei fili dovuto alla corrente applicata (fase attiva).

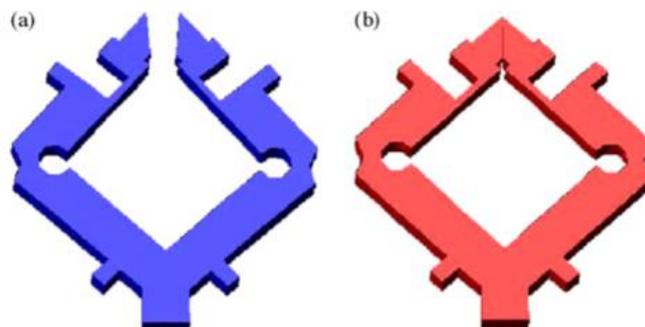


Figura 66. (a) Configurazione aperta; (b) Configurazione chiusa della pinza

La massima forza di presa del microgripper è pari a 0,33 N mentre il filo SMA è in grado di sviluppare una forza di 3 N. Sotto l'azione di questo valore di forza, considerando che il microgripper ha uno spessore di 1 mm, tenendo conto che la larghezza della cerniera A è di 0,55 mm e quella di B è pari a 0,3 mm è stato ottenuto uno spostamento delle ganasce di 123 μm .

Tuttavia, questo valore dell'escursione delle ganasce non si è rivelato sufficiente per la presa di microcomponenti. In un recente lavoro condotto da Q Khasawneh, M. A. Jaradat e A. Alhorman in [10] è stata proposta una modifica al progetto precedente con lo scopo di migliorare le prestazioni del microgripper e in particolare di aumentare lo spostamento delle griffe.

La Figura 67 mostra il confronto tra il modello precedente e il modello modificato del gripper. Come si può osservare è stata aggiunta una parte cedevole inferiore, simile alla soluzione precedente, con due ulteriori cerniere flessibili di stessa forma e dimensione. Anche il numero dei fili SMA utilizzati per l'attuazione è raddoppiato.

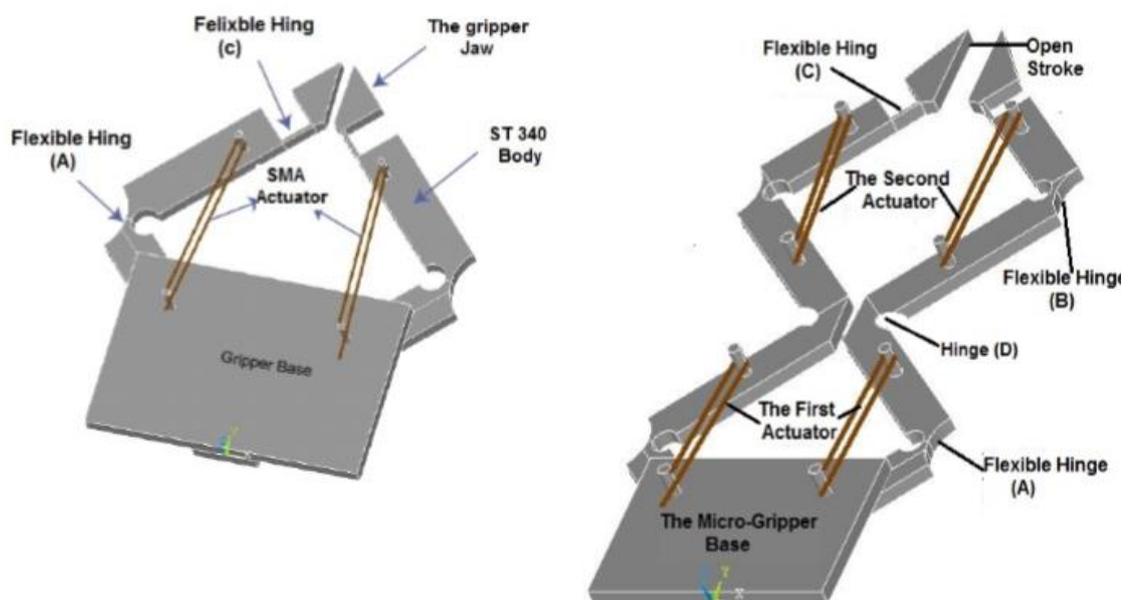


Figura 67. Confronto tra il modello precedente e quello ottimizzato

I risultati hanno mostrato un aumento delle prestazioni del microgripper infatti la modifica ha permesso di aumentare l'escursione delle griffe di 2,78 volte rispetto al modello di pinza iniziale.

Il Prof. Terenziano Raparelli e Ing. Daniela Maffiodo, docenti presso il politecnico di Torino, hanno realizzato un prototipo di gripper a tre dita per un robot di manipolazione di piccoli componenti [11]. Nel loro lavoro hanno evidenziato i vantaggi dell'impiego di cerniere flessibili nella progettazione di pinze per robot con fili in SMA.

Hanno condotto un'analisi cinematica con lo scopo di trovare la geometria ottimale in grado di ottenere un buon "rapporto di amplificazione della forza e dello spostamento". Il rapporto di amplificazione è definito come P/F dove: P è la forza di presa all'estremità del dito; F è la forza di attuazione fornita dal filo in SMA. Mentre il rapporto di amplificazione dello spostamento è dato dal rapporto dk/dy dove: dk rappresenta lo spostamento all'estremità del dito; dy è lo spostamento dell'estremità del filo in SMA.

Nella figura in basso è rappresentata la geometria ottimale in grado di ottenere un elevato rapporto di forza e di spostamento e il dito ottenuto a partire da quella geometria.

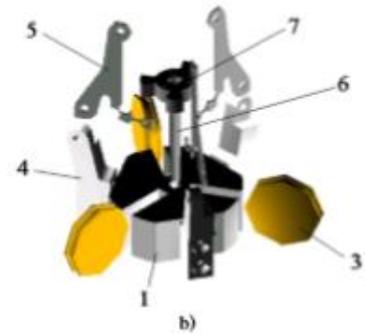
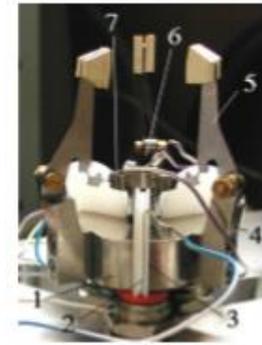
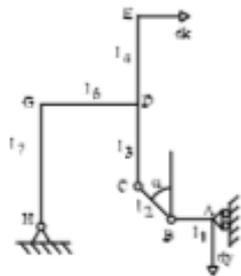


Figura 68. Gripper proposto dal prof. Raparelli e Ing. Maffiodo



$$\frac{dk}{dy} = \frac{\sqrt{l_6^2 + (l_7 + l_4)^2}}{l_6} \left(\frac{l_6 \cot \alpha}{l_6 \cot \alpha - l_7 + l_3} \right)$$



Il prototipo del gripper a tre dita proposto è mostrato in Figura 68. Sono stati utilizzati fili Flexinol della Dynalloy Inc. si diametro 250 μm e lunghezza 11, 2 mm.

Gli autori sono riusciti a realizzare una mano robotica azionata da fili compatta e leggera. È stato ottenuto un ottimo fattore di amplificazione comparabile con il valore teorico atteso, tuttavia lo spostamento medio del dito era inferiore e quello atteso. Questo è probabilmente dovuto a diversi

fattori, come ad esempio la presenza di un micro-scorrimento tra dischi in plastica e SMA che provoca una riduzione dello spostamento in uscita.

In (Luca Marioni, 2014) è proposto il progetto di un gripper con struttura cedevole e azionato tramite un filo centrale SMA impiegato nelle applicazioni biomediche [12]. È sicuramente il dispositivo che più si avvicina al gripper che si intende realizzare in questo elaborato finale. La Figura 69 mostra la geometria del gripper in esame.

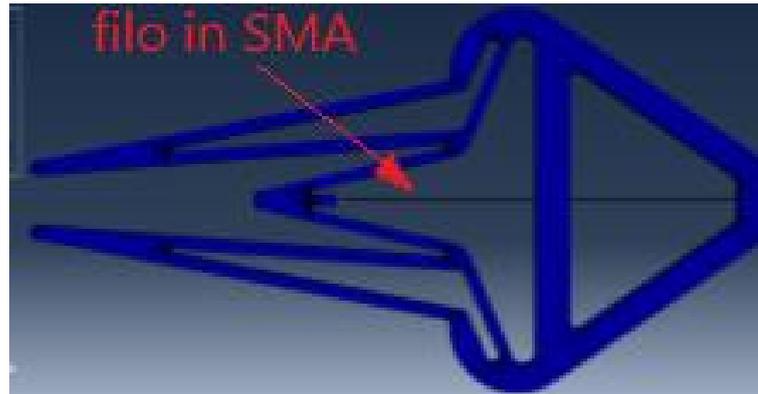


Figura 69. Geometria finale ottimizzata

Anche in questo caso sono state impiegate delle cerniere flessionali che aumentano la capacità di chiusura della pinza e consentono una grande deformazione angolare senza alcun contributo di stabilità.

La geometria definitiva, che è mostrata nella Figura precedente, è il risultato di una lunga ottimizzazione volta a trovare un giusto compromesso tra: rendere massima l'escursione delle pinze e ridurre al minimo i requisiti di chiusura in termini di forza e spostamenti dell'attuatore con una velocità di deformazione elevata.

In (Che-Min Lin, Chen-Hsien Fan, Chao-Chieh Lan, 2009) è stato proposto una tipologia di gripper che è in grado di manipolare una vasta gamma di oggetti di differente forma e dimensione [13].

La dimensione complessiva del microgripper è di $10 \times 2 \times 0,4 \text{ mm}^3$. È realizzato in Poliossimetilene (POM, $E=209 \text{ MPa}$) ed è fabbricato utilizzando una macchina commerciale per il taglio laser (M-300, Universal Laser Systems). La pinza ha una lunghezza del braccio di 10 mm con un escursione tra configurazione iniziale e quella deformata pari a 5,5 mm. Anche in questo caso l'impiego di meccanismi cedevoli consente di semplificare la realizzazione del dispositivo di presa. La pinza è in grado di fornire una forza di presa di 0,49 N. Il punto di forza di questo tipo di microgripper risiede nel fatto che il filo in SMA aziona ogni dito della pinza in più punti e questo consente di aumentare il rapporto tra lo spostamento delle dita e la lunghezza del dito.

In (Lael U. Odhner, 2011) è stato proposto un gripper a due dita sottoattuato [14] in grado di eseguire compiti di manipolazione con agilità nonostante il fatto che non sia completamente vincolato. Anche in questo caso è stato effettuato un approccio cinematico inverso con la determinazione della matrice Jacobiana utile a determinare le configurazioni assunte dal sistema. Vengono analizzati due casi: il primo in cui la parte finale delle dita è rigida ed è collegata a dei link intermedi tramite elementi passivi (cerniere) e un caso in cui si affida il moto di questa parte del gripper alla flessibilità del materiale con il quale è realizzato, come è mostrato in Figura 72.

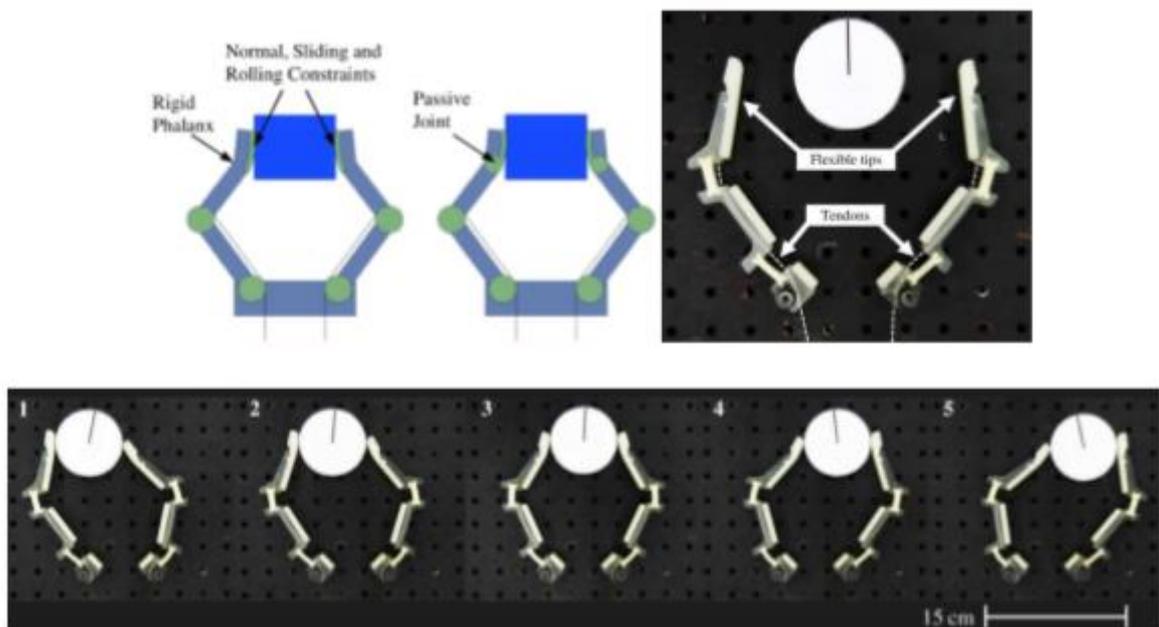


Figura 72. Gripper di Lael U. Odhner

CAPITOLO 4: PROGETTAZIONE DEL GRIPPER

4.1 Specifiche di Progetto

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di realizzare un dispositivo di presa in grado di manipolare con agilità e affidabilità componenti di apparecchiature elettroniche. Si vuole ottenere un gripper:

- economico e compatto
- accostamento parallelo
- attuato tramite fili SMA
- con cerniere flessionali

Come già detto in precedenza l'attuazione tramite le leghe in memoria di forma consente di ottenere numerosi vantaggi tra cui semplicità meccanica, condizioni di lavoro pulite, leggerezza e compattezza. Anche l'impiego di dispositivi cedevoli, ovvero delle cerniere flessionali, consente di realizzare un dispositivo economico e compatto che può essere facilmente prodotto come corpo unico senza la necessità di operazioni di assemblaggio.

Gli organi di presa tradizionali in genere sono dei dispositivi meccanici complessi dati dall'insiemi di elementi rigidi collegati tra loro tramite degli accoppiamenti cinematici (rotazionali, prismatici ecc) come mostrato in Figura in basso.

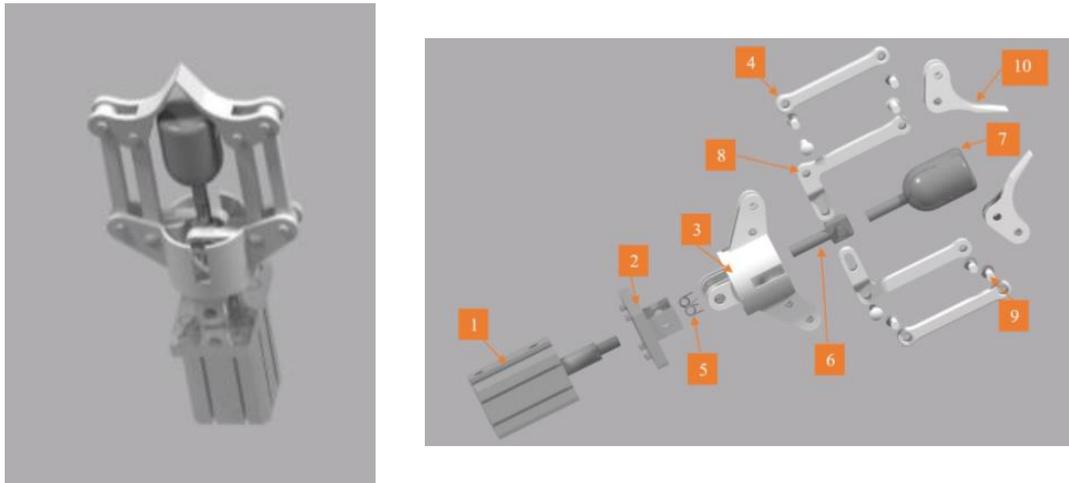


Figura 73. Gripper con accoppiamenti cinematici tradizionali

L'utilizzo di cerniere flessionali semplifica notevolmente la fase di realizzazione del gripper in quanto, essendo una struttura monolitica, può essere prodotta tramite tecniche di fabbricazione additiva.

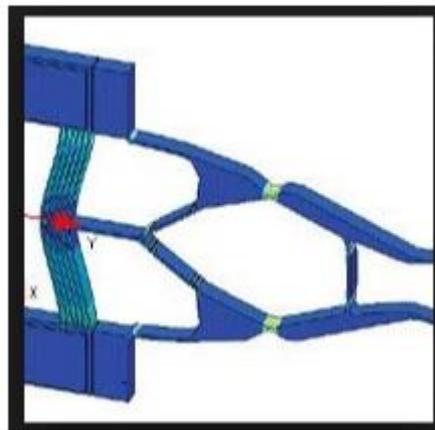


Figura 74. Gripper con cerniere flessionali

4.2 Progettazione unità cedevole

Come già detto in precedenza, un meccanismo cedevole è un particolare sistema costituito da elementi a bassa rigidità (cerniere flessionali o segmenti flessionali) capace di deformarsi elasticamente a seguito dell'applicazione di carichi esterni e di ritornare alla configurazione iniziale una volta rimossi i carichi. La scelta di utilizzare come dispositivo di trasmissione dello spostamento e/o della forza un'unità cedevole piuttosto che un tradizionale sistema meccanico costituito da corpi rigidi consente di ottenere diversi vantaggi, in particolare:

- maggiore precisione, infatti, negli accoppiamenti cinematici tradizionali è necessario un certo gioco e questo riduce la precisione;
- assenza di attrito in quanto non sono presenti accoppiamenti cinematici;
- riduzione dei costi di produzione dato che non sono necessarie operazioni di assemblaggio;
- bassissima manutenzione, l'usura del componente è limitata grazie all'assenza di attrito;
- facile produzione tramite tecniche di fabbricazione additiva;
- movimento continuo;

Tuttavia, l'impiego di cerniere flessionali presenta anche dei svantaggi come ad esempio: range di spostamento limitato, difficoltà di modellazione e controllo del movimento.

