

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA

Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in Disegno tecnico assistito dal calcolatore (C.I.)

STAMPA 3D PER LA REALIZZAZIONE DI PROTOTIPI
DI PRODOTTO NEL SETTORE DEI TRASPORTI

CANDIDATO

Elisa Villa

RELATORE

Prof.ssa Francesca De Crescenzo

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

INTRODUZIONE 6

1. ADDITIVE MANUFACTURING 7

1.1 CENNI STORICI..... 7

1.2 MATERIALI 8

 1.2.1 Polimeri 9

 1.2.2 Metalli..... 10

 1.2.3 Ceramici 10

 1.2.4 Compositi..... 10

1.3 TECNOLOGIE 11

 1.3.1 TECNOLOGIE PER POLIMERI 11

 1.3.1.1 Fused Deposition Modelling (FDM)..... 11

 1.3.1.2 PolyJet (PJ)..... 12

 1.3.1.3 Stereolithography (SLA)..... 13

 1.3.1.4 Selected Laser Sintering (SLS)..... 14

 1.3.2 TECNOLOGIE PER METALLI 15

 1.3.2.1 Electron Beam Melting (EBM)..... 15

 1.3.2.2 Laser Deposition Technology (LDT) 16

 1.3.2.3 Selective Laser Melting (SLM)..... 17

1.4 PROCESSO DI PROGETTAZIONE 18

 1.4.2 Generazione del file STL..... 19

 1.4.3 Orientamento e generazione di supporti..... 19

 1.4.4 Slicing..... 20

 1.4.5 Costruzione dell'oggetto..... 20

 1.4.6 Post-trattamento 20

1.5 APPLICAZIONI..... 21

 1.5.1 PROTOTIPAZIONE..... 21

 1.5.1.1 USABILITÀ..... 24

 1.5.1.1.1 CASI STUDIO 24

 1.5.1.1.1.1 Prototipo di un ugello e di una frizione..... 24

 1.5.1.1.1.2 Prototipi di tecnologie assistive..... 25

 1.5.1.2 MECCANISMI NON-ASSEMBLY 25

 1.5.1.2.1 Caso studio della mano protesica 29

2. IL CASO DI STUDIO DEL SEDILE PER INTERNI CABINA 30

2.1 OBIETTIVI..... 30

2.2 PROCESSO 30

 2.2.1 Processo CAD progettuale 30

 2.2.2 Processo di stampa 35

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.3 | STAMPA..... | 40 |
| 2.3.1 | <i>Tecnologie usate per la produzione del prototipo</i> | 40 |
| 2.3.2 | <i>Stampa e post-lavorazione del prototipo</i> | 42 |
| 3. | RISULTATI..... | 45 |
| 4. | CONCLUSIONI..... | 48 |
| | BIBLIOGRAFIA | 49 |

INTRODUZIONE

L'avanzamento delle nuove tecnologie, come l'Additive Manufacturing (AM) o Stampa 3D, sta portando a ridefinire le metodologie progettuali e produttive.

In questo elaborato si cerca di spiegare e verificare il potenziale che l'AM può avere nella produzione e realizzazione di nuovi prodotti o prototipi più sostenibili a livello di tempi, costi e di impatto ambientale. L'AM, infatti, permette di creare forme complesse che un tempo non si era in grado di realizzare, di produrre oggetti personalizzati e non più per forza in serie, abbassare gli sprechi di materiale e i tempi di produzione.

A questo scopo è stato analizzato un caso di studio nel settore aeronautico rappresentato da alcuni componenti di un sedile passeggeri progettato per veicoli commerciali a corto medio raggio. In particolare, nella parte posteriore del sedile sono integrati il tavolino ed il porta bicchiere. Tali componenti impattano su diversi aspetti del progetto. Innanzitutto, sull'aspetto estetico, dovendosi integrare in una geometria che va a compromettere la continuità e che deve essere disegnata in modo da garantire l'armonia della forma generale del sedile. Sono anche componenti con i quali il passeggero della fila posteriore interagisce durante tutto il viaggio. La disponibilità di un prototipo facilmente e velocemente modificabile risulta quindi importante per poter generare delle varianti di prodotto e valutarne l'integrazione e l'usabilità in tempi veloci.

Per tale motivo si è pensato di ri-progettare delle componenti di un sedile per interni cabina per creare prototipi facilmente modificabili utili a verificare l'effettiva usabilità del prodotto. Nel passare da un modello CAD ad un modello per la stampa 3D si è usato un approccio tale da ottenere un sistema di tipo non-assembly, ovvero tale che più componenti risultino già collegati da cerniere realizzate in macchina e che dunque non richiedono l'assemblaggio o l'uso di elementi di collegamento. Lo studio dei parametri geometrici e di processo per la realizzazione di tale modello di stampa con tecnologia FDM è stato dunque oggetto della tesi.

Nella prima parte si presentano la storia, i materiali, le tecnologie e le metodologie di progettazione e di produzione di prodotti con particolare riferimento ai meccanismi non-assembly e alla verifica dell'usabilità.

Nella seconda parte si descrive il processo di lavoro per la realizzazione dei prototipi di un tavolino e di un porta bicchiere di un sedile di un aereo con relativi risultati.

Infine, vengono riportate le conclusioni tratte dai risultati emersi dall'utilizzo di questo metodo di lavoro.

1. ADDITIVE MANUFACTURING

L'Additive Manufacturing (AM) o Fabbricazione Additiva, anche detta stampa 3D, è un'innovativa tecnologia produttiva che permette la realizzazione di prototipi e di prodotti finiti, seguendo un modello matematico del pezzo disegnato su di un sistema CAD 3D, tramite l'aggiunta di materiale senza la necessità di fonderlo o sottrarlo a un pieno come nelle tecnologie tradizionali.

1.1 CENNI STORICI

Le basi dell'Additive Manufacturing risalgono a quasi 150 anni, con proposte per costruire mappe topografiche e foto-sculture a forma libera da strati bidimensionali (2D). Gli sforzi di ricerca negli anni '60 e '70 hanno fornito prove di concetto e brevetti per i primi processi di AM moderni, inclusa la fotopolimerizzazione alla fine degli anni '60, la fusione delle polveri nel 1972, e la laminazione del foglio nel 1979. Tutto questo è stato reso possibile dall'invenzione del computer alla fine degli anni '40, dallo sviluppo delle resine fotopolimeriche da parte di DuPont negli anni '50 e dalla disponibilità commerciale dei laser negli anni '60. Seguirono i progressi nella progettazione assistita da computer (CAD) e nella produzione (CAM), compreso lo sviluppo di macchine utensili a controllo numerico all'inizio degli anni '50, la computer grafica e gli strumenti CAD all'inizio degli anni '60, i sistemi CAD/CAM alla fine degli anni '60 e la disponibilità di monitor per computer a basso costo a partire dai primi anni '70. Tuttavia, la tecnologia era agli inizi, senza mercato commerciale e con scarso supporto per le attività di ricerca e sviluppo.

Gli anni '80 e l'inizio degli anni '90 hanno visto un aumento dei brevetti e delle pubblicazioni accademiche; Nel 1982 Chuck Hull inventò la stereolitografia (SL), tecnica di AM per polimeri, fondando la prima realtà commerciale di rapid prototyping (RP): la 3DSystems, azienda ancora ai vertici del settore. Nel 1986 Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase (e altri ricercatori), studiando la stereolitografia, idearono la Selective Laser Sintering (SLS), che a differenza della stereolitografia utilizza un fotopolimero termoplastico in polvere e non più liquido. La Fused Deposition Modelling (FDM) fu brevettata nel 1988 da Scott Crump che poi fondò la Stratasys, azienda leader nel settore. Gli anni '90 e 2000 sono stati un periodo di crescita per l'AM. Sono stati commercializzati nuovi processi, le tecnologie esistenti sono state migliorate e l'attenzione ha iniziato a spostarsi sullo sviluppo di software relativo all'AM. Sono stati introdotti formati di file specifici per AM come STL (StereoLithography), CLI (Common Layer Interface), LEAF (Layer Exchange ASCII Format) e LMI (Layer Manufacturing Interface). Sono stati sviluppati programmi software specifici,

come CIDES di Clemson (1990) e Magics di Materialise (1992). Il 1995 fu un anno di svolta per l'AM, grazie alla tecnologia del Selective Laser Melting (SLM), sviluppata dai tedeschi del Fraunhofer Institute, per la prima volta fu possibile fondere polveri di metallo per realizzare oggetti con densità simile a quelli prodotti con tecnologie tradizionali. Infine, nel 2002 venne sviluppato l'Electron Beam Melting (EBM) che permette di realizzare una densità maggiore rispetto alla SLM. Grazie all'arrivo di computer economici e potenti si sono potute realizzare macchine per l'AM più piccole e convenienti, e grazie ai progressi nei software di modellazione solida si è reso più facile ed economico l'accesso a studenti e professori a questa tecnologia. Questo ha portato alle prime macchine per hobby dal progetto RepRap nel 2005.

Oggi, i prodotti e i servizi AM supportano un'ampia gamma di attività, tra cui produzione, energia, trasporti, arte, architettura, istruzione, hobby, esplorazione spaziale e esercito. L'adozione su larga scala dell'AM per la produzione diretta di parti finali si è verificata nei settori medico, dentale e aerospaziale. Attualmente i ricercatori sono ancora impegnati nella ricerca di soluzioni migliorative ed alternative alle tecnologie già sviluppate, specialmente con l'obiettivo di rendere l'AM più adatta alla produzione di parti definitive [2,7].

1.2 MATERIALI

Conoscere le tipologie di materiale è importante per capire i processi e ci aiuterà a classificare le tecnologie di Stampa 3D. Nella seguente tabella vengono illustrati i principali materiali attualmente utilizzati per la realizzazione di componenti dalle principali tecnologie di Additive Manufacturing; principalmente vengono utilizzati materiali polimerici, metallici, compositi e ceramici.

Tabella 1.1 Da Nannan GUO, Ming C. LEU “Additive manufacturing: technology, applications and research needs”

| Materiali | Tecnologie |
|--|------------------------------|
| Polimeri (Termoindurenti //Termoplastici) | SLA, MJM//MJM, FDM, SLS, 3DP |
| Metalli | SLM, LDM/LENS, EBM |
| Ceramici | SLA, FDM, SLS, 3DP |

| | |
|--|---|
| Compositi (Uniformi// Functionally Graded Materials (FGM)) | FDM, 3DP, LOM, SLS, SLM//FDM, LDM/LENS |
|--|---|

Three-Dimensional Printing (3DP), Electron Beam Manufacturing (EBM), Fused Deposition Modelling (FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM), Laser Engineered Net Shaping (LENS), MultiJet Modelling (MJM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS).

1.2.1 Polimeri

La plastica non è un materiale che si trova in natura infatti è creato artificialmente tramite l'unione di più molecole attraverso la polimerizzazione, ed è per questo che le plastiche sono anche chiamate polimeri perché sono create dall'unione di più molecole. La trasformazione della materia prima avviene attraverso la polimerizzazione che permette di trasformare le materie prime in materie plastiche, create sotto forma di granuli, pastiglie, polveri o liquidi. I vantaggi che possiamo ottenere dall'uso di materie plastiche rispetto ad altri materiali sono la grande facilità con cui le possiamo lavorare, il basso costo, l'isolamento acustico, termico, elettrico, meccanico (vibrazioni), la resistenza agli agenti chimici, l'idrorepellenza ed anche la resistenza alle muffe, funghi e batteri [6,7].

I materiali polimerici sono la famiglia con più alta varietà di scelta nell'AM. Possono essere selezionati in base alle loro molteplici proprietà, come: resistenza a trazione, colore, trasparenza, rigidità, flessibilità, biocompatibilità, temperatura di fusione e altre.

Le plastiche si possono classificare in base al comportamento ad alte temperature, i due principali gruppi sono:

- **Materiali Termoindurenti:** dopo che hanno raggiunto il loro stato solido non possono essere più fusi e se vengono sottoposti ad alte temperature si danneggiano.
- **Materiali Termoplastici:** possono subire ripetuti processi di fusione e solidificazione; infatti, conservano le loro proprietà anche ad alte temperature.

1.2.2 Metalli

I metalli nell'AM sono più o meno gli stessi che si usano con le tecnologie tradizionali, il numero di varietà è sicuramente inferiore a quelle delle plastiche, ma è in forte aumento. Ad oggi è possibile utilizzare: Acciaio per utensili, Acciaio inossidabile, Leghe di Alluminio, Leghe di Titanio, Leghe a base di Nickel, Leghe di Cobalto-Cromo, Oro, Argento ed altre.

La densità che si riesce a raggiungere all'interno del pezzo è quasi al 100%, questo permette di avere una struttura senza microfratture, inoltre, con le tecniche di AM si ha una solidificazione in tempi ridotti rispetto alle tecniche tradizionali, questo comporta la generazione di grani di dimensione minore aventi una distribuzione più uniforme, e di conseguenza si ottengono componenti con proprietà meccaniche migliori [6,7]

1.2.3 Ceramici

Le ceramiche sono materiali solidi inorganici, non metallici. Le ceramiche di solito hanno una grande resistenza chimica e capacità di resistere alle alte temperature e sono state ampiamente applicate nell'industria. Tuttavia, questi materiali sono molto fragili e duri, il che li rende difficili da produrre, soprattutto per la produzione di parti con geometrie complesse. La tecnologia AM ha dimostrato con successo i suoi vantaggi nella produzione di parti in ceramica attraverso metodi "diretti" e "indiretti". Con questo materiale otteniamo ottime finiture superficiali, alta definizione di particolari e ottimo grado di densità. Viene utilizzato nelle tecnologie laser poiché necessita di un apporto di calore importante per fondere le microparticelle di polvere del materiale adibito alla creazione del prodotto finale [6,7]

1.2.4 Compositi

I materiali compositi sono realizzati unendo un secondo materiale ad una base di natura differente, il materiale più comunemente utilizzato per fare da base è la poliammide. In aggiunta si utilizzano materiali come vetro, alluminio e fibre di carbonio allo scopo di incrementare le proprietà del componente (resistenza a trazione, durezza e rigidità tra le più comuni) [6,7]. Possiamo dividere i compositi in due tipologie:

- Compositi Uniformi: fabbricati utilizzando i processi AM sono solitamente eseguiti utilizzando una miscela prepreparata di materiali adeguati, come un letto a polvere misto per SLS, SLM e 3DP, un filamento in materiali misti per FDM, un laminato composito per LOM

o una miscela di resina liquida con particolato per SLA. I materiali compositi che possono essere prodotti con la tecnologia AM includono una matrice polimerica, matrice ceramica, matrice metallica e compositi rinforzati con fibre e particolato. Una delle più importanti famiglie composite uniformi per l'applicazione industriale è composito rinforzato in fibra.

- Functionally Graded Materials (FGM): I processi AM che possono fornire materiali diversi (di solito attraverso più sistemi di alimentazione) alle aree di costruzione. Hanno la capacità di costruire componenti con FGM, che è uno dei vantaggi primari della tecnologia AM che i metodi convenzionali non possono realizzare. Questa abilità offre la flessibilità di controllare la composizione e ottimizzare le proprietà della parte integrata. Un esempio è una puleggia che contiene più carburo vicino al mozzo e al bordo per renderlo più duro e più resistente all'usura e meno carburo in altre aree per aumentare la conformità.

1.3 TECNOLOGIE

In questo capitolo si descriverà il funzionamento e le caratteristiche delle principali tecnologie di AM. Tra le possibili classificazioni disponibili, si è scelto di adottare quella che si basa sui materiali utilizzati dalla tecnologia.

