



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Studio di fabbricazione di un dispositivo per la movimentazione in
linea di assorbenti da realizzare con tecniche di lavorazione additiva**

**Manufacturing analysis of a device for handling sanitary napkins to be made
with additive manufacturing techniques**

Relatore: Chiar.mo
Dott. Carlo Bruni

Tesi di Laurea di:
Diego Lucarini

A.A. 2019/2020

INDICE

1. Introduzione	4
a. Definizione dell'ambito della tesi e suo scopo.....	4
2. Contesto Teorico	7
a. Che cos'è l'Additive Manufacturing.....	7
b. Origini e sviluppo.....	9
c. Tecnologie e Materiali.....	11
c.I Richiami su Asportazione di Truciolo e Stampaggio ad Iniezione	28
d. Vantaggi, Svantaggi, Applicazioni	35
e. Strategie di design per l'AM	48
3. Case Study	52
a. Descrizione del manufatto e degli obiettivi dello studio.....	52
b. Fase 1, Riproduzione Invariata	56
c. Fase 2, Realizzazione di un unico oggetto	61
d. Fase 3, Eliminazione dei sottosquadri e fusione delle geometrie	63
e. Fase 4, Introduzione dei canali di aspirazione ed Eliminazione della base	66
f. Fase 5, Riduzione del numero dei canali di aspirazione.....	71
4. Studio dei risultati	77
a. Verifica della resistenza in esercizio	77
b. Verifica della realizzabilità del prototipo.....	85
c. Analisi dei costi e dei vantaggi produttivi.....	90
5. Conclusioni	94
6. Ringraziamenti	95
7. Bibliografia e sitografia	97

1. Introduzione

a. Definizione dell'ambito della tesi e suo scopo

Questa tesi, realizzata in collaborazione con l'azienda Prosilas di Civitanova Marche, leader nazionale nel campo del Rapid Prototyping, si pone come obiettivo l'esecuzione dello studio di fabbricazione di un prodotto realizzato con tecniche di Additive Manufacturing, in opposizione alle più tradizionali tecniche di lavorazione quali ad esempio asportazione di truciolo, mostrando così l'enorme gamma di vantaggi e possibilità che si dischiudono nella progettazione e realizzazione di un prodotto impiegando le tecniche additive.

In particolare, i risultati sono messi in evidenza grazie ad un caso pratico elaborato nel percorso di tirocinio svolto, consistente nel prendere in esame un prodotto (mostrato in figura), la cui realizzazione è stata commissionata da un'azienda esterna, per poi rielaborarne le forme in modo da trarre il massimo vantaggio da una sua manifattura con tecniche additive, mantenendo invariate le sue funzionalità dove queste non siano state addirittura migliorate.

Possono dunque essere individuate due fasi nel lavoro svolto: nella prima l'Additive Manufacturing viene sfruttato come sostituto delle lavorazioni tradizionali, perciò le modifiche che vengono apportate al prodotto sono minime e la geometria caratteristica del componente è mantenuta invariata; la seconda parte, che si avvicina ad una riprogettazione di massima, vede la geometria del prodotto venire significativamente alterata in modo da sfruttare il ricorso alle tecnologie additive per migliorarne la funzionalità. Proprio per questo, il corretto funzionamento dell'oggetto non è più scontato e va verificato.

Lo studio è avvenuto in maniera completamente virtuale avvalendosi del software di modellazione 3D SolidEdge. Il tirocinio dal quale questa tesi scaturisce è stato svolto interamente in modalità smart working.

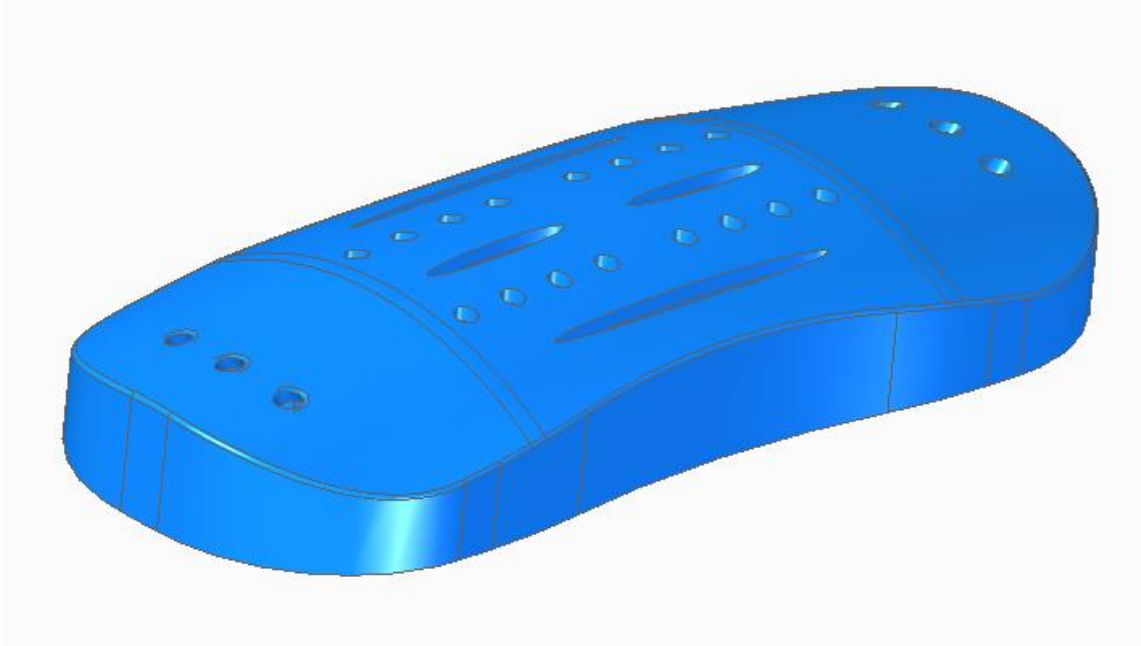


Figura 1.1-Il prodotto da studiare e ridisegnare

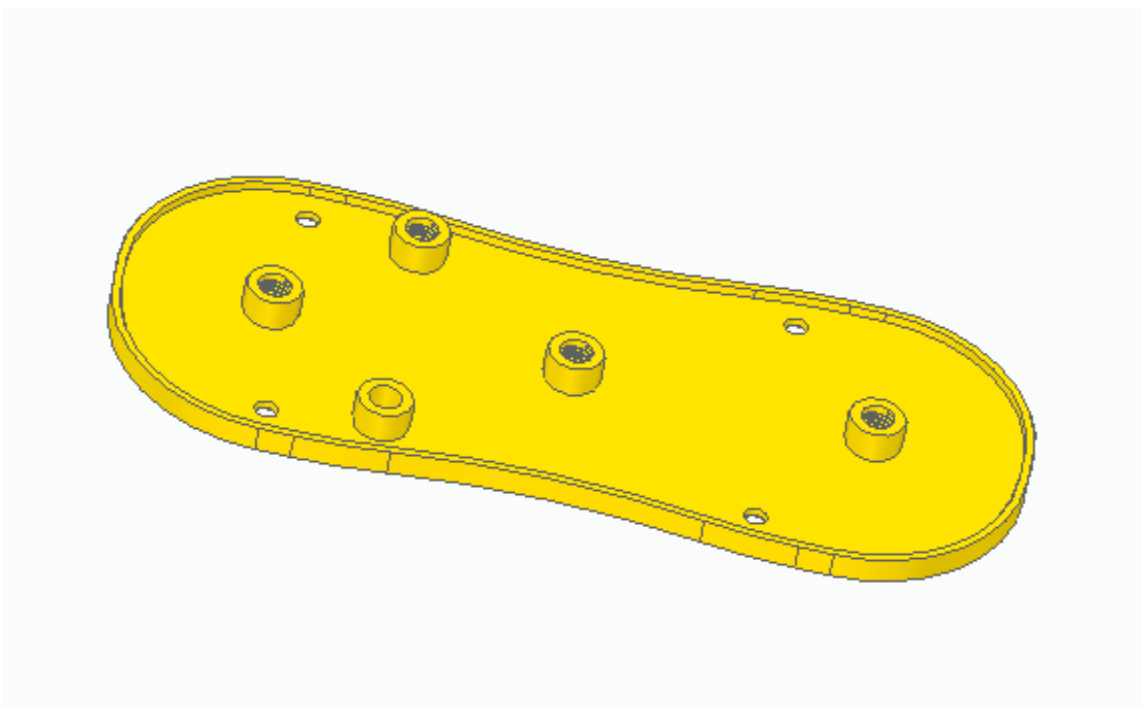


Figura 1.2-La "soletta" con cui il prodotto dovrà andarsi ad accoppiare

La tesi pertanto si sviluppa lungo un percorso piuttosto lineare: partendo da un excursus sulle tecniche di Additive Manufacturing, con alcuni brevi richiami relativi alle tecniche tradizionali, necessari per descrivere in maniera quanto più esaustiva possibile l'ambito in cui questo case study si va a collocare, essa prosegue poi seguendo passo passo gli step che sono stati compiuti nel corso dell'ottimizzazione in ottica additive del prodotto assegnato, evidenziando in particolar modo le

motivazioni alla base delle decisioni di redesign. Infine, vengono eseguite delle valutazioni per verificare che le modifiche apportate alla geometria iniziale, frutto del ricorso alle tecniche di Additive Manufacturing, non solo non siano state deleterie, ma anzi abbiano comportato notevoli vantaggi, sia in termini di costi che di funzionalità.

2. Contesto Teorico

a. Che cos'è l'Additive Manufacturing

Con l'espressione "Additive Manufacturing" si indica una serie di tecnologie e processi di manifattura che permettono di realizzare oggetti tridimensionali mediante la deposizione consecutiva di strati di materiale l'uno sopra l'altro, disposti su piani paralleli e perpendicolari all'asse verticale, fino a formare con il loro consolidamento l'oggetto desiderato. Questa espressione inoltre racchiude al proprio interno i concetti di rapid tooling, rapid prototyping e rapid manufacturing, che sono ad oggi i principali campi di destinazione di questi processi.

Queste tecnologie, cui vi si riferisce anche col nome colloquiale di "stampa 3D", hanno come punto di partenza un modello tridimensionale, che può essere realizzato al computer partendo da zero oppure ottenuto con una scannerizzazione 3D di un oggetto esistente: questo modello, una volta importato nel software della macchina incaricata di realizzarlo, subisce il processo indicato come "slicing", ovvero viene suddiviso in una successione di "layer" di piccolissimo spessore, gli stessi che la macchina dovrà poi generare depositando il materiale. Inoltre, il programma si occupa anche di aggiungere al modello 3D eventuali strutture di supporto, per evitare che la struttura collassi su sé stessa durante la costruzione (è il caso ad esempio di strutture a sbalzo). Successivamente alla loro realizzazione poi può risultare opportuno sottoporre gli oggetti ottenuti ad ulteriori trattamenti, che possono essere termici, chimici o meccanici. Saranno analizzati più avanti in dettaglio insieme alle varie tecniche di AM e ai materiali impiegati.

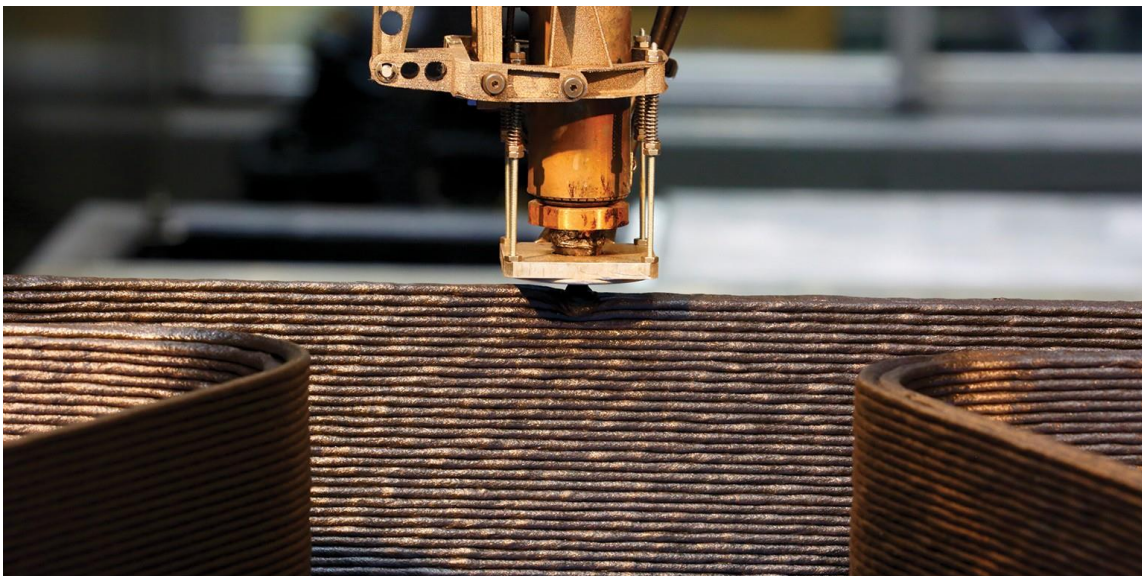


Figura 2.1-Immagine di riferimento di un processo di stampa 3D, dove possiamo vedere i vari layer



Figura 2.2-Workflow del processo produttivo additive

Come è facile intuire da questa breve descrizione, il ricorso alle tecniche additive porta con sé una grande quantità di vantaggi, soprattutto in termini di libertà di design: tuttavia per dare maggiore struttura ed organicità al testo, pro (e contro) di questi rivoluzionari processi di manifattura saranno esaminati in un paragrafo successivo, in modo tale da dare loro lo spazio necessario per una comprensione quanto più esaustiva possibile. Proseguiamo quindi nel nostro percorso, andando ad esaminare le origini di queste tecniche.

b. Origini e sviluppo

Quando si parla della nascita della stampa 3D, nell'immaginario collettivo viene spesso commesso un errore nel posizionare questo evento negli anni più recenti, quando invece risale a circa quarant'anni fa, essendo più o meno coevo con l'invenzione della comune stampa bidimensionale: essa infatti nasce nel 1986, con un brevetto ad opera dell'ingegnere americano Charles Hull, inventore della tecnica della stereolitografia; la definizione che egli stesso dà del processo è:

“Un sistema per generare oggetti tridimensionali basato sulla creazione di un modello trasversale dell'oggetto da costituire, sulla superficie di un medium fluido capace di alterare il suo stato fisico in risposta a stimoli sinergici quali radiazione incidente, bombardamento di particelle o radiazioni chimiche, in lamine adiacenti che rappresentano le sezioni trasversali adiacenti successive dell'oggetto che si integrano tra loro, provvedendo ad una progressiva crescita per apposizione dell'oggetto desiderato, per cui un oggetto è creato da una superficie planare del medium fluido durante il processo di formazione.”

Vediamo quindi che questa definizione corrisponde sostanzialmente a quello che abbiamo descritto in precedenza delle tecniche additive: il 1986 segna pertanto la data di nascita ufficiale di questo nuovo mondo della manifattura, che all'inizio viene indicato solo come “rapid prototyping”, per poi sbocciare in “Additive Manufacturing” solo in seguito.

Lo sviluppo di questa tecnica andò di pari passo con quello dei software CAD, controparte indispensabile per ottenere risultati dall'AM, e insieme andarono a gettare le basi per una rivoluzione del mondo del design e della progettazione, il quale si trovò improvvisamente ad avere a disposizione un metodo efficace ed affidabile per raggiungere obiettivi che la fabbricazione sottrattiva poteva solo sognare: diventava infatti possibile realizzare forme complesse, impossibili da ottenere con una lavorazione dal pieno, semplicemente prevedendole nel modello 3D da dare in pasto alle macchine, e si era ora in grado di produrre prototipi dei propri progetti nel giro di giorni o addirittura ore, mentre prima erano richieste settimane di lavoro sotto la supervisione di un modellista esperto. Questo rese il processo produttivo immensamente più semplice ed agile, permettendo anche di realizzare più tentativi e prototipi dello stesso prodotto in modo tale da evidenziarne i pregi e i difetti ed ottenendo come risultato un prodotto finale di qualità più elevata. Per tutti questi meriti, va riconosciuto all'introduzione delle tecniche di rapid prototyping nell'industrial design lo status di vera e propria pietra miliare, tanto da poter individuare un “prima” e un “dopo” RP.

Nel corso degli anni, queste tecniche hanno subito sviluppi e hanno ricevuto contributi notevoli, tanto che al momento della scrittura di questo testo esistono almeno 7 diverse famiglie di tecniche di stampa

3D che sono in grado di realizzare oggetti in almeno 14 materiali diversi; è solo da pochi anni, quando la maggior parte dei brevetti riguardanti le tecniche di stampa 3D sono scaduti (in particolare tra il 2009, con la decadenza del brevetto 5.121.329 sulla tecnologia FDM, e il 2014), che queste tecnologie hanno smesso di essere confinate all'interno delle realtà aziendali come metodi di realizzazione di prototipi e modelli estetici, e sono diventate per le piccole e medie imprese, così come per il grande pubblico, uno strumento dalle possibilità illimitate. È in questo contesto che si inserisce l'esplosione di popolarità cui stiamo assistendo in tempi recenti.

L'Additive Manufacturing ha quindi subito uno sviluppo impressionante: da idea rivoluzionaria da impiegare nelle grandi realtà industriali per l'evoluzione della prototipazione, in sostituzione alla realizzazione artigianale di modelli in legno, a prodotto la cui flessibilità è diventata indispensabile in una moltitudine di campi, ad esempio quello industriale, medico e casalingo, dove ogni utente può progettare e realizzare l'oggetto necessario per ogni situazione.

Per quanto riguarda ciò che potremo aspettarci in futuro da queste tecnologie, il solo limite è l'immaginazione. Come scriveva il *The Economist*, in un articolo datato Febbraio 2011:

“La stampa tridimensionale rende economico creare singoli oggetti tanto quanto crearne migliaia e quindi mina le economie di scala. Essa potrebbe avere sul mondo un impatto così profondo come lo ebbe l'avvento della fabbrica... Proprio come nessuno avrebbe potuto predire l'impatto del motore a vapore nel 1750, o della macchina da stampa nel 1450, o del transistor nel 1950, è impossibile prevedere l'impatto a lungo termine della stampa 3D. Ma la tecnologia sta arrivando, ed è probabile che sovverta ogni campo che tocchi.”

c. Tecnologie e Materiali

Nel suo percorso di evoluzione nel corso degli anni, l'Additive Manufacturing ha visto espandere il suo potenziale espressivo con l'aggiunta di varie tecnologie che sono andate ad affiancare quella originaria della stereolitografia. L'impiego di una tecnica piuttosto che un'altra è una scelta effettuata sulla base di diversi fattori, che vanno dalla velocità di realizzazione del prodotto, al materiale lavorabile, al costo dell'attrezzatura fino alle proprietà finali desiderate per l'oggetto.

Poiché negli anni lo studio di nuove tecniche di Additive Manufacturing è stato condotto parallelamente da diversi istituti e ricercatori, col tempo si è venuta a creare confusione nella nomenclatura e categorizzazione delle varie tecnologie. Per questo in tempi recenti l'ASTM International, un organismo di normalizzazione statunitense il cui acronimo sta per "American Society for Testing and Materials", ha portato ordine nell'ambiente ripartendo le tecnologie di fabbricazione additiva in 7 famiglie, che andiamo di seguito ad elencare:

- Binder Jetting;
- Vat Photopolymerization;
- Material Extrusion;
- Material Jetting;
- Powder Bed Fusion;
- Sheet Lamination;
- Directed Energy Deposition.

Prima di procedere oltre, è d'uopo definire due termini molto importanti del mondo della stampa 3D: la Risoluzione e l'Infill.

La risoluzione rappresenta la dimensione minima elaborabile dalla macchina, in particolare relativamente allo spessore degli strati realizzati. Questo valore è largamente variabile in base alla tecnologia che si considera, si va dai decimi di millimetro delle tecniche FDM ai centesimi della stereolitografia ai micron della fusione a letti di polvere, dove a dettare la risoluzione è la dimensione del granello di polvere metallica. È evidente che tanto più lo spessore dello strato è minore, tanto più la risoluzione è alta e l'oggetto realizzato presenterà una superficie esterna più fine e dettagliata; strati più sottili però implicano un tempo di stampa maggiore.

L'infill è una caratteristica prerogativa delle tecniche di stampa 3D: quando la macchina realizza gli strati dell'oggetto da realizzare, al loro interno traccia un reticolato (il più comune esempio è lo stile "a nido d'ape", o honeycomb), in modo tale da garantire robustezza all'oggetto ed evitare che collassi sotto il suo stesso peso. In riferimento a questo parametro viene definita la percentuale di infill, che

va da 0%, oggetto completamente vuoto, a 100%, oggetto completamente pieno: più alta è la percentuale, maggiore è la robustezza del pezzo, alla quale si associa un utilizzo maggiore di materiale e un tempo di stampa più lungo. Va da sé che una corretta determinazione della percentuale di infill consente di realizzare oggetti che mantengano un buon rapporto materiale/robustezza/tempo di realizzazione. Una volta che la stampa sia terminata, questa trama di reticolato non è più visibile, in quanto la macchina deposita degli strati completamente pieni, sia superiori che inferiori, in modo tale da rendere la superficie uniforme e l'oggetto perfettamente chiuso.

Esaminiamo ora brevemente i principi di funzionamento e le caratteristiche di ogni famiglia di tecnologie. Va sottolineato che, ad eccezione dei casi in cui è esplicitamente riportato diversamente, tutte queste tecnologie necessitano, durante la realizzazione dei manufatti, della creazione di strutture di supporto per evitare che l'oggetto collassi nella sua costruzione.

Binder Jetting: Il materiale utilizzato si trova sotto forma di polvere, che un legante chimico depositato da una testina di stampa provvede ad unire in maniera puntiforme e progressiva, fino a formare l'oggetto desiderato; la polvere non coinvolta nel processo rimane non legata e sospesa sullo strato sottostante, in attesa di essere rimossa e riutilizzata in un altro processo. Da questo tipo di tecniche, cui ci si riferisce anche col nome di Colour-Jet Printing, per la possibilità di realizzare oggetti di diversi colori, o Inkjet Printing, si ottengono manufatti piuttosto porosi e decisamente fragili, ma nettamente meno costosi di quelli ottenibili da altre tecnologie di stampa, rendendoli degli ottimi candidati per modelli estetici utilizzati a scopi dimostrativi.

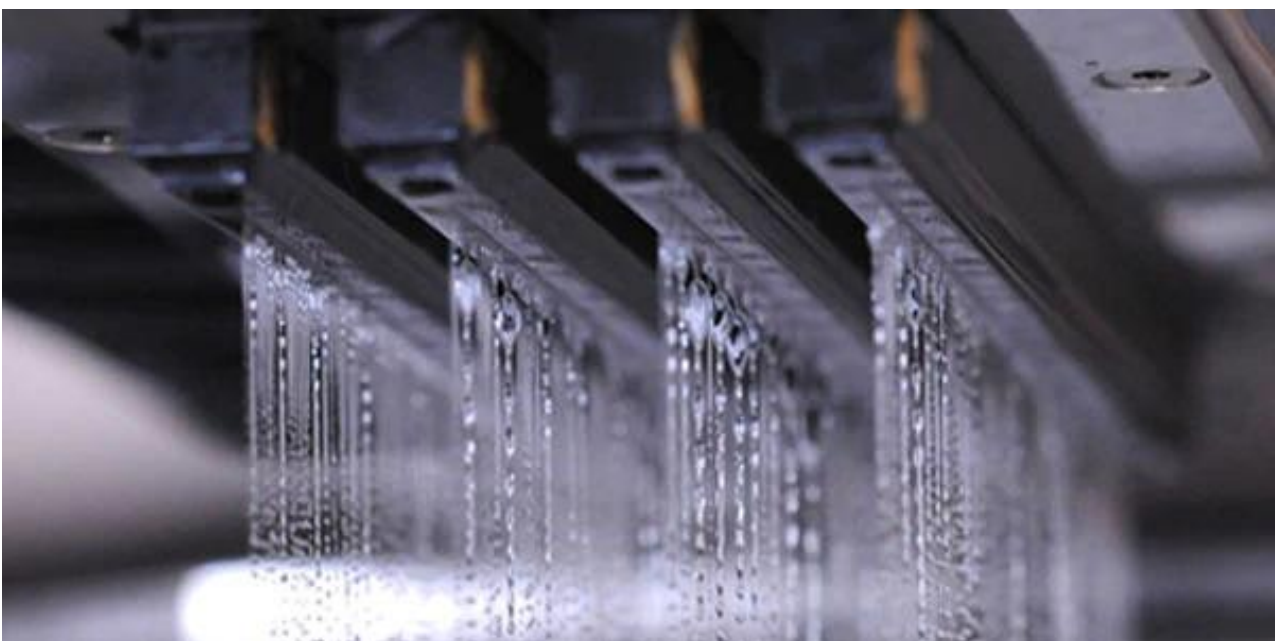


Figura 2.3-Fotografia rappresentante la fase di deposizione del legante, che solidificherà strategicamente il letto di polvere

Vat Photopolymerization: È la famiglia di processi cui appartiene la stereolitografia, in questo caso abbiamo una vasca riempita di un fotopolimero sensibile alla luce ultravioletta che viene solidificato dall'azione di una sorgente luminosa opportunamente controllata. Nelle prime macchine realizzate da Charles Hull il procedimento prevedeva che la vasca venisse posta su una piattaforma orizzontale mobile in grado di spostarsi verticalmente. Un laser puntiforme, puntato verso la vasca, si occupa di indurire il fotopolimero, seguendo grazie ad uno specchio una traiettoria che percorre l'intera sezione dell'oggetto, realizzando così oggetti con un'elevatissima risoluzione e una notevole finitura superficiale. Un'evoluzione di questi macchinari si ebbe con la tecnologia chiamata Digital Light Processing, dove la radiazione in grado di solidificare il polimero viene emessa da un proiettore, che appunto proietta l'intera sezione dell'oggetto, piuttosto che un singolo punto: in questo modo si ottiene una solidificazione uniforme ed istantanea di uno strato per volta, con conseguente riduzione dei tempi di produzione. L'unica tecnologia facente parte di questa famiglia che non necessita di strutture di sostegno durante la realizzazione dell'oggetto è quella definita Solid Ground Curing.