Grazie all'analisi dello stato attuale dei dispositivi di presa con cerniere flessionali che utilizzano come dispositivi di attuazione i fili SMA, descritta nel capitolo precedente, è stato possibile avere un quadro generale dei sistemi di presa esistenti che è stato essenziale a definire la geometria del gripper proposto in questo elaborato.

Si è pensato di realizzare un modello di gripper costituito da due unità di attuazione proposta nello studio sulla caratterizzazione delle cerniere flessionali condotto da Guimin Chen in [12]. La Figura 75 mostra la struttura cedevole che è stata presa in considerazione per la realizzazione del gripper.

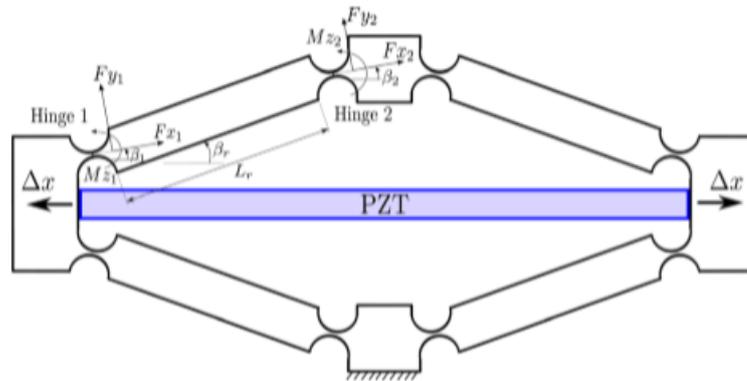


Figura 75. Unità cedevole considerata

Come si può osservare dalla Figura 75 la struttura cedevole è costituita da 8 cerniere flessionali con bassa rigidezza che si comportano da cerniere e quindi consentono una rotazione relativa degli elementi in essa collegati.

Disponendo due unità cedevoli insieme è possibile definire la geometria della pinza che si intende realizzare (Figura 76).

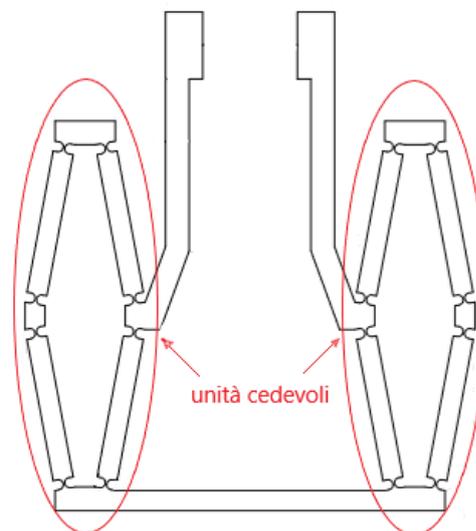


Figura 76. Geometria della pinza

L'unità cedevole ha il compito di trasferire lo spostamento in ingresso imposto dal filo SMA in uno spostamento delle griffe della pinza.

4.2.1 Modello semplificato

Il primo passo è stato quello di effettuare un'analisi cinematica dell'unità cedevole con l'obiettivo di ottenere delle dimensioni e delle grandezze geometriche ottimali utili alla costruzione del modello CAD.

Lo scopo è quello di ottenere le dimensioni ottimali del quadrilatero articolato tali da rendere massimo lo spostamento orizzontale in uscita (ΔX_{out}) in funzione dello spostamento verticale in ingresso imposto dal filo SMA (ΔY_{in}).

In Figura 77 è mostrato l'unità cedevole e il filo SMA utilizzato per imprimere il movimento e consentire che la struttura si deformi.

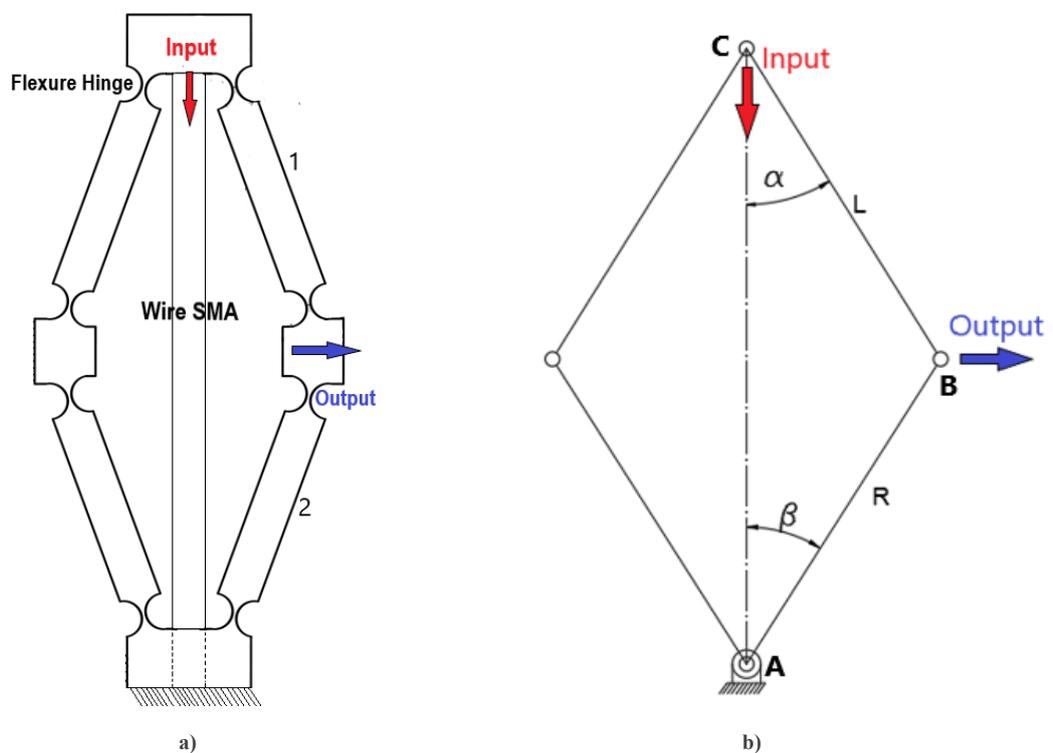


Figura 77. Unità cedevole, a) modello reale; b) schema semplificato

In prima approssimazione l'unità cedevole può essere schematizzata come un quadrilatero articolato costituito da 4 elementi trave collegati tra loro mediante delle cerniere ideali come mostrato in Figura 77 .

4.2.2 Calcolo analitico equazione $\Delta X_B = f(\Delta Y_C, \alpha)$

Lo scopo è quello di ricavare la relazione tra lo spostamento verticale in ingresso fornito dall'attuatore (ΔY_C) e lo spostamento orizzontale in uscita associato al dito del gripper (ΔX_B).

I principali parametri geometrici che sono stati associati al meccanismo sono:

L [mm] Lunghezza elemento 1

R [mm] Lunghezza elemento 2

α inclinazione elemento 1 rispetto l'asse di simmetria verticale

β inclinazione elemento 2 rispetto l'asse di simmetria verticale

Sono stati indicati inoltre con

ΔX_B spostamento orizzontale in uscita (punto B)

ΔY_C spostamento verticale in ingresso (punto C)

Osservando la Figura 78 si possono scrivere le seguenti equazioni geometriche

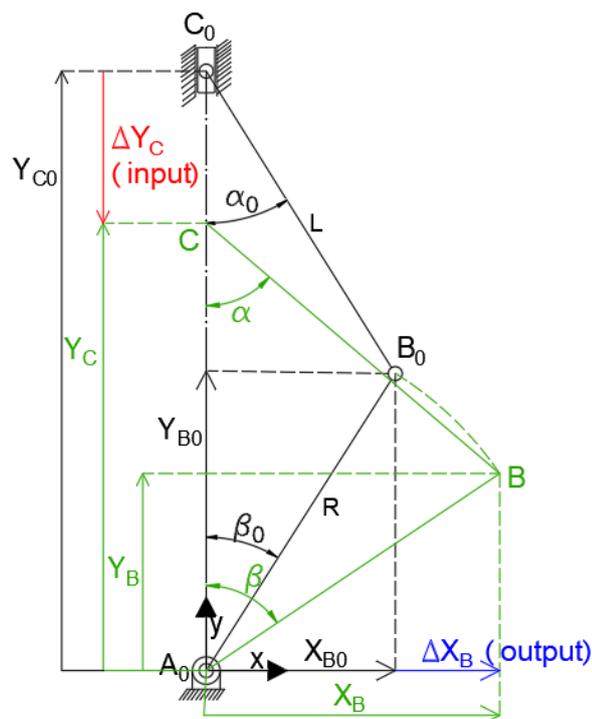


Figura 78: Meccanismo nella configurazione iniziale e in una configurazione generica

Configurazione iniziale (t_0)

$$B_o \equiv (X_{B_o}, Y_{B_o})$$

$$C_o \equiv (X_{C_o}, Y_{C_o})$$

Il punto B_o ha coordinate:

$$X_{B_o} = R \cdot \sin\beta_0$$

$$Y_{B_o} = R \cdot \cos\beta_0$$

Il punto C_o ha coordinate:

$$X_{C_o} = 0$$

$$Y_{C_o} = Y_{B_o} + L \cdot \cos\alpha_0$$

Configurazione generica (t)

$$B \equiv (X_B, Y_B)$$

$$C \equiv (X_C, Y_C)$$

Il punto B ha coordinate:

$$X_B = R \cdot \sin\beta$$

$$Y_{B_o} = R \cdot \cos\beta$$

Il punto C_o ha coordinate:

$$X_C = 0$$

$$Y_C = Y_B + L \cdot \cos\alpha$$

In entrambi i casi vale la relazione:

$$\sin\beta = \frac{L}{R} \cdot \sin\alpha \quad (30)$$

Lo spostamento lungo la direzione X del punto B (**Output**) può essere calcolato come segue:

$$\Delta X_B = X_B - X_{B_o} = R \cdot \sin\beta - R \cdot \sin\beta_0 = R \cdot (\sin\beta - \sin\beta_0) \text{(Output)} \quad (31)$$

Analogamente lo spostamento verticale del punto C (**Input**) è dato:

$$\Delta Y_C = Y_C - Y_{C_o} = (Y_B + L \cdot \cos\alpha) - (Y_{B_o} + L \cdot \cos\alpha_0) = Y_B - Y_{B_o} + L \cdot (\cos\alpha - \cos\alpha_0) \quad (32)$$

D'altra parte:

$$Y_B - Y_{B_o} = R \cdot \cos\beta - R \cdot \cos\beta_0 = R \cdot (\cos\beta - \cos\beta_0) \quad (33)$$

Sostituendo l'equazione (33) nella (32) si ottiene:

$$\Delta Y_C = R \cdot (\cos\beta - \cos\beta_0) + L \cdot (\cos\alpha - \cos\alpha_0) \text{(Input)} \quad (34)$$

A tal proposito definiamo il *Rapporto di Amplificazione* dello spostamento (RA) il rapporto tra lo spostamento in uscita (ΔX_B) e lo spostamento in ingresso (ΔY_C).

$$RA = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\Delta X_B}{\Delta Y_C} \quad \text{RAPPORTO DI AMPLIFICAZIONE} \quad (35)$$

Sostituendo l'equazione (31) e la (34) il rapporto di amplificazione assume la forma:

$$RA = \frac{R \cdot (\sin \beta - \sin \beta_0)}{R \cdot (\cos \beta - \cos \beta_0) + L \cdot (\cos \alpha - \cos \alpha_0)} \quad (36)$$

Come si può osservare il rapporto di amplificazione dello spostamento dipende solo dai parametri geometrici associati al sistema.

L'equazione (35) può essere scritta come segue:

$$\Delta X_B = RA * \Delta Y_C \quad (37)$$

Sostituendo in quest'ultima equazione la (36) si ottiene la relazione cercata.

$$\Delta X_B = \frac{R \cdot (\sin \beta - \sin \beta_0)}{R \cdot (\cos \beta - \cos \beta_0) + L \cdot (\cos \alpha - \cos \alpha_0)} * \Delta Y_C \quad (38)$$

L'equazione (39) lega lo spostamento orizzontale in uscita del dito (ΔX_B) con lo spostamento verticale in ingresso (ΔY_C) fornito dal filo SMA. Come si può osservare lo spostamento in uscita è direttamente proporzionale allo spostamento in ingresso tramite il rapporto di amplificazione (RA).

4.2.3 Determinazione dei parametri geometrici R e α_0

Per calcolare i valori dei parametri geometrici ottimali R e α_0 è stata effettuata un'analisi cinematica dell'unità cedevole orientata a ottenere un elevato rapporto di amplificazione dello spostamento. Quindi per parametri geometrici R e α_0 ottimali si intende quei valori tali da avere un elevato rapporto di amplificazione (RA) e/o spostamento orizzontale (ΔX_B) in uscita.

Per riuscire ad ottenere un gripper ad accostamento parallelo è stato necessario considerare un'unità cedevole simmetrica in cui $L=R$ e $\alpha_0 = \beta_0$.

Sotto queste condizioni le equazioni principali (31), (34), (36) e (38) si semplificano come segue:

$$\Delta X_B = R * (\sin\alpha - \sin\alpha_0) \quad (39)$$

$$\Delta Y_C = 2R * (\cos\alpha - \cos\alpha_0) \quad (40)$$

$$RA = \frac{\Delta X_B}{\Delta Y_C} = \frac{\sin\alpha - \sin\alpha_0}{2 * (\cos\alpha - \cos\alpha_0)} \quad (41)$$

$$\Delta X_B = \frac{\sin\alpha - \sin\alpha_0}{2 * (\cos\alpha - \cos\alpha_0)} \Delta Y_C \quad (42)$$

dall'equazione (40) si ricava il valore di α nella configurazione finale:

$$\alpha = \arccos(\cos\alpha_0 + \frac{\Delta Y_C}{2 * R}) \quad (43)$$

Inoltre dalla Figura 78 si può scrivere:

$$\frac{A_0 C_0}{2} = R * \cos\alpha_0 \quad (44)$$

Si è deciso di implementare le equazioni ottenute su Matlab in modo tale da determinare l'andamento del rapporto di amplificazione (RA) e dello spostamento orizzontale in uscita (ΔX_B) in funzione dell'inclinazione iniziale (α_0) ovvero le funzioni:

$$RA = f(\alpha_0)$$

$$\Delta X_B = f(\alpha_0)$$

L'obiettivo è quello di ricavare l'inclinazione α_0 ottimale tale da avere un'amplificazione dello spostamento in uscita e quindi un rapporto di amplificazione maggiore dell'unità.

I Dati di input (Fissi) sono:

$$\Delta Y_C = 3 \text{ mm} \text{ (accorciamento del filo SMA)}$$

$$A_0 C_0 = 100 \text{ mm} \text{ (lunghezza filo SMA)}$$

mentre l'angolo α_0 viene fatto variare tra $0,01^\circ$ fino a 60° .

PROCEDURA

Con un determinato valore di α_0 è stata calcolata l'inclinazione finale α delle aste del meccanismo tramite la relazione (43); noto il valore di α è stato possibile ottenere il valore della lunghezza delle aste (R); infine sono stati ricavati il valore dello spostamento orizzontale in uscita (ΔX_B) e il rapporto di amplificazione dello spostamento (RA).

La Figura 79 in basso mostra gli andamenti ottenuti tramite il software Matlab.

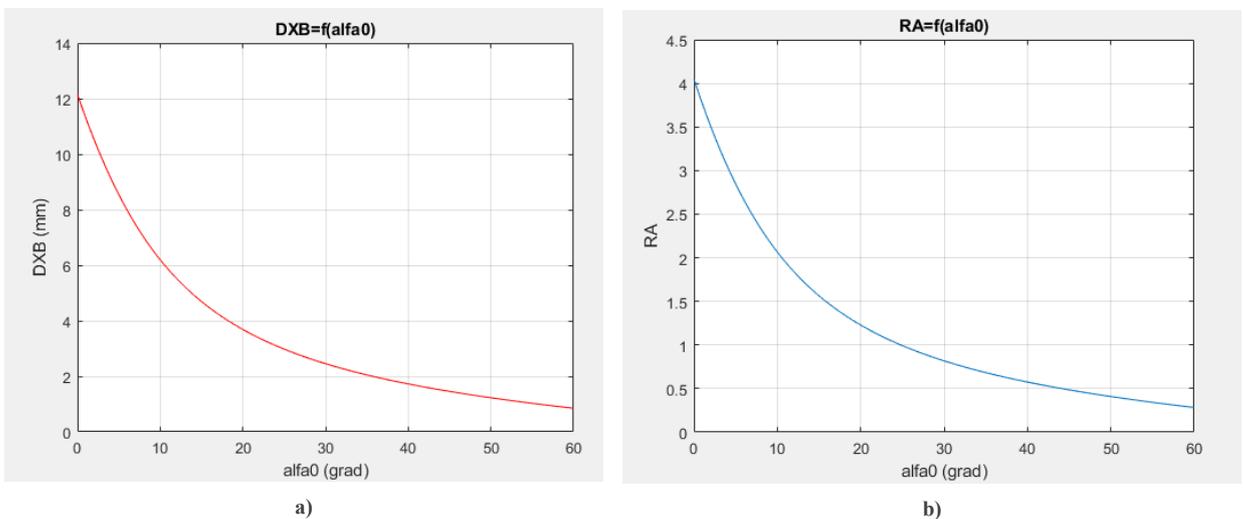


Figura 79. a) Andamento Spostamento in uscita in funzione di α_0 ; b) andamento del RA in funzione di α_0

Come si può osservare dal grafico $RA = f(\alpha_0)$, superato un certo valore di α_0 (α_{0cr}) il Rapporto di Amplificazione si mantiene al di sotto dell'unità e di conseguenza lo spostamento in uscita (ΔX_B) è inferiore a quello in ingresso (ΔY_C) quindi non ha senso parlare di amplificazione dello spostamento. Per valori di α_0 maggiori del valore critico

il rapporto di amplificazione è maggiore di uno e quindi lo spostamento in uscita è amplificato.

$$\alpha_0 < \alpha_{0cr} \rightarrow RA > 1 \rightarrow \Delta X_B > \Delta Y_C$$

Per ottenere un'amplificazione dello spostamento conviene realizzare un quadrilatero articolato allungato (angoli α_0 piccoli) piuttosto che schiacciato (angoli α_0 grandi)

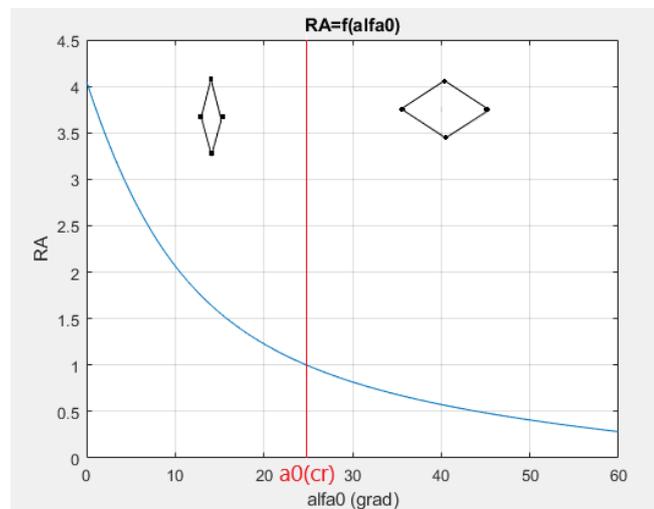


Figura 80. Inclinazione critica

Supponiamo di volere ottenere uno spostamento in uscita (ΔX_B) di 1.5 volte maggiore dello spostamento in ingresso (ΔY_C) e quindi un valore del rapporto di amplificazione dello spostamento (RA) pari a 1.5.