1.3.1 TECNOLOGIE PER POLIMERI

1.3.1.1 Fused Deposition Modelling (FDM)

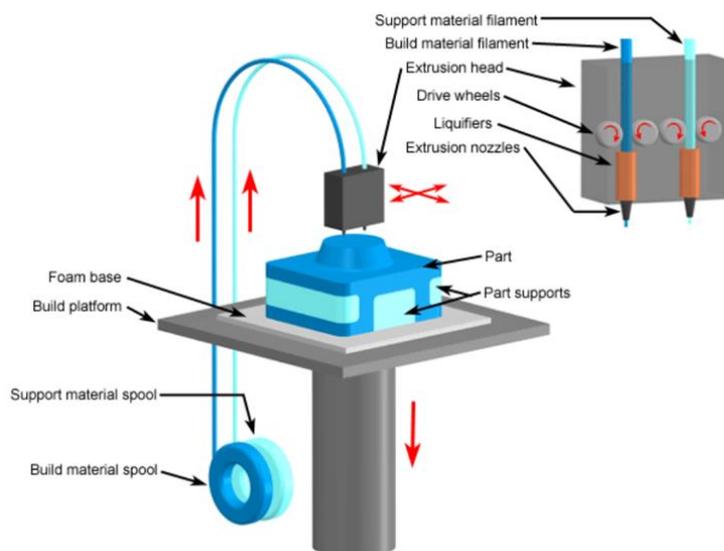


Fig.1.1 Schema FDM

La tecnica FDM utilizza una testa mobile, che deposita un filo di materiale termoplastico fuso su un substrato. Il materiale viene riscaldato fino a 1 °C sopra il suo punto di fusione, in modo che si solidifichi subito dopo l'estrusione e successivamente si salda agli strati precedenti. È necessario un adeguato controllo sulle sue caratteristiche, in particolare la temperatura di estrusione deve essere adeguata: un suo valore eccessivo provocherebbe un processo di colata che comprometterebbe la precisione della lavorazione, una temperatura troppo bassa impedirebbe l'adesione del filamento con lo strato già depositato. La testa del sistema FDM include solitamente due ugelli, uno per il materiale della parte e uno per il materiale di supporto. Una volta terminata la lavorazione si procede con la rimozione dei supporti che si compone di due fasi: inizialmente una rimozione grossolana svolta manualmente, successivamente il rimanente materiale di supporto viene sciolto depositando il pezzo all'interno di una vasca contenente una soluzione formata da acqua e soda caustica.

Il vantaggio del sistema è che può essere visto come una struttura di prototipazione desktop, poiché utilizza materiali economici, non tossici e inodori, in una varietà di colori e tipi, come acrilonitrile butadiene stirene (ABS), ABS medico, PLA, cera per microfusione ed elastomeri. La semplicità del processo FDM, le attrezzature relativamente economiche e le materie prime rendono il suo utilizzo ideale da parte degli hobbisti così come la produzione di parti in plastica a basso costo. Tuttavia, la precisione e la qualità della superficie sono relativamente scarse rispetto ad altre tecnologie di AM [1,4,5]

1.3.1.2 PolyJet (PJ)

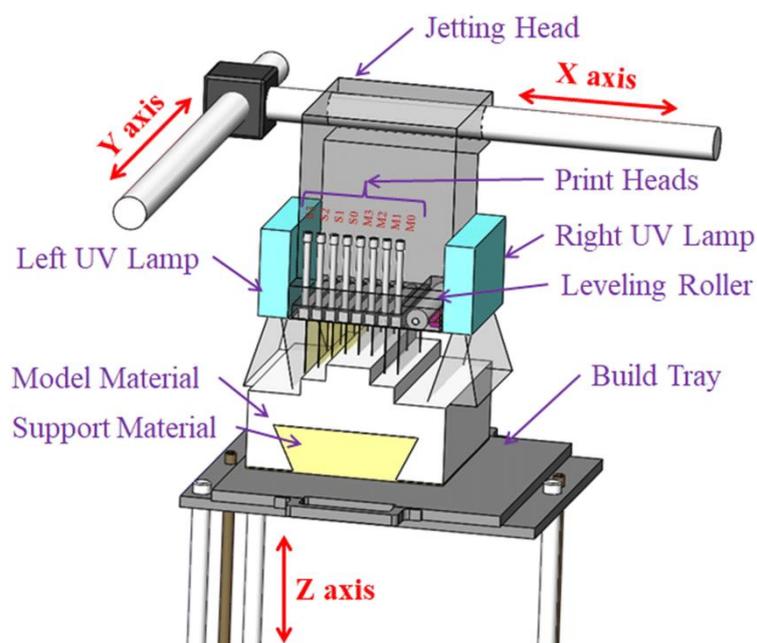


Fig.1.2 Schema PJ

Il metodo PolyJet può essere visto come un'evoluzione della stampa a inchiostro, però invece di gettare inchiostro, vengono depositate gocce di materiale liquido tramite una testina che contiene un gran numero di ugelli che spruzzano gocce finissime di fotopolimeri. Dopo la deposizione vengono trattati da una lampada UV per la solidificazione. Con questa tecnica si riescono ad ottenere forme con una risoluzione di 15 micron, con precisione fino a 0.1 mm.

Il processo di stampa è semplice, tramite il file STL dell'oggetto il software della stampante calcola il posizionamento dei fotopolimeri e del materiale di supporto gelatinoso, utile per costruzioni complesse e di facile rimozione. Elaborato il modello inizia il deposito dei fotopolimeri strato per strato con relativa polimerizzazione, in questo modo strati sottilissimi vengono ad accumularsi sul vassoio, assieme al materiale di supporto che viene posto in punti precisi per evitare il collasso o la deformazione. Alla fine del processo il materiale di supporto viene rimosso facilmente con le mani o dell'acqua e l'oggetto è pronto per l'uso [4,5]

1.3.1.3 Stereolithography (SLA)

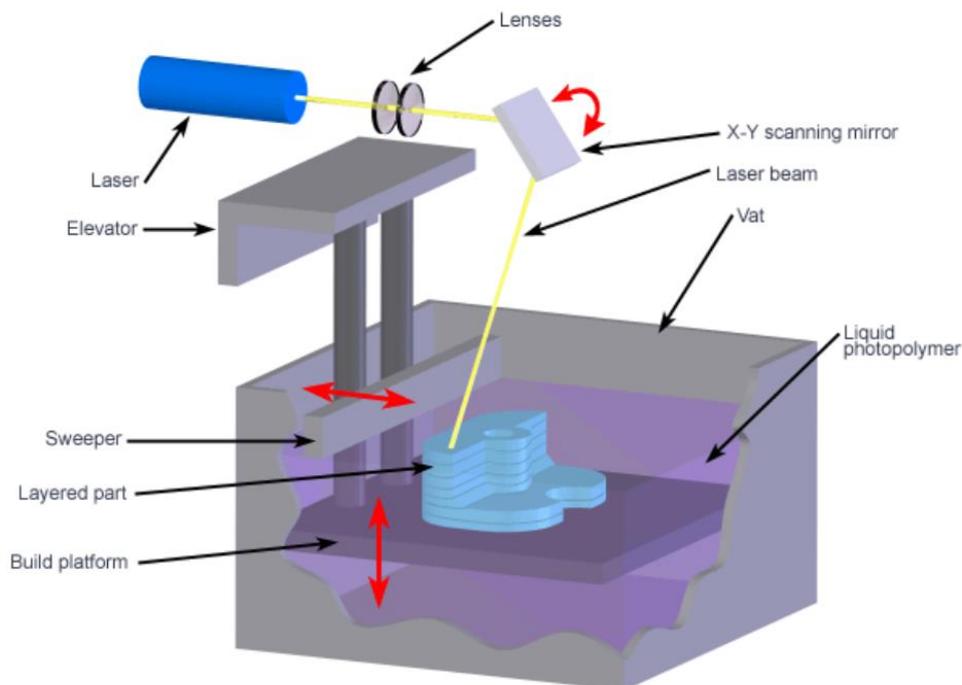


Fig.1.3 Schema SLA

La stereolitografia si basa sul principio della fotopolimerizzazione delle resine monomeriche fotosensibili quando esposte ai raggi UV. La sorgente di radiazione UV è un laser a bassa potenza che solidifica uno strato sottile sulla superficie. Una macchina SLA è costituita principalmente da una piattaforma, che è immersa in un bagno di resina liquida e una sorgente laser, compreso l'hardware e il software appropriati per il controllo. Uno strato della parte viene scansionato sulla superficie della

resina dal laser, secondo i dati dello strato del modello CAD. Una volta scansionato il contorno dello strato, l'interno viene tratteggiato e quindi solidificato; la piattaforma viene immersa nella resina, uno strato sotto. Una lama spazza la superficie per garantire la planarità e viene costruito lo strato successivo, mentre contemporaneamente viene attaccato al precedente.

Questa tecnica di stampa ha la possibilità di raggiungere con tempi di lavorazione molto rapidi un'alta risoluzione, dell'ordine di pochi mm, determinata dalla dimensione dello spot ottico del generatore radiogeno, può utilizzare resine che, una volta polimerizzate, presentano caratteristiche diverse. I limiti, invece, sono rappresentati dalla eventuale necessità di utilizzare supporti atti a sostenere le parti dell'oggetto durante la costruzione, dall'alto costo del sistema di controllo e delle resine polimerizzanti, e dal fatto che durante il processo di stampa può essere utilizzata solo una resina alla volta, limitando così il disegno complessivo dell'oggetto [1,4,5]

1.3.1.4 Selected Laser Sintering (SLS)

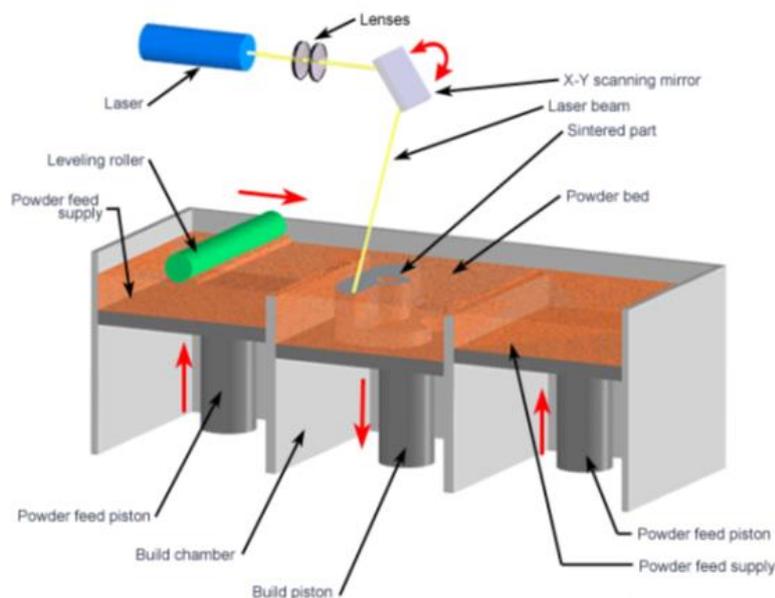


Fig.1.5 Schema SLS

La sinterizzazione laser selettiva utilizza una polvere fine, che viene riscaldata da un raggio laser (da 7 W per la plastica fino a 200 W) in modo tale da permettere ai grani di fondersi insieme. Sebbene il processo sia noto come sinterizzazione, non è del tutto vero. Prima che la polvere venga sinterizzata dal raggio laser, l'intero letto viene riscaldato appena al di sotto del punto di fusione del materiale per ridurre al minimo la distorsione termica e facilitare la fusione nello strato precedente. Dopo che ogni strato è stato costruito, il letto viene abbassato e viene applicato un nuovo strato di polvere. Un rullo rotante viene quindi utilizzato per distribuire uniformemente la polvere. Il materiale sinterizzato

costituisce la parte, mentre la polvere di materiale non sinterizzato rimane in posizione per supportare la struttura. Il materiale non sinterizzato può essere ripulito e riciclato dopo che la costruzione è stata completata.

Possono essere utilizzati materiali come polveri metalliche, nylon, compositi di nylon, sabbia, cera e policarbonati. Il SLS è una tecnologia molto più raffinata del FDM, con un livello di precisione quasi dieci volte superiore. Tuttavia, il processo è ancora relativamente lento (rispetto all'EBM per le strutture metalliche, ad esempio) e soffre di problemi come la distribuzione non uniforme del campo termico, che potrebbe portare a distorsioni termiche e crepe sul prodotto [1,4,5]

1.3.2 TECNOLOGIE PER METALLI

1.3.2.1 Electron Beam Melting (EBM)

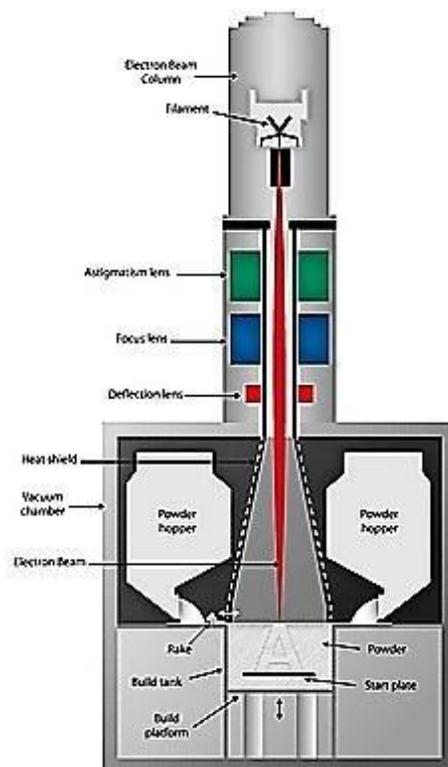


Fig.1.6 Schema EBM

L'EBM è un processo simile allo SLS, sebbene adatto solo per la costruzione di parti metalliche. La polvere viene fusa da un fascio di elettroni alimentato da un'alta tensione, tipicamente 30–60 KV. Il processo avviene in una camera ad alto vuoto per evitare problemi di ossidazione. L'EBM può anche

lavorare un'ampia varietà di metalli prelegati. il processo di produzione è completamente sottovuoto per permettere una corretta focalizzazione del fascio sul piano di lavoro. Ciò consente anche di evitare la formazione di ossidi metallici nelle polveri. Inoltre, il processo di fusione dei materiali avviene a temperature comprese tra i 700 e i 1000°C così da ottenere parti sostanzialmente prive di tensioni residue, che non necessitano di trattamenti post-produzione.