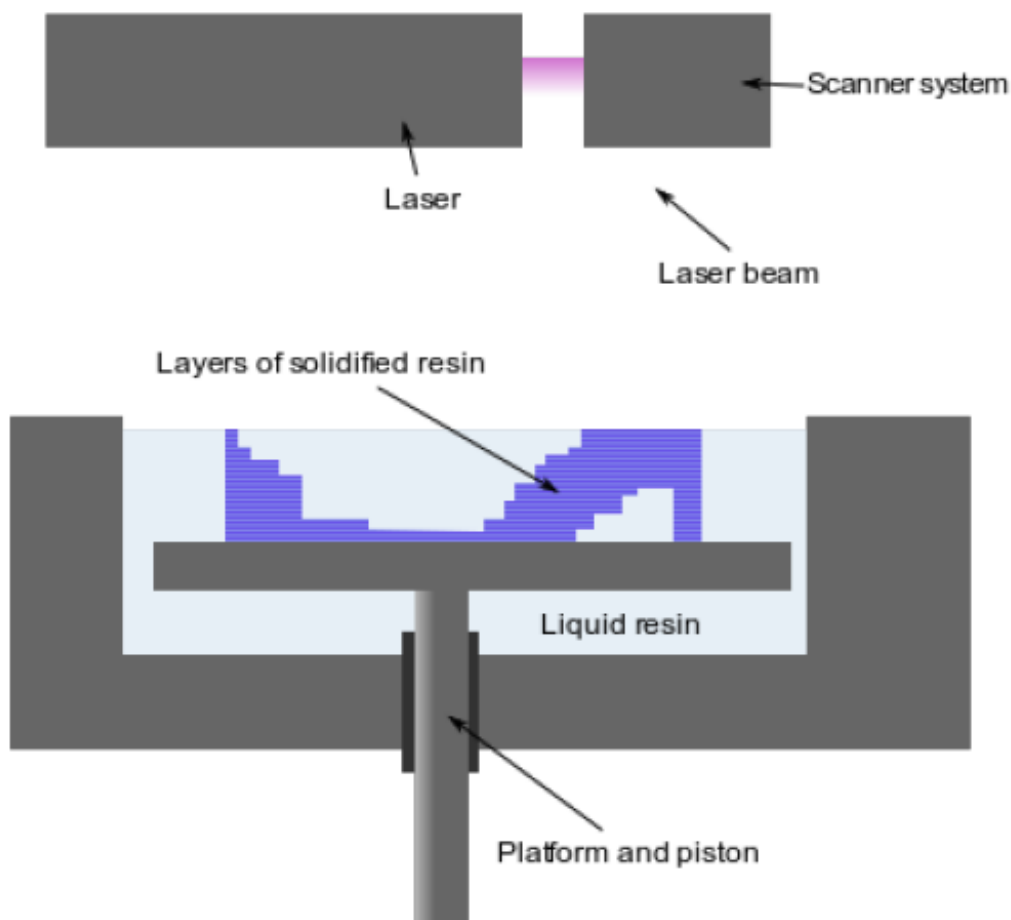


Figura 2.4-I due componenti della tecnica Vat, il laser e la piattaforma mobile su cui è poggiata la vasca con il fotopolimero

Material Extrusion: Com'è intuibile dal nome, questa serie di tecnologie basa il proprio funzionamento sulla deposizione di un materiale malleabile, opportunamente scaldato fino a fargli assumere uno stato semisolido, che viene estruso da una testina mobile e depositato su uno strato sottostante di materiale, già solidificato, andando così a costruire l'oggetto desiderato dal basso verso l'alto. Questo tipo di tecnologia, di cui la declinazione più diffusa è il Fused Deposit Modeling, viene sfruttato sia nelle macchine ad uso industriale sia, più notoriamente, nelle comuni stampanti 3D ad uso domestico. Gli oggetti prodotti presentano buone caratteristiche di resistenza al calore, agli agenti chimici, e alle variabili ambientali, motivo per cui trovano applicazione nei settori medicale, automobilistico ed aerospaziale, ma presentano una fastidiosa anisotropia nelle proprietà meccaniche, per cui otteniamo come risultato dei manufatti con una resistenza alla rottura o all'impatto molto bassa lungo l'asse Z, ovvero quello perpendicolare ai piani realizzati. Inoltre, dobbiamo considerare che gli oggetti finali sono anche caratterizzati da superfici grezze, dove sono ben individuabili gli strati di materiale depositato: sono pertanto spesso necessarie lavorazioni successive quali sabbatura, abrasione chimica o verniciatura.

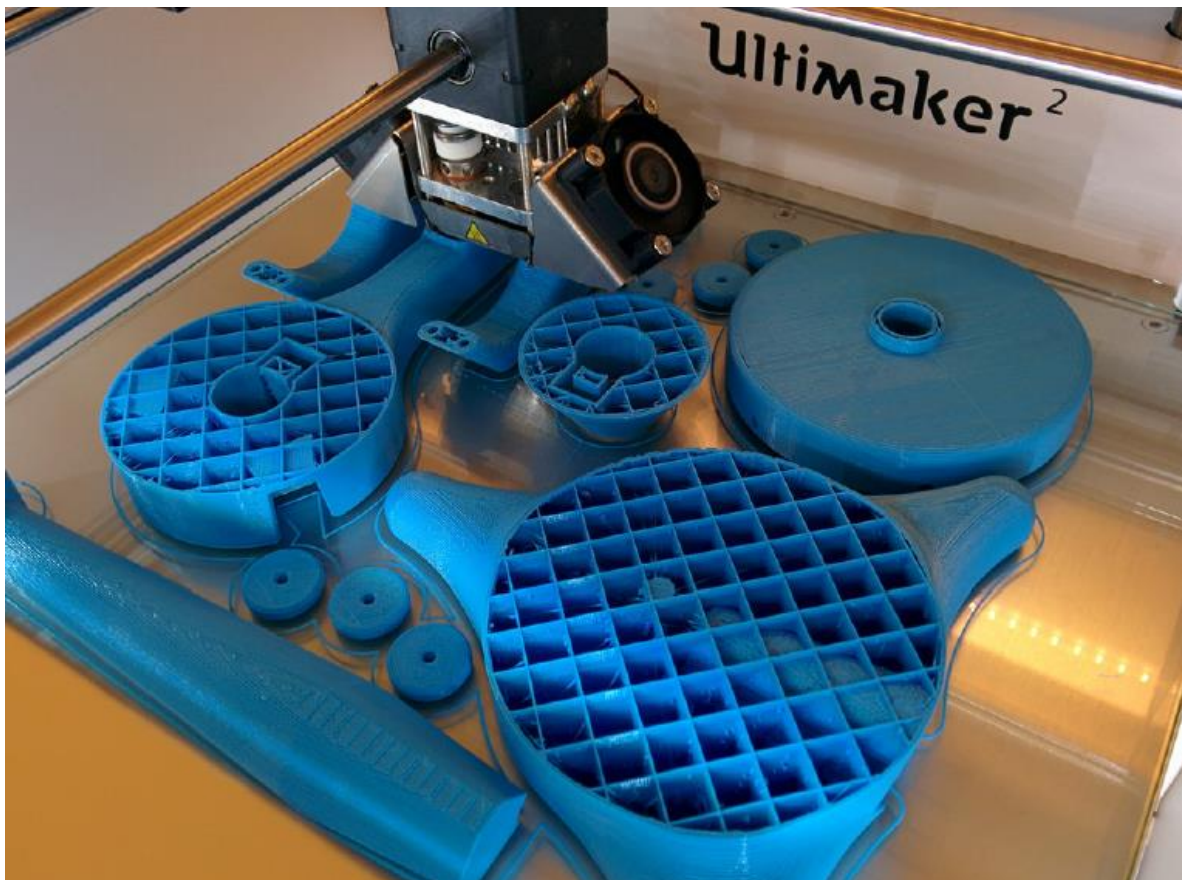


Figura 2.5-Dall'immagine possiamo notare le caratteristiche superfici grezze che questo tipo di tecnologie produce

Material Jetting: Il materiale viene depositato in una modalità che ricorda le stampanti Inkjet bidimensionali, dove al posto di inchiostro la testina mobile è caricata con cera o resine acriliche nel caso delle tecnologie Multi Jet Modeling e con fotopolimeri per quanto riguarda le Polyjet, dove le testine sono anche provviste di una fonte di luce UV che solidifica il polimero appena depositato. Le parti ottenute sono caratterizzate da un elevato livello estetico e con l'impiego di speciali fotopolimeri e resine raggiungono anche proprietà meccaniche medio-alte. Per queste tecniche, non è necessario realizzare supporti durante la costruzione del manufatto.

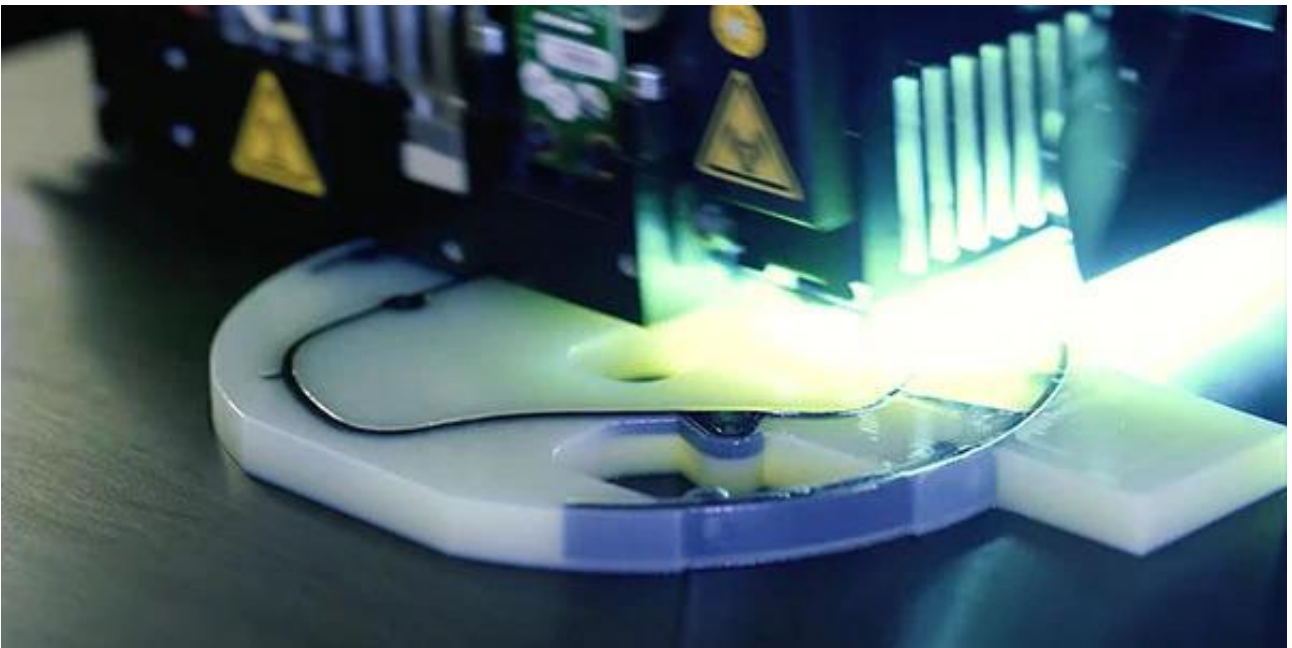


Figura 2.6-In questa immagine possiamo notare la presenza della testina provvista di una fonte di luce UV che si occupa di solidificare il polimero non appena è depositato

Powder Bed Fusion: Tecnica in cui il materiale allo stato di polvere viene fuso e solidificato con l'apporto di energia termica, è forse la tecnologia con più varianti. Nel Selective Laser Sintering un raggio laser fisso, deflesso opportunamente da uno specchio mobile per fargli compiere la traiettoria desiderata, unisce a livello molecolare i granelli di polvere; una volta che uno strato è stato terminato, la piattaforma su cui è adagiato il letto di polvere si sposta verso il basso di una quantità pari allo spessore di uno strato, mentre un macchinario si occupa di depositarne uno successivo sopra quelli già lavorati. Questo si ripete fino alla fine del processo, quando la polvere inutilizzata viene recuperata. Con questa tecnica particolare, si può generalmente fare a meno dei supporti, che, se previsti, hanno semplicemente funzione di dissipazione del calore. Nel Selective Laser Melting, chiamato anche Direct Metal Laser Sintering, accade qualcosa di simile, ma i granelli di polvere piuttosto che essere legati a livello molecolare vengono fusi per formare un blocco monolitico. Infine, nel caso dell'Electron Beam Melting invece di trovarci in presenza di un laser, vediamo che l'energia termica è fornita da un fascio di elettroni, direzionato da magneti rotanti ad anello, ma il processo risulta pressoché identico ai fratelli. Ulteriori differenze possiamo individuarle nelle tipologie di materiali lavorati: mentre il SLS può essere utilizzato per polimeri, materiali compositi, ceramiche e alcune leghe metalliche, il SLM e l'EBM possono lavorare solo polveri metalliche pure, non additivate. Infine, anche l'aspetto dei manufatti realizzati presenta differenze: più porosi quelli ottenuti dal primo metodo, più omogenei quelli ottenuti dagli altri due.



Figura 2.7-Un pezzo, realizzato con tecnica Powder Bed e al cui interno possiamo vedere un'intricata struttura, viene estratto dal letto di polvere

Sheet Lamination: Consiste nella creazione di oggetti tridimensionali mediante la sovrapposizione di fogli di materiale, opportunamente tagliati ed uniti, che andranno a realizzare un oggetto di dimensioni nettamente maggiori rispetto a quelle mediamente ottenibili dagli altri processi, dai quali si distingue anche per la possibilità di poter inserire nei fogli delle componenti “annegate”, per aggiungere proprietà particolari all’oggetto; tuttavia un pesante svantaggio dal ricorso a queste tecniche è che sono necessarie delle complesse lavorazioni successive per la rimozione del materiale in eccesso. La finitura dei manufatti ottenibili è variabile, e generalmente maggiore è quella richiesta, maggiore sarà il costo della lavorazione. Si possono realizzare oggetti mediante fogli di carta, plastica, cellulosa, metalli e materiali compositi rinforzati, legati con vari tipi di agenti di fissaggio: colla per la carta, colla o calore per le plastiche, saldature o bulloni per i materiali metallici. Per la maniera in cui gli oggetti sono realizzati, con la Sheet Lamination non sono necessari supporti alla struttura dei manufatti.

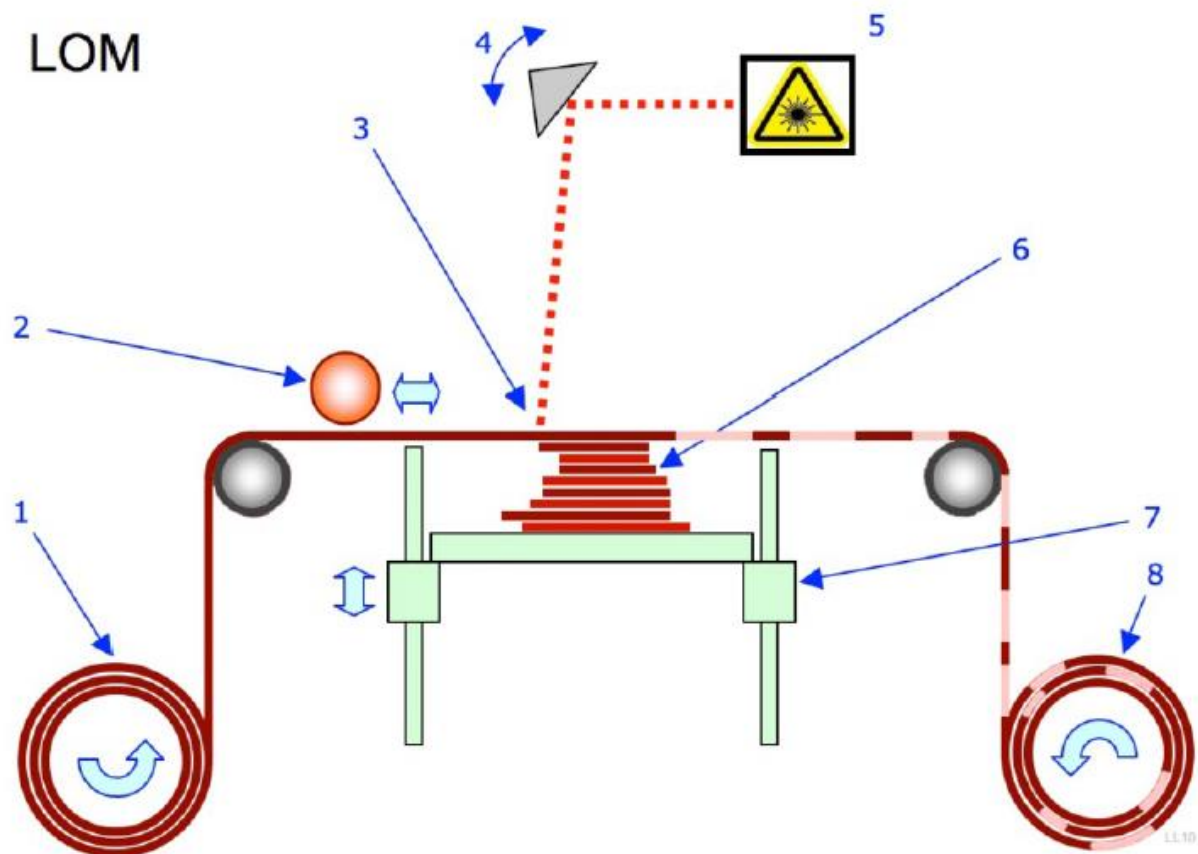


Figura 2.8-Illustrazione schematica del processo di Sheet Lamination

Directed Energy Deposition: In questa famiglia di tecnologie rientrano tutte quelle tecniche che prevedono l'utilizzo di materiale metallico sotto forma di filamento o polvere, il quale viene fuso e depositato per formare i vari layer; a differenza delle tecniche Powder Bed, in questo caso abbiamo che la fusione del materiale avviene nel momento in cui viene depositato. Un tipico macchinario che faccia riferimento a questa tecnica è provvisto di un ugello mobile dal quale esce il materiale e una fonte di energia concentrata, come un arco al plasma o un raggio laser, che fornisca il calore necessario per far avvenire la fusione; per evitare ossidazioni indesiderate, il punto di lavorazione viene spesso inondato di gas inerte. Appartengono a questa categoria tecniche come il Direct Light Fabrication, l'Electron Beam Direct Manufacturing e il Laser Engineered Net Shaping. Queste tecniche rappresentano un unicum anche nell'élite dell'Additive Manufacturing in quanto possono anche essere utilizzate per riparare o aggiungere materiale ad una parte già esistente: ciò consente di apportare materiale solo nei punti strategici di una struttura, permettendo un risparmio notevole nella creazione di particolari ad alte prestazioni per settori come quello navale, aeronautico e oil&gas.

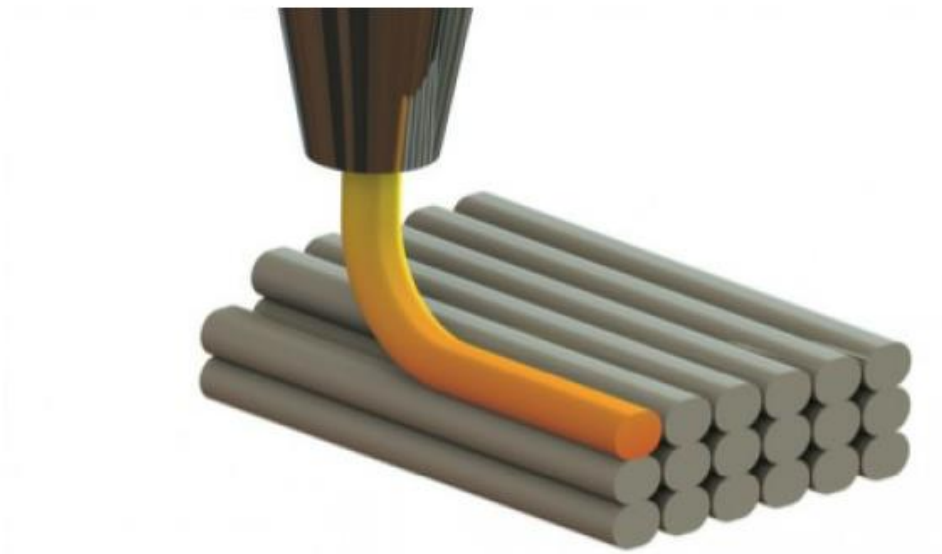


Figura 2.9-Nell'immagine è esemplificato il concetto per cui questo tipo di tecniche possa essere utilizzato per integrare e riparare strutture già esistenti

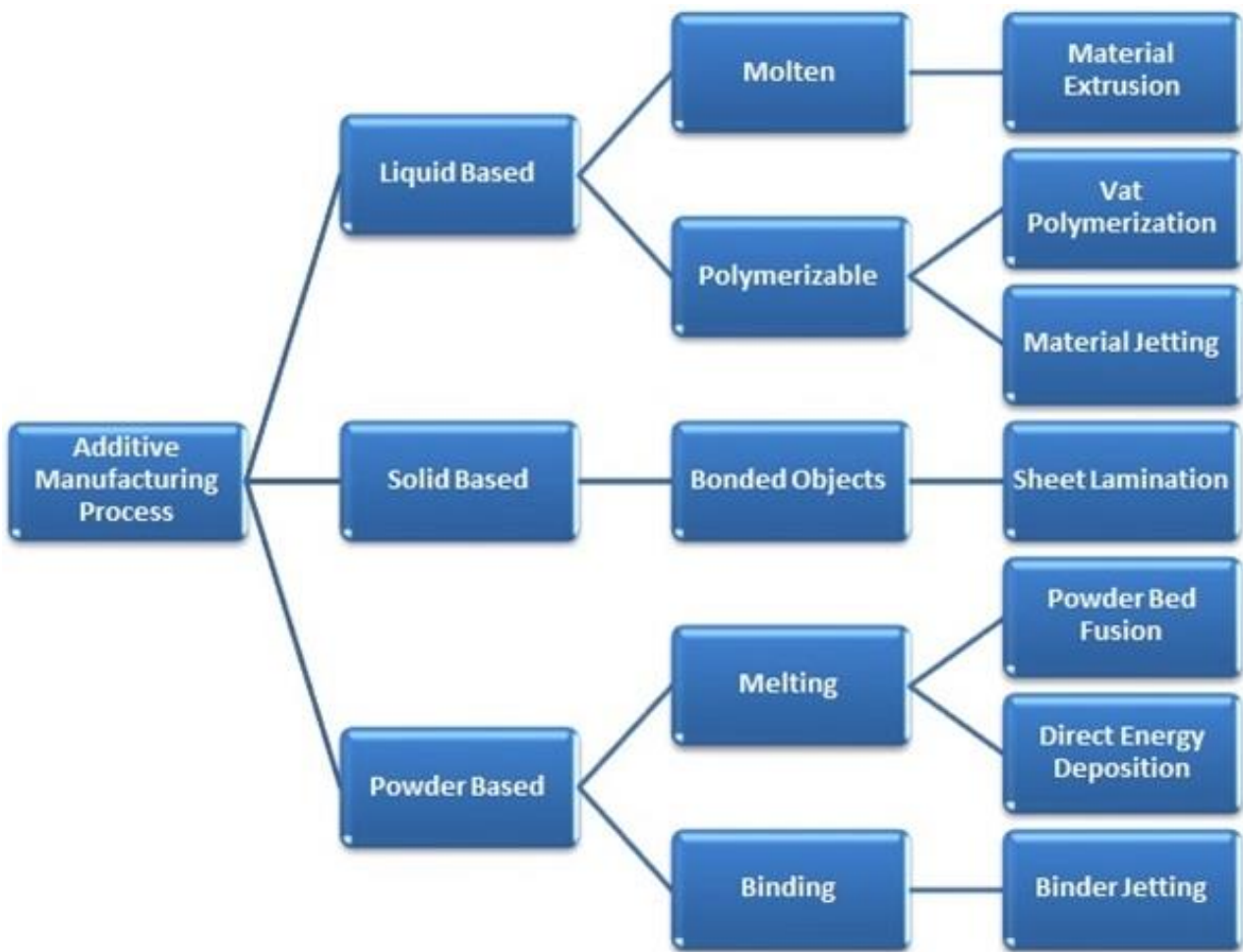


Figura 2.10-Schema riassuntivo delle famiglie di tecniche di Additive Manufacturing

È opportuno ora menzionare anche i materiali coinvolti nei processi appena descritti. Possiamo sostanzialmente dividerli in due categorie: i metalli e i polimeri. Laddove i primi trovano applicazione in quei campi in cui siano richieste prestazioni più elevate, i secondi compensano con costi decisamente più contenuti sia per quanto riguarda l'acquisto del materiale stesso che le tecnologie di stampa, e rappresentano la categoria di materiali più largamente impiegata nel campo additive.