Entrando nel grafico $RA = f(\alpha_0)$ con il valore del rapporto di amplificazione scelto è possibile ricavare il corrispondente valore di α_0 come mostrato in Figura 81.

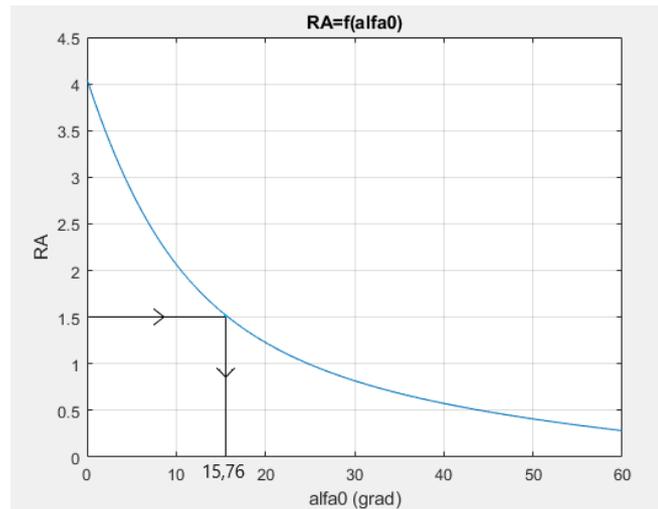


Figura 81. Andamento di RA in funzione di α_0

Noto il valore di α_0 posso ottenere la lunghezza delle aste R dall'equazione (44)

$$R = \frac{A_0 C_0}{2 \cos \alpha_0} = \frac{100}{2 * \cos(15,76)} = 51,95 \text{ mm}$$

In questo progetto si è deciso di avere uno spostamento in uscita che è il doppio di quello in ingresso e quindi di avere un rapporto di amplificazione pari a due. Con R.A. pari a due si ottiene:

$$\alpha_0 = 10,47^\circ$$

$$R = 50,85 \text{ mm}$$

In questo modo sono stati ottenute le prime dimensioni dell'unità cedevole.

In Appendice è riportato il listato di Matlab utilizzato per ricavare gli andamenti precedenti.

4.2.4 Modello Pseudo-Rigido Equivalente

Nella progettazione del meccanismo cedevole è necessario introdurre il concetto di *Meccanismo Pseudo Rigido Equivalente*. Il meccanismo (o modello) pseudo rigido equivalente è un meccanismo costituito da corpi rigidi connessi tra loro mediante accoppiamenti cinematici classici (coppie rotoidali, prismatiche etc.) che è equivalente al sistema reale costituito da cerniere virtuali. Il punto chiave nella definizione dei meccanismi pseudo rigidi equivalenti è la scelta del posizionamento delle coppie cinematiche e dei relativi elementi elastici che ne riproducono gli effetti di cedevolezza. Di seguito si riporta il modello pseudo rigido equivalente dell'unità cedevole considerata.

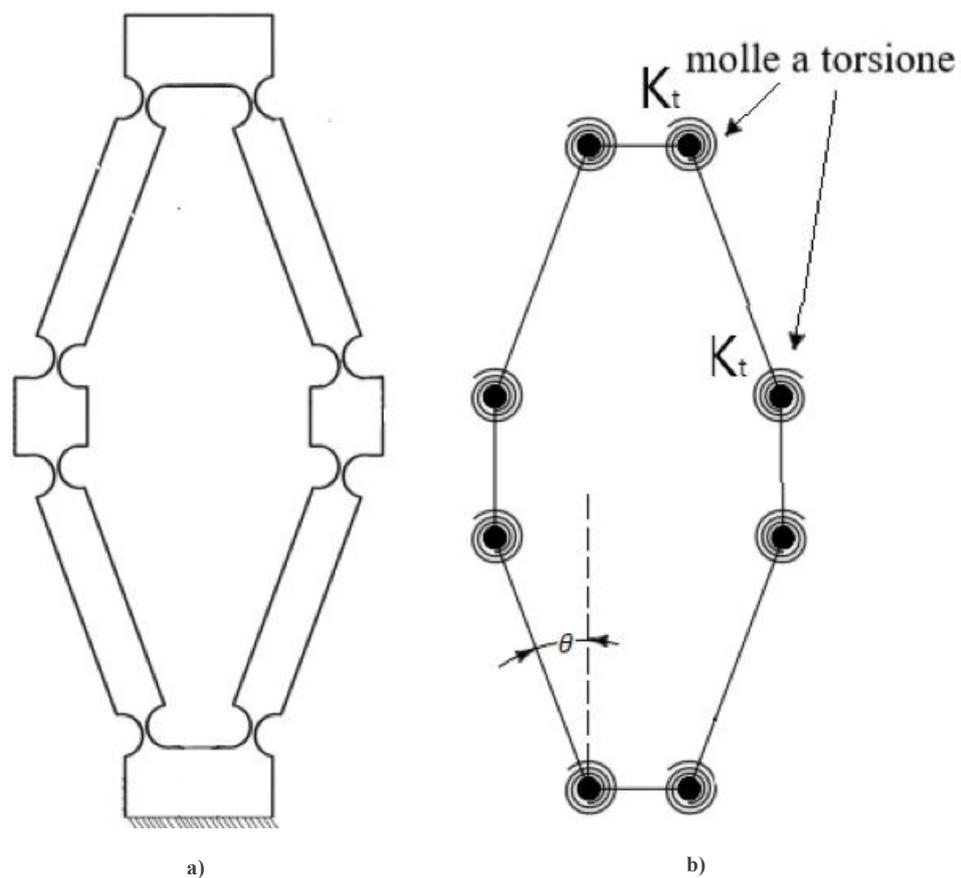


Figura 82. a) unità cedevole reale; b) modello pseudo-rigido equivalente

Come si può osservare dalla Figura 82, il modello pseudo rigido equivalente è costituito da elementi rigidi connessi tra loro tramite delle cerniere ideali. Ad ogni cerniera è associato un

elemento elastico torsionale (molla a torsione) di rigidezza a torsione opportuna K_t necessaria a fornire le forze di richiamo elastico sviluppate dalle cerniere flessionali.

Per realizzare il modello pseudo rigido equivalente è stato necessario effettuare un'**analisi cinematica** volta a definire un meccanismo che abbia come unico grado di libertà lo spostamento fornito dall'attuatore nonché dal filo SMA. Successivamente è stata condotta un'**agli elementi finiti** con l'obiettivo di determinare le rigidezze a torsione (K_t) da associare ad ogni cerniera.

4.2.5 Analisi cinematica

Per riuscire a definire il campo di spostamenti associati alla struttura è necessario determinare l'insieme di equazioni che governano la cinematica del sistema. Lo scopo dell'analisi è quello di ricavare un meccanismo che abbia come unico grado di libertà lo spostamento verticale imposto dal filo che equivale a determinare un sistema di equazioni la cui matrice dei coefficienti è una matrice quadrata singolare.

A tal proposito facciamo riferimento alla Figura 83 che riporta il modello schematico del meccanismo del gripper. Dato che il gripper è simmetrico l'analisi è stata effettuata considerando solo la parte sinistra della pinza.

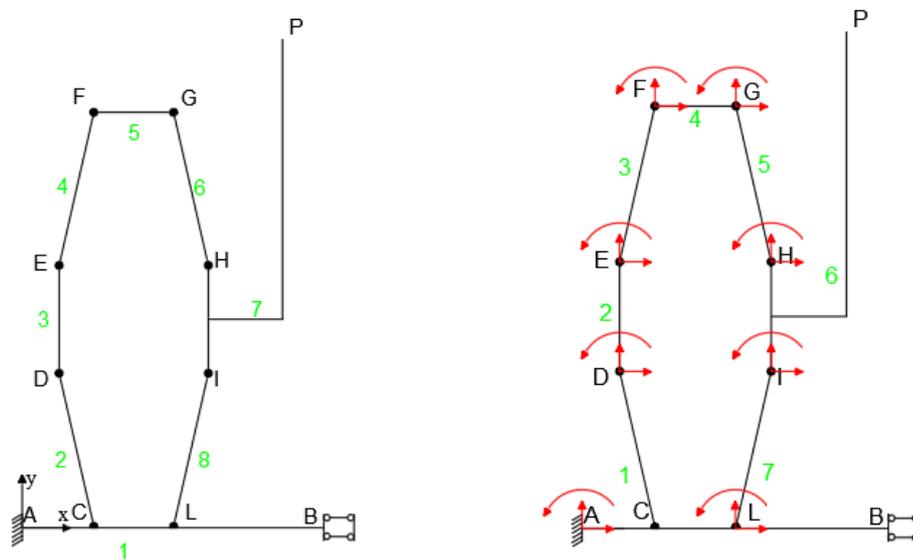


Figura 83. Modello del meccanismo gripper

Il sistema di equazioni associato al meccanismo è del tipo:

$$[A] \cdot \{u\} = \{0\} \quad (46)$$

dove $[A]$ rappresenta la *matrice cinematica* mentre $\{u\}$ rappresenta il vettore dei *parametri lagrangiani* ovvero i gradi di libertà associati al meccanismo.

Il primo passo per ottenere il sistema è stato quello di scrivere le equazioni ai vincoli. Dato che la molteplicità totale dei vincoli è pari a 21 ($3 + 2 + 2 \cdot 8$) è stato necessario scrivere 21 equazioni ai vincoli. Tenendo conto delle condizioni di vincolo e del tipo di vincoli associati alla struttura le equazioni ai vincoli sono:

$$U_A^1 = 0$$

$$V_A^1 = 0$$

$$\theta^1 = 0$$

$$U_C^1 = U_C^2$$

$$V_C^1 = V_C^2$$

$$U_D^2 = U_D^3$$

$$V_D^2 = V_C^3$$

$$U_E^3 = U_E^4$$

$$V_E^3 = V_E^4$$

$$U_F^4 = U_F^5$$

$$V_F^4 = V_F^5$$

$$U_G^5 = U_G^6$$

$$V_G^5 = V_G^6$$

$$U_H^6 = U_H^7$$

$$V_H^6 = V_H^7$$

$$U_I^7 = U_I^8$$

$$V_I^7 = V_I^8$$

$$U_L^8 = U_L^1$$

$$V_L^8 = V_L^1$$

$$U_B^1 = 0$$

$$\theta^1 = 0$$

Una volta ricavate le equazioni ai vincoli si è passato alla scelta dei parametri lagrangiani ovvero i gradi di libertà associati al sistema. Ad ogni punto generico della k-esima trave sono associati 3 possibili movimenti ovvero le due traslazioni U_i^k V_i^k e la rotazione θ^k .

Il numero di parametri lagrangiani è dunque pari a

$$8 \times 3 = \mathbf{24}.$$

Scegliere i parametri lagrangiani implica scegliere i poli che sono indispensabili per scrivere le equazioni fondamentali della cinematica. I parametri lagrangiani

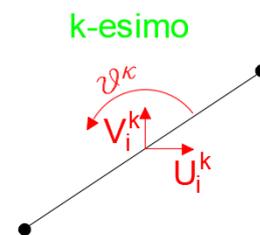


Figura 84. gradi di libertà associati ad ogni elemento trave

sono stati scelti in modo tale da ottenere un sistema costituito ad equazioni linearmente indipendenti. Si è deciso di scegliere i seguenti parametri lagrangiani:

$$u^T = \{U_A^1, V_A^1, \theta^1, U_D^2, V_D^2, \theta^2, U_E^3, V_E^3, \theta^3, U_F^4, V_F^4, \theta^4, U_G^5, V_G^5, \theta^5, U_H^6, V_H^6, \theta^6, U_I^7, V_I^7, \theta^7, U_L^8, V_L^8, \theta^8\}$$

Per ottenere la matrice cinematica è stato necessario esprimere le equazioni ai vincoli in funzione dei parametri lagrangiani scelti. Le equazioni fondamentali della cinematica associate a ogni elemento trave sono:

$$U_C^1 = U_A^1 - \theta^1(Y_C - Y_A)$$

$$V_C^1 = V_A^1 + \theta^1(X_C - X_A)$$

$$U_C^2 = U_D^2 - \theta^2(Y_C - Y_D)$$

$$V_C^2 = V_D^2 + \theta^2(X_C - X_D)$$

$$U_D^3 = U_E^3 - \theta^3(Y_D - Y_E)$$

$$V_D^3 = V_E^3 + \theta^3(X_D - X_E)$$

$$U_E^4 = U_F^4 - \theta^4(Y_E - Y_F)$$

$$V_E^4 = V_F^4 + \theta^4(X_E - X_F)$$

$$U_F^5 = U_G^5 - \theta^5(Y_F - Y_G)$$

$$V_F^5 = V_G^5 + \theta^5(X_F - X_G)$$

$$U_G^6 = U_H^6 - \theta^6(Y_G - Y_H)$$

$$V_G^6 = V_H^6 + \theta^6(X_G - X_H)$$

$$U_H^7 = U_I^7 - \theta^7(Y_H - Y_I)$$

$$V_H^7 = V_I^7 + \theta^7(X_H - X_I)$$

$$U_I^8 = U_L^8 - \theta^8(Y_I - Y_L)$$

$$V_I^8 = V_L^8 + \theta^8(X_I - X_L)$$

$$U_L^1 = U_A^1 - \theta^1(Y_L - Y_A)$$

$$V_L^1 = V_A^1 + \theta^1(X_L - X_A)$$

Sostituendo queste relazioni nelle equazioni ai vincoli si ottiene:

$$U_A^1 = 0 \quad 1$$

$$V_A^1 = 0 \quad 2$$

$$\theta^1 = 0 \quad 3$$

$$U_A^1 - \theta^1(Y_C - Y_A) - U_D^2 + \theta^2(Y_C - Y_D) = 0 \quad 4$$

$$V_A^1 + \theta^1(X_C - X_A) - V_D^2 - \theta^2(X_C - X_D) = 0 \quad 5$$

$$U_D^2 - U_E^3 + \theta^3(Y_D - Y_E) = 0 \quad 6$$

$$V_D^2 - V_E^3 - \theta^3(X_D - X_E) = 0 \quad 7$$

$$\begin{aligned}
U_E^3 - U_F^4 + \theta^4(Y_E - Y_F) &= 0 & 8 \\
V_E^3 - V_F^4 - \theta^4(X_E - X_F) &= 0 & 9 \\
U_F^4 - U_G^5 + \theta^5(Y_F - Y_G) &= 0 & 10 \\
V_F^4 - V_G^5 - \theta^5(X_F - X_G) &= 0 & 11 \\
U_G^5 - U_H^6 + \theta^6(Y_G - Y_H) &= 0 & 12 \\
V_G^5 - V_H^6 - \theta^6(X_G - X_H) &= 0 & 13 \\
U_H^6 - U_I^7 + \theta^7(Y_H - Y_I) &= 0 & 14 \\
V_H^6 - V_I^7 - \theta^7(X_H - X_I) &= 0 & 15 \\
U_I^7 - U_L^8 + \theta^8(Y_I - Y_L) &= 0 & 16 \\
V_I^7 - V_L^8 - \theta^8(X_I - X_L) &= 0 & 17 \\
U_L^8 - U_A^1 + \theta^1(Y_L - Y_A) &= 0 & 18 \\
V_L^8 - V_A^1 - \theta^1(X_L - X_A) &= 0 & 19 \\
U_A^1 - \theta^1(Y_B - Y_A) &= 0 & 20 \\
\theta^1 &= 0 & 21 \\
\theta^5 &= 0 & 22 \\
\theta^3 + \theta^7 &= 0 & 23 \\
U_G^5 &= 0 & 24
\end{aligned}$$

Il risultato è un sistema di 24 equazioni in 24 incognite di conseguenza una matrice cinematica quadrata 24x24. Dunque, per riuscire ad ottenere una matrice quadrata è stato necessario aggiungere 3 ulteriori equazioni ai vincoli (equazioni 22, 23 e 24).