Rispetto a SLS, l'EBM può offrire un rendimento molto più elevato e una distribuzione del campo termico più uniforme; tuttavia, la precisione e la qualità della superficie sono inferiori [4,5]

1.3.2.2 Laser Deposition Technology (LDT)

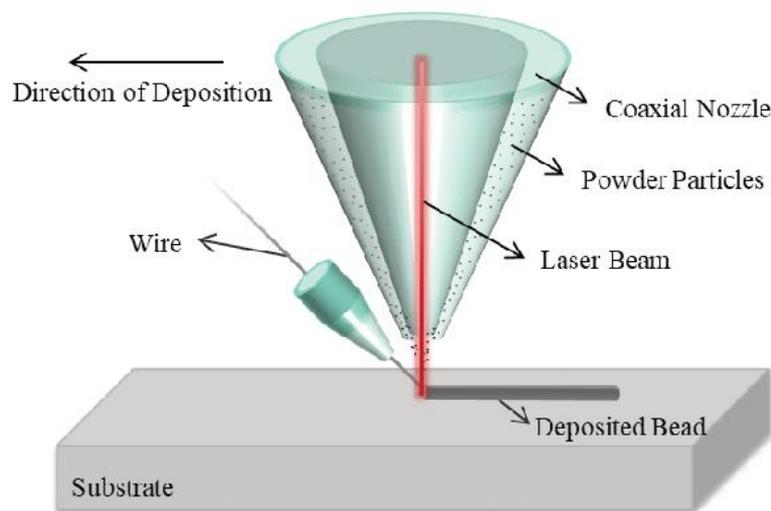


Fig.1.7 Schema LDT

La Laser Deposition Technology è una tecnica di AM nettamente differente rispetto alla SLM o alla EBM. Questa tecnologia, infatti, non sfrutta il principio di portare a fusione un letto di polvere, ma consiste nell'apportare direttamente il materiale nella zona interessata sfruttando il principio della saldatura. Il differente metodo di costruzione permette di ottenere una serie di vantaggi che rendono la tecnologia molto interessante in ottica futura; tuttavia, ancora persistono delle problematiche che ne limitano una più ampia diffusione. Il macchinario che esegue la lavorazione è composto da una testina collocata al di sopra della piattaforma di lavoro ed in grado di muoversi lungo il piano XY. La testina è composta da due ugelli, come mostrato in Figura 1.7: un ugello fornisce un getto di polvere metallica sulla zona interessata; l'ugello al centro invece emette un fascio laser in grado di fondere le

particelle metalliche, la fusione avviene direttamente nel punto di lavorazione. I parametri del processo devono essere opportunamente controllati al fine di garantire una qualità metallurgica soddisfacente degli strati depositi. Durante il processo, in analogia con tutte le lavorazioni che operano particelle meccaniche, è necessario utilizzare un gas di copertura nella zona interessata dalla lavorazione, così da evitare il verificarsi dell'ossidazione. Un grosso vantaggio, peculiare di questa tecnica, è l'elevata flessibilità sui materiali utilizzabili durante la lavorazione stessa. È possibile realizzare componenti in leghe metalliche differenti semplicemente cambiando la natura delle particelle apportate durante la costruzione, generando una zona di transizione continua, costituita da una miscela delle due leghe. Nelle tecniche tradizionali invece, per realizzare componenti metallici costituiti da leghe differenti, è necessario effettuare una saldatura, con la seguente formazione di un cordone di saldatura che costituisce un punto di debolezza e spesso si rivela fonte di rottura [4,5]

1.3.2.3 Selective Laser Melting (SLM)

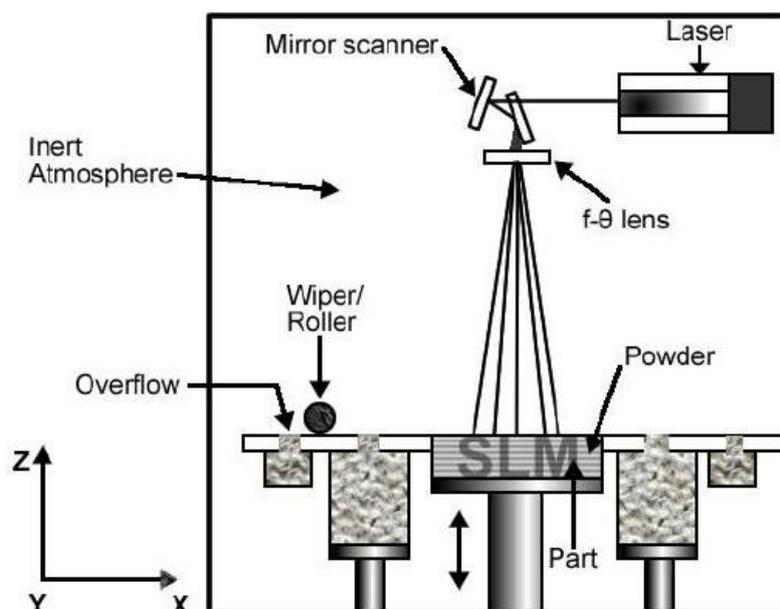


Fig.1.8 Schema SLM

La fusione laser selettiva è un processo simile a SLS; i due sono istanze dello stesso concetto ma differiscono nei dettagli tecnici. Invece della sinterizzazione, nel processo SLM, avviene la fusione della polvere per formare una parte. Pertanto, la potenza del raggio laser è generalmente maggiore (circa 400 W). All'interno della camera di lavoro è necessario realizzare il sottovuoto per evitare il fenomeno dell'ossidazione, quest'ultimo causato dalla reazione tra l'ossigeno e le polveri metalliche al momento della fusione. Per la lavorazione di materiali particolarmente reattivi, come le leghe di Titanio, è necessario l'impiego di Argon.

Terminata la lavorazione, avviene la rimozione della piattaforma di lavoro che può essere fusa e riutilizzata, questa fase è resa complicata dall'utilizzo di un materiale resistente in grado di impedire il distacco del componente [4,5].

1.4 PROCESSO DI PROGETTAZIONE

L'AM, essendo un processo produttivo si articola in diverse fasi successive che portano alla realizzazione del prodotto/prototipo [3,4]

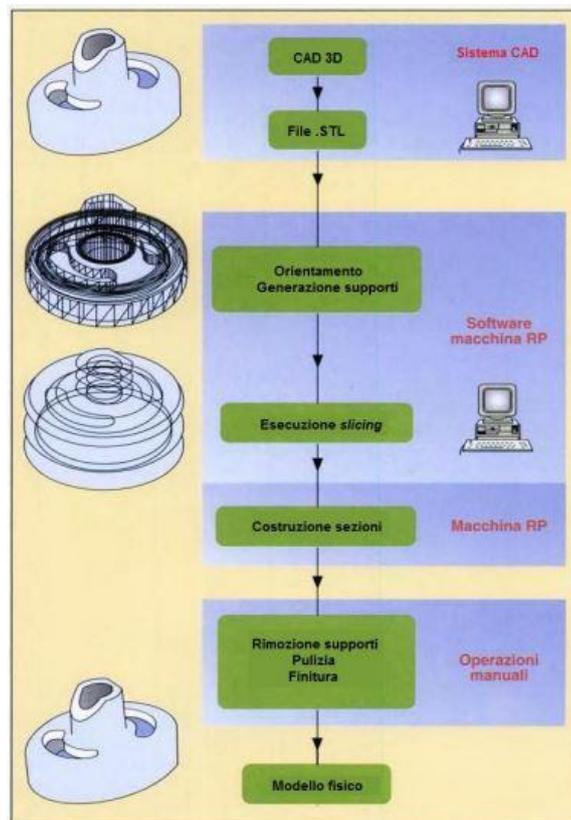


Figura 1.9 Fasi del processo di prototipazione rapida. Da Gatto A., Iuliano L., “Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale”

1.4.1 Creazione del modello tridimensionale

Il modello tridimensionale creato su di un sistema CAD è il prerequisito fondamentale per l'utilizzo della stampa 3D. Oggi questi sistemi sono ormai diffusi in ogni contesto di progettazione.

1.4.2 Generazione del file STL

Per i modelli matematici nell'AM viene utilizzato un linguaggio standard, STL (Standard Triangulation Language).

Il modello CAD 3D viene convertito in un modello tipo "Shell" nel quale le superfici interne ed esterne sono approssimate da triangoli di differenti dimensioni, in funzione della complessità geometrica e della risoluzione richiesta, così da ricreare il profilo dell'oggetto. Prima della creazione fisica del prototipo occorre controllare che il file sia privo di errori, come buchi, vuoti e fessure. Questi problemi possono compromettere la buona riuscita del prodotto fisico, con lo spreco di tempo e risorse. Una volta che il file ".STL" è privo di errori si può passare alla fase successiva del processo [4]

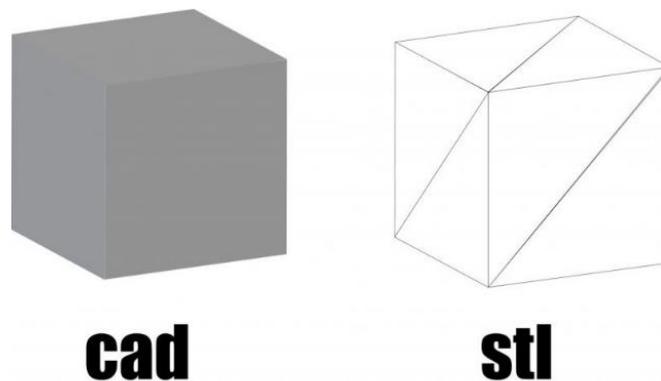


Fig.1.10 Differenze file CAD e STL

1.4.3 Orientamento e generazione di supporti

Il file in formato STL serve da interfaccia tra il modello CAD ed il Software della macchina di AM. Questo Software definisce l'orientamento con cui l'oggetto verrà realizzato e genera in automatico i supporti. I supporti hanno tre scopi: bloccare l'oggetto alla piastra di lavoro durante la costruzione, supportare le parti sporgenti, proteggere le pareti laterali durante la lavorazione. Per scegliere il materiale e la geometria dei supporti bisogna tenere conto di diverse necessità:

- Sostenere il pezzo nella costruzione e impedire l'adesione con la piastra di lavorazione.
- Essere posizionato nelle superfici che non hanno bisogno di finiture superficiali elevate perché la futura rimozione potrebbe incrementare la rugosità.
- Rendere facile la rimozione a fine lavorazione.

1.4.4 Slicing

La fase successiva che viene eseguita in automatico dal Software di stampa 3D è la divisione nelle diverse sezioni che andranno a costituire il modello fisico. Il modello in formato STL viene fatto intersecare con piani paralleli con normale parallela all'asse z e distanziati l'uno dall'altro di una quantità che dipende dalla risoluzione della macchina. I dati risultanti sono quelli utilizzati dalla macchina per eseguire la lavorazione. L'approssimazione delle superfici curve del modello con degli strati rettangolari crea un altro errore insito nella tecnologia, lo staircase, che è una rugosità superficiale che dipenderà dalla complessità della geometria e dallo spessore di ogni strato. Per minimizzare questo errore è possibile utilizzare lo Slicing adattivo, che adatta lo spessore dello strato alla geometria del componente, e orientare opportunamente il pezzo.

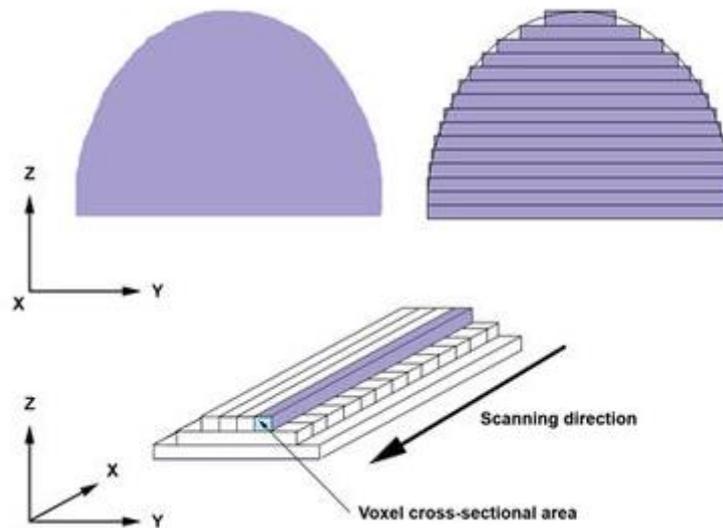


Fig.1.11 Slicing

1.4.5 Costruzione dell'oggetto

Effettuato lo Slicing, la stampante 3D procede con la realizzazione del prodotto generando uno strato sopra l'altro. Le caratteristiche di questa fase dipendono dalla tipologia di tecnologia di stampa utilizzata.

1.4.6 Post-trattamento

Una volta ultimata la lavorazione sono necessarie delle attività di post-trattamento come la pulizia, la rimozione dei supporti, lavorazioni di finitura superficiale, trattamenti termici o altre. La necessità di queste attività dipende dal metodo di stampa 3D utilizzata e dall'uso a cui è destinato il pezzo realizzato.

Questa fase è quella più manuale, di conseguenza è anche una fase molto delicata perché il pericolo di danneggiamento con una manovra errata è alto. La pulizia consiste nella rimozione di parti in eccesso che possono essere rimaste sul pezzo, come supporti, resina intrappolata e altre parti a seconda della tecnologia utilizzata. La finitura si riferisce a processi secondari come la sabbiatura o la verniciatura, il cui scopo è quello di migliorare le caratteristiche superficiali ed estetiche del pezzo [7].

1.5 APPLICAZIONI

L'AM, grazie alle sue caratteristiche flessibili, è una tecnologia che può essere impiegata in svariati settori e con svariate applicazioni. I settori nel quale è più impiegata in ordine decrescente sono: la produzione di beni strumentali, l'aerospaziale, l'automotive, biomedicale e la produzione di beni di consumo. In passato la tecnologia veniva usata soprattutto per la creazione di prototipi, mentre ora si stanno incominciando a studiare le prestazioni degli oggetti stampati in 3D per poter introdurre una produzione di prodotti finiti.

1.5.1 PROTOTIPAZIONE

La prototipazione è intrecciata con quasi tutto lo sviluppo di prodotti, servizi e sistemi. Un prototipo è una rappresentazione preproduzione di alcuni aspetti di un concetto o disegno definitivo. La prototipazione spesso predetermina gran parte della distribuzione delle risorse in sviluppo e influenza il successo del progetto di design. Un prototipo è un artefatto che approssima una caratteristica (o più caratteristiche) di un prodotto, servizio o sistema.

I prototipi possono essere suddivisi in diverse categorie in base alle loro caratteristiche e alla loro posizione durante il processo di produzione [11,15].

| | Prototipi Concettuali | Prototipi Funzionali | Prototipi tecnici | Prototipi pre-serie |
|-----------------------------|--|---|---|---|
| Obiettivi | <ul style="list-style-type: none"> Valutazione della forma Verifiche di montaggio Analisi delle difficoltà tecnologiche | <ul style="list-style-type: none"> Valutazione delle prestazioni con prove funzionali Ottimizzazione del prodotto per la funzione | <ul style="list-style-type: none"> Valutazione del prodotto e del ciclo di fabbricazione | <ul style="list-style-type: none"> Valutazione finale del prodotto |
| Materiale | Qualsiasi | Simile | Molto simile | Definitivo |
| Tecnologia di Fabbricazione | Non è considerata | Non è considerata | Simile | Definitiva |

Fig.1.12 Da A. Gatto, L. Iuliano, "Prototipazione Rapida, La tecnologia per la competizione Globale", TECNICHE NUOVE

- I **Prototipi Concettuali** sono quei modelli creati subito dopo l'ideazione per valutare la forma, il montaggio e per capire tutte le difficoltà tecnologiche. Possono essere creati con qualsiasi tecnica e materiale.
- I **Prototipi Funzionali** sono creati con materiali simili a quelle finali per valutare appunto le prestazioni funzionali.
- I **Prototipi Tecnici** sono realizzati con le stesse tecnologie e materiali, diciamo un primo esemplare, per verificare l'idoneità dei processi di lavorazione e la corrispondenza delle caratteristiche tecniche e funzionali ai requisiti previsti.
- I **Prototipi Preserie** sono la prima produzione o 'lotto zero' che verrà valutata dal cliente. A questo punto non possono più esser fatti drastici cambiamenti al processo produttivo ma solo lievi aggiustamenti.

Ogni sforzo di prototipazione richiede una certa strategia unica per risolvere un problema o un'opportunità di progettazione [11]. Ci sono molti potenziali obiettivi per progettare la prototipazione, possiamo individuarne alcuni comuni a tutti i settori:

- **Rifinitura:** è il processo di miglioramento graduale di un design
- **Comunicazione:** è il processo di condivisione delle informazioni sul design e il suo potenziale utilizzo all'interno del gruppo di progettazione e per gli utenti
- **Esplorazione:** è il processo di ricerca di nuovi concetti di design.
- **Apprendimento attivo:** è il processo di acquisizione di nuove conoscenze sul design dello spazio o di fenomeni rilevanti.

Esistono varie tecniche di prototipazione che possiamo dividere in due categorie. La prima categoria porta direttamente a migliorare le prestazioni di progettazione e l'esperienza dell'utente. La seconda categoria è l'insieme delle tecniche utilizzate per ridurre lo sforzo e il costo necessari per sviluppare un prototipo.

