

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale,
dell'Autoveicolo e della produzione

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione per la fabbricazione additiva di una
struttura flexure



Relatore
Prof. Iuliano Luca

Candidato

Correlatore:
Ing. Flaviana Calignano

Antonino Claudio Giallombardo

Anno Accademico 2019/2020

Indice

Elenco delle figure	4
Elenco delle tabelle	9
1 Introduzione all'Additive Manufacturing	1
2 Fabbricazione additiva di fotopolimeri	6
2.1 Stereolitografia	6
2.1.1 Processo	6
2.1.2 Qualità delle parti e strategie di stampa	11
2.1.3 Prove sulla qualità delle parti prodotte .	17
2.2 Progettazione per AM fotopolimeri	21
2.3 Digital Light Processing (DLP)	24
2.4 Confronto tra i processi SLA e DLP	25
3 Fabbricazione additiva di polimeri PBF	29
3.1 Selective Laser Sintering	29
3.1.1 Processo	29
3.1.2 SLS diretto e indiretto	31
3.1.3 Proprietà delle polveri	34
4 Materiali polimerici	37
4.1 Monomeri e polimeri	37
4.2 Reazioni di polimerizzazione	40
4.2.1 Polimerizzazione radicalica	41
4.2.2 Polimerizzazione cationica	43
4.3 Foto-polimerizzazione delle resine	45
4.3.1 Foto-polimerizzazione radicalica	45

4.3.2	Fotopolimerizzazione cationica	48
4.4	Polimeri Termoplastici e Termoindurenti	49
4.5	Cristallinità dei polimeri	51
4.6	Proprietà dei polimeri	53
4.7	Degradazione dei polimeri	56
5	Progettazione generale per AM dei polimeri	58
5.1	Anisotropia	58
5.2	Spessore delle pareti	59
5.3	Feature sporgenti e supporti	60
5.4	Fori	63
5.5	Elementi di rinforzo	64
6	Introduzione alle strutture flexure	66
6.1	Definizione, vantaggi e svantaggi delle strutture flexure	68
6.2	Principi base per la comprensione del funzionamento di strutture flexure	74
6.2.1	Differenza tra Resistenza e Rigidezza	74
7	Progettazione dei Compliant Mechanisms	76
7.1	Pseudo-Rigid Body Model	77
7.1.1	Modello di corpo pseudo-rigido per travi piane	81
7.2	Progettazione di CM per la fabbricazione additiva	87
7.2.1	Metodo di Ottimizzazione Topologica	87
7.2.2	Load path synthesis approach	91
8	Introduzione al caso di studio	98
8.1	CM per l'amplificazione dello spostamento	98
8.2	Modello di ispirazione al caso di studio	103
9	Progettazione dell'amplificatore caso di studio	108
9.1	Ottimizzazione topologica	108
9.1.1	Definizione del design domain	109
9.1.2	Parametrizzazione del design domain	111
9.1.3	Ottimizzazione Topologica	112
9.1.4	Risultati	113

9.2	Geometria tridimensionale	118
9.3	Analisi agli elementi finiti	120
9.3.1	Analisi FEM	120
9.4	Design of experiment	127
9.5	Grafici e caratteristiche di funzionamento	134
9.6	Progettazione per AM della struttura di supporto	143
9.6.1	Ottimizzazione topologica	143
9.7	Modello finale	148
9.7.1	Analisi FEM sul modello finale	150
10	Conclusioni	154
	Bibliografia	155

Elenco delle figure

1.1	Step principali dei processi di Additive Manufacturing	2
1.2	Classificazione in base ai materiali ed al tipo di processo coinvolto	5
2.1	SLA-1 sviluppata nel 1987 da 3D Systems	6
2.2	Stampa Stereolitografica	8
2.3	Continuous Liquid Interface Production CLIP	10
2.4	Fenomeno di distorsione "curling"	13
2.5	Retracted hatching	16
2.6	Strategie di costruzione della parte	16
2.7	Modello prismatico utilizzato nel test di risoluzione XY	18
2.8	Risultati del test sulla risoluzione	18
2.9	Benchmark delle analisi	20
2.10	Influenza dello spessore dello strato sull'effetto a gradini	20
2.11	Segni evidenti presenti dopo la rimozione dei supporti	22
2.12	Schema illustrativo processo Direct Light Projection	25
2.13	Schema Costruttivo DLP	25
2.14	Confronto tra le sorgenti UV utilizzate in SLA e DLP	26
2.15	Effetto sulla finitura superficiale della presenza dei voxel nella stampa DLP	28
2.16	Effetto a gradini dovuto ai voxel su entrambi i piani	28

3.1	Schematizzazione processo SLS: (1) Camera di approvvigionamento delle polveri, (2) Piattaforma di costruzione, (3) Rullo livellatore (4) Laser	30
3.2	Polveri per processi indiretti SLS	32
3.3	Formazione di un neck tra due particelle	34
4.1	A sinistra un gruppo alifatico, a destra la molecola del benzene	38
4.3	Fase di inizio polimerizzazione cationica	44
4.4	Fase di propagazione cationica dell'etere vinilico	44
4.5	Molecole di acrilato, etere vinilico ed epossidico	45
4.6	Strutture dei polimeri	51
4.7	Effetto della temperatura sulla struttura dei polimeri	52
4.8	Effetto del peso molecolare M_w e della temperatura sul comportamento dei polimeri	55
4.9	Effetto del peso molecolare M_w sulle proprietà meccaniche	56
5.1	Esempio di parte realizzata con differenti orientazioni di stampa	59
5.2	Configurazione di stampa angolata e parallela, per ovviare deviazioni geometriche	60
5.3	Esempio di impiego del materiale di supporto .	61
5.4	Rimozione manuale dei supporti	61
5.5	Angolo delle superfici da supportare e non	62
5.6	Materiale di supporto a differenti orientazioni di stampa	62
5.7	Area massima delle superfici che non richiedono supporti	63
5.8	Grandezza delle feature cave all'aumentare dello spessore	64

6.1	Sistema per lo svergolamento alare progettato dai fratelli Wright: (a) Un disegno di Wilbur Wright del 1912 che illustra il sistema per lo svergolamento alare da lui costruito e sperimentato nel 1899. (b) Primo modello di aeroplano motorizzato e comandato con svergolamento alare realizzato dai fratelli Wright	67
6.2	Ala adattiva FlexFoil	68
6.3	CM progettato per la movimentazione di una testa satellite per la Nasa	71
6.4	La trave ha la stessa resistenza in diverse direzioni, ma avrà una rigidità molto diversa nei due orientamenti mostrati	74
7.1	Schema di un meccanismo parzialmente flessibile: membri rigidi 1 e 2, membro 3 composto da membro rigido ed uno flessibile	78
7.2	Pseudo-Rigid Body Model PRBM del meccanismo in figura 7.1	79
7.3	Trave incastrata inflessa con un carico applicato inclinato di un angolo ψ	80
7.4	Deformata della trave in figura 7.3 con $\phi = 90^\circ$ e $500N < R < 8000N$	80
7.5	Trave piana incastrata ad una estremità e libera dall'altra, caricata a flessione	81
7.6	PRBM della trave in figura 7.5	82
7.7	Trave incastrata da una parte e libera soltanto di traslare dall'altra	83
7.8	Trave incastrata da una parte e libera di ruotare dall'altra	84
7.9	PRBM della trave piana in figura 7.7	84
7.10	PRBM della trave piana in figura 7.10	84
7.11	Meccanismo di una morsa a sinistra, a destra versione flexure della morsa di cui a sinistra	85
7.12	Schema del meccanismo rigido della morsa	85
7.13	PRBM del meccanismo in figura 7.12	86
7.14	Compliant Mechanism risultante	86
7.15	Step principali dell'ottimizzazione topologica	88

7.16	Strutture disconnesse ottenute a seguito di OT	90
7.17	Tipi di percorsi di carico	92
7.18	Percorsi diretti e indiretti tra i punti essenziali .	93
7.19	Differenti topologie con stessa sequenza pathSeq e differenti valori di pTop	94
7.20	Influenza della disposizione dei punti di inter- connessione sulla topologia	95
7.21	Influenza della variabile dimensionale pDim sulla topologia	95
8.1	Concept di Vortex Generator	100
8.2	CM per l'amplificazione dello spostamento . . .	101
8.3	Caratteristiche di una attuatore piezoelettrico e di un attuatore integrato con una struttura flexure	102
8.4	CM bridge-type	104
8.5	Versione rigida CM bridge-type	104
8.6	CM bridge-type distributed compliance	105
8.7	Fattore di amplificazione CM bridge-type	106
9.1	Definizione del design domain	110
9.2	Topologia e geometria generata: Disposizione dei punti e interpolazione della geometria strut- turale	114
9.3	Risultato dell'ottimizzazione dimensionale . . .	115
9.4	Mappa degli spostamenti lungo y della struttura	117
9.5	Distribuzione della tensione di Von Mises	118
9.6	Vista frontale CM tridimensionale	119
9.7	Vista isometrica CM	119
9.8	Struttura in tavola 2D quotata	121
9.9	Distribuzione della tensione equivalente di Von Mises	122
9.10	Distribuzione della tensione equivalente di Von Mises nella zona più sollecitata	122
9.11	Distribuzione degli spostamenti in direzione y lungo la struttura	123
9.12	Andamento di R_{amp} in funzione di Y_{IN}	125
9.13	Andamento di K_{in} in funzione di Y_{IN}	126
9.14	Andamento di Y_{OUT} in funzione di Y_{IN}	127

9.15	Proprietà dei polimeri per AM coinvolti nel DOE	129
9.16	Andamento di R_{amp} in funzione di Y_{IN}	135
9.17	Andamento di K_{in} in funzione di Y_{IN}	136
9.18	Andamento di Y_{OUT} in funzione di Y_{IN}	136
9.19	Distribuzione delle tensioni di VM per il caso 1	137
9.20	Distribuzione delle deformazioni equivalenti per il caso 1	138
9.21	Distribuzione degli spostamenti lungo y per il caso 1	138
9.22	Influenza del materiale su σ_{VM} massime agenti	139
9.23	Influenza del materiale sulla rigidezza K_{in}	140
9.24	Influenza dello spessore minimo su σ_{VM} massima	141
9.25	Influenza dello spessore minimo sulla rigidezza K_{in}	141
9.26	Influenza dello spessore minimo sul fattore di amplificazione R_{amp}	142
9.27	Geometria originale da ottimizzare	144
9.28	Impostazione del modello da ottimizzare	145
9.29	Risultato ottimizzazione con visibili zone disconnesse	146
9.30	Risultato ottimizzazione con riduzione del 57% in peso	147
9.31	PolyNURBS della geometria ottimizzata in vista frontale	147
9.32	PolyNURBS della geometria ottimizzata in vista isometrica	148
9.33	Modello amplificatore di spostamento finale in vista frontale	149
9.34	Modello amplificatore di spostamento finale in vista isometrica	149
9.35	Distribuzione delle tensioni equivalenti nel modello finale	150
9.36	Dettaglio della zona maggiormente sollecitata	151
9.37	Distribuzione della componente di spostamento lungo y nel modello finale	152
9.38	Distribuzione della deformazione equivalente nel modello finale	153

Elenco delle tabelle

1.1	Terminologia standard dei processi AM secondo ASTM F2792	4
9.1	Coordinate di definizione del design domain	110
9.2	Dati sulle condizioni al contorno	110
9.3	Proprietà materiale ABS	111
9.4	Formulazione del problema di ottimizzazione del caso di studio	113
9.5	Coordinate dei punti fondamentali e di interconnessione	116
9.6	Deviazioni di R_{amp} e σ_{MAX} , tra caso ideale e reale	124
9.7	Impostazione Design of Experiment: da 1 a 16 le configurazioni ammesse dalle variabili di influenza	129
9.8	Valori reali delle figure di valutazione per ciascuna alternativa	131
9.9	Valori su scala 10 delle figure di valutazione per ciascuna alternativa	132
9.10	Valori normalizzati delle figure di valutazione per ciascuna alternativa	133
9.11	Fattori di peso per ciascuna figura di valutazione	134
9.12	Indici di valore	134
9.13	Componenti delle forze di reazione nei punti di vincolo del CM	145
9.14	Proprietà di massa e volume ai vari step di ottimizzazione topologica	148

Sommario

La fabbricazione additiva, come categoria di processi non convenzionali, ha subito una crescita esponenziale negli ultimi decenni, sia dal punto di vista delle capacità nella realizzazione di parti con caratteristiche finali che nella vastità di applicazioni per cui costituisce una alternativa di prima scelta. Infatti i vantaggi introdotti quali, la riduzione dei tempi che intercorrono tra la fase di progetto e di produzione, le eccezionali proprietà meccaniche e l'incredibile complessità geometrica che può essere raggiunta per le parti insieme ad un utilizzo efficiente del materiale rendono i processi AM particolarmente interessanti. Verrà dunque affrontata nel presente studio di tesi la progettazione di una categoria di strutture flessibili, chiamate *flexure*, che per la loro complessità geometrica ed il numero ridotto di parti in gioco, è orientata alla fabbricazione mediante processi per sovrapposizione di strati. La categoria di strutture flexure oggetto di studio trova applicazioni nel campo della microelettronica, della sensoristica e della robotica, essendo destinata all'amplificazione dello spostamento prodotto da celle piezoelettriche. In particolare, l'utilizzo di meccanismi flessibili o *compliant mechanisms* in tal senso permette di ovviare alle imprecisioni causate dai giochi e dall'usura nei meccanismi tradizionali. Nei primi capitoli vengono esposti i processi di fabbricazione additiva per i polimeri sotto forma di resine e polveri. Successivamente verranno introdotte le strutture flexure, i loro vantaggi e le loro applicazioni. Sarà poi affrontato lo studio eseguito per la progettazione della struttura di interesse, mediante ottimizzazione topologica, con particolare riferimento alla scelta del processo AM più indicato per la realizzazione finale del modello. Infine, verrà trattata l'ottimizzazione topologica della struttura di supporto per il fissaggio al telaio dell'amplificatore, progettata e destinata alla realizzazione con processi di stampa 3D.

Capitolo 1

Introduzione all'Additive Manufacturing

Secondo la definizione dell'American Society of Testing and Materials (ASTM) la produzione additiva, meglio conosciuta sotto il nome di "Additive Manufacturing", è un processo ideato per fabbricare oggetti a partire da modelli virtuali CAD 3D mediante la sovrapposizione continua di strati uno sopra l'altro (layer-by-layer), in opposizione alle lavorazioni convenzionali di produzione [1].

Queste ultime tecnologie prevedono infatti che un modello grezzo venga intagliato o modellato fino a raggiungere i requisiti di progetto finali mediante la rimozione di parti di esso con processi per asportazione di truciolo. La produzione additiva è il polo opposto: le strutture sono realizzate con l'aggiunta di migliaia di strati che si combinano per creare il prodotto.

Il processo prevede l'uso di un computer e di un software CAD che generi, a partire da un modello 3D del prodotto, un file STL che contenga una approssimazione della sola superficie del modello 3D opportunamente suddivisa in triangoli escludendo informazioni quali colore, texture, scala ed altre contenute nel modello 3D nativo. Successivamente viene effettuata tramite software detti di "slicing" una suddivisione in strati della superficie necessaria affinché la macchina di stampa possa riprodurre sezione per sezione il pezzo voluto. I principali step che accomunano i vari processi AM sono illustrati in figura 1.1 a seguire:

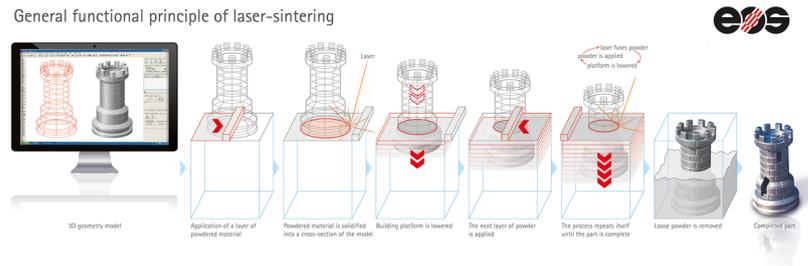


Figura 1.1: *Step principali dei processi di Additive Manufacturing*

Sebbene spesso ci si riferisca alla fabbricazione additiva in generale, utilizzando i diversi sinonimi quali Stampa 3D e Prototipazione rapida, questi in ambito industriale rappresentano una categoria di processi ben definita [2]. In particolare, il termine “Stampa 3D” accomuna i processi di produzione per deposito di materiale layer-by-layer utilizzando una testina stampante, un ugello o altra tecnologia. Anche il termine “Prototipazione Rapida” venne utilizzato impropriamente negli anni venendo ormai rimpiazzato da “Additive Manufacturing” per la sua natura ingannevole. Infatti, sebbene si possano produrre prototipi, si ottengono anche prodotti dalle caratteristiche funzionali molto vicine a quelle del prodotto finito. Questo grazie alla continua evoluzione che i processi di stampa hanno subito mediante l’implemento di tecnologie migliori per la costruzione delle macchine ma soprattutto lo sviluppo di materiali ottimizzati per raggiungere qualità di stampa sempre maggiori.

Le tecniche di produzione convenzionali sono in grado di produrre una vasta gamma di forme e strutture, ma la produzione additiva porta la produzione ad un livello superiore. Uno dei più grandi vantaggi di questa tecnologia è la vastissima gamma di forme complesse che possono essere prodotte. Strutture che con i processi tradizionali possono essere ottenute solo tramite collegamento di più elementi, adesso possono essere facilmente ottenute in un pezzo unico e con elevata precisione. Ad esempio, strutture cave possono essere ottenute senza la necessità di saldare o collegare più parti. Questo si traduce in assenza di punti deboli come zone di concentrazione delle tensioni e zone termicamente alterate con una riduzione dei costi di fabbricazione.

La produzione additiva permette inoltre di ridurre in maniera drastica il tempo e il costo di ingegnerizzazione di un prodotto ed il TTM (Time to Market). Con questo acronimo si intende il tempo che intercorre tra l'ideazione del prodotto e il momento in cui sarà posto in vendita sul mercato. La prototipazione rapida, in particolare, è molto veloce, con modelli completi prodotti in alcuni casi anche in poche ore. Ciò fornisce alle aziende molta più flessibilità e ha anche il risultato di tagliare i costi dato che è possibile apportare al modello continue modifiche fino al raggiungimento delle caratteristiche ottimali. In passato, i limiti della produzione hanno influenzato troppo spesso il progetto, escludendo le idee perché non erano praticamente realizzabili. L'introduzione di queste tecnologie e del loro sviluppo porta il design a capo della filiera produttiva.

La prototipazione rapida nasce con la stereolitografia ai primordi dell'additive manufacturing negli anni 80. La classificazione principale delle tecniche di fabbricazione additiva è sulla natura dei materiali impiegati, in particolare è possibile generare il prodotto a partire da polveri, liquidi o solidi. Oggi l'impiego di polveri sta assumendo sempre maggiore importanza, poiché teoricamente la macchina può rimanere la stessa e, cambiando il tipo di polvere, si possono ottenere oggetti con caratteristiche differenti, sia estetiche che meccaniche. Oltre alle polveri, che possono essere a un componente o due componenti per la presenza di un legante, ci sono tecniche che si basano su liquidi, ad esempio resine che vengono fatte polimerizzare, ed infine l'uso di materiali solidi quali fili di materiale polimerico portati allo stato fuso o fogli speciali di carta.

Per introdurre in maniera più chiara i vari processi allo stato d'arte della fabbricazione additiva si faccia riferimento alla 1.1 ed alla 1.2:

Process Categories	Technologies	Materials
Binder Jetting	3D printing Ink Jetting S print M print	Metal Polymer ceramic
Directed Energy Deposition	Direct Metal desposition Laser Deposition Laser Consolidation Electron Beam Direct Melting	Metal Powder wire
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling	Polymer
Material Jetting	Polyject Ink Jetting Thermojet	Photopolymer Wax
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering Selective Laser melting Electron Beam Melting	Metal Powder Ceramic
Sheet Lamination	Ultrasonic Consolidation Laminated Object Manufacture	Hybrids Metallic Ceramic
Vat photopolymerization	Stereolithography Digital Light Processing	Photopolymer Ceramic

Tabella 1.1: *Terminologia standard dei processi AM secondo ASTM F2792*

Materials	Technologies		
	Parts built through polymerization	Parts built through bonding agent	Parts built through melting
Ceramic		 BJ	 LM
Metal			 EBM
Sand			
Plastic	 SL  PJ		 FDM  LS
Wax			 MJ*

Lower	Durability	Higher
Smoother	Surface finish	Rougher
Higher	Detail	Lower
Prototypes Indirect processes	Application	Functional parts

Figura 1.2: *Classificazione in base ai materiali ed al tipo di processo coinvolto*

La tabella 1.1 è stata stilata da una apposita commissione fondata da ASTM nel 2009 con lo scopo di definire gli standard per incentivare la ricerca e lo sviluppo delle tecnologie AM [1].

Capitolo 2

Fabbricazione additiva di fotopolimeri

2.1 Stereolitografia

2.1.1 Processo

Datata 1987 e lanciata da Chuck Hull fondatore dell'azienda statunitense 3D Systems, la stereolitografia costituì il primo esempio commerciale di prototipazione rapida. Hull la definisce un metodo per creare oggetti solidi a partire dalla sovrapposizione di successivi strati induriti di polimero liquido fotosensibile mediante luce ultravioletta. La SLA-1 in figura 2.1 è stato il primo sistema al mondo di AM disponibile sul mercato.

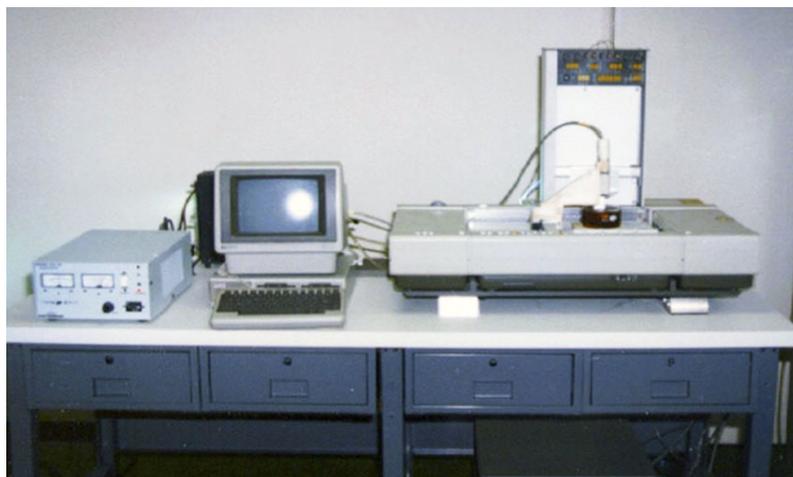


Figura 2.1: *SLA-1 sviluppata nel 1987 da 3D Systems*

La stereolitografia (SLA) utilizza un contenitore di resina fotopolimerica liquida polimerizzata mediante un laser a ultravioletti (UV) per solidificare selettivamente il modello strato dopo strato in funzione dei dati forniti tramite un file formato STL. Il processo di SLA consente di gestire la più vasta gamma di applicazioni di produzione rapida con i seguenti vantaggi:

- Massima precisione e finitura superficiale rispetto a tutte le parti stampate in additive
- Ampia selezione del materiale: rigido, duraturo, trasparente
- Ampia varietà di opzioni di post-elaborazione
- Realizzazione rapida di prototipi per collaudo di forma e idoneità
- Modelli di presentazione per modelli da esposizione e per fiere
- Tempi di consegna brevi
- Impostazioni ad alta risoluzione
- Piattaforme per costruzioni di grandi dimensioni disponibili

Il processo inizia con la creazione del file 3D CAD. Il modello viene quindi "meshato" approssimando la sua superficie con una triangolazione riferita agli assi cartesiani del modello. Tale superficie viene passata ad un software di slicing che, in base alle caratteristiche tipiche della macchina di stampa, effettuerà la suddivisione del modello in una serie di sezioni trasversali parallele più o meno spesse. Le parti principali che costituiscono una macchina per la stampa SLA sono mostrate in figura 2.2:

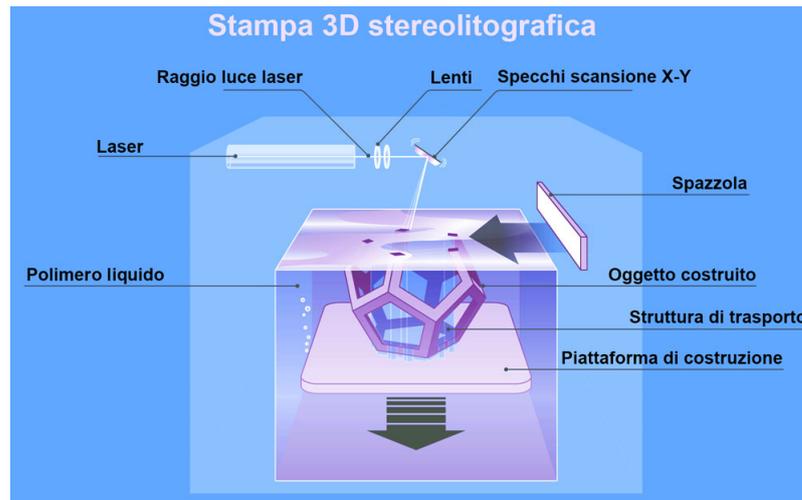


Figura 2.2: *Stampa Stereolitografica*

L'intera macchina è un sistema sigillato, per evitare ossidazione dei polimeri e uscita dei fumi, costituito da diversi sottosistemi. Una resina fotopolimerica liquida è contenuta all'interno di un serbatoio. Un dispositivo laser rileva il livello della resina nel serbatoio. Una tavola mobile verticalmente comandata da servomotori lungo l'asse Z, contiene una piattaforma su cui il modello viene costruito. Prima di costruire i successivi strati della parte, la tavola viene posizionata sotto la superficie della resina in modo che uno strato di resina fresca non indurita, di spessore pari allo spessore dello strato da realizzare, scorra sopra lo strato precedentemente polimerizzato. Tuttavia, poiché la resina è solitamente molto viscosa, essa impiega un certo tempo per stabilire uno strato liquido a spessore uniforme. Per ridurre il tempo in questa fase, il liquido sopra la parte viene livellato con l'ausilio di una spazzola mobile orizzontalmente, in inglese "*recoater blade*" [3]. Questo processo è detto di ricoprimento. Un sistema laser viene utilizzato per polimerizzare selettivamente la resina liquida e realizzare lo strato. La lunghezza d'onda, λ , della radiazione laser è solitamente nel campo tra il visibile ed il campo delle radiazioni ultraviolette, quindi, molto più grande della dimensione molecolare, d_m , della resina. Il sottosistema laser include meccanismi per il controllo della potenza e delle dimensioni del raggio. Una coppia di specchi X e Y consente il controllo del punto in cui il raggio colpisce la

superficie della resina. Gli specchi sono controllati da servomotori ad alta frequenza di riposta. Ogni strato viene realizzato muovendo il raggio laser sulla superficie del fotopolimero liquido per tracciare la geometria della sezione trasversale, coerentemente con la geometria CAD, dell'oggetto in quello strato. Le fasi esposte vengono ripetute fino a quando l'oggetto non viene ultimato. A questo punto la parte è delicatamente rimossa dalla piattaforma. La resina in eccesso viene tamponata manualmente. Tuttavia la parte di solito non raggiunge a fine stampa un polimerizzazione del 100% e quindi, potrebbe essere necessaria una fase detta di "*post-curing*" dove il modello viene ulteriormente esposto alle radiazioni ultravioletta. Questa fase è necessaria prima di poter maneggiare la parte, per evitare deformazioni dovute alle blande proprietà del modello a fine stampa. Le strutture di supporto vengono successivamente rimosse manualmente così che la parte sia pronta per l'uso.

Una conseguenza della disposizione dei sottosistemi elencati nella macchina SLA è che la profondità di riempimento della vasca con resina deve essere almeno pari all'altezza della parte o al suo ingombro lungo l'asse di costruzione. Più recentemente altri produttori, tra cui EnvisionTEC e RPS. Voit, hanno sviluppato un concetto di macchina che utilizza un fluido su cui galleggia il fotopolimero attivo in modo da minimizzare la quantità di resina utilizzata [3]. Un altro approccio è stato quello di usare un serbatoio con una finestra trasparente ai raggi UV i quali, penetrando da sotto la piattaforma, polimerizzano lo strato di resina interposto tra la piattaforma di costruzione e la parte inferiore del serbatoio. La piattaforma si muove dal basso verso l'alto e la fonte luminosa arriva dal basso, motivo per cui a volte il processo è chiamato SLA invertito. Ciò riduce notevolmente la quantità di resina foto-attiva utilizzata. Tuttavia, una conseguenza di questa configurazione è che la resina indurirà occupando l'intero spazio tra la piastra di costruzione e la finestra nella parte inferiore del serbatoio. Ciò richiede che questo strato polimerizzato venga rimosso ad ogni passo rallentando il processo. In tutti i sistemi sopra menzionati, c'è una piena solidificazione della parte all'interfaccia liquido / aria o all'interfaccia liquido / serbatoio, che porta a strut-

ture interne intrinsecamente stratificate. Di recente, è stato sviluppato un sistema di SLA invertito in cui, si utilizza una finestra sulla parte inferiore del serbatoio non solo permeabile ai raggi UV ma anche all'ossigeno. L'ossigeno è in grado di disattivare i radicali liberi generati dai fotoiniziatori che avviano il processo di polimerizzazione e quindi solidificazione. Dal momento che la concentrazione di ossigeno è maggiore in prossimità del fondo, non ci sarà reazione e la parte crescente non si attaccherà mai alla finestra. Questa "zona morta" o continua interfase liquida (CLIP) consente al pezzo di essere riposizionato immediatamente dopo un'esposizione e alla resina fresca di rifluire per la realizzazione dello strato successivo. Inoltre, poiché la concentrazione di ossigeno diminuisce con la distanza dalla superficie permeabile, l'estensione della solidificazione aumenta in proporzione a quella distanza. Quindi, c'è un gradiente nel grado di solidificazione spostandoci dal fronte di solidificazione verso l'oggetto già solidificato. In teoria, altri sistemi potrebbero essere utilizzati dove le reazioni sono bloccate dall'introduzione di un agente adatto all'interfaccia fondo / resina. La società Carbon, Inc. è stata fondata nel 2013 sulla base di questa tecnologia e il concetto di resine a doppia polimerizzazione. Tuttavia questa tecnologia utilizza un proiettore e non una sorgente laser UV rientrando nella categoria di processi stereolitografici DLP esposta successivamente.



Figura 2.3: *Continuous Liquid Interface Production CLIP*

Tipicamente la SLA permette la realizzazione di strati con uno spessore tra 15 e 50 μm . La rugosità superficiale tipica è al di sotto di 10 μm . Il volume di lavoro supera i $1500 \times 750 \times 550 \text{ mm}^3$.

2.1.2 Qualità delle parti e strategie di stampa

Ritiro volumetrico, Swelling, Curling e Distorsioni

Uno dei problemi che si incontra spesso in stereolitografia riguarda l'elevato ritiro volumetrico delle resine polimerizzate. Durante la polimerizzazione, la resina può subire tra il 5% ed il 7% di contrazione e tra il 50% ed il 70% del ritiro si verifica all'interno del serbatoio. La restante parte avviene durante la fase di post-curing. Il restringimento porta ad un aumento di densità della parte ed è fortemente influenzato dal tipo di resina, dal modo in cui viene condotta la scansione degli strati dal laser e da parametri di processo quali lo spessore dello strato e la distanza tra due linee di scansione. Il problema principale risiede non tanto nel fatto che la resina manifesti una contrazione volumetrica ma che questa interessi diversamente zone diverse della parte durante la fabbricazione provocando fenomeni quali *curling*, *swelling* e distorsioni. Può anche portare alla formazione di difetti come porosità e vuoti all'interno del pezzo che incidono negativamente sull'allungamento a rottura. Tutti questi effetti ovviamente portano a una bassa precisione e qualità delle parti. Lo sviluppo di resine SL a basso ritiro volumetrico, come le epossidiche, ha aiutato a contenere l'entità di questi difetti. Due processi avvengono simultaneamente durante la scansione di una traccia da parte del laser. In primo luogo, il calore sviluppato dalla reazione di polimerizzazione causa la dilatazione termica. In secondo luogo, si verifica una contrazione dovuta alla polimerizzazione. Generalmente la dilatazione termica domina durante la scansione e l'effetto risultante è di espansione. Tuttavia, quando il raggio laser si allontana, l'emissione di calore di reazione si arresta e il volume di resina inizia a raffreddarsi. Questo arresto si verifica immediatamen-

te nella polimerizzazione a radicali liberi e con un po di ritardo nel caso di polimerizzazione cationica. Una volta che il calore di reazione viene completamente dissipato, rimane soltanto il ritiro volumetrico durante la polimerizzazione. Lungo una traccia di scansione del laser, troveremo diversi valori di dilatazione termica indotti da una distribuzione non uniforme della temperatura mentre l'entità del ritiro indotto dalla polimerizzazione potrebbe essere la stessa. Segue che una delle ragioni principali per cui una parte manifesta distorsioni geometriche risiede nella distribuzioni irregolare della temperatura. Il ritiro iniziale è di solito sensibile al metodo di scansione degli strati a causa del fatto che la velocità di raffreddamento di un certo volume di resina dipende da come dissipa il calore attraverso il mezzo che lo circonda. Ad esempio, se tracce consecutive di uno strato vengono alternate tra uno strato ed il successivo, il ritiro risulta inferiore rispetto alla scansione continua. La natura delle reazioni chimiche che si verificano durante la polimerizzazione, influisce in modo significativo sul restringimento come nel caso di resine viniliche ed, in particolare, aumenta all'aumentare della concentrazione di legami vinilici. Inoltre, mentre complessivamente la parte riduce il suo volume a causa della polimerizzazione, la resina liquida non polimerizzata contenuta tra due tracce di scansione potrebbe essere assorbita e risultare in un rigonfiamento chiamato *swelling*. L'assorbimento è maggiore per tracce di scansione circondate da resina liquida su entrambi i lati. Il gonfiore viene solitamente misurato come variazione volumetrica percentuale dopo un'immersione per 24 ore della parte in resina liquida. Per quanto riguarda il ritiro volumetrico nella fase di post-curing, si nota un aumento quasi lineare all'aumentare dello spessore dello strato, mentre con l'aumentare del tempo di esposizione, la contrazione aumenta rapidamente all'inizio per poi saturarsi. Variare la potenza del laser non influenza direttamente il ritiro finale. Tuttavia, con una potenza laser elevata, il ritiro è meno sensibile alle variazioni sullo spessore dello strato. Una delle principali conseguenze degli effetti termici e di ritiro è la distorsione geometrica immediatamente dopo l'esposizione al laser e dopo la fase di post-curing. Un singolo strato non supportato può ritirare

senza subire distorsioni come in figura 2.4a. Tuttavia sovrapponendo gli strati l'adesione permette allo strato successivo di trasmettere, ritirandosi, sforzi allo strato precedente causando l'incurvamento verso l'alto dell'estremità libera come in figura 2.4b. Man mano che gli strati si sovrappongono, la struttura si irrigidisce ed il fenomeno si arresta rimanendo comunque presente a fine stampa, figura 2.4c. Inoltre, a causa degli stress residui indotti, le parti possono continuare a deformarsi in uso.

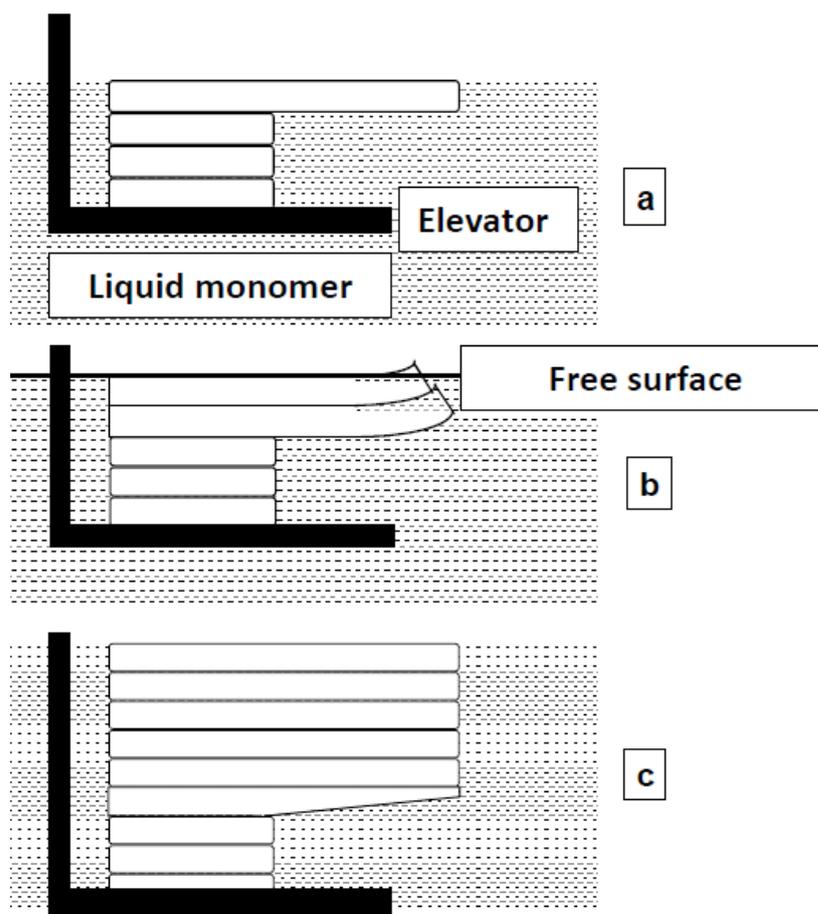


Figura 2.4: *Fenomeno di distorsione "curling"*

Vari test standardizzati dalle case produttrici di macchine per la stampa 3D hanno dato i seguenti risultati per la previsione del fenomeno:

- Il curling aumenta con l'aumentare di $E(y, z)$, esposizione al laser, e dell'overcure o sovraesposizione.

- All'aumentare della velocità di polimerizzazione delle resine aumenta l'entità della distorsione. Quindi monomeri di acrilato che polimerizzano da 3 a 10 volte più velocemente del metacrilato mostrano un comportamento peggiore.
- Il ritiro volumetrico è certamente una ragione per l'instaurarsi del curling, non vi è diretta correlazione con il ritiro lineare totale. Spesso ci sono ulteriori effetti termici da tenere in considerazione come il restringimento dovuto al raffreddamento.

Metodi di realizzazione dello strato

Durante la realizzazione di uno strato, i bordi vengono tracciati per primi, mentre l'interno è tracciato usando uno dei numerosi modelli di scansione disponibili. Uno dei primi schemi di scansione fu il TRI-HATCH o Triangular Hatch [4], dove le linee di scansione sono parallele all'asse X e combinate con le linee inclinate di 60° e 120° rispetto all'asse X . Di conseguenza, la struttura interna è costituita da colonne verticali a sezione triangolare cava. Il volume vuoto all'interno conterrà resina liquida. La presenza di una grande quantità di liquido, fino al 50 % in volume, può causare una eccessiva distorsione nella fase di post-curing ed inoltre costituisce uno spreco di resina.

Il modello di scansione WEAVE, dall'inglese "tessere" e sviluppato dalla americana 3D Systems, prevede che lo strato venga realizzato seguendo un pattern a griglia ortogonale dove tracce parallele all'asse y sono sovrapposte da tracce parallele all'asse x , come a tessere una maglia. Le linee di scansione parallele sono separate da un piccolo spazio vuoto in modo che non si verificano distorsioni nella prima fase di scansione lungo y . La velocità di scansione è selezionata in modo tale che il tempo necessario per tracciare ciascuna linea sia molto più piccolo rispetto al tempo caratteristico per un apprezzabile ritiro dei polimeri. L'esposizione massima raggiunta in mezzera per ogni linea di scansione lungo Y è impostata in modo tale che la profondità dello strato polimerizzato sia leggermente più picco-

la dello spessore dello strato selezionato. La scansione lungo x ad ogni strato viene eseguita con lo stesso valore di esposizione. Questa condizione garantisce un incremento positivo costante della profondità di polimerizzazione nel passaggio alla scansione lungo x, indipendentemente dal livello assoluto di esposizione. In questo modo si crea l'adesione tra strati successivi, specialmente nei punti di intersezione tra le linee y e x. La spaziatura tra le tracce x ed y è selezionata in modo che una percentuale elevata, circa del 96 %, del volume di polimero solidifichi a fine stampa. Quindi, la distorsione nella fase di post-curing è drasticamente ridotta. Tuttavia, le linee di scansione continuano ad essere allineate verticalmente in forma colonnare causando distorsione della parte dovuta alle sollecitazioni interne indotte.

Il problema degli stress indotti è stato risolto attraverso lo sviluppo del pattern STAR-WEAVE, STaggered Hatch Alternate Sequencing Retracted Hatch WEAVE. Lo schema prevede che le linee di scansione x ed y tra due strati successivi non si sovrappongano, risultando sfalsate di una distanza $d = h_s/2$ con h_s pari al gap tra due linee parallele sullo stesso strato. In questo modo viene meno la geometria colonnare caratteristica dei vecchi pattern e la possibilità di incorrere in micro-fessure durante la fabbricazione. La direzione di scansione viene alternata tra due strati successivi. Infine secondo la strategia "retracted hatching", ciascuna linea di scansione è collegata al perimetro dello strato soltanto ad una estremità, come mostrato in figura 2.5. Tale strategia evita che la striscia di resina liquida tracciata dal laser, contraendosi durante la solidificazione, possa flettere e causare la distorsione della parte.

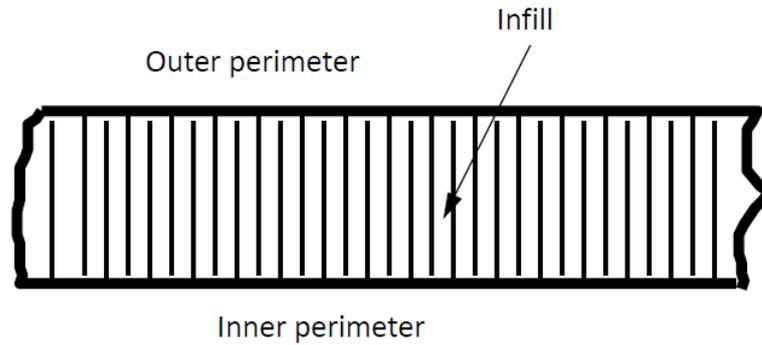


Figura 2.5: *Retracted hatching*

Su un piano parallelo all'asse z della macchina, le due strategie di scansione del laser vengono mostrate nelle figure 2.6a e 2.6b:

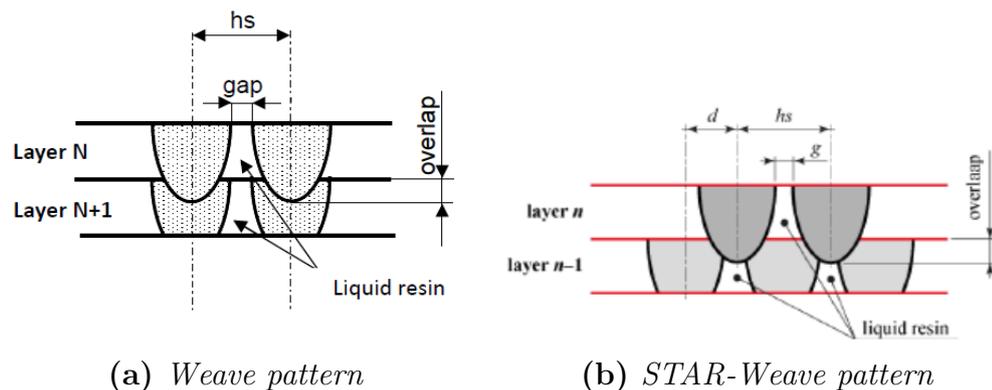


Figura 2.6: *Strategie di costruzione della parte*

E' possibile notare come con STAR WEAVE il volume di resina rimasta liquida sia minore a fine stampa e quindi, ritiro volumetrico e distorsioni molto più basse nella fase di post-curing. L'adesione tra gli strati è affidata alla quantità di "overlap" ovvero di sovrapposizione tra le tracce di due strati successivi.

ACES, acronimo di Accurate Clear Epoxy Solid, permette di raggiungere una alta stabilità dimensionale della parte. Il metodo elimina quasi completamente la distorsione post-curing e gli stati tensionali residui. La polimerizzazione di ogni strato avviene in due fasi. Nella prima, lo strato viene polimerizzato quasi a tutto spessore ma senza raggiungere l'adesione con lo

strato successivo cosicché non si verifichi alcuna distorsione. Nella seconda fase, lo strato è soggetto a un'esposizione tale da assicurare una polimerizzazione uniforme e l'adesione allo strato precedente.

2.1.3 Prove sulla qualità delle parti prodotte

La qualità delle parti prodotte con un processo di stampa stereolitografica è influenzata principalmente da 4 fattori:

- Tipo di resina
- Spessore dello strato
- Orientamento della parte all'interno della macchina
- Operazioni post-stampa

Riguardo alla precisione delle parti prodotte, ci si riferisce a quella che i produttori forniscono nelle specifiche di ogni macchina chiamata risoluzione lungo l'asse Z ovvero, lo spessore minimo dello strato che la macchina è in grado di realizzare. La risoluzione lungo gli altri due assi X e Y , risulta invece meno facile da determinare e comunque raramente attendibile quando indicata dunque, andrebbe verificata tramite l'analisi di immagini ottenute al microscopio su modello campione opportunamente progettato per il test. La risoluzione XY inoltre è quella che maggiormente influenza la qualità di stampa. Dipende principalmente dalla dimensione del fascio laser ma anche dal più piccolo movimento che il laser è in grado di eseguire durante l'esecuzione di uno strato. Quanto più piccola è la risoluzione, quanto più precisi saranno i dettagli. In particolare, per capire l'importanza di questo parametro è possibile osservare i risultati ottenuti durante un test per la determinazione della risoluzione XY di una stampante Form 2 prodotta dall'azienda statunitense Formlabs. Tale stampante ha un raggio laser di $140 \mu\text{m}$ ed il modello utilizzato è un prisma a base rettangolare su cui sono state realizzate delle linee orizzontali, verticali e diagonali la cui distanza reciproca è compresa in un

range tra 10 e 200 μm a step da 10 μm così come mostrato in figura 2.7. Lo spessore di ogni linea è di 200 μm .