Indicando con $\Delta X_{i,j} = X_i - X_j$ e $\Delta Y_{i,j} = Y_i - Y_j$ il sistema precedente può essere scritto in forma matriciale come segue:

Si può osservare che la terza e la ventunesima riga sono identiche quindi non tutte le equazioni del sistema sono indipendenti. Quindi la matrice cinematica è una matrice quadrata singolare. Il rango della matrice è dunque inferiore al rango massimo ($r < r_{max}$). Il numero di gradi di libertà è dato dalla differenza tra il rango massimo e il rango effettivo della matrice cinematica.

$$g.d.l = r_{max} - r = 24 - 23 = 1$$

dove si è indicato con r e r_{max} rispettivamente il rango e il rango massimo della matrice cinematica.

La struttura possiede 1 grado di libertà (labile) quindi si hanno ∞^1 possibili cinematismi, pertanto, imponendo uno spostamento verticale (imposto dall'attuatore) all'elemento 5 è possibile determinare il campo di spostamenti e quindi il suo movimento.

4.2.6 Calcolo rigidezza cerniera cedevole

In questo paragrafo è descritto il calcolo della rigidezza a torsione delle cerniere flessionali che costituiscono la struttura della pinza. Per il calcolo della rigidezza si è deciso di effettuare un'analisi agli elementi finiti tramite l'ausilio del software ANSYS.

Si è deciso di utilizzare delle cerniere flessionali con profilo ad arco di circonferenza riportato in Figura 86 con i seguenti parametri geometrici:

w larghezza della cerniera

h altezza della cerniera

t spessore minimo tra i due profili circolari

r raggio del profilo circolare

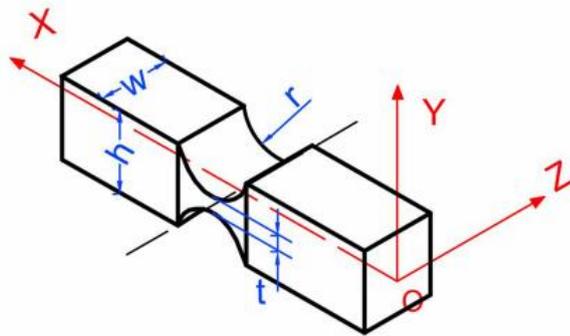


Figura 86. Cerniera flessionale con profilo circolare

Per calcolare i valori ottimali dei parametri geometrici delle cerniere flessionali sono state effettuate ripetute analisi con l'obiettivo di ottenere un valore di rigidezza opportuno tale da garantire che la cerniera si deformi a seguito dell'applicazione di forze esterne e che è in grado di ritornare alla configurazione iniziale una volta rimossi i carichi.

La cerniera flessionale è stata modellata come una struttura 2D. La scelta di utilizzare un modello piano è giustificata dal fatto che un'analisi bidimensionale consente di ridurre notevolmente gli sforzi computazionali e i tempi di calcolo rispetto a un modello tridimensionale ottenendo risultati affidabili. Tuttavia, è necessario fare attenzione nell'uso di modelli 2D e nella selezione dei tipi di elementi.

Per l'analisi piana della cerniera cedevole è stato utilizzato l'elemento *SHELL63* in quanto consente di approssimare nel modo migliore sollecitazioni tridimensionali grazie all'elevata capacità di deformazione ed allo stesso tempo di irrigidimento. E' in grado, inoltre, di descrivere accuratamente il comportamento a flessione e quello membranale di conseguenza sono permessi

sia carichi trasversali e sia sul piano. L'elemento ha quattro nodi a cui sono associati sei gradi di libertà (tre traslazioni e tre rotazioni) come è mostrato in Figura 86.

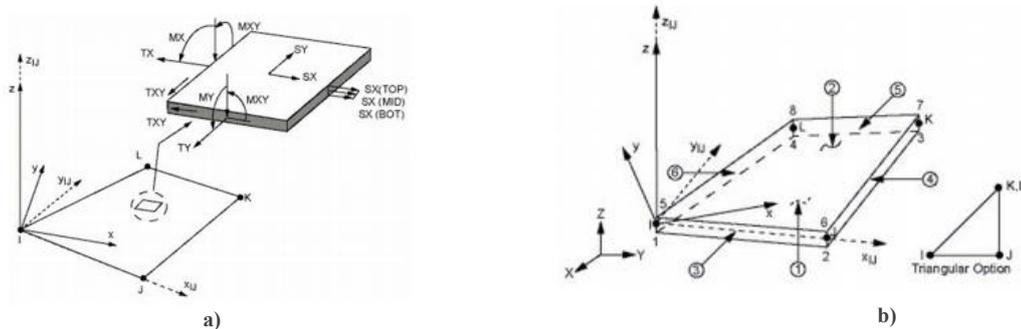


Figura 87. Elemento SHELL63 : a) tensioni associate all'elemento ; b) geometria elemento

Dato che il prototipo del gripper sarà realizzato in PA tramite una tecnica di fabbricazione additiva e dato che è necessario mantenersi in campo elastico, quindi effettuare un'analisi lineare, è stato sufficiente inserire solo il valore del modulo elastico del materiale ($E=1650$ MPa). Il valore del modulo elastico è stato ricavato dalla Tabella 4 (paragrafo 4.3.2) fornita dal laboratorio di fabbricazione additiva del politecnico di Torino.

Una volta definita geometria, elemento e materiale si è passati alla definizione delle condizioni di carico e vincolo.

Per valutare la rigidità a torsione della cerniera flessionale è stato necessario applicare una coppia di forze uguali e opposte all'estremità destra della cerniera come mostrato in Figura 88. Per ottenere un momento torcente unitario il modulo della forza deve essere dato:

$$M_x = 2 \cdot F_x \cdot \frac{h}{2} \quad (47)$$

$$F_x = \frac{M_x}{h} = \frac{1}{h} \quad (48)$$

Mentre il lato sinistro della cerniera è stato vincolato tramite degli incastri.

La Figura 88 mostra il modello 2D della cerniera flessionale e le condizioni di carico e vincolo imposte nell'analisi tramite il software ANSYS.

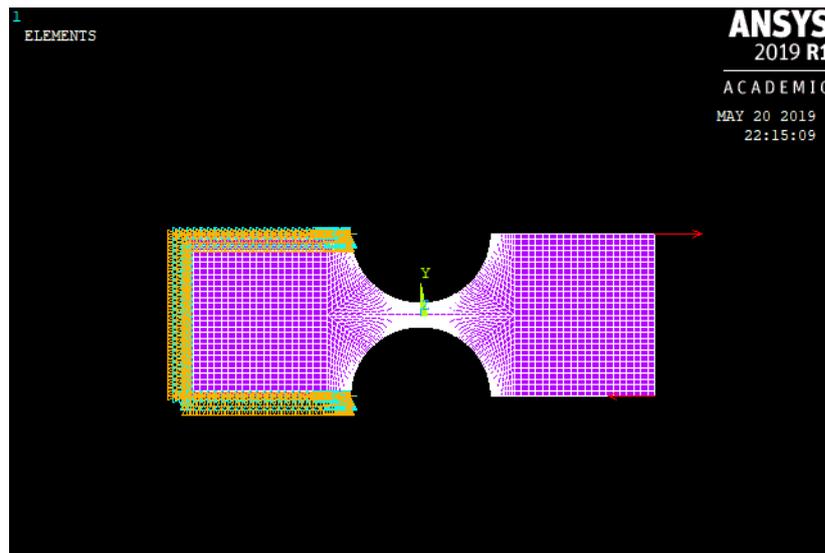


Figura 88. Condizioni di carico e vincolo

Una volta imposti i carichi e i vincoli è stata lanciata l'analisi. La Figura 89 mostra la deformazione della cerniera cedevole ottenuta dall'analisi FEM.

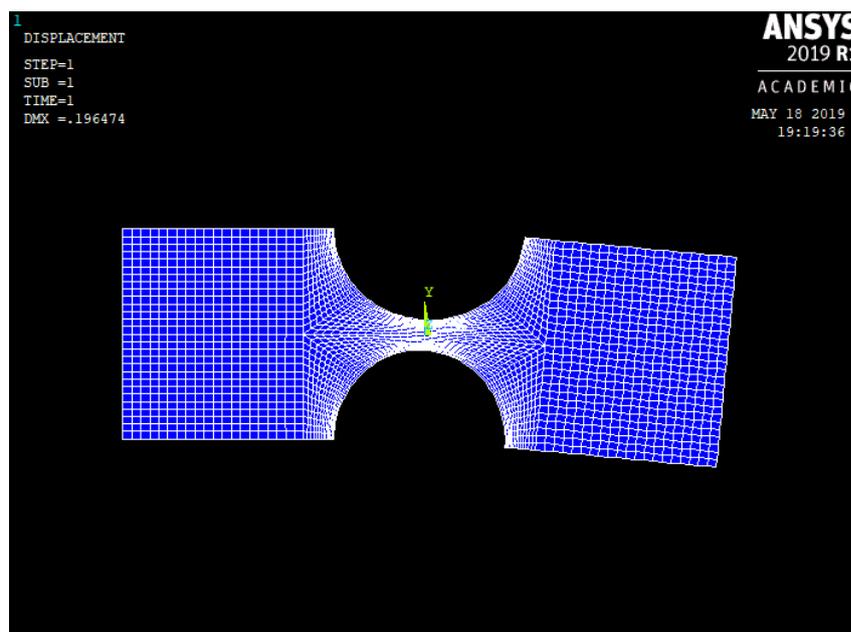


Figura 89. Configurazione deformata

L'obiettivo è quello di ricavare la rotazione, rispetto all'asse z (ortogonale al piano della cerniera flessionale) di un nodo di riferimento in modo tale da calcolare la rigidità della cerniera flessionale. A tal proposito è stato scelto come nodo di riferimento il nodo 1472. Il software consente di leggere il a seguito dell'applicazione

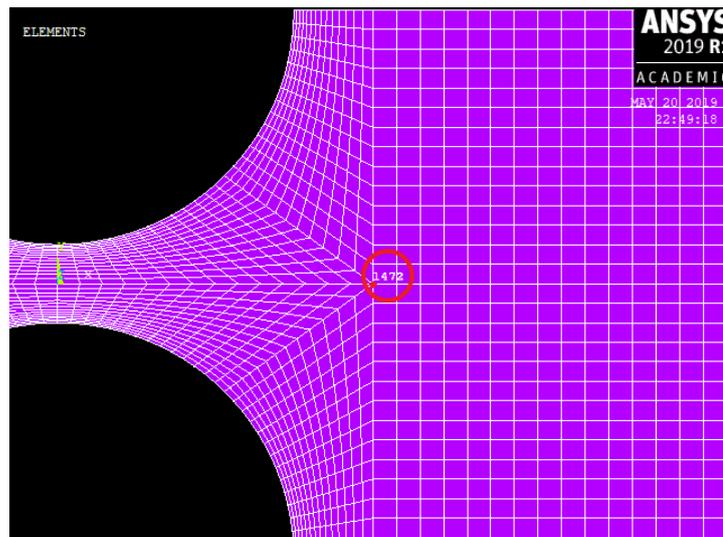


Figura 90. Nodo di riferimento

```

PRNSOL Command
File
PRINT ROT NODAL SOLUTION PER NODE
***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM
NODE ROTZ
1472 -1.5971
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE 1472
VALUE -1.5971

```

Figura 91. Valore della rotazione nodo di riferimento

Noto il valore della rotazione in un punto è possibile calcolare la rigidezza a torsione della cerniera flessionale.

$$K_t = \frac{M_z}{\theta_z^{(1472)}} = \frac{1}{1,5971} = 0,626 \text{ Nmm/rad} \quad (49)$$

In Appendice è riportato il file word che è stato utilizzato nell'analisi agli elementi finiti

4.3 Dimensionamento in base al valore della rigidità

4.3.1 Sistema a parametri concentrati

Il valore di rigidità di un meccanismo cedevole è fondamentale nella progettazione del sistema stesso, infatti, deve essere tale da garantire che la struttura si deformi e allo stesso tempo garantire che essa ritorni alla configurazione iniziale. L'obiettivo di questa fase della progettazione è quello di determinare il valore di rigidità opportuno della pinza e di confrontarlo con la rigidità offerta dai fili SMA. Come già detto in precedenza la pinza viene azionata tramite dei fili a memoria di forma, di conseguenza è fondamentale analizzare l'interazione tra gli attuatori SMA e il meccanismo pinza durante il funzionamento. Quando i fili in lega a memoria di forma vengono eccitati elettricamente (**fase attiva**) per effetto Joule si sviluppa calore che porta a un incremento della temperatura. Superata la temperatura di attivazione della fase austenitica i fili SMA si contraggono e il meccanismo cedevole si deforma consentendo la chiusura delle griffe (pinza chiusa).

Nel momento in cui si interrompe il flusso di corrente i fili iniziano a raffreddarsi e ritornano alla lunghezza iniziale (**fase passiva**). A questo punto il meccanismo cedevole è libero di muoversi. L'energia elastica immagazzinata durante la fase attiva viene rilasciata sotto forma di coppie elastiche associate alle cerniere cedevoli che permettono al meccanismo pinza di ritornare alla configurazione iniziale (pinza aperta).

La pinza si comporta come una molla di conseguenza si può pensare di concentrare tutta la rigidità della pinza in un unico parametro (K_p) e quindi considerare un sistema a parametri concentrati del tipo:

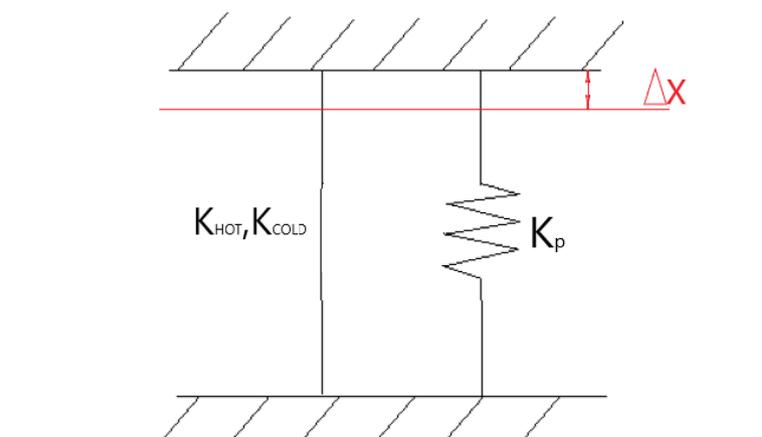


Figura 92. Sistema a parametri concentrati

dove K_p è la rigidezza della pinza mentre K_{HOT} e K_{COLD} rappresentano rispettivamente la rigidezza del filo SMA allo stato caldo e la rigidezza del filo SMA allo stato freddo.

La rigidezza del sistema pinza deve essere scelta in modo tale da consentire al sistema di deformarsi durante il riscaldamento e di ritornare alla configurazione iniziale quando il filo si raffredda. Quindi è necessario che venga rispettata la seguente condizione:

$$K_{HOT} > K_p > K_{COLD} \quad (50)$$

4.3.2 Rigidezza teorica della pinza (Kp)

La rigidezza della pinza è stata calcolata tramite ripetute analisi statiche con l'ausilio del software Solidworks. Sono stati considerati 5 modelli CAD geometricamente identici ma con diversi valori di r e t associati alle cerniere flessionali. In particolare:

MODELLO CAD	r "raggio raccordo" (mm)	t "spessore minimo" (mm)
1°	1,5	0,5
2°	1,5	1
3°	1,5	2
4°	2	1
5°	3	1

Tabella 5. Cinque modelli CAD con diversi parametri associati alle cerniere virtuali



La Figura 93 illustra il modello 2D del gripper e il particolare della cerniera flessionale.

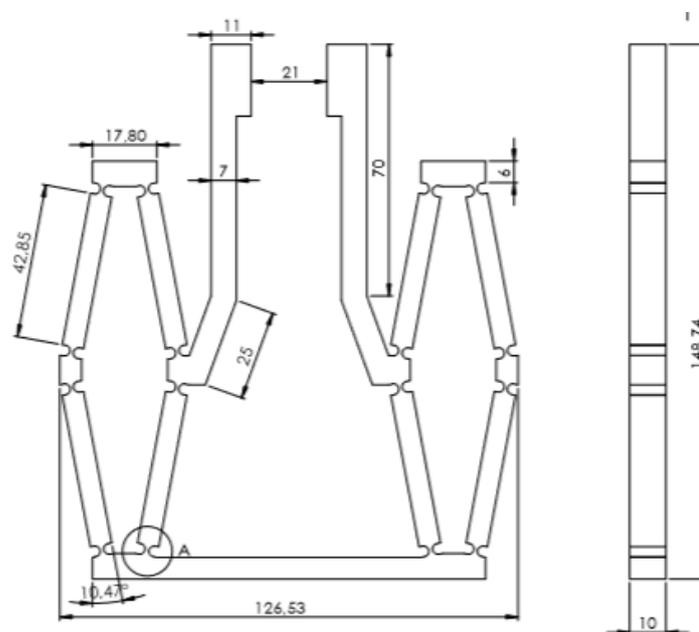


Figura 93. Modello 2D del gripper

Come materiale è stato scelto PA2200Balance1.0 tra quelli disponibili in quanto è ampiamente impiegato nei processi di fabbricazione additiva e presenta buone caratteristiche di cedevolezza ma al contempo buone proprietà meccaniche e quindi rappresenta un valido compromesso tra deformabilità e resistenza meccanica che sono richieste in queste applicazioni. Di seguito è

mostrata la scheda tecnica del materiale fornita dal laboratorio di fabbricazione additiva del politecnico.