I principali metalli utilizzati sono:

- **Alluminio:** Essendo molto leggero è particolarmente adatto ad applicazioni che richiedono un buon compromesso tra capacità termiche e peso contenuto, ad esempio nel settore automobilistico e aeronautico;
- **Leghe cobalto-cromo:** Offrono proprietà meccaniche elevatissime, che addirittura migliorano con l'aumentare della temperatura fino a 500°-600°. Inoltre, sono caratterizzate da un'ottima resistenza alla corrosione, motivo per cui sono impiegate in applicazioni ingegneristiche ad alta temperatura, ad esempio nella realizzazione dei motori degli aerei, e in ambito biomedico;

- **Nichel:** Le leghe a base di nichel presentano elevata resistenza all'ossidazione e ottime proprietà meccaniche, che non si degradano con le alte temperature, tanto che queste leghe vengono spesso utilizzate anche fino a 1200°. Trovano applicazione nel settore aerospaziale;
- **Acciaio:** La vasta gamma di acciai utilizzabili nell'Additive Manufacturing riproduce l'ampio campionario di caratteristiche tipiche dei normali acciai forgiati. Grazie al suo basso rapporto costo/prestazioni è la lega più utilizzata, anche considerando la sua notevole flessibilità applicativa;
- **Titanio:** Famoso per essere caratterizzato da bassa densità ed elevatissime proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione, questo metallo trova numerose applicazioni in ambito motorsport e aerospaziale, oltre che biomedico, dove è richiesta la grande purezza che si può ottenere in alcune polveri, in aggiunta alle sue eccellenti proprietà.

Passando ad esaminare i polimeri abbiamo:

- **PLA:** Derivato dall'amido e per questo considerato eco-friendly, questo polimero presenta buona stabilità, discrete caratteristiche meccaniche e un coefficiente di ritiro piuttosto basso. Il fatto inoltre che può essere lavorato a temperature inferiori rispetto a quelle degli altri polimeri lo rende un materiale molto flessibile, utilizzabile in numerose applicazioni;
- **ABS:** Questo polimero è caratterizzato da un'alta resistenza meccanica, al graffio e al calore, caratteristiche che insieme alla sua grande rigidità lo rendono un candidato ideale per quelle applicazioni dove il componente da realizzare deve essere sottoposto a sforzi considerevoli. Tuttavia, in fase di progettazione si deve tener conto del suo elevato ritiro;
- **HIPS:** Questo polimero, inizialmente introdotto nel mondo della stampa 3D per essere utilizzato per realizzare le strutture di supporto, essendo solubile nell'idrocarburo D-Limonene, ha visto poi ricavarsi un altro spazio di applicazione quando ci si è resi conto delle sue buone proprietà meccaniche, affini a quelle dell'ABS. Inoltre, la maggiore facilità di stampa, che avviene a temperature ridotte e a costi inferiori, insieme alla sua caratteristica opacità che nasconde alla vista i gradini tipici della produzione per strati, lo rendono un valido sostituto all'ABS;
- **Poliammide:** Indicato generalmente con la sigla PA, questo polimero si distingue per una stampa caratterizzata da un'elevata risoluzione nei dettagli e un'alta selettività; in più, dimostra una buona resistenza agli agenti chimici, un basso coefficiente d'attrito e una buona resistenza all'abrasione. Una caratteristica tipica dei pezzi sinterizzati in PA è la perfetta armonia tra solidità meccanica ed elasticità su un ampio range di temperatura, che rende

questo materiale adatto per parti con diverse geometrie, dimensioni e requisiti. A questa categoria di polimeri appartengono il Nylon e il Kevlar;

- **PET:** Uno dei grandi vantaggi di questo polimero è la totale assenza di odore o fumi tossici durante la fase di stampa, caratteristica che unita al suo scarso assorbimento d'acqua e alla sua buona trasparenza e lucidità lo rendono un candidato ideale nella realizzazione di giocattoli, parti per elettronica e cosmetica;
- **PC:** Grande trasparenza, atossicità e alta temperatura di deformazione rendono il policarbonato un materiale adatto alla realizzazione di tutti i manufatti ottenuti con la stampa 3D, con lo svantaggio associato però del costo mediamente superiore rispetto agli altri polimeri;
- **HDPE:** Tra le principali proprietà di questo polimero troviamo che è atossico e che ha un basso assorbimento d'acqua, caratteristiche che ne rendono adatta l'applicazione in campo alimentare. Viene inoltre anche utilizzato nell'industria chimica ed elettrica per la sua grande resistenza agli agenti chimici;
- **PCL:** Polimero caratterizzato da un'eccellente adesione tra gli strati depositati, che insieme alle sue ottime proprietà di biocompatibilità e ad un'elevata stabilità termica, lo rendono un candidato ideale per le applicazioni biomedicali, nonostante la difficoltà nello stamparlo;
- **PVA:** Questo materiale è principalmente utilizzato per creare supporti solubili in acqua, ma resistenti agli idrocarburi. Tuttavia, è leggermente più complesso da lavorare rispetto ad altri polimeri soprattutto a causa dell'alta temperatura di stampa, inoltre per via delle sue proprietà va conservato in un luogo asciutto per evitarne il degrado.

Prima di concludere questo paragrafo e procedere oltre, è opportuno riportare quelli che sono i principali trattamenti, estetici e funzionali, che vengono eseguiti sui manufatti realizzati con le tecniche additive.

- **Rimozione dei supporti:** Come è intuibile dal nome, in questa fase di lavorazione vengono eliminate le strutture di supporto che possono essere state realizzate in fase di costruzione dell'oggetto. Quest'operazione è in realtà un aspetto negativo delle tecnologie AM, in quanto richiede generalmente una grande quantità di lavoro manuale, specialmente nel caso di manufatti realizzati in metallo, che necessitano di lavorazioni su macchine utensili specifiche come le fresatrici; in alternativa, se i supporti non sono metallici, si può pensare ad una loro rimozione chimica, mediante l'immersione in un liquido nel quale solo i supporti siano solubili. A queste si aggiungono lavorazioni successive per eliminare eventuali sfridi residui e migliorare la finitura superficiale (per i metalli parliamo di burattatura ed elettroerosione),

risultando quindi complessivamente in un aumento del tempo di lavorazione e conseguentemente del costo del manufatto;

- **Sabbiatura:** Come è stato più volte sottolineato, spesso la superficie dei manufatti ottenuti è piuttosto grezza e difficilmente uniforme, per questo si ricorre a trattamenti per migliorarne la finitura superficiale. Nella sabbiatura l'oggetto viene investito da un forte getto di aria compressa mista a sabbia, che con la sua azione abrasiva si occupa di rimuovere gli eventuali residui dei supporti e i caratteristici gradini derivanti da una lavorazione per strati;
- **Mass Finishing:** Trattamento simile alla sabbiatura, in questo caso l'oggetto viene posto in un sistema vibrante assieme ad un materiale abrasivo, come la sabbia. Gli impatti e l'attrito generatosi levigheranno la superficie rimuovendo quindi eventuali spigoli o sporgenze. Questo processo è utilizzato soprattutto nelle grandi produzioni. Va tuttavia sottolineato che spesso le forme ottenute dopo questo processo variano notevolmente rispetto a quelle di partenza;
- **Vapor Smoothing:** Tecnica alternativa alle due precedentemente descritte ed utilizzata specialmente per i manufatti in ABS e PA, consiste nell'espore per qualche secondo l'oggetto a dei vapori di solventi. In questo modo si riescono a raggiungere anche zone non accessibili alla sabbiatura, ma a differenza di questa i risultati ottenuti, sia in termini di lucidatura che di rimozione delle sporgenze, non sono ottimali;
- **Verniciatura:** La funzione di questo trattamento risulta ovvia dal nome. Possiamo dire che insieme alla sabbiatura è uno dei processi più rapidi ed economici, e che ha come grande vantaggio che può essere effettuato su praticamente ogni superficie;
- **Electroplating:** procedimento elettrochimico realizzato immergendo in un bagno di ioni di una lega (che può essere di oro, argento, nichel e rame) un oggetto dotato di carica opposta, in modo tale che gli ioni siano attratti da questo e si adagino sulla sua superficie, creando uno strato sottile ed omogeneo. Questo trattamento permette di migliorare notevolmente l'aspetto dei manufatti, per questo viene realizzato spesso anche sui componenti in polimero;
- **Bonding:** Sebbene uno dei punti di forza dell'additive manufacturing sia la capacità di realizzare oggetti normalmente costituiti da più componenti in un manufatto unico, questo è limitato dalle dimensioni delle macchine che si vanno ad utilizzare. A volte perciò si è comunque costretti a scomporre l'oggetto in più parti, che devono poi essere unite. Questo può avvenire con vari metodi specifici per i materiali in gioco, andando dalla saldatura all'incollaggio mediante adesivi;
- **Infiltration:** Trattamento realizzato per risolvere l'inconveniente della fragilità che spesso caratterizza i manufatti realizzati con le tecniche di AM. La superficie dell'oggetto viene

ricoperta di una resina epossidica che con l'ausilio di una pompa da vuoto penetra nelle cavità della superficie stessa, andandole a riempire. Una volta solidificata a seguito di un trattamento in forno la resina avrà creato una superficie isolante.

Infine, nella tabella seguente vengono illustrate le principali caratteristiche delle dieci tecnologie di additive manufacturing più utilizzate.

Tecnologia AM	Precisione	Materiale	Vantaggi	Svantaggi	Presenza supporti
Inkjet Printing (Binder Jetting)	34-40 μm	Legante liquido	In grado di stampare parti anche con forme molto complesse; alta velocità di produzione; applicazione in campo medico, ad esempio stampa di organi.	La dimensione delle parti è limitata; il costo delle macchine è elevato.	Sì: per la stampabilità e per l'equilibrio del manufatto
Colour-Jet Printing (Binder Jetting)	23-30 μm	Legante liquido	Produce stampe colorate di alta qualità; molto rapido e silenzioso; essendo altamente portatile, è molto comodo per le piccole imprese o per gli ambienti come uffici o case.	Il costo del prodotto stampato è elevato per via del colore; scarse proprietà meccaniche; le parti realizzate non sono definitive in quanto soggette a degrado veloce nel tempo.	Sì: per la stampabilità e per l'equilibrio del manufatto

<p>Stereolitografia (Vat Photopolymerization)</p>	<p>50-55 μm</p>	<p>Fotopolimeri</p>	<p>Grande velocità di produzione in grado di realizzare parti immediatamente utilizzabili anche in una giornata; utilizzata per realizzare modelli anatomici, protesi, stampi per stampaggio a iniezione.</p>	<p>Le parti ottenute sono piuttosto fragili; utilizzata nella produzione non di massa; costo elevato delle macchine; le parti realizzate non sono definitive in quanto soggette a degrado veloce nel tempo.</p>	<p>Sì: per la stampabilità e per l'equilibrio del manufatto</p>
<p>Fused Deposition Modeling (Material Extrusion)</p>	<p>35-40 μm</p>	<p>Policarbonato; ABS; Poliesteri</p>	<p>In grado di produrre parti ad elevata resistenza e resistenti all'acqua; disponibilità di realizzare le parti in più colori; unica tecnologia in grado di stampare il PEEK.</p>	<p>Spesso il processo lascia ben visibili i vari layer, con necessità di eseguire una sabbiatura; la fluttuazione della temperatura durante la lavorazione potrebbe portare a delaminazione.</p>	<p>Sì: per la dissipazione del calore, per la stampabilità e per l'equilibrio del manufatto</p>
<p>Polyjet Printing (Material Jetting)</p>	<p>20-85 μm</p>	<p>Fotopolimeri</p>	<p>In grado di produrre forme complesse, dettagli intricati e feature delicate;</p>	<p>Compattezza e qualità dei materiali inferiori a quelle dello stampaggio per iniezione; non</p>	<p>No</p>

			<p>processo molto flessibile utilizzato largamente in ambito medico.</p>	<p>adatto alla produzione di massa.</p>	
<p>Multi-Jet Printing (Material Jetting)</p>	<p>25-35 μm</p>	<p>Plastiche</p>	<p>Produce parti lisce e precise con dettagli molto complessi; elevata velocità di produzione; non è richiesto nessun trattamento post stampa</p>	<p>Non sono ancora disponibili per questo tipo di tecnologia materiali ceramici</p>	<p>No</p>
<p>Selective Laser Sintering (Powder Bed Fusion)</p>	<p>45-50 μm</p>	<p>Polveri metalliche, plastiche, ceramiche</p>	<p>Non sono necessarie strutture di supporto; le parti stampate posseggono elevate proprietà meccaniche; buona resistenza chimica; in grado di stampare prototipi e parti che possono essere immediatamente utilizzate</p>	<p>Le parti realizzate hanno una superficie porosa; se sottili, devono essere sigillate con l'applicazione di uno strato di sostanze come il cianoacrilato o con processi di chemical smoothing</p>	<p>Generalmente no; se sì: per la dissipazione del calore</p>

Direct Metal Laser Sintering (Powder Bed Fusion)	20-35 μm	Polveri di titanio, cobalto, alluminio, leghe di bronzo, acciaio, acciaio inox, leghe di nichel	Le parti realizzate hanno elevate proprietà meccaniche; buona accuratezza e precisione del prodotto finale; in grado di realizzare efficientemente anche prodotti dalle forme complesse	A seconda del materiale usato le parti realizzate potrebbero avere una superficie porosa; a causa del ritiro termico i prodotti potrebbero subire rimpicciolimenti o deformazioni	Sì: per la dissipazione del calore
Electron Beam Melting (Powder Bed Fusion)	40-50 μm	Polveri metalliche	Possibilità di ottenere elevati livelli di energia in un raggio molto sottile; minor consumo di polvere delle altre tecnologie; le camere a vuoto in cui avviene la lavorazione eliminano le impurità	A causa della necessità di realizzare il vuoto, i costi sono più elevati, così come la manutenzione richiesta; le tecnologie a raggi di elettroni producono raggi X mentre sono in funzione	Sì: per la dissipazione del calore, per la stampabilità e per l'equilibrio del manufatto
Laminated Object Manufacturing (Sheet Lamination)	60-70 μm	Metalli; Plastiche; Carta	Possibilità di produrre parti di dimensioni molto grandi; rapidità e	È richiesta una quantità di lavoro manuale maggiore delle altre tecniche; gli	No

			precisione; ecologico; buone proprietà meccaniche	oggetti realizzati in carta hanno proprietà inferiori rispetto ai materiali impiegati in altre tecniche	
--	--	--	--	---	--

c.I Richiami su Asportazione di Truciolo e Stampaggio ad Iniezione

Nell'ottica di presentare nella maniera più completa ed oggettiva possibile i dati in base ai quali è stato eseguito lo studio di fabbricazione riportato nei capitoli successivi di questa tesi, è necessario spendere delle parole per descrivere anche le tecniche "concorrenti" rispetto all'Additive Manufacturing, ovvero quelle finora indicate come tecniche tradizionali. Questo consentirà di avere una comprensione migliore del confronto tra le due metodologie di realizzazione, in modo tale da dare un senso più concreto allo studio di fabbricazione svolto.

Per realizzare un oggetto come quello presentato nel capitolo introduttivo con tecniche tradizionali, i processi più immediati e semplici cui si può ricorrere sono l'asportazione di truciolo e lo stampaggio ad iniezione. Benché siano entrambe metodologie piuttosto note nell'ambito industriale, si ritiene opportuno presentarne una breve descrizione in modo tale da richiamare all'attenzione i punti salienti di entrambe.

Come suggerisce il nome, l'asportazione di truciolo è una tecnica sottrattiva nella quale da un oggetto di partenza, che può essere un blocco pieno così come un semilavorato o un grezzo di fusione, viene asportato uno strato superficiale di materiale, in seguito ad un processo di deformazione plastica, mediante il moto relativo tra un utensile e il pezzo stesso. Ne risulta quindi una nuova superficie che presenta le caratteristiche desiderate ed espresse sul disegno del pezzo.

Fanno parte di questa categoria solamente tre tipi di lavorazioni: la tornitura, la fresatura, e la foratura. Nella tornitura, l'oggetto da lavorare è fissato ad un mandrino, che lo mette in rotazione attorno al proprio asse, mentre lateralmente si trova posizionato l'utensile tagliente, che ad ogni rivoluzione dell'oggetto ne asporta uno strato superficiale (definito sovrmetalto); generalmente il tagliente è dotato di moto rettilineo, lungo l'asse di rotazione. La fresatura è sostanzialmente un negativo del processo precedente: qui abbiamo che l'oggetto da lavorare è immobile, ed è l'utensile a muoversi, sia di moto rotatorio, per asportare materiale, sia di moto traslatorio, per spostarsi nelle altre zone in cui è richiesta la lavorazione. La foratura infine è il processo la cui modalità è più immediata, abbiamo infatti che il pezzo da lavorare viene fissato, e l'utensile, anche qui dotato di entrambi i moti, di avanzamento e di taglio, si occupa di realizzare i fori.

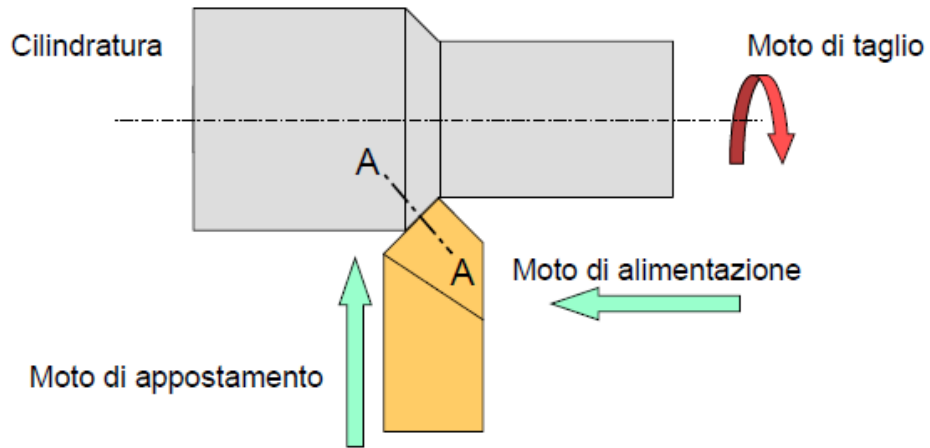


Figura 2.11-Esemplificazione di un processo di tornitura

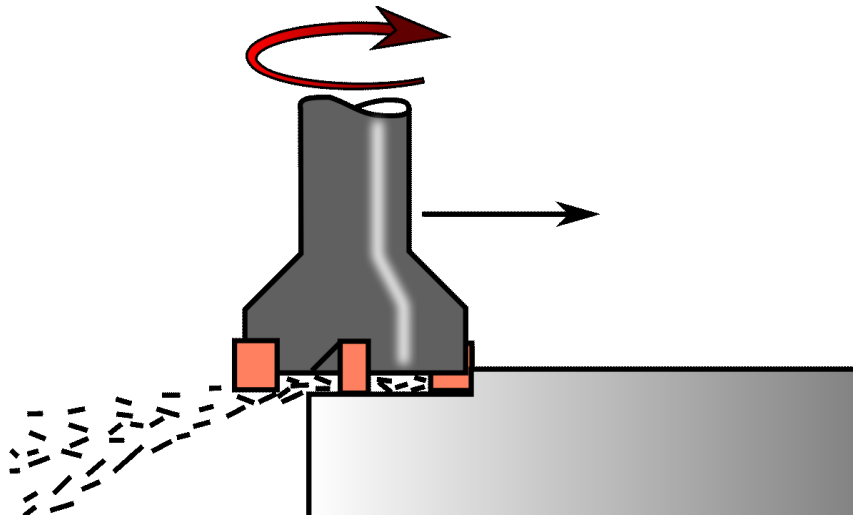


Figura 2.12-Esemplificazione di un processo di fresatura

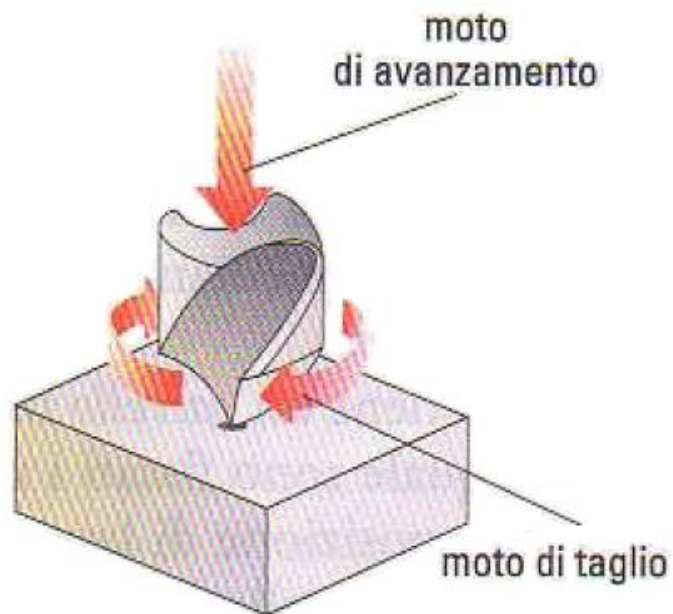


Figura 2.13-Esemplificazione di un processo di foratura

Benché ormai questa famiglia di tecniche sia stata estensivamente studiata da numerosi tecnologi nel corso degli anni e si disponga oggi di un vastissimo bagaglio di conoscenze cui fare affidamento per ottimizzare i processi, rimane comunque vero che una gamma così esigua di lavorazioni disponibili limita significativamente le possibilità di design dei progettisti. Questo è chiaramente un enorme elemento a sfavore verso l'utilizzo di tale famiglia di processi per la realizzazione di parti caratterizzate da un grado di complessità piuttosto elevato, in quanto si rischierebbe di incorrere in processi produttivi molto lunghi, con pesanti fasi di preparazione nella fase di studio dei processi e con elevati costi finali. L'asportazione di truciolo si dimostra quindi limitata sotto questo punto di vista.

Anche l'utilizzo del materiale è un punto discriminante per queste tecniche. Dovendo necessariamente avere come punto di partenza un oggetto di dimensioni maggiorate rispetto al pezzo finale e che presenta del materiale in eccesso (ad esempio quello che andrà asportato durante la foratura), gran parte della massa iniziale finirà in prodotto di scarto; nei casi peggiori, solo una frazione del materiale di partenza costituisce poi il prodotto finito. Questo ovviamente non costituisce solamente uno sperpero di materiale prezioso, ma anche un aumento dei costi sostenuti dall'azienda, in quanto deve procurarsi più materiale di quello strettamente necessario, aumento che poi si riflette inevitabilmente sul costo finale del prodotto.

Il costo inoltre non dipende solo dal materiale, ma anche da altri due fattori: i parametri di lavorazione ed il costo della strumentazione.

Il principale parametro di lavorazione che influisce sul risultato del processo è sicuramente la velocità di taglio, ovvero la velocità derivata dalla combinazione dei due moti, rotatorio e traslatorio, che caratterizzano i processi presi in esame. Questo parametro è spesso modificabile, consentendo quindi di ottenere, ove richiesto, un tempo di processo minore aumentando opportunamente la velocità di taglio. Ciò permette chiaramente di fornire prodotti finiti in tempi di consegna più rapidi, ma ha come effetto collaterale un'usura maggiore degli utensili, che pertanto devono essere sostituiti più frequentemente oppure essere rimpiazzati da versioni migliori, rinforzate e quindi più costose.

Ma pur prescindendo da lavorazioni gravose sulle attrezzature, anche i processi più quotidiani comportano un consumo graduale degli utensili, che richiedono quindi una manutenzione e sostituzione continua; inoltre la natura stessa dei processi di asportazione di truciolo comporta che sia il pezzo lavorato, sia l'utensile tagliente si scaldino per attrito.

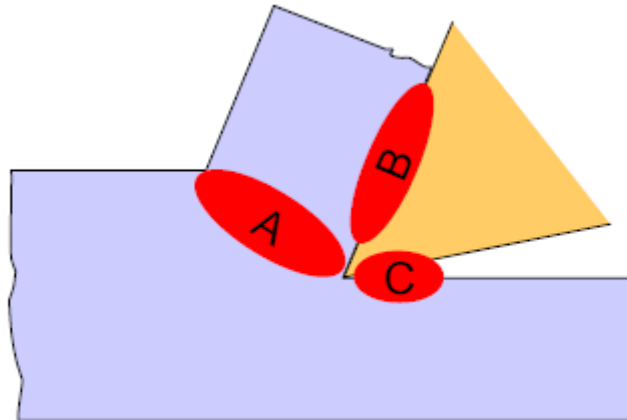


Figura 2.14-Schema delle zone che si scaldano maggiormente durante una tornitura

Sebbene gran parte del calore generato sia smaltito dal truciolo scartato, rimane comunque evidente come una lavorazione prolungata porti a degli effetti che non possono essere positivi né per il pezzo lavorato (deformazioni e modifica della finitura superficiale) né per l'utensile (curvatura e riduzione della capacità di taglio).