1° categoria:

- **Prototipazione iterativa:** l'iterazione è il test sequenziale e il perfezionamento di un prototipo, arrivando così a soddisfare i requisiti.
- **Prototipazione parallela:** vengono incorporati e confrontati più concetti di design contemporaneamente per fornire un feedback critico nella selezione dei concetti.

2° categoria:

- **Prototipazione dei requisiti:** viene applicata quando viene sviluppato un prototipo per affrontare un sottoinsieme o una versione ridotta dei requisiti di progettazione.
- **Sottosistema isolato:** un concetto o prototipo viene segmentato e un singolo sottosistema viene esplorato isolatamente. La costruzione di sottosistemi in isolamento può consentire lo sviluppo di una strategia di prototipazione su misura per quel sottosistema.
- **Prototipazione in scala:** imita il comportamento di un progetto più grande (o più piccolo) attraverso la similitudine. Questa scala può essere geometrica (cioè la dimensione) o relativa alla complessità
- **Prototipazione virtuale:** è un modello sviluppato su un computer o piattaforma che consente di eseguire test più rapidamente e costi ridotti rispetto ai prototipi fisici.

| | | Objectives | | | | | |
|-----------------------|------------------------|------------|-------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| | | Refinement | Exploration | Communication | Active Learning | Reduce cost | Reduce time |
| Individual Techniques | Iterative Prototyping | ● | | | | | |
| | Parallel Prototyping | | ● | | | | |
| | Requirement Relaxation | | | ● | ● | ● | ● |
| | Subsystem Isolation | | | | | ● | ● |
| | Scaled Prototyping | | | | | ● | ● |
| | Virtual Prototyping | | | ● | | ● | |

Fig.1.12 Mappatura tra tecniche e obiettivi comunemente associati. Le tecniche correlate sono indicate con un cerchio pieno. Da Bradley Camburn, Vimal Viswanathan, Julie Linsey, David Anderson, Daniel Jensen, Richard Crawford, Kevin Otto and Kristin Wood “Design prototyping methods: state of the art in strategies, techniques, and guidelines”

Dopo la creazione del prototipo è possibile effettuare dei test che servono per verificare i vari aspetti del prodotto. Uno dei principali aspetti da verificare in un prodotto che deve essere utilizzato da un utente finale è ad esempio l’usabilità.

1.5.1.1 USABILITÀ

La qualità nell'uso di un prodotto può essere misurata dall'efficacia (ovvero, attività completate, obiettivi raggiunti, errori in un'attività, attività con errori e intensità dell'errore dell'attività), efficienza (tempo di attività, efficienza del tempo, rapporto costi/benefici, rapporto tra tempo produttivo, azioni non necessarie e fatica) e soddisfazione (soddisfazione generale, soddisfazione per le funzionalità, utilizzo discrezionale, utilizzo delle funzionalità, piacere dell'utente e comfort fisico) degli utenti previsti al raggiungimento dei loro obiettivi. Per meglio comprendere come l'AM e la prototipazione possono supportare la valutazione di questo aspetto specifico si descrivono, nei paragrafi seguenti, alcuni casi di studio selezionati [14].

1.5.1.1.1 CASI STUDIO

Si presentano alcuni casi studio di prototipi creati attraverso l'AM e poi sottoposti a studi di usabilità.

1.5.1.1.1.1 Prototipo di un ugello e di una frizione



Fig.1.13 Ugello stampato in 3D: verticale (sinistra), orizzontale (destra) e banco di prova per testare la qualità del getto di spruzzo

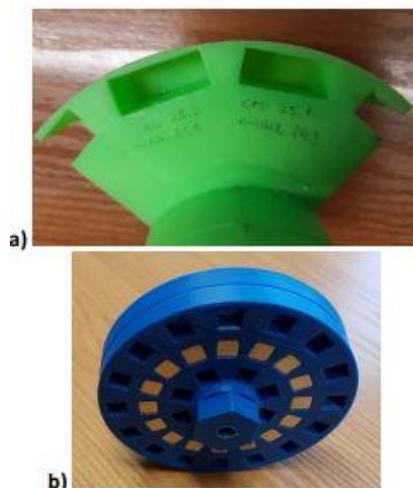


Fig.1.14 a) una stampa di esempio della parte della frizione, b) un modello fisico ottenuto dopo l'assemblaggio dei componenti

Il caso di studio consiste nella riprogettazione di un ugello e di una frizione (vedi fig.1.13 e 1.14). Grazie ai vari test di usabilità realizzati sui prototipi 3D si è potuto fare scelte progettuali consapevoli. Infatti, confrontando i risultati dei test dell'ugello disponibile sul mercato e del suo modello stampato in 3D si è riusciti a selezionare i materiali e l'orientazione per la stampa 3D di prototipi. Nel caso degli innesti coassiali, l'esperienza da precedenti test sulla variante a fila singola ha consentito di prendere una decisione sulla modifica dei parametri (densità di riempimento) per la stampa 3D dell'elemento successivo del rotore. Si è poi analizzato che questo metodo di prototipazione permette di risparmiare tempo, bassi costi, evitare sprechi di materiale, offre una grande flessibilità e adattamento per nell'effettuare i test [12].

1.5.1.1.2 Prototipi di tecnologie assistive



Fig.1.15 Prototipi stampati in 3D e test di usabilità

In questo caso studio si sono realizzati e analizzati prototipi di alcune parti di tecnologie assistive. Siccome in questo campo l'ergonomia e l'adattabilità sono fondamentali l'AM offre grandi possibilità nella realizzazione di prodotti personalizzati. Una volta stampati i prototipi, non tutti in scala reale (per i tempi ristretti di lavoro), si è provato a effettuare i test di usabilità ma si è notato che con i prototipi di dimensioni non reali non era possibile, mentre su quelli in scala reale si sono avuti riscontri positivi [13].

1.5.1.2 MECCANISMI NON-ASSEMBLY

L'AM grazie alle sue tecnologie permette di realizzare prodotti di forma molto complessa. Infatti, è possibile creare anche interi meccanismi o parti senza il bisogno di un assemblaggio finale. Questi prodotti vengono chiamati meccanismi non-assembly o di non assemblaggio [8]

Sono state distinte tre categorie principali che sono rappresentative per i meccanismi di non assemblaggio AM, come rappresentato in Fig.1.16.

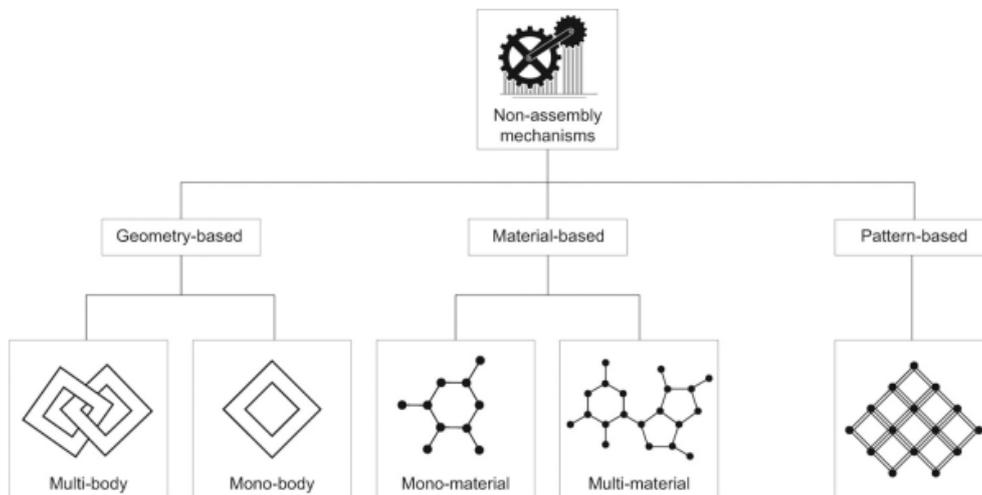


Fig.1.16 Divisione meccanismi non-assembly. Da Kirsten Lussenburg, Aim´ee Sakes, Paul Breedveld “Design of non-assembly mechanisms: A state-of-the-art review”

1. Meccanismi basati sulla geometria: sono un gruppo di meccanismi in cui la funzionalità del meccanismo è al primo posto sulla geometria della struttura, che può essere realizzata utilizzando più corpi, come per i meccanismi tradizionali, o un corpo unico, come per i meccanismi conformi [8]. Questi si possono suddividere in meccanismi:

1.1 **Multi-corpo:** ricordano molto da vicino il design dei "tradizionali" meccanismi, poiché sono costituiti da parti separate. I giochi tra le parti separate sono difficili da realizzare nella maggior parte dei processi di stampa 3D. Pertanto, sono necessarie soluzioni progettuali per creare meccanismi funzionali. Le strutture di supporto sono spesso necessarie quando si progettano questi meccanismi, poiché i corpi sono separati l'uno dall'altro e non si possono stampare in aria senza supporto.



Fig1.17 esempio multi-corpo, Mano protesica

1.2 **Mono-corpo:** questi meccanismi spesso soffrono di mobilità limitata, a causa della rigidità del materiale. Aumentando la lunghezza della parte flettente della cerniera, è possibile creare un giunto di grande spostamento. Le spirali e le eliche sono una forma ideale per questo, poiché possono avere una lunga flessione pur mantenendo una dimensione compatta. Il design della cerniera consente di impilare più collegamenti uno sopra l'altro con un nucleo di collegamento, creando meccanismi a strati che possono essere stampati senza supporto su una stampante FDM.

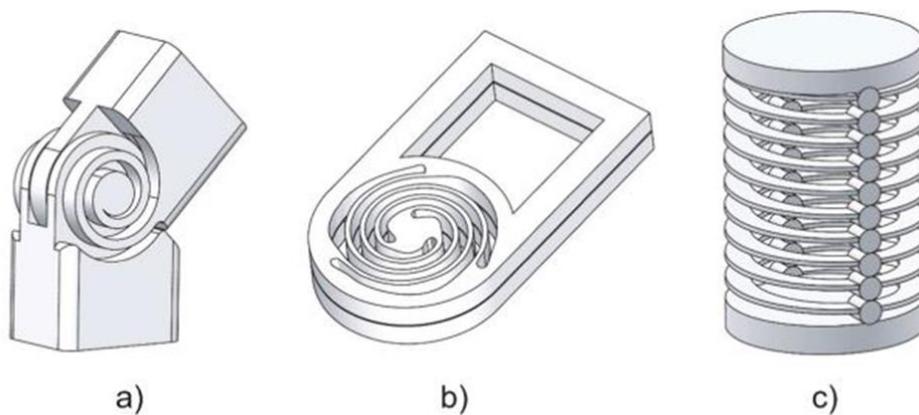


Fig.1.18 Esempi di cerniere mono-corpo. a) Molla di torsione a spirale, b) cerniera a tre spirali, c) giunto elicoidale con contatti volventi

2. Meccanismi basati sul materiale: sono un insieme di meccanismi in cui il materiale è responsabile del funzionamento del meccanismo, avvalendosi o di un singolo materiale flessibile o di un materiale flessibile combinato con un altro rigido [8]. Si possono dividere in:

2.1 **Mono-materiale:** sono meccanismi realizzati con lo stesso materiale solitamente abbastanza flessibile per piegarsi ma sufficientemente rigido per avere una struttura stabile, purtroppo non è sempre facile trovare i materiali giusti.

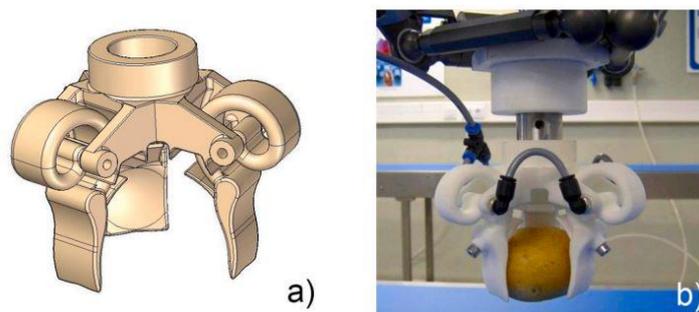


Fig.1.19 Un esempio di pinza pneumatica mono-materiale

2.2 **Multi-Materiale:** Le opzioni per la stampa multi-materiale sono limitate a quelle disponibili stampanti in grado di stampare più materiali. La combinazione di materiali più utilizzata è la combinazione di due polimeri, uno rigido e uno flessibile. L'area di una struttura multi-materiale che ha più probabilità di staccarsi o rompersi è il confine tra i due diversi materiali.

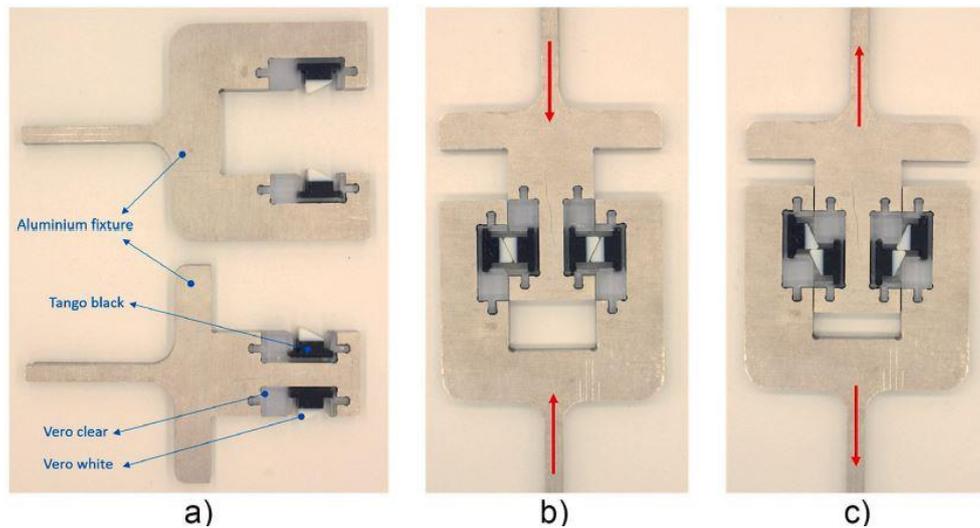


Fig.1.20 Meccanismo a cricchetto multimateriale a) L'allestimento di collaudo del meccanismo con infisso in alluminio; b) allestimento iniziale; c) direzione di bloccaggio.

3. **Meccanismi basati su modelli:** descrivono un gruppo di meccanismi in cui uno schema o una ripetizione di una semplice unità di base sono fondamentali per il funzionamento del meccanismo [8].