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Izod Impact notched (23°C)	4.4	kJ/m ²	ISO 180/1A
Shore D hardness (15s)	75	-	ISO 868

3D Data	Value	Unit	Test Standard
The properties of parts manufactured using additive manufacturing technology (e.g. laser sintering, stereolithography, Fused Deposition Modelling, 3D printing) are, due to their layer-by-layer production, to some extent direction dependent. This has to be considered when designing the part and defining the build orientation.			
Tensile Modulus			ISO 527-1/-2
X Direction	1650	MPa	
Y Direction	1650	MPa	
Z Direction	1650	MPa	
Tensile Strength			ISO 527-1/-2
X Direction	48	MPa	
Y Direction	48	MPa	
Z Direction	42	MPa	
Strain at break			ISO 527-1/-2
X Direction	18	%	
Y Direction	18	%	
Z Direction	4	%	
Charpy impact strength (+23°C, X Direction)	53	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C, X Direction)	4.8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C, X Direction)	1500	MPa	ISO 178

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (20°C/min)	176	°C	ISO 11357-1/-3
Vicat softening temperature (50°C/h 50N)	163	°C	ISO 306
Burning behavior			UL 94
Test passed, HB	0.5	mm	
Test passed, HB	1.6	mm	
Test passed, HB	3.2	mm	

Tabella 6: proprietà meccaniche PA2200Balance1.0

Dato che questo materiale non è presente all'interno del database del software è stato necessario creare un nuovo materiale con valori estrapolati dalla scheda tecnica del materiale (Tabella 5).

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	1650	N/mm ²
Coefficiente di Poisson	0.34	N/A
Modulo di taglio	615.7	N/mm ²
Densità di massa	1120	kg/m ³
Resistenza alla trazione	48	N/mm ²
Resistenza a compressione		N/mm ²
Snervamento	48	N/mm ²
Coefficiente di espansione termica		/K
Conducibilità termica	0.2256	W/(m·K)

Tabella 7: Proprietà meccaniche implementate nel software

Una volta definito il materiale si è passato all'applicazione dei carichi e dei vincoli. Il modello è stato vincolato alla base mentre dei carichi concentrati sono stati applicati in corrispondenza delle superfici in cui verranno fissati i fili come mostrato in Figura 94.

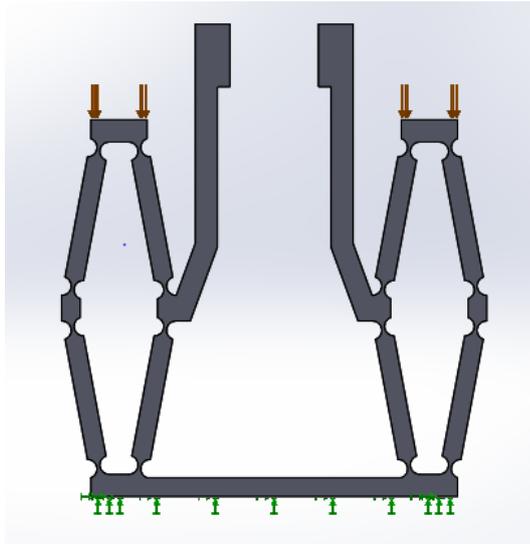


Figura 94. Condizioni di carico e vincolo

Sono state condotte delle simulazioni statiche imponendo diversi valori di forza e registrando i corrispondenti valori di spostamento orizzontale del punto all'estremità della griffa (come si può osservare nella Figura in basso).

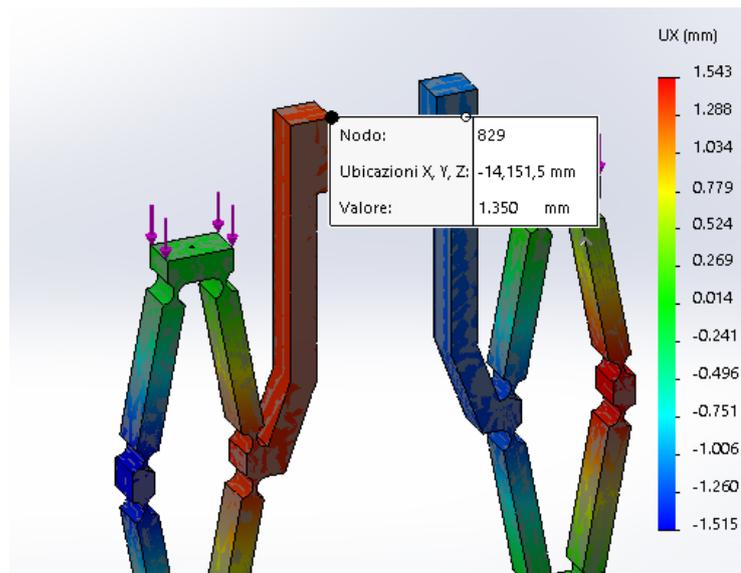


Figura 95. Entità dello spostamento all'estremità del dito

Ad esempio per il 5° modello CAD del gripper (con $r = 3$ e $t = 1$) i valori di spostamento ottenuti a seguito dell'applicazione dei diversi valori di forza sono elencati nella Tabella 5.

F [N]	Ux [mm]
0	0
5	0,68
10	1,35
15	2,03
20	2,70
25	3,38
30	4,05
35	4,73

Tabella 8: Valori di F e Ux

Plottando questi valori in un grafico in cui sull'asse delle ascisse è riportato il valore dello spostamento in uscita del dito e sull'asse delle ordinate la forza applicata si ottiene l'andamento illustrato in Figura 96.

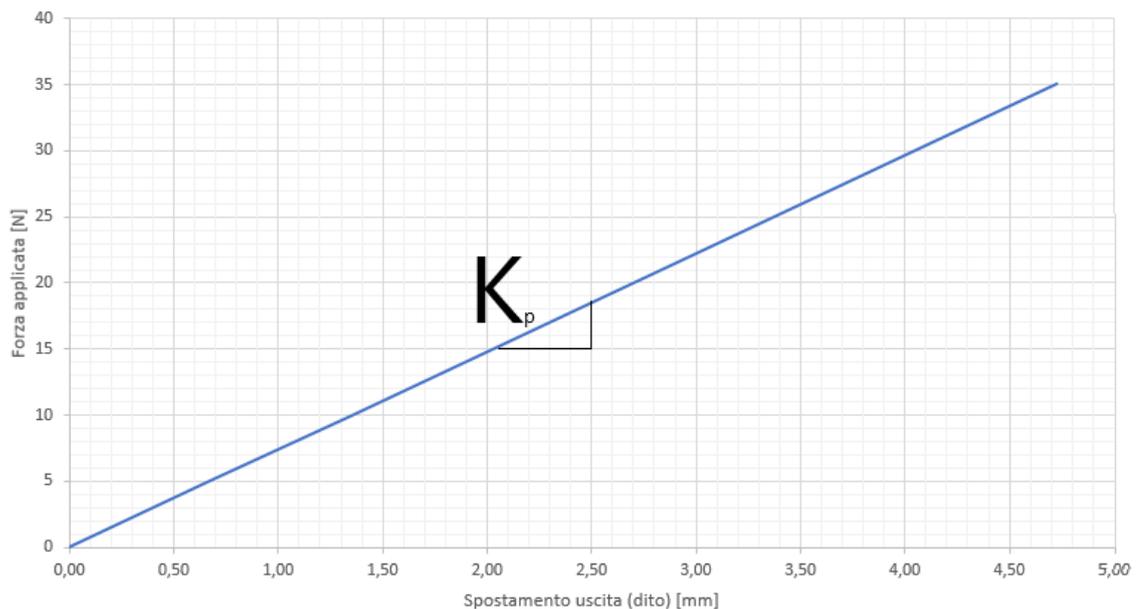


Figura 96. Diagramma Forza-Spostamento uscita del dito

La caratteristica del meccanismo pinza è quindi una retta la cui pendenza rappresenta proprio il valore di rigidità (K_p).

Quindi il comportamento della pinza è lineare di conseguenza è lecito scrivere:

$$F = K_p \cdot U_x \quad (51)$$

Dove con K_p è stata indicata la rigidezza del meccanismo. Sostituendo i valori numerici la rigidezza della pinza è pari a:

$$K_p = \frac{F}{U_x} = 7,40 \text{ N/mm} \quad (52)$$

Con la stessa procedura sono stati ricavati i valori di rigidezza associati agli altri modelli CAD.

MODELLO CAD	Kp [N/mm]
1°	6,4
2°	13,86
3°	41,5
4°	12,03
5°	7,4

Tabella 9: Valori di rigidezza dei 5 modelli di pinza

4.3.3 Rigidezza Fili SMA (K_{HOT} , K_{COLD})

La caratteristica del filo SMA dipende dal tipo di filo considerato. Si è deciso di utilizzare i fili Flexinol della Dynalloy Inc. dato che erano già disponibili presso il politecnico di Torino.

La seguente tabella fornisce i valori delle principali grandezze coinvolte in funzione del diametro del filo impiegato. Se il filo dell'attuatore Flexinol viene utilizzato all'interno delle linee guida, si può ottenere uno spostamento ripetibile che varia tra il 2% e il 5% della lunghezza con una durata a fatica dell'ordine di dieci milioni di cicli.

Diameter Size inches (mm)	Resistance ohms/inch (ohms/meter)	Heating Pull Force* pounds (grams)	Cooling Deformation Force* pounds (grams)	Approximate** Current for 1 Second Contraction (mA)	Cooling Time 158°F, 70°C "LT" Wire*** (seconds)	Cooling Time 194°F, 90°C "HT" Wire*** (seconds)
0.001 (0.025)	36.2 (1425)	0.02 (8.9)	0.008 (3.6)	45	0.18	0.15
0.0015 (0.038)	22.6 (890)	0.04 (20)	0.016 (8)	55	0.24	0.20
0.002 (0.050)	12.7 (500)	0.08 (36)	0.032 (14)	85	0.4	0.3
0.003 (0.076)	5.9 (232)	0.18 (80)	0.07 (32)	150	0.8	0.7
0.004 (0.10)	3.2 (126)	0.31 (143)	0.12 (57)	200	1.1	0.9
0.005 (0.13)	1.9 (75)	0.49 (223)	0.20 (89)	320	1.6	1.4
0.006 (0.15)	1.4 (55)	0.71 (321)	0.28 (128)	410	2.0	1.7
0.008 (0.20)	0.74 (29)	1.26 (570)	0.50 (228)	660	3.2	2.7
0.010 (0.25)	0.47 (18.5)	1.96 (891)	0.78 (356)	1050	5.4	4.5
0.012 (0.31)	0.31 (12.2)	2.83 (1280)	1.13 (512)	1500	8.1	6.8
0.015 (0.38)	0.21 (8.3)	4.42 (2250)	1.77 (900)	2250	10.5	8.8
0.020 (0.51)	0.11 (4.3)	7.85 (3560)	3.14 (1424)	4000	16.8	14.0

Tabella 10: Proprietà dei fili forniti dalla Dynalloy

Come si può osservare, la forza di tiro sviluppata dal filo durante la fase attiva (riscaldamento), aumenta al crescere del diametro. Si potrebbe pensare di utilizzare fili con il diametro maggiore in modo da avere forze di attivazione elevate, tuttavia, maggiore è il diametro del filo e maggiore sarà il tempo necessario per il raffreddamento e quindi il tempo di apertura del gripper.

Come già detto nel capitolo relativo ai materiali in memoria di forma, le proprietà meccaniche dei fili SMA dipendono fortemente dalla fase e dalla temperatura a cui si trovano queste leghe. Nella transizione dalla fase martensitica (bassa temperatura) alla fase austenitica (ad alta temperatura) il modulo elastico aumenta. Di conseguenza la rigidezza del filo SMA allo stato caldo (K_{HOT}) è maggiore della rigidezza del filo SMA allo stato freddo (K_{COLD}).

$$K_{HOT} > K_{COLD} \quad (53)$$

È stato dimostrato in [10] che il comportamento dei fili SMA può essere ragionevolmente considerato lineare. Quindi le rigidezze associate ai fili SMA possono essere ricavate come segue:

$$K_{HOT} = \frac{F_H}{\Delta X} \quad \text{“Rigidezza filo stato caldo”} \quad (54)$$

$$K_{COLD} = \frac{F_C}{\Delta X} \quad \text{“Rigidezza filo stato freddo”} \quad (55)$$

I valori F_{HOT} e F_{COLD} rappresentano rispettivamente la forza di tiro al riscaldamento (terza colonna Tabella 7) e la forza del filo SMA durante il raffreddamento (quarta colonna tabella 7).

I fili devono essere scelti in modo tale da essere soddisfatta la seguente relazione:

$$K_{HOT} > K_P > K_{COLD} \quad (56)$$

La scelta dei fili è trattata nel proseguo di questo lavoro in quanto è necessario considerare il valore reale della rigidezza e non quello teorico.

Nelle successive analisi si fa riferimento al modello CAD n° 5 con $r=3$ mm e $t=1$ mm in quanto presenta un modesto valore di rigidezza (neanche troppo basso) che favorisce la deformazione elastica della pinza stessa.

CAPITOLO 5: PROTOTIPAZIONE E PROVE SPERIMENTALI

5.1 Prototipazione

Per verificare se le caratteristiche della pinza (la rigidità, rapporto di amplificazione e la sua cinematica) corrispondono a quelle ottenute nella fase di progettazione, è stato realizzato un prototipo del gripper tramite la tecnica di *Selective Laser Sintering*. È una tecnica di fabbricazione additiva che utilizza una polvere di polimero (Nylon o Poliammide) che viene sinterizzata tramite una fonte di energia laser. La polvere è depositata tramite un rullo su una piattaforma mobile dove il laser ad elevata potenza investe le particelle di plastica fondendole insieme dando origine a uno strato solido. Una volta terminato uno strato la piattaforma di costruzione si abbassa e il rullo deposita la polvere necessaria per lo strato successivo. Grazie a questa tecnica di fabbricazione additiva si possono realizzare, in tempi brevi e costi contenuti, prototipi utili per effettuare analisi e valutare le prestazioni durante le fasi progettuali.

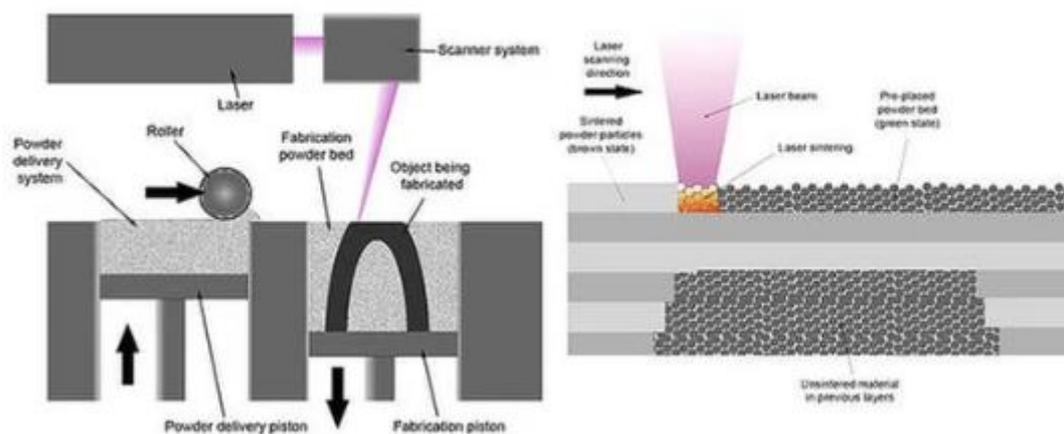


Figura 97. Processo di selective laser sintering

A differenza di altre tecnologie di fabbricazione additiva, come la stereolitografia e la FDM, questa tecnica non necessita di supporti e presenta con una camera di lavoro flessibile in grado di produrre più parti contemporaneamente adattandole ai limiti della macchina. Lo svantaggio

principale di questa tecnologia risiede nel fatto che le parti presentano superfici porose e le loro proprietà meccaniche sono influenzate dai parametri di processo adottati e dall'orientamento di costruzione scelto.

I parametri di processo che sono stati impostati sono elencati in Tabella 8.

Temperatura polvere [°C]	170° C
Temperatura camera [°C]	156° C
Spessore strato [mm]	0,1 mm

Tabella 11. Parametri di processo utilizzati

È stato scelto come materiale PA2200, ovviamente lo stesso materiale inserito nelle simulazioni agli elementi finiti le cui proprietà meccaniche sono mostrate in Tabella 4 del paragrafo 4.3.2.

La Figura 103 mostra il prototipo della pinza al termine del processo di sinterizzazione laser.



Figura 98. Prototipo

Una volta ottenuto il pezzo è stato effettuato un controllo dimensionale tramite un semplice calibro in modo da verificare se le dimensioni del prototipo coi a quelle del modello CAD.

5.2 Allestimento banco prova e taratura dei sensori

Come già stato detto nel paragrafo precedente, l'obiettivo principale dei test di laboratorio è quello di valutare le caratteristiche della pinza ovvero la cinematica, la sua rigidezza (K_p) e il Rapporto di Amplificazione dello spostamento (R.A.).

Per determinare queste caratteristiche della pinza è stato necessario valutare:

- Spostamento verticale in ingresso fornito dal filo SMA (Y_{in})
- Spostamento orizzontale in uscita del dito (X_{out})
- Forza applicata (F) sviluppata dal filo SMA

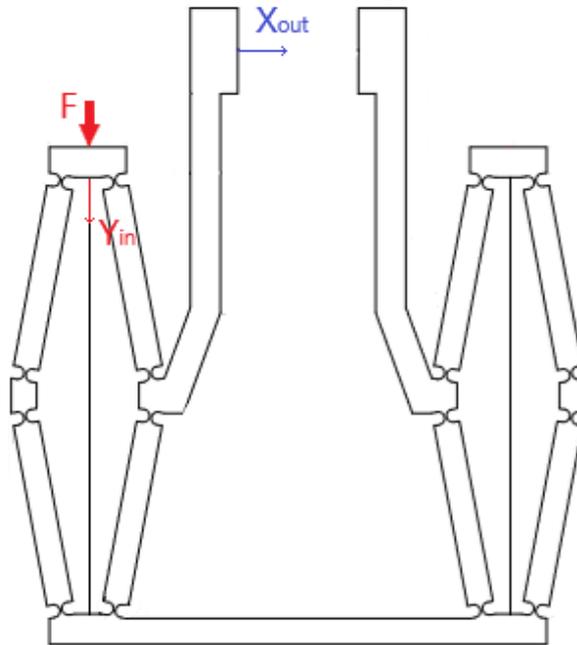


Figura 99. Grandezze coinvolte nelle misurazioni

Presso il laboratorio di meccanica del Politecnico di Torino è stato allestito un banco prova in grado di misurare le grandezze di interesse.