Per ovviare a queste problematiche, si introduce spesso l'utilizzo di fluidi lubrorefrigeranti, apposite sostanze chimiche il cui impiego ha lo scopo di ridurre l'attrito tra utensile e pezzo, sviluppando quindi meno calore, e di raffreddare per convezione l'utensile stesso. Tuttavia, il ricorso a questi fluidi comporta numerosi svantaggi, quali possibili effetti fisiologici negativi sugli operatori, possibili effetti chimico-fisici su alcuni materiali (ad esempio ossidazione), la necessità di prevedere una loro rimozione dai pezzi finiti, ed ovviamente dei costi aggiuntivi, sia per il loro approvvigionamento, sia per il loro smaltimento, andando quindi nuovamente ad incrementare il prezzo finale del prodotto.

Appare quindi evidente come, sebbene siano processi dall'affidabilità molto elevata, di cui si conoscono i più intimi particolari e che sono in grado di produrre grandi lotti di pezzi in tempi contenuti, le lavorazioni per asportazione di truciolo sono caratterizzate da una quantità niente affatto trascurabile di svantaggi.

Lo stampaggio ad iniezione è un processo industriale in cui un materiale plastico in forma liquida viene immesso in una forma permanente, detta "stampo", grazie ad una forza di iniezione; nella maggior parte delle applicazioni moderne questa forza è esercitata da un meccanismo a vite pistonante ("reciprocating screw"). Durante il processo, la vite è posta in rotazione e forza il materiale ad avanzare verso lo stampo; all'aumentare della pressione all'ingresso dello stampo, la vite inizia ad arretrare, vincendo una contropressione impostata per migliorare la plastificazione, fino a giungere ad una determinata distanza, che permette di controllare il volume di materiale da iniettare. Giunta

alla distanza desiderata, la vite smette di ruotare ed è spinta in avanti idraulicamente, forzando il polimero a riempire la cavità dello stampo; una specie di valvola di non ritorno, posta sulla punta della vite, consente al materiale di fluire solamente in un verso, impedendo il flusso contrario in fase di iniezione. Infine, appena il polimero è solidificato, lo stampo si apre e il pezzo finito viene estratto. Le pressioni massime in gioco, alla fine della fase di iniezione, oscillano tra i 70 e i 200 MPa.

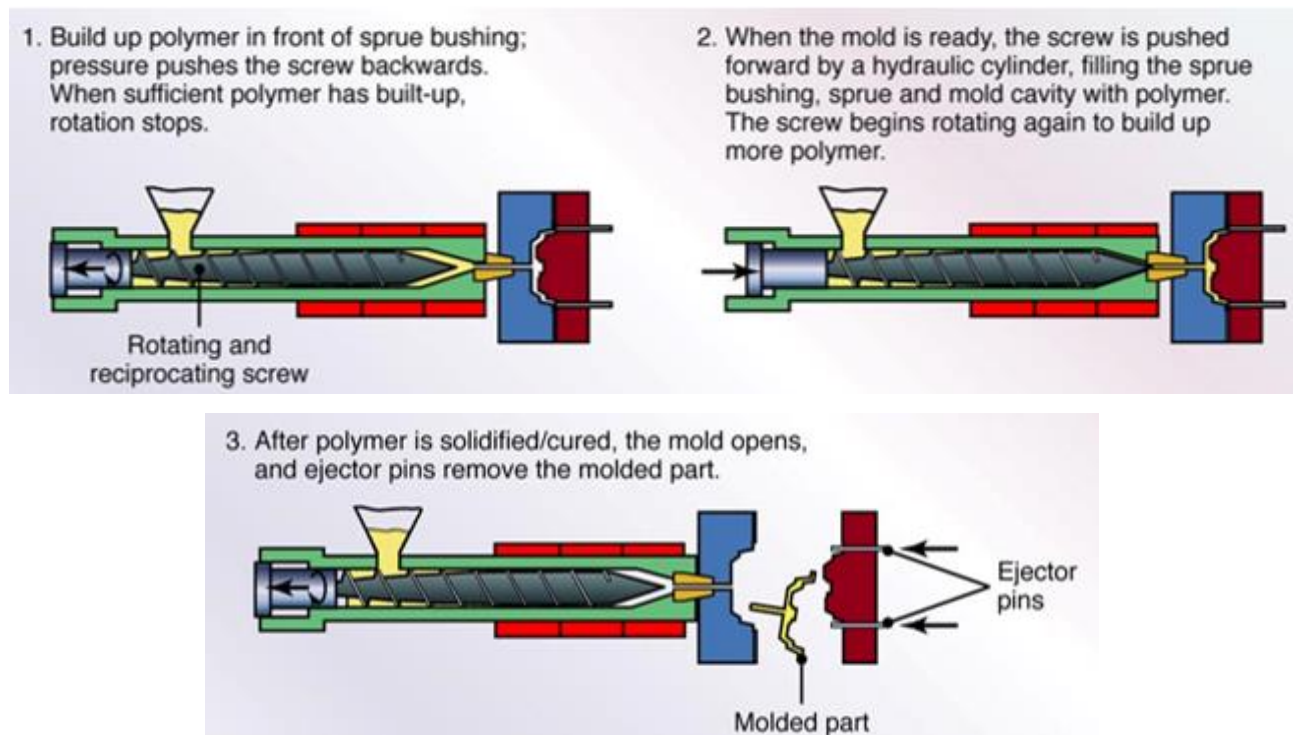


Figura 2.15-Schematizzazione del processo di stampaggio ad iniezione

Questo tipo di tecnologia consente di realizzare oggetti dalle forme molto complesse e di dimensioni variabili, da un bottone ad uno sportello per automobili, con ritmi produttivi anche piuttosto sostenuti (i tempi di ciclo vanno dai 5 ai 50 s).

Tuttavia, ricorrendo a questa tecnica si devono affrontare due problematiche piuttosto significative, ovvero i difetti superficiali e di forma, e l'elevato costo delle attrezzature.

L'origine dei difetti in cui si può incorrere realizzando un manufatto con tecnica ad iniezione risiede quasi interamente nella natura fluida del materiale di partenza (oltre che in una eventuale scorretta progettazione degli stampi); i principali sono:

- Overpack, o sovraimpaccamento, fenomeno che si verifica nei casi in cui la cavità dello stampo è caratterizzata da zone di più facile riempimento rispetto alle altre, con la conseguenza che il materiale fuso tenderà a riempire queste per prime, continuando ad impaccarle, risultando quindi in un manufatto con un'esigua presenza di materiale in alcune

zone, ed eccessiva in altre. In queste ultime inoltre, una volta raffreddato, a causa dello stress accumulato si avranno deformazioni dell'oggetto finale;

- Weld e Meld lines, linee di giunzione generate dall'incontro tra fronti di flusso che viaggiano in direzioni rispettivamente opposte e parallele, e rappresentano dei punti di debolezza per il manufatto realizzato. Generalmente non si può prescindere dalla loro formazione, sia nei pezzi a geometria complessa sia in quelli dalle forme più semplici, pertanto l'unico accorgimento valido è fare in modo che si generino nei punti in cui l'oggetto è meno sollecitato una volta in esercizio;
- Bolle o Vuoti, generati quando dell'aria o comunque del gas rimane intrappolato all'interno del materiale fluido ed impedisce al materiale stesso di riempire alcune zone, portando alla formazione, appunto, di vuoti, che compromettono il corretto funzionamento del pezzo;
- Deformazioni, dovute al ritiro del materiale durante il raffreddamento; sebbene generalmente il ritiro sia un fenomeno di cui si tiene conto in fase di progettazione, prevedendo uno stampo con un volume maggiorato del 5-7% in modo tale da avere un pezzo finale con le dimensioni desiderate, se questo fenomeno avviene in maniera disomogenea sulla superficie del pezzo, a causa di un insufficiente mantenimento in pressione generato da pressioni locali troppo basse o di durata inferiore al necessario, si possono creare delle deformazioni piuttosto pesanti nel pezzo, compromettendo sia il suo aspetto estetico che il suo corretto funzionamento;
- Bave, ovvero materiale in eccesso fuoriuscito dai limiti dello stampo, fenomeno causato nella maggior parte dei casi dall'applicazione di una forza superiore alla resistenza strutturale dello stampo sul materiale; oltre a costituire un difetto dal punto di vista estetico, le bave comportano lavorazioni ulteriori del pezzo, con conseguente aumento dei tempi e dei costi di produzione.

A tutto questo si aggiunge inoltre, come accennato in precedenza, l'elevato costo delle attrezzature, in particolare degli stampi che, avendo costi che variano dai 20 ai 200 mila €, impongono ritmi produttivi piuttosto sostenuti per essere ammortizzati.

Vediamo quindi come, pur essendo tecniche di produzione largamente diffuse e riguardo le quali si possiede un vasto bagaglio di conoscenze cui fare riferimento, l'asportazione di truciolo e lo stampaggio ad iniezione comportano una serie di difetti piuttosto incisivi, che contribuiscono a non renderle competitive.

Va però fatta una precisazione, per evitare ambiguità ed incomprensioni: il paragrafo appena presentato ha lo scopo di dimostrare non che le due tecniche in questione siano deprecabili in senso

assoluto, in quanto nella comune pratica industriale caratterizzata da grandi volumi di produzione esse sono normalmente impiegate con elevata efficienza; i difetti riportati però fanno emergere che, se confrontate con l'Additive Manufacturing e in riferimento a manufatti come quello esaminato in questo lavoro di tesi, dalla geometria complessa e da produrre in un numero esiguo di pezzi, è legittimo aspettarsi che esse non risultino affatto competitive.

La risposta definitiva a questa questione sarà riportata più avanti con un confronto diretto tra il metodo di lavorazione per asportazione di truciolo e con tecnica additive, dove vengono esaminati dati numerici e concreti relativi al pezzo esaminato; pertanto per ora si considera sufficiente la trattazione riportata.

d. Vantaggi, Svantaggi, Applicazioni

Dopo aver spiegato nel dettaglio che cosa si intende per Additive Manufacturing e quali sono le tecnologie principali nel panorama industriale (e non), andiamo a descrivere esplicitamente quelli che sono i vantaggi che un ricorso a queste tecniche porta con sé.

Ovviamente, ogni tipo di differenza che possiamo trovare rispetto alle tecniche di lavorazione tradizionali nasce dal diverso approccio che si ha nella realizzazione dei componenti: costruire un oggetto strato per strato partendo da zero è qualcosa di mai visto nell'ambito.

Il vantaggio principale dell'AM pertanto è e rimarrà sempre la straordinaria libertà di design che questa tecnologia porta con sé: quelle che nelle lavorazioni tradizionali potevano essere forme difficili o addirittura impossibili da realizzare, in questo caso diventano semplicemente una mera sovrapposizione di layer bidimensionali dove la complessità tridimensionale perde di significato. I progettisti possono pertanto prescindere da quelli che erano i normali vincoli posti dalle classiche tecniche di lavorazione dal pieno e, non preoccupandosi di dover progettare un oggetto in ottica Design For Manufacturability, sono liberi di concentrarsi sul Design For Functionality, creando l'oggetto esclusivamente in relazione alla funzione che deve svolgere. Questo include geometrie particolarmente complesse o altrimenti irrealizzabili, come oggetti chiusi con delle cavità al loro interno, manufatti che normalmente richiederebbero l'assemblaggio di più parti separate e che invece possono essere creati in una sola stampa, addirittura oggetti con parti mobili che non presentano elementi di giunzione esterni. Si ottiene quella che viene definita "complexity for free", ovvero una condizione per cui per le macchine operatrici non c'è sostanzialmente differenza tra un prodotto "complesso" ed uno semplice, in quanto il processo produttivo rimane invariato.

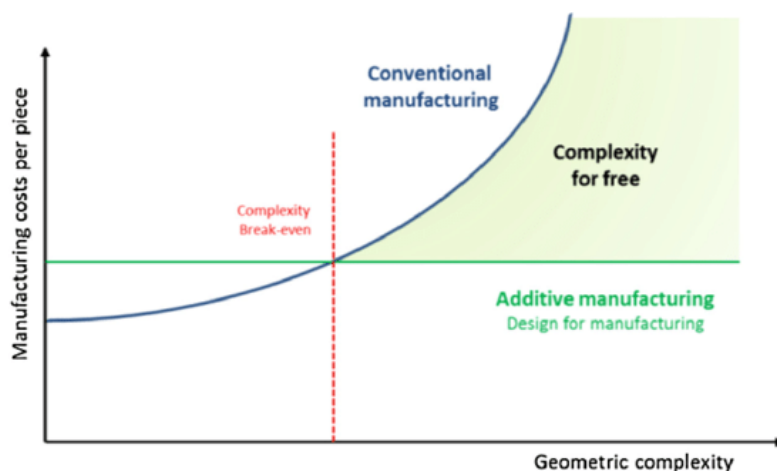


Figura 2.16-Il grafico mette in evidenza la differenza tra lavorazioni tradizionali ed additive manufacturing

A questo concetto è legata anche l'entità dei costi sostenuti durante i processi di lavorazione, che per le tecniche di Additive Manufacturing sono completamente slegati dalla complessità del prodotto realizzato, a differenza delle normali lavorazioni, per le quali invece c'è una proporzionalità più che diretta. Va da sé che questo rappresenta un ulteriore vantaggio a favore delle tecniche additive.

Un'altra differenza tra le due tecnologie consiste nel tipo di attrezzature necessarie per la realizzazione dei prodotti: nelle tecniche tradizionali abbiamo bisogno di una varietà di macchinari ed utensili, tanto più grande quanto è maggiore la complessità e il livello di dettaglio che si vuole raggiungere nel prodotto finale. Ciò non si applica nell'Additive Manufacturing, in quanto la "stampante" è l'unico macchinario necessario per realizzare l'oggetto nella sua interezza, in grado di occuparsi di tutti gli aspetti della sua creazione. Viene così a cadere non solo un'ulteriore problematica, riguardante l'approvvigionamento di strumenti vari, ma anche il costo ad essi associato, che è completamente tagliato nei processi di stampa 3D e che quindi rende i prodotti ottenibili più economici.

È però anche vero che questo vantaggio non si applica quando parliamo di manufatti realizzati in metallo: come abbiamo già spiegato, questi necessitano di varie lavorazioni successive alla fase di stampa per rimuovere i supporti, come la fresatura, e altre per ottenere la finitura superficiale desiderata, come l'elettroerosione e la burattatura. In generale quindi è necessaria una grande mole di lavoro per compensare la presenza dei supporti.

Tornando ad un discorso generale, in aggiunta ad una riduzione dei costi, l'assenza della necessità di attrezzature dedicate rende estremamente più facile e conveniente realizzare più versioni dello stesso prodotto, aprendo così le porte alla possibilità della customizzazione dei prodotti a seconda delle esigenze e desideri dei consumatori senza alcun aggravio economico derivante dalla produzione di pezzi sostanzialmente unici. Non solo, la produzione diventa di fatto flessibile, con macchinari che non richiedono set-up specifici né costosi e con la possibilità di riconfigurare all'infinito l'impianto di produzione, senza alcun costo da sostenere se non quelli di ricerca e sviluppo. Questo favorisce ovviamente la produzione di più lotti di prodotti diversi tra loro ma di dimensioni ridotte.

Un altro elemento di grande importanza nel confronto tra le due famiglie di tecnologie riguarda il grado di automazione, che sebbene nel caso delle lavorazioni tradizionali sia piuttosto alto, è anche vero che difficilmente le macchine lavorano in condizioni di totale autonomia e assenza di personale di supervisione, cosa che invece si verifica nel caso dell'AM. Ove queste tecnologie siano applicate diviene infatti possibile una metodologia di produzione "senza intervento di operatore", nella quale

al personale non è richiesto un grande impegno per mantenere attivi i sistemi di stampaggio, diventando pertanto disponibile per compiere altre mansioni.

Parlando invece della supply chain degli strumenti di attrezzaggio, vediamo che grazie alla produzione additiva questa diventa molto più efficiente. Nei tradizionali processi di produzione sono previsti numerosi passaggi, che portano ad una richiesta maggiore di manodopera, materiali, lavorazioni e processi accessori, per un tempo totale dell'ordine delle settimane. Realizzando invece lo stesso strumento con tecnologia additiva si impiegano appena poche ore, in un unico processo: dal modello CAD al software di elaborazione alla creazione sulla stampante.

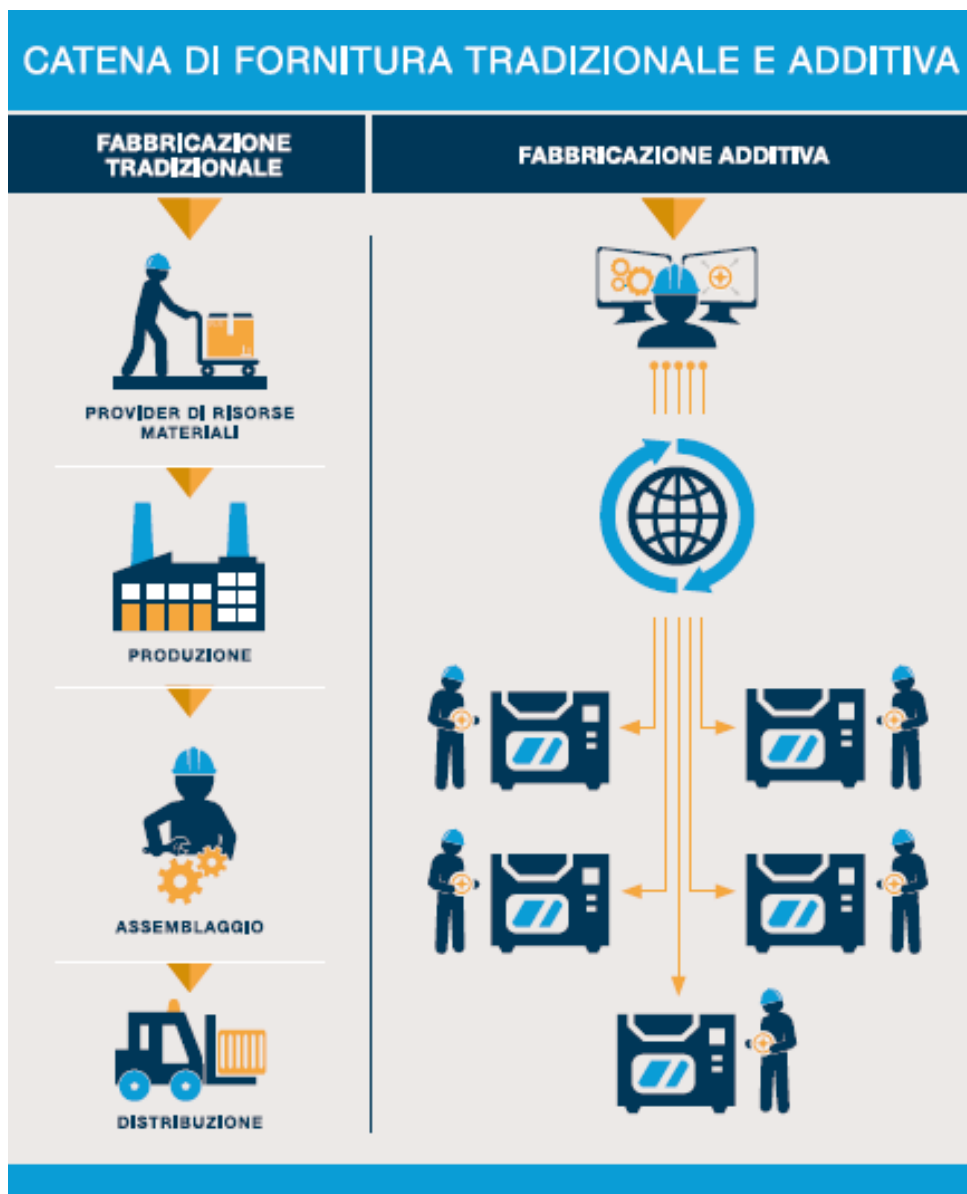


Figura 2.17-La figura sottolinea la differenza della supply chain nelle due metodologie di produzione

La produzione additiva ha inoltre come vantaggio non trascurabile quello di permettere alle aziende di ridurre l'ingombro dato dagli strumenti di attrezzaggio: invece di conservare strumenti fisici è infatti ora possibile archiviare sui server un inventario digitale di strumenti per poterlo successivamente fornire alle fabbriche per la stampa non appena gli stessi si rendano necessari. Tale metodologia può ridurre enormemente i tempi di lavorazione e spedizione: la manifattura decentralizzata è un enorme vantaggio per le compagnie che operano in località remote, ad esempio quelle petrolifere, in quanto questa metodologia di produzione consente di fornire pezzi di ricambio molto più rapidamente di quello che potrebbe realizzare la manifattura centralizzata.

Parlando di riduzione degli sprechi, possiamo anche sottolineare come l'Additive Manufacturing sia caratterizzato per definizione da un consumo minore di materiale rispetto alle lavorazioni tradizionali, dove si produce una grande quantità di materiale in eccesso che poi viene semplicemente scartato. Nella stampa 3D invece non si verifica nessuna delle due cose: durante la lavorazione la quantità di materiale superfluo generata è irrisoria, e nel caso delle lavorazioni a Powder Bed Fusion ogni particella di polvere che non viene coinvolta nella fusione è raccolta e trattata per essere utilizzata in un altro processo, riducendo di fatto gli sprechi ad un valore molto vicino allo zero. Le uniche istanze in cui abbiamo una produzione considerevole di materiale di scarto si hanno quando vengono realizzate le strutture di sostegno, da rimuovere una volta terminata la stampa; in ogni caso, parliamo comunque di masse decisamente inferiori rispetto a quelle che possono essere coinvolte nelle lavorazioni per sottrazione. Gli sprechi vengono ridotti grazie anche all'utilizzo delle tecniche AM per riparare parti danneggiate, dando loro nuova vita ed alimentando una "green economy" basata sulla ri-manifattura.

Infine, l'Additive Manufacturing consente di abbattere le barriere tra imprenditoria e sviluppo dei prodotti: usando le tecnologie di stampa 3D, le imprese sono in grado di realizzare prototipi e prodotti finali utilizzando lo stesso singolo macchinario, invece di investire in un intero set-up per una fabbrica. Addirittura, grazie al recente sviluppo di servizi di hosting di stampa che consentono ai possessori dei macchinari di "affittarli", piccole compagnie sono state in grado di sfruttare i vantaggi dell'AM senza dover sostenere un ingente investimento iniziale.

Viene quindi da chiedersi quale ambito dello sviluppo di un prodotto tragga maggior vantaggio dalle qualità appena descritte, se la fase di prototipazione o quella di produzione.

Sebbene l'Additive Manufacturing, come suggerisce il nome stesso, possa essere impiegato efficacemente ed in sostituzione alle lavorazioni tradizionali per realizzare prodotti finiti, pronti per essere venduti e messi in funzione, efficacia dimostrata anche nel prosieguo di questa tesi dove

vengono messi a confronto due metodi di fabbricazione vera e propria per lo stesso oggetto, è nel campo del Rapid Prototyping che le tecniche additive sono state in grado di portare uno sconvolgimento.

Per capire il suo impatto, analizziamo brevemente il ciclo produttivo di un oggetto generico: le prime fasi cui i designer si avvicinano prevedono normalmente l'ideazione di più concept per lo stesso prodotto, varie iterazioni possibili, tutte potenzialmente valide fino alla loro verifica; verifica che, idealmente, dovrebbe avvenire su un oggetto effettivamente realizzato, in modo da poterne esplorare concretamente e approfonditamente i punti di forza e di debolezza, l'appeal estetico e le proprietà che deve dimostrare di possedere quando messo in esercizio.

Tuttavia, questo significherebbe realizzare almeno una copia di ogni concept sviluppato nelle fasi iniziali della progettazione, processo che richiederebbe un ingente investimento di denaro e tempo per essere portato a compimento con le tradizionali tecniche di lavorazione, risorse che ovviamente un'azienda non sarebbe disposta ad investire a cuor leggero per realizzare degli oggetti che poi sarebbero semplicemente scartati. L'iter normalmente seguito, quindi, è quello di eseguire le suddette verifiche ad un livello puramente concettuale, basandosi su disegni o modelli 3D, aiutandosi ove possibile con software di simulazioni virtuali; questa metodologia, pur consentendo un risparmio in termini economici, richiede comunque un dispendio sostanzioso di tempo, oltre ad essere caratterizzata da evidenti limiti: nel caso delle citate simulazioni FEM, ad esempio, pur raggiungendo un elevato livello di accuratezza, non si potrà mai arrivare alla concretezza dei risultati delle prove eseguite su un modello fisico.

A questo punto della lettura sarà chiaro che la quadratura del cerchio giace nelle tecniche additive: i tempi e soprattutto i costi di realizzazione vengono abbattuti nella stampa 3D, che non ha bisogno di macchinari ed utensili diversi per creare un prodotto (semi)finito; la semplicità di creazione di un manufatto consente poi una straordinaria libertà di approccio al design, permettendo ad ogni progettista di realizzare fisicamente le proprie idee in qualsiasi momento, passando dal modello 3D visualizzato al computer all'oggetto concreto in una manciata di ore, in maniera completamente automatizzata e con un elevatissimo grado di fedeltà.