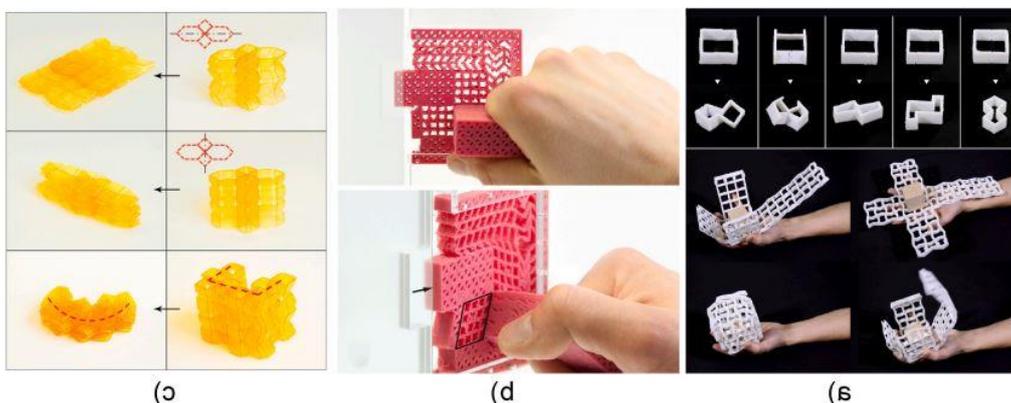


Fig.1.21 Esempi di meccanismi basati su pattern. a) Cinque diverse configurazioni di trasformazione per una singola cella e celle applicate in un design a scatola pieghevole, b) meccanismo di chiusura della porta basato su un motivo, c) diverse strutture pieghevoli a base di origami

1.5.1.2.1 Caso studio della mano protesica

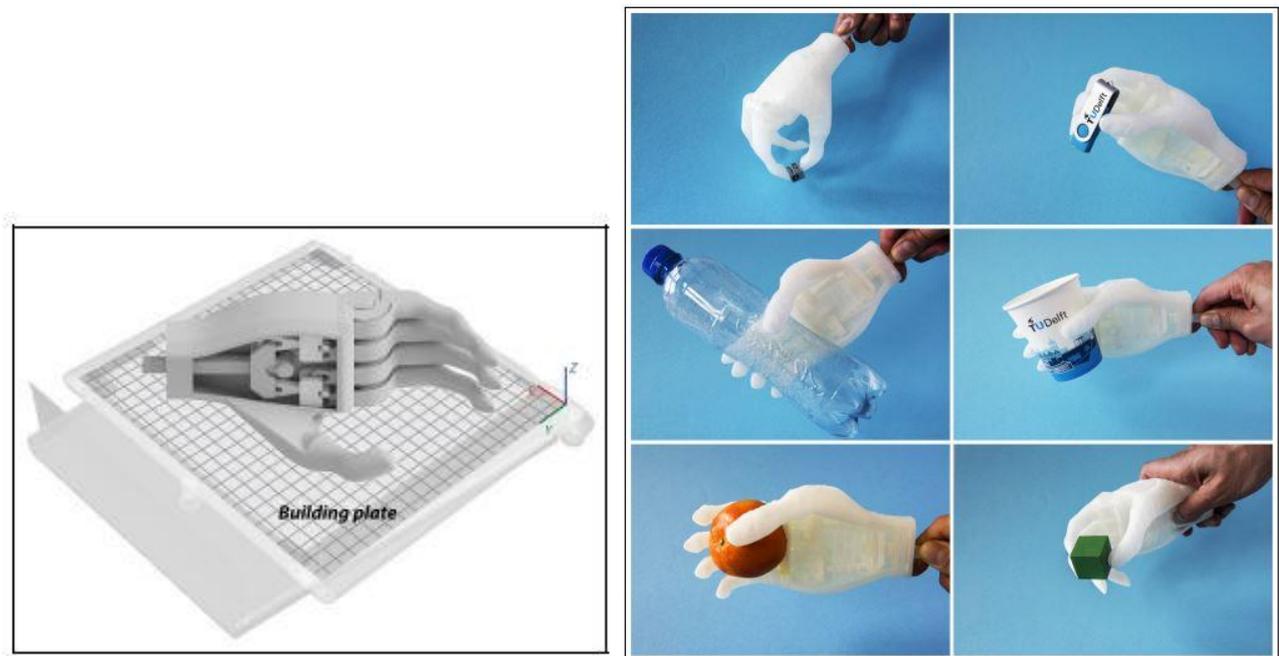


Fig.1.22 A sinistra: direzione di stampa della protesi della mano. A destra: modelli di presa.

Il caso di studio presenta una protesi di una mano progettata con metodologia non-assembly in particolare multi-corpo. In figura 1.22 possiamo vedere la disposizione migliore del pezzo per la stampa 3D. Realizzato il prototipo si sono fatti alcuni test di presa per verificare l'effettivo funzionamento. È stata scelta questa metodologia progettuale per risparmiare tempo, soldi, materiale, Infatti, il prezzo di questa protesi si aggira intorno ai 10\$, quindi una protesi che si potrebbero permettere praticamente tutti, con possibilità di personalizzazioni e in breve tempo [9].

2. IL CASO DI STUDIO DEL SEDILE PER INTERNI CABINA

In questo capitolo si mostra per intero tutto il processo di progettazione, stampa e test di usabilità di un prototipo nel caso studio di studio di un sedile per interni cabina. Si è partiti da un modello al CAD di un sedile e si è arrivati alla prototipazione di alcuni elementi del tavolino che si trova sullo schienale del sedile dopo averli resi non assembly.

2.1 Obiettivi

Questo caso studio riguarda la creazione di un modello per la stampa 3D di alcuni componenti del sedile passeggeri a partire dal modello CAD. L'obiettivo principale è quello di produrre un modello facilmente modificabile e duplicabile utile per verificare l'interazione dell'utente, visualizzare i meccanismi e la movimentazione relativa delle parti senza il bisogno di implementare i collegamenti reali che farebbero aumentare i tempi di lavoro e i costi. Per questo motivo si è scelto di modificare un file CAD esistente, riprogettarlo con meccanismi non-assembly e poi creare il prototipo utilizzando la tecnologia FDM.

2.2 Processo

In questo capitolo viene definito il processo completo di progettazione-fabbricazione, a partire dal modello CAD finito fino alla produzione del prototipo ri-progettato. Il processo si può dividere in due fasi:

- Processo CAD progettuale
- Processo di stampa

2.2.1 Processo CAD progettuale

Si è partiti dal modello CAD di due sedili per interni cabina forniti da un'azienda leader del settore (vedi Fig.2.1) e si è ritagliata la parte d'interesse, cioè la parte superiore del sedile dove si trova la struttura del tavolino (vedi Fig.2.2). Il tavolino ed il porta bicchiere rappresentano la parte del sedile con la quale il passeggero interagisce durante tutta la durata del volo. Si è partiti dal file CAD in formato step (formato di interscambio standard) e si è passati poi a lavorare in Rhinoceros.

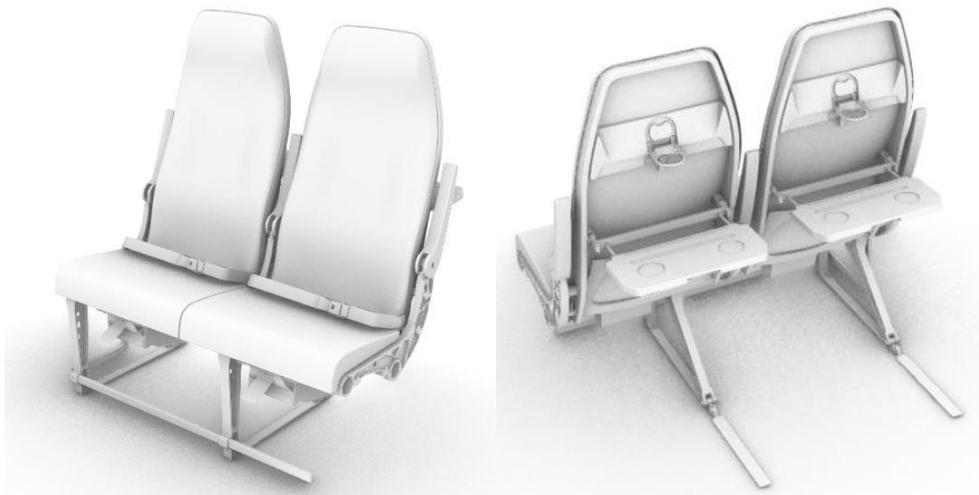


Fig.2.1 Davanti e dietro del modello CAD iniziale dei sedili



Fig.2.2 Parte d'interesse del modello

Fatto questo si sono suddivisi in livelli i vari componenti del tavolino, del porta bicchieri e del sedile/schienale. Si sono incominciati ad eliminare tutti i componenti di assemblaggio, come bulloni, perni, ecc. Prima di passare alla modifica vera e propria della struttura si è pensato alle dimensioni che dovesse avere il prototipo finale. Il vincolo principale era la dimensione della piastra di lavoro della stampante 3d, ed essendo 25×25 cm si è arrivati alla conclusione che il porta bicchiere si poteva stampare in scala 1:1 mentre il tavolino in scala 1:2 (vedi Fig.2.3). Quindi si sono divisi il porta bicchiere e il tavolino in due file diversi per lavorare separatamente. (vedi Fig.2.4).

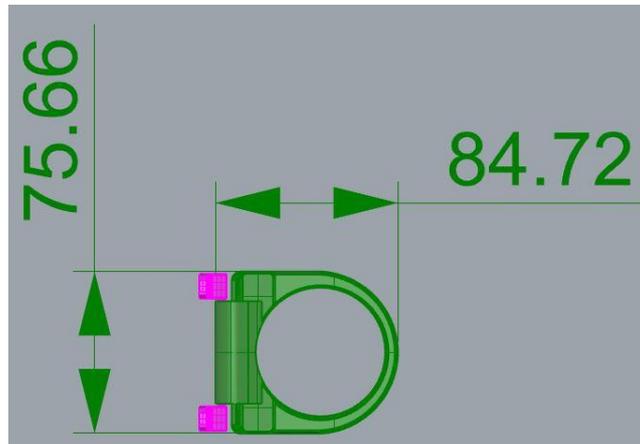
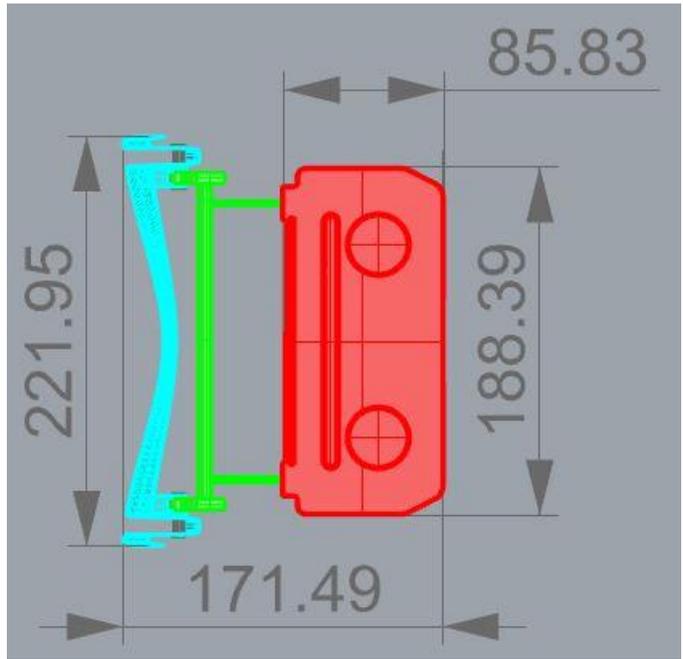
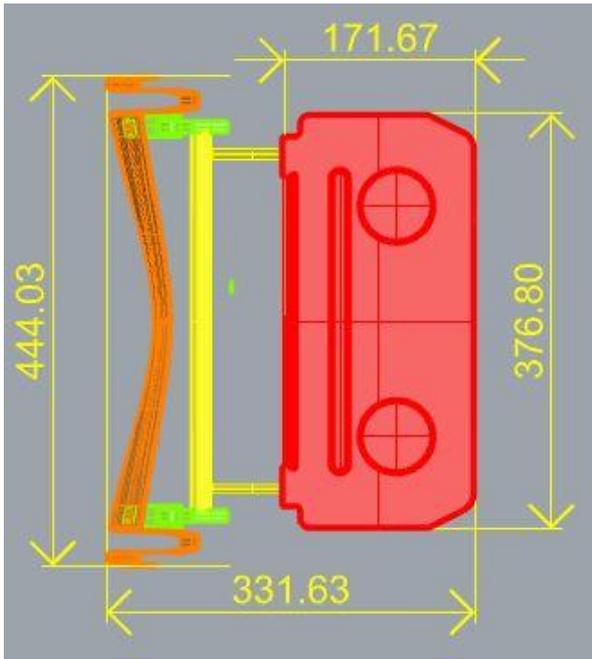
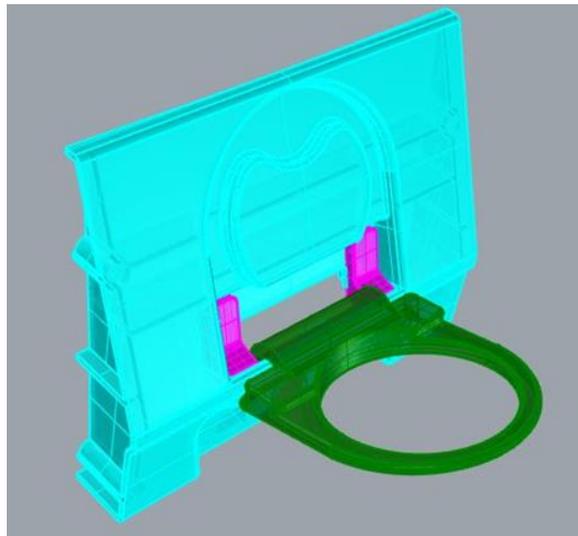
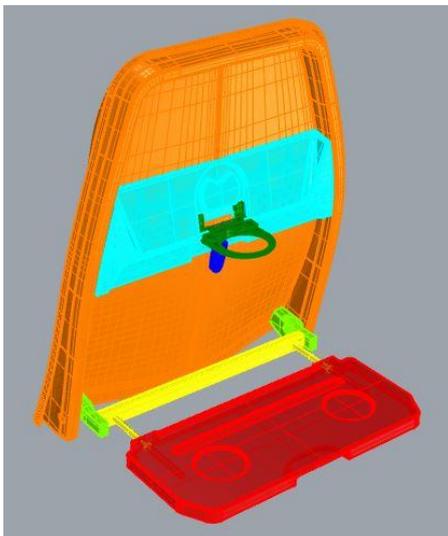


Fig.2.3 Misure prima e dopo le modifiche di scala



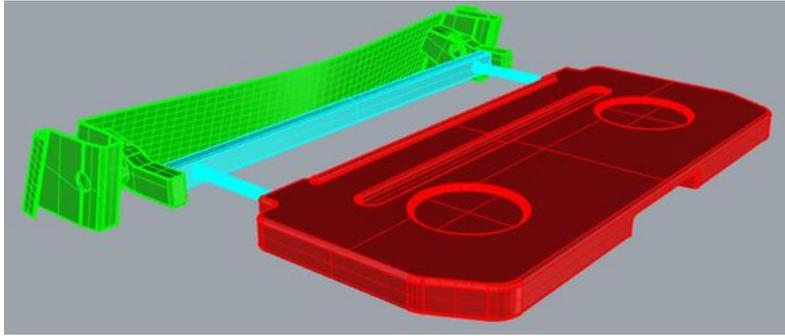


Fig.2.4

Dopo di che si sono riprogettate le cerniere e i vari accoppiamenti con meccanismi **non-assembly multi-corpo** spiegati nei paragrafi precedenti. Si è partiti dal tavolino, già scalato 1:2, e dalle sue cerniere laterali (vedi Fig.2.5), eliminando tutti fori non più indispensabili, unendo i vari componenti, prima uniti da collegamenti filettati e creando i perni essenziali per il movimento.