Sono stati disposti tre sensori in particolare:

- *Riga ottica*, che rileva lo spostamento verticale in ingresso (quello fornito dal filo SMA)
- *Sensore di spostamento laser*, che si occupa di rilevare lo spostamento orizzontale del dito (spostamento in uscita)

- *Cella di carico*, che si occupa di rilevare la forza applicata

La Figura 105 mostra il banco prova utilizzato per effettuare i test sperimentali mentre la Figura 106 illustra la disposizione dei sensori in prossimità del prototipo.

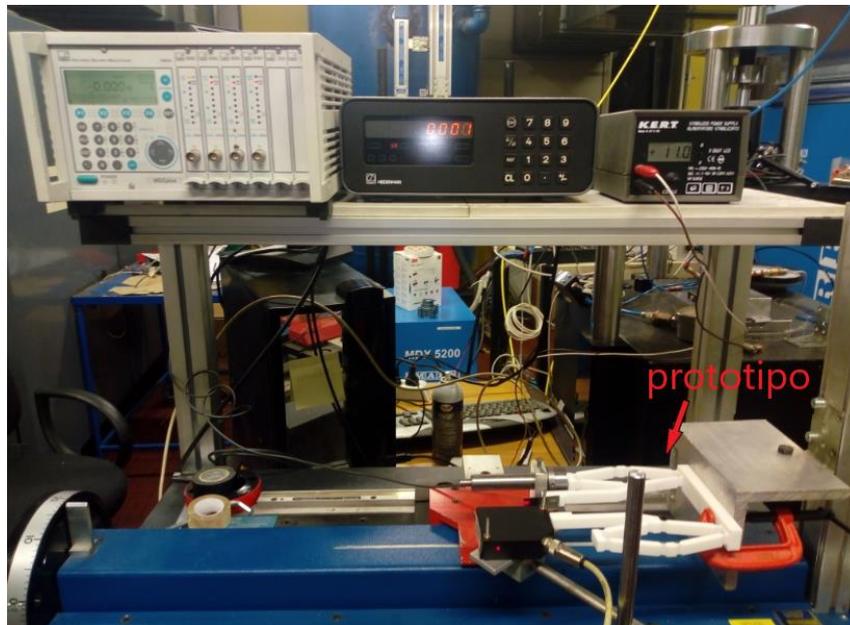


Figura 100. Banco prova allestito per le misurazioni

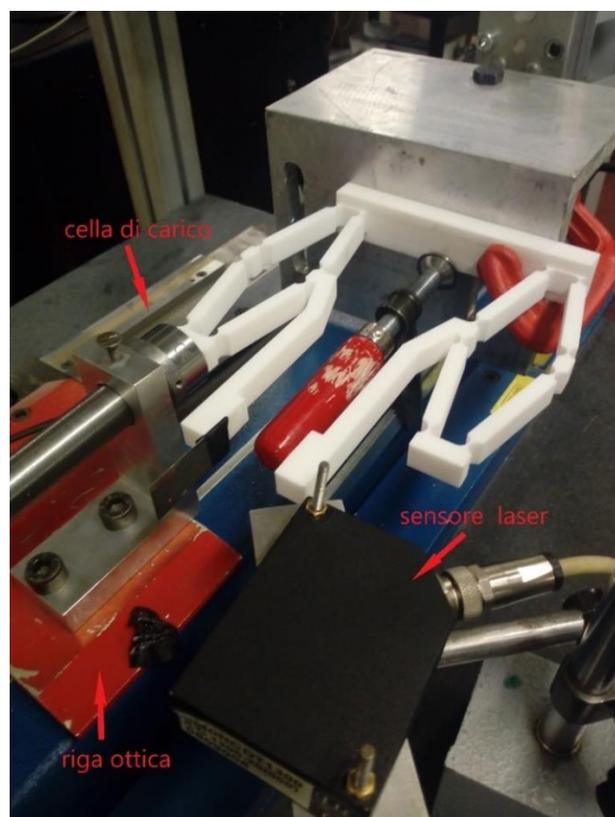


Figura 101. Disposizione dei sensori in prossimità del modello

Prima di procedere con le misurazioni i diversi sensori sono stati opportunamente tarati.

La taratura della *cella di carico* è stata eseguita aggiungendo di volta in volta dei campioni di massa con peso noto (Figura 108). I valori di forza forniti dalla cella di carico sono stati confrontati con i valori di forza teorici associati ai campioni di massa. La calibrazione è terminata quando i valori di forza forniti dalla cella di carico coincidono con i valori di forza attesi associati alle masse aggiunte.



Figura 103. Campioni di massa nota



Figura 102. Cella di carico a bottone

Una volta calibrata la cella di carico si è passato alla calibrazione del sensore laser.

Il sensore laser fornisce un'uscita di tipo elettrico, ovvero in tensione, quindi ad uno spostamento misurato corrisponde un certo valore in tensione. Fatta questa premessa, è stato necessario ricavare la relazione che lega il segnale in tensione (fornito dal sensore) e lo spostamento rilevato ovvero la caratteristica del sensore. A tal proposito sono state eseguite delle misurazioni variando la distanza tra la parte mobile della riga ottica e il sensore stesso e registrando i corrispondenti valori di tensione in uscita. Al termine delle misurazioni è stato ottenuto un insieme di punti di coordinate (Volt, mm).



Figura 104. Sensore di spostamento laser

La caratteristica del sensore di spostamento rappresenta la retta che meglio approssima i punti ottenuti delle misurazioni.

La retta di approssimazione è stata ottenuta in Matlab ed è rappresentata in rosso in Figura 105

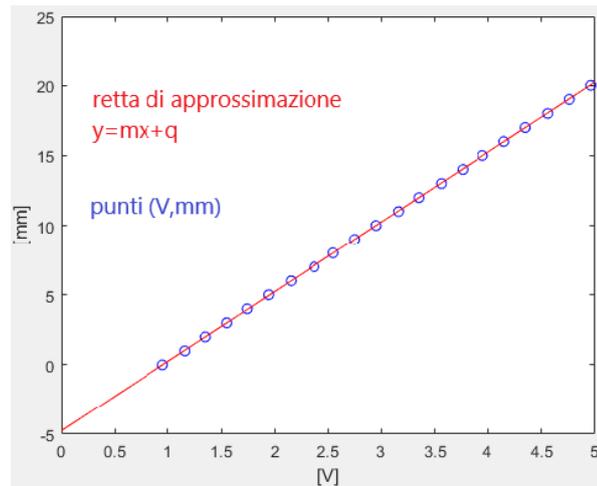


Figura 105. Caratteristica del sensore di spostamento laser

Una volta ricavati i parametri della retta ovvero la pendenza m e il termine noto q (rispettivamente 5 e -4,75) , sono stati inseriti nel software integrato del sensore come mostrato in Figura 106.

Una volta inseriti i parametri della retta e quindi definita la caratteristica del sensore laser è stato possibile effettuare le prove. Per migliorare le misurazioni è stata applicata una piastrina con superficie riflettente sull'estremità del dito della pinza come si può osservare in Figura 101.

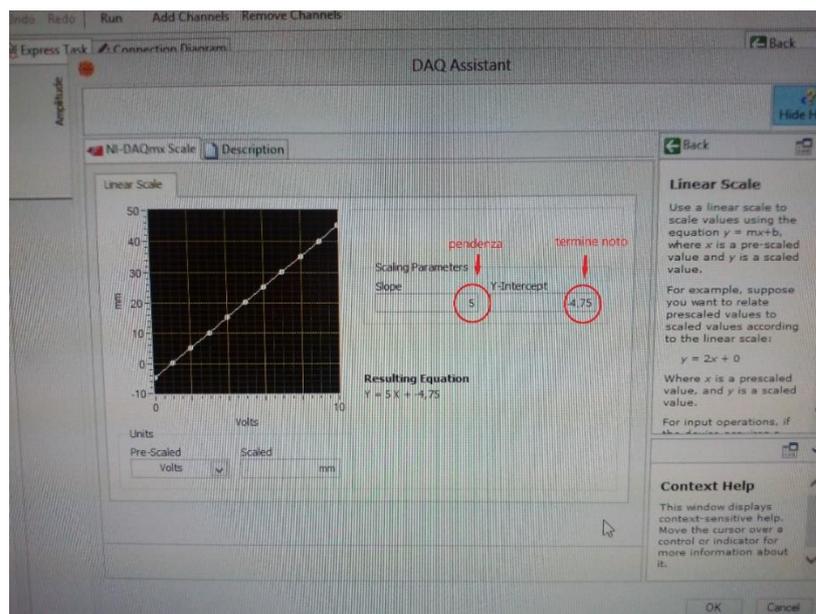


Figura 106. Parametri della retta inseriti

5.3 Misure sperimentali

I test sono stati condotti agendo solo sulla riga ottica. Si impone un certo valore di spostamento in ingresso con la parte mobile della riga ottica e si misurano i corrispondenti valori della forza e dello spostamento in uscita del dito. In particolare, si è proceduto nel seguente modo:

- Fase di carico o di *chiusura* della pinza: in cui si incrementa gradualmente il valore dello spostamento in ingresso (area rosa)
- Fase di scarico o di *apertura*: in cui si riduce gradualmente il valore dello spostamento in ingresso (area grigia)

Per rendere i dati più affidabili, le misurazioni sono state eseguite tre volte e al termine è stata fatta la media dei valori.

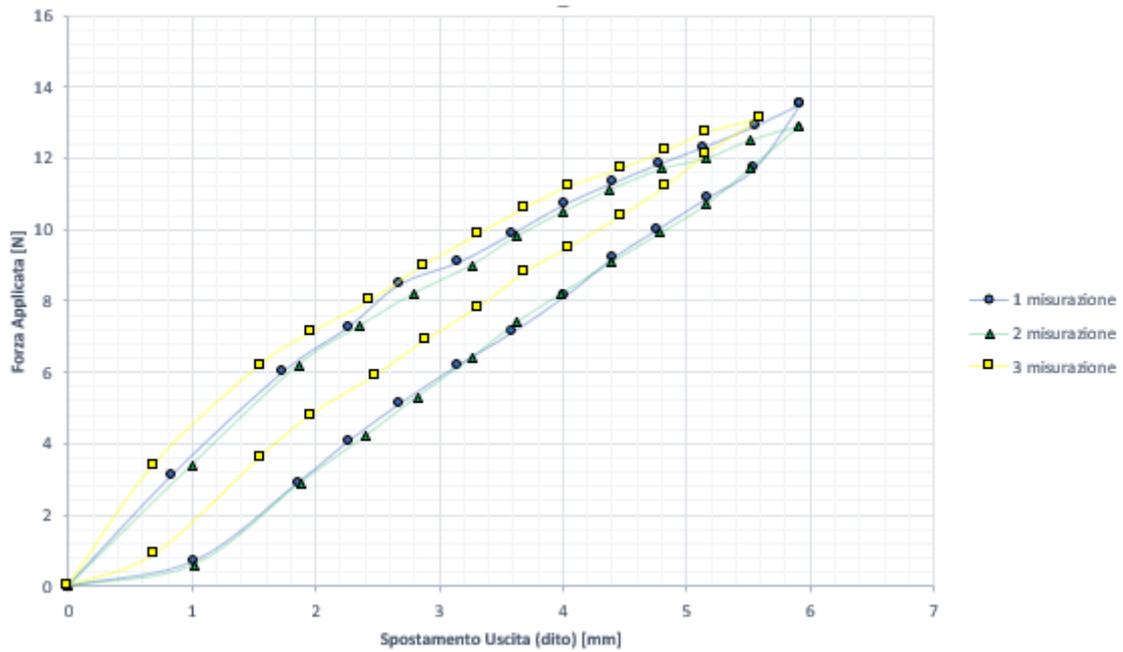
Le seguenti tabelle mostrano i dati ottenuti dalle tre misurazioni.

1° Misurazione					2° Misurazione					3° Misurazione				
F[N]	Yin[mm]	Xout[mm]	delta[out][mm]	Kp [N/mm]	F[N]	Yin[mm]	Xout[mm]	delta[out][mm]	Kp [N/mm]	F[N]	Yin[mm]	Xout[mm]	delta[out][mm]	Kp [N/mm]
0	0	7,41	0		0	0	7	0		0	0	6,69	0	
3,1	0,5	6,57	0,84	3,69	3,4	0,5	6	1	3,40	3,4	0,5	6	0,69	4,93
6	1	5,67	1,74	3,22	6,2	1	5,14	1,86	3,26	6,2	1	5,14	1,55	3,26
7,26	1,25	5,14	2,27	2,38	7,3	1,25	4,64	2,36	2,20	7,1	1,25	4,73	1,96	2,20
8,45	1,5	4,73	2,68	2,90	8,2	1,5	4,21	2,79	2,09	8	1,5	4,25	2,44	1,88
9,07	1,75	4,25	3,16	1,29	9	1,75	3,74	3,26	1,70	9	1,75	3,81	2,88	2,27
9,87	2	3,82	3,59	1,86	9,8	2	3,38	3,62	2,22	9,85	2	3,38	3,31	1,98
10,7	2,25	3,39	4,02	1,93	10,5	2,25	3	4	1,84	10,6	2,25	3	3,69	1,97
11,3	2,5	3	4,41	1,54	11,1	2,5	2,63	4,37	1,62	11,2	2,5	2,64	4,05	1,67
11,84	2,75	2,62	4,79	1,42	11,7	2,75	2,2	4,8	1,40	11,7	2,75	2,22	4,47	1,19
12,3	3	2,27	5,14	1,31	12	3	1,84	5,16	0,83	12,2	3	1,86	4,83	1,39
12,9	3,25	1,85	5,56	1,43	12,5	3,25	1,49	5,51	1,43	12,7	3,25	1,54	5,15	1,56
13,5	3,5	1,49	5,92	1,67	12,9	3,5	1,09	5,91	1,00	13,1	3,5	1,1	5,59	0,91
13,5	3,5	1,49	5,92	1,67	12,9	3,5	1,09	5,91	1	13,1	3,5	1,1	5,59	0,91
11,7	3,25	1,86	5,55	4,86	11,7	3,25	1,49	5,51	3,00	12,1	3,25	1,54	5,15	2,27
10,9	3	2,23	5,18	2,16	10,7	3	1,84	5,16	2,86	11,2	3	1,86	4,83	2,81
10	2,75	2,64	4,77	2,20	9,9	2,75	2,21	4,79	2,16	10,4	2,75	2,21	4,48	2,29
9,2	2,5	3	4,41	2,22	9,1	2,5	2,6	4,4	2,05	9,5	2,5	2,64	4,05	2,09
8,12	2,25	3,39	4,02	2,77	8,2	2,25	3,01	3,99	2,20	8,8	2,25	3	3,69	1,94
7,1	2	3,82	3,59	2,37	7,4	2	3,37	3,63	2,22	7,8	2	3,38	3,31	2,63
6,2	1,75	4,25	3,16	2,09	6,4	1,75	3,74	3,26	2,70	6,9	1,75	3,8	2,89	2,14
5,1	1,5	4,73	2,68	2,29	5,3	1,5	4,18	2,82	2,50	5,9	1,5	4,21	2,48	2,44
4,06	1,25	5,14	2,27	2,54	4,2	1,25	4,6	2,4	2,62	4,8	1,25	4,73	1,96	2,12
2,9	1	5,55	1,86	2,83	2,9	1	5,12	1,88	2,50	3,6	1	5,14	1,55	2,93
0,7	0,5	6,39	1,02	2,62	0,6	0,5	5,98	1,02	2,67	0,9	0,5	5,99	0,7	3,18
0	0	6,67	0		0	0	6,64	0		0	0	6,5	0	

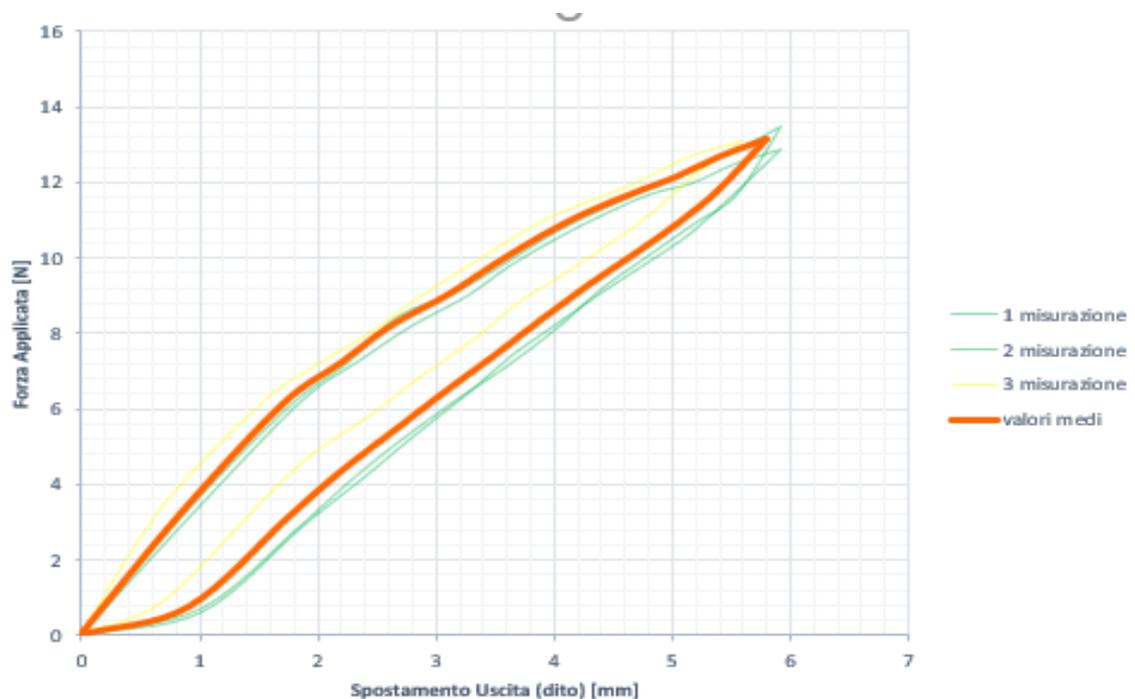
Figura 108. Dati ottenuti dalle misurazioni

L'area evidenziata in rosa rappresenta la fase di carico o di chiusura della pinza, mentre l'area evidenziata in grigio rappresenta la fase di scarico o di apertura.