Il Rapid Prototyping (così si chiama l'insieme di tecniche basate sulla tecnologia additive che consente di restituire prototipi funzionali in maniera efficiente dal punto di vista dei tempi e dei costi) si dimostra quindi praticamente indispensabile al giorno d'oggi per qualsiasi azienda che voglia risultare competitiva, in quanto garantisce ai designer la possibilità di esplorare e valutare concept molto più rapidamente e comodamente, in modo da permettere ai team di sviluppo di oltrepassare la

mera visualizzazione di un prodotto e facilitando la comprensione delle proprietà e del design concreto del prodotto stesso. Diventa quindi possibile un approccio completamente diverso alla progettazione, più flessibile, dove fin dall'inizio si può procedere su binari paralleli, creando e sperimentando vari concept fin da subito, con grande beneficio per la qualità della progettazione e del prodotto finale.

In tutto questo però sarebbe ridicolo ignorare i difetti e le lacune che queste tecnologie, seppur rivoluzionarie, presentano.

Uno dei primi svantaggi che salta all'occhio parlando di Additive Manufacturing è la selettività che lega tecnologie e materiali lavorabili: infatti la maggior parte delle tecniche può processare un numero molto limitato di materiali. Se un'azienda ricevesse l'ordine di realizzare un manufatto in un materiale non compatibile con i macchinari in suo possesso, dovrebbe acquistarne uno specifico o rifiutare l'ordine, mentre invece nel caso delle lavorazioni tradizionali ogni macchinario è virtualmente in grado di lavorare qualsiasi materiale, se dotato dell'utensile adatto.

Inoltre, entra in gioco anche il costo dei materiali lavorati, che nel caso dell'AM ha un peso pari al 30% sul costo totale del prodotto realizzato, mentre nelle tecniche tradizionali, come può essere l'injection molding, oscilla tra lo 0,2% e il 2,7%. Per fare un esempio pratico, secondo alcune analisi il costo di termoplastici e fotopolimeri per stampa 3D può andare dai 175 ai 250 dollari al kg, mentre per materiali analoghi per injection molding si aggira intorno ai 2-3 dollari al kg. Appare evidente come questo sia un grande disincentivo verso l'applicazione delle tecniche additive.

Le lavorazioni basate sulla stampa 3D richiedono poi più tempo rispetto a processi analoghi realizzati con tecniche tradizionali, soprattutto se le parti da realizzare sono di dimensioni considerevoli. Queste lavorazioni lasciano inoltre spesso superfici grezze e "a gradini" che necessitano di lavorazioni successive, costituendo ovviamente un disagio per la catena produttiva.

Infine, non possiamo non citare il fatto che queste tecniche sono ancora molto giovani, soprattutto se confrontate con quelle tradizionali, che sono state concepite già prima della nascita dell'industria moderna e che hanno avuto modo di subire numerosi processi di ottimizzazione. C'è quindi una conoscenza molto più approfondita di queste tecniche, che sono pertanto considerate più affidabili, laddove invece la stampa 3D rappresenta ancora un mondo da esplorare.

Tutto questo fa sì che l'AM venga impiegato, piuttosto che nelle grandi produzioni di massa, nei casi in cui si debbano realizzare lotti di piccole dimensioni, di prodotti diversi e con la possibilità di essere altamente personalizzati.

In questo senso si declinano le macrocategorie in cui possiamo suddividere le applicazioni dell'Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling e Rapid Manufacturing.

Come accennato in precedenza, fornendo uno strumento di prototipazione rapida l'AM consente di accorciare enormemente i tempi di sviluppo di un prodotto: la realizzazione di un modello fisico permette di esplorarne le forme in modo visivo e più concreto, verificandone i difetti e i punti di forza. Grazie alla grande rapidità con cui si riesce a produrre un prototipo in qualsiasi momento della progettazione, la stampa 3D si conferma uno strumento potentissimo per i designer.

Oltre a realizzare prototipi, l'Additive Manufacturing viene incontro alle esigenze delle aziende anche nel campo della strumentazione specializzata per date lavorazioni, offrendo la possibilità non solo di creare matrici che poi con un secondo passaggio realizzeranno l'attrezzatura necessaria per un determinato processo (è il caso questo degli stampi per colata), ma anche di costruire direttamente la suddetta attrezzatura.

Il terzo campo di applicazione di queste tecnologie prevede la realizzazione dell'oggetto finale nella sua completezza, saltando tutti gli eventuali passaggi intermedi che caratterizzano le lavorazioni tradizionali e risparmiando tempo, materiale ed attrezzature.

Risulta quindi chiaro come l'AM abbia visto un'implementazione capillare in tutti i settori più all'avanguardia, che richiedono tecnologie efficienti, rapide e che permettano un elevato grado di customizzazione delle parti realizzate.

Vediamo ora più da vicino quali sono concretamente i campi della scienza e della tecnologia che abbiano tratto maggior giovamento dall'introduzione delle tecniche additive; essendo i polimeri la categoria di materiali più largamente utilizzata in queste applicazioni, con una percentuale trascurabile occupata invece dai metalli, gli esempi presentati in seguito faranno riferimento solo ad essi.

Il settore medicale è sicuramente quello più prolifico di esempi: uno dei più grandi vantaggi portati in questo campo dall'AM è stato la possibilità di studiare preventivamente ad un'operazione la conformazione di organi e strutture interne, in modo tale da avere una comprensione migliore sulla strategia da adottare durante il successivo intervento. Un caso interessante è quello di Schmauss e del suo gruppo di ricerca, che hanno creato un modello fisico di un'aorta per eseguire la pianificazione preventiva di un'operazione piuttosto complessa. Il modello, realizzato in polimero con una stampante 3D ad alta definizione a colori (la Spectrum Z 510, a tecnologia Inkjet), si basava sulle scannerizzazioni tridimensionali ottenute mediante una Tomografia Computerizzata, e come è stato

possibile osservare, una volta stampato, l'organo possedeva un'anatomia imprevedibile, rendendo così un'eventuale operazione "alla cieca" di difficoltà estrema. Un altro esempio della potenza di questa applicazione deriva dal settore dell'otorinolaringoiatria: Berens e il suo team hanno mostrato un metodo semplice e a basso costo per realizzare strutture realistiche della cartilagine in amido e silicone, basate su scannerizzazioni 3D dell'apparato acustico del paziente, utili per simulare le operazioni di ricostruzione della microtia. Queste tecniche si stanno rivelando così efficaci ed indispensabili che la comunità medica del settore cardiovascolare sta richiedendo a gran voce che le simulazioni come quelle appena descritte vengano implementate nel percorso di studio dei giovani medici.



Figura 2.18-Ricostruzione 3D dell'aorta, possiamo notare la forma assolutamente anomala ed impossibile da intuire normalmente

Un'altra grande applicazione emerge nel campo degli scaffold, o sostituti ossei, impalcature sulle quali l'organismo può rigenerare le ossa. Un requisito indispensabile di questo tipo di strutture è che siano biocompatibili e biodegradabili, in modo da non dare problemi di rigetto con l'organismo nel quale sono inserite. Negli ultimi anni ha ricevuto quindi molta attenzione il PCL, un polimero il cui degrado dei legami d'estere avviene in normali condizioni fisiologiche, combinato con la tecnica della stereolitografia: Elomaa e i suoi colleghi, ad esempio, hanno realizzato con la SLA una serie di scaffold a tre braccia mediante una resina a base di PCL; questi scaffold, una volta realizzati, combaciavano perfettamente con i modelli realizzati al computer, non presentando alcun segno di ritiro del materiale.

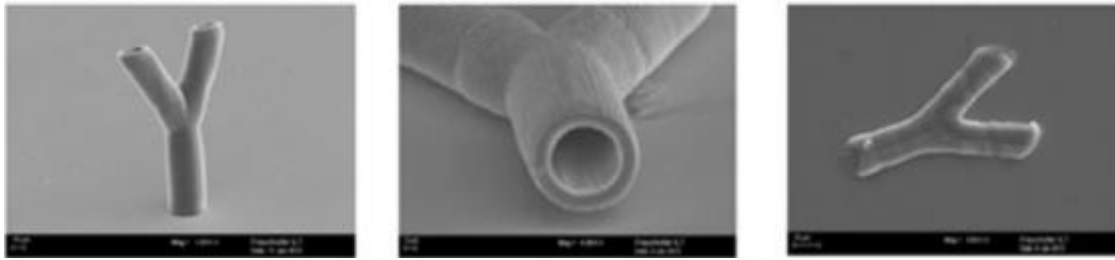


Figura 2.19-Gli scaffold realizzati con la SLA; l'ordine di grandezza è del micrometro

Oltre agli impianti interni inoltre abbiamo ovviamente anche l'intero campo applicativo delle protesi esterne, dove possiamo trovare sia strutture di sostegno sia arti completi realizzati in polimero; i materiali più utilizzati sono l'ABS, dal basso costo ma dalla resistenza all'impatto estremamente elevata, impiegato per i busti ortopedici; l'EVA (etilene vinil acetato), un materiale molto elastico utilizzato come rivestimento di comfort per i pazienti con prese protesiche rigide; il PEEK, un termoplastico semicristallino dalle eccellenti proprietà meccaniche e chimiche di resistenza che vengono mantenute anche alle alte temperature, impiegato come base per vari tipi di protesi.



Figura 2.20-Implanto craniale realizzato in PEEK

Ancora, un risultato ottenuto mediante la combinazione di polimeri e AM è stato quello di permettere ai medici di utilizzare durante le operazioni neurochirurgiche delle guide personalizzate per ogni singolo paziente, come quella mostrata in figura. Sfruttando le proprietà della Poliammide 12 e la flessibilità di design delle tecniche additive è possibile realizzare attrezzature come quella riportata in figura, in grado di assistere efficacemente i chirurghi durante operazioni molto complesse.



Figura 2.21-Guida chirurgica customizzata realizzata in PA12

Allontanandoci dal mondo medico, vediamo che la coppia AM-polimeri trova applicazioni anche in campo ottico, dove sono richieste caratteristiche specifiche e materiali altamente performanti. Un esempio è costituito dal risultato conseguito da Ishihara ed il suo gruppo di ricerca, che mediante la tecnica denominata Two-Photon Polymerization (o 2PP in breve), appartenente alla categoria della fotopolimerizzazione, sono riusciti a creare un waveguide, un dispositivo per la trasmissione di onde con una perdita di energia minima, in acrilati di calixarene sopra una struttura in PDMS. Le immagini seguenti ci restituiscono un'idea dell'ordine di grandezza dell'oggetto realizzato, dimostrando l'impressionante precisione e potenziale di queste tecniche.

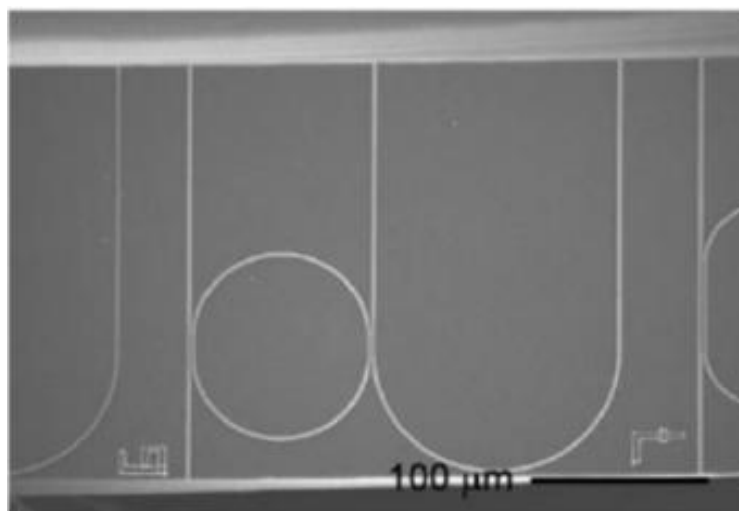


Figura 2.22-Dettaglio del waveguide

L'automotive è un altro settore dove le tecniche additive hanno trovato largo impiego, aprendo le porte a design più robusti, con parti più leggere, resistenti e sicure, realizzate in tempi più rapidi e a costi inferiori di quanto si verificava con le tecniche tradizionali. Per dare un'idea dell'impatto che l'AM ha avuto sul settore automobilistico, nel 2015 il rapporto annuale di Wohlers, un'autorità dell'informazione in campo additive, ha stimato che l'industria dell'automobile ha rappresentato il 16.1% dell'intera spesa del settore dell'Additive Manufacturing.

Questo perché l'AM rispetta numerosi requisiti del settore della manifattura automobilistica: è in grado di realizzare parti finite sfruttando molti dei materiali a bassissimo peso comunemente impiegati in questo ambito industriale, consentendo di abbassare il peso complessivo dei veicoli e risultando quindi in un incremento delle prestazioni e una riduzione dei consumi; diviene poi possibile realizzare parti con geometrie estremamente complesse, per pezzi che richiedono canali interni di raffreddamento, pareti sottili o complesse superfici curve altrimenti irrealizzabili con le tecniche tradizionali; questa libertà di design consente anche di integrare più componenti in uno, permettendo un efficace consolidamento delle parti, che si traduce in un minor spreco di materiale, riduzione del peso e semplificazione della manutenzione; l'Additive Manufacturing è inoltre in grado di lavorare un grande numero di materiali con elevata Heat Deflection Temperature, ovvero la temperatura cui uno specifico materiale polimerico si deforma se sottoposto ad un certo carico, ben superiore a quella raggiunta nei vani motore.

Nella seguente tabella sono riassunti alcuni esempi di parti realizzate in AM, con relativa tecnologia di manifattura e materiale associati.

Applicazione	Processo	Materiale	Caratteristica	Esempio
Sotto il cofano	SLS	PA (Nylon)	Parti funzionali resistenti al calore	Copri batterie
Accessori d'interno	SLA	Resine	Componenti cosmetici personalizzati	Prototipo di cruscotto
Condotti dell'aria	SLS	PA (Nylon)	Condotti e soffiotti flessibili	Condotti dell'aria condizionata

Pannelli a dimensioni reali	SLA Industriale	Resine	Ampie parti con una finitura superficiale comparabile allo stampaggio ad iniezione che permette sabbiatura e verniciatura	Paraurti frontale
Lunette	Material Jetting	Fotopolimeri	Lunette personalizzate pronte per l'uso	Interfaccia della dashboard
Luci	SLA	Resine	Modelli altamente dettagliati e completamente trasparenti	Prototipi per i fari

Infine, un settore che ha sicuramente visto nella stampa 3D uno strumento potente da poter utilizzare appieno è quello dell'artigianato casalingo e del fai-da-te: una community di persone che desidera realizzare oggetti personali e personalizzati, aggiustarne altri non più apparentemente utili e in generale dare sfogo a tutte quelle idee di manufatti che con le normali lavorazioni richiederebbero conoscenze specializzate, attrezzature dedicate e una notevole quantità di tempo. Venendo meno queste problematiche grazie all'utilizzo delle stampanti 3D, reperibili sul mercato anche a prezzi modici, i "makers" si sono ritrovati tra le mani lo strumento dei propri sogni, con cui ora possono finalmente creare, condividere su internet e mettere in vendita in maniera completamente autonoma le proprie opere.

Il seguente grafico mostra un riassunto generale di quelli che sono i campi in cui manufatti in polimero realizzati con tecniche di AM trovano maggiore applicazione.

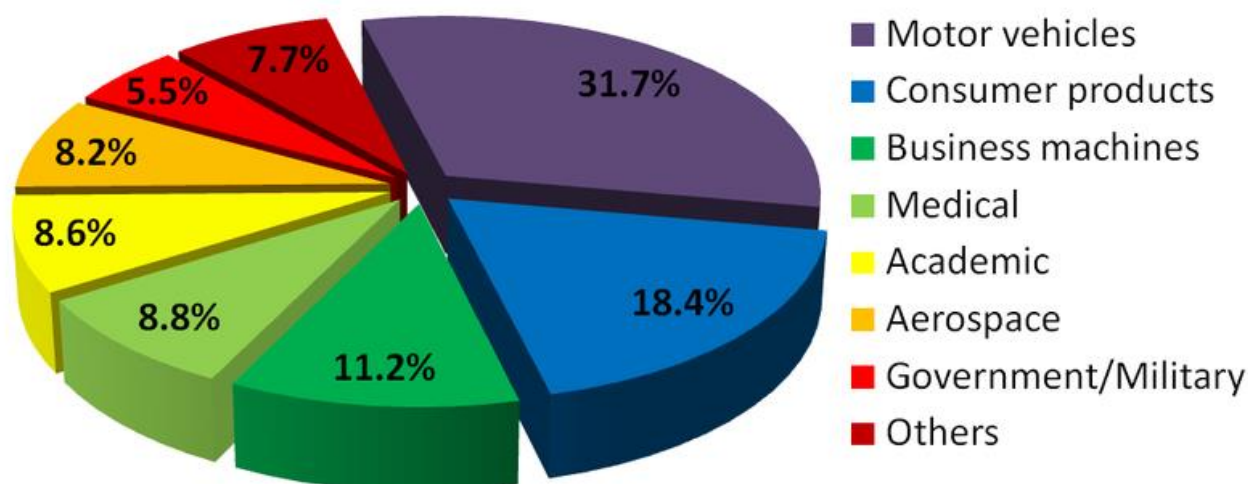


Figura 2.23-Il grafico dimostra la grande versatilità dell'Additive Manufacturing

Si potrebbe proseguire l'elenco con ulteriori dimostrazioni del vastissimo campo di applicazione che le tecniche additive hanno trovato fin dalla loro nascita, ma è ormai chiaro quale sia il concetto che questo discorso vuole veicolare: seppur caratterizzato da limitazioni tecnologiche e pur essendo più giovane ed "acerbo" delle tecniche di lavorazione utilizzate dall'uomo da centinaia di anni ed ormai padroneggiate, appare evidente che l'Additive Manufacturing porta con sé un potenziale immenso, che ha già cominciato a mostrarsi in numerosi contesti e che ne favorirà uno sviluppo ancora maggiore negli anni a venire.

e. Strategie di design per l'AM

Ma come si traduce tutto quello che abbiamo detto finora in informazioni e linee guida precise cui far riferimento durante il processo di modellazione e ottimizzazione di un prodotto da realizzare in ottica additive? La questione in realtà è più complicata di quel che si potrebbe pensare.

Come viene sottolineato da Pereira, Kennedy e Potgieter nel loro articolo “A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job”, il settore industriale mostra scetticismo nei confronti della maggior parte delle tecniche di AM per la loro mancanza di linee guida in relazione al design: proprio grazie alla capacità di realizzare forme di una complessità irraggiungibile dalle lavorazioni tradizionali, le tecniche additive non vedono la necessità di seguire i classici principi del Design For Manufacturing and Assembly, ma piuttosto si basano sulla loro serie di normative di design, che vanno sotto il nome di Design For Additive Manufacturing. Tuttavia, la standardizzazione e l'istituzione dei principi del DFAM è ancora in corso, e richiede ulteriore lavoro (questo ha senso se ricordiamo che le tecnologie additive sono relativamente giovani e il loro utilizzo non è ancora diffuso come le lavorazioni tradizionali); in più, questa assenza di regolamentazioni ufficiali cui far riferimento ha rallentato non poco lo sviluppo delle strategie di Controllo Qualità.

Questo non significa che non siano stati compiuti sforzi in questo senso: nella loro pubblicazione “Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing”, Klahn, Leutenecker e Meboldt sottolineano come ogni oggetto possa potenzialmente sfruttare i vantaggi offerti dall'Additive Manufacturing secondo due strategie diverse di design. La prima, definita Manufacturing driven design strategy, prevede che l'AM venga implementato nello sviluppo di un prodotto solo come tecnica di manifattura, sfruttandone i benefici economici nella realizzazione di parti complesse e in piccole quantità: l'esempio portato è quello delle corone dentali, la cui forma non è stata alterata nel passaggio dalle tecniche tradizionali a quelle additive, e per le quali l'AM è semplicemente un metodo per realizzare oggetti altamente personalizzati a costi molto bassi. Per Function driven design strategy invece si intende un approccio alla progettazione che sfrutta i benefici dell'Additive Manufacturing per migliorare le funzionalità del prodotto, che alla fine del processo di design sarà probabilmente caratterizzato da strutture interne complesse e/o giunzioni integrate, altrimenti impossibili da realizzare. Nell'esempio mostrato in figura vediamo un apparecchio medico, un riflettore ad onde d'urto, la cui forma e struttura è stata ripensata per sfruttare la libertà di design della stampa 3D durante la realizzazione, ottenendo come risultato di migliorarne la maneggevolezza, l'assemblaggio e la generazione di onde d'urto.

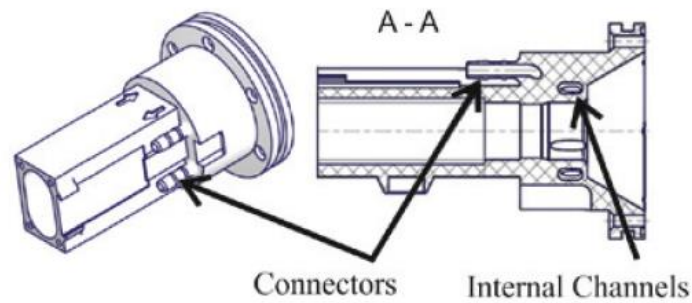


Figura 2.24-Vista laterale e prospettica del componente riprogettato

Nel passaggio da un approccio all'altro possiamo identificare la differenza tra il semplice studio di fabbricazione, che valuta l'efficacia di un processo se inserito nella catena di realizzazione di un prodotto, e la riprogettazione vera e propria, che invece si basa su un redesign atto a trarre vantaggio dal processo produttivo utilizzato.

Pertanto, tornando alla domanda posta all'inizio del paragrafo, come viene influenzata la progettazione quando decidiamo di realizzare un oggetto con tecniche additive? Quali sono le "regole" da seguire per ottenere il risultato migliore possibile?

Come già detto, non esiste un vademecum ufficiale e rigoroso, una ricetta perfetta che assicuri il successo, tuttavia ci sono sicuramente alcuni elementi su cui sappiamo per certo che un approccio additive può e deve agire.

Uno degli aspetti principali è sicuramente la possibilità di eliminare i sottosquadri, prevedendo in fase di progettazione degli smussi al posto di quelli che sarebbero stati angoli interni. Questo è importante non solo per evitare punti di concentrazione delle tensioni, ma anche per impedire che eventuale materiale di lavorazione residuo rimanga intrappolato e venga di fatto sprecato; questa soluzione, nel caso di oggetti chiusi, è attuabile esclusivamente con l'AM.

Legato a questo è il concetto del consolidamento delle parti, che prevede l'unione di più componenti in un prodotto solo: dove prima era necessario scomporre un oggetto in più parti, in modo tale da poter lavorare comodamente ed efficacemente ognuna di esse, ora questo limite cade e la stampa 3D consente di realizzare un oggetto unico con la complessità esterna o interna desiderata (pensiamo alla possibilità di costruire senza problemi delle strutture interne in un prodotto chiuso). In questo modo non solo viene ridotto il tempo di design, ma viene parallelamente anche aumentata la resistenza del materiale e diminuita la sollecitazione a fatica dei componenti. Nella maggior parte dei casi, il consolidamento delle parti porta un beneficio a 360° al prodotto.

Un altro cambiamento che è possibile e consigliato apportare alla struttura del prodotto è l'inserimento di reticoli: nella realizzazione di un prodotto viene sprecata una notevole quantità di materiale, non (solo) per via degli scarti, ma soprattutto per il bisogno fisiologico di prevedere la presenza di materiale anche dove non fosse strettamente necessario a fini strutturali. Questo limite viene superato con l'inserimento nell'oggetto di strutture reticolari, che consentono di mantenere solo il materiale che serve solo nei punti in cui serve, permettendo un grande risparmio economico e di peso, senza per questo compromettere il funzionamento del pezzo. Anche se sarebbe tecnicamente possibile realizzare questa soluzione anche con le tecniche tradizionali, ciò richiederebbe una grande quantità di lavoro di progettazione e delle macchine utensili molto accurate e costose; inoltre, solo l'Additive Manufacturing è in grado di inserire questi reticoli all'interno delle pareti di un oggetto, nascondendoli quindi alla vista.



Figura 2.25-Esempio di una struttura reticolare realizzata con una stampante 3D

Nel ricorrere a questo espediente bisogna però prestare particolare attenzione, dobbiamo infatti essere sicuri delle zone in cui il materiale sia in eccesso, altrimenti andremmo a rimuovere massa che svolge un'importante funzione nel sostegno dei carichi, ritrovandoci così con un oggetto semplicemente non funzionante. Vengono in nostro aiuto gli stessi software da cui nasce la modellazione 3D: esistono infatti tools che consentono di effettuare quella che viene definita Topology Optimization, ovvero uno studio (compiuto autonomamente dal calcolatore) che in base ai carichi e ai vincoli imposti dal

progettista esamina la struttura dell'oggetto realizzato al CAD e la ottimizza, concentrando il materiale nelle zone di sollecitazione maggiore e rimuovendolo ove non sia necessario.