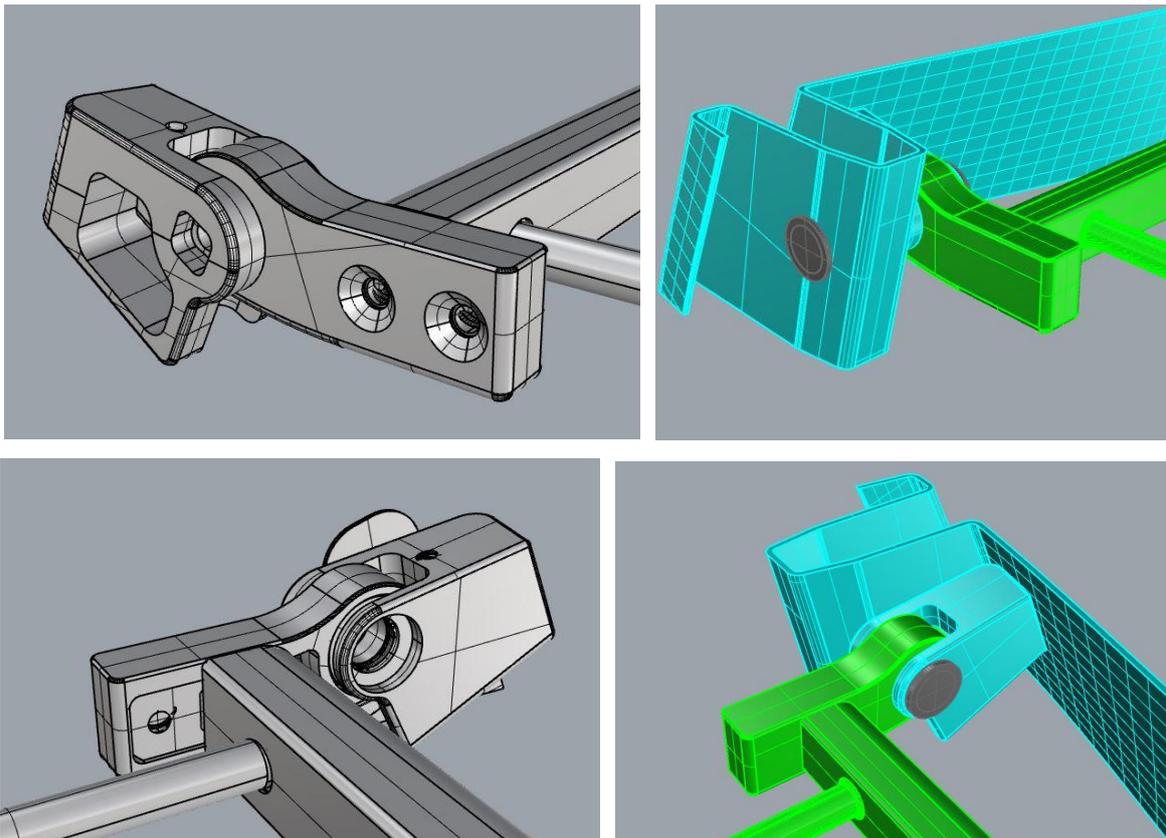


Fig.2.5 Prima e dopo delle cerniere del tavolino

Si è poi passati alla parte del tavolino vero e proprio dove si sono creati i fori per far scorrere i perni per allungare e accorciare il tavolino, creando dei perni con la testa più larga per non farli uscire dai fori e infine unito i perni con degli smussi alla struttura portante (vedi Fig.2.6).

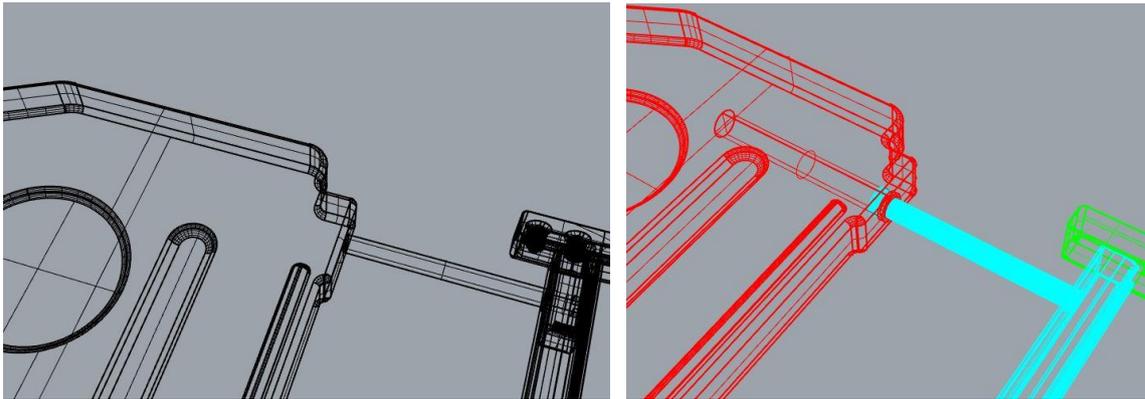


Fig.2.6 Prima e dopo la ri-progettazione del meccanismo per allungare il tavolino

Anche per il porta bicchiere si sono eliminati tutti i fori non necessari e si è unito il perno, che prima andava montato, alla struttura viola (vedi Fig.2.7).

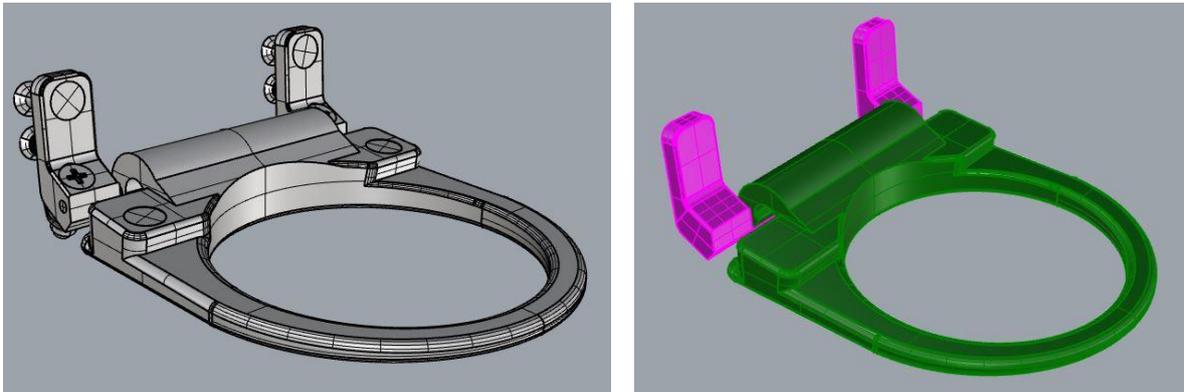


Fig.2.7 Prima e dopo la ri-progettazione del porta bicchiere

Per calcolare i giochi e le tolleranze ci si è basati sull'articolo "Design for Additive Manufacturing of a non-assembly robotic mechanism" di F. De Crescenzo e F. Lucchi, quindi si sono usati 0,2 mm di gioco tra perno e foro (vedi Fig.2.8) [10].

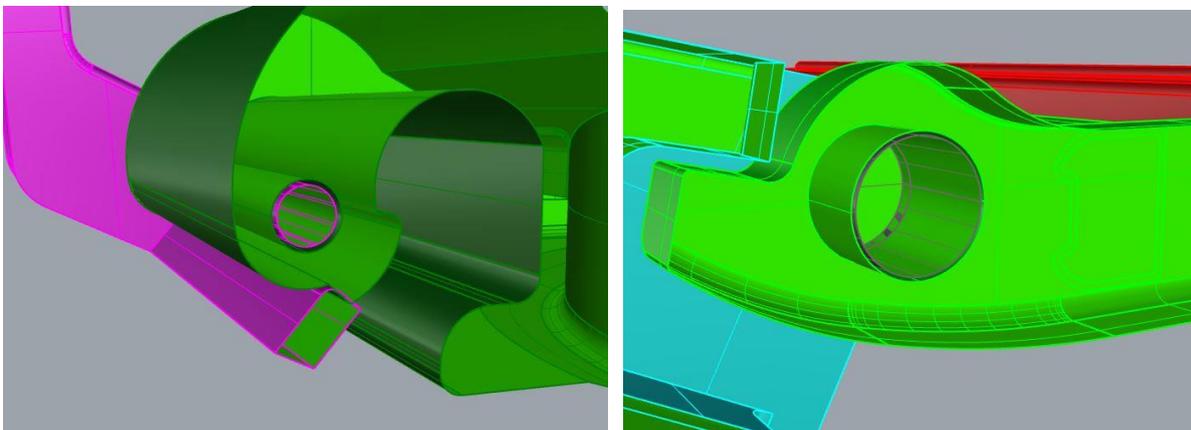


Fig.2.8 Gioco tra perno e foro

Prima della ri-progettazione si avevano 15 componenti (tra viti, perni, etc.) per il porta bicchiere e 52 per il tavolino. Alla fine si è arrivati ad averne rispettivamente 2 e 5 (vedi Fig.2.9). Questo fa capire l'ottimizzazione che si è ottenuta grazie ai meccanismi non assembly.

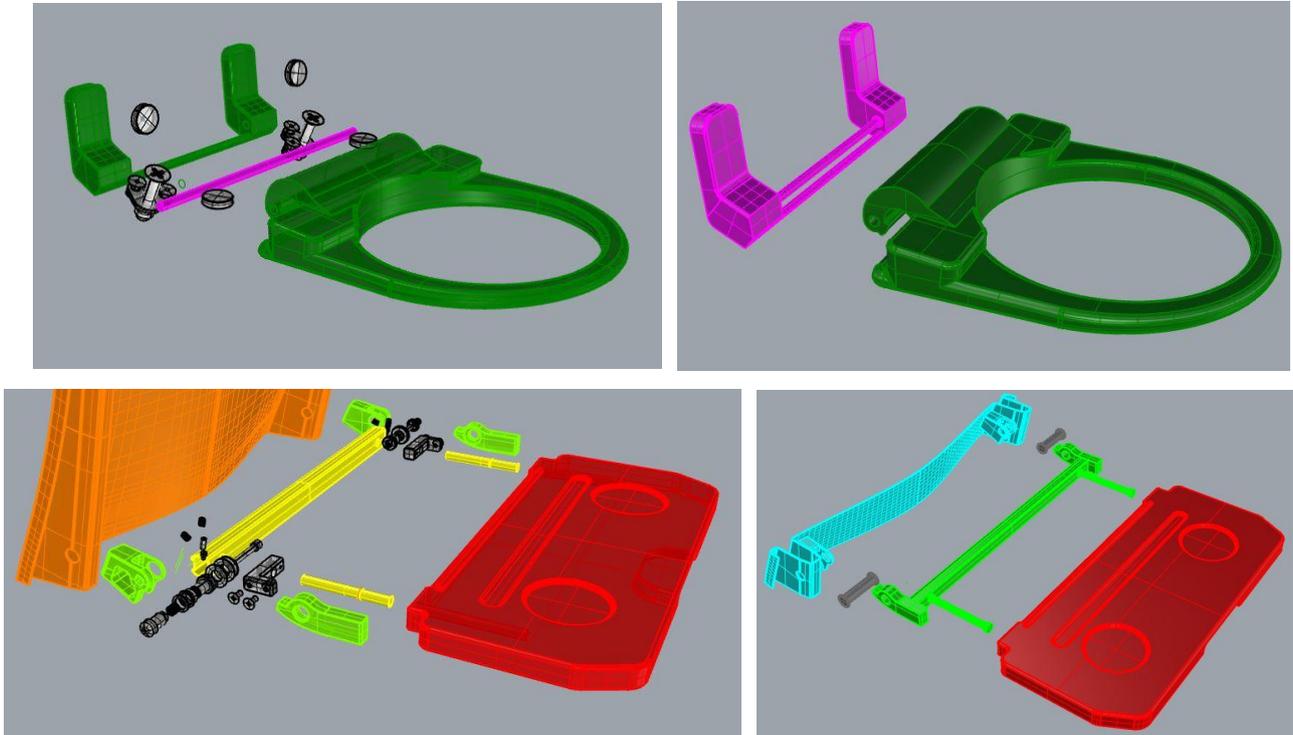


Fig.2.9 Esploso dei modelli prima e dopo le modifiche

Completati i modelli al CAD si è notato che il tavolino in dimensione 1:2 (vedi Fig.2.3) era veramente piccolo e per cui si sarebbe ottenuto un prototipo in cui non era possibile praticare lo studio di usabilità. Si è deciso quindi, di prototipare solo il porta bicchiere in dimensioni reali.

2.2.2 Processo di stampa

Per poter stampare il prototipo del porta bicchiere si è dovuto convertire il file CAD in file STL per poi usare il software Insight 15.7 che guida la stampante nel processo di creazione.

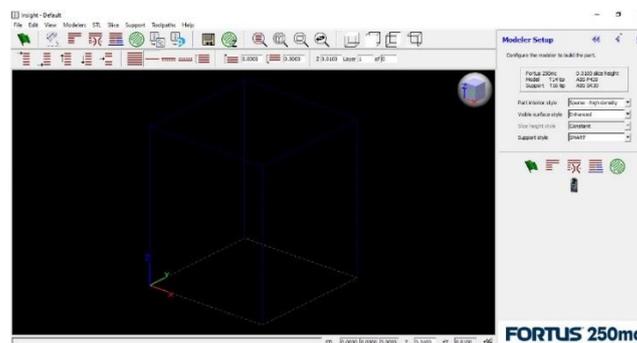


Fig.2.10 Interfaccia del software Insight

Il software di stampa 3D Insight prepara l'output tagliando e generando automaticamente strutture di supporto e percorsi di estrusione del materiale. Si possono modificare manualmente i parametri che determinano l'aspetto, la resistenza, la precisione delle parti, la velocità e l'uso dei materiali del processo FDM.

Questo software permette di:

- Ottimizzare l'orientamento del modello per la massima resistenza e la finitura superficiale più liscia;
- Personalizzare i supporti per una rimozione facile e veloce e il miglior utilizzo dei materiali;
- Manipolare i percorsi degli utensili per un controllo avanzato sulle proprietà delle parti

Per avviare la stampa bisogna importare il file STL su Control Center, un software che comunica direttamente con la stampante, per gestire i lavori e monitorare lo stato della produzione.

Prima di avviare la stampa sono stati configurati sul *software* la stampante utilizzata e le tipologie di materiale caricato.

La prima cosa da scegliere è l'orientamento del pezzo che è una parte fondamentale che influisce su molti aspetti, come la velocità di stampa, il consumo di materiale di supporto, la resistenza e la finitura superficiale. Si sono provati alcune ipotesi di orientamento per vedere quale fosse la miglior soluzione.

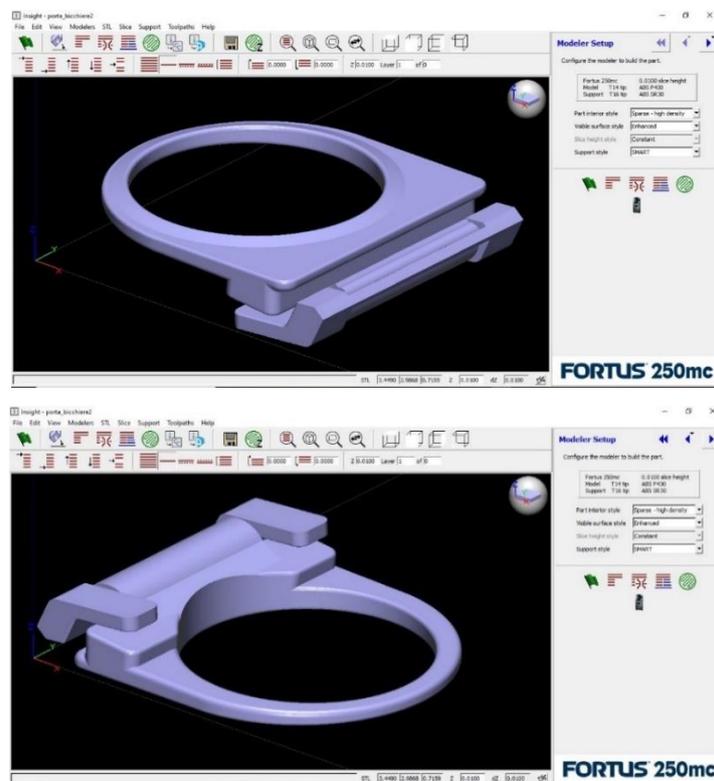


Fig.2.11 Due orientamenti possibili.

Successivamente sono stati impostati i parametri del “percorso macchina” riguardanti lo stile di riempimento e lo stile del supporto.