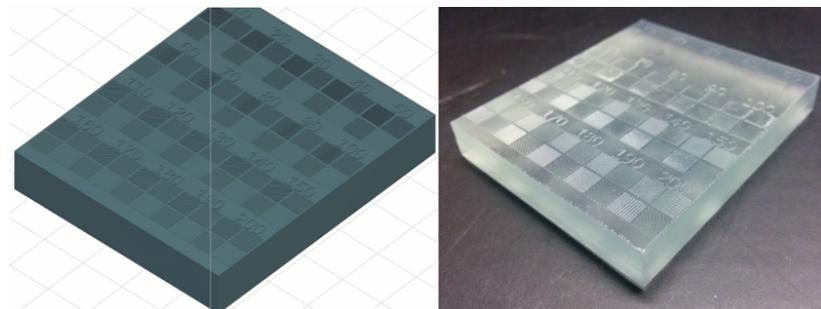


Figura 2.7: *Modello prismatico utilizzato nel test di risoluzione XY*

I risultati dell'analisi tramite immagine al microscopio sono mostrati nel grafico 2.8:

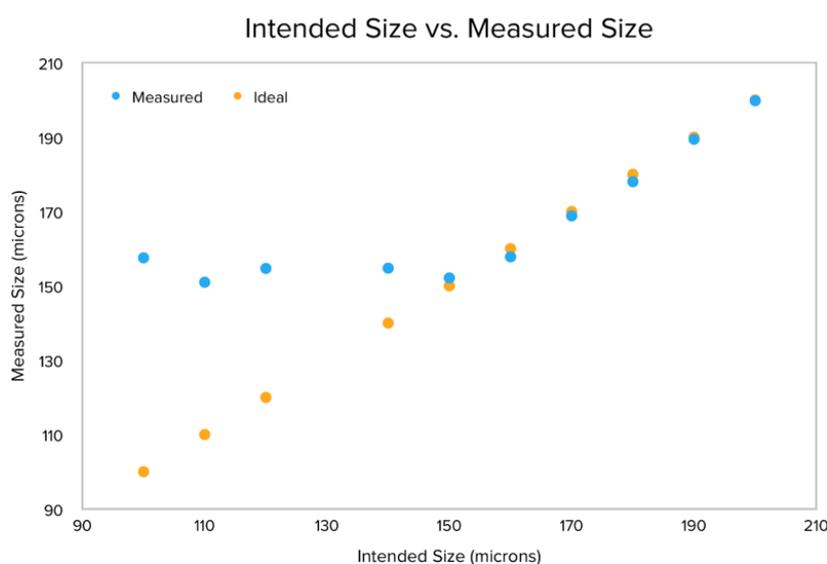
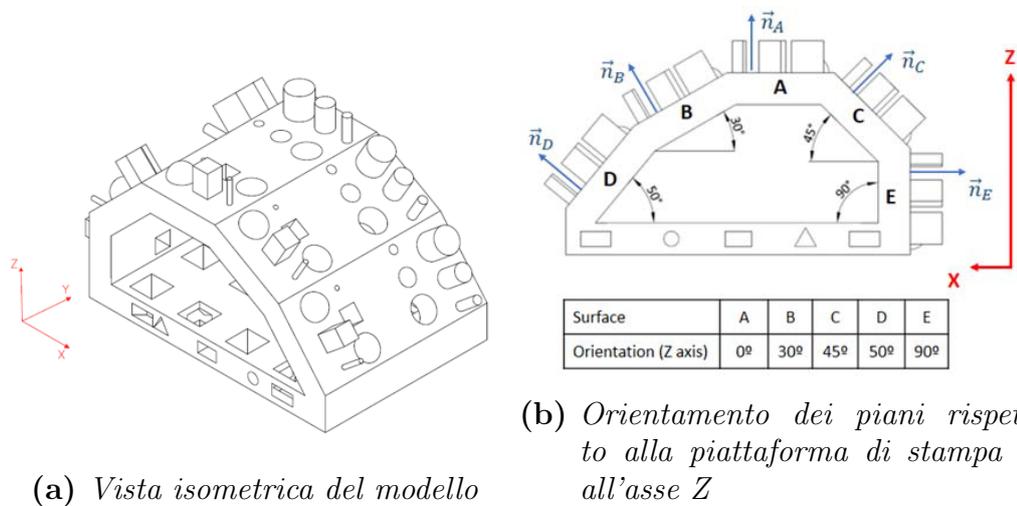


Figura 2.8: *Risultati del test sulla risoluzione*

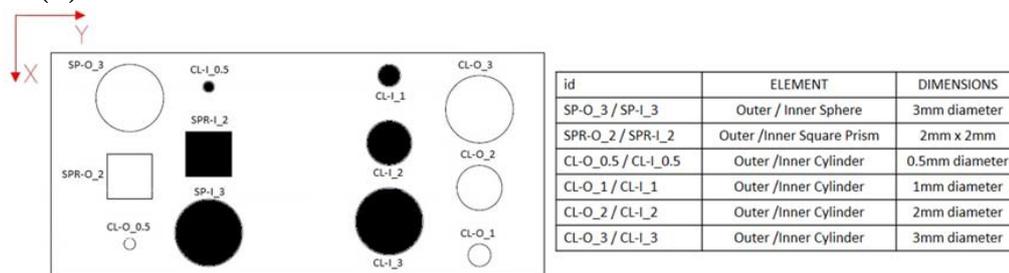
Quando la distanza tra le linee è compresa tra 200 e 150 μm , i valori misurati corrispondono a quelli ideali con una affidabilità del 95 %. Man mano che ci portiamo sotto i 150 μm la deviazione risulta sempre più marcata. Questo sta a significare che la macchina in esame è in grado di riprodurre "feature" accurate con dimensioni minime sul piano XY pari a 150 μm . Fissata una determinata macchina per la stampa e quindi le sue specifiche, la risoluzione è considerata indipendente

da altri parametri di processo quali il tipo di resina utilizzata o l'orientazione del modello rispetto agli assi di riferimento della macchina stessa. L'orientazione del pezzo è il risultato di una media ponderata dei vari fattori che ne sono influenzati. In particolare, da essa dipendono la scelta dei supporti, la finitura superficiale e l'accuratezza. Riferendosi alla qualità superficiale e accuratezza dimensionale è possibile progettare un modello di prova che contenga diverse feature quali facce piane, sferiche, cilindriche e fori di varie dimensioni e con varie orientamenti rispetto agli assi macchina. Questo costituirà il benchmark delle analisi. Successivamente sono realizzate varie copie di tale modello variando di volta in volta i parametri di processo. Il modello deve essere grande abbastanza rispetto alle dimensioni della area di lavoro così da mostrare le reali capacità della macchina, le feature devono essere di varie dimensioni e la realizzazione deve avvenire con tempi e consumi di materiale ridotti. S. Martinez et al hanno investigato l'accuratezza dimensionale e la rugosità superficiale utilizzando il benchmark mostrato in figura 2.9 [5]:



(a) Vista isometrica del modello

(b) Orientamento dei piani rispetto alla piattaforma di stampa e all'asse Z



(c) Disposizione delle feature su ogni piano

Figura 2.9: Benchmark delle analisi

Dallo studio si evince che i fori realizzati con asse perpendicolare al piano di costruzione risultano precisi indipendentemente dal loro diametro. L'inclinazione dell'asse del foro rispetto all'asse Z della macchina può influire negativamente sulla qualità delle feature, e la deviazione dalle dimensioni nominali aumenta al diminuire delle stesse.

La rugosità delle parti prodotte è influenzata dal tipo di resina utilizzata e dalla pendenza dei piani rispetto all'asse Z . La rugosità aumenta all'aumentare dell'inclinazione rispetto all'asse di stampa a causa del prevalere dell'effetto a gradini.

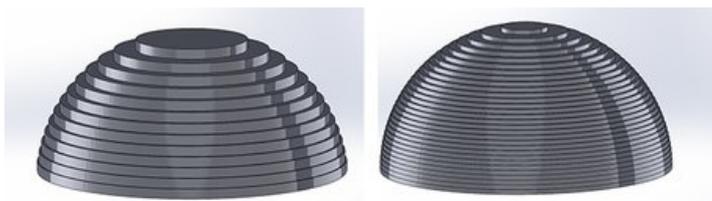


Figura 2.10: Influenza dello spessore dello strato sull'effetto a gradini

2.2 Progettazione per AM fotopolimeri

Sebbene molte delle regole di progettazione che si applicano per tecnologie di produzione come la stereolitografia e sue varianti possano essere condivise da molti altri processi di AM di polimeri generici, ci sono alcune linee guida specifiche per le tecnologie a base di resina che è bene tenere a mente per l'ottenimento delle parti desiderate. Si noti che il sistema SLA classico prevede la fabbricazione in modalità top-down, cioè gradualmente la parte scende verso il basso affondando nella resina contenuta nel serbatoio di uno spessore pari allo spessore dello strato fino a completamento. Altre invece funzionano in modalità bottom-up, dove la sorgente laser o sorgente UV in generale (DLP / DMD) si trova sotto il serbatoio e solidifica la parte attraverso una "finestra" trasparente ai raggi UV collocata sul fondo. La parte viene poi estratta, sollevando la piattaforma di stampa, dal bagno di resina. La SLA è in grado di ottenere risoluzioni più elevate rispetto agli altri processi additivi. La risoluzione SLA nella direzione XY dipende dalla dimensione del fascio laser e può variare da 50 a 200 μm . Questo di solito non è un parametro variabile di stampa. Pertanto, la dimensione minima delle feature non può essere inferiore a tale grandezza. La risoluzione nella direzione Z varia da 25 a 200 micron a seconda dei possibili valori di spessore dello strato consentiti dalla macchina. La scelta dello spessore a sua volta è un compromesso tra velocità e qualità di stampa. Per una parte che ha poche curve e piccoli dettagli, ci sarà poca differenza ad occhio nudo tra una stampa a 25 micron rispetto a una stampa a 100 micron. L'orientazione del modello in macchina, in particolare su una macchina SLA bottom-up che polimerizza la parte dal basso e la estrae dalla vasca di resina, di particolare interesse è l'area della sezione verticale. Le forze coinvolte nella stampa di un modello che rimane attaccato al fondo del serbatoio sono direttamente proporzionali all'area della sezione trasversale. All'aumentare della sezione trasversale è spesso consigliato dare una certa angolazione al modello rispetto alla

piattaforma di costruzione. Ridurre al minimo l'area della sezione trasversale lungo l'asse Z è il modo migliore per orientare le parti nella SLA. Naturalmente delle modifiche possono essere introdotte anche nella fase di progettazione delle parti per ridurre al minimo tali aree. È importante capire perché l'orientamento delle parti influisce sulla qualità di una stampa SLA. La necessità di orientare i componenti in modo che l'area della sezione trasversale sull'asse Z sia minimizzata spesso comporta l'aggiunta di una quantità significativa di supporti. In alcuni casi, il progetto potrebbe richiedere un utilizzo dei supporti così esteso da rendere svantaggiosa economicamente la stampa o molto scarsa la finitura superficiale della parte compromettendone l'utilizzo. Segni tipici dopo la rimozione dei supporti sono visibili nel modello in figura 2.11. La SLA richiede che le feature sporgenti dal modello vengano irrigidite da supporti [6]. Questo perché la resina non indurita non è abbastanza viscosa per supportare da sola lo strato successivo. Sulla maggior parte dei sistemi SLA la fase di aggiunta dei supporti è in gran parte automatizzata ma con l'esperienza l'utente può modificare manualmente il numero e la disposizione degli stessi per evitare di compromettere la qualità nelle aree in cui la finitura è critica.



Figura 2.11: *Segni evidenti presenti dopo la rimozione dei supporti*

Le sporgenze in genere non costituiscono grossi problemi nella stampa SLA, a meno che il modello non sia stampato senza adeguate strutture di supporto. La stampa senza supporti spesso porta a deformazione per incurvamento ma, se necessaria, le feature sporgenti devono essere mantenute ad una lunghezza inferiore a 1,0 mm ed inclinate di almeno 20° rispetto all'orizzontale.

Lo SLA è uno dei pochi processi in cui le parti sono relativamente isotrope. Questo perché gli strati si legano chimicamente tra loro mentre vengono stampati risultando in una distribuzione omogenea delle proprietà meccaniche nelle tre direzioni.

Le macchine SLA possono stampare modelli solidi e densi ma, se la stampa non è destinata direttamente all'uso come nel caso della prototipazione, svuotare il modello può ridurre significativamente la quantità di materiale necessario oltre a ridurre i tempi di stampa. E' consigliabile che le pareti della parte cava siano spesse almeno 2 mm per evitare di compromettere la stampa. Quando si realizza una parte cava, è necessario aggiungere dei fori per l'evacuazione della resina non indurita racchiusa all'interno della parte. Se non rimossa, la resina non polimerizzata può creare una differenza di pressione nel volume interno della parte e può causare il cosiddetto "Cupping". Piccoli difetti come crepe o fori propagano sotto l'effetto della pressione esercitata dal fluido fino ad una eventuale rottura o esplosione. I fori di scarico devono avere un diametro di almeno 3,5 mm ed almeno un foro per sezione cava, anche se con due la resina risulta molto più semplice rimuovere. I dettagli in rilievo, ovvero tutte le feature del modello che sporgono leggermente dalle superfici, devono essere alti almeno 0,1 mm per garantire che vengano effettivamente realizzati. I dettagli incisi invece possono essere compromessi dal rischio di fusione con il resto del modello durante la stampa se poco profondi. Devono essere larghi e profondi almeno 0,4 mm. Collegamenti tra due punti di un modello del tipo a "contrafforte" possono essere stampati correttamente, ma è necessario tener presente che strutture più spesse devono avere lunghezza minore, di solito meno di 20 mm, di quelle a sezione minore.

Se infine parti prodotte devono essere collegate tra loro, è sempre meglio averne una certa tolleranza che per SLA valgono:

- 0.2 mm tolleranza tra parti mobili di un assieme realizzate in differenti stampe
- 0.5 mm tra le parti mobili stampate in unico assieme

Infine per quanto riguarda lo spessore delle pareti, se collegate ad altre strutture su almeno due lati, hanno pochissime possibilità di deformazioni dunque il loro spessore minimo è di circa 0,4 mm. Se la superficie è elevata, può essere richiesto uno spessore maggiore [6]. Pareti che sono collegate al resto della stampa da un lato solo hanno una probabilità molto elevata di deformarsi o staccarsi dalla stampa. Queste pareti devono avere uno spessore di almeno 0,6 mm. Raccordare gli spigoli all'intersezione tra due pareti riduce la concentrazione delle tensioni. In generale, è consigliato uno spessore uniforme delle pareti su tutte le pareti.

2.3 Digital Light Processing (DLP)

Digital Light Processing è una tecnologia, di proprietà della Texas Instruments, applicata ai dispositivi che visualizzano immagini, come i videoproiettori cinematografici di ultima generazione. Oggetto di studio saranno macchine per la stampa stereolitografica integrate con tecnologia DLP. Si utilizza un proiettore DLP al posto del laser per polimerizzare in un unico step l'intera sezione trasversale esposta alla luce UV. Ancora una volta la macchina è costituita da una vasca trasparente riempita con fotopolimeri liquidi e costituita da una piattaforma in vetro e da silicone con alto grado di trasparenza. Il proiettore DLP è posizionato al di sotto della macchina e proietta immagini che volta per volta riproducono la sezione trasversale del modello CAD da realizzare come illustrato in figura 2.12.

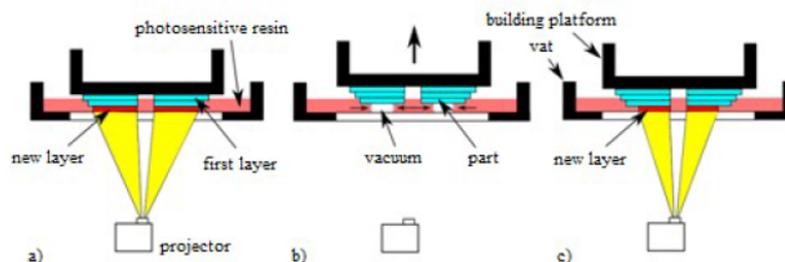


Figura 2.12: *Schema illustrativo processo Direct Light Projection*

In questo modo si ottiene la polimerizzazione della intera sezione in un solo step. Il primo strato si ottiene posizionando la piattaforma di posizione a contatto con il fondo della vasca e portandola in alto fino ad avere un gap tra le due superfici pari allo spessore dello strato scelto. In figura 2.13 è possibile notare come sostanzialmente, dal punto di vista costruttivo, la macchina DLP non si distanzia di molto da quella per la stereolitografia classica.

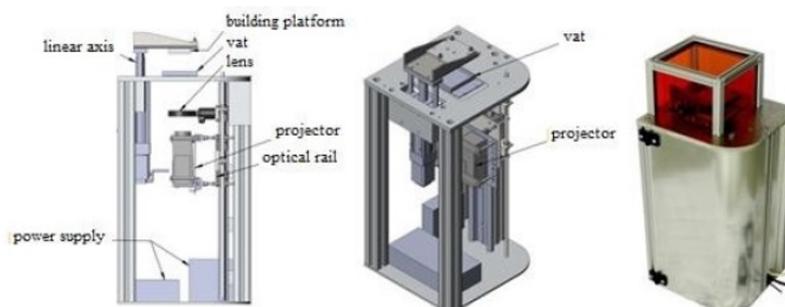


Figura 2.13: *Schema Costruttivo DLP*

La piattaforma su cui viene creato il modello può avere un moto concorde o opposto alla forza di gravità a seconda della configurazione della macchina stessa.

2.4 Confronto tra i processi SLA e DLP

La stereolitografia e il processo di stampa DLP seguono dei principi molto simili ma che possono portare a risultati significativamente diversi. Comprendere l'effetto delle variabili di

processo di ognuna delle due tecnologie di stampa 3D aiuta a prevedere ciò che otterremo a fine stampa e come massimizzare il potenziale di ciascun tipo di macchina. La parola “stereolitografia” viene dal greco “stereo” ovvero solido e “litografia” che è una forma di scrivere con la luce. La stereolitografia non fa altro che disegnare solidi con la luce. Sebbene questa definizione possa andare bene per entrambe le tecnologie, utilizzare un raggio laser può essere completamente differente dal proiettare una immagine 2D tramite un proiettore. Le macchine per SLA utilizzano due servomeccanismi chiamati galvanometri uno per ognuno dei due assi X e Y , che variando l’orientazione di uno specchio permettono rapidamente il puntamento del fascio laser nel punto di coordinate $(x; y)$. Questo processo insomma divide ogni strato in un insieme di punti e linee da seguire per il laser e che sono fornite ai galvanometri come set di coordinate. Il processo DLP invece utilizza un proiettore digitale che emette una singola immagine della intera sezione trasversale in una sola volta. Essendo appunto il proiettore capace di generare immagini digitali, queste sono composte da un numero finito di pixel quadri che come risultato portano a strati formati da piccoli “mattoncini” rettangolari chiamati Voxel come mostrato in figura 2.14:

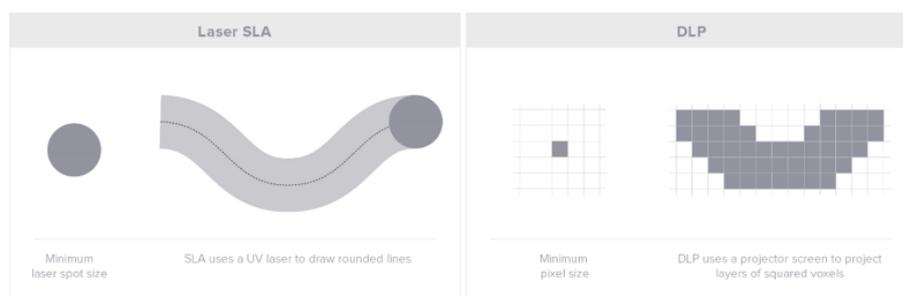


Figura 2.14: Confronto tra le sorgenti UV utilizzate in SLA e DLP

Le stampanti DLP possono raggiungere, per modelli di media complessità, elevate velocità di produzione grazie alla possibilità di generare ogni strato con una singola ed unica esposizione rispetto al laser dell’SLA. Tempi ridotti possono essere ottenuti nella produzione di pezzi grandi e con alta densità riferendosi a una superficie della piattaforma di produzione para-

gonabile con quella di stampa. Per parti contenute e con molti piccoli dettagli inoltre è possibile cambiare l'ottica dell'unità di proiezione in funzione del volume di lavoro e conseguentemente avere una luce adatta ad ottenere più rapidamente strati piccoli. Anche se più veloce, la stampa con le stampanti DLP 3D introduce dei compromessi in termini di risoluzione e finitura superficiale, sia con parti grandi che con serie di parti più piccole e dettagliate. Difficilmente inoltre sono in grado di stampare parti con alta risoluzione che riempiono gran parte del volume di costruzione. Ad esempio, una stampante DLP è in grado di stampare un anello ben dettagliato anche più rapidamente di una stampante SLA. Tuttavia, la stampa di molti anelli dettagliati in una sola volta richiederebbe una stampante 3D SLA, in grado di garantire un'elevata risoluzione costante sull'intero volume di costruzione. La risoluzione delle stampanti DLP 3D dipende dal proiettore, che definisce quanti pixel / voxel sono disponibili. Ad esempio, in full HD si proiettano immagini con 1920×1080 pixel. Il proiettore, in una stampante DLP 3D, deve essere riferito alla dimensione della sezione da stampare per ottenere una determinata risoluzione $X - Y$. Quando si desiderano pixel piccoli, ciò limita l'area di costruzione generale riducendo l'intera immagine. In altre parole, una stampa dettagliata su una stampante DLP deve utilizzare solo una frazione dell'area di lavoro ovvero modelli di grandi dimensioni possono essere ottenuti solo con una risoluzione blanda. Una stampante con volume di grandi dimensioni ha una quantità fissa di pixel di grandi dimensioni, rendendo impossibile stampare piccoli dettagli a pieno volume di costruzione. Il volume di costruzione di una stampante laser SLA 3D è completamente indipendente dalla risoluzione della stampa. Ciascuna stampa può essere di qualsiasi dimensione e risoluzione in qualsiasi posizione all'interno dell'area di costruzione. Essendo gli oggetti stampati a strati, le stampe 3D presentano spesso linee orizzontali visibili. Tuttavia, poiché il processo DLP esegue il rendering delle immagini utilizzando voxel rettangolari, esiste anche un effetto dovuto ai voxel riscontrabile in linee verticali a fine stampa rendendo meno accurata la qualità della stampa. In figura 2.15 sono mostrati i difetti superficiali tipici in una

stampa DLP

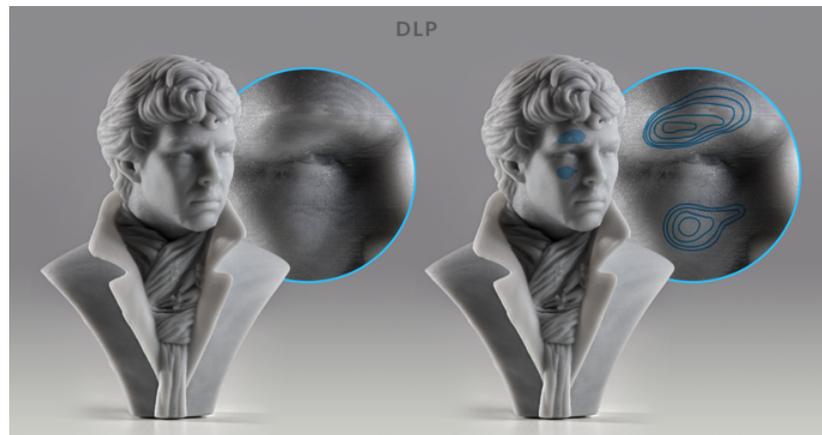


Figura 2.15: *Effetto sulla finitura superficiale della presenza dei voxel nella stampa DLP*

Poiché l'unità è rettangolare, i voxel hanno anche un effetto sui bordi curvi. Sarebbe come costruire una forma curva con i mattoncini Lego: i bordi appariranno a gradini sia sull'asse Z che sul piano $X - Y$ come rappresentato in figura 2.16. La rimozione delle imperfezioni causate dai voxel e dell'effetto a gradini causato dalla sovrapposizione di strati successivi richiede trattamenti di post-elaborazione, come la levigatura.



Figura 2.16: *Effetto a gradini dovuto ai voxel su entrambi i piani*

Capitolo 3

Fabbricazione additiva di polimeri

PBF

3.1 Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering (SLS) è un processo di fabbricazione additiva facente parte della categoria dei Powder Bed Fusion, PBF. Il processo utilizza un raggio laser diretto sulla superficie di polveri ceramiche o polimeriche per produrre rapidamente modelli solidi. Il processo di consolidamento delle polveri può avvenire per sinterizzazione o per fusione completa delle particelle, come nel caso della realizzazione di parti in polimero. È uno dei pochi processi inizialmente definiti di Rapid Prototyping in grado di realizzare parti durevoli e funzionali a partire da materiali già conosciuti, in molti casi, nei processi fabbricativi convenzionali.

Il processo SLS è stato sviluppato per la prima volta nel 1987 da Carl Deckard dell'Università del Texas ad Austin, per la produzione di parti in polimero [7]. Il processo è stato poi brevettato nel 1989 e commercializzato da DTM Corporation, USA.

3.1.1 Processo

In generale tutte le macchine SLS sono composte da una camera cilindrica all'interno della quale la parte viene realizzata e

due camere adiacenti alla prima per l'approvvigionamento delle polveri, secondo lo schema costruttivo mostrato in figura 3.1:

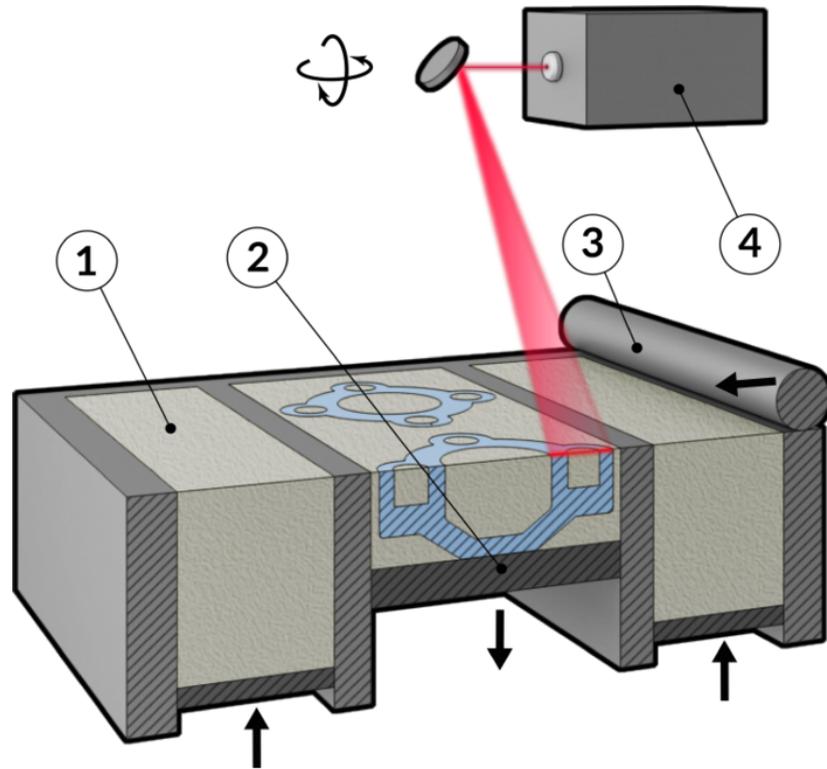


Figura 3.1: Schematizzazione processo SLS: (1) Camera di approvvigionamento delle polveri, (2) Piattaforma di costruzione, (3) Rullo livellatore (4) Laser

All'inizio di ogni ciclo di realizzazione dello strato, un pistone nella camera di alimentazione si sposta verso l'alto di una certa quantità in modo da spingere una quantità fissata di polvere sulla piattaforma di costruzione. Un rullo passando distribuisce uniformemente le polveri fino a creare uno strato uniforme e compatto. Lo spessore dello strato è di solito compreso tra $100\ \mu\text{m}$ e $150\ \mu\text{m}$. Come si nota in figura 3.1 vi sono due serbatoi di polvere, in modo da poter avere un processo di distribuzione di polvere più efficiente: infatti, il rullo esegue una distribuzione di polvere sia nella corsa di andata che in quella di ritorno. Nelle prime macchine non era presente il secondo serbatoio di polvere e solo la corsa di andata era attiva allungando di molto i tempi di produzione. Una sorgente a raggi infrarossi irradia costantemente le polveri per mantener-

le ad una temperatura vicina alla temperatura di fusione. Il preriscaldamento è realizzato per ridurre il ritiro volumetrico della parte e quindi gli stress termici e tensionali indotti. Molte macchine utilizzano un raggio laser CO_2 che si muove attraverso lo strato di polvere in modo tale da riprodurre la geometria dettata dal file STL per la sezione in esecuzione. Un laser CO_2 è in grado di generare potenze più elevate rispetto a quelle dei laser utilizzati nella SLA. La potenza del fascio è regolata per riscaldare le polveri fino ad una temperatura tale che le particelle aderiscano tra loro per sinterizzazione o fusione completa. La sinterizzazione può avvenire per fusione parziale delle particelle o del materiale di rivestimento con cui le particelle sono prodotte. Lo strato sinterizzato viene fatto raffreddare per un tempo sufficientemente lungo da evitare l'instaurarsi di stress tensionali elevati, e successivamente il cilindro posto nella camera di stampa si abbassa di una quantità pari allo spessore dello strato fissato, per ripetere il ciclo sullo strato seguente. La parte a fine stampa si troverà immersa nelle polveri all'interno della camera. Una volta terminata, la parte viene estratta dalle polveri, vengono rimosse le ulteriori polveri rimaste attaccate con l'aiuto di aria compressa e viene eventualmente sabbiata per aumentarne la finitura superficiale.

3.1.2 SLS diretto e indiretto

Si distinguono due tipi principali di processi SLS: indiretto e diretto. Il processo indiretto si riferisce alla fabbricazione di parti metalliche o ceramiche. Inizialmente il processo SLS diretto, applicato a miscele di polveri metalliche e polimeriche a differenti punti di fusione, portava ad un difetto conosciuto come "balling", ovvero si verificava la formazione di piccole sfere con ordine di grandezza simile a quello del fascio laser. Questo era dovuto al sovrariscaldamento ("overheating") delle polveri superando un certo valore di potenza laser o diminuendo la velocità di scansione. Tale limite venne oltrepassato utilizzando polveri a due fasi, come quelle mostrate in figura 3.2, e quindi sviluppando il processo indiretto SLS.

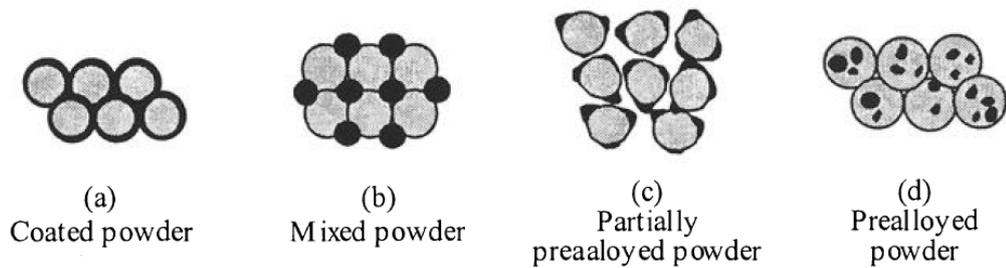


Figura 3.2: *Polveri per processi indiretti SLS*

La figura 3.2a mostra polveri metalliche rivestite da uno strato di polimero con funzione legante o eventualmente di metallo con temperatura di fusione più bassa allo scopo di facilitare l'adesione tra le particelle. In tal senso la seconda fase presente fonde e lega le particelle della fase primaria. Il processo SLS indiretto di metalli si basa sul fenomeno di sinterizzazione allo stato liquido o in inglese "*Liquid Phase Sintering*", LPS, in contrasto con la sinterizzazione allo stato solido. Quest'ultima infatti sarebbe particolarmente difficile da indurre per via delle basse temperature coinvolte in SLS. In LPS, la fase liquida diffonde velocemente per occupare i vuoti tra le particelle solide. Successivamente la diffusione interessa principalmente l'omogeneizzazione della composizione e la riduzione ulteriore della porosità. La densità finale della parte è ottenuta principalmente nel primo stadio della LPS in cui la fase liquida si forma e diffonde, dunque dipenderà principalmente dalla potenza e dalla velocità del laser e quindi dalla velocità di riscaldamento. Le ultime due fasi invece richiedono tempi più lunghi rispetto a quelli di interazione laser-particelle, ed è per questo che la densificazione può risultare incompleta. Si richiedono dunque trattamenti post-processo come la successiva sinterizzazione ad alta temperatura o infiltrazione. Il processo indiretto richiede che, una volta terminata la stampa, la parte venga sottoposta ad una fase detta di "*debinding*" per rimuovere gli agenti leganti polimerici. I polimeri possono essere chimicamente trasformati in composti a punto di fusione elevato oppure degradati termicamente ed eliminati. Questa fase comporta una riduzione del volume di circa il 5%, e genera una porosità risultante nella parte troppo elevata per poter essere utilizzata senza trattamenti

post-processo. Tra questi si ricorre di solito a infiltrazione con polimeri in soluzione acquosa o metalli, per il riempimento dei vuoti, e sinterizzazione finale.

Nel processo SLS diretto, il laser consolida direttamente le polveri senza l'ausilio di leganti polimerici, come nella versione indiretta, ottenendo densità fino all'80 % della densità teorica. Per la caratteristica di agire direttamente sulle polveri portandole a fusione completa o parziale, il processo SLS diretto è destinato a polveri polimeriche o a miscele di polveri polimeriche a contenuto metallico ridotto. Alumide ne è un esempio, ottenuto dalla sinterizzazione di una miscela di polveri a base poliammidica con polveri di alluminio. Un elevato contenuto di particelle metalliche renderebbe il processo SLS insufficiente a causa delle elevate temperature richieste, ed ha motivato la sua evoluzione in SLM. Un vantaggio del processo diretto è che molte delle fasi di pre e post processo non sono richieste. A differenza del processo indiretto, dove il polimero fungeva da legante tra le particelle metalliche, nel processo diretto il legame è raggiunto per sinterizzazione delle particelle stesse. In questa fase il laser riscalda le polveri fino a temperatura di fusione, a partire da una temperatura di pre-riscaldamento, tra il 70 % e l'80 % della temperatura di fusione. All'aumentare della temperatura, i processi di diffusione si attivano e permettono che due particelle adiacenti inizino a legarsi grazie alla formazione di "necks", come mostrato in figura 3.3. Il processo è attivato termicamente e viene mantenuto dalla diffusione. Le superfici nelle zone vuote tra le particelle solide tendono a chiudersi per ridurre l'energia totale di superficie. Di conseguenza, questa forma di sinterizzazione è associata ad una riduzione di volume ed aumento della densità. Allo stesso tempo la resistenza e la duttilità aumentano. Il fenomeno che spinge la sinterizzazione può essere caratterizzato dal rapporto tra l'energia superficiale, E_s , ed il volume, V_p , delle particelle. Supponendo che le particelle possano essere approssimate a sfere di raggio, r , otteniamo:

$$E_s/V_p = \gamma(4\pi r^2)/(4\pi r^3/3) = 3\gamma/r$$

dove γ è la tensione superficiale. Si evince come, al diminuire

della dimensione delle particelle, la sinterizzazione sia meno favorita.

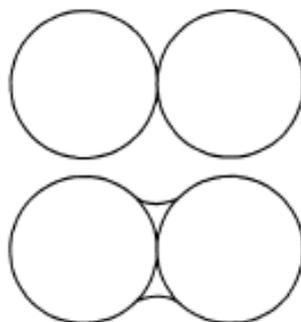


Figura 3.3: *Formazione di un neck tra due particelle*

Contrariamente alla sinterizzazione delle polveri convenzionale, in SLS non viene applicata nessuna pressione di compattazione e, di conseguenza, sebbene le parti a fine stampa risultino con densità più bassa, si riduce l'anisotropia e la presenza di stati tensionali indesiderati. Ad ogni modo, processi come HIP (Hot Isostatic Pressing) possono completare il processo di densificazione ed omogeneizzazione delle parti prodotte con SLS, mediante esposizione ad elevata temperatura e pressione per lunghi intervalli di tempo.

3.1.3 Proprietà delle polveri

Il processo SLS coinvolge un elevato numero di fattori da controllare durante la fabbricazione delle parti. Tra tutti, quelli che sicuramente influenzano maggiormente il feedback della stampa riguardano le polveri. La dimensione, la distribuzione della dimensione e la forma delle particelle sono parametri importanti per tutti i processi PBF. La dimensione delle particelle viene solitamente misurata mediante "sieving" [8], ovvero facendo passare le polveri attraverso una serie di setacci a griglia via via più stretta. Altri metodi per caratterizzare la dimensione delle particelle sono la sedimentazione, l'analisi microscopica, analisi di diffusione della luce, rilevamento ottico e rilevamento elettrico di particelle sospese in un liquido. La distribuzione delle particelle viene solitamente caratterizzata tracciando in un grafico la frequenza con la quale si presentano le particelle

al variare della dimensione mediante valutazione statistica. La forma delle particelle è di solito specificata come rapporto della lunghezza sullo spessore ed ancora, tra superficie e volume. La densità di un letto di polvere dipende non solo dalla densità delle particelle ma anche dal loro grado di impacchettamento. Se la polvere è appena stata depositata, le particelle saranno orientate in modo casuale. Se la polvere è stata pressata, viene imposta una certa direzionalità e la densità aumenta in prossimità delle superfici pressate. Molte polveri, comprese le polveri ceramiche, tendono ad agglomerarsi a causa delle forze di superficie di Van der Waals, occupando un volume maggiore di quello intrinseco. Il grado di impaccamento di uno strato di polvere può essere caratterizzato dalla densità relativa, ρ_R , definita come:

$$\rho_R = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{\rho}{\sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i}$$

dove ρ è la densità del letto di polveri, ρ_s è la densità teorica dell'aggregato di polveri, ottenibile dalla sommatoria dei prodotti tra la frazione volumetrica della i -esima specie di particelle per la relativa densità, considerando n specie presenti. La densità, ρ , delle polveri è misurata attraverso un metodo che consiste essenzialmente nel produrre con SLS dei contenitori con una certa geometria e misurarne successivamente la massa delle polveri non sinterizzate contenute all'interno. In alternativa è possibile definire un parametro ϵ come rapporto tra la differenza del volume dello strato di polveri ed il volume delle particelle solide, sul volume del letto di polveri.

$$\epsilon = 1 - \rho_R = 1 - \left(\frac{\rho}{\sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i} \right)$$

Supponendo che tutte le particelle idealmente abbiano forma sferica, dimensione e densità uguali e collocate in una struttura cubica, la densità del letto di polvere risulterebbe :

$$\rho = \pi \rho_s / 6$$

Risulta che la densità relativa ρ_R è del 52.3 % e la porosità ϵ è del 47.7 %. Il vantaggio principale del processo SLS sta nella

capacità di produrre parti funzionali, i cui materiali hanno le proprietà meccaniche richieste per le applicazioni finali d'uso. Una vasta gamma di materiali polimerici sono disponibili per l'utilizzo nei processi SLS diretti tra cui cere, per modelli destinati a processi di fusione a cera persa, o polimeri come il nylon per parti funzionali. Teoricamente potrebbero essere utilizzati tutti i materiali che se riscaldati presentino un abbassamento delle loro proprietà meccaniche e della viscosità. Ne costituiscono un esempio molti polimeri termoplastici come nylon, nylon vetro-rinforzato e polistirene. I termoplastici a struttura lineare e ramificata soddisfano questo requisiti. Sia i polimeri amorfi che i cristallini possono essere utilizzati in SLS, ma le caratteristiche delle parti ottenute sono diverse a causa del differente assorbimento della radiazione laser incidente. Polimeri amorfi come gli epossidici, il policarbonato, il polimetile metacrilato (PMMA), il polistirene ed il polivinil cloruro (PVC) sono trasparenti ai raggi laser a meno che non vengano aggiunte seconde fasi di riempimento, come i filler. Polimeri cristallini come nylon, polietilene e polipropilene risultano invece opachi.

Capitolo 4

Materiali polimerici

4.1 Monomeri e polimeri

La parola "polimero" fu usata per la prima volta nel 1866. Ha due radici greche: poli (molti) e mers (parti). I polimeri sono costituiti da macromolecole formate attraverso il collegamento ripetuto di unità monomeriche. I primi polimeri erano realizzati da materiali organici come la cellulosa. Successivamente, altri tipi furono prodotti sottoponendo i polimeri naturali a determinate reazioni chimiche. Ad esempio, la cellulosa è stata modificata in acetato di cellulosa per realizzare pellicole fotografiche. Il primo polimero sintetico fu il fenol-formaldeide sviluppato da Baekaland nel 1906 con il nome commerciale di bachelite. Lo sviluppo di polimeri sintetici commerciali iniziò solo negli anni '20 quando diventò possibile estrarre le materie prime necessarie dal carbone e dai prodotti petroliferi. Tutti i polimeri sono di natura organica, cioè contengono carbonio come elemento essenziale e la maggior parte delle molecole di polimero contiene anche atomi di idrogeno. Possono contenere atomi di F, O o N e "gruppi pendenti" come CH_3 . Vengono chiamati composti saturi quei composti organici senza doppi o tripli legami. Un polimero è costituito da unità ripetute chiamate monomeri. Un monomero è una semplice molecola, di un composto a basso peso molecolare, costituito da una semplice unità strutturale non ripetuta, ma in grado di reagire per formare un polimero. Un esempio di monomero è l'etilene C_2H_4 che contiene due atomi di carbonio uniti da un doppio legame e

ciascun atomo di carbonio è collegato a due atomi di idrogeno attraverso singoli legami. Altri esempi di monomeri includono stirene, metilmetacrilato, vinil acetato, butil acrilato, butadiene, acrilonitrile. La maggior parte dei polimeri hanno idrocarburi come l'etilene presente come unità ripetitiva. Qualsiasi classe di composti organici composta solamente da carbonio ed idrogeno appartiene agli idrocarburi. Due tipi di idrocarburi hanno una particolare importanza: alifatici e aromatici. Negli idrocarburi alifatici gli atomi di carbonio sono disposti in catene lineari o ramificate e possono essere saturi come alcani e paraffine o insaturi come alcheni o olefine. I composti aromatici, invece, presentano localizzazione degli elettroni in un sistema ad anello contenente doppi legami coniugati multipli, come mostrato per il benzene in 4.1

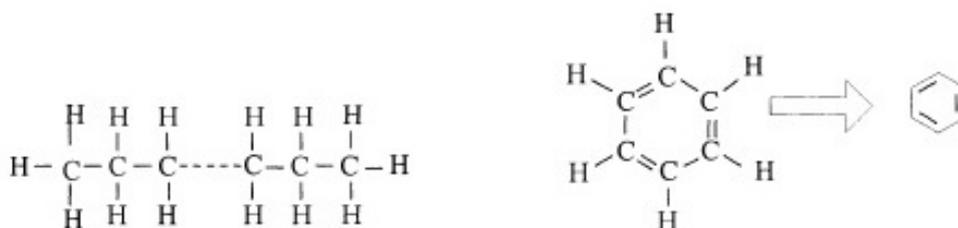
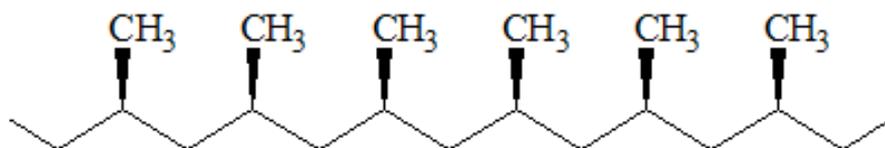


Figura 4.1: *A sinistra un gruppo alifatico, a destra la molecola del benzene*

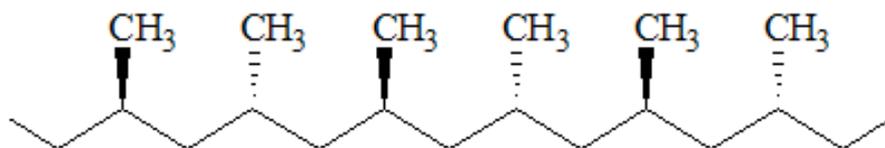
Un doppio legame del carbonio coinvolge quattro elettroni di cui solo due sono necessari per tenere uniti i due atomi di carbonio in quello che viene chiamato legame sigma. Gli altri due sono chiamati elettroni pi e sono liberi di legarsi con l'iniziatore o con molecole monomeriche. I radicali sono una categoria di atomi che possono esistere solo in combinazione con altre molecole per formare un radicale libero, come nel caso di una sostanza chimica avente un elettrone libero che forma un legame covalente con l'elettrone di un'altra molecola. Non è necessario che tutti i legami singoli si verifichino con atomi di H. Possono formarsi con gruppi funzionali come il metile CH_3 nel caso del polipropilene (PP). Alcuni idrocarburi sono aromatici come il polistirene contenente benzene. La polimerizzazione può anche procedere con molecole che non fanno parte

degli idrocarburi come quelle contenenti N, O, S, P o Si mentre H può essere sostituito da Cl monovalente ad esempio nel polivinilcloruro, F come nel politetrafluoroetilene o Br.