Ma perché fermarsi qui? Perché utilizzare questi potenti software solo per valutare opzioni già esistenti, e non invece sfrutarli per generare nuovi design, che un progettista da solo non potrebbe concepire? E' questa la domanda alla base del Generative Design, un processo di progettazione basato su algoritmi di intelligenza artificiale: il progettista si occupa di fornire al software i vincoli, gli obiettivi del design e le specifiche su materiali, costi e carichi; dopo di che, il computer utilizza i suoi algoritmi per sviluppare centinaia e centinaia di possibili soluzioni al problema, che vengono sottoposte a simulazioni per verificarne l'efficacia; i risultati vengono poi mostrati al progettista, che valuta le opzioni fornite dal software e le modifica a suo piacimento; il programma si rimette a lavoro con i nuovi dati, e questo si ripete finché necessario, in uno sforzo combinato da parte sia del progettista umano che del programma, unendo le migliori caratteristiche dei due mondi per sviluppare il miglior prodotto possibile nel minor tempo possibile.

Sono queste dunque alcune delle principali "regole" che possiamo seguire quando andiamo a progettare o riprogettare un oggetto per trarre il massimo vantaggio da una sua realizzazione con tecniche di Additive Manufacturing: eliminazione dei sottosquadri; consolidamento delle parti; inserimento di reticoli; topology optimization; generative design.

Questo conclude il percorso teorico necessario per avere una comprensione del contesto in cui inserisce il tirocinio svolto. Nel capitolo successivo verrà descritta l'attività vera e propria di tirocinio, sottolineando come i principi emersi finora siano stati applicati nella pratica.

3. Case Study

a. Descrizione del manufatto e degli obiettivi dello studio

Entriamo ora nel dettaglio dell'attività svolta durante il tirocinio per evidenziare come quanto descritto finora si applichi ad un caso pratico.

L'oggetto studiato e rielaborato è un componente industriale utilizzato nella catena di produzione di assorbenti igienici, un movimentatore a depressione il cui scopo è quello di accoppiarsi con i prodotti da spostare senza afferrarli o "pinzarli". Esso è basato sul principio del piano aspirante, ed è dotato di più camere di vuoto differenziato: ciò significa che in camere diverse si ha la possibilità di generare depressioni diverse, che si traducono in forze di accoppiamento diverse sulla superficie del prodotto da spostare.

Questo movimentatore, una volta posto in funzione, è montato all'estremità di ruote di grande diametro rotanti ad alta velocità. È quindi evidente come la massa di questo oggetto rivesta un ruolo fondamentale nella determinazione di tempi e costi: una massa maggiore richiede un'energia maggiore per essere movimentata, e su macchine che muovono migliaia di pezzi/ora ogni grammo può fare la differenza.

Come è stato mostrato brevemente all'inizio di questa tesi, il movimentatore è in realtà composto da due parti, realizzate entrambe in polimero per sottrazione dal pieno: la prima, che vediamo nella figura sottostante e che indicheremo come la "copertura" del movimentatore, è sicuramente quella più peculiare, determinando non solo la disposizione e la dimensione delle diverse camere di depressione, ma anche in che modo e in che punti questa depressione raggiunge poi l'assorbente igienico.

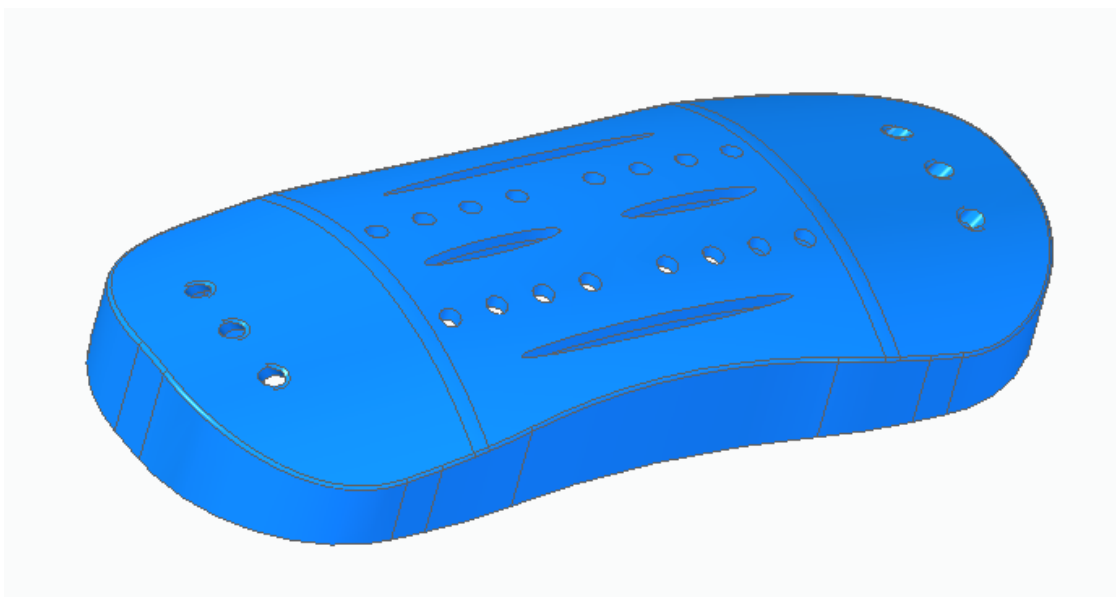


Figura 3.1-La parte superiore della "copertura", dove vediamo i fori che si interfacciano con l'assorbente igienico

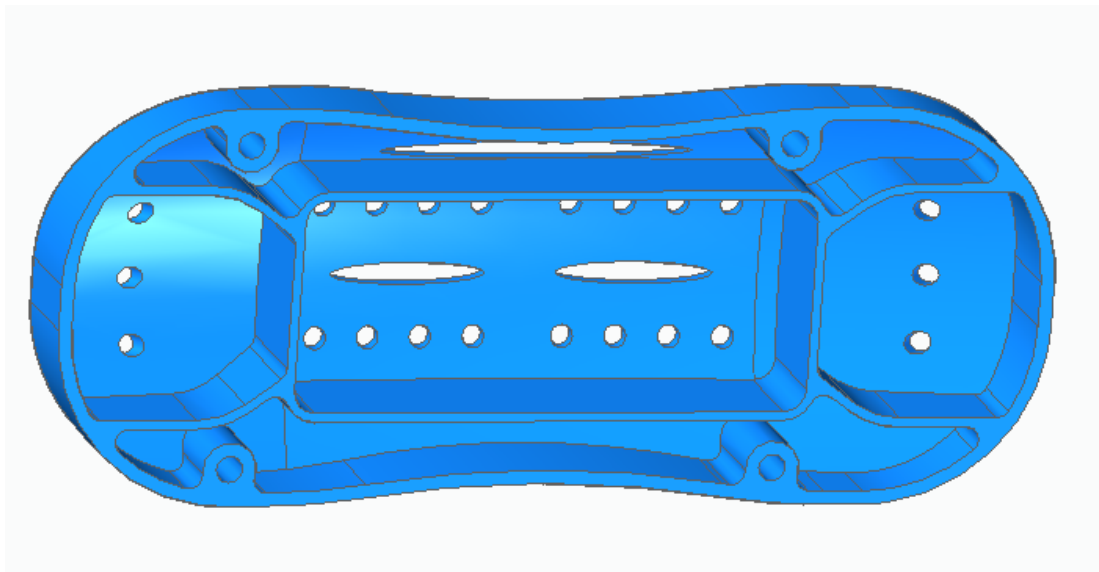


Figura 3.2-La parte inferiore della “copertura”, dalla quale si evince la suddivisione in camere di depressione

Il secondo componente, la “soletta” gialla, serve da chiusura per la parte inferiore del movimentatore, in modo tale che si possa efficacemente realizzare una depressione: questa parte si rende necessaria in quanto il primo componente deve poter essere lavorato all’interno della superficie inferiore in modo tale da realizzare le pareti per le camere; se il movimentatore fosse stato prodotto in un pezzo unico ciò non sarebbe stato, ovviamente, possibile. In questo componente notiamo inoltre un particolare importante, ovvero i 5 raccordi filettati di aspirazione: questi si andranno ad accoppiare con dei condotti posti a diversi livelli di depressione, generandola così anche all’interno delle camere del movimentatore.

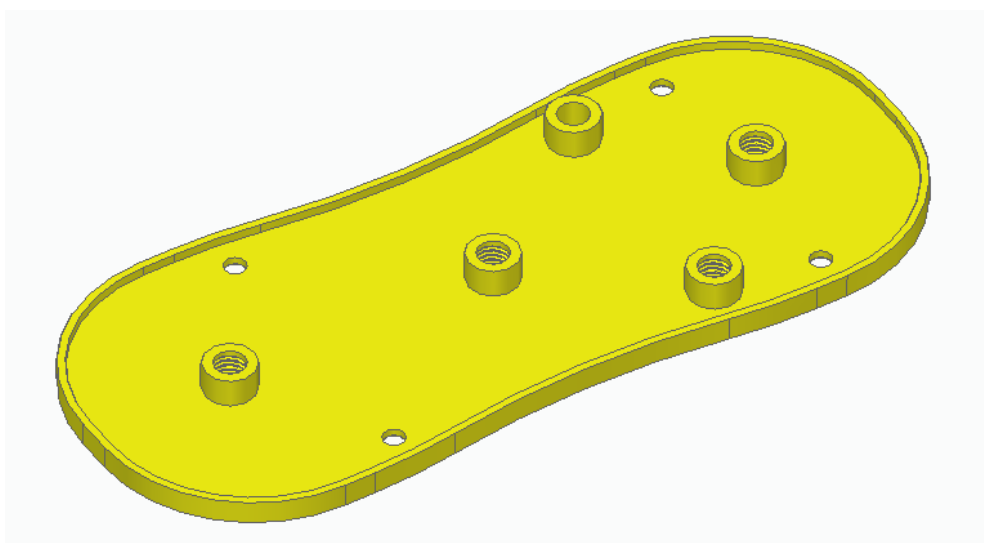


Figura 3.3-La “soletta”, nella quale possiamo notare i fori filettati per accoppiarsi coi canali di depressione e gli alloggiamenti per le viti di collegamento con la “copertura”

Tra questi due componenti andrebbe poi inserita una guarnizione fustellata, che in questa trattazione non viene considerata in quanto irrilevante ai fini dello studio, e infine i due sarebbero fissati insieme con 4 viti filettate. Il prodotto finale che si ottiene è quello riportato in figura.

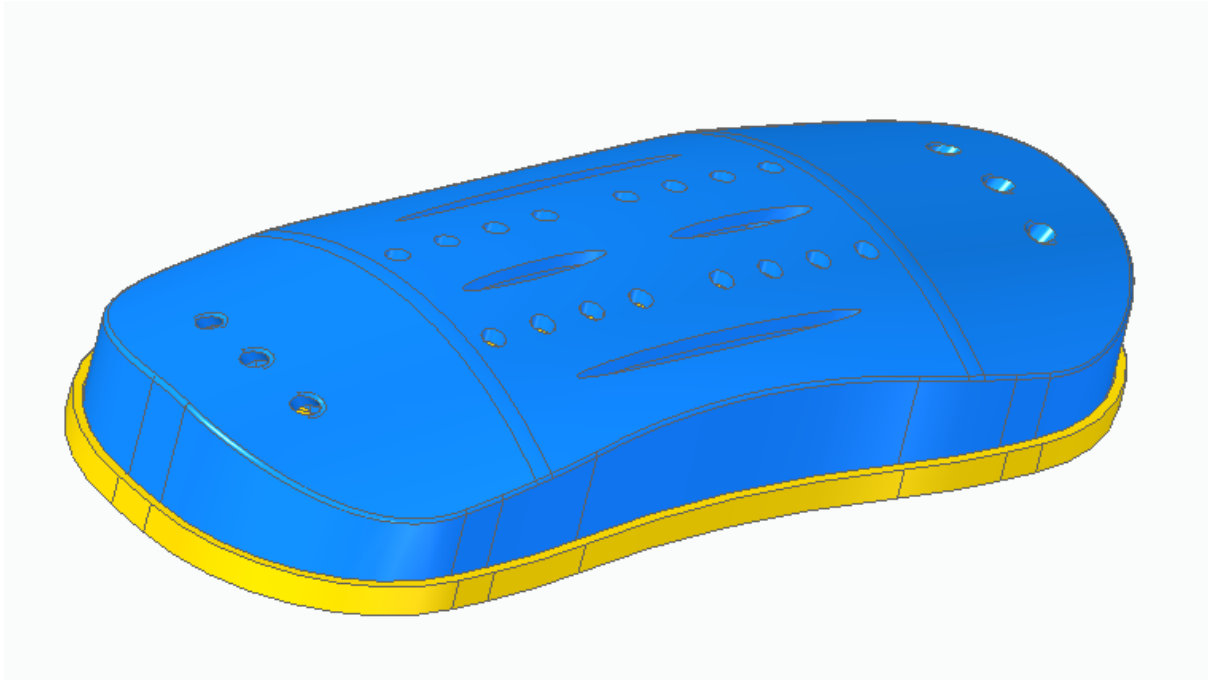


Figura 3.4-Il movimentatore assemblato

Questo è stato dunque il punto di partenza per l'attività di tirocinio; andiamo a definire ora quali sono gli obiettivi, i punti cardine che sono stati tenuti a mente durante il processo che verrà approfondito nei paragrafi successivi.

Lo scopo ultimo del lavoro svolto è stato quello di migliorare l'efficienza produttiva del manufatto mediante una sua realizzazione in Additive Manufacturing. Questo fine è stato perseguito mediante il compimento di obiettivi intermedi, che hanno fornito delle linee guida utili per la rielaborazione del movimentatore.

I principi sui quali si è basata l'attività di redesign, in particolare, sono:

- Alleggerire i componenti;
- Sfruttare la libertà di design;
- Eliminare le criticità dell'assemblaggio dei componenti (nel dettaglio, limitazione del design e perdite di vuoto);
- Perseguire una riduzione dei tempi di fornitura rispetto alla lavorazione sottrattiva.

Prima di procedere oltre, va fatta una precisazione: come accennato nel paragrafo introduttivo, il lavoro svolto non ricade all'interno della categoria "riprogettazione" (anche se di massima) fino a

quella che viene definita Fase 4. Fino a quel momento infatti si hanno modifiche molto limitate della geometria di base del prodotto, tanto che la sua funzionalità non viene compromessa. In questa prima parte del processo il prodotto viene “riadattato” per essere realizzato tramite Additive Manufacturing, aderendo quindi alla strategia del Manufacturing driven design strategy; è nella seconda parte che invece il movimentatore viene ripensato da capo, in modo tale che fin dalla progettazione si tenga in considerazione la sua realizzazione con tecniche di stampa 3D e se ne tragga il massimo vantaggio, secondo i principi della Function driven design strategy. Ciò comporta un cambiamento significativo nella forma del prodotto, che pertanto deve subire una verifica della sua effettiva funzionalità.

Chiarito questo aspetto, possiamo proseguire, entrando nel dettaglio delle singole fasi.

b. Fase 1, Riproduzione Invariata

Come prima cosa, è risultato opportuno adoperarsi per riprodurre in maniera quanto più fedele possibile all'originale il prodotto di partenza: ciò è stato fatto non solo per prendere dimestichezza con le forme che poi si sarebbero andate a rielaborare, ma anche per rendersi conto in maniera più diretta di quelle che potevano essere le feature più critiche e importanti del movimentatore, sulle quali poi nelle fasi successive si sarebbe andato ad agire.

Si è supposto che verosimilmente, nel caso in cui si fosse dovuto iniziare il progetto ex novo, l'azienda commissionante avrebbe fornito informazioni circa gli ingombri dei due componenti e le posizioni dei fori di aspirazione: questo è stato il punto di partenza. Utilizzando come riferimento le matematiche dei componenti originali, sono stati ricavati quindi gli sketch di base, che racchiudono i dati sopra citati.

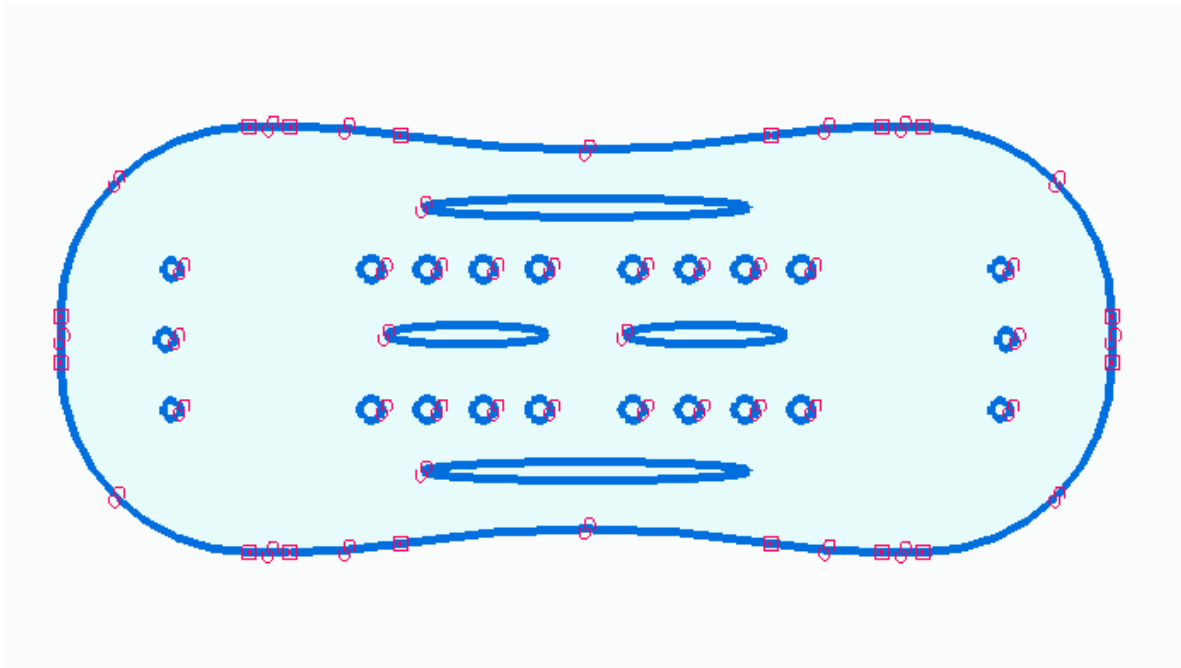


Figura 3.5-Sketch della parte di "copertura"

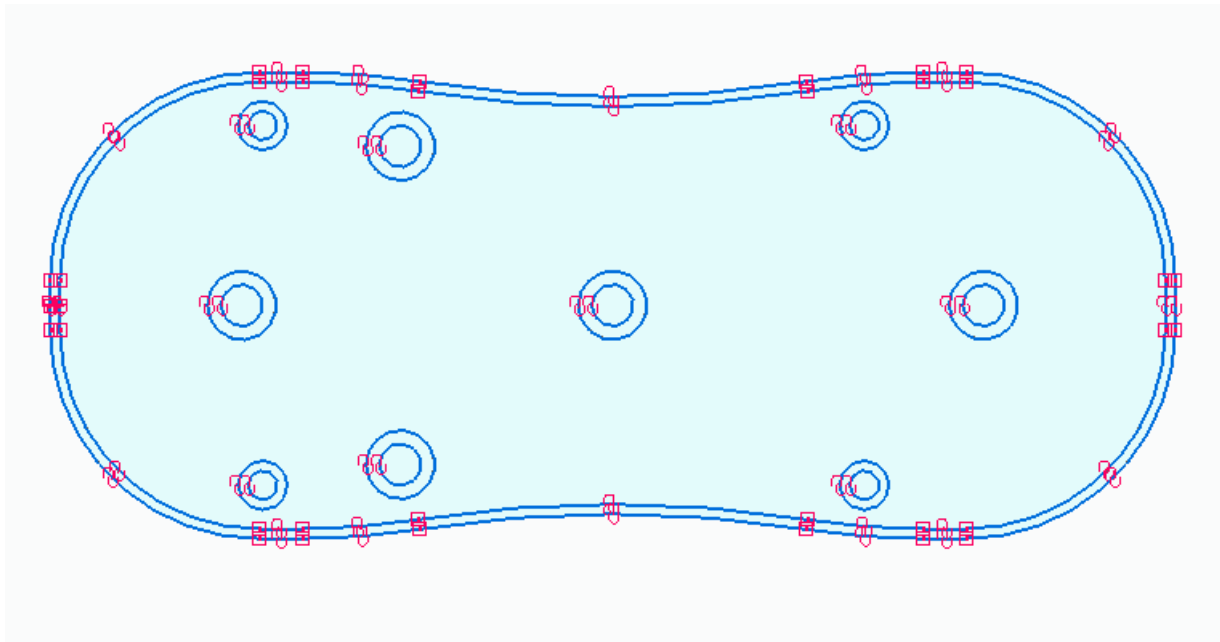


Figura 3.6-Sketch della “soletta”

Avendo a disposizione questi sketch, la realizzazione dei solidi è avvenuta utilizzando le varie funzioni del software SolidEdge, in particolar modo quelle relative alle superfici, con cui sono stati tagliati e modellati i corpi ottenuti grazie al comando “Estrudi”.

Il risultato è, a meno di leggere differenze ininfluenti ai fini dello studio, sostanzialmente analogo per forma a quanto già mostrato, pertanto si è ritenuto sufficiente riportare semplicemente un confronto tra le due “coperture”, essendo l’elemento più caratteristico.

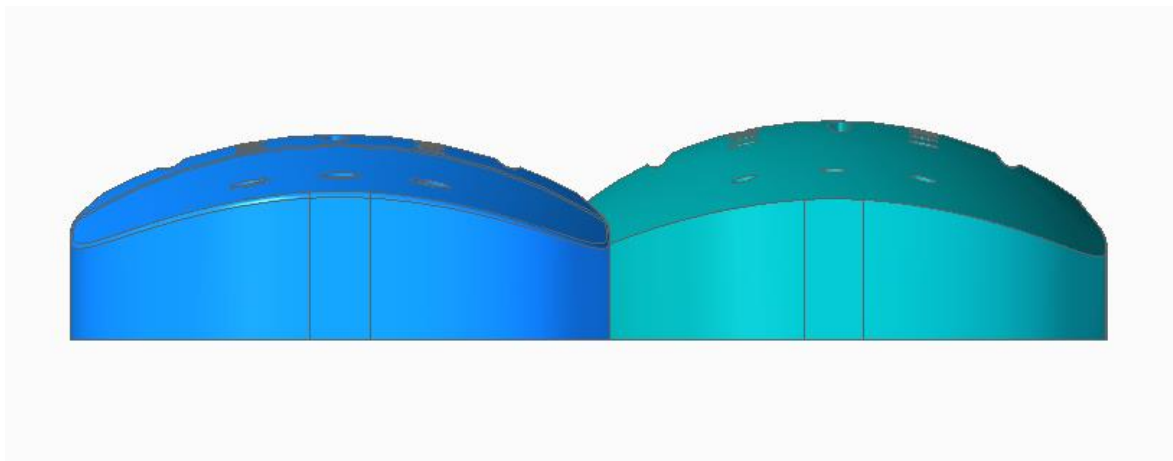


Figura 3.7-Confronto frontale delle due “coperture”

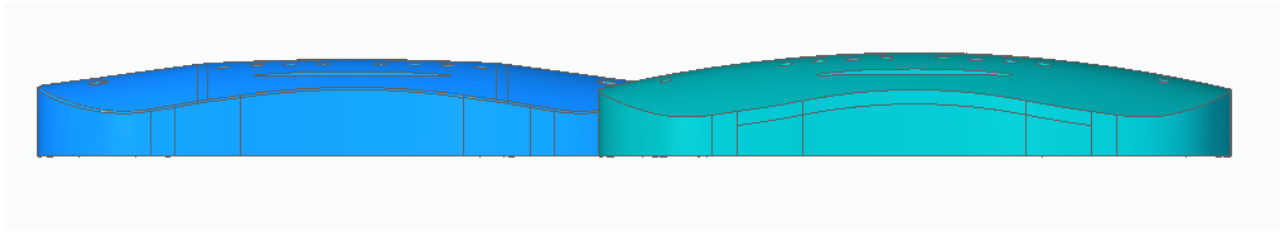


Figura 3.8-Confronto laterale delle due "coperture"

Come si nota, l'unico aspetto in cui i due componenti sono dissimili è una leggera differenza di curvatura della parte superiore, che comunque nelle iterazioni successive si è cercato di correggere.

Ciò su cui invece è interessante puntare l'attenzione sono gli aspetti da rielaborare risaltati durante la realizzazione della copia e le conclusioni che ne sono state tratte.

Il primo aspetto che salta all'occhio sono le pareti interne alla copertura, le quali hanno la funzione di chiudere le varie zone interne del movimentatore, in modo tale da impedire un eventuale passaggio di aria e mantenendo quindi la depressione stabile e a valori eventualmente diversi tra le varie camere. Affinché sia possibile realizzare questi divisori, è necessario che il pezzo, ricavato da un blocco pieno nelle lavorazioni tradizionali, sia realizzato separatamente alla sua controparte, la soletta. Questo ovviamente si traduce in un maggiore dispendio di materiale e di tempo di lavoro, risultando quindi in un aggravio economico.