Plottando questi punti in un diagramma che riporta sull'asse delle ascisse lo spostamento in uscita (fornito dal sensore di spostamento laser) e sull'asse delle ordinate quello della forza applicata (fornita dalla cella di carico) si ottengono i seguenti andamenti:



A questo punto è stata fatta una media delle tre misurazioni ottenendo così un'unica curva rappresentativa dei dati (curva arancione Figura 109).



I dati associati alla curva dei valori medi sono rappresentati in Figura 110 anche in questo caso l'area in rosa è quella associata all'incremento dello spostamento in ingresso (fase di carico o

chiusura) mentre quella in grigio è quella associata alla riduzione dello spostamento in ingresso (fase di scarico o apertura).

Lo spostamento in uscita di nostro interesse, ovvero lo spostamento orizzontale del dito è riportato nella 4° colonna in quanto ci interessa la variazione e non la distanza misurata dal sensore laser.

VALORI MEDI					
F[N]	Yin[mm]	Xout[mm]	delta(out)[mm]	Kp [N/mm]	R.A.
0,00	0,00	7,03	0,00		
3,20	0,50	6,19	0,84	3,81	1,68
6,13	1,00	5,32	1,71	3,37	1,71
7,22	1,25	4,83	2,20	2,22	1,76
8,22	1,50	4,40	2,63	2,33	1,75
9,02	1,75	3,93	3,10	1,70	1,77
9,84	2,00	3,53	3,50	2,05	1,75
10,60	2,25	3,13	3,90	1,90	1,73
11,20	2,50	2,76	4,27	1,62	1,71
11,75	2,75	2,34	4,69	1,31	1,71
12,17	3,00	1,99	5,04	1,20	1,68
12,70	3,25	1,63	5,40	1,47	1,66
13,17	3,50	1,23	5,80	1,17	1,66
13,17	3,50	1,23	5,80	1,18	1,66
11,83	3,25	1,63	5,40	3,34	1,66
10,93	3,00	1,98	5,05	2,60	1,68
10,10	2,75	2,35	4,68	2,21	1,70
9,27	2,50	2,75	4,28	2,12	1,71
8,37	2,25	3,13	3,90	2,31	1,73
7,43	2,00	3,52	3,51	2,41	1,75
6,50	1,75	3,93	3,10	2,30	1,77
5,43	1,50	4,37	2,66	2,41	1,77
4,35	1,25	4,82	2,21	2,40	1,77
3,13	1,00	5,27	1,76	2,73	1,76
0,73	0,50	6,12	0,91	2,82	1,82
0,00	0,00	6,60	0,00		

Figura 111. Valori medi delle tre misurazioni

Effettuando la media dei valori Kp (5ª colonna Figura 110) e la media dei valori di R.A. (6ª colonna Figura 110) si ottiene rispettivamente la rigidezza della pinza e il rapporto di amplificazione sperimentali.

$$K_p^s = \frac{\sum_{i=1}^n K_{pi}}{n} = 2,21 \text{ N/mm}$$

$$R.A.^s = \frac{\sum_{i=1}^n R.A_i}{n} = 1,72 \text{ mm/mm}$$

5.4 Confronto dei risultati

I valori di rigidezza e del rapporto di amplificazione sperimentali sono stati confrontati con i valori teorici ottenuti in precedenza nella fase di progettazione.

VALORI TEORICI	VALORI SPERIMENTALI
$R.A.^t = 2$	$R.A.^s = 1,72$
$K_p^t = 7,4 \text{ N/mm}$	$K_p^t = 2,21 \text{ N/mm}$

a) CONFRONTO SUL RAPPORTO DI AMPLIFICAZIONE

Per mettere a confronto il rapporto di amplificazione teorico e quello sperimentale si è deciso di riportare l'andamento dello spostamento orizzontale in uscita del dito (δ) in funzione dello spostamento in ingresso (Y_{in}) imposto tramite la riga ottica.

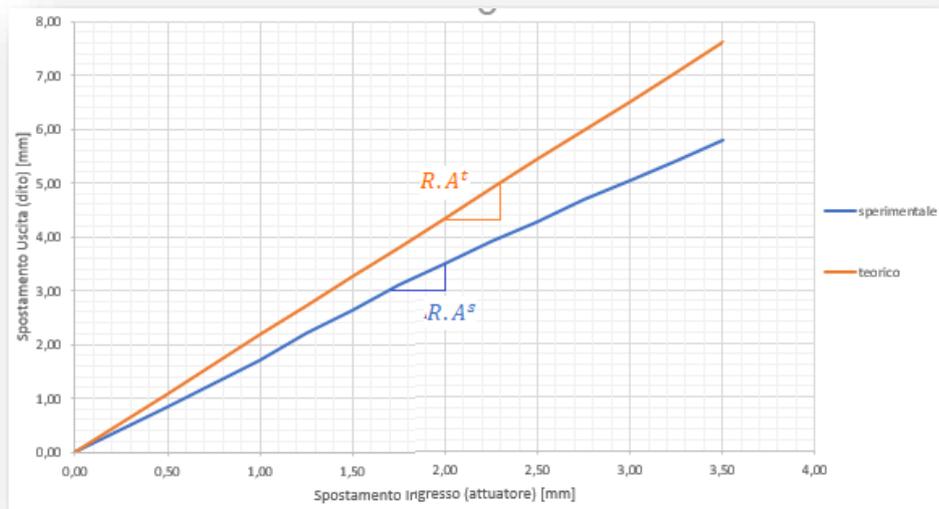


Figura 112. Confronto tra il Rapporto di Amplificazione teorico e quello sperimentale

Dal modello CAD si ottiene una proporzionalità diretta tra spostamento in ingresso e spostamento in uscita. Come si può osservare anche l'andamento in blu, associato ai dati ottenuti in laboratorio può essere considerato lineare ma con una pendenza inferiore rispetto alla retta teorica dovuta al diverso valore del rapporto di amplificazione. Come si osserva il rapporto di amplificazione sperimentale è minore rispetto al valore atteso (che era imposto a 2) $R.A.^t > R.A.^s$ di conseguenza la curva $X_{out}^s = f(Y_{in}^s)$ è meno inclinata rispetto a quella teorica. L'errore associato al rapporto di amplificazione sperimentale rispetto al valore esatto (valore teorico) è dato:

$$Err\% = \frac{|Valore\ teorico - Valore\ sperim. |}{Valore\ teorico} \cdot 100 = 10,5\%$$

b) CONFRONTO SULLA RIGIDEZZA

La Figura 112 confronta l'andamento dello spostamento del dito del gripper in funzione della forza applicata. Sulla destra è riportato il comportamento lineare evidenziato nel capitolo 4 paragrafo 4.3.2, mentre sulla sinistra quello ottenuto sperimentalmente.

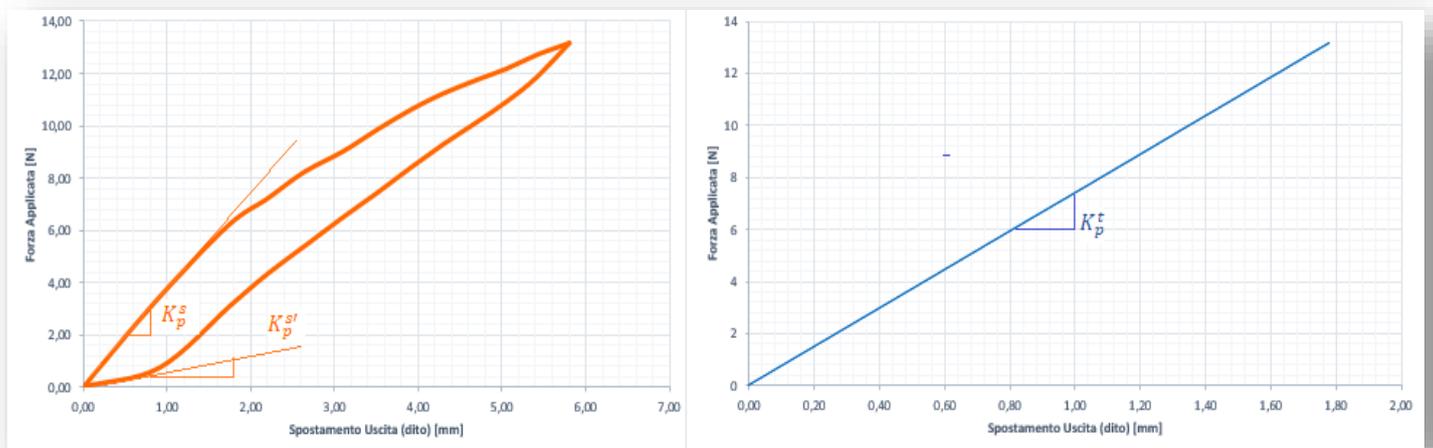


Figura 113: Confronto tra la Rigidezza teorica e quella sperimentale

Nella realtà la pinza non possiede un comportamento lineare quindi non c'è la proporzionalità diretta tra la forza applicata e lo spostamento, inoltre è presente una certa isteresi, infatti durante la fase di scarico (fase di apertura della pinza) si raggiungono valori di forza più bassi rispetto a quanto succede nella fase di carico in cui i valori di forza sono più alti.

Un ulteriore differenza tra modello teorico e quello sperimentale risiede nel valore della rigidezza. La rigidezza ottenuta sperimentalmente è nettamente inferiore a quella ricavata dalle simulazioni sul modello CAD.

Questa discrepanza nel valore della rigidezza può essere messa maggiormente in evidenza sovrapponendo i due andamenti come mostrato in Figura 113.

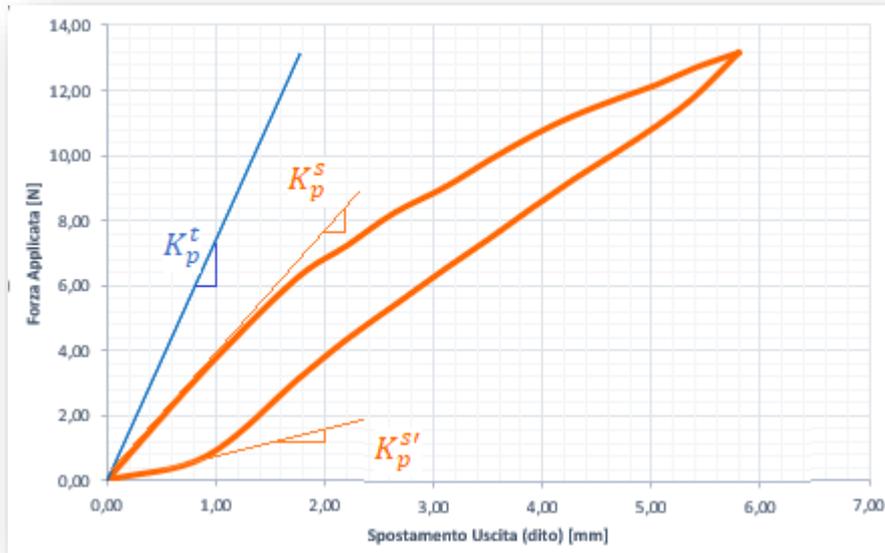


Figura 114. Differenti valori di rigidità equivalgono a differenti pendenze

Come si evince dalla Figura 113 a valori di rigidità differenti corrispondono differenti pendenze.

5.5 Considerazioni

Il valore basso della rigidità ottenuto sperimentalmente può essere imputato ai parametri di processo adottati durante la sinterizzazione laser e dall'orientamento di costruzione. Inoltre, come già detto in precedenza, i pezzi realizzati tramite SLS presentano delle superfici porose e questo contribuisce alla riduzione di rigidità. Esistono in letteratura diversi studi che analizzano l'influenza dei parametri di processo e dell'orientamento del pezzo sulle proprietà meccaniche delle parti ottenute tramite SLS. Lo studio condotto da Răzvan e Ancuța Păcurar e Anna Petrilak in [15] evidenzia come i parametri di processo, come a potenza del laser, lo spessore dello strato, la velocità di scansione, ecc. e l'orientamento di costruzione alterino le proprietà meccaniche e di conseguenza il comportamento delle parti prodotte tramite SLS. È stato evidenziato un ampio range di variabilità del modulo elastico al variare della potenza del laser e dell'orientamento del pezzo.

Un'ulteriore conferma dell'influenza dei parametri di processo si trova in [16] in cui test di compressione e di flessione vengono effettuati su parti prodotte in SLS utilizzando dei differenti valori di potenza. Con parti prodotte con una potenza del laser compresa tra 4 – 6 W il valore del modulo di Young ottenuto oscilla tra 1613 a 1670 MPa per test di flessione, mentre tra 1235 e 1400 MPa per test di compressione. È stato dimostrato quindi che all'aumentare della potenza si ha un aumento del modulo di Young e viceversa. A basse potenze, si ottengono parti porose e quindi meno resistenti, mentre ad alte potenze si ottengono oggetti più densi e quindi più resistenti.

Il basso valore di rigidità del prototipo può essere imputato a diversi fattori, come:

1. Temperatura della polvere di PA [°C]
2. Temperatura della camera di lavoro [°C]
3. Spessore dello strato [mm]
4. Potenza laser [W]
5. Velocità di scansione [mm/s]
6. Altezza di costruzione [mm]
7. Orientamento di costruzione
8. Presenza di polvere riciclata

Quindi la scelta dei parametri di processo e l'orientamento della parte gioca un ruolo fondamentale per riuscire ad ottenere dei pezzi di qualità e con buone proprietà meccaniche.

5.6 Scelta dei fili in funzione del valore di rigidezza reale

Una volta ricavato il valore di rigidezza del prototipo si è passati alla determinazione del numero di fili e del diametro. A causa della bassa rigidezza del gripper il sistema può essere azionato mediante due soli fili (uno per ogni lato).

Il valore di rigidezza della pinza è pari a 2,2 N/mm. Quindi è necessario scegliere dei fili che offrono dei valori di rigidezza limite (K_{COLD} e K_{HOT}) compatibili con la rigidezza della pinza. In altri termini deve essere soddisfatta la relazione (56).

Facendo riferimento alla tabella 7 del paragrafo 4.3.3 si può considerare che:

- Per due fili con lunghezza di 100 mm e diametro di **0,31 mm** (ovvero di 310 μm) i valori di rigidezza sono:

$$K_{HOT} = 2 \cdot \frac{F_{HOT}}{\Delta X} = 2 \cdot \frac{12,56}{3} = 8,37 \text{ N/mm}$$

$$K_{COLD} = 2 \cdot \frac{F_{COLD}}{\Delta X} = 2 \cdot \frac{5,02}{3} = 3,34 \text{ N/mm}$$

- Per due fili con lunghezza di 100 mm e diametro di **0,25 mm** (ovvero di 250 μm) i valori di rigidezza sono:

$$K_{HOT} = 2 \cdot \frac{F_{HOT}}{\Delta X} = 2 \cdot \frac{8,75}{3} = 5,82 \text{ N/mm}$$

$$K_{COLD} = 2 \cdot \frac{F_{COLD}}{\Delta X} = 2 \cdot \frac{3,5}{3} = 2,33 \text{ N/mm}$$

- Per due fili con lunghezza di 100 mm e diametro di **0,20 mm** (ovvero di 200 μm) i valori di rigidezza sono:

$$K_{HOT} = 2 \cdot \frac{F_{HOT}}{\Delta X} = 2 \cdot \frac{5,6}{3} = 3,72 \text{ N/mm}$$

$$K_{COLD} = 2 \cdot \frac{F_{COLD}}{\Delta X} = 2 \cdot \frac{2,24}{3} = 1,48 \text{ N/mm}$$

Come si può osservare l'unico filo che presenta dei valori di rigidezza all'interno del quale cade il valore della pinza è quello con un diametro di 0,20 mm mentre i fili con diametro superiore non

sono adatti per l'azionamento del gripper in quanto forniscono delle forze di attuazione elevate non compatibili con il modesto valore di rigidità della pinza.

Il sistema gripper può essere azionato tramite due fili con diametro da 0,20 mm capaci di sviluppare: durante il riscaldamento una forza di circa 5,6 N, mentre nella fase di raffreddamento una forza di 2,24 N. Su questi valori carichi è stata svolta un'analisi statica con l'obiettivo di valutare la resistenza della pinza.

5.7 Analisi statica

Lo scopo di questa analisi è quello di valutare la resistenza del modello reale e quindi del gripper prodotto tramite SLS soggetto ai carichi imposti dai fili durante il funzionamento. Di conseguenza come valore del modulo di Young è stato inserito un valore che ci consente di ottenere una rigidità prossima a quella reale del prototipo. Questo valore è stato ricavato tramite un metodo iterativo ed i risultati di spostamento in funzione della forza applicata sono riportati in Tabella 12. Definite le proprietà del materiale si è passati alla definizione delle condizioni di carico e vincolo. A tal proposito è necessario distinguere due condizioni di funzionamento, in particolare:

- a) *Fase attiva* o fase di chiusura griffe: si considerano solo le forze sviluppate dai fili SMA durante il riscaldamento (Figura 114 a);
 - b) *Fase di afferraggio*: in questo caso si considera solo la forza di presa che agisce sulla superficie di contatto delle griffe della pinza (Figura 114 b);
- a) Per quanto riguarda la **fase attiva** si considerano delle forze sulle superfici in cui verranno installati i fili SMA . Il modulo delle forze inserito nel software Solidworks è dato:

$$|F| = F_{HOT}^{(0,20)} * 2^\circ \text{ fili} = 5,59 * 2 = 11,18 \text{ N}$$

Dove $F_{HOT}^{(0,20)}$ è stato ricavato dalla Tabella 7 per un filo di diametro di 0,20 mm, mentre n° fili è il numero di fili utilizzati che nel nostro caso è pari a 2.