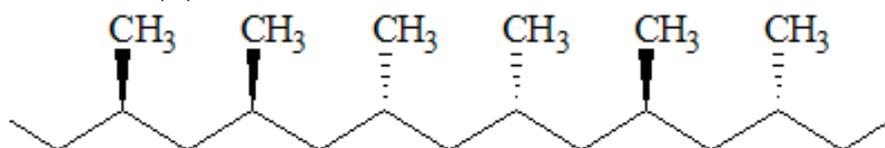
L'ordine dei gruppi funzionali può significativamente influenzare le proprietà del polimero risultante. Quando tutti gli atomi di carbonio hanno la stessa configurazione relativa mostrata in 4.2a, ovvero tutti i sostituenti che sporgono dalla catena principale sono sullo stesso lato, si dice che il polimero è isotattico. I polimeri sono detti sindiotattici se gli atomi di carbonio adiacenti hanno configurazioni opposte alternate, ovvero i sostituenti sporgono dalla catena principale alternativamente in una direzione e nell'altra come in 4.2b. I polimeri atattici hanno le configurazioni degli atomi di carbonio distribuite casualmente lungo la catena, ovvero i sostituenti sporgono in una direzione o nell'altra senza regolarità come in 4.2c.



(a) *Struttura del polipropilene isotattico*



(b) *Struttura del polipropilene sindiotattico*



(c) *Struttura del polipropilene atattico*

Tutti i polimeri discussi finora hanno una catena costituita da una successione di unità della stessa specie, i monomeri. Questi sono analoghi ai metalli puri. Tuttavia, proprio come due o più metalli possono essere combinati per formare una lega, è possibile avere polimeri con due (copolimeri) o tre (terpolimeri) differenti specie di monomeri. Ad esempio, l'etil-propilene è un copolimero mentre l'ABS (acrilonitrile-

butadiene-stirene) è un polimero ternario. Le unità ripetitive in un copolimero o terpolimero possono essere collegate in diversi modi. Ad esempio, un copolimero di monomeri A e B potrebbe esibire configurazione casuale (BBBABABABBA), alternata (ABABAB) o a blocco (AAAAABBBAAABBBBBBAA). A volte catene di polimero costituito da monomero di tipo A sono innestate ad una catena di monomero B producendo un polimero da innesto.

Non tutte le coppie di polimeri possono formare catene. Si dice che tali polimeri sono incompatibili. Tuttavia, potrebbe essere possibile produrre miscele di polimeri miscelando polimeri incompatibili dove uno funge da matrice per gli altri.

4.2 Reazioni di polimerizzazione

Una classificazione dei polimeri può essere fatta in base al meccanismo di reazione seguito durante la sintesi degli stessi. A seconda del meccanismo di reazione, la reazione di polimerizzazione può essere infatti distinta in:

- Polimerizzazione per addizione
- Polimerizzazione per condensazione

Altra classificazione può essere

- Polimerizzazione a catena
- Polimerizzazione a stadi

I polimeri ottenuti per polimerizzazione a stadi sono in genere polimeri di condensazione, mentre i polimeri ottenuti per polimerizzazione a catena sono in genere polimeri di addizione. Esistono comunque delle eccezioni a questa regola, come nel caso del poliuretano, un polimero di addizione che polimerizza a stadi.

Nella polimerizzazione a catena la reazione è innescata dalla formazione di una specie chimica attiva, chiamata iniziatore. L'iniziatore somma ricorsivamente su di sé una molecola di monomero, spostando l'elettrone spaiato all'estremità della catena

a mano a mano che questa cresce. Si possono avere diverse tipologie di polimerizzazione a catena, a seconda della tipologia della specie attiva:

- Polimerizzazione Radicalica
- Polimerizzazione Ionica:
 - Polimerizzazione Cationica
 - Polimerizzazione Anodica

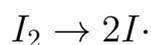
La polimerizzazione radicalica e quella cationica sono di particolare interesse nelle applicazioni di additive manufacturing grazie alla velocità di reazione elevata con la quale si formano le catene polimeriche. Tra tutte quindi, verranno esposte nel dettaglio.

4.2.1 Polimerizzazione radicalica

La polimerizzazione radicalica avviene secondo il seguente schema:

- Attivazione
- Propagazione
- Terminazione

Nel processo di attivazione viene creato un radicale libero partendo da un iniziatore. L'iniziatore è una molecola in grado di decomporsi tramite la rottura omolitica di un legame, con la relativa formazione del radicale, secondo una reazione del tipo:



con I_2 si indica l'iniziatore e con $2I\cdot$ Il radicale $I\cdot$ presenta una notevole reattività, per cui può unirsi ad un monomero M portando alla formazione di un radicale primario $P_1\cdot$:



L'attivazione di una molecola può avvenire per via termica, per via chimica o per radiazione elettromagnetica e di solito la reazione di generazione dei radicali è una reazione lenta. La fase di inizio polimerizzazione è influenzata dalla temperatura ed è sufficientemente lenta da far sì che in genere la velocità dell'intero processo di polimerizzazione sia controllata dalla sola reazione chimica di attivazione: infatti le altre reazioni sono relativamente veloci e non vengono influenzate dalla temperatura. Per il cosiddetto "principio di Flory", si ipotizza che tutte le reazioni di propagazione avvengano con la stessa velocità. Il fattore di efficienza radicalica determina l'efficienza dei radicali in una reazione, e si esprime come il rapporto tra il numero di radicali efficaci ed il numero totale di radicali. Di norma il suo valore varia da 0,3 a 0,8.

Nel processo di propagazione, il radicale primario $P_1\cdot$ reagisce con più monomeri successivamente, formando un radicale composto da un numero di unità ripetitive più elevato, secondo una reazione del tipo:



in cui n è il numero di monomeri che si uniscono alla catena e $P_n\cdot$ rappresenta una catena composta da un numero n di unità ripetitive.

Durante il processo di terminazione, una catena polimerica che si era accresciuta durante il processo di propagazione $P_n\cdot$ incontra un'altra catena polimerica anch'essa in fase di propagazione $P_m\cdot$, e dalla reazione di questi due radicali si ha la formazione di un polimero P con un numero di unità ripetitive pari alla somma $m + n$ delle unità ripetitive che componevano le singole catene. La reazione di terminazione, chiamata anche per accoppiamento, si può quindi schematizzare come segue:



Ogni ciclo di attivazione-propagazione-terminazione è riferito ad una molecola di polimero, per cui in un determinato istante si realizzeranno più cicli di questo tipo all'interno dell'ambiente di reazione.

4.2.2 Polimerizzazione cationica

La polimerizzazione cationica è di origine più recente. Il primo brevetto relativo all'idea fu rilasciato nel 1965 mentre le prime applicazioni commerciali basate sul principio apparvero alla fine degli anni '70. Anche nella polimerizzazione vinilica cationica, gli elettroni interessati in un legame π tengono insieme gli atomi di carbonio tramite doppio legame. Tuttavia, invece di suddividersi come nella polimerizzazione con radicali liberi, questi si muovono insieme per formare il nuovo legame. Il processo si chiama polimerizzazione cationica perché l'iniziatore è un catione ovvero uno ione con carica elettrica positiva indicato come "Init +" nella 4.3. Il catione attira una delle due coppie di elettroni impegnate nel doppio legame con il carbonio per formare un legame singolo con l'iniziatore. Tali coppie di elettroni che migrano sono indicate come "R" in 4.3 e stabilizzano le specie che propaga. Nel processo, a causa della perdita di elettroni, uno degli atomi di carbonio diventa quindi un catione acquisendo carica positiva. Tale catione reagisce con una seconda molecola monomerica nello stesso modo in cui l'iniziatore aveva reagito con la prima. Il processo si ripete ed il peso molecolare del polimero aumenta progressivamente. La fase di terminazione del processo di polimerizzazione cationico avviene principalmente attraverso la formazione di impurità come acqua e altri composti contenenti idrossili. Contrariamente alla polimerizzazione radicalica, la presenza di ossigeno non inibisce la polimerizzazione cationica. La 4.4 illustra la fase di propagazione nella formazione di etere vinilico. Il più semplice iniziatore della polimerizzazione cationica è un protone di acido forte come acido solforico H_2SO_4 , CF_3SO_3H o anche acido triflico, acido perclorico $HClO_4$. Tuttavia, nei processi AM laser, abbiamo bisogno di acidi fotochimici idonei all'uso. In questo contesto, HCl e acidi simili non vanno bene perché il controione (Cl^- per HCl) reagirebbe con il catione iniziale. Il risultato non sarebbe la polimerizzazione bensì una reazione di addizione secondo la regola di Markovnikov. Questo problema può essere risolto da un acido di Lewis poiché può generare cationi in situ. Un acido di Lewis ha molecole con meno di un ottetto

di elettroni nel guscio di valenza. Quindi può agire ricevendo coppie di elettroni. Molti cationi metallici come Fe^{3+} possono agire come acidi di Lewis. Composti con più legami possono anche comportarsi come acidi di Lewis cioè possono accettare coppie di elettroni e formare nuovi legami. Ad esempio, l'atomo di carbonio in una molecola di CO_2 è legato ai due atomi di ossigeno attraverso una coppia di doppi legami.

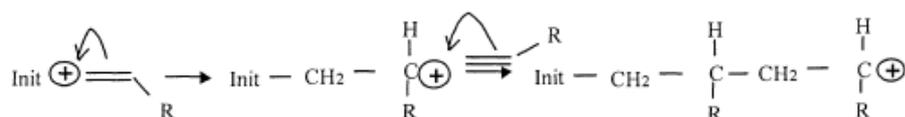


Figura 4.3: Fase di inizio polimerizzazione cationica

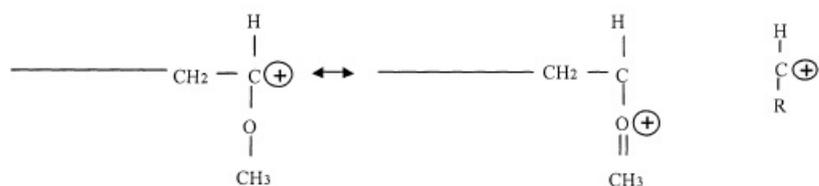


Figura 4.4: Fase di propagazione cationica dell'etere vinilico

La propagazione cationica di solito è piuttosto rapida. Tuttavia, è abbastanza difficile far crescere lunghe catene usando la polimerizzazione cationica a causa dell'incidenza delle reazioni di trasferimento di catena. Infatti le catene di polimeri attive che stanno crescendo si bloccano mentre altre iniziano in modo che i monomeri diano vita ad un elevato numero di catene corte. Di conseguenza, il peso molecolare raggiungibile può essere basso. Proprio come la polimerizzazione radicalica, la polimerizzazione cationica è processo esotermico. È inoltre accompagnato da un restringimento volumetrico. Ad ogni modo, tali reazioni esotermiche continuano anche parecchio tempo dopo che la fonte energetica, il laser per un processo AM, che ha attivato la reazione sia stata disattivata.

4.3 Foto-polimerizzazione delle resine

4.3.1 Foto-polimerizzazione radicalica

Nella stereolitografia vengono utilizzati laser o lampade UV nella gamma di lunghezze d'onda comprese tra 200 e 400 nm. Le macchine SL che utilizzano laser He-Cd lavorano a una lunghezza d'onda di 325nm. Laser a ioni di argon si portano su lunghezze d'onda pari a 351 e 364nm. Quasi tutti gli SLA utilizzano una resina liquida fotopolimerizzabile come materiale della parte. Esistono molti tipi di fotopolimeri liquidi che possono essere solidificati mediante esposizione alle radiazioni elettromagnetiche, includendo raggi γ , raggi X, raggio UV o fascio di elettroni. I fotopolimeri polimerizzabili ai raggi UV sono resine formulate da fotoiniziatori e monomeri liquidi reattivi. Ne esiste una grande varietà. Alcuni contengono additivi e altri prodotti chimici per aumentarne le proprietà meccaniche. All'inizio le resine erano principalmente acriliche, successivamente sono state introdotte resine come uretano acrilato, etere vinilico, ed acrilati epossidici la cui struttura è mostrata in figura 4.5. Tuttavia, la maggior parte delle resine più recenti sono epossidiche.

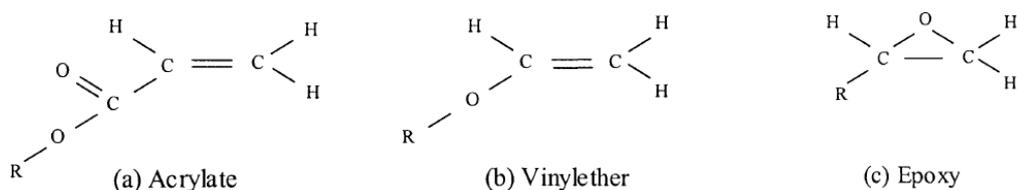


Figura 4.5: Molecole di acrilato, etere vinilico ed epossidico

Il principio si basa sulla possibilità di iniziare la polimerizzazione mediante radiazione laser. Ogni fotone emesso ha energia uguale a h/λ dove h è la costante di Planck e λ è la lunghezza d'onda della radiazione. Un fotoiniziatore genera radicali liberi in seguito all'esposizione ai raggi UV. I gruppi carbonilici aromatici sono tra i più usati foto-iniziatori. Dal momento

che diversi fotoiniziatori mostrano diversi spettri di lunghezza d'onda di assorbimento, il fotoiniziatore selezionato deve essere compatibile con il laser utilizzato dalla macchina. Qualsiasi monomero che può essere polimerizzato mediante polimerizzazione a radicali liberi può anche essere polimerizzato mediante foto-polimerizzazione. Ad eccezione della fase di inizio, le fasi coinvolte nella fotopolimerizzazione sono simili a quelle descritte nella polimerizzazione radicalica dei polimeri generici. In SLA, la fase di inizio viene eseguita da fotoni con lunghezza d'onda nell'intervallo UV. Poiché la maggior parte dei monomeri vinilici non è in grado di assorbire la luce in questo spettro, il processo deve essere aiutato da foto-sensibilizzanti in grado di assorbire la luce nell'intervallo di lunghezze d'onda desiderato e di formare radicali liberi. Un esempio di fotosensibilizzatore è l'azoisopropano. Sebbene questo materiale non si dissocia termicamente, può facilmente dissociarsi quando irradiato con raggi UV. Durante la polimerizzazione radicalica attivata dall'esposizione laser, l'energia potenziale aumenta. I fotoni colpendo le molecole iniziano a rompere i doppi legami del carbonio e le molecole risultanti si troveranno in uno stato eccitato. Una volta completata la polimerizzazione, le molecole tornano alla loro configurazione stabile, ovvero a minor contenuto energetico. La differenza di energia viene rilasciata sotto forma di calore. Ogni due fotoni viene prodotto un radicale che potrebbe polimerizzare fino a 1000 monomeri di acrilato con un rilascio di energia da 50 a 100 volte maggiore di quella fornita. Pertanto, questo processo è altamente efficiente dal punto di vista energetico. Il rilascio di calore si interrompe quasi istantaneamente dopo l'interruzione dell'esposizione alla radiazione laser. La velocità di foto-polimerizzazione dei polimeri a base di acrilato è generalmente piuttosto elevata. Tuttavia, a causa dell'inibizione provocata dall'ossigeno, la polimerizzazione potrebbe risultare incompleta. Inoltre, gli acrilati possono presentare un elevato restringimento volumetrico fino al 5% a causa della conversione di ogni doppio legame in una coppia di legami singoli. Contrariamente alla polimerizzazione convenzionale mediante apporto termico, la modellazione della foto-polimerizzazione è complicata dal fatto che l'esposizione $E(y, z)$ diminuisce espo-

enzialmente all'aumentare della profondità z , secondo la legge di Beer-Lambert. In questo caso la velocità di fotoiniziazione, R_i , può essere espresso come una funzione della potenza incidente per unità di volume, dP / dV :

$$R_i = 2n_c \frac{dP}{dV}$$

con n_i , numero di catene iniziate per quanto di energia, moltiplicato per due ipotizzando due radicali prodotti per ogni catena dissociata. Considerando il bilancio energetico lungo uno spessore dz di resina a livello z otterremo:

$$dP/dV = \frac{E(y, 0)}{D_p} \exp\left(\frac{-z}{D_p}\right)$$

Ovvero:

$$R_i = \frac{2n_c E(y, 0)}{D_p} \exp\left(\frac{-z}{D_p}\right)$$

Indipendentemente dal fatto che la fase di terminazione avvenga per combinazione, sproporzione o occlusione, la velocità di terminazione, R_t , può essere espressa come

$$R_t = 2k_t[M\cdot]^2$$

Di solito, R_t è almeno 10.000 volte più grande di R_i . Di conseguenza, poco dopo che la reazione abbia avuto inizio, i radicali si formano e si distruggono alla stessa velocità. Quindi, possiamo eguagliare i membri delle due equazioni per determinare la concentrazione di radicali, $M\cdot$, come:

$$[M\cdot] = \sqrt{\frac{n_c E(y, 0)}{k_t D_p} \exp\left(\frac{-z}{D_p}\right)}$$

La velocità di polimerizzazione, R_p , deve essere uguale alla velocità di consumo dei monomeri, quindi

$$R_p = -\frac{d[M]}{dt} = k_p[M] \sqrt{\frac{n_c E(y, 0)}{k_t D_p} \exp\left(\frac{-z}{D_p}\right)}$$

Il numero medio di unità monomeriche polimerizzate per catena iniziata è chiamato "lunghezza media cinetica della catena", v_0 . Questo parametro è definito come rapporto tra la velocità di propagazione e quella di iniziazione che, in condizioni stazionarie, è uguale alla velocità di terminazione radicalica:

$$v_0 = \frac{R_p}{R_i} = \frac{k_p[M]}{2k_t[M\cdot]} = \frac{k_p[M]}{2\sqrt{\frac{K_t n_c E(y,0)}{k_t D_p} \exp\left(\frac{-z}{D_p}\right)}}$$

Il grado di polimerizzazione, DP_0 , è un numero adimensionale uguale al peso molecolare medio del polimero diviso per il peso molecolare del monomero. È possibile esprimere DP_0 come:

$$DP_0 = v_0(1 + y'')$$

dove y'' è il rapporto tra la velocità di terminazione per accoppiamento e quella di tutti gli altri meccanismi di terminazione. Pertanto, se la terminazione per accoppiamento domina, $DP_0 = 2v_0$. Dalle equazioni di v_0 e DP_0 risulta la necessità di trovare un compromesso tra alte velocità di polimerizzazione, ovvero velocità di fabbricazione della parte, e peso molecolare della parte indurita. Mentre il primo aumenta con l'aumentare dell'esposizione, il secondo diminuisce.

4.3.2 Fotopolimerizzazione cationica

I foto-iniziatori cationici sono utilizzati per indurre la polimerizzazione delle resine di etere vinilico ed epossidiche. Sono presenti tre classi di iniziatori per SL: sali di organoioduri, sali di triarilsolfonio, e complessi ciclopentadiene-Fe-Arene. L'etere vinilico venne introdotto molto prima delle resine epossidiche e furono sviluppati esclusivamente per macchine SL-190 e SL-250 che utilizzavano laser He-Cd operando ad una lunghezza d'onda di 325 nm. Un potenziale svantaggio di queste resine è l'alto valore di esposizione critica, E_c , intesa come energia da superare per dare inizio alla polimerizzazione. I vinileteri hanno strutture a doppio legame di carbonio che possono decomposte a causa della forte tendenza dell'atomo di ossigeno adiacente a

donare un elettrone. Generalmente hanno una bassa viscosità. Presentano anche poca attitudine all'incurvamento per ritiro volumetrico. Gli epossidici sono ampiamente utilizzati nell'industria come adesivi bicomponente. La prima resina epossidica per SL è stata Cibatool SL5170 introdotta da 3D Systems Inc. nel 1993. Questo materiale è stato progettato per l'uso con i laser He-Cd. Successivamente è stata introdotta la SL-5180 per l'utilizzo con i sistemi laser Ar-Io delle macchine SLA-500. La maggior parte delle resine epossidiche convenzionali utilizza la vulcanizzazione anziché la polimerizzazione cationica. Tuttavia, è possibile polimerizzare gli epossidici attraverso reazioni che aprano gli anelli O-C-C. Questo può accadere in presenza di fotoiniziatori cationici in grado di generare in modo efficiente acidi di Lewis, acidi di Brønstedt o protoni. Le reazioni di apertura della catena ad anello comportano una riduzione minima di volume dal momento che il tipo ed il numero di legami rimane invariato durante la reazione. Quindi il ritiro volumetrico può essere contenuto tra il 2% ed il 3%. Manifestano bassa tendenza a deformarsi, migliore planarità ed alta resistenza con carichi esterni prolungati nel tempo. Fu lo sviluppo di resine epossidiche a rendere possibile l'introduzione della stereolitografia nella realizzazione di stampi in processi quali la fusione a cera persa.

4.4 Polimeri Termoplastici e Termoindurenti

Quando si verificano legami covalenti primari all'interno delle molecole polimeriche, l'energia di legame è compresa tra 350 e 830kJ/mol , la molecola quindi non può rompersi facilmente. Tuttavia, la resistenza di una molecola non è determinata principalmente dai suoi legami primari bensì dalla presenza di legami secondari tra coppie di molecole. Poiché questi ultimi legami sono molto più deboli, possono rompersi e riformarsi durante la deformazione. È possibile controllare la lunghezza media delle macromolecole mediante l'interruzione della reazione a catena nel momento opportuno. Quindi, diversi polimeri

formati dagli stessi monomeri possono avere peso molecolare diverso o diverso grado di polimerizzazione inteso come il numero di monomeri mediamente presenti in una molecola. Il numero di legami secondari e quindi la resistenza di un polimero aumenta all'aumentare della lunghezza della catena. Allo stesso tempo, se vi è un alto apporto energetico, i legami secondari si rompono e si riformano facilmente, cioè può esserci movimento relativo tra le molecole. Tuttavia, quando cessiamo di trasferire energia al sistema, il polimero praticamente ritorna alla sua durezza e resistenza originali. I polimeri che esibiscono tale comportamento reversibile sono chiamati termoplastici. I termoplastici sono ampiamente utilizzati nelle applicazioni industriali e sono formati usando processi come lo stampaggio a iniezione. Tuttavia, materie plastiche a catena molto lunga possono carbonizzare prima di raggiungere lo stato modellabile. In alcuni polimeri, possono esistere anche legami covalenti primari tra le molecole e il processo che porta alla loro formazione è chiamato reticolazione. La reticolazione venne scoperta per caso da Charles Goodyear nel 1839, quando riuscì a vulcanizzare la gomma con l'aiuto di zolfo. Il grado di reticolazione può variare in un ampio intervallo passando da una struttura ramificata come nel polietilene a bassa densità (LDPE) a una struttura di catene fittamente interconnesse come nel caso di una gomma vulcanizzata. L'instaurarsi di questi legami interferisce con il movimento relativo tra molecole e quindi, maggiore è il grado di reticolazione, maggiore è la resistenza alla deformazione e alla frattura. La reticolazione conferisce anche durezza, resistenza, fragilità, rigidità e stabilità dimensionale al materiale. La struttura reticolata costituisce a tutti gli effetti una molecola gigante la cui forma è definita in modo permanente. Tali polimeri sono chiamati polimeri termoindurenti. Contrariamente ai termoplastici, la reazione di indurimento, attribuita al processo di reticolazione, nei termoindurenti è irreversibile. I termoplastici possono essere polimerizzati sottoponendoli a radiazione ad alta energia come radiazioni UV, fasci di elettroni, raggi γ , raggi X. Tuttavia, il materiale può deteriorarsi quando la radiazione è troppo intensa. Nell'ambito della prototipazione rapida, i processi Selective Laser Sintering SLS e Fused

Deposition Modeling FDM utilizzano materiali termoplastici a struttura lineare o ramificata. Al contrario, la Stereolitografia SL si basa sull'utilizzo di resine liquide a basso peso molecolare in grado di presentare un comportamento termoindurente se esposte alla radiazione ultravioletta. In 4.6 sono mostrate le tre strutture tipiche che possono assumere i polimeri.

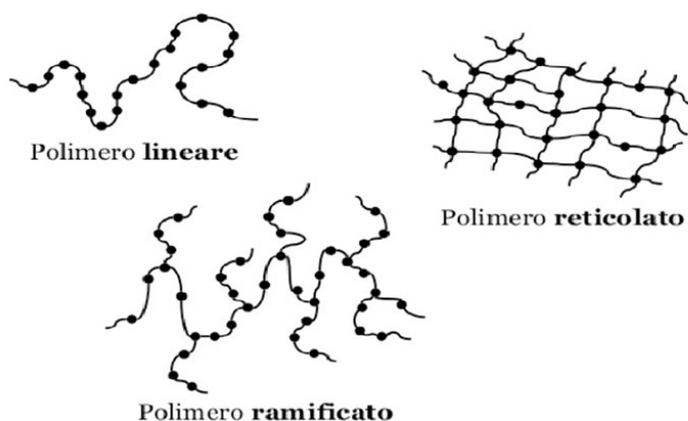


Figura 4.6: *Strutture dei polimeri*

4.5 Cristallinità dei polimeri

Che una macromolecola sia lineare non significa necessariamente che i suoi atomi siano disposti in maniera diritta nella catena. Ad esempio, come di solito si riscontra nei legami covalenti, il legame C-C nel polietilene ha una spaziatura di 0,154 nm con un angolo di legame fisso di 109.5° . Pertanto, la spaziatura in linea retta è di circa 0,126 nm. Quindi, una macromolecola di polietilene ad alto peso molecolare costituita da 150.000 monomeri sarà lunga 18.900 nm se la immaginassimo allungata. In realtà la macromolecola ha una configurazione a solenoide nella pratica in modo tale che tra testa e coda la distanza sia molto più piccola. Tali macromolecole a spirale non hanno la capacità di esibire una configurazione in cui la disposizione degli atomi abbia una sequenza ordinata e definita, per meglio dire sono amorfe. I polimeri amorfi non hanno una ben definita temperatura di fusione, T_m . Tutti i polimeri presentano una

struttura amorfa quando sono riscaldati fino ad una certa temperatura ma non così alta da rompere i legami primari. Il loro stato non sarà rigido e fisso poiché, a causa dell'elevata temperatura, le molecole polimeriche sono in costante movimento ed occupano un volume maggiore. Ciò che accade invece quando un polimero, precedentemente riscaldato e portato allo stato amorfo, viene raffreddato dipende dal tipo di polimero. Si può riscontrare una sequenza periodica nella disposizione se le molecole polimeriche mostrano regolarità chimica lungo la catena e le condizioni di processo sono favorevoli. Tuttavia, a differenza dei metalli, la cristallizzazione nei polimeri si verifica solo in alcune regioni. Il volume specifico nelle regioni ordinate diminuirà, cioè il polimero diventa più denso come si può notare in figura 4.7. All'aumentare della cristallinità, il polimero diventerà più duro e rigido, meno duttile e più resistente chimicamente. Molti polimeri cristallini presentano bordi definiti tra le regioni cristalline e quelle amorfe rendendo il polimero più opaco. I polimeri parzialmente cristallini mostrano una temperatura di fusione definita, T_m . Un grado maggiore di cristallinità si ottiene solitamente se il polimero non ha ramificazioni. Le strutture isotattiche cristallizzano più facilmente delle atattiche. Tempi di raffreddamento maggiori favoriscono la cristallizzazione.

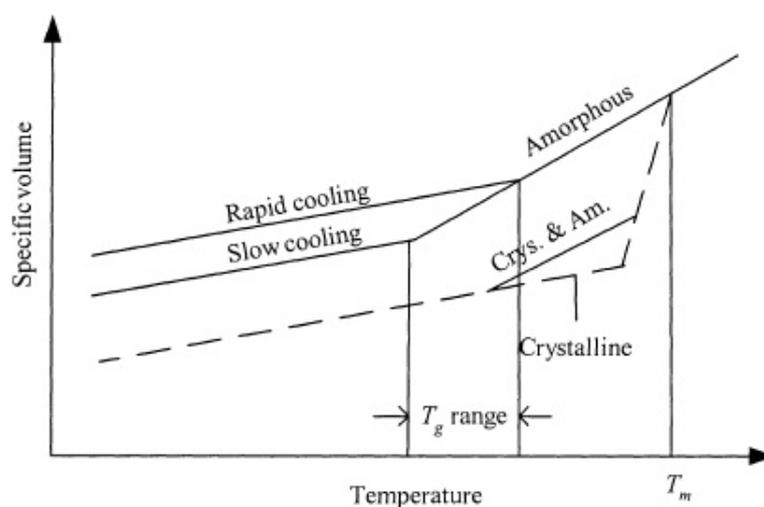


Figura 4.7: *Effetto della temperatura sulla struttura dei polimeri*

Se le condizioni sono sfavorevoli per lo sviluppo di una struttura ordinata, lo stato amorfo si protrarrà fino a alla temperatura ambiente. Il volume specifico diminuirà ma non distaccandosi di troppo dallo stato fuso. Il movimento relativo tra le molecole diminuisce al diminuire della temperatura. Vi è una certa temperatura alla quale il movimento relativo si arresta e prende il nome di temperatura di transizione vetrosa, T_g , del polimero. Sotto T_g , di solito c'è un forte calo nella sensibilità del volume specifico alla temperatura. T_g può essere determinato sperimentalmente andando a cercare la temperatura alla quale si verifica questo fenomeno. La contrazione volumetrica influisce negativamente sull'accuratezza delle parti prodotte nei processi AM come Stereolitografia SL, Selective Laser Sintering SLS e Fused Deposition Modeling FDM.

4.6 Proprietà dei polimeri

I polimeri sono materiali viscoelastici, quindi le loro proprietà dipendono dal tempo e dalla temperatura. Quindi la frequenza dei test influenza i risultati. L'allineamento a catena in un polimero può essere influenzato dal flusso di taglio. Polimeri orientati hanno valori di rigidità più elevati rispetto ai polimeri non orientati. La rottura potrebbe essere raggiunta per frattura sia duttile che fragile. La natura della rottura è da ricercare nella rotture di legami primari e secondari nel polimero. Il peso molecolare di un polimero è semplicemente il peso molecolare di un monomero moltiplicato per il numero di unità che si ripetono nella catena. Tuttavia, i polimeri sono normalmente costituiti da macromolecole che presentano la stessa struttura ma diverse lunghezze di catena, cioè sono polidisperse. Quindi è necessario determinare un peso molecolare medio. Tra i diversi tipi di media calcolabili, due sono più comunemente utilizzate. La massa molecolare media numerale, M_n è ottenuta ponderando ciascuna massa molare in base al numero di molecole presenti in quella massa molare:

$$M_n = \frac{\sum_i (M_i N_i)}{\sum_i (N_i)}$$

Allo stesso modo, la massa ponderale è

$$M_w = \frac{\sum_i (M_i^2 N_i)}{\sum_i (M_i N_i)}$$

In quest'ultima la massa molecolare della i -esima specie ha un peso maggiore sul valore della media. Il rapporto tra M_w ed M_n è detto "indice di polidispersione" ed è una misura della dispersione delle masse molecolari. M_w è inversamente proporzionale al rapporto tra la concentrazione dell'agente di trasferimento di catena e quella del monomero. Pertanto, l'entità di M_n può essere controllata tra 5000, valore sotto il quale sono chiamati oligomeri, ed infinito attraverso una sintesi chimica appropriata. Ad esempio, in processi a resina termoindurente come la stereolitografia il materiale di partenza ha basso M_w che va crescendo via via con l'avanzare delle reazioni chimiche derivanti dall'esposizione alla luce UV. Prodotti con proprietà meccaniche e reologiche molto differenti tra loro possono essere ottenuti controllando M_n 4.8. Per esempio, mentre il cis-polibutadiene con $M_w = 5000$ è un liquido viscoso facilmente colabile a temperatura ambiente, lo stesso materiale si presenta gommoso quando il M_n aumenta a 2 milioni. Diverse proprietà come la temperatura di transizione vetrosa, il modulo di young e la resistenza a trazione dei polimeri seguono un preciso andamento in funzione del peso molecolare. Man mano che le molecole raggiungono dimensioni intermedie, come nel caso degli oligomeri, le proprietà aumentano bruscamente 4.9. Le proprietà si stabilizzano se le catene diventano abbastanza lunghe da formare solo polimeri. Al contrario, alcune proprietà, come la viscosità allo stato fuso e la viscosità della soluzione, aumentano sempre con M_w . Quindi, l'obiettivo della sintesi polimerica non è quello di rendere le molecole più grandi possibili, piuttosto di renderle sufficientemente grandi da raggiungere il massimo delle proprietà desiderate. Tuttavia, proprietà come colore, costante dielettrica e l'indice di rifrazione non vengono modificati da M_w perché sono dettate solamente dai monomeri costituenti. Le proprietà reologiche di resine liquide sono di particolare importanza in molti processi produttivi che utilizzano polimeri. Per esempio, nella stereolitografia, la riuscita della fase di deposizione del nuovo strato di resina liquida per il

nuovo strato è fortemente influenzata dalla viscosità della resina liquida. I polimeri liquidi hanno viscosità molto più elevate rispetto a quella dell'acqua. Inoltre, a differenza dell'acqua, i polimeri mostrano un comportamento non newtoniano esibendo viscosità decrescente all'aumentare della velocità di taglio. Tuttavia, a velocità di taglio molto basse, la viscosità rimane essenzialmente costante. È stato riscontrato che questo apparente plateau di viscosità, η_0 , è proporzionale a $M_w^3/4$. Questo è il motivo per cui il materiale sembra essere meno viscoso e molto più duro man mano che procede la polimerizzazione. La viscosità del polimero è sensibile anche alla temperatura ed in alcuni casi possono addirittura diventare due volte più grandi a seguito di una riduzione della temperatura di soli $15^\circ C - 15^\circ C$.

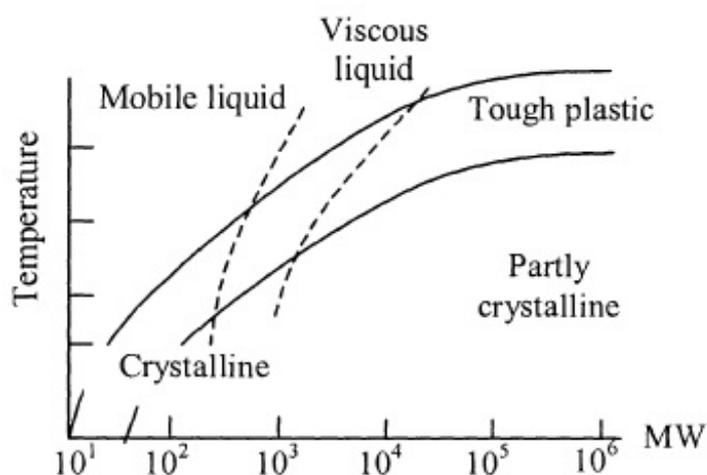


Figura 4.8: *Effetto del peso molecolare M_w e della temperatura sul comportamento dei polimeri*

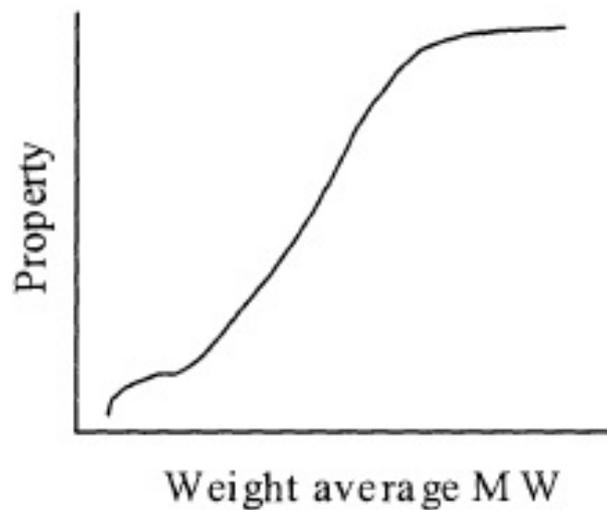


Figura 4.9: *Effetto del peso molecolare M_w sulle proprietà meccaniche*

4.7 Degradazione dei polimeri

I polimeri possono degradarsi a causa di ossidazione, scissione random della catena e depolimerizzazione a causa dell'esposizione al calore e alle radiazioni UV. La maggior parte delle reazioni di degradazione comportano una perdita di peso molecolare e delle proprietà associate. Nella maggior parte dei casi, la degradazione dei polimeri è indesiderabile mentre in altri, come SLS, gli agenti polimerici con funzione di leganti sono intenzionalmente degradati per evitare che rimangano nel prodotto finale. In entrambi i casi, è importante conoscere le caratteristiche di degradazione dei polimeri. Sebbene lenta, l'ossidazione dei polimeri può verificarsi anche a temperature sotto i 100°C . Nella maggior parte dei casi, l'ossigeno reagisce con l'idrogeno nel polimero formando idroperossidi $-OOH$ che si decompongono producendo radicali liberi. Il risultato è una riduzione del peso molecolare. La velocità di ossidazione è proporzionale alla concentrazione di idrogeno facilmente estraibile nel polimero e la propagazione della reazione è più rapida della fase di inizio. La fase di terminazione avviene attraverso

reazioni bimolecolari che portano a prodotti non in forma di radicali. Generalmente i polimeri con dorsali alifatiche tendono ad ossidarsi più facilmente di quelli a catena aromatica. La depolimerizzazione termica, a volte chiamata "decompressione", con formazione di un monomero può verificarsi in alcuni polimeri come il metacrilato di metile e α -metilstirene.

Capitolo 5

Progettazione generale per AM dei polimeri

5.1 Anisotropia

L'anisotropia è una delle caratteristiche comuni di tutte le parti prodotte con tecnologie di fabbricazione a strati. Descrive le proprietà di una parte in cui le proprietà meccaniche non sono le stesse in tutte le direzioni. In tutti i processi di produzione additiva, c'è sempre una certa quantità di anisotropia in direzione verticale, muovendosi attraverso gli strati. Questo perché la resistenza meccanica all'interfaccia tra ogni strato può essere leggermente più debole della resistenza meccanica dello strato stesso. In alcune tecnologie AM, questa anisotropia può essere trascurabile o eliminata attraverso processi post stampa, ma in altri è un problema che deve essere preso in considerazione quando si progetta una parte e quando si decide l'orientamento della stampa. Poiché tutte le tecnologie soffrono di un certo livello di anisotropia, un'attenzione particolare deve essere rivolta a tutti gli aspetti del progetto che potrebbero risentire della debolezza derivante dall'orientamento di stampa: una clip, come quella mostrata 5.1, ad esempio, dovrebbe, se possibile, non essere mai stampata con orientamento verticale in quanto è probabile che si rompa in uso. Alcune tecnologie, come quelle a letto di polvere tipo SLS, presentano un certo grado di anisotropia ma, superato un certo spessore dello strato, viene minimizzata. Questo è dovuto al fatto che aumentando il

volume di un singolo strato diminuisce la velocità di solidificazione trattenendo più a lungo il calore, il che permette un legame migliore con lo strato sottostante. Con SLS, fori filettati, di diametro inferiore a circa 6 mm, mostrano ancora qualche anisotropia, mentre diventa trascurabile per fori con diametro maggiore di 6 mm [9]. Man mano che le geometrie diventano più complesse, tuttavia, l'orientamento della stampa diventa spesso un compromesso tra anisotropia, finitura superficiale e proprietà meccaniche delle feature presenti.

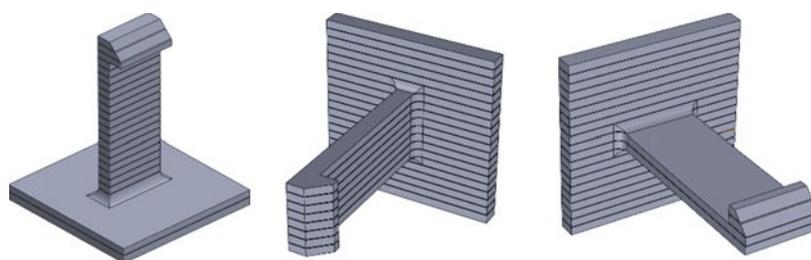


Figura 5.1: *Esempio di parte realizzata con differenti orientazioni di stampa*

5.2 Spessore delle pareti

Un altro parametro da controllare durante la progettazione per AM delle parti è lo spessore minimo delle pareti. In generale, lo spessore delle pareti in parti polimeriche dovrebbe essere circa quello usato per le operazioni di stampaggio ad iniezione. Per parti leggere, il valore si attesta in un range che va da circa 0,6 mm a 2,5 mm, mentre per prodotti industriali pesanti, questo intervallo va da 3 mm a 5 mm. Sebbene sia possibile creare pareti più sottili, l'accuratezza della stampa dipenderà dalla superficie della parete e dal rapporto larghezza/altezza. Pareti sottili e di grande estensione sono difficili da stampare senza incorrere in distorsioni e, a seconda della tecnologia AM utilizzata, delaminazione. Una tecnica semplice per evitare questo problema, se lo spessore della parete non può essere modificato, può essere l'uso di nervature per rinforzare la parete. Come con lo stampaggio ad iniezione convenzionale, una regola pratica generale è anche di usare uno spessore delle pareti costante

in tutta la parte, poiché spessori delle pareti irregolari possono creare distorsioni delle parti. La libertà progettuale concessa da AM, soprattutto rispetto allo stampaggio, rende molto più facile raggiungere spessori di parete uniformi lungo la parte. Ciò non significa che non ci possano essere spessori delle pareti irregolari, bensì la scelta deve essere motivata da vincoli ingegneristici o funzionali. In alcuni casi, l'orientamento con cui viene stampata la parte può essere utilizzato per impedire che pareti sottili ed estese vadano incontro a deformazioni durante il processo. Se la parte è stampata con orientazione orizzontale, come in figura 5.2, un sottile strato di polimero verrà polimerizzato e potrebbe tentare di incurvarsi. Al contrario la stampa della parte con una leggera angolazione, in genere superiore a 10° , diminuisce l'area orizzontale della sezione da realizzare in un singolo step riducendo notevolmente il rischio di distorsione. Ma, come con tutte le linee guida per AM, anche questo deve essere frutto di un compromesso, dato che stampare la parte con orientazione angolata può comportare una scarsa finitura superficiale [9].

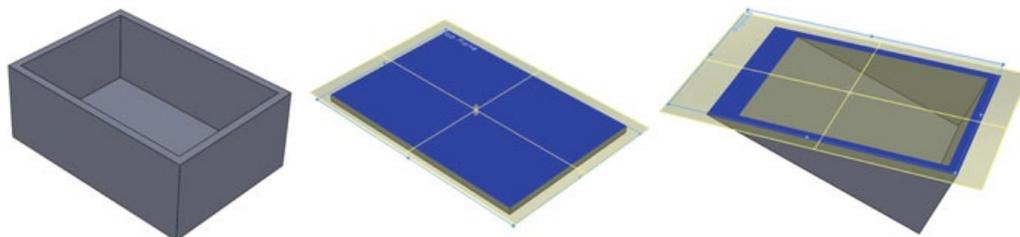


Figura 5.2: *Configurazione di stampa angolata e parallela, per ovviare deviazioni geometriche*

5.3 Feature sporgenti e supporti

Con tutte le tecnologie AM che trattano polimeri, ad eccezione di quelle basate sull'utilizzo di un letto di polveri ed alcune tecnologie come quelle Binder Jetting, le parti stampate richiedono materiale di supporto per reggere eventuali feature sporgenti. Il materiale di supporto viene utilizzato durante il processo di stampa per consentire che tutte le parti sporgenti vengano

realizzate correttamente, senza che il materiale collassi, e successivamente al termine della stampa deve essere rimosso, come mostrato in figura 5.4. Un esempio è mostrato in figura 5.3:



Figura 5.3: *Esempio di impiego del materiale di supporto*



Figura 5.4: *Rimozione manuale dei supporti*

La maggior parte dei sistemi AM consente di scegliere fino a che angolo è necessario utilizzare il materiale di supporto. L'angolo che le feature dovrebbero avere rispetto alla piattaforma di stampa è ottenuto attraverso prove sperimentali ed ha un ruolo importante sia per ottenere la migliore qualità della parte che per minimizzare la quantità di supporti utilizzati. Di

solito i software di elaborazione pre-stampa sono in grado di determinare l'angolo limite per cui la parte richiede materiale di supporto, come illustrato in 5.5:

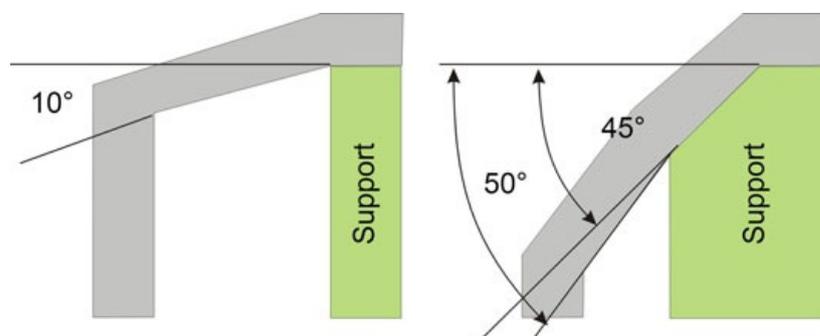


Figura 5.5: Angolo delle superfici da supportare e non

Scegliere l'orientamento con cui la parte viene stampata, per ottimizzare l'uso del materiale di supporto, deve tenere in conto anche l'anisotropia che ne può risultare, poiché potrebbe indebolire la parte in aree indesiderate. La parte in figura 5.6, se stampata rivolta verso l'alto, richiede una quantità di supporti limitata mentre se stampata capovolta, internamente sarà riempita di materiale di supporto richiedendo una laboriosa fase di rimozione dopo la stampa, ed allo stesso tempo comportando uno spreco di materiale.