La necessità di realizzare il pezzo in due parti comporta anche che poi essi vadano successivamente accoppiati, fase intrinsecamente caratterizzata da problematiche: le lavorazioni separate infatti fanno sì che la probabilità che i due componenti abbiano degli ingombri non compatibili e diversi da quelli teorici sia alta. Ciò ha due possibili conseguenze, entrambe non desiderabili: la prima è che si crei interferenza al momento dell'accoppiamento, rendendolo di fatto impossibile o comunque forzato; la seconda è che ci sia gioco, e che quindi la depressione che si viene a creare nelle camere sia a valori inferiori a quelli ottimali richiesti, con una perdita di prestazioni del prodotto.

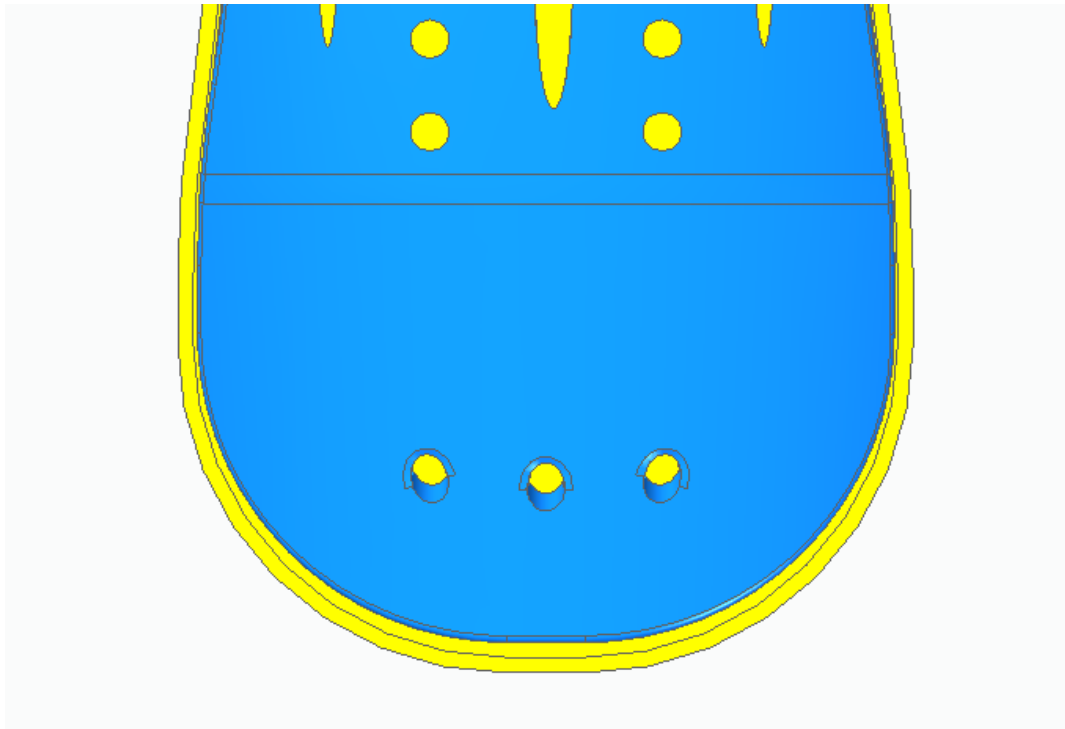


Figura 3.9-Rappresentazione di un accoppiamento con gioco

In ultima istanza, possiamo notare, analizzando ancora una volta l'interno della copertura, che le intersezioni tra le pareti interne e laterali e la superficie superiore sono caratterizzate da sottosquadri, sebbene il termine sia improprio in quanto si riferisce tipicamente a lavorazioni sottrattive (mentre, lo ricordiamo, già da questa prima fase il prodotto è pensato per essere realizzato in AM). Questo è sicuramente un aspetto su cui intervenire in quanto gli spigoli vivi rappresentano degli alloggiamenti in cui si va a depositare il materiale in eccesso durante la lavorazione, rendendone difficile la rimozione. Nel caso dell'AM inoltre questo costituisce un'ulteriore perdita economica in quanto la polvere intrappolata sarebbe sprecata in due sensi, sia perché non strettamente necessaria per la realizzazione del pezzo, sia perché non potrebbe essere riutilizzata per altre lavorazioni.

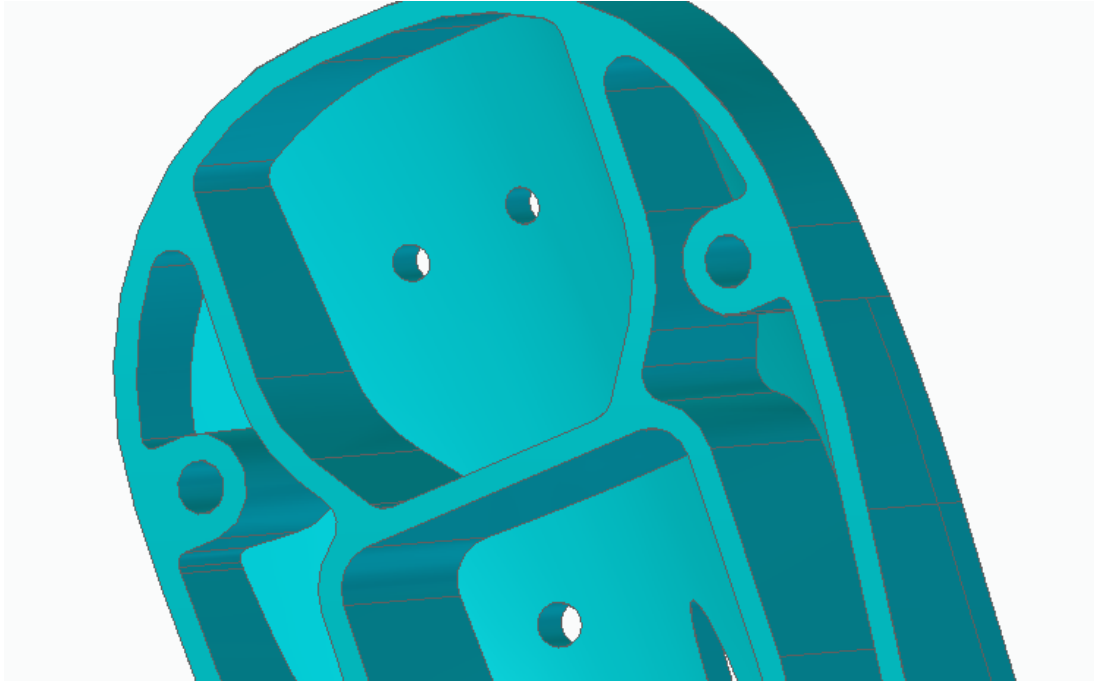


Figura 3.10-Dettaglio dell'interno della copertura, dove vediamo i sottosquadri

Dalla fase successiva si metteranno in pratica i vantaggi derivanti dal ricorso alle tecniche additive per realizzare soluzioni atte a risolvere queste problematiche, oltre che per apportare dei miglioramenti al concept di partenza sfruttando la libertà di design che l'AM consente.

c. Fase 2, Realizzazione di un unico oggetto

Durante lo svolgimento di questo progetto è risultato opportuno decidere di avanzare per step progressivi, senza adottare stravolgimenti dall'uno all'altro ma cercando piuttosto di vedere ogni fase come una naturale evoluzione della precedente, risolvendo specifiche criticità di volta in volta senza bruciare le tappe per ottenere fin da subito un prodotto che si sforzasse di risolvere ogni problema.

Questo spirito è stato ovviamente mantenuto durante l'elaborazione di questa tesi, con il vantaggio non trascurabile di rappresentare ai lettori con maggiore chiarezza (si augura) il processo logico seguito.

Rimane quindi chiaro comprendere come in questa seconda fase l'unico cambiamento apportato alla struttura di partenza sia stata la fusione dei due componenti in uno solo, senza alcuna modifica nella loro forma.



Figura 3.11-Il risultato della Fase 2, costituito semplicemente dall'assemblaggio dei due componenti in un solo oggetto

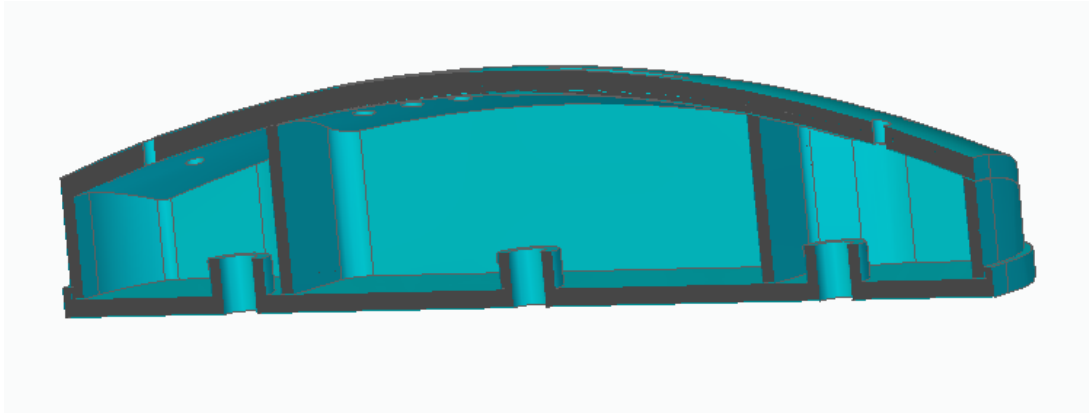


Figura 3.12-Sezione interna dell'oggetto

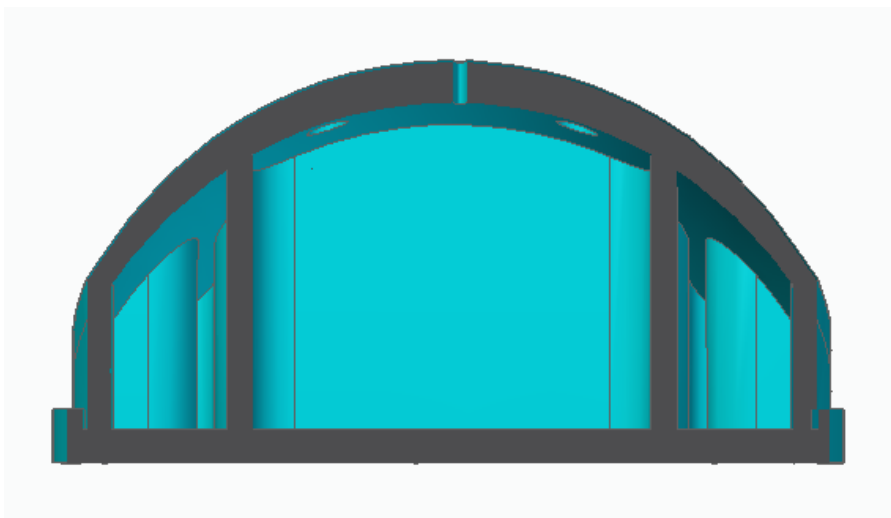


Figura 3.13-Altra sezione interna

Lo scopo che ci si era prefissati di raggiungere in questa tappa del processo era di risolvere le problematiche legate all'accoppiamento: questo è banalmente verificato essendo ora i due componenti un tutt'uno. In questo modo si è inoltre dimostrato come l'Additive Manufacturing consenta una notevole libertà di design, permettendo di concepire e realizzare oggetti chiusi, cavi e addirittura con strutture più o meno complesse al loro interno.

Va comunque notato che l'utilizzo fatto, in questa fase, delle potenzialità additive è di livello molto basso; ciononostante questo step, pur rappresentando un design di "passaggio", è fondamentale per la realizzazione dei prototipi descritti nelle fasi successive, decisamente più articolati e caratterizzati da una componente additive più incisiva.

Senza ulteriori indugi procediamo quindi alla prossima fase.

d. Fase 3, Eliminazione dei sottosquadri e fusione delle geometrie

Se quanto abbiamo visto nella fase precedente era una mera combinazione dei due oggetti di partenza, in questa fase di lavoro si sono adottati dei mutamenti alla struttura del movimentatore tenendo in mente il fatto che sarebbe stato realizzato fin da subito come un unico componente. Pertanto, sebbene non ci sia un cambiamento incisivo nella forma generale, possiamo notare una maggiore omogeneità nelle curve, dalle quali sono assenti gli angoli che invece sporgevano nell'iterazione precedente.



Figura 3.14-Il movimentatore realizzato in un unico pezzo

Il lavoro svolto in questa fase non si è però arrestato qui: come accennato in precedenza, la presenza di sottosquadri all'interno dell'oggetto aumenta notevolmente la probabilità che del materiale residuo dalla lavorazione vi rimanga intrappolato. È quindi questa la criticità che nell'attuale fase dello studio si è cercato di risolvere, prevedendo degli smussamenti per tutti i sottosquadri presenti, ulteriore impresa impossibile per le lavorazioni tradizionali.

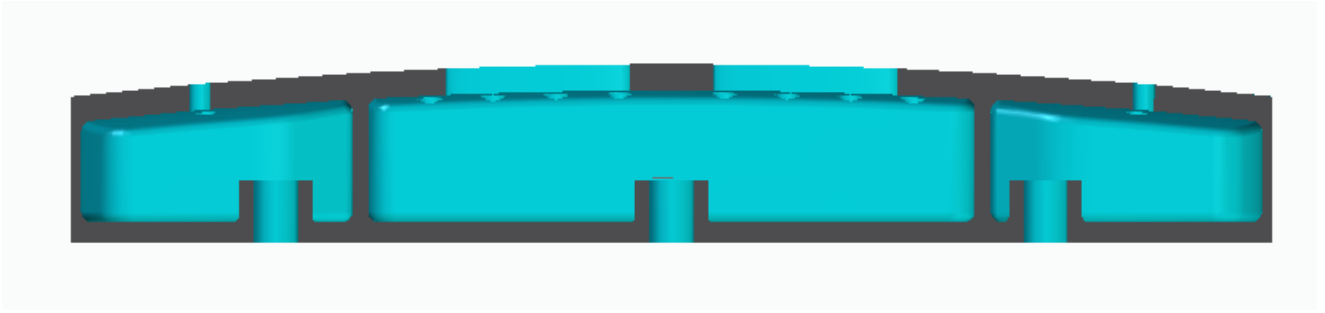


Figura 3.15-L'interno dell'oggetto, dove possiamo vedere come le varie pareti si trasformino dolcemente l'una nell'altra

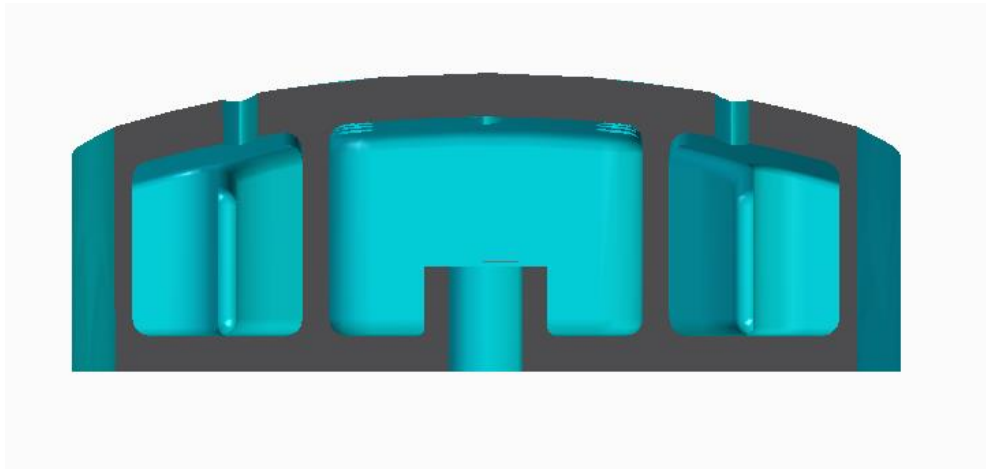


Figura 3.16-Altra vista interna

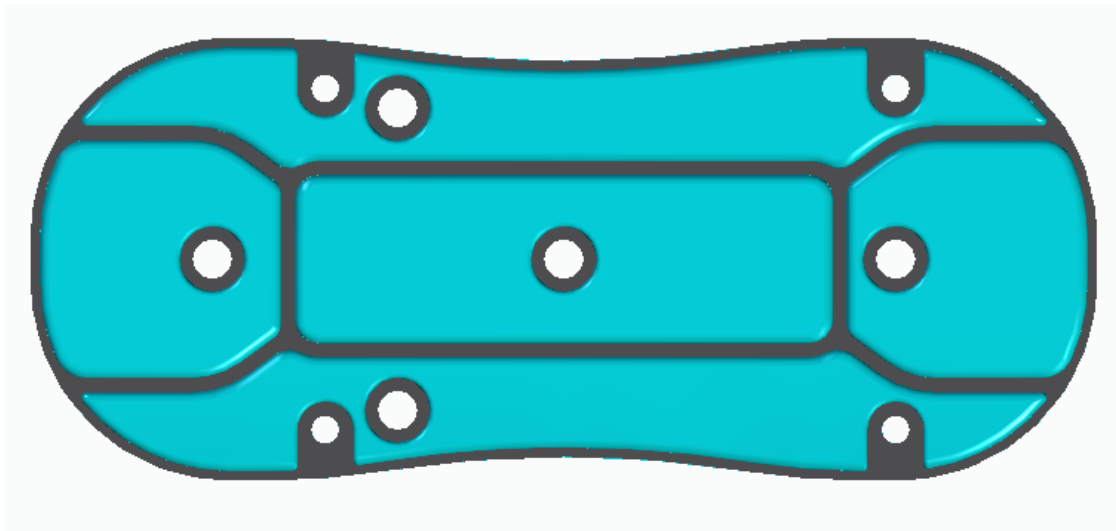


Figura 3.17-Vista interna della parte inferiore

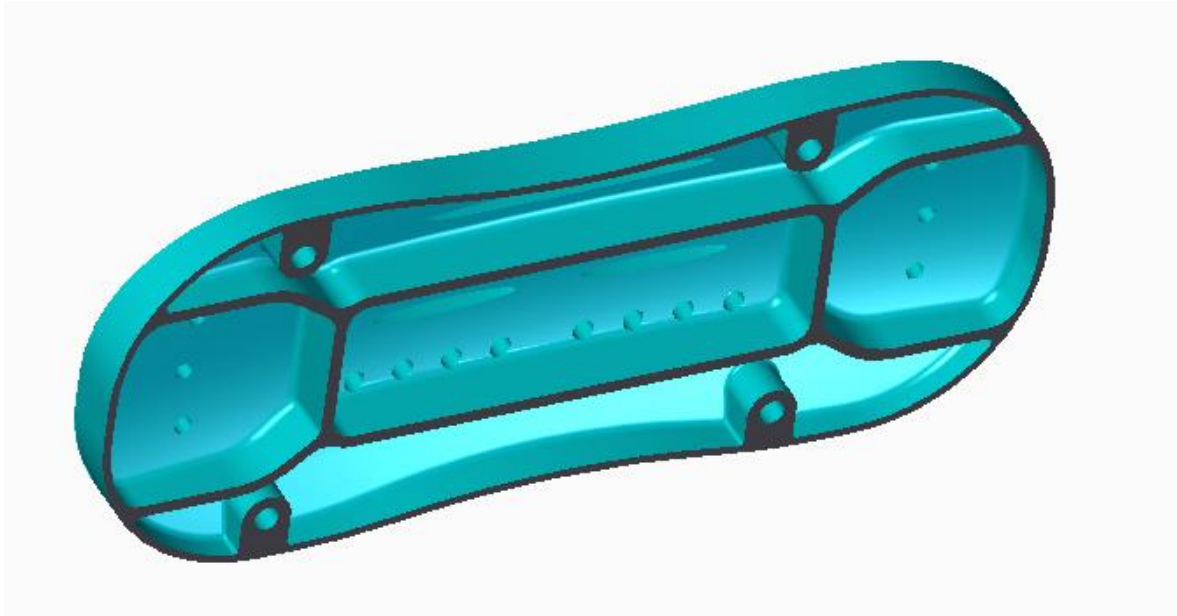


Figura 3.18-Vista interna della parte superiore

Possiamo quindi vedere come già in questa fase ci sia un numero maggiore di cambiamenti rispetto alla struttura di partenza, ognuno basato su un obiettivo da raggiungere e su soluzioni offerte dal ricorso all'Additive Manufacturing.

Nella fase successiva vedremo un'ulteriore evoluzione in questo senso, con scelte di design più radicali e peculiari, cosa che segnerà il passaggio del lavoro a riprogettazione.

e. Fase 4, Introduzione dei canali di aspirazione ed Eliminazione della base

Finora ci si è limitati a risolvere delle problematiche presenti nell'oggetto di partenza mediante i vantaggi forniti dalla tecnologia additive. In questa fase ci si è invece spinti oltre, andando a questionare come l'utilizzo delle tecniche 3D potesse tradursi in un incremento e miglioramento delle funzionalità del movimentatore.

L'oggetto che è stato preso in esame svolge una funzione chiara: mediante la sua forma opportunamente studiata, si occupa di accoppiarsi agli assorbenti igienici che deve trasportare da una zona all'altra della catena di montaggio, non afferrandoli bensì facendoli aderire alla sua superficie mediante una depressione controllata, generata da appositi canali di depressione collegati alle camere interne all'oggetto. Il vuoto che si viene a creare può essere modulato, in modo tale che si possano anche avere zone a depressione diversa sulla superficie del movimentatore.

Poiché, come già detto, la forma del nostro oggetto è già stata ottimizzata per garantire l'accoppiamento più efficiente possibile con ciò che deve movimentare, l'unico altro aspetto funzionale su cui si possa agire è come venga generata depressione all'interno del movimentatore.

È già stato spiegato che nel suo design tradizionale dei canali filettati vengono collegati alle cinque prese locate sulla soletta, disposte in modo tale che ognuna cada all'interno di una delle camere delineate dalle pareti della copertura; una volta che l'oggetto completo è assemblato e messo in funzione, avviene l'aspirazione dell'aria attraverso i canali, e così si genera una depressione più o meno spinta all'interno delle varie camere. È quindi questo l'aspetto che ci si è prefissi di rielaborare e migliorare.

La soluzione più immediata, per realizzare comunque una depressione potenzialmente diversa in cinque punti diversi della superficie del movimentatore e "trasportarla" fino alla sua estremità superiore, dove i fori di varie forme e dimensioni avrebbero trattenuto gli assorbenti, è stata immaginare che, al posto di pareti divisorie, la copertura fosse fornita di canali a sezione variabile nei quali si sarebbero poi innestati i canali filettati per l'aspirazione dell'aria. Questi sarebbero stati un tutt'uno col corpo, garantendo una tenuta stagna sotto ogni condizione sia nella parte inferiore (dove un collegamento filettato renderebbe impossibile il passaggio indesiderato di aria) sia in quella superiore, essendo i canali e la copertura di fatto un corpo solo.