La selezione dello stile di riempimento interno del modello stabilisce il tipo di riempimento utilizzato per le aree interne del pezzo. Per il riempimento esistono quattro tipi di modello interno che si possono scegliere:

- **Solido:** utilizzato quando si desidera una parte più resistente e durevole. I tempi di costruzione saranno più lunghi e verrà utilizzato più materiale;
- **Alta densità sparsa:** è lo stile interno del modello predefinito ed è altamente consigliato. I tempi di costruzione saranno più brevi, verrà utilizzato meno materiale.
- **Bassa densità sparsa:** l'interno sarà "a nido d'ape" o "tratteggiato". Questo stile consente tempi di costruzione più brevi e il minor utilizzo di materiale, ma diminuirà la resistenza del pezzo;
- **Doppia densità sparsa:** riduce al minimo la quantità di materiale del modello utilizzato, ma utilizza un motivo a griglia a tratteggio incrociato (anziché unidirezionale) per una maggiore resistenza.

Per la selezione dello stile di supporto si hanno 5 diverse tipologie di stili e la loro scelta influenzerà la forza del supporto e il tempo di costruzione della stampa.

- **Base:** può essere utilizzato per la maggior parte delle parti. Il supporto di base utilizza una spaziatura costante tra i percorsi del supporto;
- **SMART:** riduce al minimo la quantità di materiale di supporto utilizzato, riduce il tempo di costruzione e migliora la rimozione del supporto;
- **Surround:** L'intero modello è circondato da materiale di supporto;
- **Sparso:** I supporti sparsi creeranno supporti che utilizzano meno materiale rispetto ai supporti di base;
- **Box:** I supporti separabili sono simili ai supporti sparsi ma sono costituiti da scatole invece che da griglie continue.

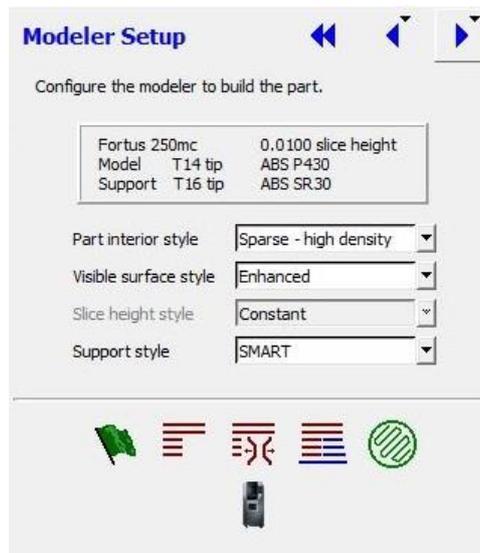


Fig.2.12 Stili selezionati per il materiale e il supporto

Una volta selezionati i parametri, per terminare la pre-elaborazione del file STL con preimpostazioni predefinite è stato cliccato il  pulsante (fine) per creare il file CMB.

Per capire quale delle due soluzioni di orientamento sia la migliore bisogna vedere il consumo di materiale e il tempo di costruzione. Guardando le figure 2.11 possiamo notare che nella figura sulla sinistra, corrispondente al primo orientamento, il tempo stimato e la quantità di materiale di supporto è superiore a quella del secondo orientamento. Quindi possiamo dedurre che il secondo orientamento sia quello più performante.

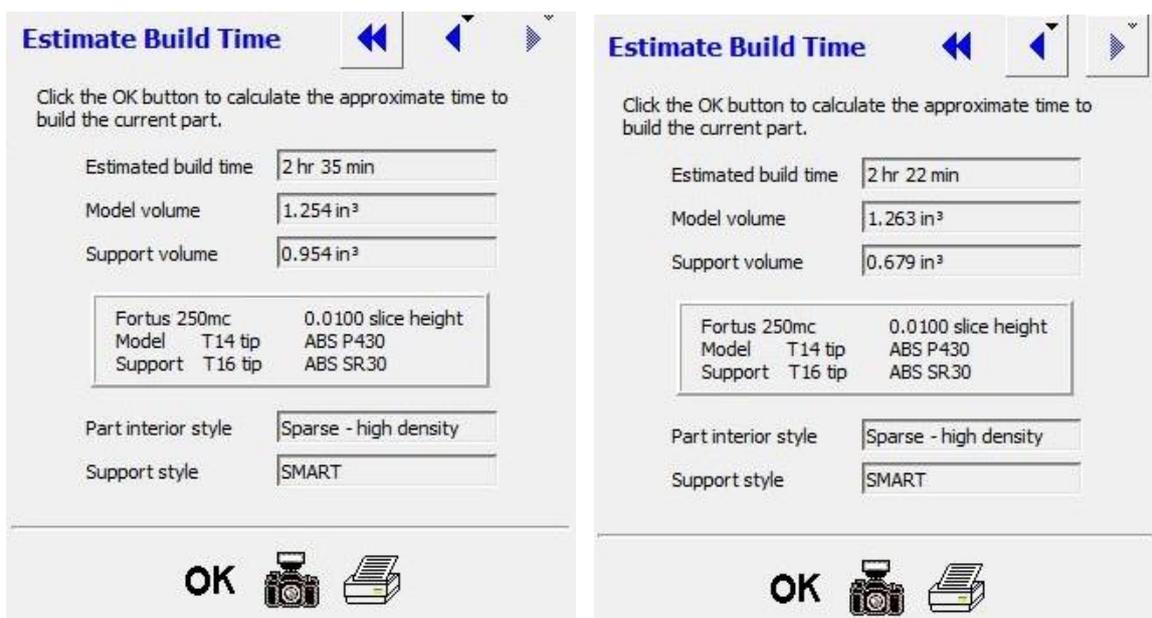


Fig.2.13 Tempi stimati di costruzione del primo orientamento sulla sinistra e del secondo orientamento sulla destra.

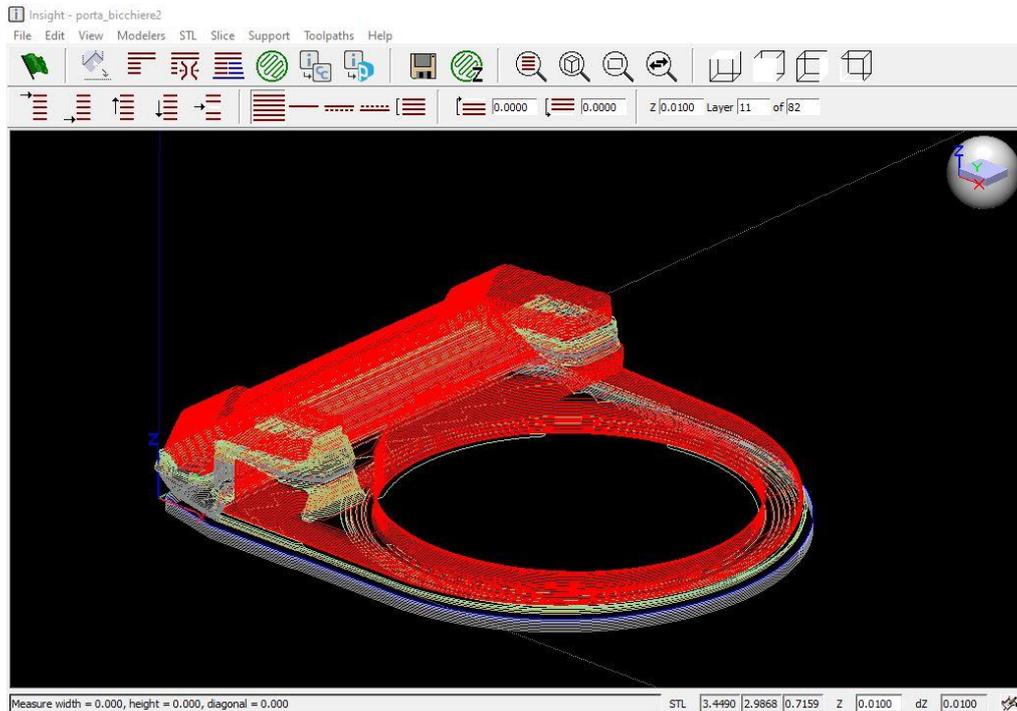


Fig.2.14 Elaborato per la stampa. In bianco il materiale di supporto e in rosso il prototipo.

A seguito del processo di elaborazione si esportano i file di stampa in formato CMB per poter essere processati sul software Control Center che dialoga direttamente con la stampante.

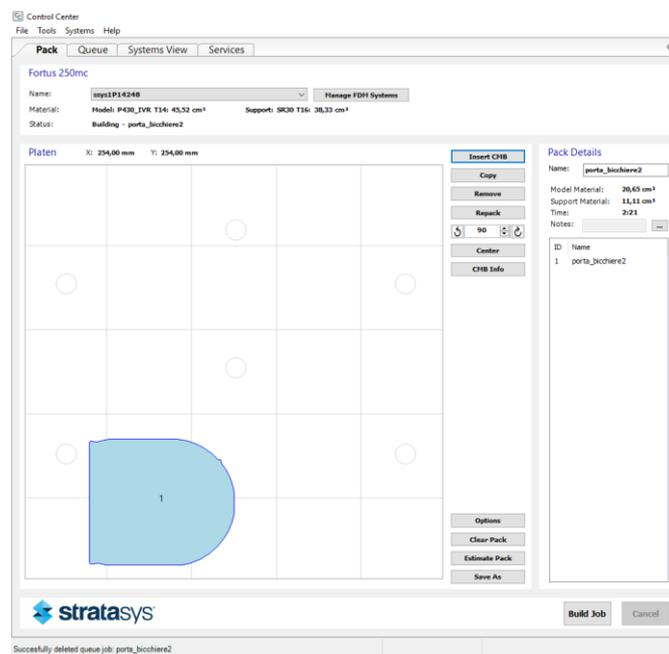


Fig.2.15 Piattaforma software Control Center.

A questo punto è possibile avviare il processo di prototipazione.

2.3 Stampa

2.3.1 Tecnologie usate per la produzione del prototipo



Fig.2.16 Stampante Fortus 250mc

La stampante Fortus 250mc, creata da Stratasys, è molto performante e adatta a diversi impieghi. Avendo tre impostazioni di risoluzione dei livelli, può costruire rapidamente una parte per la verifica del progetto oppure di stampare un prodotto con dettagli di superficie di alta qualità.

Questa stampante è provvista di due ugelli di estrusione e lavora con materiale di supporto solubile per una post-lavorazione di rimozione. Il primo ugello si occupa dell'estrusione di un filamento di plastica (ABSplus P430) necessario per la costruzione del prodotto finale mentre il secondo si occupa dell'estrusione del materiale di supporto (ABS SR30) che viene utilizzato per sostenere il modello durante il processo di costruzione.

Tra i materiali creati appositamente da Stratasys per essere utilizzati con la tecnica FDM, l'ABSplus-P430 rappresenta un primo esempio di materiale valido per la creazione di prototipi funzionali. Con questo materiale i prodotti ottenuti risultano robusti e stabili nel tempo ed è possibile avere buone finiture superficiali.

| MECHANICAL PROPERTIES ¹ | TEST METHOD | ENGLISH | | METRIC | |
|--|-------------|--------------|--|-----------|--|
| | | XZ Axis | | XZ Axis | |
| Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min) | ASTM D638 | 4,700 psi | | 33 MPa | |
| Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min) | ASTM D638 | 4,550 psi | | 31 MPa | |
| Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min) | ASTM D638 | 320,000 psi | | 2,200 MPa | |
| Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min) | ASTM D638 | 6% | | 6% | |
| Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min) | ASTM D638 | 2% | | 2% | |
| IZOD Impact, notched (Method A, 23 °C) | ASTM D256 | 2.0 ft-lb/in | | 106 J/m | |

| MECHANICAL PROPERTIES | TEST METHOD | ENGLISH | | METRIC | |
|--|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| | | XZ Axis | ZX Axis | XZ Axis | ZX Axis |
| Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min) | ASTM D790 | 8,450 psi | 5,050 psi | 58 MPa | 35 MPa |
| Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min) | ASTM D790 | 300,000 psi | 240,000 psi | 2,100 MPa | 1,650 MPa |
| Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min) | ASTM D790 | 4% | 4% | 2% | 2% |

| THERMAL PROPERTIES ² | TEST METHOD | ENGLISH | METRIC |
|-----------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Heat Deflection (HDT) @ 66 psi | ASTM D648 | 204 °F | 98 °C |
| Heat Deflection (HDT) @ 264 psi | ASTM D648 | 180 °F | 82 °C |
| Glass Transition Temperature (Tg) | DSC (SSYS) | 226 °F | 108 °C |
| Melting Point | ----- | Not Applicable ³ | Not Applicable ³ |
| Coefficient of Thermal Expansion | ASTM E831 | 4.90x10 ⁻⁵ in/in/°F | 8.82x10 ⁻⁵ mm/mm/°C |

| ELECTRICAL PROPERTIES ⁴ | TEST METHOD | VALUE RANGE |
|------------------------------------|--|--|
| Volume Resistivity | ASTM D257 | 2.6x10 ¹⁵ - 5.0x10 ¹⁶ ohm-cm |
| Dielectric Constant | ASTM D150-98 | 2.3 - 2.85 |
| Dissipation Factor | ASTM D150-98 | 0.0046 - 0.0053 |
| Dielectric Strength | ASTM D149-09, Method A, XZ Orientation | 130 V/mil |
| Dielectric Strength | ASTM D149-09, Method A, ZX Orientation | 290 V/mil |

Fig.2.17 Proprietà del l'ABSplus-P430

La figura 2.15 mostra schematicamente le caratteristiche del materiale, quali ad esempio: la resistenza alla trazione (Tensile Strength Ultimate/Yield) a rottura o snervamento, la resistenza alla flessione (Flexural Strength) ed i relativi moduli, la prova d'impatto (IZOD Impact o prova Charpy) utilizzata per valutare la resistenza agli urti, la temperatura di deviazione del calore (*Heat Deflection Temperature*).



Fig.2.18 SCA-1200HT macchina per la pulitura.

SCA-1200HT dissolve il supporto dei modelli 3D creati su una qualsiasi delle stampanti 3D Stratasys che utilizzano la tecnologia di supporto solubile. Il Design ottimizzato di ugelli e pompe di SCA-1200HT fa circolare la soluzione detergente riscaldata dentro e intorno i modelli dissolvendo il materiale di supporto. Questo velocizza la rimozione dei supporti su tutti i tipi di modelli indipendentemente dalla geometria della parte. Un'impostazione della temperatura per ogni materiale. Sono selezionabili dall'utente le preimpostazioni di temperatura per pulire i modelli con un particolare materiale di supporto solubile alla temperatura ottimale [Stratasys.com].

2.3.2 Stampa e post-lavorazione del prototipo

Avviata la stampa, la stampante ha incominciato a scaldare il materiale per poi iniziare la costruzione del prototipo.

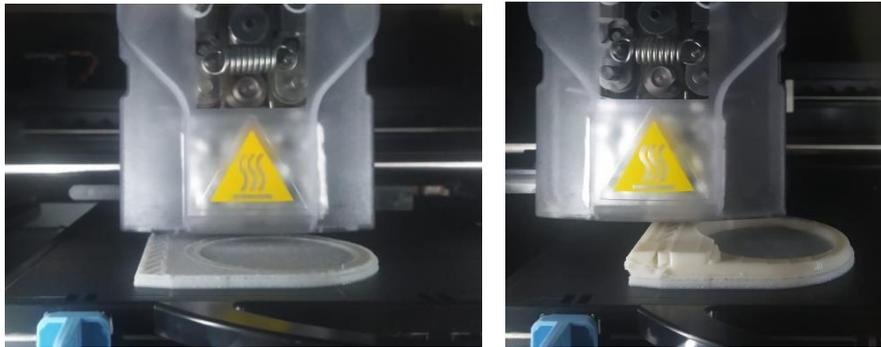


Fig.2.19 Stampante in lavorazione

Dopo circa 2 ore e 20 minuti il prototipo era pronto.