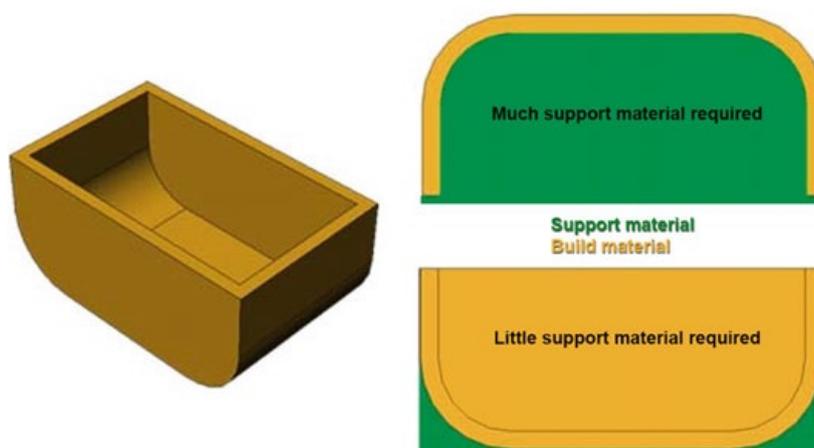


Figura 5.6: Materiale di supporto a differenti orientazioni di stampa

Inoltre è sempre più facile rimuovere materiale dall'esterno della parte che dall'interno. Le superfici rivolte verso il basso, con cui il materiale di supporto viene a contatto, avranno

anche una finitura superficiale peggiore rispetto a quella delle superfici rivolte verso l'alto, richiedendo una fase successiva di finitura per ridurre le irregolarità. Alcuni software AM consentono anche di impostare la superficie al di sotto della quale non è richiesto alcun supporto. Il vantaggio sta nel risparmio di materiale e una lieve riduzione dei tempi di stampa. Inoltre, questo approccio può anche comportare minor impiego di supporti da rimuovere sui fori. Il rischio è che, se la superficie è troppo grande, possa verificarsi il cedimento del materiale sovrastante la superficie superiore della cavità mostrata in figura 5.7:

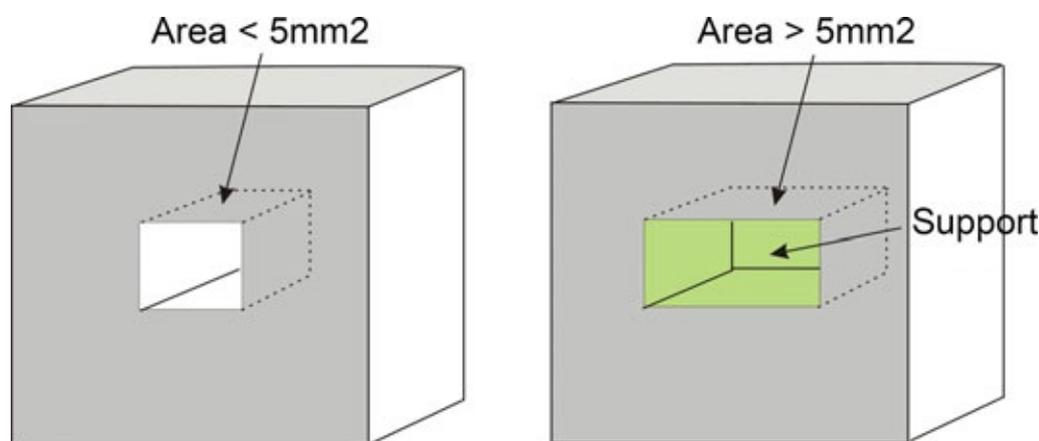


Figura 5.7: Area massima delle superfici che non richiedono supporti

5.4 Fori

L'orientazione delle parti in macchina può inoltre influenzare fortemente la cilindricità dei fori realizzati. In particolare, come regola base per ottenere fori regolari, questi dovrebbero essere sempre realizzati con l'asse parallelo all'asse Z di stampa della macchina. Fori stampati con asse orizzontale soffrono l'effetto a gradini tipico della risoluzione lungo l'asse Z e potrebbe verificarsi il cedimento locale del materiale sovrastante il foro, risultando in una sezione più ellittica che circolare. I fori risultano spesso leggermente sottodimensionati, ma questo può essere facilmente compensato nella fase di modellazione CAD sovradimensionando il foro di circa 0,1 mm o comunque di un

valore tale da compensare direttamente il difetto macchina. Il sovrmateriale può essere apportato tenendo anche conto di una eventuale operazione di rettifica del foro post-stampa, per portarlo alle dimensioni esatte e conferirgli maggiore accuratezza geometrica. Il diametro del foro più piccolo realizzabile dipende fortemente dallo spessore di materiale che sta attraversando. All'aumentare dello spessore, come visibile in figura 5.8, la polvere non fusa circoscritta dai fori più piccoli, viene parzialmente fusa, quindi diventa impossibile da rimuovere. Ma diverse macchine producono anche parti di qualità diverse, poiché lavorano a temperature, spessori dello strato e parametri del laser differenti. Quindi la dimensione minima del foro è relazionata allo spessore della parte, allo spessore dello strato, all'orientamento della stampa ed infine alla macchina su cui è realizzato.



Figura 5.8: *Grandezza delle feature cave all'aumentare dello spessore*

In generale, tuttavia, per pareti spesse 2 mm, è possibile realizzare fori a partire da 0,5 mm di diametro. Lo stesso vale per le tolleranze di accoppiamento tra le parti in movimento. Più grande è la superficie delle zone a stretto contatto, maggiore sarà il calore trattenuto durante la sovrapposizione degli strati, che indurrà la fusione delle polveri nella zona di tolleranza. Si necessiterà dunque di una zona di tolleranza maggiore.

5.5 Elementi di rinforzo

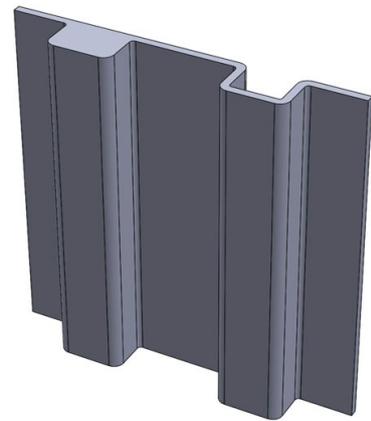
La maggior parte delle parti polimeriche prodotte con AM sono leggermente meno rigide rispetto alle controparti stampate ad

iniezione. Ciò significa che ampie superfici di piccolo spessore possono essere abbastanza flessibili e a volte sviluppare qualche distorsione durante il processo di stampa o nella fase di raffreddamento. Il modo più semplice per rendere le pareti più rigide e minimizzare il rischio di distorsione è quello di progettare le parti con nervature, per rinforzare ampie aree sottili come in 5.9a. Le linee guida generali per l'aggiunta di nervature ad una parte polimerica in AM sono:

- Spessore delle nervature: 75% dello spessore della parete da irrigidire
- Altezza delle nervature: minore a tre volte lo spessore
- Spaziatura tra le nervature: maggiore a due volte lo spessore
- Raccordare i punti di intersezione delle nervature con la parete



(a) *Nervature di rinforzo*



(b) *Nervature di rinforzo a guscio*

Per ottenere una certa rigidità, è meglio aumentare il numero di nervature anziché la loro altezza. Per nervature molto spesse, è preferibile realizzare un sezione cava in modo da evitare un elevato impiego del materiale che possa causare distorsione e aumentare i costi della stampa. Altre opzioni possono essere la realizzazione di nervature vuote a guscio, come mostrato in figura 5.9b.

Capitolo 6

Introduzione alle strutture flexure

Sin dai primordi la progettazione meccanica coinvolta nella realizzazione di meccanismi e quindi macchine che assolvano ad una determinata funzione, si è basata sull'unione di membri rigidi tramite coppie cinematiche. Ma da un'analisi attenta della natura vediamo un'idea completamente diversa alla base del funzionamento delle strutture: la maggior parte delle cose mobili sono flessibili anziché rigide, ed il movimento deriva dalla flessione delle parti. Innumerevoli esempi possono essere fatti riguardanti la vita di ogni giorno, come il cuore, uno straordinario meccanismo che comincia a funzionare prima della nascita e non smette di lavorare fino alla morte. Ma anche le ali delle api, anguille, alghe, spine e i fiori. È interessante notare che alcune delle prime macchine erano costituite da meccanismi flessibili, come l'arco ad esempio in grado di immagazzinare energia nella fase di deformazione elastica proiettando la freccia. Ma anche, nei primi anni del 900, il progetto dello svergolamento alare dei fratelli Wright per il controllo di volo dei primi aerei da loro sviluppati. Tale sistema [10], mostrato in figura 6.1a e 6.1b, prevedeva che il pilota tramite una coppia di leve e dei tiranti provocasse la torsione delle estremità alari. Questo comportava una modifica dell'angolo di attacco del profilo alare e dunque della portanza, creando uno squilibrio tra le estremità opposte dell'ala in grado di generare il movimento di rollio, ovvero di rotazione attorno all'asse del velivolo.

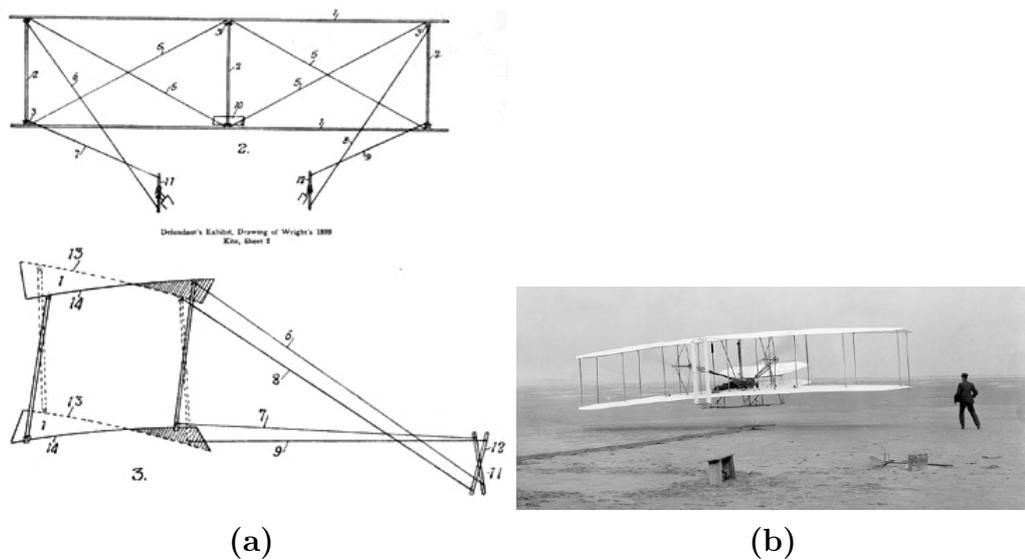


Figura 6.1: *Sistema per lo svergolamento alare progettato dai fratelli Wright: (a) Un disegno di Wilbur Wright del 1912 che illustra il sistema per lo svergolamento alare da lui costruito e sperimentato nel 1899. (b) Primo modello di aeroplano motorizzato e comandato con svergolamento alare realizzato dai fratelli Wright*

Dal 1912 il sistema dello svergolamento alare per il controllo direzionale, che ai tempi del Fratelli Wright era l'unico disponibile, perse la sua diffusione venendo progressivamente rimpiazzato dai più efficienti e più semplici alettoni. Tuttavia, recentemente si è intensificata la ricerca riguardo alla possibilità di implementare strutture flessibili nella costruzione delle ali e giungere ad un prototipo di "ala adattiva" capace di cambiare la propria geometria ed adattarla alle condizioni di funzionamento in volo del velivolo. Progettato dalla società americana Flexsys Inc in collaborazione con la U.S. Air Force Research Laboratory, FlexFoil rappresenta il più innovativo sistema di ala a geometria variabile adattiva alle condizioni di volo [11]. Questo sistema, mostrato in figura 6.2, è in grado di modificare la curvatura del profilo alare di $\pm 10^\circ$ agendo sul bordo di uscita, così come accade normalmente con i sistemi flap. Il sostanziale miglioramento introdotto da tale tecnologia risiede nella significativa riduzione del numero di componenti coinvolti nel sistema di controllo degli alettoni, che si traduce in una di-

minuzione della probabilità di incorrere in avarie e soprattutto in una significativa riduzione del peso complessivo del velivolo. Inoltre la mancanza di cerniere implica assenza di lubrificazione e riduzione degli attriti con conseguente aumento della durata e dell'affidabilità. Tale tecnologia ha un grosso impatto anche sulla riduzione della resistenza in un intervallo tra il 5 % ed il 12% per gli aeromobili ad ala fissa, rappresentando un enorme risparmio nel consumo di carburante. Gli studi del Centro di ricerca di volo Dryden della NASA hanno dimostrato che anche una riduzione di un punto percentuale per la flotta di velivoli statunitense potrebbe comportare risparmi di circa 200 milioni di galloni all'anno, con un conseguente enorme risparmio in termini di emissioni inquinanti. Per ultimo la continuità realizzata tra la parte rigida dell'ala e quella mobile elimina il gap rispetto agli alettoni convenzionali, garantendo una continuità nel flusso d'aria che attraversa il profilo alare riducendo la creazione di moti turbolenti.



Figura 6.2: *Ala adattiva FlexFoil*

6.1 Definizione, vantaggi e svantaggi delle strutture flexure

I meccanismi il cui movimento è ottenuto attraverso la flessione di parte o di tutti i loro elementi sono chiamati "*Compliant Mechanism*" (CM) o anche "*strutture flexure*". Con flexure

ci si riferisce ad un elemento o ad un insieme di elementi appositamente progettati per essere flessibili secondo certi gradi di libertà. La parola *compliance* è sinonimo di flessibilità ed è definita come l'inverso della rigidità. Rappresenta quindi l'attitudine di un materiale alla deformazione, la proprietà di essere flessibile e facile da distorcere subendo in molti casi deformazioni considerevoli con sollecitazioni relativamente basse. Vi sono una serie di ragioni per cui un compliant mechanism può essere considerato in una particolare applicazione. Alcuni di questi vantaggi sono elencati di seguito [12]:

- **Numero di parti ridotto**

Un vantaggio dei meccanismi compliant è il potenziale per una drastica riduzione del numero totale di parti necessarie per eseguire un compito specifico. Il numero di parti può essere ridotto utilizzando elementi flessibili che sostituiscano molle, perni e cerniere rigide tradizionali. Il numero di componenti richiesti per un CM può essere considerevolmente inferiore rispetto alla versione rigida dello stesso.

- **Costi ridotti**

Poiché hanno meno parti, i meccanismi compliant possono essere molto economici da produrre. La riduzione del numero di pezzi può semplificare la produzione e ridurre sia i tempi che i costi di assemblaggio.

- **Precisione del moto**

I meccanismi tradizionali possono perdere precisione a causa del gioco e dell'usura a differenza dei meccanismi compliant che consentono movimenti precisi sempre, riducendo o eliminando giochi e usura. I meccanismi composti da elementi rigidi ottengono il loro movimento da perni e cerniere che scorrono l'uno sull'altro. L'usura meccanica si verifica quando due o più parti accoppiate si trovano in moto relativo tra loro. Durante il funzionamento, la continua asportazione di materiale per sfregamento può

provocare significative variazioni della geometria e quindi del movimento del meccanismo. Poiché i meccanismi compliant non utilizzano i tradizionali perni o cerniere rigide, l'usura può essere notevolmente ridotta. Il gioco è normalmente già presente in tutti i meccanismi e se ne tiene conto nel dimensionamento delle tolleranze dei pezzi accoppiati, in questo caso invece viene ridotto o eliminato perché non vi sono parti accoppiate. Questo motiva l'utilizzo esteso nella progettazione di strumentazioni che abbiano precisione e ripetibilità nel tempo. Anche le vibrazioni e i rumori, causati dai giunti rotanti o dalle coppie prismatiche dei meccanismi a corpo rigido, vengono notevolmente ridotti.

- **Efficienza** Non avendo coppie cinematiche viene meno la necessità di lubrificazione. Questa è una caratteristica preziosa per applicazioni in cui il meccanismo non è facilmente accessibile o per il funzionamento corretto in presenza di attrito. In particolare nelle applicazioni spaziali dove i lubrificanti tendono ad evaporare in un ambiente a bassa gravità. Il dispositivo di movimentazione, mostrato in figura 6.3, è un dispositivo progettato specificamente per l'uso nello spazio [13].

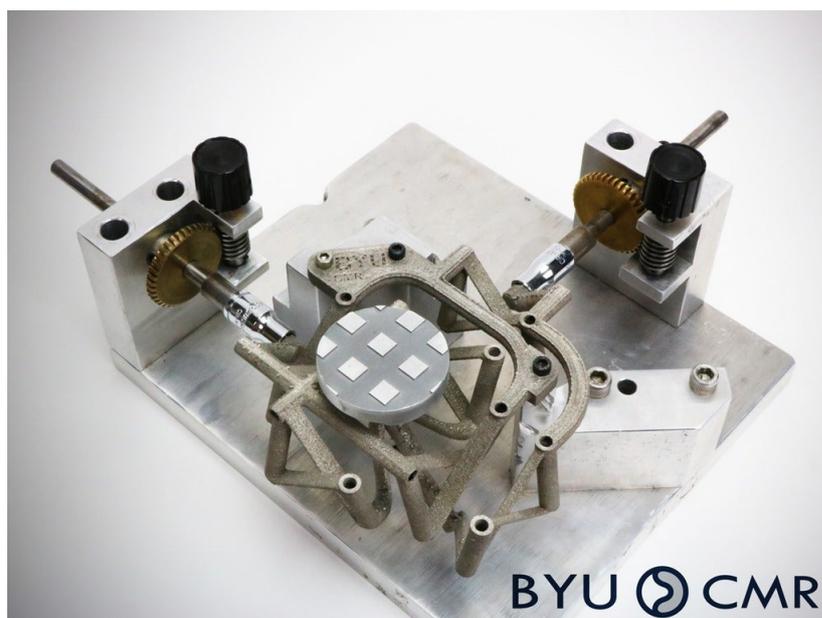


Figura 6.3: *CM progettato per la movimentazione di una testa satellite per la Nasa*

- **Proporzioni geometriche**

Un altro vantaggio dei meccanismi compliant è la facilità con cui sono miniaturizzati. Sono infatti ampiamente utilizzati nei sistemi micro-elettromeccanici (MEMS). La riduzione del numero totale di parti e giunti offerta da meccanismi compliant costituisce un vantaggio significativo nella fabbricazione di micro-meccanismi.

- **Riduzione del peso complessivo** La riduzione significativa del peso dei CM rispetto alle loro controparti a corpo rigido può essere un fattore significativo nel campo aerospaziale e in tante altre applicazioni.

- **Prevedibilità** Poiché i meccanismi compliant si basano sulla deflessione di elementi flessibili, l'energia viene immagazzinata sotto forma di energia di deformazione, come nel caso di una molla. Questa caratteristica può essere usata per immagazzinare o trasformare facilmente l'energia da rilasciare in un secondo momento o in un modo diverso. Un sistema arco e frecce ne è un semplice esempio. L'energia viene immagazzinata negli arti men-

tre l'arciere tira l'arco. L'energia potenziale viene quindi trasformata in energia cinetica della freccia. La caratteristica di accumulo di energia può anche essere utilizzata per far sì che un meccanismo tenda verso posizioni particolari ad esempio implementando la bistabilità, come nel caso di un interruttore ON/OFF.

Sebbene siano importanti i vantaggi introdotti da strutture flexure, vi sono alcuni svantaggi che devono essere attentamente considerati durante la loro progettazione:

- **Effetto della combinazione di sistemi complessi** Forse la sfida più grande è la relativa difficoltà nell'analizzare e progettare CM. È richiesta la conoscenza di metodi di analisi dei meccanismi e di deformazione dei membri flessibili. La combinazione dei due richiede non solo una comprensione di entrambi, ma anche una comprensione delle loro interazioni in un sistema complesso. Il modello di corpo pseudo-rigido, che verrà introdotto nei prossimi capitoli, renderà più chiara la comprensione di tale concetto.
- **Studio di un sistema di equazioni non lineari** Poiché molti degli elementi flessibili subiscono grandi deflessioni, le equazioni lineari delle travi non sono più valide. A causa di queste difficoltà, molti CM in passato sono stati progettati con approcci iterativi. Tali metodi, sono applicabili solo a sistemi molto semplici che svolgono compiti relativamente semplici e spesso non sono efficienti, in termini di costi, per molte applicazioni. La teoria su questi meccanismi è maturata negli anni per semplificare l'analisi e la progettazione, ed i limiti non sono così grandi come una volta. Pur considerando questi progressi, tuttavia, l'analisi e la progettazione rimangono in genere più complicati rispetto ai meccanismi a corpo rigido.
- **"Accumulo" di energia** La capacità di immagazzinare energia negli elementi flessibili è stata menzionata tra i vantaggi poiché può essere utilizzata per semplificare

ad esempio meccanismi che utilizzano molle, per ottenere relazioni specifiche di deflessione della forza e per immagazzinare energia che viene trasferita o trasformata dal meccanismo. Tuttavia, in alcune applicazioni avere energia immagazzinata in membri flessibili è uno svantaggio. Ad esempio, se la funzione di un meccanismo è di trasferire energia dall'ingresso all'uscita, non tutta l'energia viene trasferita poiché una parte viene immagazzinata dal meccanismo.

- **Fatica** L'analisi della fatica è in genere un problema importante nei CM. Poiché i membri flessibili vengono spesso caricati ciclicamente durante l'utilizzo, è importante progettare tali membri in modo tale che abbiano una durata a fatica sufficiente per le funzioni prescritte, quindi che la loro vita a fatica superi la durata prevista del meccanismo.
- **Movimento limitato** Essendo il movimento realizzato mediante la deformazione di membri flessibili, esso è limitato dalla resistenza meccanica degli elementi stessi. Ovviamente un membro flessibile non può produrre un movimento di rotazione continuo come quello permesso da una cerniera classica.
- **Distensione degli stress tensionali** Alcuni materiali se sottoposti a stress per lunghi periodi di tempo o ad elevate temperature, possono assumere una nuova forma associata alla posizione sotto carico. Questo fenomeno è chiamato "stress relaxation" ed interessa i CM che devono mantenere posizioni desiderate anche sotto stress. Per evitare ciò si richiede un'attenta progettazione e una scelta ponderata del materiale.

La comprensione dei limiti di tali strutture è utile per individuare quali applicazioni possano beneficiare maggiormente della sostituzione dei meccanismi classici.

6.2 Principi base per la comprensione del funzionamento di strutture flexure

6.2.1 Differenza tra Resistenza e Rigidezza

Di solito quando vogliamo che qualcosa non vada incontro a rottura vogliamo anche che sia rigido ovvero non si deformi, sia che si tratti di un albero motore, di un ponte o di una scrivania. Si progettano così spesso cose che devono essere sia rigide che resistenti che risulta spesso facile confondere rigidezza e resistenza, anche se le due proprietà hanno significati profondamente diversi. La resistenza si riferisce alla tensione massima che porta a rottura il materiale, mentre la rigidità si riferisce alla sua capacità di resistere alla deformazione. Si consideri un elemento d'acciaio a sezione rettangolare come mostrato in figura 6.4. La trave sarà in grado di resistere fino ad un certo stato tensionale senza rompersi. La sua resistenza a rottura è la stessa, indipendentemente dal fatto che la trave sia snella o tozza, supponendo che sia isotropa, mentre non può dirsi lo stesso sulla rigidezza.

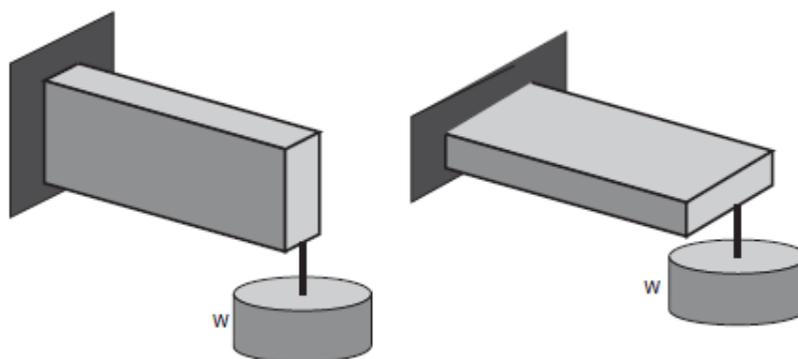


Figura 6.4: *La trave ha la stessa resistenza in diverse direzioni, ma avrà una rigidezza molto diversa nei due orientamenti mostrati*

Allora perché in certe applicazioni desideriamo che i membri siano resistenti e rigidi, mentre preferiamo che in altre siano flessibili e resistenti? Cosa determina la differenza tra i due casi? La risposta risiede nel fatto che il dispositivo si limiti

a reggere un carico o debba deformarsi per compiere la sua funzione. Un ponte è un esempio di qualcosa che deve essere rigido e resistente, perché vogliamo che mantenga il peso di ciò che lo attraversa senza muoversi. La fune da avvolgere in una puleggia invece è un esempio di qualcosa che deve essere flessibile e resistente allo stesso tempo.

Capitolo 7

Progettazione dei Compliant Mechanisms

Sebbene la storia dell'utilizzo di CM sia relativamente lunga, non vi è un criterio di progettazione universalmente riconosciuto valido. Durante gli anni la loro progettazione si è evoluta grazie allo sviluppo di modelli che approssimassero fedelmente il problema, tenendo conto di un numero di fattori via via crescente. I primi metodi di progettazione introdotti per i CM si basavano su casi semplici e non richiedevano calcoli significativi. Con la crescita della potenza di calcolo disponibile, tuttavia, anche sistemi complessi poterono essere risolti facilmente utilizzando metodi numerici. Questo aprì la strada allo studio e all'utilizzo di tali strutture. Alla fine degli anni '80, la Purdue University iniziò a studiare sistematicamente meccanismi con membri flessibili, inaugurando il preludio ai moderni CM.

Negli ultimi decenni, sono state condotte ricerche sostanziali sulla progettazione di CM e sono stati sviluppati diversi approcci, tra cui l'approccio basato sulla cinematica, l'approccio *building block* e l'approccio di *ottimizzazione topologica*. L'approccio basato sulla cinematica consente al progettista di applicare l'insieme di conoscenze che sono state sviluppate per i meccanismi di corpi rigidi alla progettazione di CM. Esistono due metodi principali relativi all'approccio basato sulla cinematica, vale a dire il metodo *FACT* (Freedom and Constraints Topologies) ed il metodo cosiddetto di *Rigid Body Replacement* [14]. Il metodo FACT fornisce solo configurazioni sulla disposizione geometrica dei membri che comporranno il meccanismo

e richiede l'uso di procedure aggiuntive di sintesi dimensionale, di ottimizzazione della forma e della dimensione dei membri per completare il processo di progettazione del meccanismo. Il metodo di Rigid Body Replacement è stato uno dei primi metodi capaci di semplificare lo studio di strutture flexure, quando la complessità del caso costituiva una grande barriera per lo sviluppo e l'estensione delle applicazioni. Partendo dalla definizione del modello di corpo pseudo-rigido, ed applicandola ad alcuni esempi di strutture semplici, si approfondirà nella sezione successiva in che modo i metodi di analisi dei meccanismi rigidi possono essere estesi anche allo studio di CM.

7.1 Pseudo-Rigid Body Model

Il modello di Pseudo Corpo Rigido (in inglese "Pseudo-Rigid Body Model", PRBM) è uno dei più usati metodi di progettazione per i CM. Stabilisce un insieme di equazioni e configurazioni che descrivono una corrispondenza tra una struttura flessibile, o parzialmente flessibile, ed un meccanismo rigido in termini di forze e spostamenti [15]. Tale modello ha lo scopo di descrivere il comportamento generale dei membri flessibili nel funzionamento come struttura, abbandonando l'idea di una analisi delle tensioni e delle deformazioni sui singoli elementi. Infatti, in una struttura flexure le parti si deformano subendo molto spesso deformazioni di grande entità, facendo cadere l'ipotesi di piccole deformazioni su cui si basa la teoria delle travi classica nella meccanica delle strutture. In figura 7.1 è mostrata una struttura parzialmente flessibile, costituita da tre aste collegate tra loro. Le aste 1 e 2 sono rigide mentre l'elemento 3 è costituito da un elemento rigido rettangolare e da un elemento flessibile, rappresentato con spessore minore.

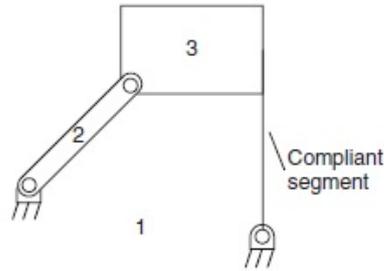


Figura 7.1: *Schema di un meccanismo parzialmente flessibile: membri rigidi 1 e 2, membro 3 composto da membro rigido ed uno flessibile*

Se l'elemento 3 fosse rigido, la struttura non avrebbe gradi di libertà. Assumendo invece che l'elemento 3 possa deformarsi, un momento applicato all'asta 2 provocherebbe un movimento degli altri membri. La deformazione subita dall'elemento flessibile del corpo 3 potrebbe essere importante in base all'entità del momento applicato, risultando in un modello complicato da analizzare. Infatti, sebbene ci sia una corrispondenza tra il momento applicato al membro 2 e la forza trasmessa al corpo 3, ed ancora una relazione non lineare tra la forza trasmessa al corpo 3 e le deformazioni subite dal membro flessibile, tali relazioni andrebbero risolte contemporaneamente. Infatti, l'equilibrio del corpo 2 dipende dalla posizione della cerniera che lo collega al corpo 3, e la posizione del corpo 3 è legata alla deformazione subita dal suo elemento flessibile, quindi, dalla forza trasmessa dal corpo 2. La complicazione del problema viene preventivata dal modello di Pseudo Corpo rigido che propone per il meccanismo precedente una configurazione come quella in figura 7.2.

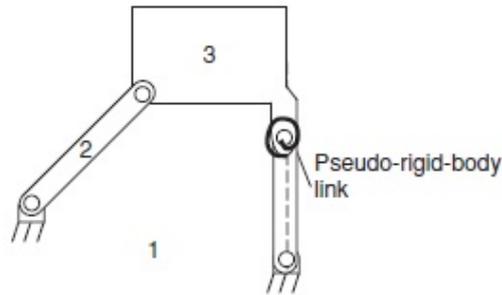


Figura 7.2: *Pseudo-Rigid Body Model PRBM del meccanismo in figura 7.1*

L'elemento tre, che prima era costituito da un elemento rigido ed uno flessibile, viene sostituito da una coppia di elementi di cui uno rigido e l'altro appunto detto "*pseudo rigido*". Quest'ultimo interpreterà il movimento dell'elemento flessibile nel precedente modello. In questo modo, la rotazione del corpo 2 e quindi la posizione del corpo 3, può essere calcolata accuratamente scegliendo correttamente la posizione del punto di collegamento tra i due membri del corpo 3. Sarà possibile in questo modo imporre una rigidezza flessionale all'elemento pseudo-rigido, tramite una molla torsionale applicata nel punto di collegamento con il membro rigido, come illustrato in figura 7.2. Ad ogni modo, l'impiego di un modello simile è giustificato solo se il guadagno in semplicità di analisi del sistema è maggiore della perdita in accuratezza dovuta all'approssimazione del modello flessibile di partenza. Vi è infatti un posizione, dove si intende applicata la molla torsionale, per cui la posizione raggiunta dai membri nel modello flessibile è uguale a quella raggiunta dai membri del modello pseudo-rigido, per una data condizione di carico. La forza trasmessa dal membro 2 ed il braccio di applicazione variano durante il moto e quindi si rende necessario stabilire una lunghezza per il membro pseudo-rigido in modo che il movimento del meccanismo risultante sia accurato, anche se non necessariamente esatto. Facendo riferimento alla figura 7.3, dove viene rappresentata una trave incastrata con un carico verticale applicato all'estremità inclinata di un angolo $\phi = 90^\circ$, le coordinate $(x; y)$ dell'estremità libera durante la deformazione per effetto di una variazione tra 500N e 8000N sono mostrate in figura 7.4:

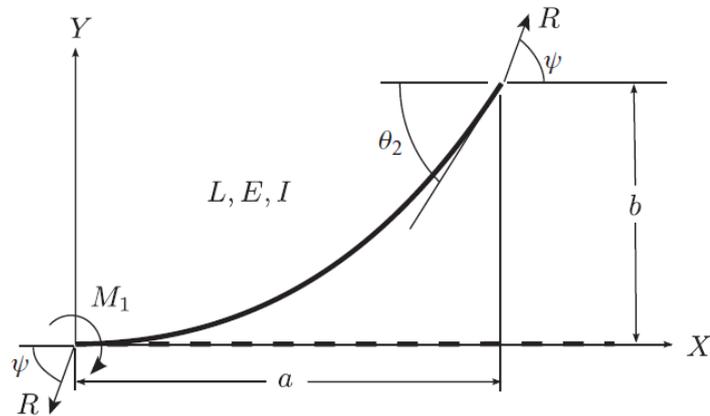


Figura 7.3: *Trave incastrata inflessa con un carico applicato inclinato di un angolo ψ*

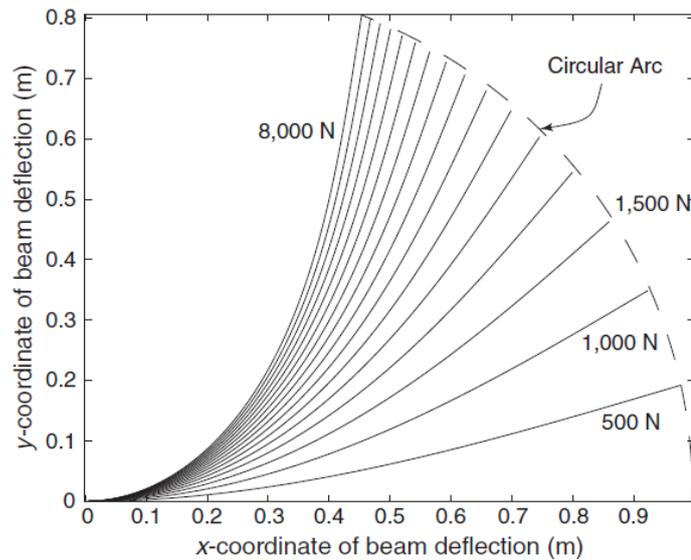


Figura 7.4: *Deformata della trave in figura 7.3 con $\phi = 90^\circ$ e $500N < R < 8000N$*

Dal grafico in figura 7.4 si evincono due comportamenti in particolare. Il primo riguarda il profilo circolare seguito dalla deformata durante l'applicazione del carico. Il secondo riguarda l'aumento della rigidità della trave all'aumentare del carico applicato. Per piccoli incrementi della forza, nel range tra 500-1500N, l'incremento delle deformazioni è alto rispetto a quello generato da variazioni del carico nell'intervallo prossimo al valore massimo del range. I due comportamenti sono da tenere in

conto nella modellazione del sistema con PRBM di travi piane che verrà introdotto nella sezione successiva.

7.1.1 Modello di corpo pseudo-rigido per travi piane

Le travi piane, o elementi il cui asse neutro di flessione giace su un piano durante la deformazione, possono esibire diverse configurazioni tra quella indeformata, perfettamente rettilinea, e quella circolare. Integrando il modello teorico delle travi inflesse con quello di pseudo corpo rigido si arriva alla conclusione che per una trave piana caricata a flessione, la lunghezza del corrispondente elemento pseudo rigido nel PRBM è compresa tra $0.83L$ e $0.85L$ [16]. Tale coefficiente di L sarà indicato successivamente con γ e prende il nome di *fattore di raggio caratteristico*. Un esempio tipico di trave piana è la trave incastrata ad una estremità, rappresentata in figura 7.5:

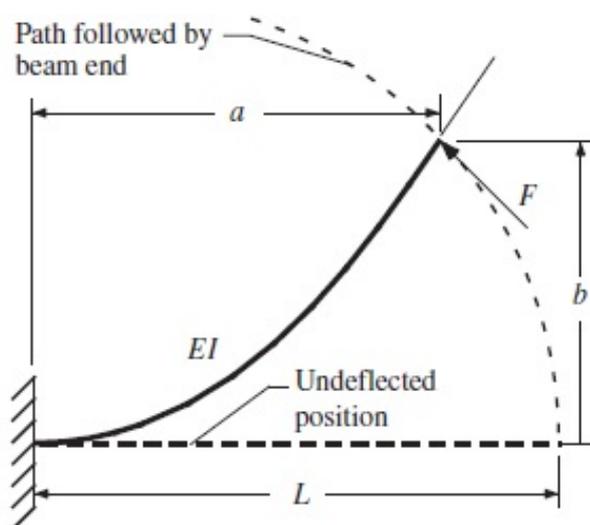


Figura 7.5: *Trave piana incastrata ad una estremità e libera dall'altra, caricata a flessione*

L'applicazione di un carico all'estremità libera determina la deformazione della trave e in particolare la curvatura sarà tanto maggiore quanto più si è vicini all'incastro. Gli spostamenti della trave durante la deformazione sono approssimati

dal PRBM in figura 7.6, sostituendo la trave, in qualità di elemento flessibile, con due elementi rigidi collegati tra loro da una molla torsionale.

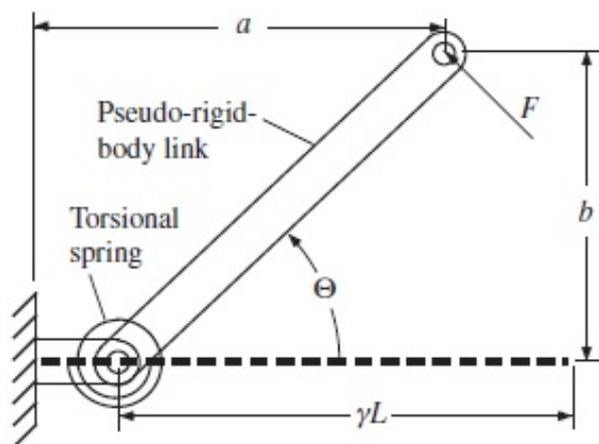


Figura 7.6: PRBM della trave in figura 7.5

Uno dei due elementi rigidi è fisso, l'altro invece è mobile ed all'estremità libera avrà il carico F applicato. Scelta una lunghezza variabile, per il membro rigido mobile, tra $0.83L$ e $0.85L$, la lunghezza dell'elemento fisso sarà compresa tra $0.15L$ e $0.17L$. Il carico F provoca una rotazione θ dell'asta rigida mobile ed in generale per $\theta < 15^\circ$ scegliendo $0.83L$ il modello risulta più accurato mentre per $\theta > 45^\circ$ è meglio scegliere $0.85L$ come valore progettuale iniziale. Questa scelta sul fattore di raggio caratteristico è giustificata per approssimare meglio la deformata della trave mostrata in figura 7.4 all'aumentare di θ . Le equazioni che descrivono la posizione dell'estremità libera della trave inflessa, facendo riferimento al modello PRBM in figura 7.6, sono:

$$a = (1\gamma)L + \gamma L \cos \theta$$

$$b = L \sin \theta$$

La rigidezza flessionale della trave lungo tutta la sua estensione lineare è concentrata nell'elemento molla torsionale di rigidità K collocata tra membro rigido mobile e fisso nel PRBM.

$$K = 2.25 \frac{EI}{L}$$

dove E è il modulo di Young, I il momento di inerzia della sezione trasversale della trave ed L lunghezza della trave. Il modello di pseudo corpo rigido appena presentato per il caso semplice di trave incastrata ad una estremità, può essere utilizzato per ricondurre configurazioni come quelle di trave incastrata da una parte e libera soltanto di traslare dall'altra, rappresentata in figura 7.7, oppure trave incastrata da una parte e con una cerniera mobile dall'altra, mostrata in figura 7.8. In quest'ultimo caso, l'applicazione del carico causa l'inflessione della trave per carico di punta, trattandosi di trave snella. I due esempi si presentano spesso nella progettazione di vari CM. Il PRBM della trave in figura 7.7 si ottiene semplicemente collegando due PRBM relativi alla trave incastrata e libera all'altra estremità, ottenendo il modello in figura 7.9. In questo caso, le rotazioni all'estremità non incastrata della trave sono impedito e di conseguenza la distribuzione dei carichi nel sistema sarà simmetrica. Le curvature e le tensioni nel modello saranno massime in corrispondenza delle estremità dell'elemento rigido mobile, sovrapponendo i risultati ottenuti per il PRBM della trave incastrata nel primo esempio. Per la struttura in figura 7.8, l'estremità è libera di ruotare e quindi la curvatura e le tensioni massime saranno al centro della trave. Il modello PRBM che approssima il movimento della trave sotto carico è mostrato in figura 7.10, sempre ottenuto utilizzando il primo modello di corpo pseudo rigido introdotto.

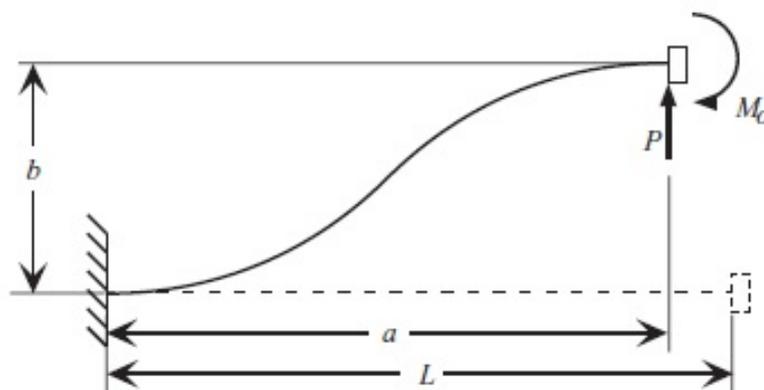


Figura 7.7: *Trave incastrata da una parte e libera soltanto di traslare dall'altra*

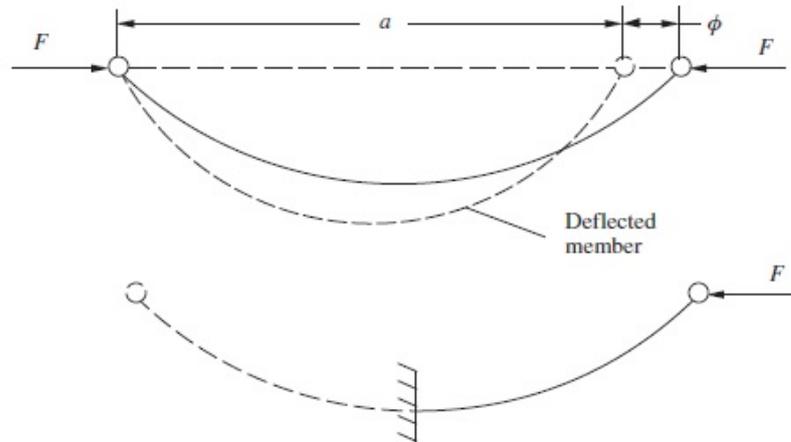


Figura 7.8: Trave incastrata da una parte e libera di ruotare dall'altra

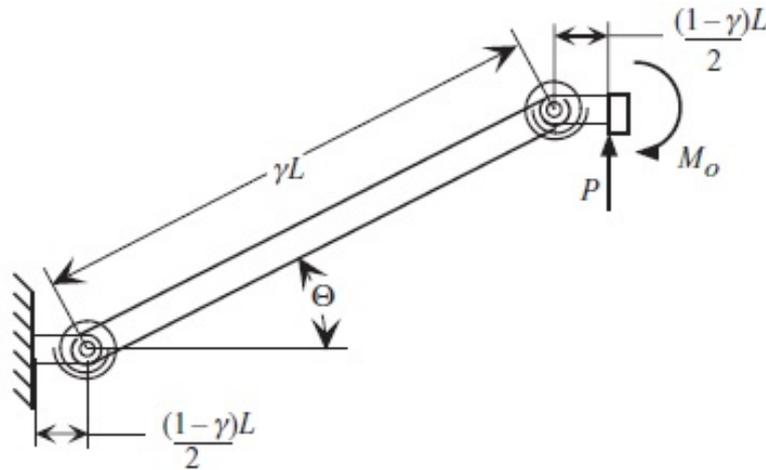


Figura 7.9: PRBM della trave piana in figura 7.7

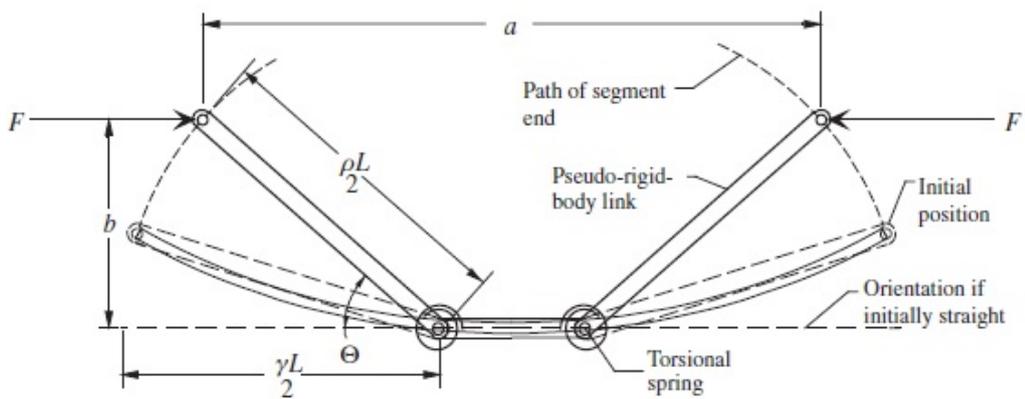


Figura 7.10: PRBM della trave piana in figura 7.10

Allo scopo di rendere chiaro l'utilizzo del PRBM nella progettazione dei CM, si faccia riferimento alla figura 7.11: In figura 7.11 a sinistra, è mostrata una morsa costituita da circa 18 elementi collegati tramite cerniere fisse e mobili a creare un meccanismo rigido adatto all'uso. A destra invece troviamo la versione compliant del meccanismo, su cui non è possibile distinguere parti e quindi realizzata tutta d'un pezzo:

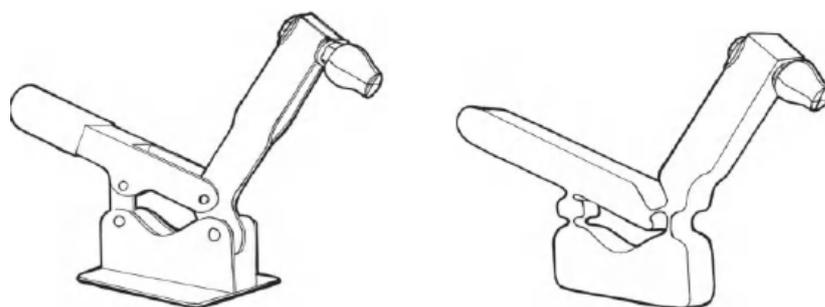


Figura 7.11: *Meccanismo di una morsa a sinistra, a destra versione flexure della morsa di cui a sinistra*

Per arrivare alla versione flessibile del meccanismo, si parte sempre dallo schema dinamico e cinematico del meccanismo rigido, contenente informazioni sulle forze e sugli spostamenti dei vari membri, come in figura 7.12:

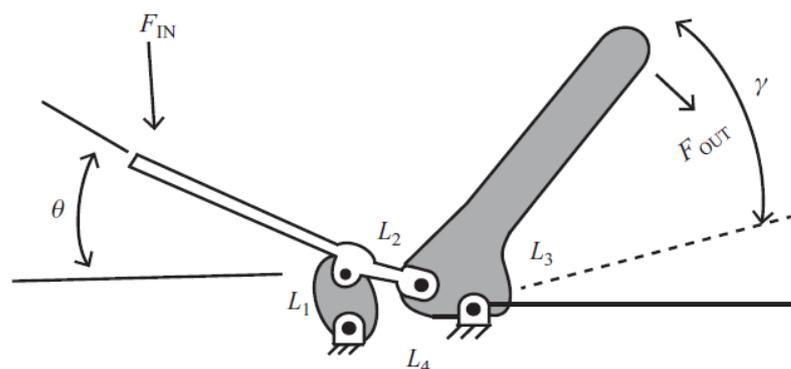


Figura 7.12: *Schema del meccanismo rigido della morsa*

Lo schema del meccanismo rigido riporta informazioni sui carichi applicati e le traiettorie seguite dai membri nel funzionamento del meccanismo. A questo punto, il modello PRBM da

associare può essere scelto tra varie configurazioni che assolvono la stessa funzione della versione rigida ma con accuratezza di approssimazione diversa. Una tra le possibili può essere quella rappresentata in figura 7.13:

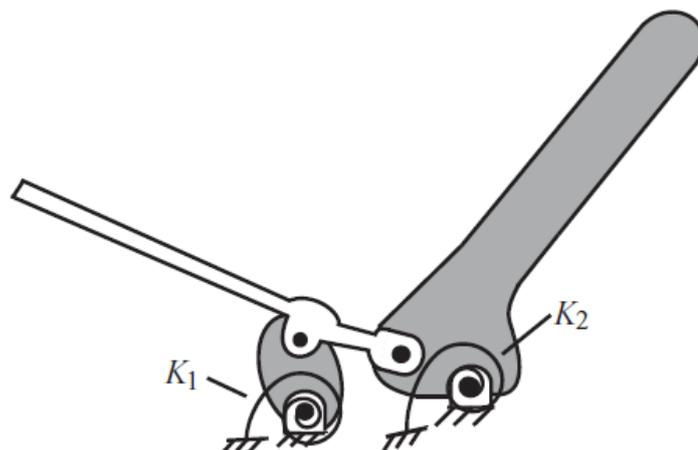


Figura 7.13: *PRBM del meccanismo in figura 7.12*

Come già visto nell'introduzione al PRBM, vengono applicate delle molle torsionali di rigidità K per concentrare l'energia di deformazione del meccanismo in determinati punti piuttosto che distribuirla sui membri del CM. In questo modo è possibile trattare come rigidi gli altri membri nella fase progettuale ed applicare la procedura di analisi tipica dei meccanismi convenzionali. Si giunge ad un meccanismo come quello mostrato in figura 7.14:

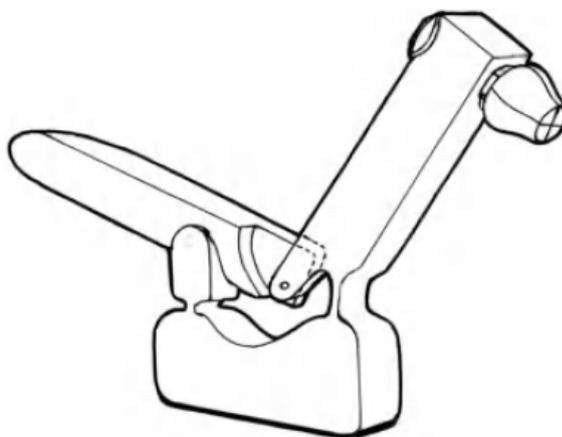


Figura 7.14: *Compliant Mechanism risultante*

Si può notare come quelle che erano indicate come molle torsionali nel PRBM del meccanismo, vengono interpretate da elementi di piccolo spessore rispetto a quello degli altri membri, di rigidità K e su cui si localizzerà la deformazione del meccanismo in esercizio.