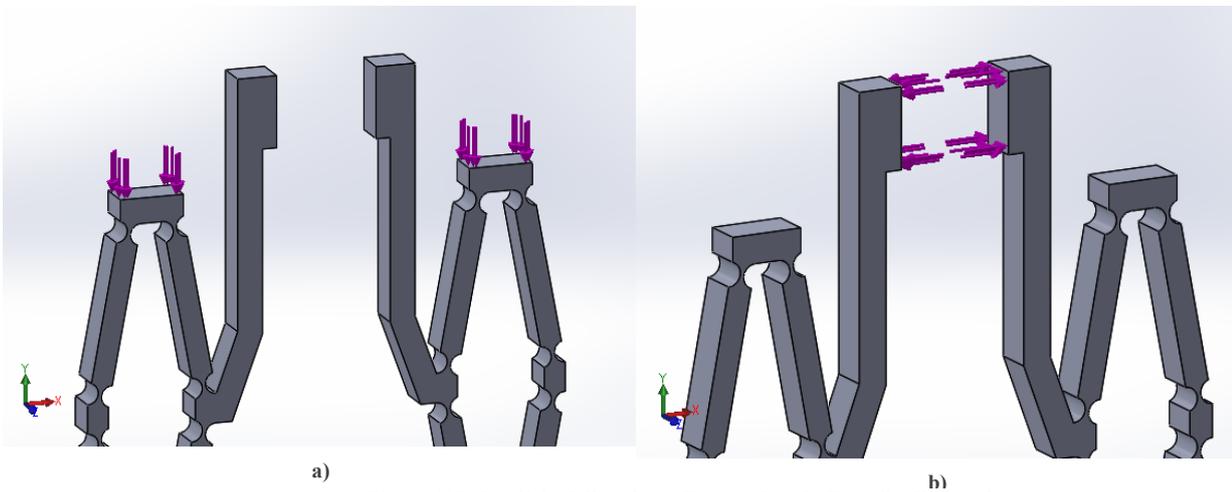


Figura 115. Condizioni di carico a) Fase Attiva ; b) Fase di Afferraggio

- b) Nella **fase di afferraggio**, invece, si deve considerare la forza necessaria ad afferrare l'oggetto ovvero la forza di presa (F_g) che dipende dal materiale da manipolare. Ricordiamo che in [5] è fornita la formula per il calcolo della forza di presa per i gripper di tipo Impactive.

$$F_G = \frac{m \cdot g \cdot f_s}{\mu \cdot n} \quad [N] \quad (56)$$

dove:

m massa oggetto da afferrare (Kg)

g accelerazione di gravità (m/s^2)

μ coefficiente di attrito

f_s fattore di sicurezza

Come componente da afferrare è stato scelto un lettore di scheda SIM di uno smartphone Samsung Galaxy S4:



Figura 116. Componente elettronico da manipolare

Le dimensioni del lettore della scheda SIM sono:

15 mm x 15 mm

Di seguito si riporta una tabella con i valori considerati.

$m(kg)$	0.005
$g(m/s^2)$	9.81
μ	0.3
f_s	4

Inserendo questi valori nell'equazione (56) si ottiene una forza di presa pari a:

$$F_g = 0.327 \text{ N} \quad (57)$$

Definiti i carichi si è passati alle condizioni di vincolo. Il modello è stato vincolato nella superficie inferiore come fatto nel paragrafo 4.3.2. “Rigidità della pinza” Figura 94. Di seguito si riporta lo stato di tensione del gripper nelle due fasi di funzionamento.

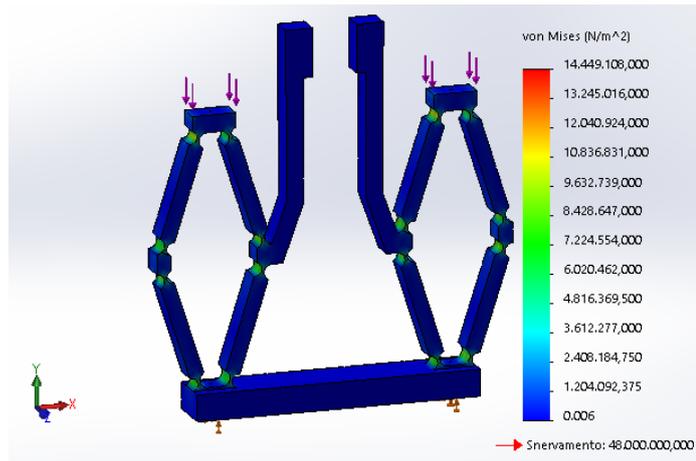


Figura 117. Stato di tensione Fase di Chiusura

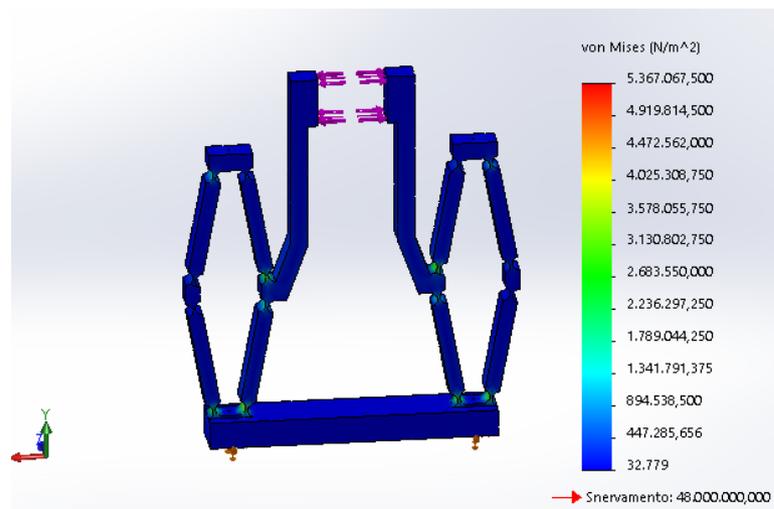


Figura 118. Stato di tensione Fase di Presa

Come si può osservare anche in corrispondenza degli intagli delle cerniere flessionali, dove si registrano dei picchi del valore di tensione, è garantita la resistenza della pinza dato che il valore massimo di tensione, in entrambe le fasi di funzionamento, si mantiene al di sotto del limite di snervamento del materiale ($\sigma_{max} < \sigma_{id}^{Von Mises}$).

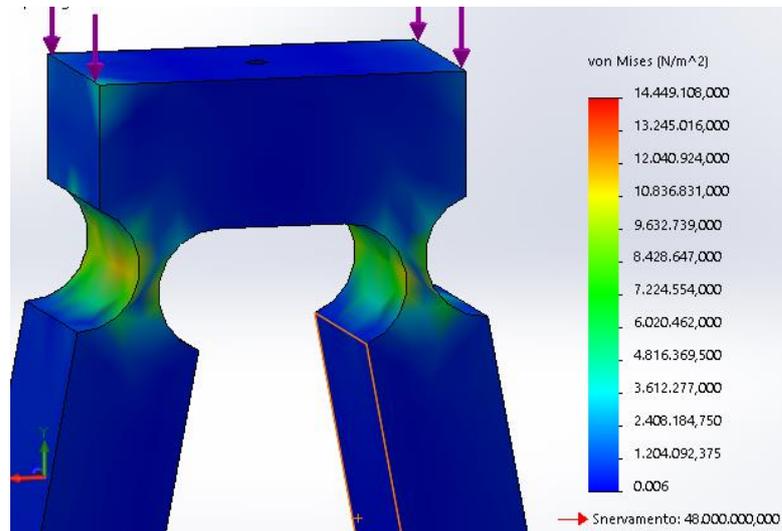


Figura 119. Incremento del valore di tensione

F [N]	Ux [mm]	Rigidezza [N/mm]
0	0,00	
3,2	1,43	2,2
6,13	2,73	2,2
7,22	3,21	2,2
8,22	3,66	2,2
9,02	4,02	2,2
9,84	4,38	2,2
10,6	4,72	2,2
11,2	4,99	2,2
11,75	5,23	2,2
12,17	5,42	2,2
12,7	5,65	2,2
13,17	5,864	2,2

Tabella 12: Valori di F-Ux ottenuti dall'analisi

5.8 Conclusioni e prospettive future

Questo lavoro di tesi è volto principalmente allo studio e alla progettazione di un dispositivo di presa attuato da fili SMA e realizzato tramite l'impiego di cerniere flessionali in grado di manipolare oggetti di dimensioni ridotte.

I valori teorici ottenuti nella fase di progettazione sono stati confrontati con i valori sperimentali ricavati dalle prove in laboratorio. Dal confronto dei dati è stato verificato l'accostamento parallelo del gripper e che il rapporto di amplificazione sperimentale si avvicina a quello teorico con un errore percentuale del 10 %. Per quanto riguarda la rigidità della pinza è stata evidenziata una discrepanza tra il valore teorico pari a 7,4 N/mm e quello sperimentale ottenuto dalle prove condotte sul modello pari a 2,21 N/mm. Questo valore basso di rigidità può essere imputato ai parametri di processo adottati ed all'orientamento del gripper durante la fase di costruzione. Un possibile scenario sarebbe quello effettuare prove sperimentali con l'obiettivo di valutare le proprietà meccaniche, come la resistenza, il modulo di Young, l'allungamento a rottura ecc, al variare dai parametri di processo e dell'orientamento dei pezzi durante la costruzione tramite SLS in modo da riuscire a comprendere come questi fattori influenzano il materiale e magari riuscire ad agire sui parametri in modo tale da realizzare componenti le cui proprietà meccaniche dipendono dal tipo di applicazione. In altri termini, l'intento è quello di fabbricare dei materiali personalizzati (in termini di resistenza meccanica o altre proprietà) in base al tipo di applicazione a cui essi sono destinati.

Il passo successivo sarà quello di svolgere dei test di apertura e chiusura installando i fili SMA ed è per questo motivo che è stata condotta un'analisi statica considerando le forze generate dai fili e il valore del modulo di Young ridotto a causa dell'influenza dei parametri di processo e dell'orientamento.

Bibliografia

- [1] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, H. Schunk, “*Robot Grippers*”. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 2007.
- [2] F. Castelli “*Organi di presa per manipolatori industriali*” Tesi di laurea, Università degli studi di Padova, A.A. 2012/2013
- [3] H. S. A. Wolf, R. Steinmann, Grippers in Motion “*The Fascination of Automated Handling Tasks*”. Germany: Springer, 2005.
- [4] D.Sallè, F. Cepolina, P. Bidaud, “*Surgery Grippers for minimally invasive Heart Surgery*” IEEE International Conference Intelligent Manipulation and Grasping IMG 04 Genova, Italy 2004.
- [5] T. M. Wang, Z.Y. Shi, D.Liu, Chen Ma and Z.H. Zang, “*An Accurately Controlled Antagonistic SMA Gripper*”, China, 2012
- [6] M. Kohl, E. Just, W. Pfleging, S. Miyazaki, “*SMA microgripper with integrated antagonism*” Institute of Materials Science, Germany; University of Tsukuba, Japan, 1999
- [7] Dalibor Petkovic, S. J. (2015, Luglio). Analyzing of flexible gripper by computational intelligence approach.
- [8] A. Manuello Bertetto and M. Ruggiu, “*A two Degree of Freedom Gripper Actuated by SMA with Flexure Hinges*”, Department of Mechanical Engineering, University of Cagliari, 2003
- [9] J.H. Kyung, B.G. Ko, Y.H. Ha, G.J. Chung, “*Design of a Microgripper for Micromanipulation of Microcomponents using SMA and Flexible Hinges*” Korea Institute of Machinery and Materials, 2005
- [10] Q. Khasawneh, M. A. Jaradat and A. Alshorman, “*Enhanced Design of Microgripper Using Double Actuators of Shape Memory Alloy Wires*” Dynamic Systems and Control Conference San Antonio, USA, 2014
- [11] D. Maffiodo, T. Raparelli, “*Three-Fingered Gripper with Flexure hinges actuated by Shape Memory Alloy wires*”, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Politecnico di Torino, 2016.
- [12] L. Marioni, “*Design and Rapid prototyping of a SMA based actuator*”, Thesis, Università degli studi di Pavia, July 2014.
- [13] Che-Min Lin, Chen-Hsien Fan e Chao-Chieh Lan, “*A Shape Memory Alloy Actuated Microgripper with Wide Handling Ranges*” IEEE/ASME Singapore, July 14-17, 2009
- [14] Lael U. Odhner, M. I. (2011). *Dexterous Manipulation with Underactuated Elastic Hands*. International Conference on Robotics and Automation, (p. 5254-5260). Shanghai, China.
- [15] Răzvan Păcurar*, Ancuța Păcurar, and Anna Petrilak, “*The influence of build orientation on the mechanical properties of medical implants made from PA 2200 by Selective Laser Sintering*”, Technical University of Cluj-Napoca, 2017

[16] Cristina Stefana Miron-Borzan^{1,*}, *Mircea Cristian Dudesu*², and *Petru Berce*, *Bending and compression tests for PA 2200 parts obtained using Selective Laser Sintering method*” Technical University of Cluj-Napoca, 2017

SITOGRAFIA

<https://www.tesionline.it/tesi/1701/I-metalli-a-memoria-di-forma>

http://www.ing.unitn.it/~colombo/LEGHE_A_MEMORIA_DI_FORMA/SMAs.pdf

https://www.researchgate.net/publication/301796167_Design_and_rapid_prototyping_of_a_SM_A_based_actuator

http://www.ing.unitn.it/~colombo/memoriatome%27/HTM/06_Vie_memoria.htm

<https://digilander.libero.it/limorta/V3G.pdf>

http://veprints.unica.it/684/1/PhD_Falchi_Costantino.pdf

http://www.dynalloy.com/tech_data_wire.php

Appendice

Listato Matlab andamenti del rapport di amplificazione

```

DYC=-3; %spostamento attuatore (mm)
A0C0=100; %lunghezza filo SMA (mm)
a0_grad=linspace(0.01,60,500);%(grad)
alfa0=a0_grad*pi/180;%(rad)
%calcoli
R=A0C0./(2*cos(alfa0)); % lunghezza elementi
alfa=acos(cos(alfa0)+DYC./(2*R)); %inclinazione finale f=(alfa0,DYC)
DXB=R.*(sin(alfa)-sin(alfa0));
RA=-DXB./DYC;

%grafici
figure
plot(a0_grad,DXB,'r'),grid
xlabel('alfa0 (grad)')
ylabel('DXB (mm)')
title('DXB=f(alfa0)')

figure
plot(a0_grad,RA),grid
xlabel('alfa0 (grad)')
ylabel('RA')
title('RA=f(alfa0)')

figure
plot(a0_grad,R,'g'),grid
xlabel('alfa0 (grad)')
ylabel('R (mm)')
title('R=f(alfa0)')

```

Listato Matlab Retta di approssimazione

```

y=[0:1:20];
x=[0.95 1.16 1.35 1.55 1.74 1.94 2.15 2.37 2.55 2.75 2.95 3.16 3.35 3.56
3.76 3.95 4.15 4.35 4.56 4.76 4.96];
figure
plot(x,y,'bo'),hold on
xlabel(' [V] '), ylabel(' [mm] ')

deltaV=diff(x);
deltaX=diff(y);
k=deltaX./deltaV;
K=mean(k)
xi=[0:5];
q=-4.75;
yi=K*xi+q;
plot(xi,yi,'r')

```

Listato per il calcolo rigidezza su Ansys

```

/PREP7
!Definisco i parametri geometrici
B=7
R=3
L=10
!Definisco il materiale
Et,1,shell63
Mp,ex,1,1650
r,1,10
type,1
mat,1
real,1
!Definisco i punti chiave
K,1,0,0,0
K,2,-1,0,0
K,3,-1,B/2,0
K,4,0,B/2,0
k,5,-(R+1),B/2,0
k,6,-(R+1),0,0
!Creo le linee
L,1,6

```

L,6,2

L,2,3

L,3,5

L,5,6

Circle,4,R,,,8

L,5,11

L,6,12

L,13,1

!cancello le linee e i punti chiave associati

Ldele,9

Ldele,8

Ldele,7

Ldele,6

Ldele,13

Ldele,12

Kdele,10

Kdele,9

Kdele,8

Kdele,7

Kdele,14

!Genero le aree

A1,2,3,4,5

A1,14,10,15,5

A1,11,16,1,15

!Suddivido le linee per la mesh

Lesize,16,,,14,1/.3

Lesize,1,,,14

Lesize,15,,,14,.3

Lesize,11,,,14

Lesize,10,,,14

Lesize,14,,,14,.3

Lesize,4,,,20

Lesize,2,,,20

Lesize,3,,,14

Lesize,5,,,14

!specchio le aree

Arsym,y,all

Arsym,x,all

!genero la mesh

Amesh,all

Numcompress,all

Nummrg,all

!Applico carichi e vincoli

Nsel,s,loc,x,-10

D,all,all

Nall

Nsel,all

Nsel,s,loc,x,-10,-3

Nsel,r,loc,y,B/2

D,all,all

Nsel,all

Nsel,s,loc,x,-10,-3

Nsel,r,loc,y,-B/2

D,all,all

Nsel,all

!Applico carichi

Nsel,s,loc,x,10

Nsel,r,loc,y,3.5

F,all,fx,143

Nsel,all

Nsel,s,loc,x,10

Nsel,r,loc,y,-3.5

F,all,fx,-143

lsel,all

nsel,all

esel,all

check

/solu

Solve

/post1

!info su punto H

nsel,s,loc,x,4

nsel,r,loc,y,0

prnsol,u,x

prnsol,u,y

prnsol,rot,z