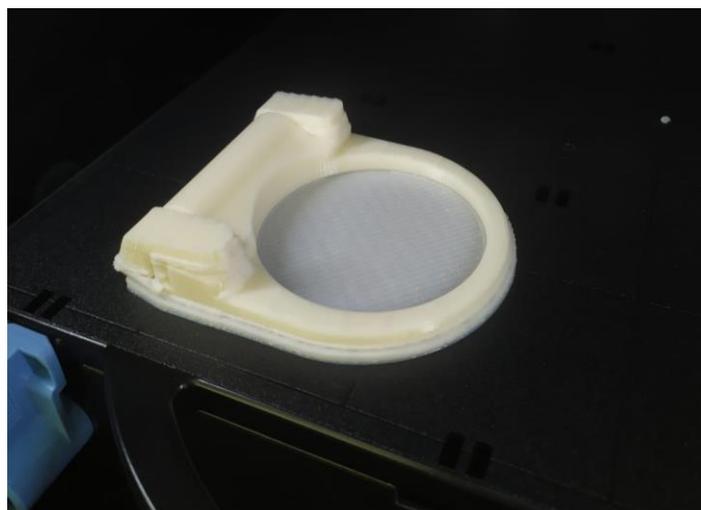


Fig.2.20 Il prototipo prima dell'estrazione dalla camera di stampa.

Estratto il prototipo dalla camera di stampa si è passati alla rimozione manuale dalla piastra di stampa.

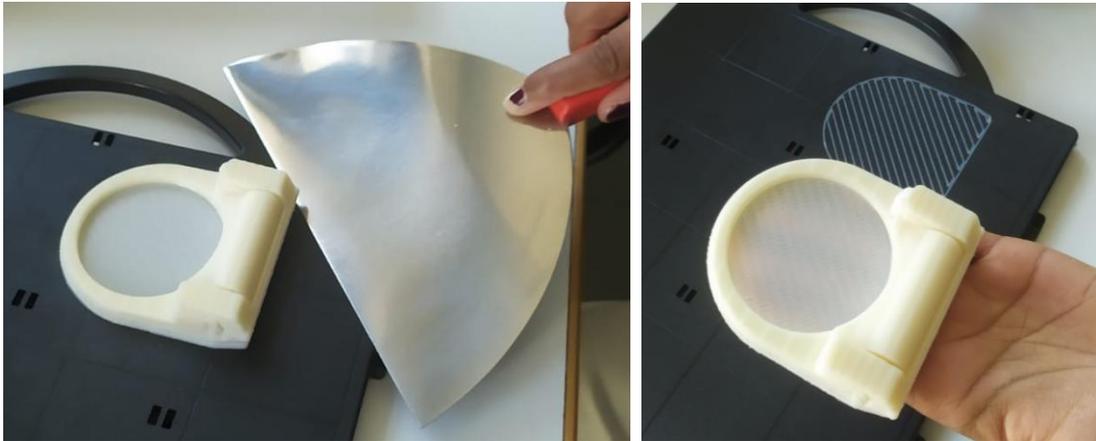


Fig.2.21 Rimozione manuale del prototipo

Rimosso il prototipo dalla piastra si passa alla post-lavorazione, cioè la pulitura del materiale di supporto. Questa fase consiste nel mettere il modello dentro a una gabbietta di metallo che andrà inserita nella macchina di pulitura e si imposta la temperatura ottimale di pulizia. Il tempo stimato di pulizia è di circa 6 ore.



Fig.2.22 Processo di post-lavorazione

Passate le 6 ore si rimuove il pezzo dalla macchina di pulitura, si asciuga ed il prototipo è pronto per l'uso.

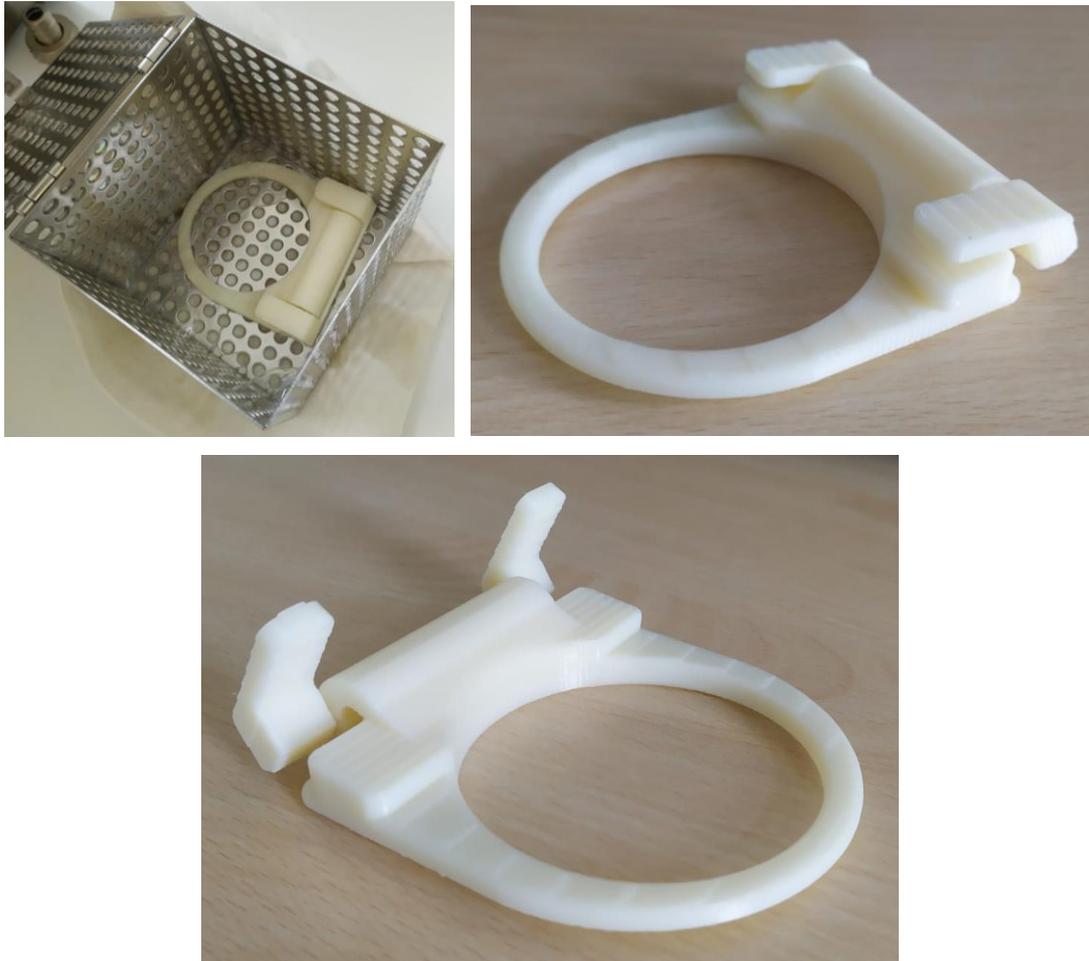


Fig.2.23 Prototipo finito

3. RISULTATI

Finito il processo di produzione si può osservare che sulla superficie si notano gli strati a gradini, quindi probabilmente si poteva ottimizzare il modello e l'orientamento per una maggior finitura superficiale.

Durante la prova di movimentazione delle cerniere si aveva paura di rompere il perno perché sembrava veramente sottile, si è iniziato a ruotare con cautela e si sentiva come se il perno fosse in alcuni punti saldato con il foro e questo rendeva difficile il movimento, piano piano si è riusciti a farlo ruotare. Dopo questa prima prova si è notato che il meccanismo funzionava in parte, perché ad un certo punto della rotazione era come bloccato da qualcosa (probabilmente uno dei punti ancora saldati tra loro).

Subito dopo si è provato a fare un test di usabilità che consisteva nel provare il prototipo nella sua funzione cioè aprirsi e portare un bicchiere. Si è riusciti a girare in parte il meccanismo e a inserire il bicchiere che ci stava perfettamente.

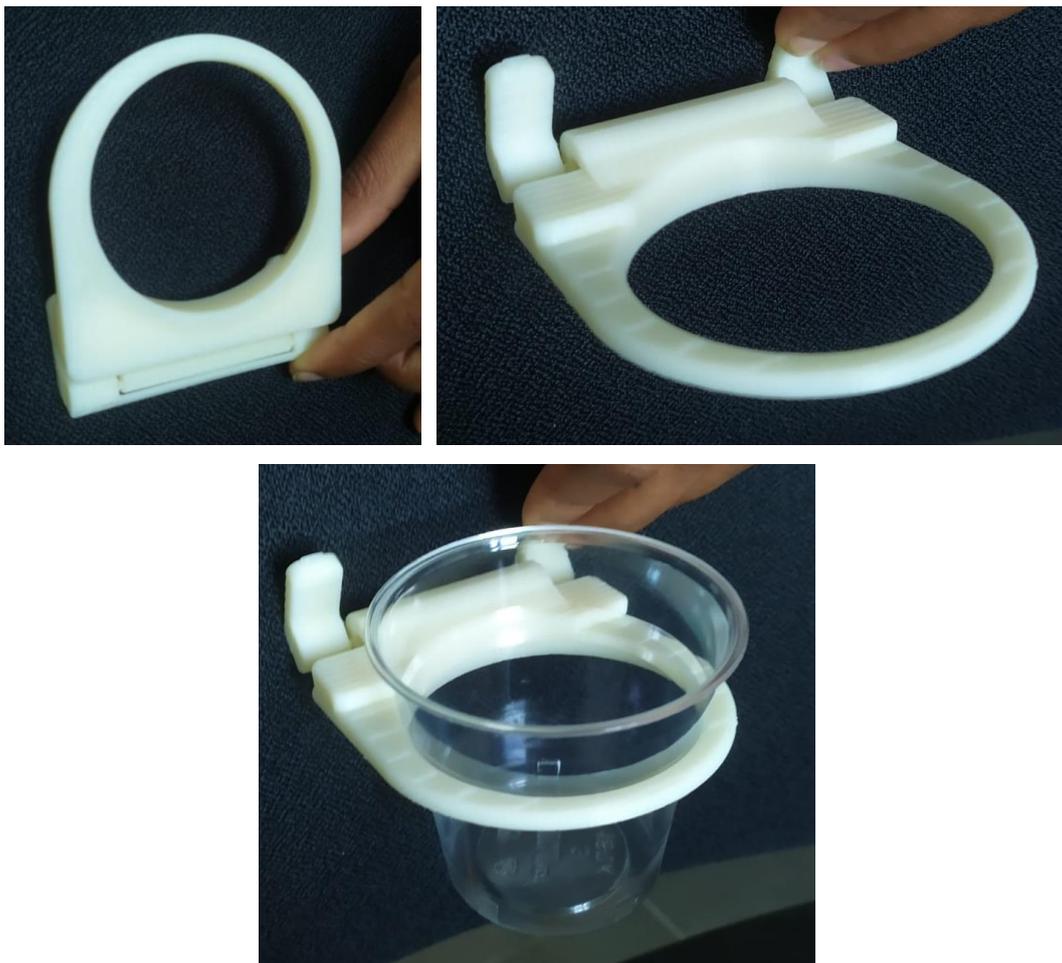


Fig.2.24 Test di usabilità

Dopo altre prove il pezzo purtroppo si è rotto proprio nel perno dove effettivamente si è notata una saldatura (vedi Fig.2.25).



Fig.2.25

L'errore principale è stato quello di aver mantenuto le dimensioni reali del perno senza considerare il materiale di per cui era stato effettivamente pensato. Il processo è stato tutto sommato abbastanza semplice perché non si è dovuto aggiungere niente ma si è dovuto solo sottrarre o modificare leggermente e sicuramente bisogna dare più attenzione alle caratteristiche del materiale e ri-progettare di conseguenza il modello. Penso sia un processo ripetibile, con alcuni accorgimenti in più, con qualsiasi oggetto.

I vantaggi principali che si sono riscontrati sono stati:

- la diminuzione e annullamento rispettivamente del tempo di produzione e assemblaggio del prototipo che comunque ha offerto la possibilità di fare test di usabilità e di funzionalità;
- la diminuzione di spreco di materiale, perché si è cercato di utilizzare meno materiale di supporto possibile.

Il prototipo è stato realizzato successivamente anche con la tecnologia PolyJet che è più precisa e come si può vedere nella Fig.2.24 il modello ha una rifinitura superficiale migliore e il meccanismo funziona perfettamente. Si deduce che i modelli con dimensioni particolari hanno bisogno di essere adattati alla tecnologia.



Fig.2.26

4. CONCLUSIONI

L'obiettivo principale di questo elaborato è quello di mostrare i vantaggi della metodologia del processo di modellazione e produzione di prototipi di componenti di un sedile per interni cabina non-assembly per studi di usabilità. Per la produzione di questi prototipi si è utilizzata la tecnologia di AM, che è stata spiegata nel primo capitolo in tutte le sue sfaccettature.

Dal processo di lavoro, si può evincere che l'uso dell'AM ha permesso di risparmiare materiali e tempi senza abbassare il livello dei test sui prototipi.

Si è capito che bisogna avere più attenzione durante la ri-progettazione, soprattutto nelle dimensioni e caratteristiche meccaniche dei materiali.

In conclusione, questo elaborato ha contribuito a dimostrare le potenzialità della prototipazione in un caso specifico ed ha anche fornito un modello di riferimento per ulteriori sperimentazioni per le cerniere non assembly di meccanismi da realizzare in stampa 3D.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Cirp Annals*, 47(2), 525-540.
- [2] Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., ... & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*, 65(2), 737-760.
- [3] Klahn, C., Leutenecker, B., & Meboldt, M. (2015). Design strategies for the process of additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 36, 230-235.
- [4] Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012.
- [5] Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), 389-405.
- [6] Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215-243.
- [7] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, (2015) "Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing" Second Edition
- [8] Lussenburg, K., Sakes, A., & Breedveld, P. (2021). Design of non-assembly mechanisms: A state-of-the-art review. *Additive Manufacturing*, 101846.
- [9] Juan Sebastian Cuellar, Gerwin Smit, Amir A Zadpoor and Paul Breedveld, (2018) "Ten guidelines for the design of non-assembly mechanisms: The case of 3D-printed prosthetic hands"
- [10] De Crescenzo, F., & Lucchi, F. (2017). Design for Additive Manufacturing of a non-assembly robotic mechanism. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing* (pp. 251-259). Springer, Cham.
- [11] Bradley Camburn, Vimal Viswanathan, Julie Linsey, David Anderson, Daniel Jensen, Richard Crawford, Kevin Otto, Kristin Wood, (2017) "Design prototyping methods: state of the art in strategies, techniques, and guidelines"
- [12] Magdalena Rozmus, Piotr Dobrzaniecki, Michał Siegmund, Juan Alfonso Gómez Herrero, (2020) "DESIGN WITH USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY"
- [13] Samantha McDonald, Niara Comrie, Erin Buehler, Nicholas Carter, Braxton Dubin, Karen Gordes, Sandy McCombe-Waller, Amy Hurst, (2016) "Uncovering Challenges and Opportunities for 3D Printing Assistive Technology with Physical Therapists"
- [14] Molly Follette Story M.S, (1998) "Maximizing Usability: The Principles of Universal Design"

[15] A. Gatto, L. Iuliano, “Prototipazione Rapida, La tecnologia per la competizione Globale”,
TECNICHE NUOVE

RINGRAZIAMENTI

Con il presente lavoro di tesi termina la mia permanenza alla sede di Forlì dell'Ateneo di Bologna e il percorso di ingegneria meccanica.

Ci tengo a ringraziare la Professoressa Francesca De Crescenzo e l'Ingegnere Sandhya Santhosh per l'enorme disponibilità concessami e per avermi seguito costantemente lungo tutto il percorso di elaborazione.

Ringrazio la mia famiglia, perché, fin dall'inizio, ha creduto in me e nel raggiungimento di questo traguardo.

Ringrazio tutti gli amici e le persone a me care che mi sono state accanto durante tutti questi anni e con i quali ho condiviso sia i momenti più belli che quelli più scoraggianti