7.2 Progettazione di CM per la fabbricazione additiva

7.2.1 Metodo di Ottimizzazione Topologica

I compliant mechanisms sono dispositivi flessibili realizzati in una unica parte, che combinano insieme le caratteristiche delle strutture e dei meccanismi. La sintesi di tali meccanismi è molto più complicata rispetto alla progettazione di meccanismi convenzionali, dal momento che la cinematica di un CM non può, come abbiamo visto, essere determinata usando l'analisi cinematica dei meccanismi rigidi se non commettendo delle approssimazioni sul modello. I metodi di progettazione originariamente introdotti, come il PRBM, risultano rigidi, complessi ed a volte imprecisi. La sintesi della topologia costituisce uno degli aspetti più importanti nella progettazione di CM, perché la topologia strutturale dello stesso detta la sua caratteristica cinematica. Data la caratteristica peculiare dei CM di combinare le strutture e i meccanismi in una unica configurazione, verrà affrontata la progettazione basata sul metodo di ottimizzazione topologica, già ampiamente utilizzato per la progettazione delle strutture rigide [17]. Tale scelta è motivata anche dalla possibilità di ottenere una geometria completamente nuova per la struttura flexure da progettare, che non implichi la riprogettazione di un meccanismo rigido di partenza. Inoltre sarà possibile distribuire la flessibilità lungo tutta la struttura evitando che le deformazioni e le tensioni si localizzino, compromettendo la vita del meccanismo. Vi sono diverse varianti con la quale può essere condotta una ottimizzazione topologica, essenzialmente tutte condividono 4 step schematizzati in figura 7.15 [17]: specificazione del problema, parametrizzazio-

ne del " *design domain* " o dominio di progetto, ottimizzazione topologica ed infine interpretazione dei risultati finali.

Typical Synthesis Procedure	(a) Homogenization	(b) Ground Structure
Step 1: Problem Specification - Define design domain - Apply boundary conditions		
Step 2: Design Domain Parameterization - Discretize design domain - Define design variables		
Step 3: Topology Optimization - Define objective function - Choose and implement optimization method		
Step 4: Final Design Interpretation - Filter out elements with values under certain threshold - Interpret final topology		

Figura 7.15: *Step principali dell'ottimizzazione topologica*

Il primo step di specificazione del problema di ottimizzazione riguarda la definizione dello spazio di progetto, all'interno del quale il meccanismo deve adattarsi. Vengono inoltre specificate le condizioni al contorno in questo passaggio, ovvero forze e spostamenti all'ingresso, all'uscita e la posizione dei vincoli. La parametrizzazione del dominio è il secondo passo, e permette di esprimere vari topologie strutturali in termini di valori per un determinato insieme di variabili progettuali. La parametrizzazione deve essere in grado di descrivere quante più topologie idonee, escludendo le altre dallo spazio di soluzioni formato dalle variabili di progetto. Nella terza fase, detta di ottimizzazione topologica, una funzione obiettivo appropriata viene formulata in base ai requisiti di progetto allo scopo di valutare quantitativamente le prestazioni delle varie topologie. La funzione obiettivo può essere lo spostamento o l'energia di deformazione all'output, calcolata tramite analisi agli elementi finiti FEA con le condizioni in input, output ed al contorno prescritte in fase di specificazione del problema di ottimizzazione. La funzione obiettivo permette dunque di determinare i valori

ottimali per le variabili di progetto, per il raggiungimento di un determinato scopo. Nell'ultimo step di interpretazione della topologia finale, il risultato dell'ottimizzazione viene utilizzato per estrarre informazioni sulle connessioni della struttura e formare la topologia finale. In figura 7.15 sono mostrati due metodi di ottimizzazione: "homogenization" e "ground structure". L'unica grande differenza tra i due sta nella parametrizzazione del dominio di progetto. Nell'approccio homogenization, il dominio di progetto è suddiviso in un insieme di quadrilateri a formare una *mesh*. Nel metodo detto ground structure, il dominio di progetto è parametrizzato con una serie di aste rettilinee collegate tra loro a formare una mesh reticolare. Indipendentemente dalla parametrizzazione, l'idea di base sulla quale vengono generate le topologie rimane identica: la progettazione della topologia viene trattata come un problema di dimensionamento. Un parametro fisico di ogni elemento, come l'elasticità del materiale o la sezione trasversale, è definito come variabile di progetto che può variare in maniera continua tra zero ed il limite superiore imposto nella fase 3 di ottimizzazione topologica. Basandosi sulla funzione obiettivo, l'algoritmo di ottimizzazione trova il valore ottimale da assegnare ad ogni variabile di progetto. Quando l'elasticità del materiale oppure l'area della sezione trasversale ha un valore assegnato vicina allo zero, l'elemento ha un effetto marginale sulla deformazione della struttura risultante, e quindi può essere rimosso dalla mesh nella fase di interpretazione della topologia finale. Gli elementi esclusi creano vuoti all'interno del design domain e cambiano la connettività strutturale, conducendoci verso la topologia finale. Un approccio continuo nell'assegnazione del valore ad ogni variabile di progetto per ciascun elemento, implica che ogni variabile possa variare continuamente tra zero ed il limite superiore imposto. Pertanto, il risultato dell'ottimizzazione generalmente contiene "aree grigie" in cui le variabili di progetto assumono valori intermedi all'interno dell'intervallo imposto. Nell'interpretazione finale, per ogni elemento appartenente all'area grigia deve essere stabilito se questo sarà pieno o vuoto nella topologia finale, come illustrato nello step 4 in figura 7.15. Un approccio comune è quello di utilizzare un va-

lore di soglia in modo che tutti gli elementi con valori inferiori ad esso siano considerati vuoti, mentre gli elementi rimanenti vengano considerati solidi. Tuttavia, la selezione di un valore di soglia dipende dal caso analizzato e talvolta può portare a risultati inaccettabili, come nel caso di strutture disconnesse. Sebbene sia stato cercato un modo per ovviare a tale problema, le aree grigie non scompaiono finché ogni variabile di progetto può variare continuamente tra zero ed il suo limite superiore. Se il problema di ottimizzazione topologica è trattato come un problema di dimensionamento, ovvero le cui variabili di progetto sono di carattere dimensionale come nei casi precedenti, è inevitabile la presenza di aree grigie in quanto la dimensione di un elemento è continua per natura. L'ottimizzazione della topologia invece può essere considerata come un problema discreto. La decisione riguardo l'esistenza o meno di un elemento all'interno del design domain è discreta e per questo motivo viene spesso assegnata anche una variabile di progetto binaria a ciascuno di essi. Il risultato è soddisfacente dal punto di vista della scomparsa delle aree grigie ma soffre della presenza nel campo delle soluzioni, di topologie non pienamente connesse e quindi inaccettabili come mostrato in figura 7.16:

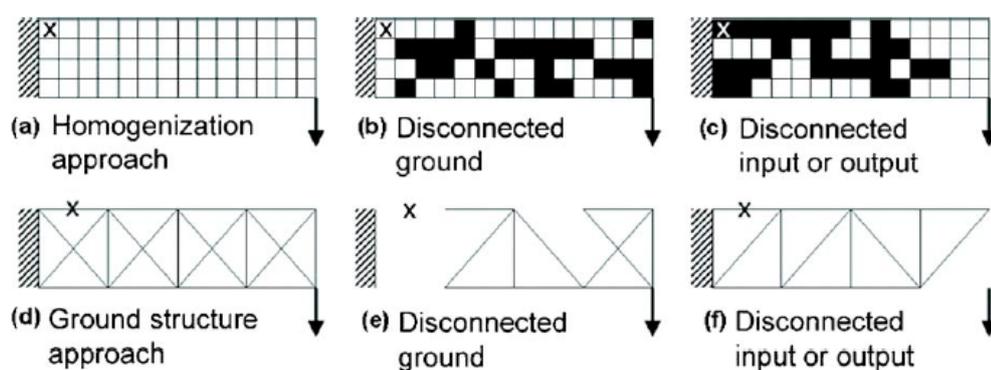


Figura 7.16: *Strutture disconnesse ottenute a seguito di OT*

Soluzioni inaccettabili di questo tipo nascono perché sono effettivamente incluse nello spazio delle soluzioni possibili definito dalle variabili di progetto. Infatti, la presenza o l'assenza di un certo elemento trattata singolarmente non fornisce informazioni sulla connettività strutturale complessiva. Quest'ul-

tima, è invece determinata da tutti gli elementi presenti contemporaneamente. Algoritmi e vincoli aggiuntivi devono essere applicati per garantire la connettività strutturale con questo approccio, rendendolo inefficiente e talvolta inefficace.

7.2.2 Load path synthesis approach

In questa sezione, verrà introdotto un approccio diverso per l'ottimizzazione topologica delle strutture chiamato "*Load path synthesis approach*". Tale metodo implementa una parametrizzazione del design domain mediante una rete di "load path" o percorsi di carico all'interno di un algoritmo GA, per la progettazione di CM SISO, ovvero ad uno ingresso ed una sola uscita. Quello che costituirà il nostro caso di studio sarà un CM appartenente a tale categoria. Il metodo load path approach introduce un approccio diverso per parametrizzare il design domain e definire le variabili di progetto. In qualsiasi categoria di CM, esistono tre categorie di punti definiti "essenziali": input, output e vincoli. Questi punti possono essere collegati direttamente o indirettamente tra loro, per formare una struttura ben connessa. In figura 7.17, sono illustrati diversi percorsi per mettere in luce la differenza tra i percorsi diretti (1) e indiretti (2) che collegano i punti essenziali. I percorsi diretti collegano direttamente due punti essenziali mentre quelli indiretti hanno connessioni intermedie con altri percorsi. Questi identificano dunque dei "percorsi di carico" in una struttura. Possono essere interpretati come percorsi tramite cui i carichi si trasmettono tra i punti di input, di vincolo e di output. Ancor di più, rappresentano la connettività di una struttura.

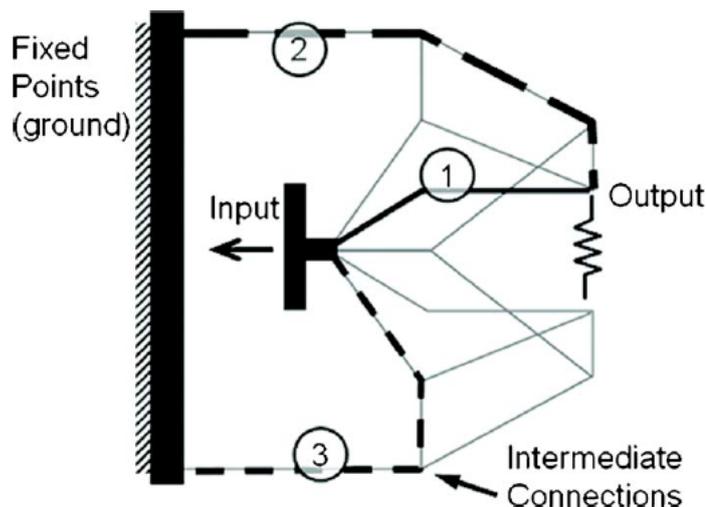


Figura 7.17: *Tipi di percorsi di carico*

Dunque tali percorsi identificano una nuova parametrizzazione del design domain e verranno utilizzati per rappresentare varie topologie. Assegnando delle variabili di progetto ad ogni percorsi di carico, considerandolo come elemento di una mesh, possono essere assegnate le dimensioni all'elemento ad esempio in termini di sezione trasversale. Le variabili di progetto assegnabili ad ogni percorso di solito sono la sequenza del percorso (pathSeq), una variabile binaria di esistenza del percorso (pTop), la posizione dei suoi punti intermedi (interConLocation) e la dimensione del percorso stesso (pDim). In figura 7.17 sono schematizzati i percorsi di carico diretti e indiretti possibili in una struttura. Possono essere suddivisi ancora in:

- Percorsi di collegamento input/output
- Percorsi di collegamento tra input e vincoli
- Percorsi di collegamento tra vincoli ed output

Sono indicati rispettivamente come pathInOut, pathInFix e pathFixOut in figura 7.18. Un CM SISO è mostrato in figura 7.19, come esempio per i diversi tipi di punti che possono presentarsi in un CM. La rappresentazione fisica del CM può essere interpretata come un grafico i cui vertici sono rappresentati dai punti di input, output e di vincolo. Specificato il numero di

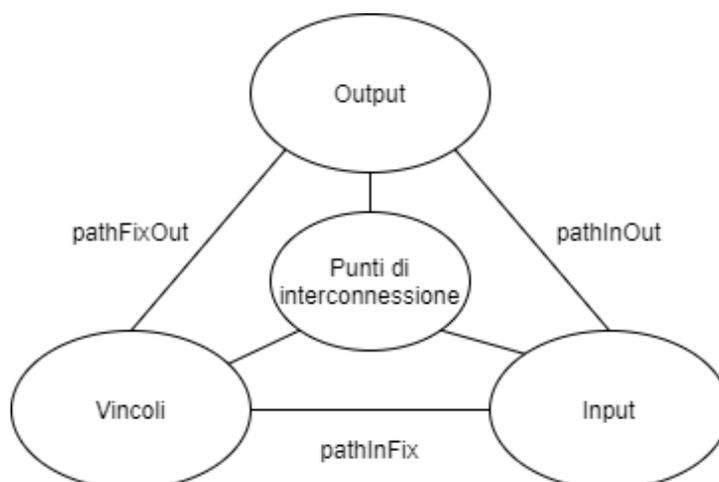


Figura 7.18: *Percorsi diretti e indiretti tra i punti essenziali*

punti di vincolo, nelle condizioni al contorno, e gli altri punti essenziali, vi sono altri punti enumerati da 5 ad 8 ed introdotti per consentire connessioni intermedie tra vari percorsi, detti punti di connessione intermedi o punti di interconnessione. Anche il numero dei suddetti punti può essere specificato a priori in fase di definizione del design domain ed, in genere, un numero compreso tra quattro e dieci è sufficiente per la maggior parte dei problemi di ottimizzazione topologica dei CM. Come regola generale, ogni punto essenziale è connesso ad un altro della stessa categoria tramite un solo percorso. Ad esempio, un punto di vincolo è collegato ad un punto di input o di output tramite un solo percorso, e non è collegato ad altri punti di vincolo. Il numero totale di percorsi di carico può essere definito dunque conoscendo il numero di punti presente in ciascuna categoria. Consentire un solo percorso di collegamento tra una coppia di punti essenziali di diversa natura facilita la ricerca della configurazione più semplice che soddisfa i requisiti di progetto. La topologia in figura 7.19a, è composta da 5 percorsi. Ognuno di essi può essere definito mediante la sequenza di vertici che attraversa, chiamata sequenza del percorso *pathSeq*. I percorsi di carico sono numerati in ordine crescente secondo il tipo, da *pathInOut*, *pathInFix*, a *pathFixOut*. Ad ognuno viene poi assegnata una variabile di esistenza binaria *pTop* per indicare la presenza o meno nella topologia finale. Quando tutti i valori di *pTop* sono pari a 1, la topologia è pie-

namente connessa, come in figura 7.19a. Quando alcuni valori della variabile $pTop$ sono pari a 0, i percorsi associati vengono scartati, creando così topologie parzialmente connesse e diverse dalla precedente. La figura 7.19b mostra un esempio di topologia parzialmente connessa che, pur avendo lo stesso valore della variabile $pathSeq$ in figura 7.19a, porta ad una topologia differente avendo diversi valori della variabile $pTop$. In questo modo, controllando la variabile binaria $pTop$ su ogni percorso, e non soltanto su un elemento, si può evitare di ricadere in soluzioni inaccettabili come lo sono quelle disconnesse. La topologia finale sarà costituita dall'unione di tutti i percorsi descritti da $pathSeq$ e $pTop$.

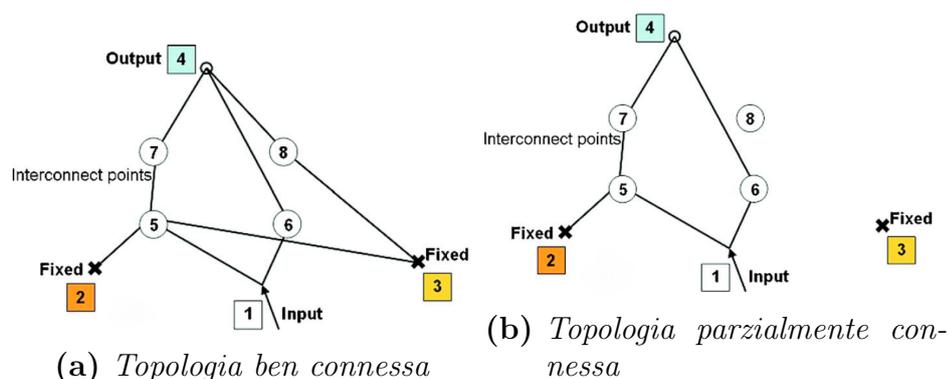


Figura 7.19: *Differenti topologie con stessa sequenza $pathSeq$ e differenti valori di $pTop$*

Un'altra variabile di progetto riguarda la posizione dei punti di interconnessione, *interConLocation*. Questi punti possono muoversi all'interno del design domain specificato e dalla loro posizione dipenderà la lunghezza e l'orientamento dei tratti che li collegano, caratterizzando quindi la forma geometrica della struttura ottimizzata. Viene quindi considerata come una variabile geometrica. L'influenza della posizione dei punti di interconnessione sulla geometria risultante è illustrata dalle due configurazioni in figura 7.20, in cui, sebbene le variabili $pDim$ e $pathseq$ siano le stesse, la geometria risulta differente al variare di *interConLocation*.

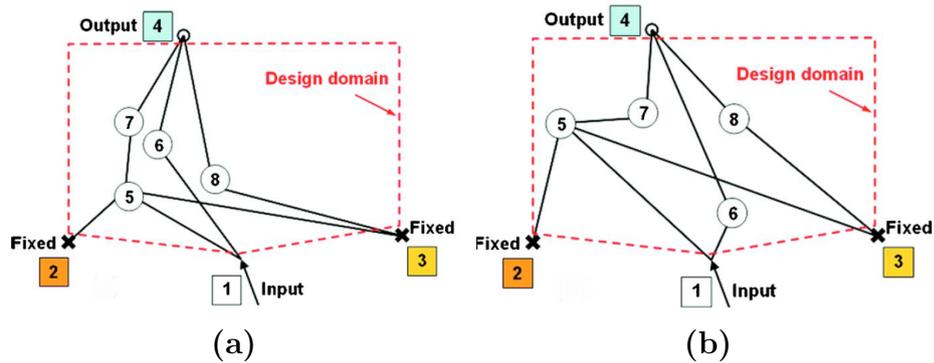


Figura 7.20: *Influenza della disposizione dei punti di interconnessione sulla topologia*

Per ogni percorso viene assegnata una variabile di dimensione $pDim$, per descriverne la dimensione della sezione trasversale. Nella fase di assegnazione della variabile dimensionale, si ipotizza che le sezioni trasversali siano rettangolari. Essendo ogni percorso costituito da diversi tratti, tra un punto ed il successivo, $pDim$ contiene una sequenza di valori che rappresentano le dimensioni dei vari tratti lungo uno stesso percorso. Lo spessore lungo l'asse z di percorsi è invece ipotizzato costante, pertanto $pDim$ descrive solo lo spessore sul piano $x - y$. In figura 7.21 sono mostrati due esempi di topologie identiche ma con diversi spessori, e quindi valori di $pDim$, assegnati.

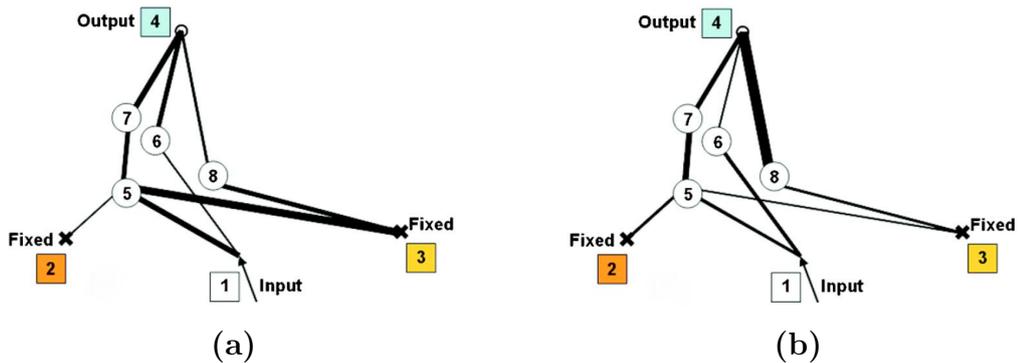


Figura 7.21: *Influenza della variabile dimensionale $pDim$ sulla topologia*

Infine vi sono dei parametri mantenuti costanti nel problema di ottimizzazione. Ad esempio, un limite superiore può essere imposto sulla lunghezza massima di ciascun percorso

”*maxPathLength*”, controllando il numero di tratti che lo compongono. Maggiore è la lunghezza massima, maggiore la probabilità che i percorsi si intersechino tra loro formando punti di interconnessione e generando topologie più complesse. Per questo motivo, di solito sono utilizzati valori compresi tra quattro e sei per la variabile *maxPathLength*. Un altro parametro che può essere imposto è il numero di punti di interconnessione *nInterCon*, che controlla indirettamente la complessità geometrica della struttura. In figura 7.19b, si nota come non tutti i punti di interconnessione siano necessariamente interessati da percorsi di carico quindi, *nInterCon* costituisce soltanto un limite superiore per la complessità della mesh. Minore il numero di punti di interconnessione, maggiore è la probabilità che si verifichi l’intersezione tra più percorsi. Tuttavia pochi punti limitano il campo di soluzioni all’interno del quale troveremo la topologia finale e per questo motivo è raccomandato un numero compreso tra quattro e dieci. Altri parametri che possono essere fissati sono il modulo di Young *E*, lo spostamento all’input e la posizione dello stesso, numero e posizione dei punti di vincolo, spessore lungo l’asse *z*, un range per lo spessore sul piano *x – y* da assegnare alla variabile *pDim* per ciascun tratto in un percorso ed i parametri associati all’algoritmo di calcolo.

Un vantaggio del metodo *path load approach* sta nella possibilità di rappresentare varie topologie con meno variabili di progetto, rispetto ai metodi precedenti tra cui il *ground structure*. In quest’ultimo caso, la parametrizzazione prevede l’uso di una mesh di discretizzazione, che determina direttamente la risoluzione finale del progetto. In generale, una mesh più fine aumenta la precisione e l’affidabilità dei risultati, introducendo anche un numero maggiore di variabili assegnate. Con il metodo *path load approach*, poiché la posizioni dei punti di interconnessione può variare continuamente all’interno del *design domain*, è possibile raggiungere una elevata varietà di configurazioni con lo stesso numero di variabili di progetto. In particolare il numero di variabili, quindi la complessità del calcolo, aumenta linearmente con il numero di interconnessioni mentre nella parametrizzazione convenzionale ha una dipendenza quadratica dal numero di nodi della struttura.

Riguardo alla validità delle soluzioni proposte dal metodo path load approach, per evitare la presenza di topologie parzialmente connesse vengono imposte due condizioni alla variabile binaria di esistenza del percorso $pTop$. In particolare imponendo:

$$\sum_{i \in pathInOut} pTop_i \geq 1$$

$$\sum_{i \in pathInFix \cup pathFixOut} pTop_i \geq 1$$

In questo modo si assicura che via sia almeno un percorso che collega i punti di input ed output e che almeno un percorso colleghi questi ai vincoli. In questo modo si garantisce la piena connessione della topologia con i punti essenziali. La funzione della variabile binaria ha quindi una duplice valenza in questo senso.

La rappresentazione mediante percorsi di carico presentata, viene dunque utilizzata per formulare il problema di ottimizzazione, le cui soluzioni costituiranno la topologia e le dimensioni per una desiderata funzione della struttura. Quest'ultima viene quantificata nella cosiddetta *funzione obiettivo* del problema. Per una struttura SISO che abbia la funzione di amplificare ad esempio lo spostamento in una data direzione, una funzione obiettivo sarà massimizzare la MPE, Mutual Potential Energy. Se invece l'obiettivo della struttura è quello di amplificare la forza all'output, la funzione obiettivo potrebbe essere massimizzare la funzione SE (Strain Energy), ovvero aumentare la rigidità all'output del meccanismo.

Capitolo 8

Introduzione al caso di studio

8.1 CM per l'amplificazione dello spostamento

Una delle innovazioni tecnologiche che ha rivoluzionato il campo dei sistemi attuatori, con particolare riferimento alla miniaturizzazione degli stessi e alla loro efficienza in rapporto al peso ed alle dimensioni, è stata l'introduzione dei "*smart material*". I materiali piezoelettrici sono emersi come uno degli appartenenti a tale categoria, acquistando popolarità nelle moderne applicazioni di precisione. Le caratteristiche di alta potenza di attuazione con ingombri contenuti, alta risoluzione nella gestione della forza e dello spostamento generato in funzione del voltaggio applicato, elevato valore della forza che sono capaci di esplicare e risposta dinamica veloce sono di particolare rilievo in tal senso. Tuttavia, tali attuatori possono subire deformazioni dell'ordine dello 0,1% della loro dimensione in direzione perpendicolare alle facce su cui è applicata la differenza di potenziale. Gli spostamenti generati sono dunque molto piccoli e per molte applicazioni potrebbero risultare insufficienti se si immagina che per 1 mm di spostamento generato servirebbe un piezoelettrico da 1 m. Per tal motivo vengono spesso utilizzate strutture flexure per amplificare lo spostamento prodotto dagli attuatori piezoelettrici con i conseguenti vantaggi che ne derivano. La categoria di compliant mechanisms alla quale ci si riferirà nel seguente e nei successivi capitoli è quella degli amplificatori di

spostamento (DaCM). La mancanza di usura, giochi di accoppiamento, attrito e le dimensioni compatte rendono le strutture flexure ad azionamento piezoelettrico perfette per applicazioni in cui è richiesta elevata precisione di posizionamento come nei sistemi per l'allineamento ottico, per la movimentazione laser, per la manipolazione di oggetti su scala micrometrica e nanometrica, per le lavorazioni di precisione, per la robotica e per la realizzazione di sensori di forza e spostamento. La ricerca riguardo all'utilizzo di attuatori piezoelettrici amplificati con strutture flexure venne approfondita all'inizio per applicazioni aerospaziali dalla NASA ed altri enti del settore. Venivano richieste elevate potenze di attuazione con il minore ingombro e peso associato, alta precisione, risposta dinamica alle variazioni di tensioni e la necessità di non dover lubrificare le parti per via del congelamento o dell'evaporazione a cui il liquido poteva andare incontro nelle applicazioni criogeniche o a vuoto. In riferimento al campo aerospaziale, l'azienda FlexSys Inc. insieme all'Università del Michigan sviluppò un modello di amplificatore per l'attuazione di un sistema atto a controllare le condizioni fluido-dinamiche dell'aria in prossimità delle superfici del profilo alare. In particolare, l'attuazione interessa delle lame che protratte dalla superficie alare creano dei vortici nel flusso d'aria (da qui il nome di *vortex generator*), prevenendo lo stallo del profilo in determinate manovre di volo o in presenza di angoli d'attacco elevati. La sostituzione del sistema pneumatico convenzionale con il sistema mostrato in figura 8.1, permette di lavorare meglio in condizioni di flusso transonico grazie all'esteso range di frequenze di funzionamento ed, allo stesso tempo, una riduzione del peso e degli ingombri grazie ad una consistente riduzione del numero di parti [18].

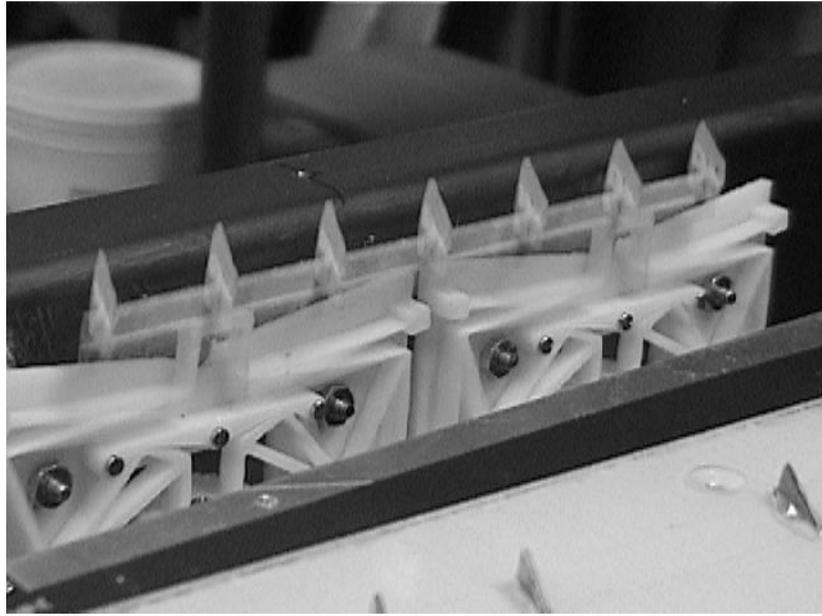


Figura 8.1: *Concept di Vortex Generator*

La gamma di applicazioni di tali strutture si è estesa anche grazie all'avanzare di teorie per la progettazione sempre più accurate, in grado di soddisfare svariate funzioni. In figura 8.2 viene mostrata una varietà di compliant mechanisms per l'amplificazione dello spostamento, ottenuti a partire da metodi di progettazione differenti.

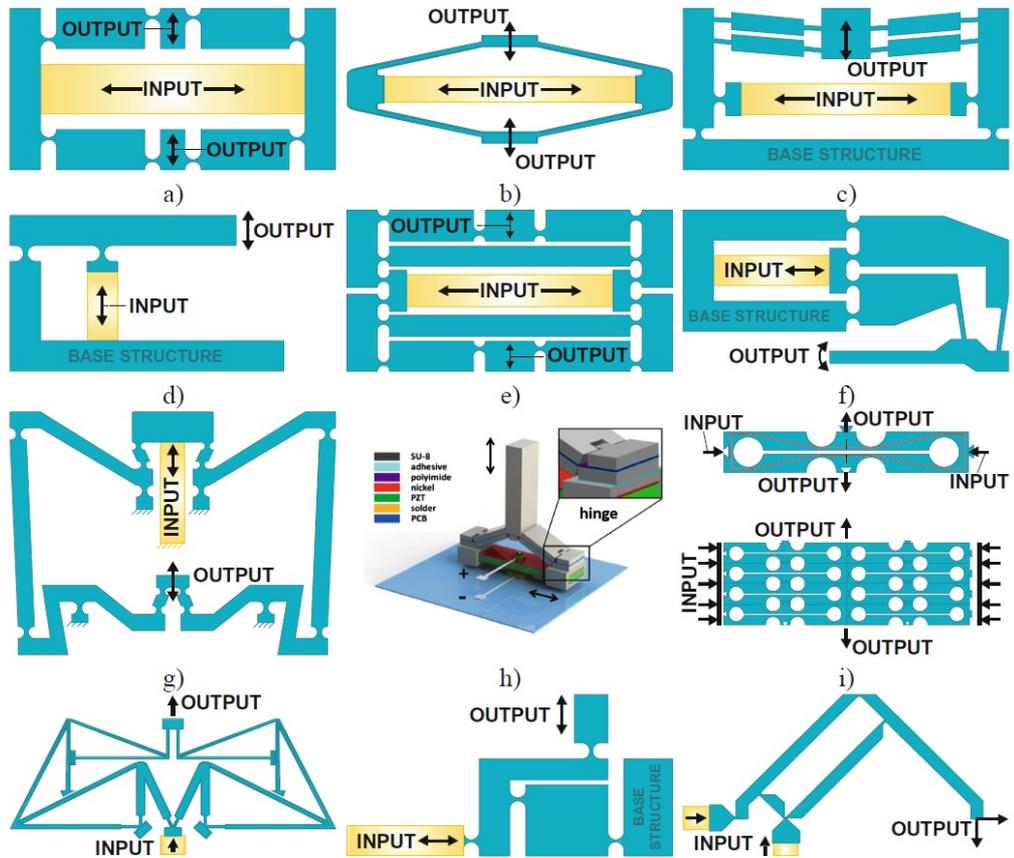


Figura 8.2: *CM per l'amplificazione dello spostamento*

Le strutture illustrate sono accomunate dall'aver una porta di input su cui l'attuatore piezoelettrico eserciterà una forza ed un relativo spostamento, ed una porta di output su cui troveremo lo spostamento all'input amplificato. L'amplificazione dello spostamento avviene sempre con una perdita nella relativa forza contrastabile all'output del meccanismo, secondo il grafico illustrato in figura 8.3:

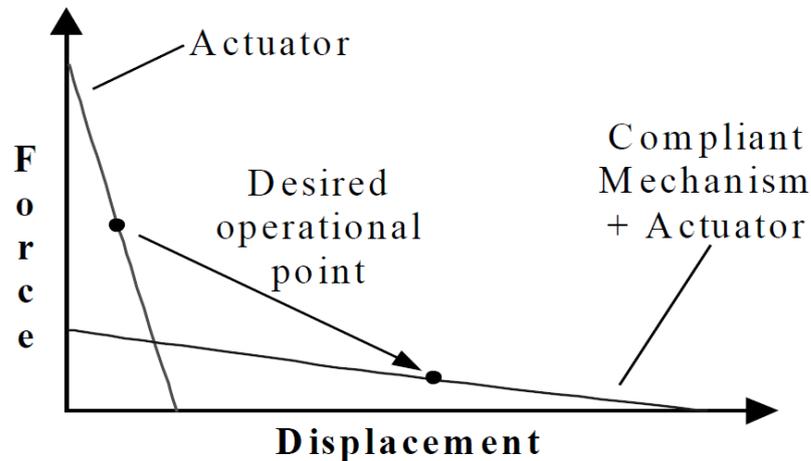


Figura 8.3: *Caratteristiche di una attuatore piezoelettrico e di un attuatore integrato con una struttura flexure*

Gli attuatori piezoelettrici sono in grado di generare forze di output dell'ordine di migliaia di newton, dunque la perdita in forza a fronte di un guadagno in spostamento è accettabile nella maggioranza dei casi. Le caratteristiche di ingombro e numero di parti ristretto richieste dall'impiego nella meccanica di precisione e nell'integrazione in dispositivi per la microelettronica o nel settore aerospaziale, dove la riduzione del peso e dell'affidabilità dei sistemi è di cruciale importanza, rende la fabbricazione additiva particolarmente vantaggiosa per la realizzazione delle strutture flexure. Inoltre la libertà progettuale introdotta dalle tecnologie di produzione non convenzionali consente l'utilizzo del metodo di ottimizzazione topologica, approfondito nel capitolo precedente, per definire una geometria ex-novo dei meccanismi atta ad assolvere una determinata funzione, allontanandoci dai vincoli imposti dalla progettazione a partire da un sistema preesistente, come nel caso del metodo di PRBM. Ancora, la possibilità di distribuire il materiale nella struttura dove necessario permette di ottenere strutture cosiddette "distributed compliance", ovvero la cui flessibilità è distribuita su tutti i membri e non concentrata all'intersezione tra gli stessi. In questo modo, la distribuzione delle tensioni è più omogenea lungo la struttura e la vita a fatica viene significativamente aumentata. Nei capitoli successivi, partendo da un modello di amplificatore di spostamento classico det-

to "bridge type" o a "ponte", come quello mostrato in figura 8.2b, la trattazione verrà focalizzata sull'obiettivo del caso di studio ovvero la progettazione di una struttura flexure pensata per essere realizzata mediante tecniche di fabbricazione additiva con polimeri. In generale, una volta presentato il modello di confronto e le relative caratteristiche principali, verrà affrontata la progettazione di un amplificatore per trasduttore piezoelettrico mediante ottimizzazione topologica secondo il metodo *path load approach*, introdotto nel capitolo precedente. Successivamente, sul modello ottenuto verranno eseguite analisi agli elementi finiti per valutare la corrispondenza con i risultati dell'ottimizzazione topologica. Secondo un opportuno Design of Experiments, DOE, ulteriori analisi FEM verranno condotte allo scopo di valutare l'influenza del materiale e dello spessore minimo dei membri sulle caratteristiche di funzionamento del CM. La scelta del materiale più indicato guiderà la selezione del processo di fabbricazione additiva più idoneo per la stampa. A questo punto, sarà possibile identificare la coppia materiale/spessore minimo dal DOE che presenta il miglior compromesso tra i fattori di valutazione delle performance del CM, ovvero entità delle tensioni massime agenti, valore della rigidità alla porta d'ingresso $K_{IN} = \frac{F_{IN}}{y_{IN}}$ e valore del fattore di amplificazione dello spostamento, $R_{amp} = y_{OUT}/y_{IN}$, ottenuto dal rapporto dello spostamento tra le porte di uscita ed ingresso. Infine si procederà con la progettazione della struttura di supporto del CM selezionato in ottica di fabbricazione additiva mediante ottimizzazione topologica, la cui geometria risultante verrà validata mediante analisi FEM.

8.2 Modello di ispirazione al caso di studio

La figura 8.2 propone una serie di strutture flexure per l'amplificazione dello spostamento con caratteristiche di funzionamento diverse tra loro e ottenute a partire da modelli analitici differenti. Tra quelle mostrate, la tipologia più diffusa è quella delle

strutture dette "bridge-type" o a ponte, mostrata nel dettaglio in figura 8.4 [19].

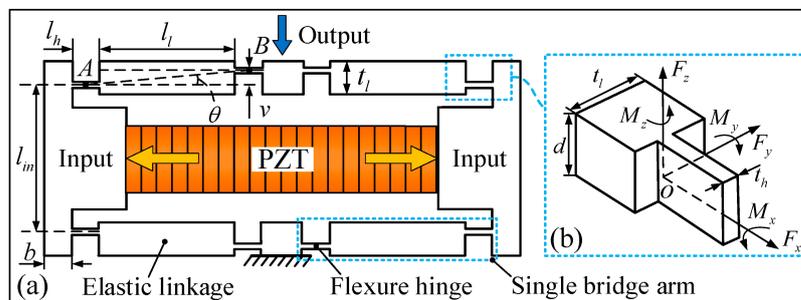


Figura 8.4: *CM bridge-type*

La struttura a ponte è ottenuta applicando il modello analitico PRBM ad una struttura come quella mostrata in figura 8.5:

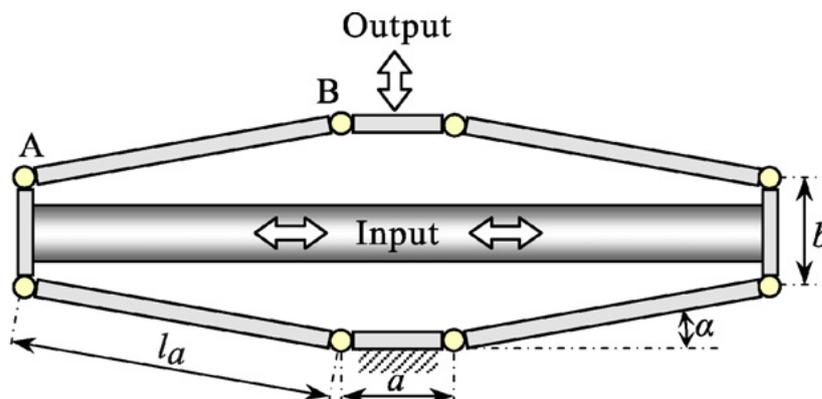


Figura 8.5: *Versione rigida CM bridge-type*

Sostanzialmente, la struttura risultante è costituita da elementi considerati rigidi nel modello teorico e collegati tra loro mediante "flexure hinge" o "cerniere flessibili". Tali cerniere sono progettate in spessore t_h , lunghezza l_h e sezione trasversale tale da concentrare una certa rigidità flessionale secondo gli assi coinvolti nel movimento del meccanismo. Nel caso particolare di amplificatore a ponte, gli elementi flessibili sono sottoposti a flessione in direzione z con un momento M_z . Le deformazioni previste dal modello teorico per il funzionamento sono legate a tali cerniere flessibili e non dovrebbero influenzare dunque i membri da loro collegati. Nella realtà questo accade,

generando deviazioni nel comportamento reale della struttura. Inoltre la concentrazione delle deformazioni in alcuni punti della struttura, causa una distribuzione delle tensioni non omogenea, accorciando la vita utile del meccanismo. Infine vi è anche un effetto negativo sulla frequenza di risonanza del sistema e quindi sul comportamento dinamico della struttura a frequenze di funzionamento elevate. Risulta migliore il comportamento di una struttura a ponte dove le deformazioni si distribuiscano in maniera più omogenea tra i membri che la compongono, come quella mostrata in figura 8.6:

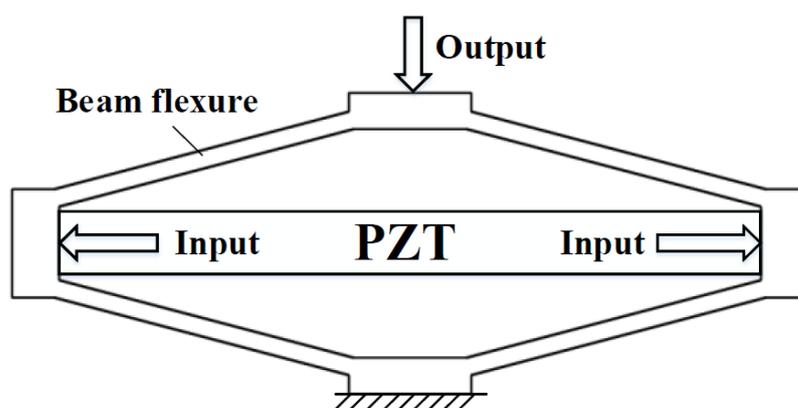


Figura 8.6: *CM bridge-type distributed compliance*

La struttura detta "*distributed compliance*" o a flessibilità distribuita, è costituita da quattro travi flessibili collegate tra loro con un disposizione simile a quella vista in precedenza [20]. Come è possibile notare, non sono presenti cerniere flessibili e questo a vantaggio dei problemi esposti. Rimane invece un limite, già presente nell'amplificatore in figura 8.4, riguardo allo spostamento massimo prodotto all'output. Analizzando la relazione tra la risposta del meccanismo in uscita (output) e quella in ingresso (input), definita dal *fattore di amplificazione*, R_{amp} , può essere d'aiuto consultare il grafico in figura 8.7.

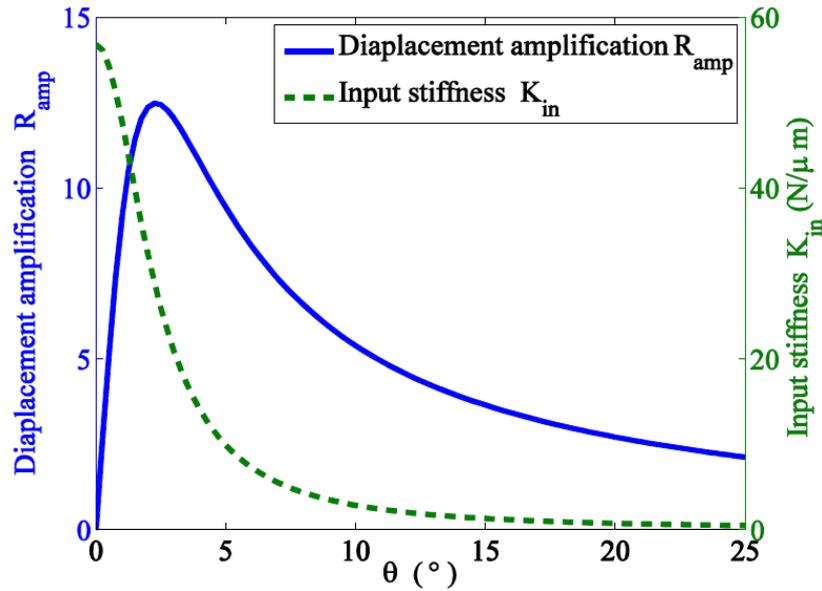


Figura 8.7: *Fattore di amplificazione CM bridge-type*

Il grafico propone l'andamento del suddetto fattore, parametro fondamentale per la valutazione del meccanismo risultante ottenuto dalla progettazione, e si evince come questo sia influenzato principalmente dall'angolo θ d'inclinazione dei membri rispetto all'orizzontale, tracciato in figura 8.4. In particolare si ha un valore massimo raggiungibile per il fattore R_{amp} , corrispondente ad un valore di θ di solito compreso tra 1° e 3° . Al diminuire dell'angolo sotto il valore per cui si presenta il massimo, R_{amp} diminuisce bruscamente fino ad annullarsi. Il valore massimo del fattore di amplificazione si abbassa passando dal modello teorico a quello reale. Nella maggior parte dei casi, variando parametri geometrici quali la lunghezza l , lo spessore t , l'altezza b dei membri e l'angolo θ , il fattore R_{amp} massimo raggiungibile con queste strutture si attesta difficilmente sopra valori di 10:1. La presenza di questa corrispondenza tra l'angolo θ e la risposta all'output risulta essere un grosso limite. Per tal motivo si introdurrà nei prossimi capitoli un approccio diverso per la progettazione, volto all'amplificazione dello spostamento ed eseguito con il metodo di ottimizzazione topologica. Lo scopo è di ottimizzare l'impiego dello spazio definito all'interno del design space al fine di ottenere un meccanismo ad alta frequenza di funzionamento massima, flessibilità distri-

buita ed alto rapporto di amplificazione, comunque maggiore rispetto a quello delle strutture viste. La progettazione eseguita secondo ottimizzazione topologica, si sposa bene in previsione di fabbricazione additiva della struttura, per via delle geometrie complesse che potrebbero risultarne.

Capitolo 9

Progettazione dell'amplificatore caso di studio

9.1 Ottimizzazione topologica

Nella sezione seguente verrà illustrato il procedimento seguito per l'utilizzo del metodo di ottimizzazione topologica secondo l'approccio detto "a percorsi di carico" o "path load approach", al fine di ottenere la geometria del meccanismo. Tale metodo di sintesi topologica è incorporato in un algoritmo all'interno di un codice MATLAB, utilizzabile come interfaccia per l'ottimizzazione di una vasta gamma di CM e contenente un modulo per la risoluzione di analisi lineari agli elementi finiti. Il caso di studio, può essere definito come un SISO, Single Input Single Output, ovvero un meccanismo con un solo ingresso ed una sola uscita. Ha come obiettivo principale quello di creare un meccanismo ad alto vantaggio geometrico, ovvero che possa produrre il massimo spostamento in uscita, a partire da un valore di spostamento all'ingresso imposto pari a $40 \mu\text{m}$. Tale valore è stato scelto in base allo spostamento generato da un pacco di celle piezoelettriche della lunghezza di 4 cm. Il carico F_{out} sulla porta d'uscita è di 0.01 N. L'obiettivo può essere ottenuto impostando come funzione obiettivo per lo studio topologico la massimizzazione del valore di MPE, Mutual Potential Energy, entità che rappresenta l'energia di deformazione all'output. Questo garantisce che lo spostamento in una certa direzione all'output sia massimo, per un fissato spostamento in input.

Come già ampiamente esposto nel capitolo sull'ottimizzazione topologica, gli step che ci porteranno alla topologia cercata possono essere riassunti in:

- **Specificazione del problema:**
 - Definizione del design domain
 - Definizione delle condizioni al contorno
- **Parametrizzazione del design domain**
 - Discretizzazione del design domain
 - Definizione delle variabili di progetto
- **Ottimizzazione Topologica:**
 - Definizione delle funzioni obiettivo
 - Scelta ed implementazione del metodo di ottimizzazione

9.1.1 Definizione del design domain

Il primo passo per l'ottimizzazione topologica della geometria è la definizione del design domain. Il design domain circoscrive la regione all'interno della quale la struttura dovrà essere contenuta. Inoltre, vengono fissate in questa fase le condizioni al contorno del problema che, per il caso di studio, sono:

- Posizione delle porte di input ed output
- Ampiezza e direzione degli spostamenti di input ed output
- Ampiezza e direzione del carico esterno applicato all'output

In figura 9.1 vi è una rappresentazione grafica del design domain, impostato sul software in cui è implementato il codice MATLAB e i cui dati sono schematizzati in tabella 9.1.

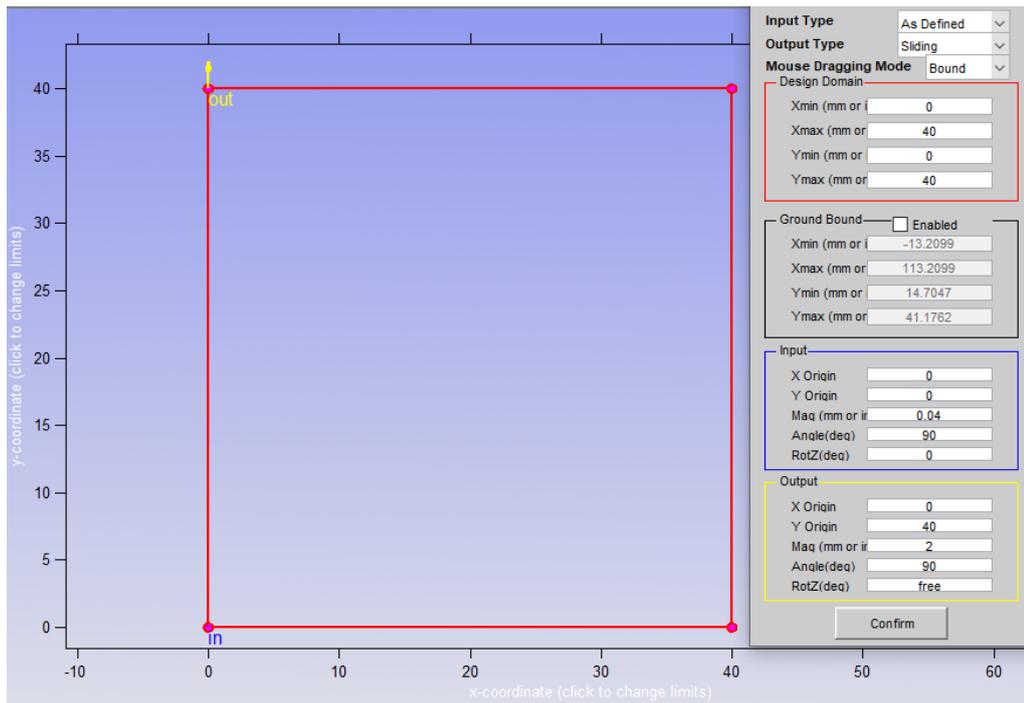


Figura 9.1: *Definizione del design domain*

$X_{MIN}[\text{mm}]$	$Y_{MIN}[\text{mm}]$	$X_{MAX}[\text{mm}]$	$Y_{MAX}[\text{mm}]$
0	0	40	40

Tabella 9.1: *Coordinate di definizione del design domain*

Le condizioni al contorno relative alla posizione $(x; y)$ di input ed output, ai rispettivi vettori spostamento Y_{in} e Y_{out} , sono schematizzate in tabella 9.2.

<i>Input</i> $(x;y)$	<i>Output</i> $(x;y)$	$Y_{in} [\text{mm}]$	$Y_{out}[\text{mm}]$	$Y_{in} [^\circ]$	$Y_{out}[^\circ]$
0;0	0;40	0,04	2	90	-90

Tabella 9.2: *Dati sulle condizioni al contorno*

Come è possibile notare, il design domain è un'area rettangolare di dimensioni $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$. La scelta delle dimensioni si rifà agli ingombri con cui si presentano i meccanismi bridge type precedenti, tenendo a mente che all'interno del design domain potremmo accogliere il trasduttore piezoelettrico la cui

estensione è di 4 cm. Per garantire che l'output del meccanismo sia uno spostamento lineare lungo la direzione verticale, privo di moti parassiti significativi lungo gli altri assi, la struttura è stata pensata per essere simmetrica rispetto all'asse y . A tal fine il design domain, utilizzato nella progettazione ed illustrato in figura 9.1, rappresenta solo la metà destra del design domain totale. Inoltre la direzione di Y_{out} è stata scelta opposta a quella di Y_{in} , ovvero il meccanismo deve non solo amplificare lo spostamento all'input ma allo stesso tempo invertirne la direzione. Questo al fine di testare le capacità del metodo di ottimizzazione topologica. Nella scelta delle condizioni al contorno, non è stata fissata a priori la posizione dei vincoli all'interno del design domain, per evitare di limitare il campo di soluzioni idonee ed aumentare la libertà di sintesi del codice di calcolo. Il carico esterno da vincere è applicato all'output e la direzione è quella dell'asse y , discorde allo spostamento Y_{out} . Il materiale di partenza scelto, in prima approssimazione, è un polimero termoplastico ABS le cui proprietà sono mostrate in tabella 9.3.

Proprietà ABS				
E [MPa]	ν	ρ [g/cm^3]	σ_Y [MPa]	σ_R [MPa]
2480	0,3	1,03	34,4	68,9

Tabella 9.3: *Proprietà materiale ABS*

Successivamente, tramite analisi FEM, lo studio sull'influenza del materiale nel funzionamento della struttura verrà approfondito al fine di una selezione più accurata. Infine è stata fissato un valore t_z pari a 3 mm e costante in tutta la struttura, dimensione nella direzione z uscente dal design domain.

9.1.2 Parametrizzazione del design domain

L'ottimizzazione topologica secondo il path load approach non prevede che il design domain definito venga discretizzato in una serie di elementi a costituire una mesh convenzionale, fine abbastanza da consentire la generazione di un numero consistente

di topologie che rispettino le condizioni di bordo del problema. Infatti, il codice di calcolo genera una serie di topologie che interpolano i punti essenziali definiti all'interno del design domain quali input, output e supporti se imposti. I percorsi creati passano anche per una serie di punti di interconnessione. L'assegnazione, dunque, delle variabili di progetto i cui valori costituiranno lo spazio delle soluzioni tra cui ricadrà la nostra topologia, non può essere basata su proprietà di ciascun elemento della mesh, come nel caso convenzionale, con la densità. Una variabile di progetto assegnabile è invece quella sul valore del numero di punti di interconnessione che avrà la struttura, nel nostro studio limitato ad un valore massimo di 8 punti, come compromesso tra la necessità di avere una struttura priva di intersezioni tra i membri ed un sufficiente numero di soluzioni possibili tra cui cercare la topologia finale. La posizione dei punti di interconnessione è un'altra variabile di progetto ma non è stato posto alcun vincolo su di essa, se non quello di rientrare all'interno del design domain. Nel nostro studio i punti di interconnessione, potendo muoversi liberamente all'interno del design domain, verranno interpolati da una serie infinita di percorsi. Ovviamente il codice, assegnando una variabile binaria di esistenza ad ogni percorso, stabilirà quali di essi vanno scartati e quali invece andranno a definire la forma della struttura, come già discusso nel capitolo 8.2.2. Una ulteriore variabile assegnata è quella sullo spessore della struttura. In tal senso, è stato imposto il valore massimo e minimo sul piano piano $x-y$, avendo già definito fissa e costante in tutta la struttura la dimensione lungo l'asse z . Il valore limite inferiore è di natura tecnologica in quanto è legato allo spessore minimo mediamente realizzabile con precisione nei processi di fabbricazione additiva. Pertanto, il range di variazione è stabilito tra 0,5 mm e 1,5mm.

9.1.3 Ottimizzazione Topologica

L'ottimizzazione topologia prevede che venga assegnata una funzione obiettivo per la risoluzione del problema di studio e, nel caso in esame, è stata scelta la MPE con l'intenzio-

ne di massimizzare la deformazione all'uscita nella direzione verticale ovvero lo spostamento all'output Y_{out} . Il metodo di ottimizzazione scelto è il GA o Genetic Algorithm.

Si giunge ad una formulazione completa del problema di ottimizzazione del caso di studio riportata in tabella 9.4, contenente le variabili di progetto ed il range di variabilità assegnato, la funzione obiettivo scelta e le condizioni al contorno.

<i>Funzione obiettivo</i>	<i>Variabili di progetto</i>
$\max (\text{MPE})$	$pathSeq, pTop, pDim, interConLocation$
<i>Condizioni al contorno e parametri fissi</i>	<i>Descrizione</i>
1- $0,5 < pDim_{i,j} < 1,5$	Range per lo spessore
2- $(0;0) < interConlocation < (40;40)$	Design Domain
3- $\sum_{i=pathInOut} pTop_i < 1$	Vincolo di struttura connessa
4- $\sum_{i=pathInFixUpathFixOut} pTop_i > 1$	Vincolo di esistenza supporti
5- $\sigma < 34.45MPa$	Limite tensionale
6- $h_e = pTop_i \times pDim_{i,j}$	Spessore sul piano $x - y$
7- $d = K^{-1}F$ e = numero di elementi	Equilibrio FEA

Tabella 9.4: *Formulazione del problema di ottimizzazione del caso di studio*

Per una comprensione migliore dei termini in tabella e del problema formulato si rimanda alla sezione 8.2.2.

9.1.4 Risultati

I risultati forniti dal codice di calcolo per il problema impostato vengono mostrati in figura 9.2:

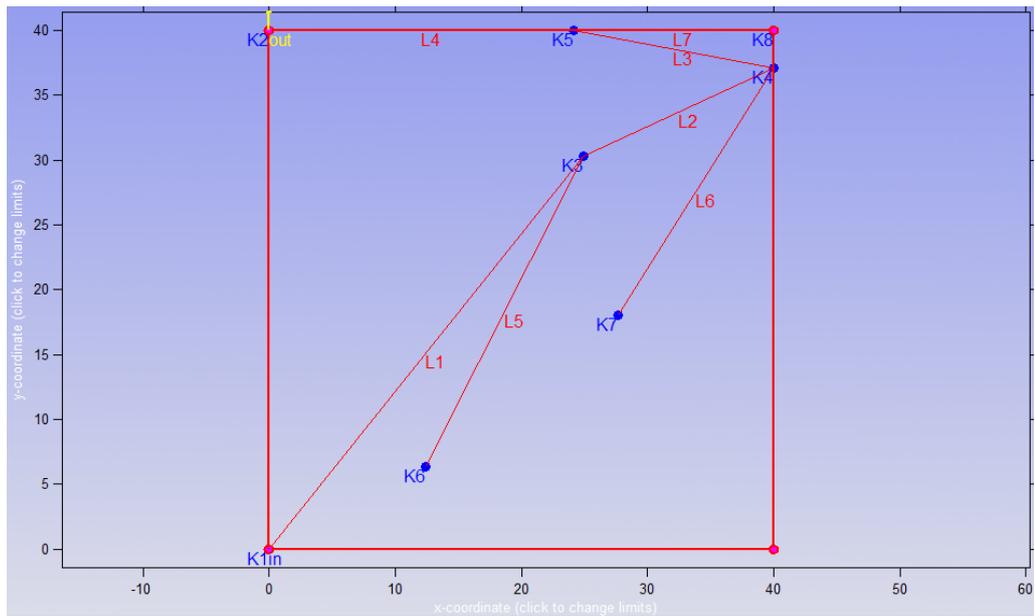


Figura 9.2: *Topologia e geometria generata: Disposizione dei punti e interpolazione della geometria strutturale*

Il codice di calcolo essenzialmente esegue tre operazioni contemporaneamente: ottimizzazione della topologia, della geometria e della dimensione degli elementi. In figura 9.3 è illustrato a parte il risultato dell'ottimizzazione dimensionale della struttura, anche se i valori della variabile che definisce la dimensione per ogni elemento, ovvero gli spessori $pDim_{i,j}$, sono stati selezionati dal codice di calcolo simultaneamente ai valori delle variabili topologiche e geometriche. Queste ultime, definiscono rispettivamente la sequenza dei punti da interpolare e il numero di punti di interconnessione.

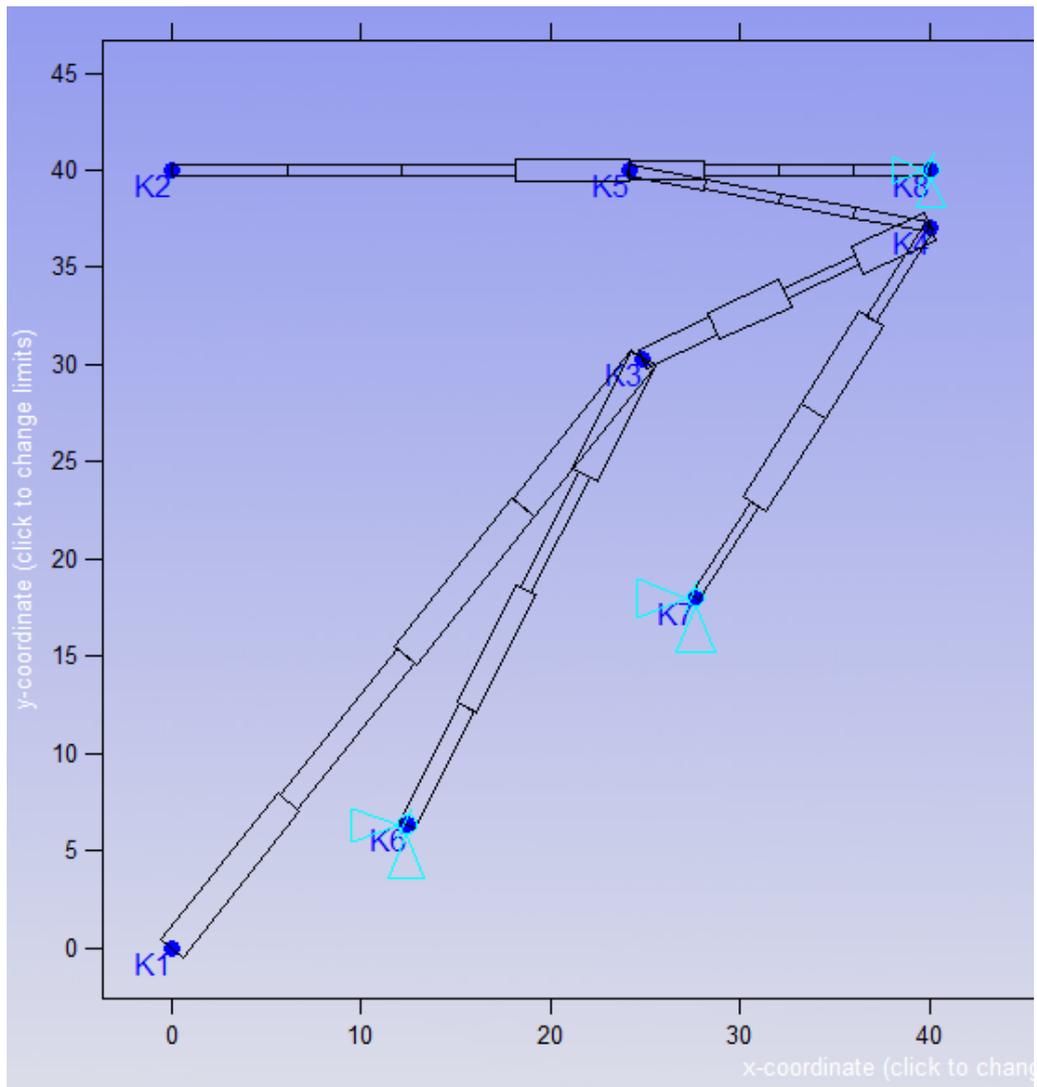


Figura 9.3: Risultato dell'ottimizzazione dimensionale

La struttura presenta tre vincoli a incastro nei punti K6, K7, K8 e tre punti di interconnessione K3, K4, K5. I punti K1 e K2 sono rispettivamente nodo di input ed output del CM. Su K1 è stato imposto lo spostamento $Y_{IN} = 0.04mm$ ed il vincolo di pura traslazione lungo l'asse y , mentre su K2 nessun vincolo è stato imposto. Le coordinate dei punti sono elencate in tabella 9.5.

<i>Punti</i>	<i>Coordinate (x;y)</i>
K1	(0 ; 0)
K2	(0 ; 40)
K3	(24.875 ; 30.2972)
K4	(40 ; 37.0863)
K5	(24.125 ; 40)
K6	(12.4367 ; 6.3158)
K7	(27.6248 ; 17.9995)
K8	(40 ; 40)

Tabella 9.5: *Coordinate dei punti fondamentali e di interconnessione*

La struttura è costituita da 28 elementi a sezione rettangolare di spessore, 3mm lungo l'asse z e variabile sul piano $x - y$ tra 0,5mm e 1,5mm, come imposto. Il software utilizzato per l'ottimizzazione propone, oltre ad un codice MATLAB per la risoluzione del problema, un modulo per lo sviluppo di analisi agli elementi finiti lineari della struttura. I risultati di queste analisi servono a dare una valutazione in prima approssimazione delle caratteristiche di amplificazione della struttura, dell'entità delle deformazioni e degli stati tensionali. Infatti, potendo subire grandi deformazioni, la struttura sarà comunque testata successivamente mediante una più accurata analisi non lineare, così da poter verificare eventuali margini di errore. Ad ogni modo, i risultati delle analisi FEM riportano una mappa di spostamenti in direzione y della struttura mostrata in figura 9.4:

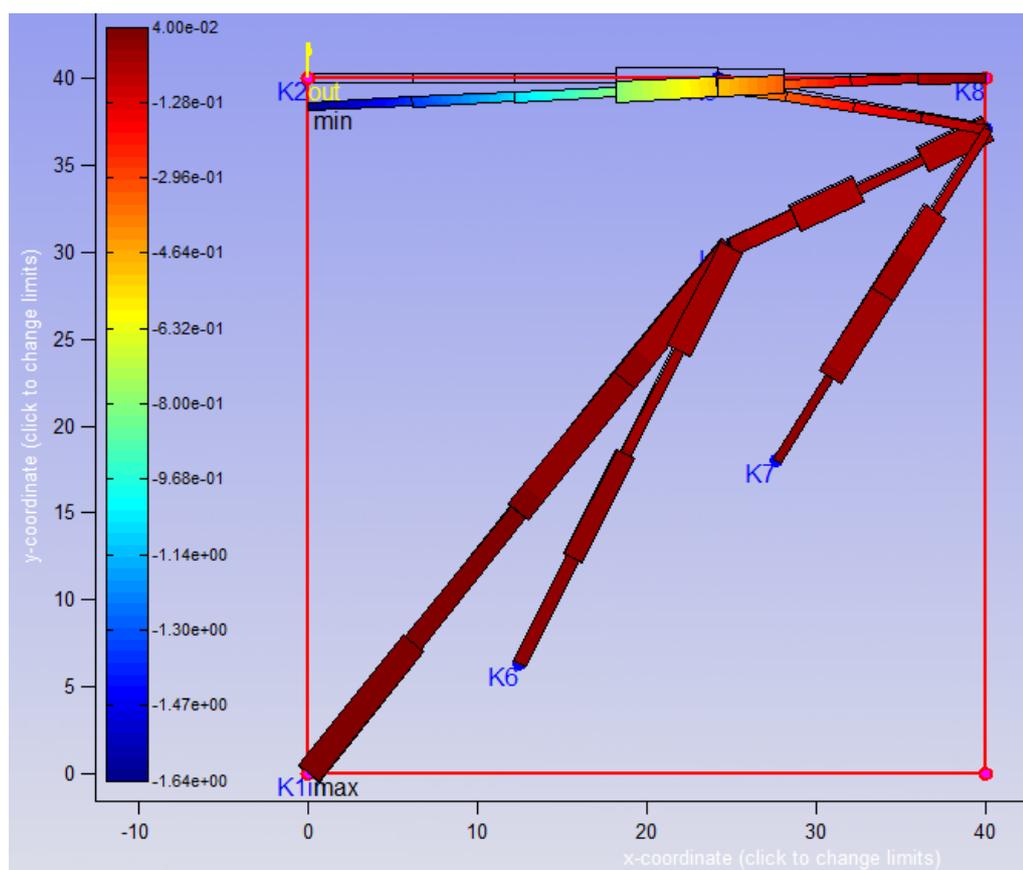


Figura 9.4: *Mapa degli spostamenti lungo y della struttura*

Dal grafico in figura 9.4 si evince come lo spostamento nel punto K1 di input sia quello assegnato Y_{IN} , pari a 0.04mm. Lo spostamento è stato amplificato fino ad un valore di Y_{OY} pari a 1,614 mm all'output. Questo valore è da ritenersi il massimo ideale in quanto subirà variazioni in seguito alla composizione delle due metà del meccanismo, all'ipotesi di vincoli infinitamente rigidi e ad una analisi più accurata. Infatti, nelle condizioni al contorno del problema non sono stati limitati i gradi di libertà per il nodo di output che può percorrere una traiettoria circolare durante la deformazione. Di contro, nel caso reale, la simmetria del sistema ottenuta con la composizione delle due metà limita i g.d.l. di traslazione lungo l'asse x e rotazione rispetto all'asse z del nodo di output ed input, garantendo la mancanza di moti parassiti. In figura 9.5 è rappresentata una distribuzione della tensione totale di Von Mises molto approssimativa lungo la struttura:

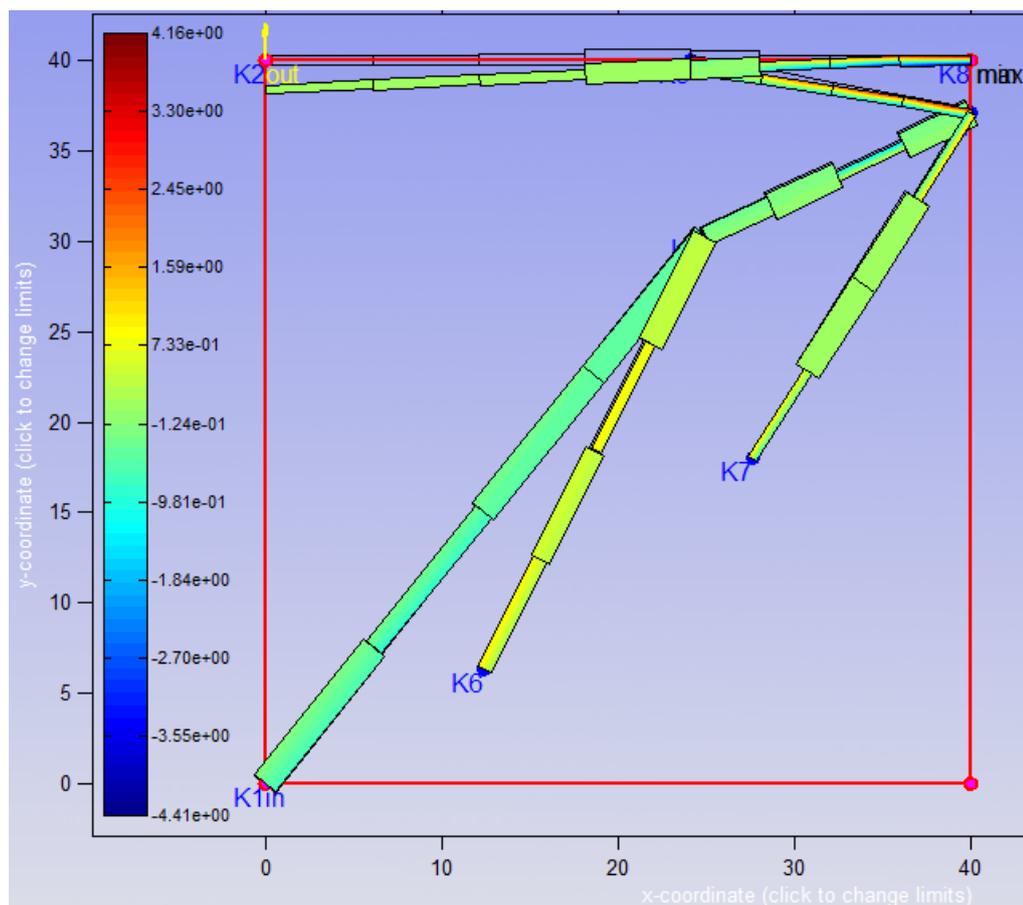


Figura 9.5: *Distribuzione della tensione di Von Mises*

Da questa analisi delle tensioni nei primi stadi della progettazione è stato possibile intuire come l'entità degli stress associati alla struttura, il cui valore massimo riportato è dell'ordine di 4 MPa, sia comunque ben al di sotto delle condizioni critiche del materiale di partenza, la cui tensione di snervamento vale $\sigma_Y = 34MPa$.

9.2 Geometria tridimensionale

La geometria ottimizzata dell'amplificatore caso di studio è stata esportata in formato 2D (.igs) dal software di calcolo ed importata sul software di modellazione CAD Solidworks, per la realizzazione del modello 3D della struttura. In particolare, è stata effettuata la composizione delle due metà del meccanismo specchiando rispetto all'asse y la geometria 2D importata.

Quest'ultima è stata estrusa in direzione z , di una quantità pari allo spessore t_z di 3mm, ottenendo il modello mostrato in figura 9.6 e 9.7:

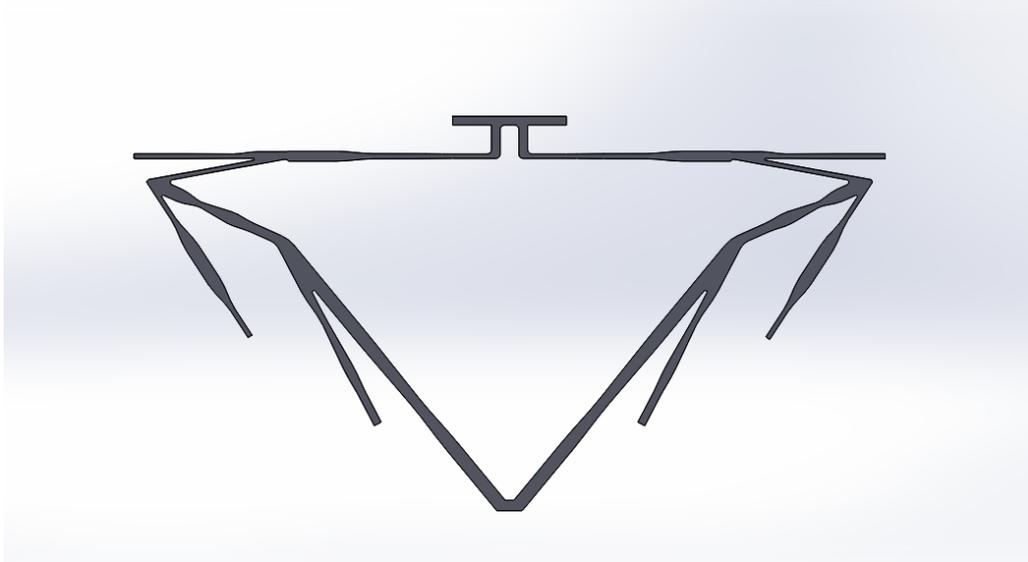


Figura 9.6: *Vista frontale CM tridimensionale*

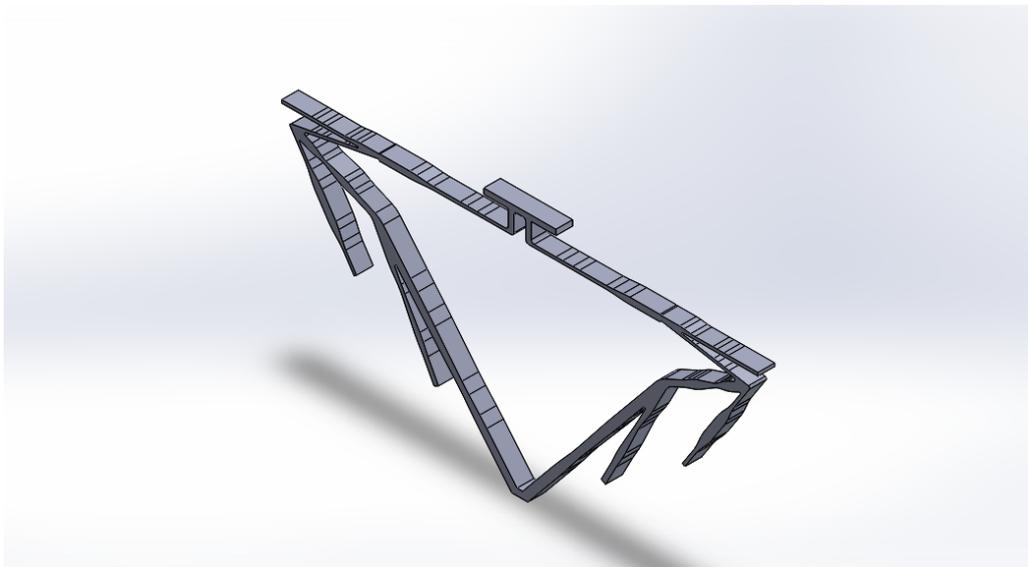


Figura 9.7: *Vista isometrica CM*

In figura 9.8 vi è una rappresentazione assonometrica su tavola 2D della struttura con alcune quote relativi agli ingombri ed allo spessore. Si noti che la congiunzione dei nodi di output

delle due metà che compongono la struttura è stata eseguita con un collegamento come quello rappresentato di spessore costante pari a 1 mm, che consente una superficie piana di interfaccia all'output.

9.3 Analisi agli elementi finiti

9.3.1 Analisi FEM

In questa sezione verrà trattata l'analisi agli elementi finiti del modello 3D ottenuto, al fine di effettuare un confronto con i risultati dell'ottimizzazione topologica. Il materiale scelto in questa prima fase di analisi è un polimero termoplastico ABS, in accordo con le proprietà del materiale utilizzate nel codice di calcolo. Il software utilizzato è Ansys 2019 R3 e le analisi condotte sono di tipo non lineare, giacché l'entità degli spostamenti coinvolti nel funzionamento della struttura è elevata e potrebbe invalidare i risultati di una analisi lineare. L'analisi è stata dunque eseguita imponendo inizialmente le condizioni al contorno ovvero un incastro nei punti di supporto della struttura, uno spostamento di 0,04 mm sulla porta di ingresso in direzione y positiva ed infine un carico esterno in direzione y negativa di 0,01 N sulla porta di output. Inoltre, è stato suddiviso lo spostamento totale applicato all'input in 30 step uguali della durata di 0.033s ciascuno, a formare un intervallo temporale totale di 1s tra la condizione a spostamento applicato nullo e quella a $Y_{in} = 0.04mm$. Tale suddivisione in step ha reso possibile la raccolta dei dati sulle deformazioni, gli spostamenti e le tensioni sperimentate dalla struttura all'avanzare dello spostamento all'input, da 0 fino al valore massimo. I risultati delle analisi hanno fornito una distribuzione della tensione equivalente di VM mostrata in figura 9.9:

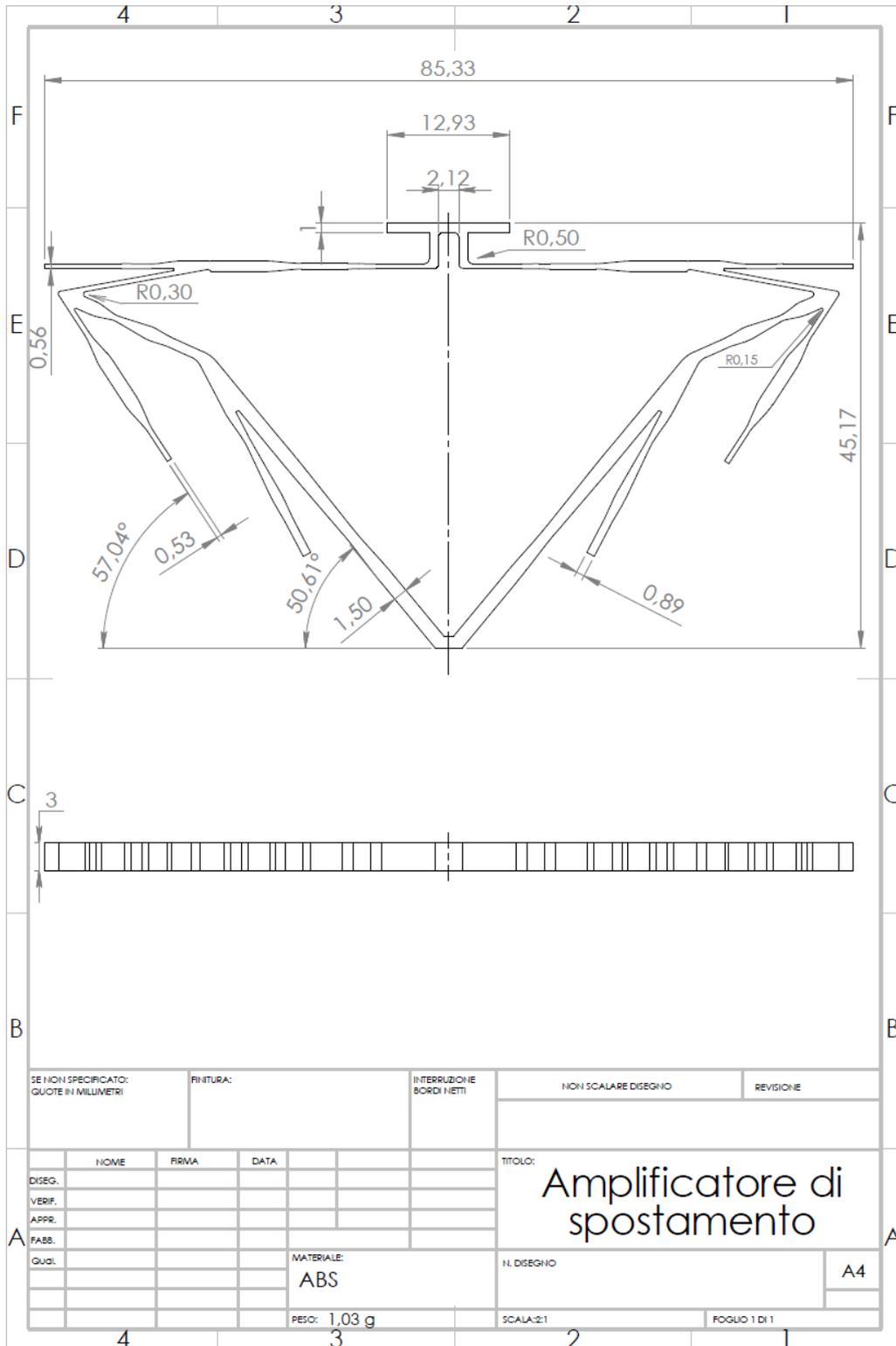


Figura 9.8: *Struttura in tavola 2D quotata*

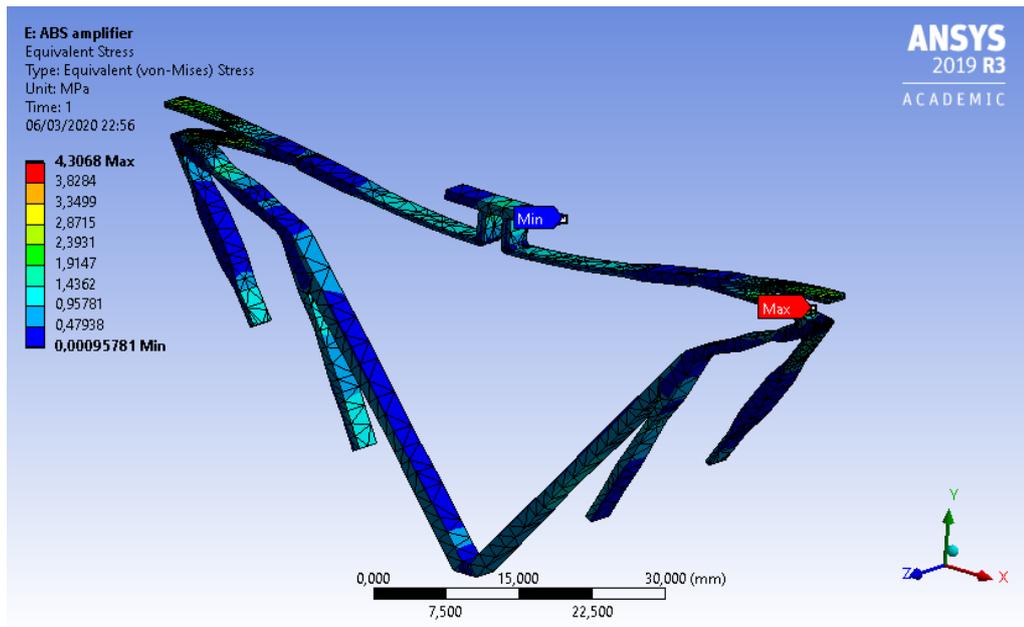


Figura 9.9: *Distribuzione della tensione equivalente di Von Mises*

La zona più sollecitata della struttura riporta un valore massimo di tensione positiva $\sigma_{MAX} = 4.3068 MPa$ ed un valore minimo positivo pari $\sigma_{MIN} = 0.9578 \times 10^{-3} MPa$, quest'ultimo nella zona meno sollecitata corrispondente alla superficie piana di interfaccia output. In figura 9.10, una rappresentazione locale delle tensioni nella zona più sollecitata.

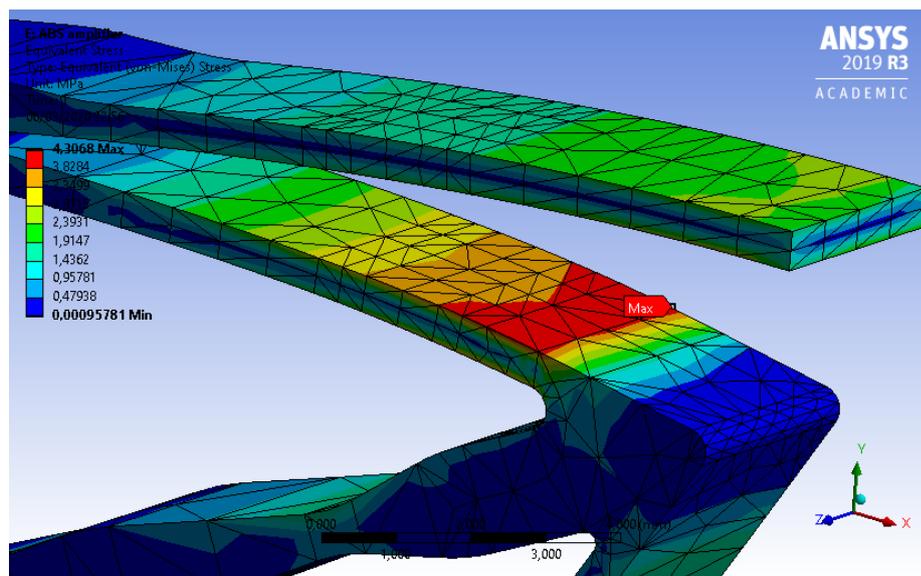


Figura 9.10: *Distribuzione della tensione equivalente di Von Mises nella zona più sollecitata*

Come si può notare in figura 9.11 e come ci si aspettava, la deformata in scala 4,8:1 ha un punto di flesso e due punti di curvatura massima per via della rotazione impedita all'output. Le tensioni saranno massime in corrispondenza dei punti a curvatura massima, poiché è lì che si concentrano le deformazioni maggiori. Un'altra considerazione può essere fatta sul punto di flesso della struttura che, risultando a spessore più robusto rispetto agli altri membri, prova una efficiente distribuzione del materiale del metodo di ottimizzazione topologica.

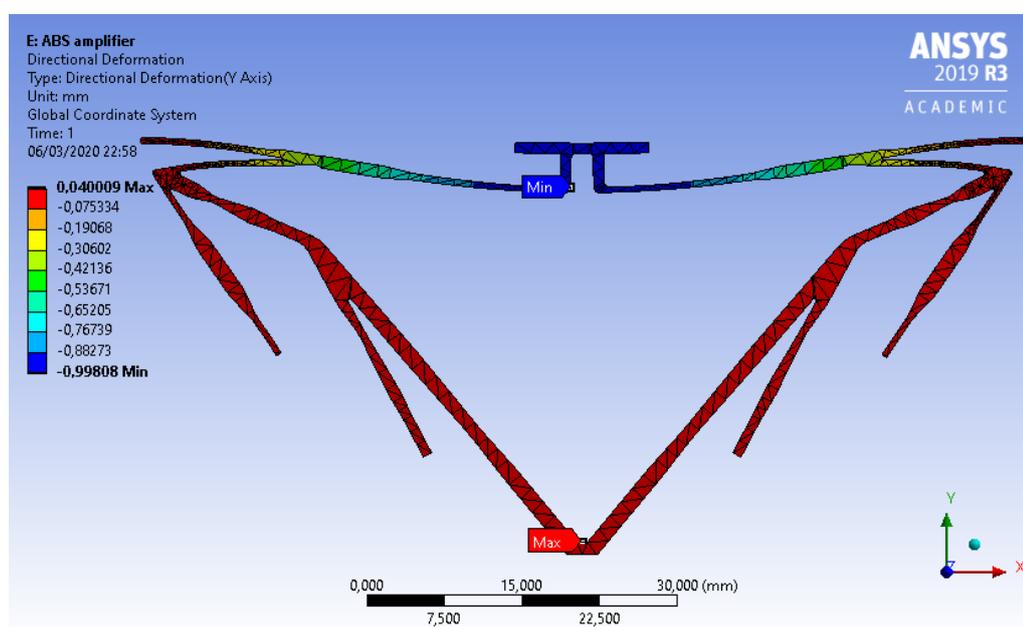


Figura 9.11: *Distribuzione degli spostamenti in direzione y lungo la struttura*

Nella figura sovrastante è mostrata la distribuzione della componente di spostamento lungo l'asse y della struttura. Il valore minimo è pari a $y_{min} = -0.998mm$, di segno negativo perché discorde all'asse y . Lo spostamento sulla superficie piana di interfaccia dell'output ha un valore pari a $Y_{OUT} = -0,98639mm$. Dunque le analisi forniscono un valore di Y_{OUT} minore rispetto a quello teorico pari a $Y_{OUT(TH)} = -1,64mm$, ottenuto a seguito dell'ottimizzazione topologica. Il motivo di tale deviazione è in primo luogo attribuibile alla composizione delle due metà del meccanismo, in quanto il nodo di output non può percorrere una traiettoria circolare essendo vincola-

to a muoversi lungo y . Gli spostamenti lungo x all'output si annullano per la simmetria del meccanismo rispetto all'asse y . Inoltre, rispetto alla geometria ottimizzata, le variazioni di sezione discrete tra gli elementi sono state omogeneizzate lungo la struttura. Ancora, le analisi sono più accurate. Risulta interessante schematizzare in tabella 9.6 le deviazioni tra i risultati precedenti e quelli appena esposti:

	Ideale	Reale
Y_{IN} [mm]	0,04	0,04
Y_{OUT} [mm]	-1,64	-0,99
R_{amp}	41	24,66
$Errore_{R_{amp}}$ [%]		39,8
σ_{MAX} [MPa]	4,16	4,30
$Errore_{\sigma}$ [%]		3,4

Tabella 9.6: *Deviazioni di R_{amp} e σ_{MAX} , tra caso ideale e reale*

Il fattore di amplificazione pari a 24,66, riportato in tabella, è da intendersi nella condizione di spostamento applicato all'input di 0.04mm.

Andamenti che sono risultati interessanti per caratterizzare il funzionamento del meccanismo sono proposti dai grafici in figura 9.12, 9.13 e 9.14 che legano rispettivamente il fattore di amplificazione R_{amp} , la rigidità all'input K_{in} e lo spostamento in output Y_{OUT} allo spostamento sulla porta di input Y_{IN} .

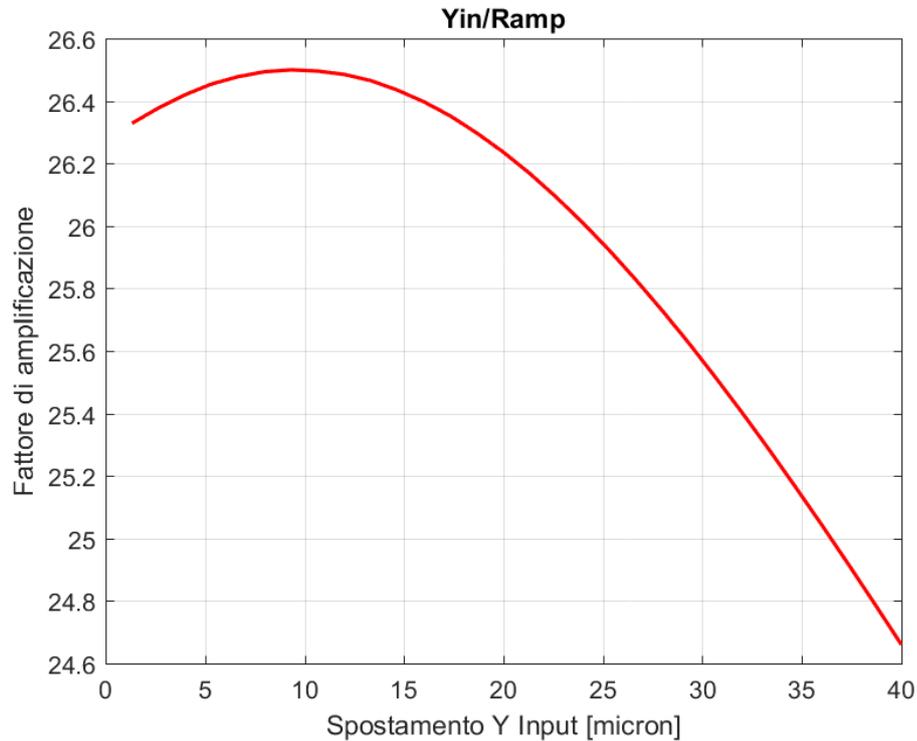


Figura 9.12: *Andamento di R_{amp} in funzione di Y_{IN}*

Il grafico in figura 9.12 mostra l'andamento del fattore di amplificazione R_{amp} in funzione dello spostamento Y_{IN} applicato. La curva non viene diagrammata a partire dal valore ad $Y_{IN} = 0$, che costituisce ovviamente un output nullo, bensì da $Y_{IN} = 1,33\mu m$ al fine di poter apprezzare il tratto della curva con maggiore variabilità. L'andamento proposto ha un massimo per $9,33\mu m \leq Y_{IN} \leq 10\mu m$, dove $R_{ampmax} = 26,5$, e successivamente una rapida diminuzione fino al valore minimo per $Y_{IN} = 40\mu m$. Il tratto decrescente della curva è ben approssimato da una iperbole per valori di $Y_{IN} \geq 25\mu m$. La variazione massima apprezzata è pari al 6,9 % del valore massimo. La rigidezza K_{in} all'interfaccia di input è definita come:

$$K_{in} = \frac{F_{in}}{Y_{in}}$$

il cui andamento è illustrato in figura 9.13:

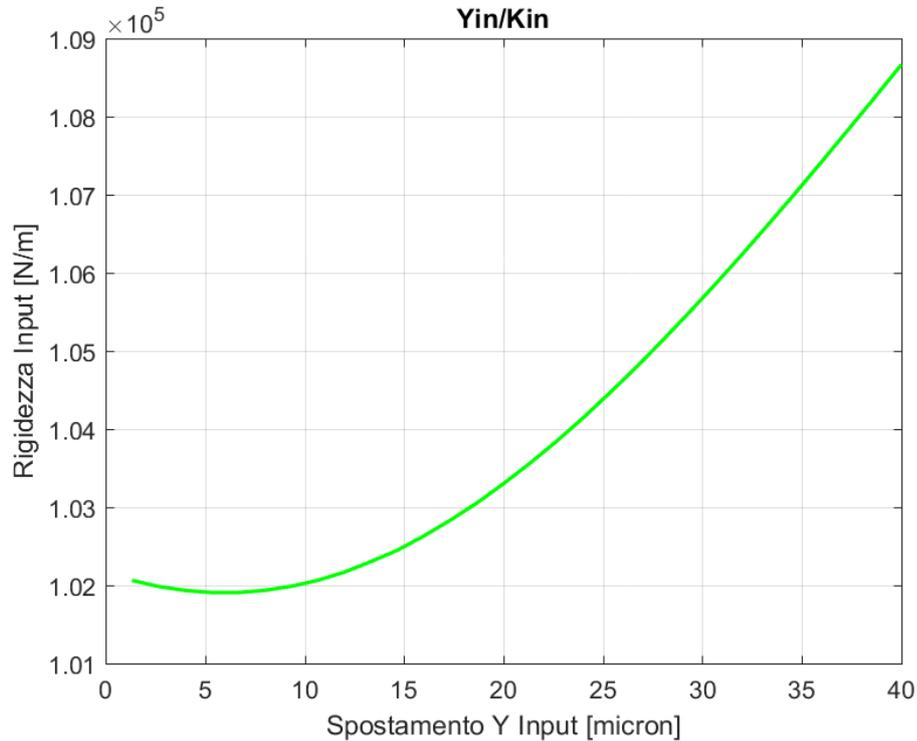


Figura 9.13: *Andamento di K_{in} in funzione di Y_{IN}*

La rigidezza K_{in} all'input del meccanismo rappresenta una correlazione tra forza F_{in} e spostamento da applicare all'input Y_{IN} , ed è risultata essere dipendente dal valore di quest'ultimo. Infatti, coerentemente con l'andamento proposto per il fattore R_{amp} , la rigidezza presenta anch'essa un andamento iperbolico. K_{in} presenta un minimo per valori di $5.33\mu m \leq Y_{IN} \leq 8\mu m$ dove $K_{in} = 101906N/m$, successivamente per valori crescenti di Y_{IN} si ha un andamento crescente fino al massimo per $Y_{IN} = 0.04mm$ dove $K_{in} = 108667N/m$. Dunque all'avanzare dello stato di deformazione si ha un incremento della forza in ingresso necessaria per il progredire della deformazione stessa e comunque, a causa della diminuzione contemporanea di R_{amp} , con un effetto utile minore sullo spostamento prodotto all'output. Infine in figura 9.14, è illustrato l'andamento della caratteristica input/output:

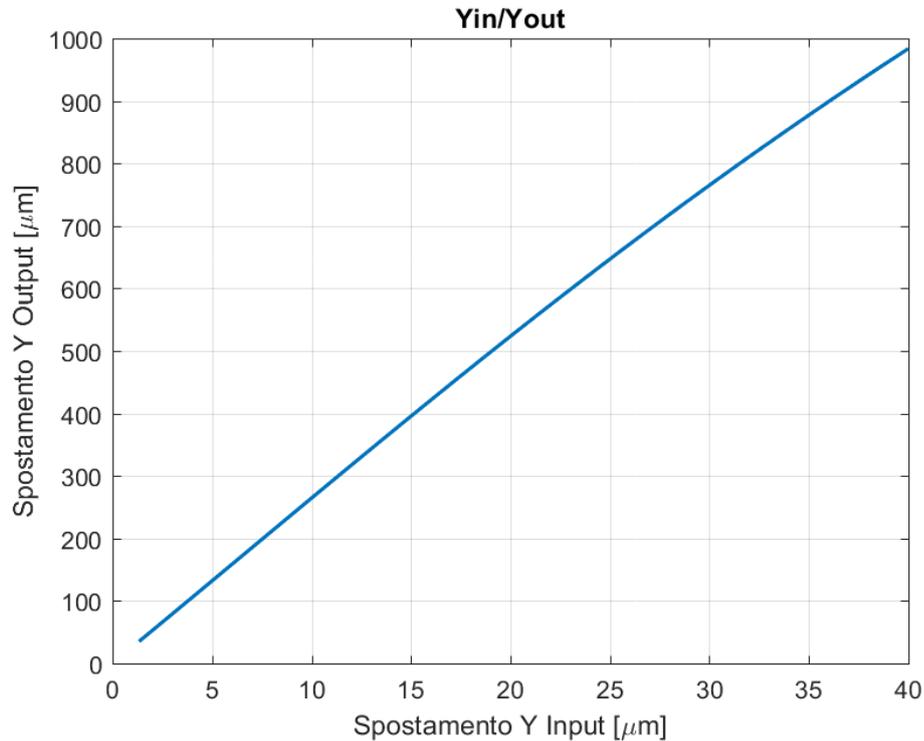


Figura 9.14: *Andamento di Y_{OUT} in funzione di Y_{IN}*

In particolare si sottolinea la non linearità dello stesso, presentando la pendenza massima per un valore di $9.33\mu\text{m} \leq Y_{IN} \leq 10\mu\text{m}$ dove si ha, come ci si aspettava, il fattore di amplificazione massimo $R_{ampmax} = 26,5$.

9.4 Design of experiment

In questa sezione si affronterà la campagna di analisi eseguita per valutare l'influenza della variazione di alcuni parametri sulle caratteristiche di funzionamento dell'amplificatore di spostamento, al fine di selezionare la configurazione dello stesso con il miglior compromesso tra i valori che risultano per determinate figure di merito scelte. Tali figure di merito, che guideranno la scelta della configurazione migliore, tengono in considerazione la realizzazione finale dell'amplificatore mediante fabbricazione additiva e lo scopo principale dello stesso, ovvero la massimizzazione dello spostamento all'output Y_{OUT} . Per questo motivo è stata impostata una sequenza di analisi FEM del CM secondo

un cosiddetto "Design Of Experiment", DOE. In particolare, sono state selezionate due variabili di influenza principali per l'amplificatore: materiale e spessore minimo s_{min} della struttura sul piano $x - y$. L'analisi di influenza del materiale sul funzionamento della struttura ha un duplice valore, diretto ed indiretto. In primo luogo è volta alla valutazione del funzionamento al variare delle proprietà del materiale polimerico utilizzato, principalmente modulo di Young E . In maniera indiretta, il DOE ha permesso invece di selezionare, una volta selezionato il materiale, il processo di fabbricazione additiva con polimeri da utilizzare. L'influenza della variabile spessore minimo s_{min} è stata studiata invece allo scopo principale di caratterizzare le performance di amplificazione del meccanismo, sebbene abbia anche una certa rilevanza sull'accuratezza con cui vengono prodotte le parti in additive manufacturing. La selezione dello spessore minimo è stata orientata principalmente nella direzione di massimizzazione delle prestazioni di amplificazione, mantenendo allo stesso tempo una distribuzione delle tensioni agenti quanto più distante dal limite di snervamento. Questo per la necessità sia di lavorare in campo elastico che di preservare la vita a fatica del meccanismo in condizioni di funzionamento ciclico. L'analisi di natura tecnologica sullo spessore minimo s_{min} realizzabile con i processi fabbricazione additiva e sulla dimensione minima di altre feature è stata vastamente affrontata in altri studi, producendo regole per la progettazione delle parti destinate a processi di AM a cui si è riferiti per l'impostazione del limite inferiore $s_{min} = 0.5mm$, sia nell'impostazione del problema di ottimizzazione topologica che nell'impostazione del DOE. Lunge quindi dagli obiettivi dello studio corrente. Il DOE del caso di studio è stato impostato facendo variare il materiale e lo spessore minimo s_{min} , generando quindi 16 totali possibili configurazioni per la struttura. In particolare è stato posto un range di variazione pari a $0.5mm \leq s_{min} \leq 1mm$, suddiviso in step uguali pari circa a 0.17 ciascuno. I materiali di cui viene testata l'influenza sono relativi a due processi di fabbricazione additiva: Stereolitografia ed SLS. Le loro proprietà, modulo elastico E , tensione limite a trazione e allungamento percentuale a rottura sono schematizzate nella tabella in figura

9.15 e, nel caso dei materiali per la stereolitografia, sono riferite ai nomi commerciali delle resine fotopolimeriche fornite dalle case produttrici:

Proprietà	Materiale			
	Stereolitografia			SLS
	G-STRONG	S-HARD	PR-S	PA12
Modulo di Young [MPa]	1750	2560	2403	1700
Tensione di rottura a trazione [MPa]	30	49	66	50
Allungamento a rottura [%]	4	3,8	3,5	20

Figura 9.15: *Proprietà dei polimeri per AM coinvolti nel DOE*

In tabella 9.7, è mostrata la matrice che racchiude i casi di studio analizzati, tra cui è stata selezionata la coppia materiale/ s_{min} del modello finale, enumerati da 1 a 16.

<i>DOE</i>	<i>Materiale</i>			
$s_{min}[mm]$	PA12	PR-S	S-HARD	G-STRONG
0.5	1	2	3	4
0.67	5	6	7	8
0.84	9	10	11	12
1	13	14	15	16

Tabella 9.7: *Impostazione Design of Experiment: da 1 a 16 le configurazioni ammesse dalle variabili di influenza*

Per la valutazione di ognuno dei 16 casi in tabella, sono state eseguite analisi agli elementi finiti non lineari al fine di raccogliere dati sugli andamenti nella struttura delle deformazioni e tensioni di VM equivalenti, dello spostamento prodotto all'output Y_{OUT} e della forza F_{IN} richiesta all'input al progredire della deformazione. Alcune di quelle elencate, sono state scelte come figure di valutazione per il confronto delle casistiche e vengono specificate di seguito insieme ai loro corrispettivi parametri:

- **Performance di amplificazione**

Valore del fattore di amplificazione R_{amp}

- **Sollecitazioni**

Tensione equivalente di VM agente massima σ_{VM}

- **Peso della struttura e consumo di materiale**

Massa m

Ogni figura di valutazione ha un valore massimo attribuibile pari a 10 per ciascuna configurazione, che corrisponde al valore massimo reale riscontrato per quella figura tra i 16 casi. Di conseguenza, in relazione al massimo, potranno essere scalati i valori da assegnare ad ogni caso. Tali valori, variabili da 1 a 10, sono stati successivamente normalizzati, ovvero rapportati al valore massimo assegnabile di 10. Il valore normalizzato è ottenuto tramite le seguenti due relazioni analitiche a seconda del fatto che la figura influisca positivamente o negativamente sulla scelta di una determinata configurazione. Ad esempio, un aumento delle tensioni agenti o della massa di materiale coinvolto, avendo una influenza negativa sulle performance della struttura, sul peso e sui costi, sarà normalizzato con una relazione del tipo:

$$Sollecitazioni_{NORM} = 100 - \frac{\sigma_{VM}}{\sigma_{VM_{MAX}}} \cdot 100 \quad (9.1)$$

$$Peso_{NORM} = 100 - \frac{m}{m_{MAX}} \cdot 100 \quad (9.2)$$

Al contrario invece, l'aumento del fattore di amplificazione R_{amp} indirizza positivamente la scelta della configurazione e quindi verrà calcolato come :

$$Amplificazione_{NORM} = \frac{R_{amp}}{R_{amp_{MAX}}} \cdot 100 \quad (9.3)$$

Sono stati individuati successivamente i fattori di peso di ognuna delle figure di valutazione normalizzate. Per fare ciò, è stata confrontata l'importanza di ciascuna figura rispetto alle altre nel raggiungimento dell'obiettivo del caso di studio. Infine, è stata calcolato l'indice di valore per ogni configurazione come risultato della valutazione su scala 100, il cui massimo corrisponderà alla configurazione scelta. Si è partiti dunque con

l'assegnazione dei valori ad ogni figura di valutazione ed, a tale scopo, sono state eseguite 16 analisi FEM per caratterizzare le varie configurazioni. Tra i risultati prodotti, sono mostrati quelli utili alla risoluzione del DOE in tabella 9.8 ovvero i valori del fattore di amplificazione, della tensione massima di VM e della massa ottenuti per ogni caso.

Figura di valutazione	Sicurezza	Performance di amplificazione	Peso della struttura
Parametro	$\sigma_{VM}[MPa]$	R_{amp}	Massa $m[g]$
Caso 1	2,9451	24,59675	0,973994
Caso 2	4,163	24,59675	0,973994
Caso 3	4,435	24,59675	0,973994
Caso 4	3,0318	24,59675	0,973994
Caso 5	2,8939	17,75	1,013737
Caso 6	4,0906	17,75	1,013737
Caso 7	4,3578	17,75	1,013737
Caso 8	2,979	17,75	1,013737
Caso 9	2,3417	11,43	1,080599
Caso 10	3,31	11,43	1,080599
Caso 11	3,5263	11,43	1,080599
Caso 12	2,4105	11,43	1,080599
Caso 13	2,3124	8,37	1,148875
Caso 14	3,2686	8,37	1,148875
Caso 15	3,4822	8,37	1,148875
Caso 16	2,3804	8,37	1,148875

Tabella 9.8: *Valori reali delle figure di valutazione per ciascuna alternativa*

I valori sono dunque stati riportati in scala 10, ricordando che il valore 10 corrisponde al massimo generale verificatosi per una determinata figura di valutazione, ottenendo i valori schematizzati di seguito in tabella 9.9:

Figura di valutazione	Sicurezza	Performance di amplificazione	Peso della struttura
Caso 1	6,640586	10	8,477802
Caso 2	9,386697	10	8,477802
Caso 3	10	10	8,477802
Caso 4	6,836077	10	8,477802
Caso 5	6,525141	7,216401	8,823736
Caso 6	9,22345	7,216401	8,823736
Caso 7	9,82593	7,216401	8,823736
Caso 8	6,717024	7,216401	8,823736
Caso 9	5,280045	4,646955	9,405714
Caso 10	7,46336	4,646955	9,405714
Caso 11	7,951071	4,646955	9,405714
Caso 12	5,435175	4,646955	9,405714
Caso 13	5,21398	3,402889	10
Caso 14	7,370011	3,402889	10
Caso 15	7,851635	3,402889	10
Caso 16	5,367306	3,402889	10

Tabella 9.9: *Valori su scala 10 delle figure di valutazione per ciascuna alternativa*

Come si può notare dai dati in tabella, le performance di amplificazione, come ci si aspettava, diminuiscono all'aumentare dello spessore minimo della struttura in quanto questa risulta più rigida in alcune zone e può subire deformazioni minori, dunque generando minori spostamenti Y_{OUT} . Il fattore di amplificazione è risultato essere insensibile alle variazioni sulle proprietà del materiale e quindi dal modulo di Young. Si ricorda che la struttura lavora comunque in campo elastico. Rimanendo costanti le deformazioni massime e minime, per un certo spessore minimo, al crescere del modulo elastico la struttura ha esibito valori delle sollecitazioni crescenti. Le tensioni tendono ad abbassarsi invece all'aumentare dello spessore minimo. Una volta selezionata la configurazione migliore alla fine dell'analisi corrente, su di essa verranno approfondite le relazioni tra le variabili s_{min} e modulo di Young, tra le figure di valutazione ed altri parametri caratteristici. A questo punto, è stata eseguita la normalizzazione dei valori in tabella 9.9 utilizzando le equazioni 9.1, 9.2 e 9.3, ottenendo i valori mostrati in tabella 9.10:

Figura di valutazione	Sicurezza	Performance di amplificazione	Peso della struttura
Caso 1	33,59	100	15,2
Caso 2	6,133	100	15,2
Caso 3	0	100	15,2
Caso 4	31,64	100	15,2
Caso 5	34,75	72,16	11,8
Caso 6	7,766	72,16	11,8
Caso 7	1,741	72,16	11,8
Caso 8	32,83	72,16	11,8
Caso 9	47,2	46,47	5,94
Caso 10	25,37	46,47	5,94
Caso 11	20,49	46,47	5,94
Caso 12	45,65	46,47	5,94
Caso 13	47,86	34,03	0
Caso 14	26,3	34,03	0
Caso 15	21,48	34,03	0
Caso 16	46,33	34,03	0

Tabella 9.10: *Valori normalizzati delle figure di valutazione per ciascuna alternativa*

Come ultimo passo di questa analisi, sono stati individuati i fattori di peso per ogni figura basandosi sull'importanza di ciascuna rispetto alle altre nella struttura finale desiderata. La configurazione della struttura flexure è stata pensata per massimizzare la risposta all'output e dunque la figura di performance amplificative ha ricevuto peso maggiore rispetto all'entità delle sollecitazioni indotte e alla massa. Vogliamo inoltre che sia garantita una vita utile adeguata, quindi la figura di sicurezza è stata ponderata in relazione al margine esistente tra la tensione massima agente e la tensione di snervamento. Essendo il valore massimo della tensione agente nei 16 casi pari a 4,435 MPa, ben al di sotto della tensione di snervamento del materiale meno resistente, pari a 30 MPa, il peso dato alla figura di sollecitazione è inferiore solo al peso della figura di prestazioni amplificative. Infine, avendo assegnato maggiore importanza sia alla figura sollecitazioni che a quella di performance amplificative rispetto alla figura sul peso della struttura, quest'ultima avrebbe teoricamente un peso nullo sul calcolo dell'indice di valore per ogni caso, dunque gli è stato assegnato un peso approssimativo pari al 15%. I fattori di peso per ciascuna figura di valutazione sono schematizzati in tabella 9.11:

Figura	σ_{VM}	R_{amp}	m	Rank	Weight Factor
σ_{VM}	X	0	0	1	28
R_{amp}	1	X	1	2	57
m	0	0	0	0	15
				3	100

Tabella 9.11: *Fattori di peso per ciascuna figura di valutazione*

I fattori di peso sono stati calcolati al fine di ponderare l'influenza delle figure di valutazione sugli indici di valore, per ogni caso. Questi ultimi quantificano numericamente la bontà di ciascuna alternativa e sono stati calcolati ponendo i valori normalizzati e i fattori di peso di ogni figura nella seguente relazione:

$$i = \frac{Soll_{NORM} \cdot Wf_{soll} + Pes_{NORM} \cdot Wf_{peso} + Amp_{NORM} \cdot Wf_{amp}}{100}$$

Gli indici di valore, i , ottenuti per ogni caso sono riportati in tabella 9.12:

Indici di valore	Materiale			
$s_{min}[mm]$	PA12	PR-S	S-HARD	G-STRONG
0.5	68,69	61	59,28	68,14
0.67	52,63	45,07	43,38	52,09
0.84	40,59	34,48	33,11	40,16
1	32,80	26,76	25,41	32,37

Tabella 9.12: *Indici di valore*

Come si evince dai valori, la configurazione che a seguito dello studio ha ricevuto il maggiore indice di valore, e quindi consigliata per la realizzazione dell'amplificatore caso di studio, è risultata quella in materiale poliammide PA12 (nylon) con uno spessore minimo sul piano $x - y$ pari a 0,5 mm. Tale risultato ha orientato dunque la scelta per la realizzazione finale, verso il processo di fabbricazione additiva SLS.

9.5 Grafici e caratteristiche di funzionamento

Il DOE eseguito sulla struttura ottimizzata per la selezione del materiale e dello spessore minimo da assegnare alla struttura finale ha dato come risultato il caso 1, costituito dal materiale PA12 e di spessore minimo

$s_{min} = 0,5mm$. Il valore massimo dello spostamento prodotto all'output vale $Y_{out} = 0,983mm$, con $Y_{in} = 0.04mm$. Per la configurazione selezionata sono stati prodotti gli andamenti del fattore di amplificazione R_{amp} , della rigidità sulla porta di ingresso K_{in} e dello spostamento all'output Y_{OUT} in funzione di Y_{IN} rispettivamente in figura 9.16, 9.17 e 9.18:

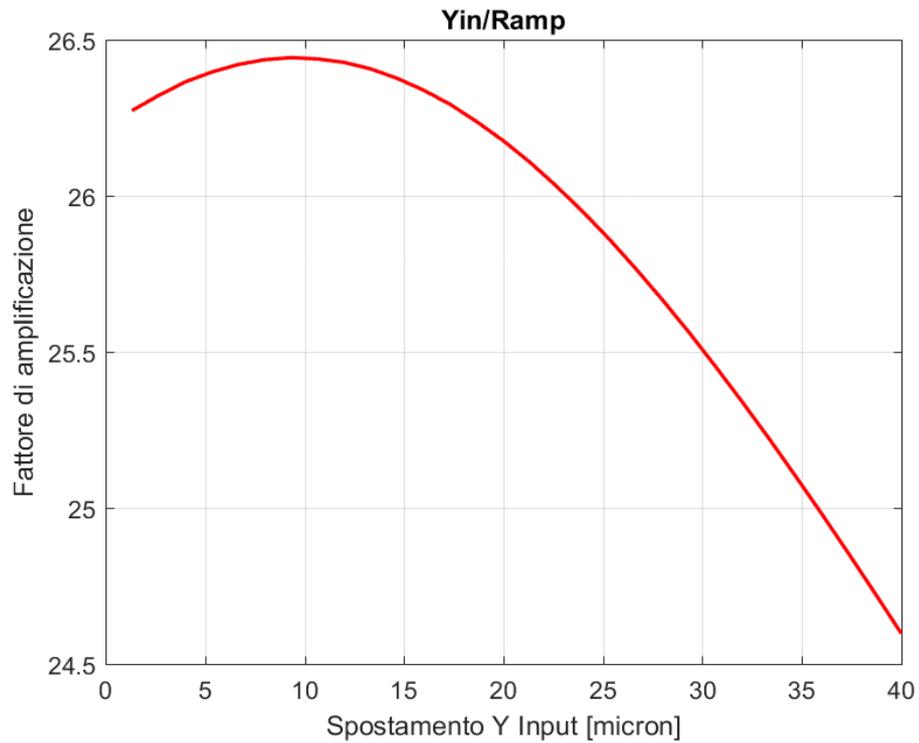


Figura 9.16: *Andamento di R_{amp} in funzione di Y_{IN}*

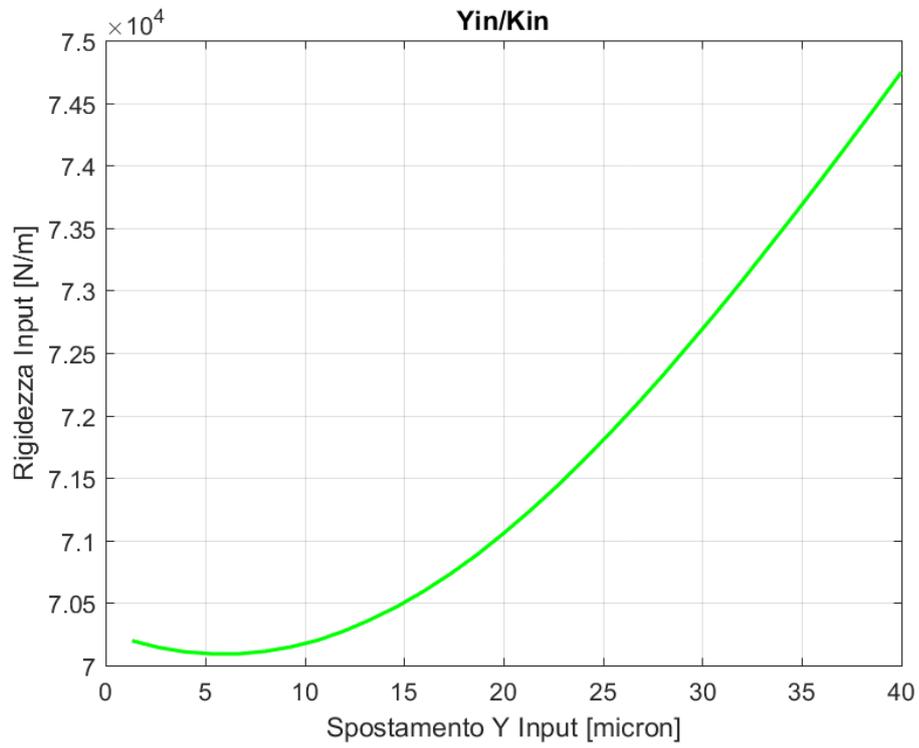


Figura 9.17: *Andamento di K_{in} in funzione di Y_{IN}*

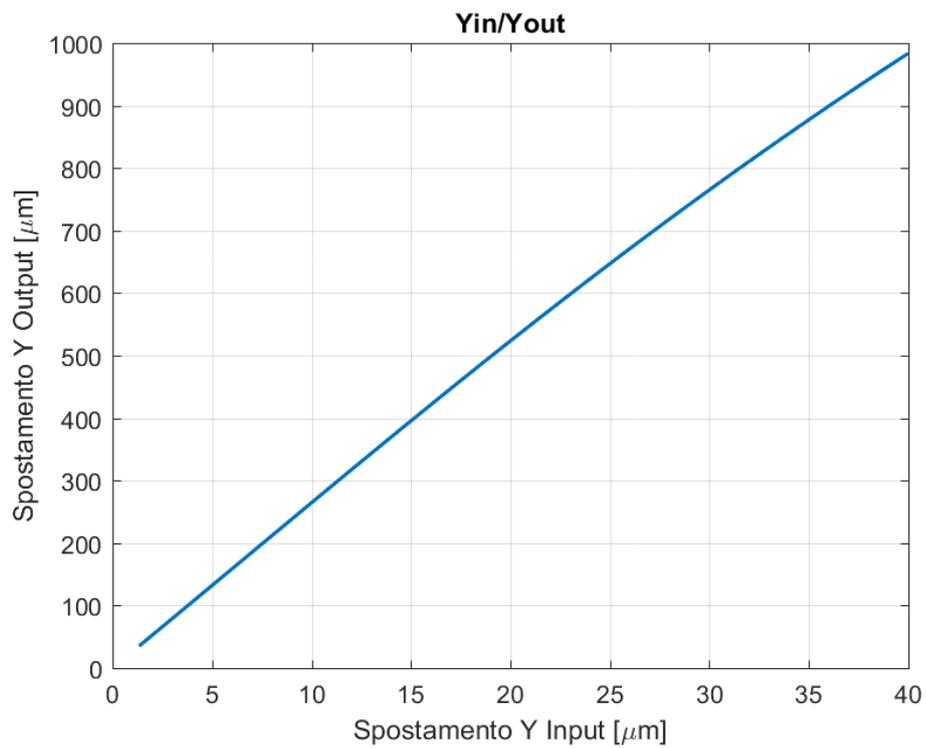


Figura 9.18: *Andamento di Y_{OUT} in funzione di Y_{IN}*

Gli andamenti seguono la stessa tendenza dei grafici mostrati in figura 9.12, 9.13 e 9.14 per la struttura in materiale ABS. Anche in questo caso, per un valore di $Y_{IN} \cong 10\mu m$ si ha il massimo di amplificazione con un valore di $R_{amp} \cong 26,5$, per poi decrescere secondo una iperbole. La tendenza opposta segue il grafico della rigidezza K_{in} , il cui valore minimo è pari a $K_{in} \cong 7N/m$ per $Y_{IN} \cong 6\mu m$. Infine in figura 9.18 è mostrato l'andamento di Y_{OUT}/Y_{IN} , la cui pendenza diminuisce all'aumentare di Y_{IN} come ci si aspettava dal grafico in figura 9.17. Le prestazioni di amplificazione subiscono un calo avvicinandosi al valore massimo $Y_{IN} = 0.04mm$ da amplificare, per cui la struttura è stata progettata.

I risultati delle analisi FEM in termini di distribuzione delle tensioni equivalenti, delle deformazioni equivalenti e della componente di spostamento lungo Y in tutta la struttura, per la configurazione scelta, sono mostrati in figura 9.19, 9.20 e 9.21:

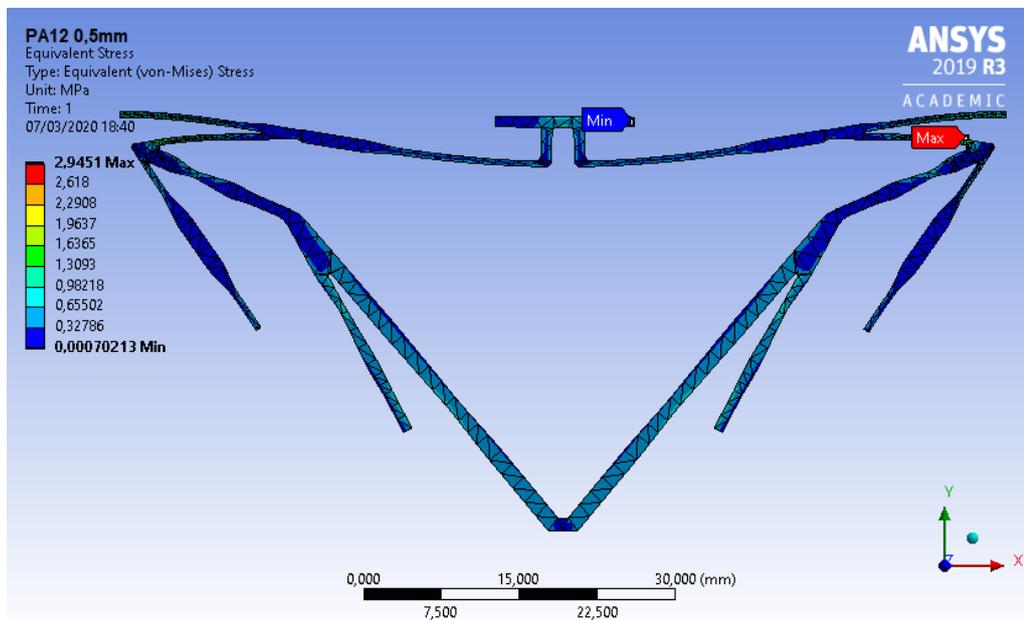


Figura 9.19: Distribuzione delle tensioni di VM per il caso 1

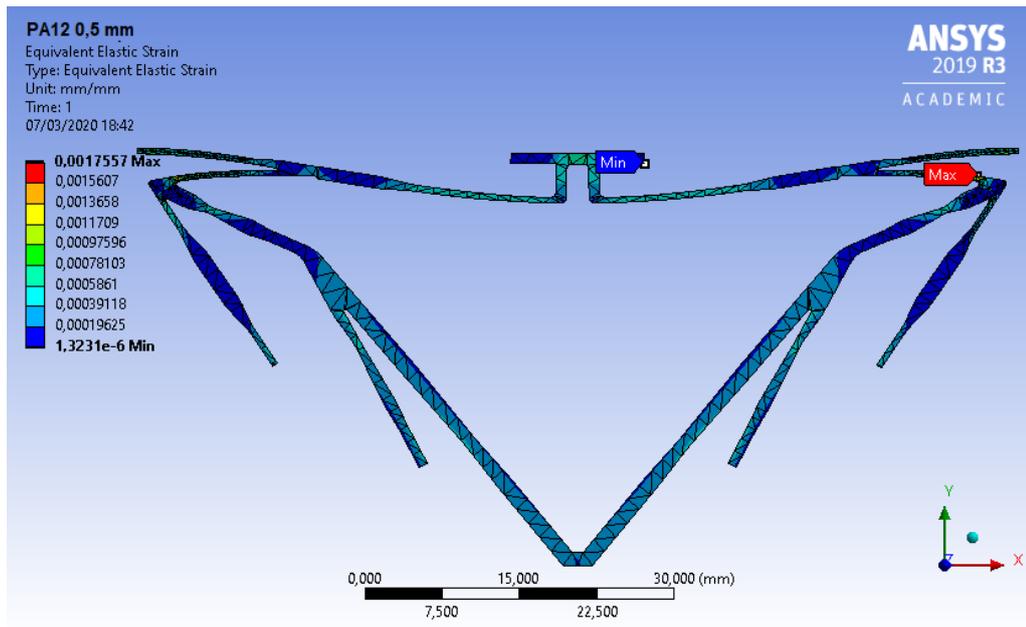


Figura 9.20: *Distribuzione delle deformazioni equivalenti per il caso 1*

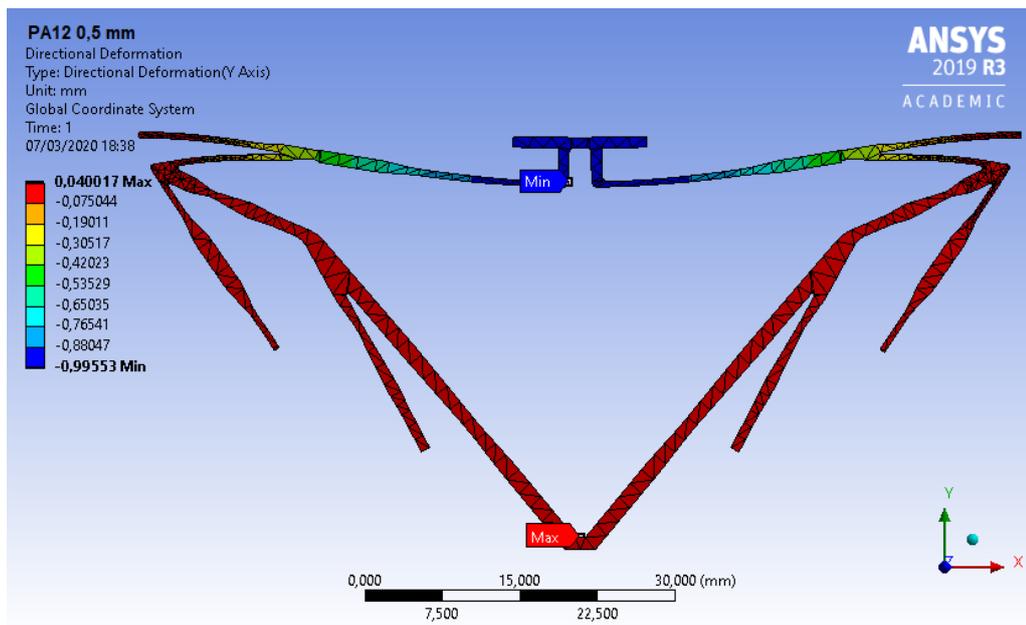


Figura 9.21: *Distribuzione degli spostamenti lungo y per il caso 1*

A questo punto, come frutto dei dati raccolti dalle analisi FEM di ciascuno dei 16 casi proposti, l'influenza singolare dello spessore minimo e del materiale sul caso selezionato è stata riassunta in alcuni grafici mostrati di seguito. In figura 9.22 e 9.23 sono stati diagrammati i dati rispettivamente sull'evoluzione delle tensioni massime e della rigidezza all'input al progredire della deformazione della struttura da $Y_{IN} = 0$ a $Y_{IN} = 40\mu\text{m}$ per i

quattro materiali testati mantenendo costante lo spessore minimo del caso 1 scelto di 0,5 mm.

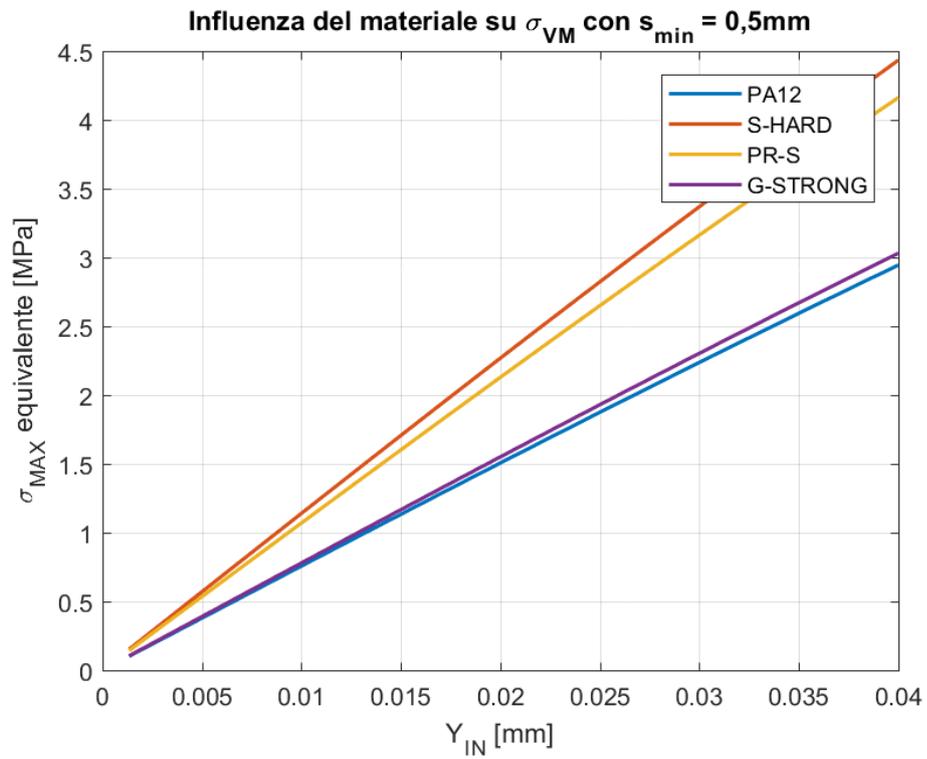


Figura 9.22: *Influenza del materiale su σ_{VM} massime agenti*

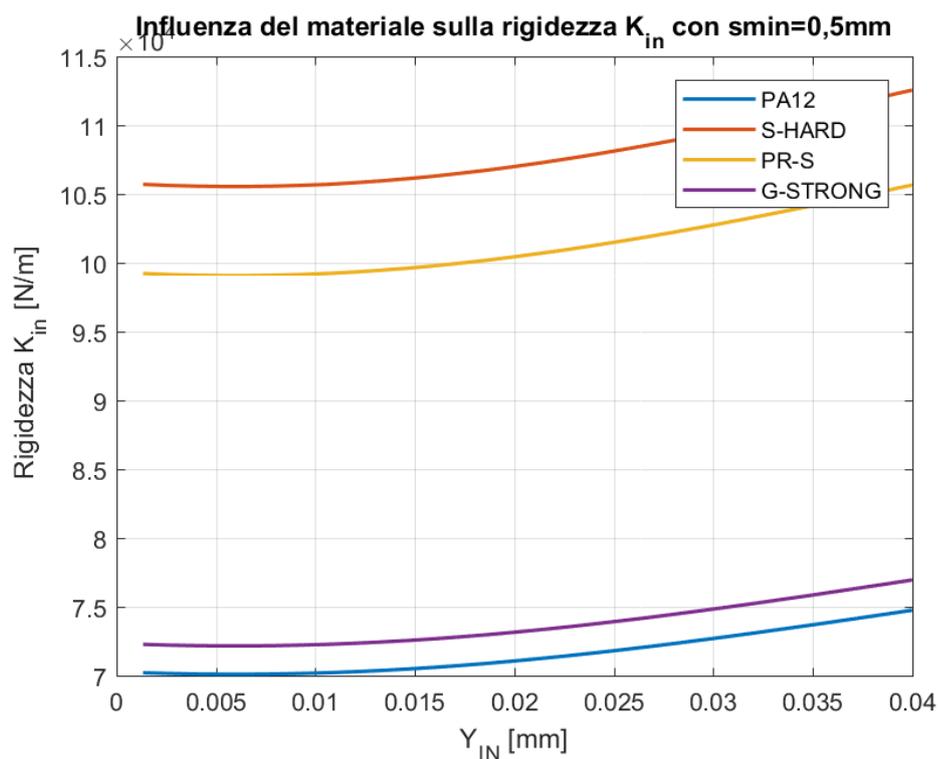


Figura 9.23: *Influenza del materiale sulla rigidezza K_{in}*

L'influenza del materiale è nulla sul valore del rapporto di amplificazione, la cui tendenza generale è stata discussa ampiamente a proposito dei grafici precedenti. Per questo motivo, non è stato riproposto alcun andamento. Riguardo invece all'influenza dello spessore minimo sulle tensioni massime, sulla rigidezza all'ingresso e sul fattore di amplificazione sono stati ottenuti i seguenti grafici rispettivamente in figura 9.24, 9.25 e 9.26:

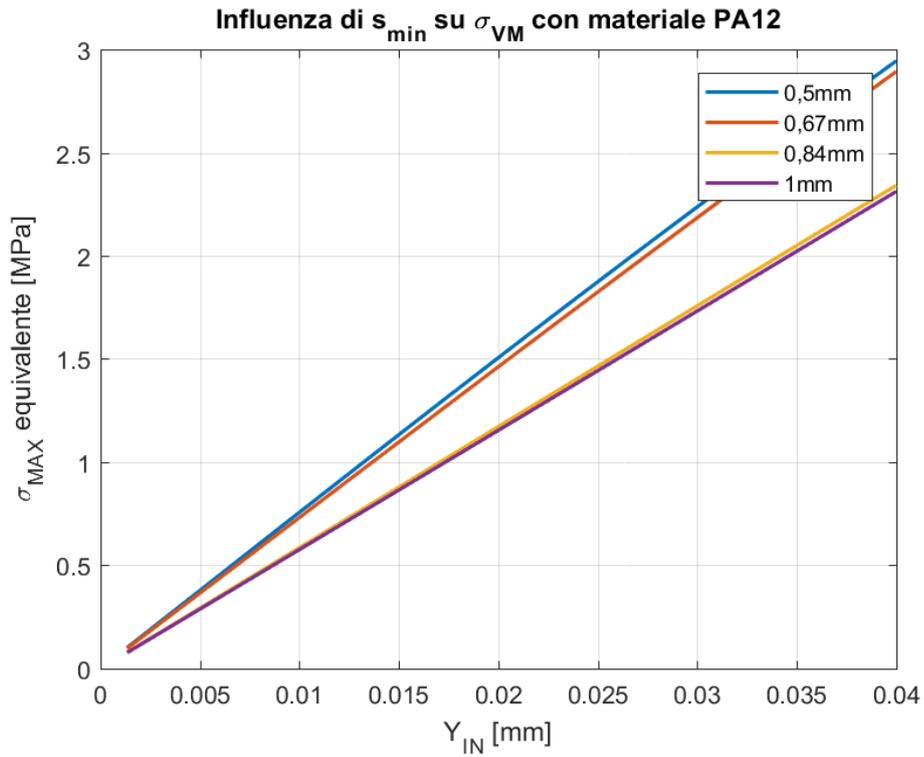


Figura 9.24: *Influenza dello spessore minimo su σ_{VM} massima*

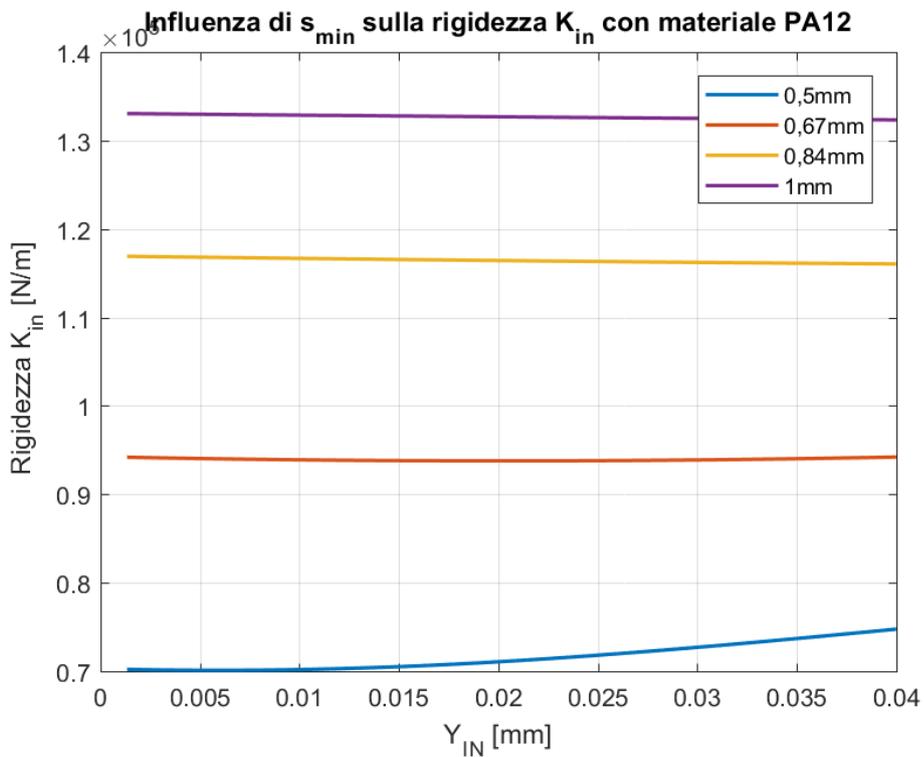


Figura 9.25: *Influenza dello spessore minimo sulla rigidezza K_{in}*

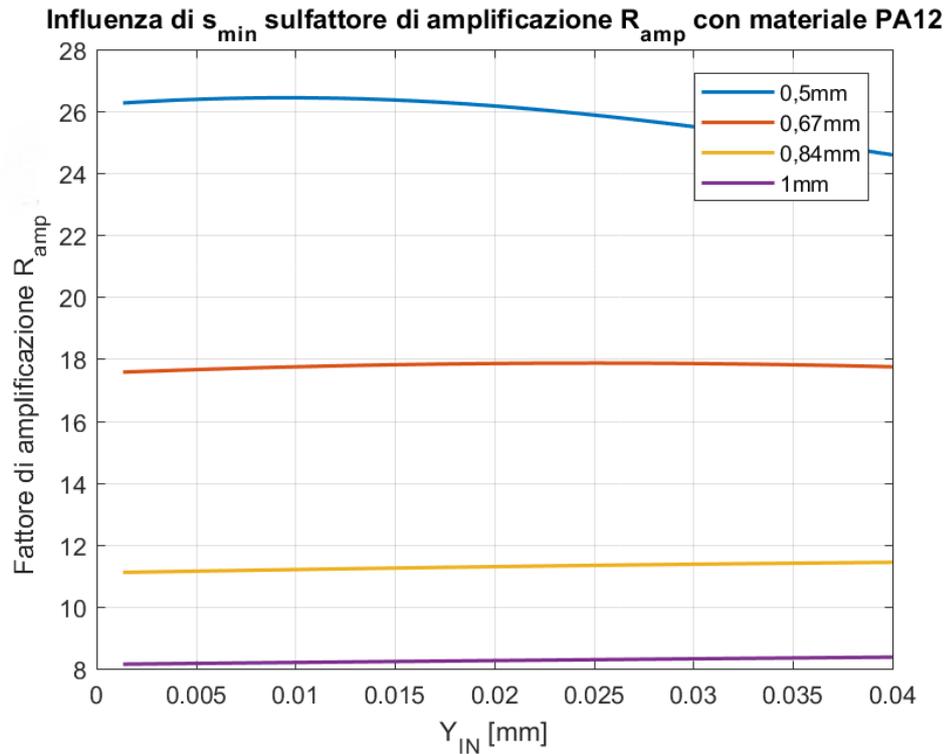


Figura 9.26: *Influenza dello spessore minimo sul fattore di amplificazione R_{amp}*

Il grafico in figura 9.24 mostra le tensioni massime agenti in relazione all'input, le quali diminuiscono all'aumentare dello spessore come ci si aspettava, per un aumento della sezione resistente. Il grafico in figura 9.25 diagramma le curve delle rigidezze dei meccanismi ai vari spessori analizzati, risultando in andamenti iperbolici a concavità verso l'alto per spessore minimo pari a 0,5mm e 0,67mm, la concavità è invece rivolta verso il basso per spessori di 0,84mm e 1mm. Si è apprezzata dunque, in questi ultimi casi, una diminuzione della rigidezza al progredire della deformazione elastica lungo la struttura. Infine in figura 9.26, sono stati diagrammati gli andamenti del fattore di amplificazione ai vari spessori minimi, mantenendo sempre il materiale PA12. Tali andamenti mettono in luce le performance amplificative della struttura a spessore minimo 0,5 mm rispetto alle altre. Una interessante considerazione può essere fatta dall'analisi di tali grafici, riguardo la pendenza con la quale, avvicinandosi al valore di $Y_{in} = 0,04mm$, le iperbole decrescono. In particolare, all'aumentare dello spessore minimo, si nota una diminuzione della pendenza negativa ed a limite, per $s_{min} = 1mm$, si ha un'inversione di tendenza dell'iperbole assumendo una concavità rivolta verso l'alto. Quindi l'andamento passa da crescente-decrescente, nel caso di $s_{min} = 0,5mm$, a sempre crescente, per $s_{min} = 1mm$. Si ricorda che, l'ottimizzazione topologica eseguita secondo il metodo "path load approach", ha dato come risultato una topologia a spessore minimo 0,5 mm. In considerazione degli elevati fattori di amplificazione ottenuti per la curva in blu di

figura 9.26, il DOE ha selezionato in maniera corretta il caso idoneo, tenendo conto della drastica riduzione sul fattore di amplificazione per aumenti di spessore nell'intervallo analizzato.

9.6 Progettazione per AM della struttura di supporto

In questa sezione verrà affrontata la progettazione della struttura di supporto per la configurazione scelta al termine dello studio precedente. In particolare lo studio si è orientato all'ottenimento di una struttura leggera e resistente, che possa interpretare la funzione dei vincoli imposti durante la progettazione del CM amplificatore. Grazie alla complessità geometrica concessa dalle tecnologie di additive manufacturing, è stato possibile utilizzare ancora una volta l'ottimizzazione topologica su una geometria standard di partenza ed ottenere, a seguito di validazione con analisi FEM, la struttura finale. Tale metodo ha permesso la realizzazione con successo di una geometria vantaggiosa in termini di efficienza nell'impiego del materiale, quindi ottenendo un alto rapporto resistenza/peso.

9.6.1 Ottimizzazione topologica

La struttura di partenza alla quale è stata applicata l'ottimizzazione topologica viene mostrata in figura 9.27:

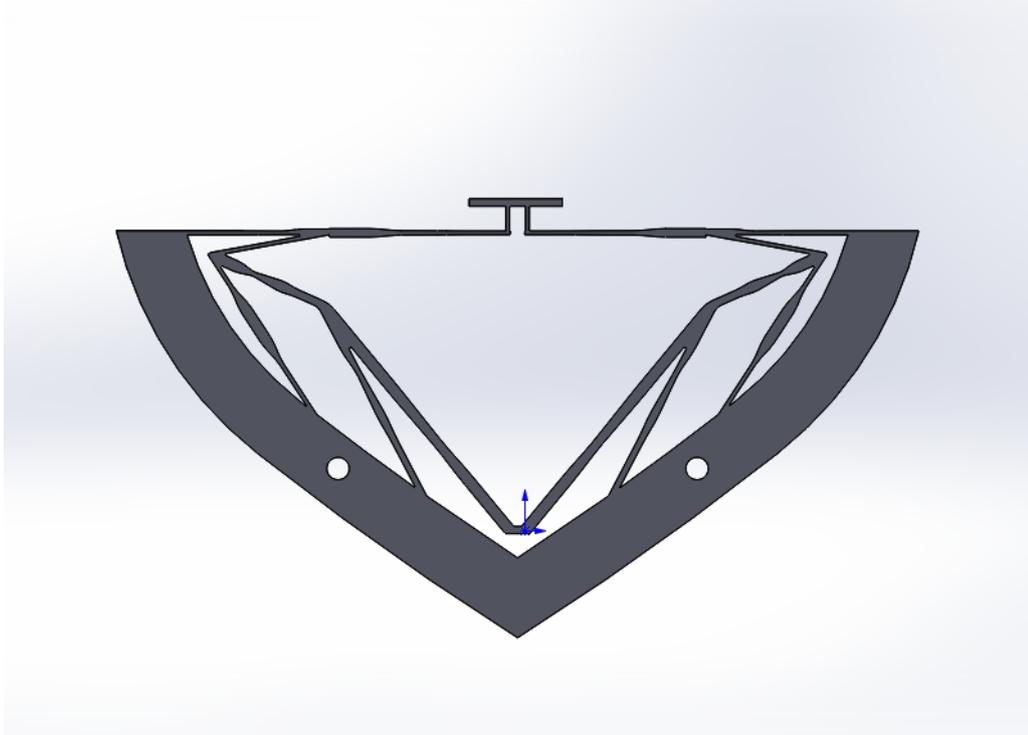


Figura 9.27: *Geometria originale da ottimizzare*

La struttura di partenza ipotizzata segue la geometria della struttura flexure progettata, al fine di ridurre gli ingombri totali del CM. Sono stati presupposti due fori di diametro 3 mm per il fissaggio della stessa al telaio. Lo spessore ipotizzato è di 9 mm sul piano $x-y$, lungo z invece è stato mantenuto lo spessore costante pari a 3 mm della struttura flexure. La struttura modellata su CAD è stata importata su di un software del pacchetto Altair, chiamato Altair Inspire. Si tratta di un software per l'ottimizzazione topologica all-in-one, che contiene all'interno un modulo di simulazione FEM ed un modellatore 3D con funzioni parametriche per lo studio e la progettazione del modello. Il metodo di modellazione è basato sulla tecnologia delle curve e superfici NURBS. Le matematiche NURBS sono in grado di rappresentare qualsiasi forma, sia analitica che di forma libera [21]. Dunque è stata eseguita l'impostazione del modello da ottimizzare, imponendo i carichi che la struttura dovrà essere in grado di sostenere, applicati dal CM durante il funzionamento. Sono stati imposti i vincoli nei punti di fissaggio al telaio, ovvero sulla superficie cilindrica dei fori da 3mm, predisposti come in figura 9.28.

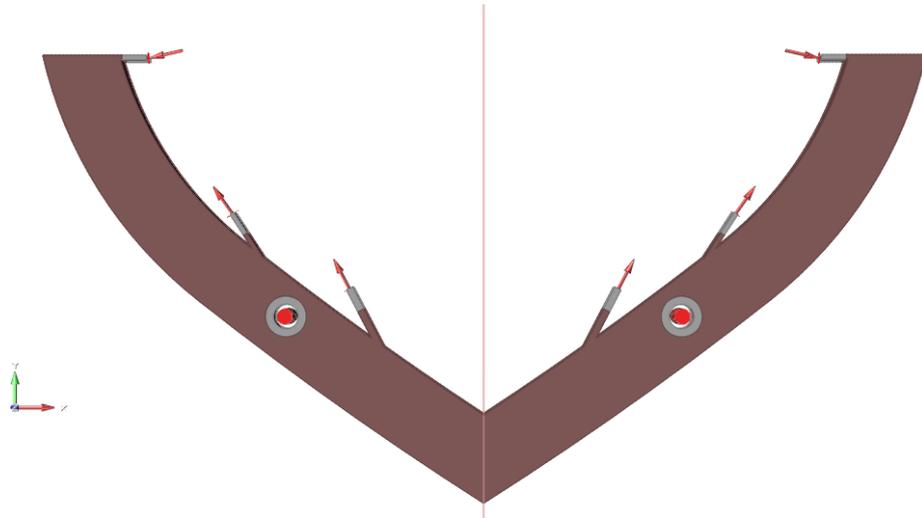


Figura 9.28: *Impostazione del modello da ottimizzare*

Tali vincoli impediscono la rotazione rispetto all'asse z e la traslazione lungo l'asse y . Infine, sono state definite le cosiddette zone di progetto o "design space", indicate in rosso, per distinguerle dalle "non-design space" ovvero quelle aree della struttura che vogliamo non vengano interessate dal processo di ottimizzazione topologica, dovendo rimanere invariate in forma e disposizione. Tra queste ultime ricadono le aree di supporto al telaio e quelle su cui pensiamo applicati i carichi. Come area di progetto invece è stata definita tutta l'area rimanente, che dovrà essere ottimizzata dal software per il raggiungimento di una determinata funzione obiettivo definita poco dopo. L'ultima fase di impostazione del problema di ottimizzazione topologica è stata la definizione di un vincolo di simmetria sulla geometria che risulterà, coerentemente con la simmetria dei carichi applicati e dei vincoli con la quale è stata pensata la struttura flexure amplificatore. I dati sulle componenti x ed y delle forze di reazione massime ai vincoli dell'amplificatore sono riassunti in tabella 9.13:

NODI DI SUPPORTO	F_x [N]	F_y [N]	F_{tot} [N]
K6	-0.659333	-1.251555	1.414606
K7	-0.218517	-0.310983	0.380079
K8	-0.208818	0.048186	0.214305

Tabella 9.13: *Componenti delle forze di reazione nei punti di vincolo del CM*

Tali dati sono stati riferiti ai nodi di vincolo K6, K7 e K8 di figura 9.3. Si ricorda che il segno attribuito alle forze è riferito ai carichi applicati sulla metà destra della struttura, in figura 9.28. I restanti sono ottenuti

per simmetria rispetto al piano $y - z$. La struttura ha un volume iniziale di $v_{start} = 3758,5mm^3$ e, con una densità del materiale teorica di $\rho_{PA12} = 1.01g/cm^3$, la massa iniziale è $m_{start} = 3,796grammi$. A questo punto, è stato necessario imporre la funzione obiettivo del problema con il quale il software ci suggerirà possibili geometrie ottimizzate. L'obiettivo scelto è stato quello di massimizzare la rigidità ed, allo stesso tempo, ottenere una riduzione del volume totale dello spazio di progettazione del 30%. Successivamente sarà possibile regolare tale percentuale in funzione della bontà della geometria ottenuta, ad esempio in termini di interconnessione delle varie zone nella struttura. Un vincolo sullo spessore minimo viene imposto pari a 2,89 mm come consigliato dallo stesso software. I risultati forniti dal software sono illustrati in figura 9.29:

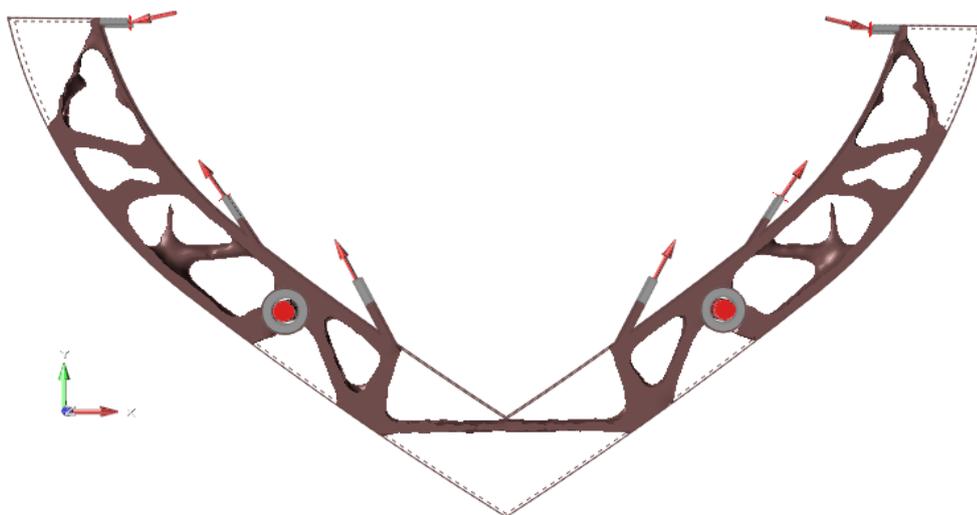


Figura 9.29: Risultato ottimizzazione con visibili zone disconnesse

La struttura presenta alcune zone in cui la mancanza di materiale genera disconnessioni e dunque non è stata accettata. Ponendosi su una percentuale di materiale maggiore e ripetendo l'ottimizzazione è stata ottenuta una geometria ottimizzata ben connessa come quella in figura 9.30:

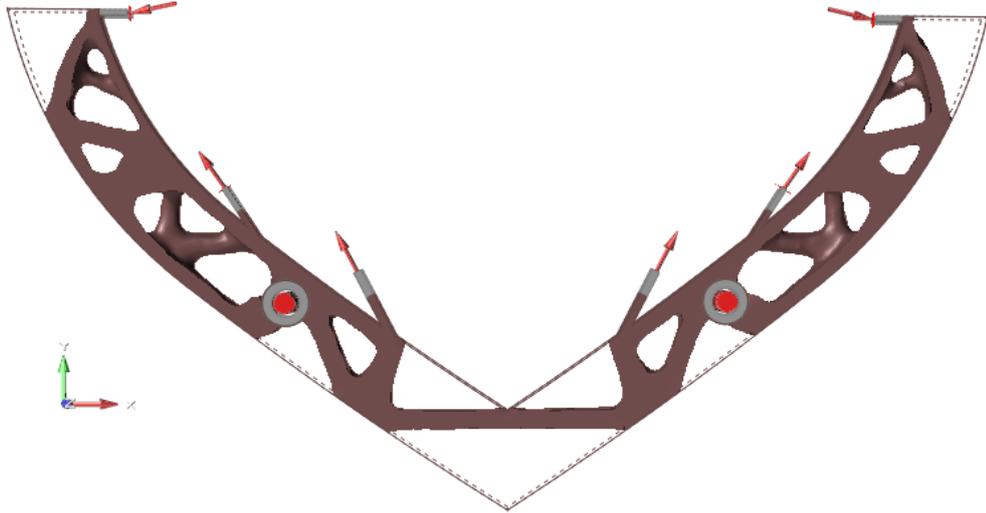


Figura 9.30: Risultato ottimizzazione con riduzione del 57% in peso

Tale struttura presenta una massa $m_{optimized} = 1,624g$ ed un volume $v_{optimized} = 1608,1mm^3$, con una riduzione del peso originario pari al 57,2%. Non siamo comunque giunti alla topologia ottimizzata in quanto le superfici che risultano dall'interpretazione geometrica del software sono ancora insoddisfacenti allo stato attuale. Si è passati ad una fase in cui la geometria in figura 9.30 è stata utilizzata come guida sui cui avvolgere una polyNURBS, ricreando quella che è la geometria finale della nostra struttura di supporto. A seguito di questa fase, è stata ottenuta la geometria in figura 9.31:

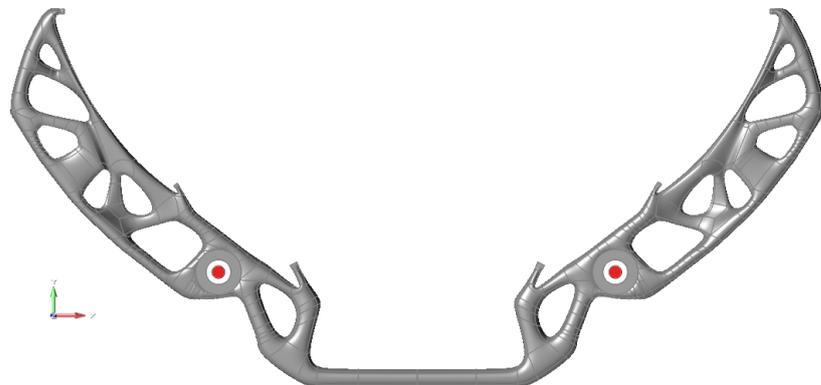


Figura 9.31: PolyNURBS della geometria ottimizzata in vista frontale

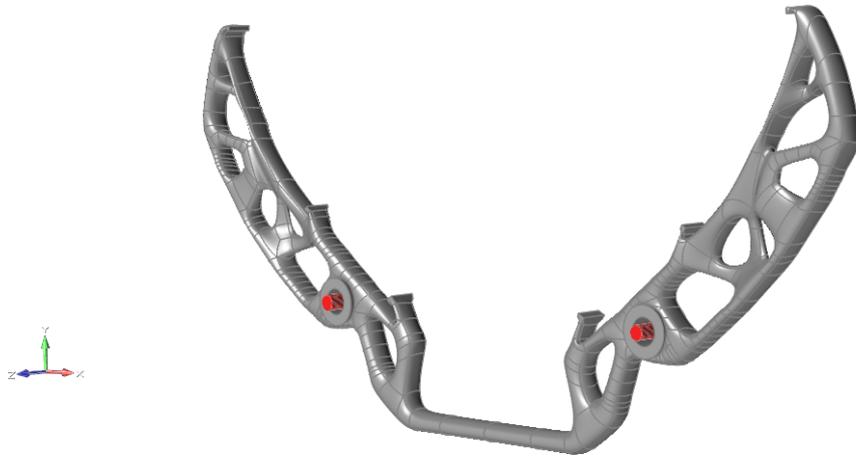


Figura 9.32: *PolyNURBS della geometria ottimizzata in vista isometrica*

La polyNURBS ottenuta ha un volume solido $v_{NURBS} = 1553,26mm^3$ ed una massa $m_{NURBS} = 1,57g$. In tabella 9.14, sono riassunte le proprietà di massa e volume dall'inizio alla fine del processo di ottimizzazione topologica:

Step TO	$v[mm^3]$	$\rho_{TH}[g/cm^3]$	$m[g]$	Risparmio[%]
Iniziale	3758,5	1,01	3,796	0
Ottimizzata	1608,1	1,01	1,624	57,2
Finale polyNURBS	1553,26	1,01	1,568	58,69

Tabella 9.14: *Proprietà di massa e volume ai vari step di ottimizzazione topologica*

Abbiamo ottenuto un risparmio di materiale del 58% circa rispetto alla geometria originaria. La geometria polynurbs ottenuta è stata testata con analisi FEM per verificare che effettivamente la struttura sia rigida e vincoli in maniera adeguata l'amplificatore di spostamento. Le analisi sono state eseguite dopo aver composto le due strutture rispettivamente di amplificazione e di supporto. Confrontando i dati ottenuti dalle analisi sulla struttura completa con i dati relativi alle analisi condotte con vincoli rigidi ideali applicati, è stata valutata la geometria ottenuta.

9.7 Modello finale

Il modello finale, ottenuto componendo la struttura flexure progettata e la geometria di supporto ottimizzata, è mostrato in figura 9.33:

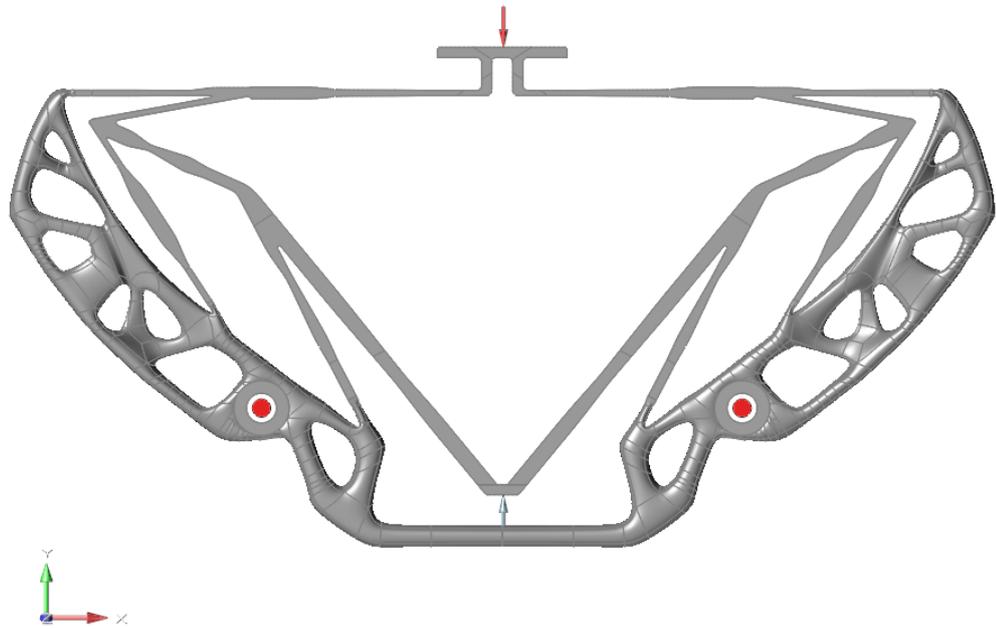


Figura 9.33: *Modello amplificatore di spostamento finale in vista frontale*

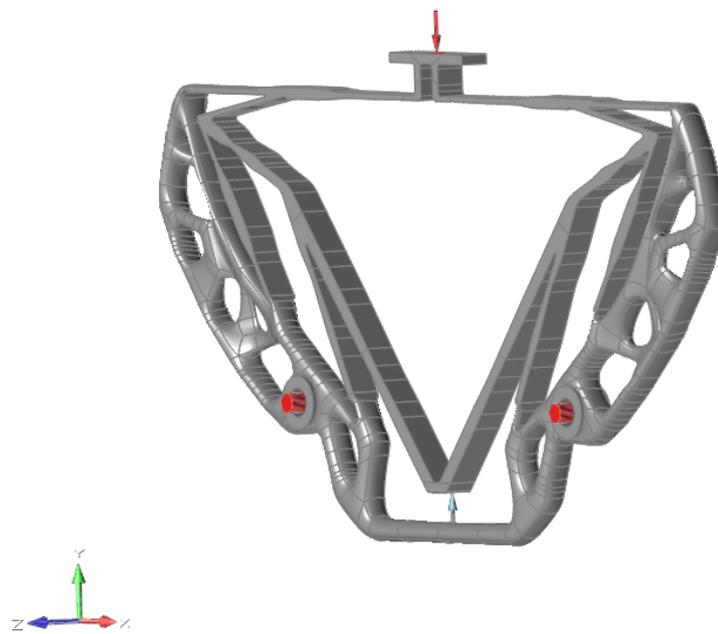


Figura 9.34: *Modello amplificatore di spostamento finale in vista isometrica*

Su di esso sono state eseguite le analisi FEM, utilizzando il modulo per le simulazioni implementato in Altair Inspire.

9.7.1 Analisi FEM sul modello finale

Le analisi FEM sulla struttura finale hanno fornito una distribuzione della tensione equivalente di Von Mises massima, mostrata in figura 9.35. La zona più sollecitata è mostrata nel dettaglio in figura 9.36:

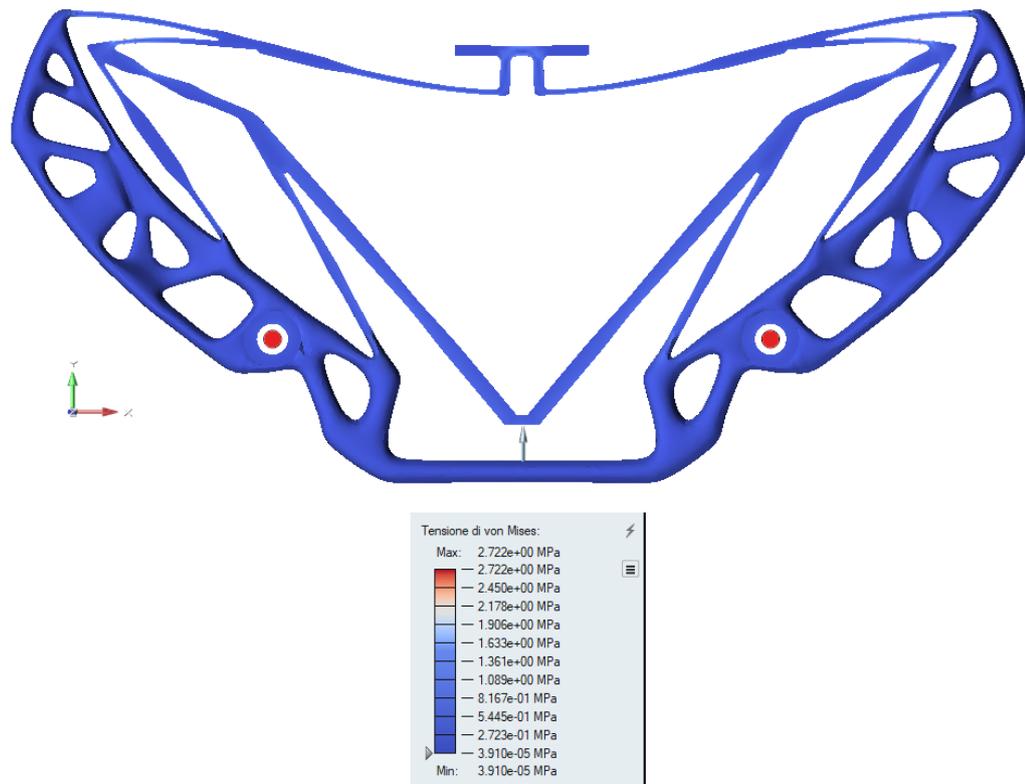


Figura 9.35: *Distribuzione delle tensioni equivalenti nel modello finale*

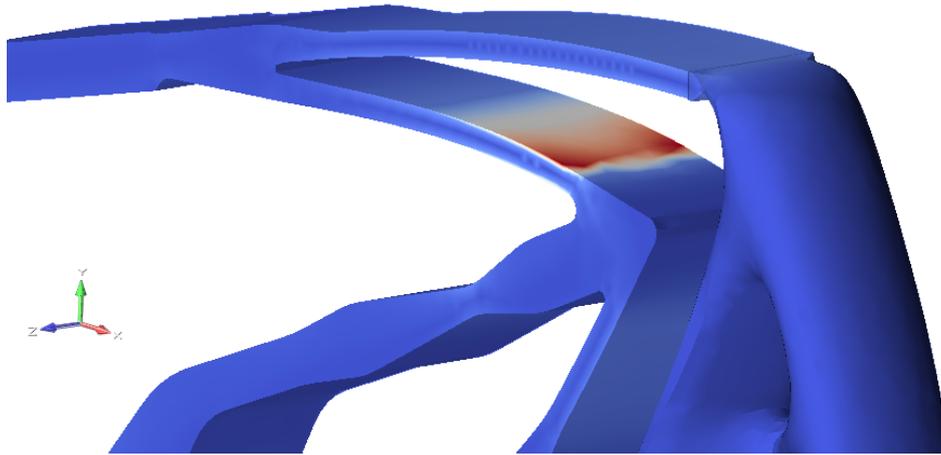


Figura 9.36: *Dettaglio della zona maggiormente sollecitata*

La distribuzione delle tensioni lungo la struttura, come si nota nel dettaglio in figura 9.36, interessa maggiormente le zone che subiscono la deflessione maggiore durante il funzionamento, riportando valori della tensione equivalente massima pari a $\sigma_{MAX} = 2,722MPa$. La tensione massima si è abbassata del 7,5 % rispetto al caso di struttura flexure con vincoli rigidi applicati, in cui era pari a $\sigma_{MAX} = 2,945MPa$. La variazione subita fino a questo punto è benefica per la vita utile. La distribuzione delle componenti di spostamento lungo y è illustrata in figura 9.37:

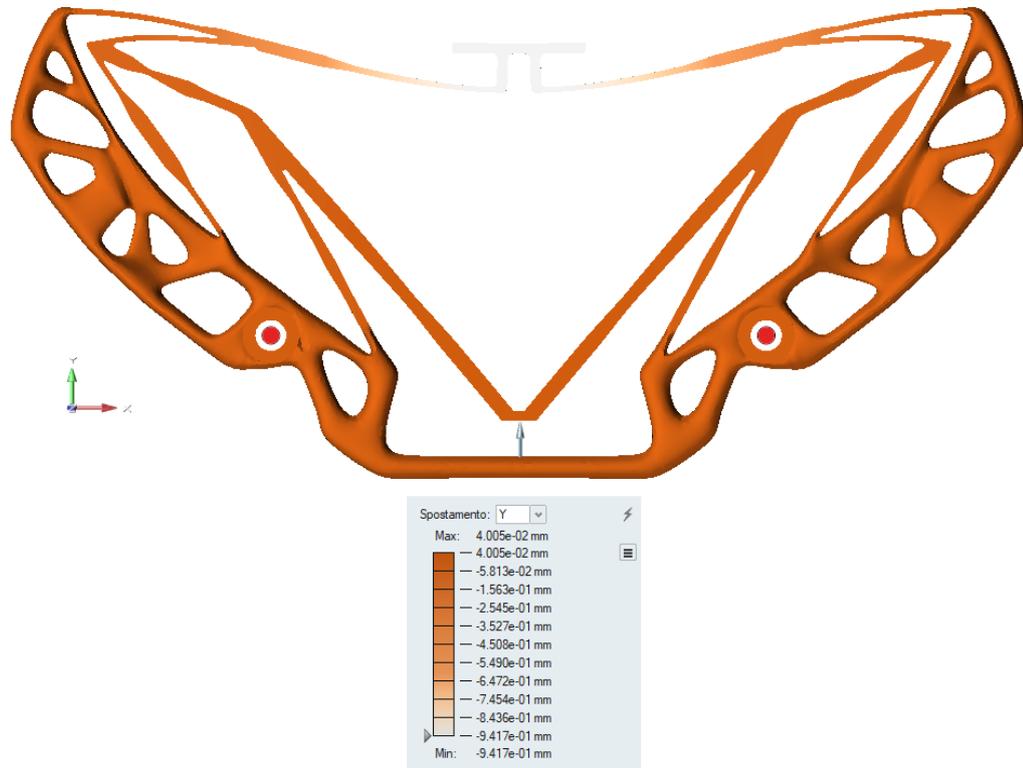


Figura 9.37: *Distribuzione della componente di spostamento lungo y nel modello finale*

Lo spostamento all'output del modello finale si attesta ad un valore $Y_{out} = 0,9414mm$. Dunque il fattore di amplificazione finale è pari a $R_{amp} = 23,5$. Rispetto al valore di 24,5 che risultava dalle analisi FEM sul caso 1 del Design Of Experiment, il valore si è abbassato del 4% circa. Tale deviazione è dovuta all'ipotesi di vincoli infinitamente rigidi su cui sono state basate le analisi per la selezione nel DOE. Come visto, anche la tensione massima agente sul modello si abbassa in quanto, potendo la struttura di supporto accompagnare la deformata nel funzionamento subendo deformazioni di ordine molto inferiore, la deflessione diminuisce. Ad ogni modo, considerando che le deviazioni sul rapporto di amplificazione finale (4%) sono minori rispetto alle variazioni sulla tensione massima (7,5%) e che tali deviazioni sono inevitabili quando viene meno l'ipotesi di vincoli infinitamente rigidi, i risultati ottenuti sono stati considerati positivi a fronte di una riduzione significativa del peso totale e confermano la geometria ottimizzata come geometria di supporto finale. Infine è proposta la distribuzione delle deformazioni equivalenti sul modello finale in figura 9.38:

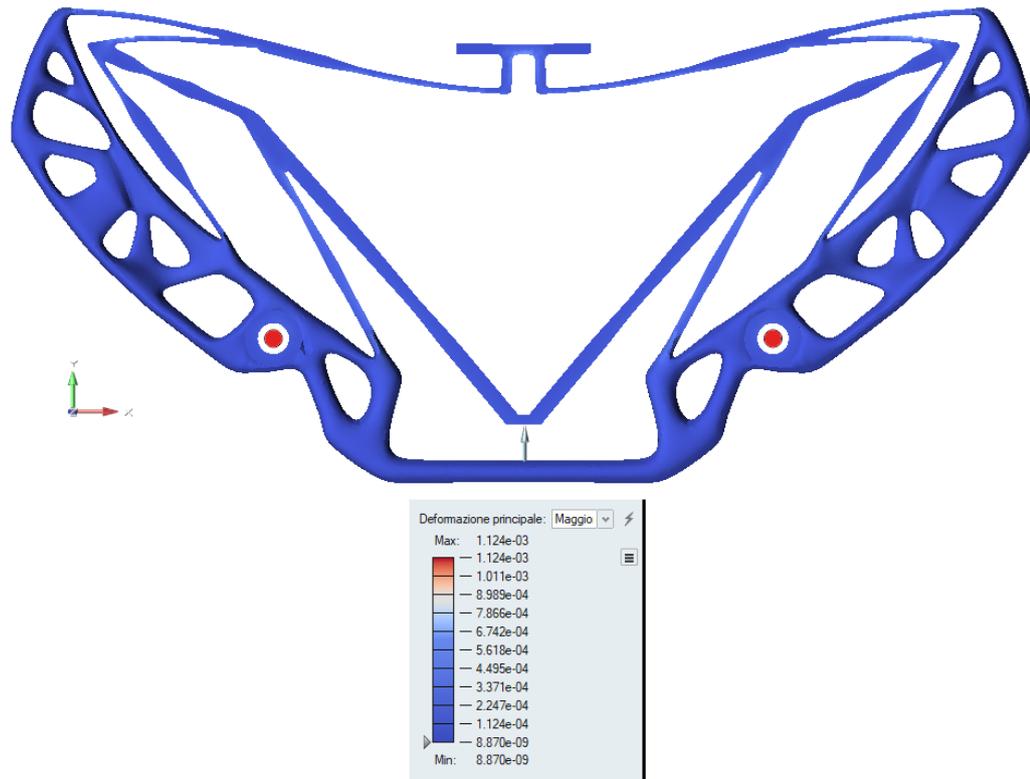


Figura 9.38: *Distribuzione della deformazione equivalente nel modello finale*

Come si nota dalla legenda, il valore massimo della deformazione equivalente ha un valore di $\epsilon_{MAX} = 1,12 \times 10^{-3} mm/mm$ minore del valore ottenuto in precedenza per il modello vincolato rigidamente pari a $\epsilon_{MAX} = 1,76 \times 10^{-3} mm/mm$.

Capitolo 10

Conclusioni

Nel presente lavoro è stato affrontato lo studio per la progettazione di una struttura flexure capace di amplificare lo spostamento applicato alla porta di input, con un considerevole valore del fattore di amplificazione rispetto alle strutture tradizionali destinate al medesimo scopo. Lo studio è stato condotto per la fabbricazione additiva con polimeri del modello, dunque al fine di selezionare il processo più favorevole alle caratteristiche di funzionamento della struttura e agli obiettivi del caso di studio. I risultati del DOE condotto hanno presentato il processo SLS come quello più congruo per la realizzazione dell'amplificatore. Inoltre è stata valutata l'influenza dei parametri sul materiale e dello spessore minimo sulle prestazioni amplificative, sulla sicurezza e sul peso del CM. Grazie alla libertà progettuale concessa dai processi AM, è stata progettata una struttura di supporto dalla geometria innovativa mediante ottimizzazione topologica di una struttura di partenza piena. Il risultato è stato soddisfacente grazie ad una significativa riduzione del peso complessivo ottenuta, che esplicita i vantaggi della fabbricazione additiva sia in termini di distribuzione intelligente del materiale che di complessità geometrica delle strutture realizzabili. Il modello finale ottenuto gode inoltre di prestazioni amplificative ben al di sopra rispetto a quelle presentate dalle strutture bridge-type convenzionali. La realizzazione del modello finale mediante processo SLS è avvenuta con successo, permettendo la realizzazione di una geometria libera da vincoli progettuali, sia nella fase di progettazione della struttura flexure che della struttura di supporto.

Bibliografia

- [1] ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. *ASTM International*, pages 1–3, 2012.
- [2] Elisa Paola Ambrosio Sara Biamino Mariangela Lombardi Eleonora Atzeni Alessandro Salmi Paolo Minetola Luca Iuliano e Paolo Fino Flaviana Calignano, Diego Manfredi. Overview on Additive Manufacturing Technologies. *Proc. IEEE*.
- [3] Declan M. Devine of Athlone Institute of Technology. Polymer-based additive manufacturing. pages 1–9, 2019.
- [4] Weiyin Ma Patri K. Venuvinod. Rapid-prototyping, laser based and other technologies. pages 235–238, 2004.
- [5] M.A. Castro S. Martinez-Pellitero. Analysis of influence factors on part quality in micro-SLA technology. *Manufacturing Engineering Society International Conference*, pages 1–3, 2017.
- [6] Darmien Motte Olaf Diegel, Axel Nordin. A practical guide to design for additive manufacturing. pages 115–120, 2019.
- [7] Weiyin Ma Patri K. Venuvinod. Rapid-prototyping, laser based and other technologies. pages 245–253, 2004.
- [8] Weiyin Ma Patri K. Venuvinod. Rapid-prototyping, laser based and other technologies. pages 258–260, 2004.
- [9] Darmien Motte Olaf Diegel, Axel Nordin. A practical guide to design for additive manufacturing. pages 43–48, 2019.
- [10] W. Wright, O. e Wright. Flying machine. pages U.S. Patent No. 821,393, 1906.
- [11] FlexSys e U.S. American Air Force. FlexFoil™ Compliant Control Surfaces. *US Patents: 5971328, 6491262, 7384016 B1*, page <https://www.flxsys.com/flexfoil>.
- [12] Nicolae Lobontiu. Compliant mechanisms.

- [13] S.P. Magleby e L.L. Howell E.G.Merriam, J.E. Jones. Monolithic 2 dof fully compliant space pointing mechanism. 2013.
- [14] Hongchuang Zhan Benliang Zhu, Xianmin Zhang. Design of compliant mechanisms using topology optimization: A review. 2019.
- [15] L. L. Lowell. Compliant mechanisms. 2001.
- [16] C. P. Lusk. Quantifying Uncertainty for Planar Pseudo-Rigid-Body Models. *Proceedings of the International Design Engineering Technical Conference IDETC/CIE*, 2011.
- [17] Sridhar Kota Kerr-Jia Lu. Topology and Dimensional Synthesis of Compliant Mechanisms Using Discrete Optimization. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2006.
- [18] Sridhar Kota e Joel A. Hetrick Russell F. Osborn. Active Flow Control Using High-Frequency Compliant Structures.
- [19] Li-Quan Wang Zhi Zhong Hong-Wen Maa, Shao-Ming Yao. Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type flexure hinge. 2006.
- [20] Lei-Jie Lai e Xiao-Qia Yin. Analysis of Bridge-type Distributed-compliance Mechanism. 2018.
- [21] Altair University. Practical Aspects of Finite Element Simulation.