La prima realizzazione di questa idea è mostrata nell'immagine seguente:

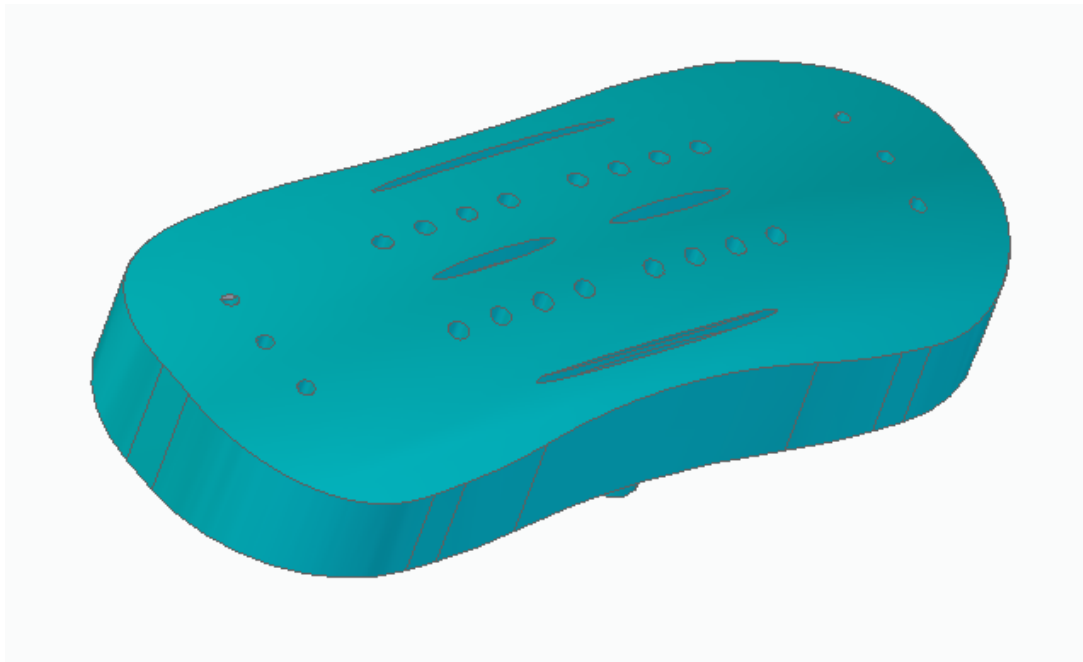


Figura 3.19-La quarta iterazione del movimentatore, dove vediamo che la forma esterna è rimasta pressoché invariata

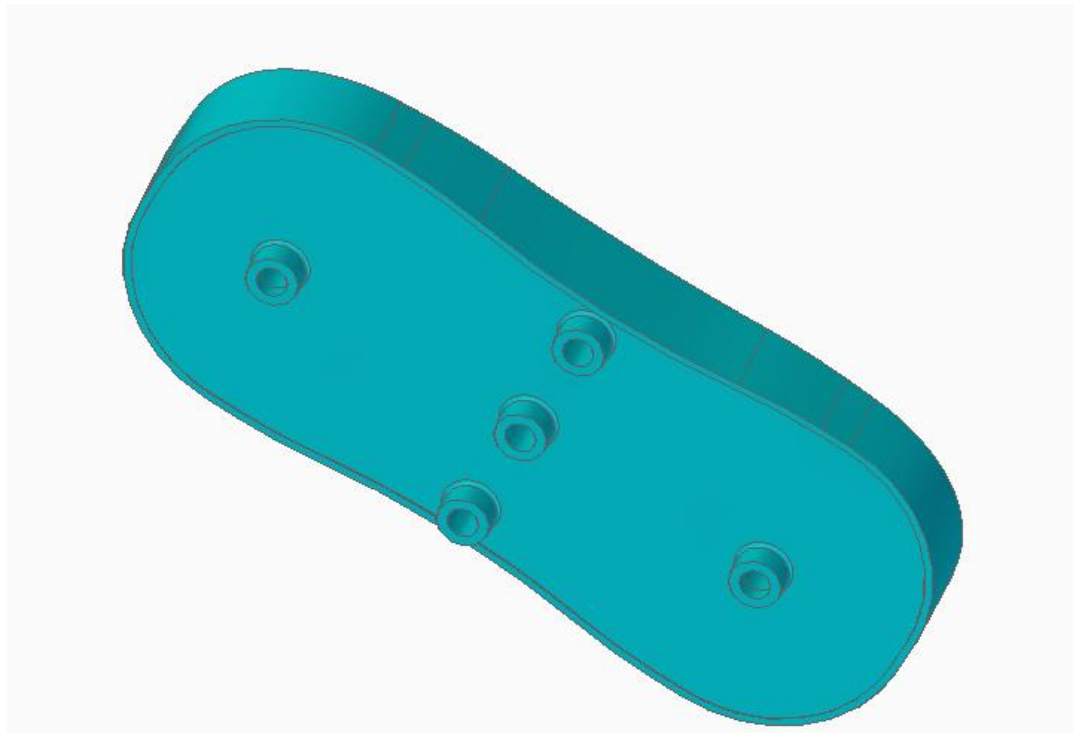


Figura 3.20-Vista da sotto del movimentatore, nella quale notiamo che in questa prima versione le prese per i canali vengono poste all'esterno per non interferire con i canali interni

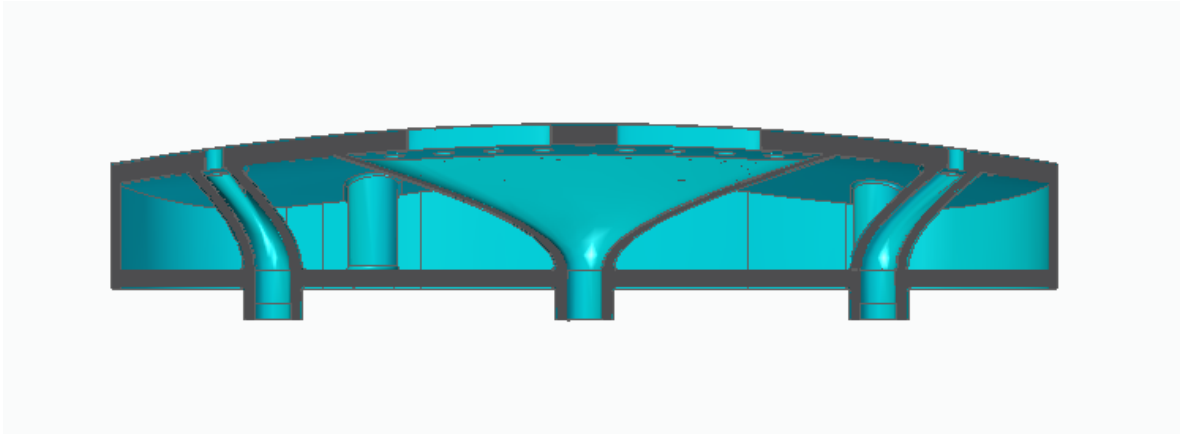


Figura 3.21-Vista interna del movimentatore, dove possiamo vedere i canali introdotti in questa fase

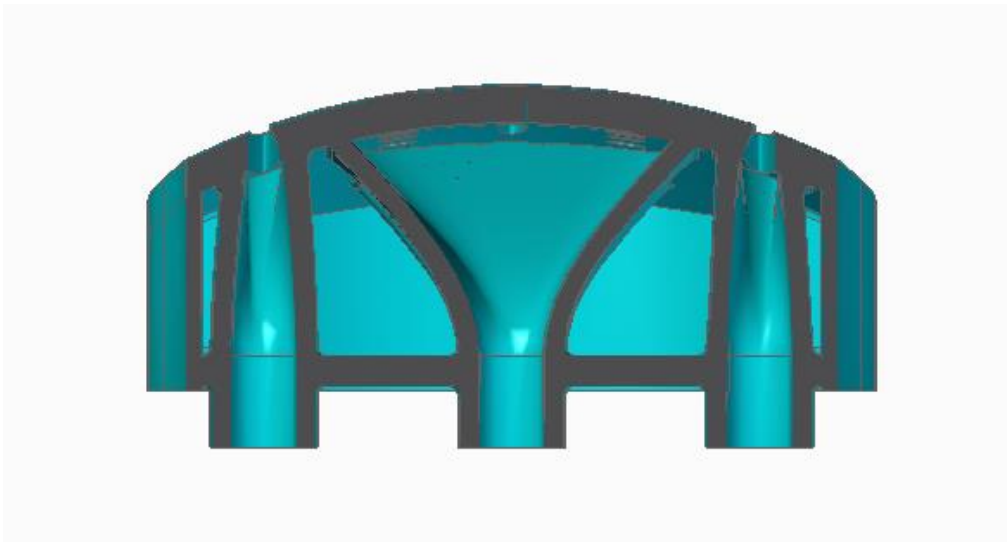


Figura 3.22-Altra vista interna



Figura 3.23-Ulteriore vista interna

Tuttavia, analizzando meglio le immagini appena mostrate, ci si rende conto che la sostituzione delle camere di depressione con i canali di aspirazione porta con sé la possibilità di risolvere un difetto intrinseco delle realizzazioni viste nelle fasi precedenti.

Richiamando alla mente le immagini viste nei paragrafi superati possiamo notare infatti come la presenza della base, di quella parte che in principio era stata chiamata “soletta”, rappresenti un elemento da cui è impossibile prescindere, essendo fondamentale per la chiusura del movimentatore nella parte inferiore e quindi per poter efficacemente riprodurre il vuoto (o una sua frazione) al suo interno. Ma questo implica una problematica già accennata nel corso di questa tesi: essendo l’oggetto non più realizzato in due componenti separati bensì come pezzo unico e chiuso, diventa, se non impossibile, molto complesso e difficoltoso rimuovere dell’eventuale polvere in eccesso che potrebbe rimanere intrappolata durante la lavorazione.

Questo, almeno, fino al raggiungimento di questa fase: infatti qui la soletta è stata sollevata dalla sua funzione principale, in quanto la depressione a tenuta stagna è garantita dai canali di aspirazione, ed è pertanto possibile rimuoverla interamente, ottenendo sia un risparmio di materiale che una risoluzione del problema appena presentato.

Implementando questi cambiamenti, l’oggetto si mostra come segue:



Figura 3.24-Vista da sopra del movimentatore, dove vediamo che ancora una volta la forma esterna è rimasta praticamente inalterata

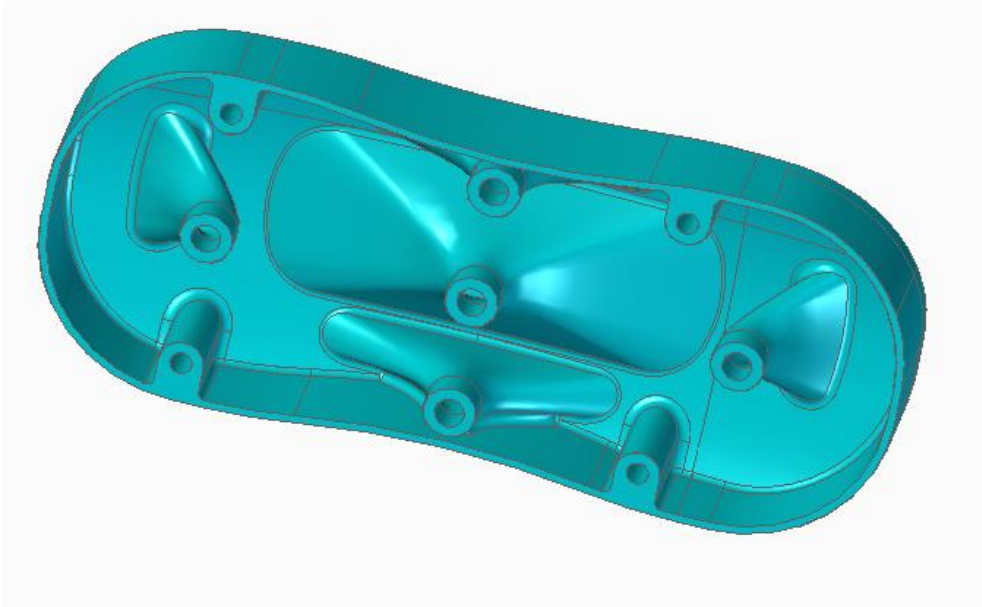


Figura 3.25-Vista da sotto, dove possiamo notare, oltre all'ovvia rimozione della base, anche la presenza degli smussi in ogni zona idonea

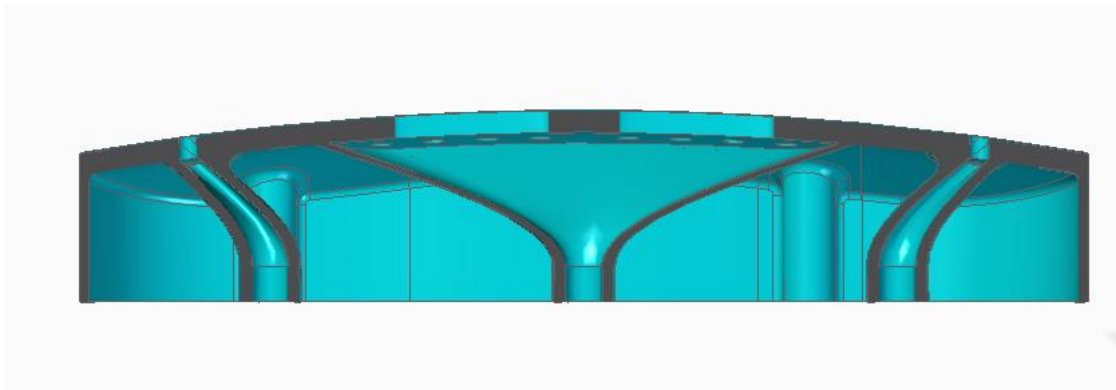


Figura 3.26-Vista interna del movimentatore, grazie alla quale possiamo apprezzare la complessità delle forme raggiunta

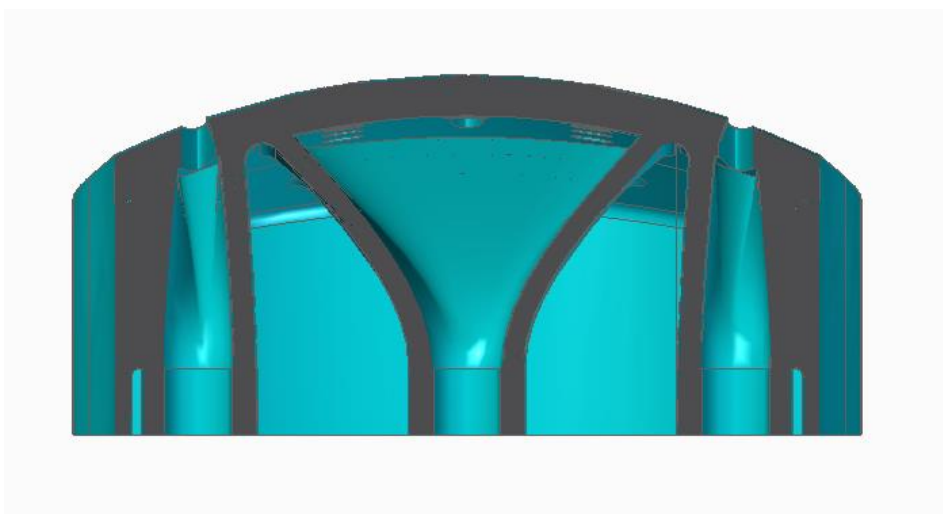


Figura 3.27-Altra vista interna

f. Fase 5, Riduzione del numero dei canali di aspirazione

Proseguendo sul filo logico della riprogettazione di massima iniziata nella fase precedente, si sono cercate soluzioni per spingersi oltre e modificare in maniera sensibile la geometria del movimentatore in modo tale da realizzare un miglioramento dal punto di vista dell'efficienza sfruttando i vantaggi dell'AM.

L'aspetto su cui si è ora andati ad agire è il numero di canali di aspirazione che permettono di ottenere la depressione sulla superficie esteriore del manufatto: pur essendo stato specificato più volte infatti che la presenza di diversi canali permette la realizzazione di vari gradi di depressione, consentendo quindi una notevole libertà in fase di utilizzo del prodotto, è anche vero che, essendo questo caratterizzato da simmetrie rispetto ad entrambi gli assi del piano su cui giace, verosimilmente lavorerà in condizioni anch'esse simmetriche, ovvero le depressioni realizzate all'interno dei canali speculari rispetto agli assi X ed Y saranno uguali.

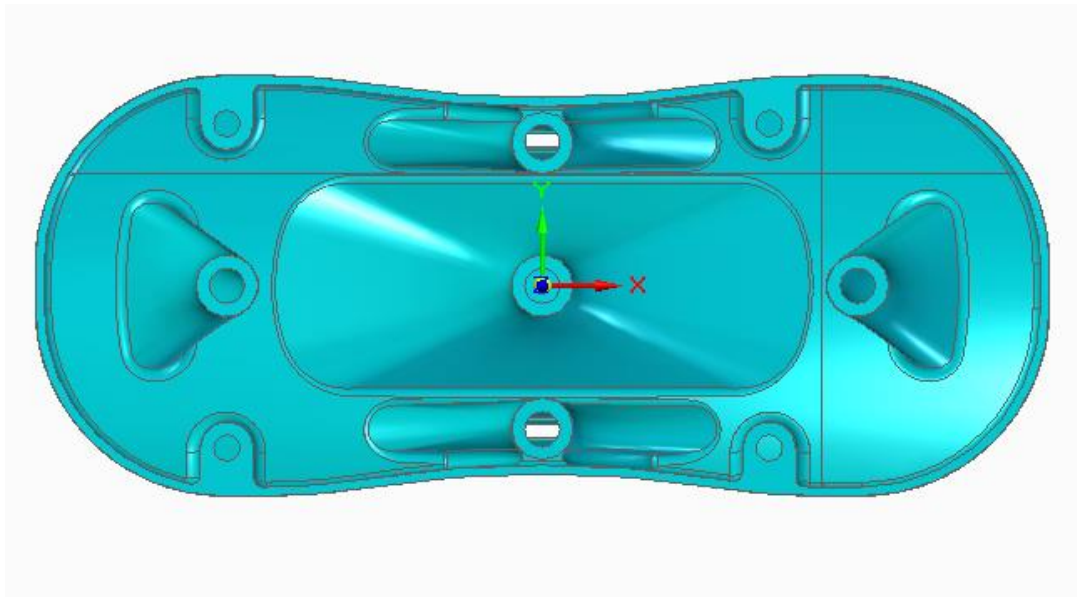


Figura 3.28-Vista la doppia simmetria dell'oggetto, è logico aspettarsi che anche le depressioni di lavoro dimostrino questa proprietà

Possiamo quindi dedurre che all'atto pratico siano necessari solo tre canali di depressione per tutto l'oggetto, uno che si colleghi al canale centrale, uno ai due speculari rispetto all'asse X, ed uno ai due speculari rispetto all'asse Y. L'obiettivo che ci si è posti in questa fase di lavoro è stato dunque quello di ridurre il numero di canali al minimo possibile; questo inoltre permette di assicurarsi che le pressioni raggiunte nelle zone simmetriche siano uguali tra loro, evitando eventuali difformità, dovute alle cause più disparate, che si avrebbero utilizzando canali separati.

Dopo qualche tentativo, l'idea vincente è risultata essere quella di creare dei condotti che connettessero le prese di pressione (ad eccezione di quelle centrali) che fossero simmetriche agli stessi canali di depressione, ottenendo quindi la riduzione da 5 a 3 desiderata. Il risultato è mostrato nelle immagini seguenti. Per avere una comprensione migliore dell'intricata struttura interna, dapprima saranno riportate le immagini del manufatto senza le pareti laterali.

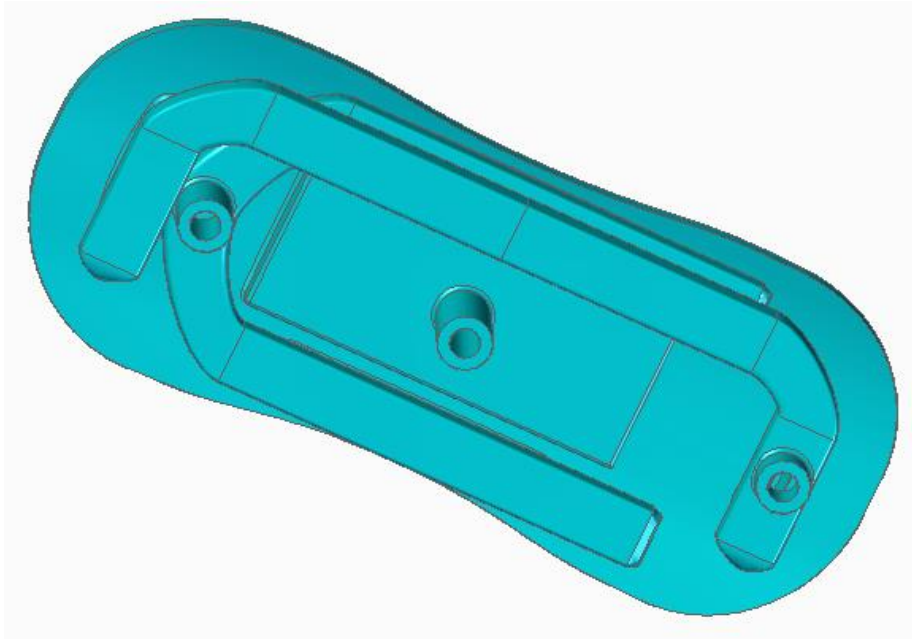


Figura 3.29-Come si evince, la differenza rispetto alle iterazioni precedenti è lampante

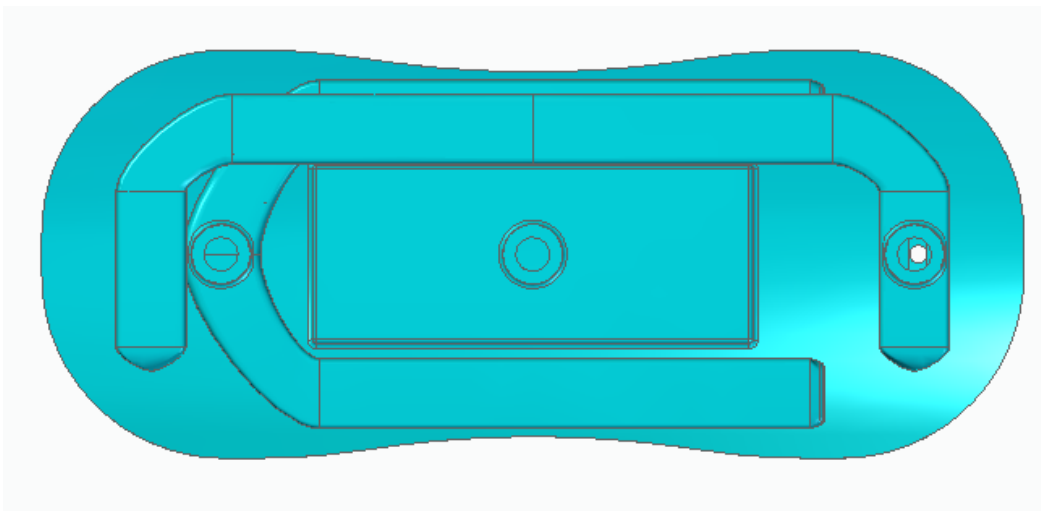


Figura 3.30-Vista dal basso del manufatto, dove viene messa in risalto la disposizione dei nuovi condotti

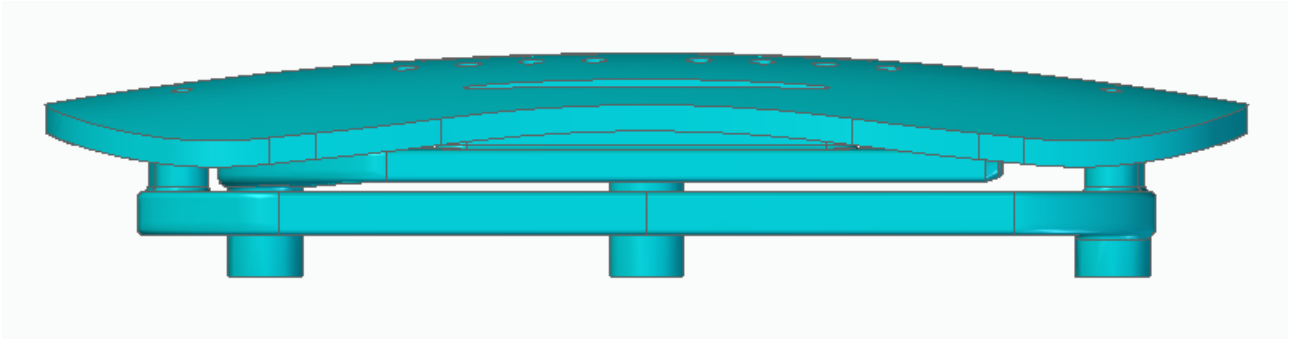


Figura 3.31-Vista laterale, notiamo che i condotti si trovano su piani diversi

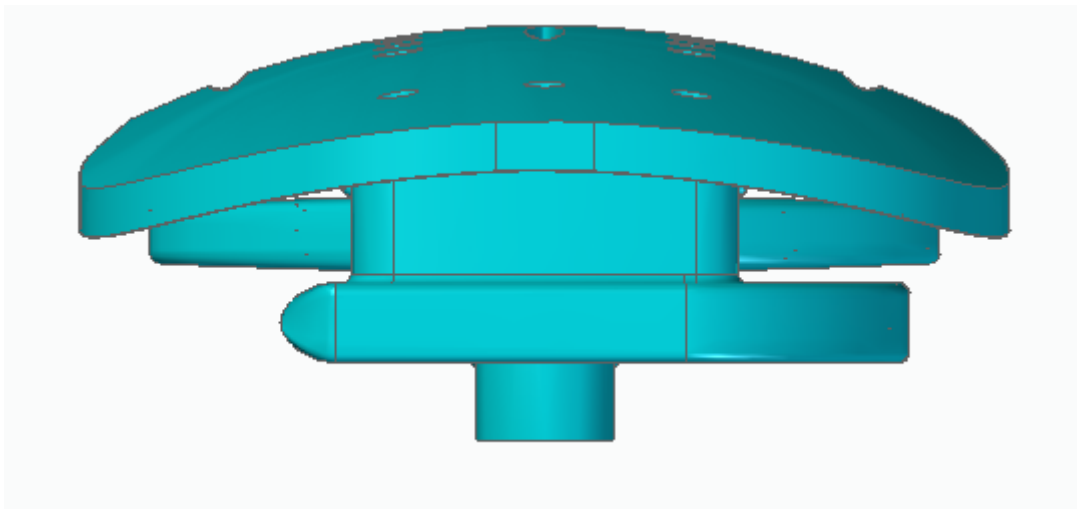


Figura 3.32-Terza vista, dove possiamo vedere non solo il collegamento tra i condotti e le prese di pressione, ma anche la totale assenza di spigoli nel manufatto

Ci si rende facilmente conto, osservando queste immagini, che si è compiuto un grande passo avanti rispetto alle forme osservate all'inizio dello studio, avendo ottenuto ora una geometria decisamente più complessa e articolata che, oltre ad avere una funzione di miglioramento dell'efficienza del manufatto, consente anche di dimostrare in maniera concreta l'enorme potenziale di realizzazione delle tecniche additive: pensare di creare un oggetto così intricato e preciso con delle tecniche di sottrazione dal pieno sarebbe stato follia, sia dal punto di vista della difficoltà di lavorazione, sia dal punto di vista dei costi, che sarebbero cresciuti in maniera astronomica.

Inserendo nell'insieme anche le pareti laterali a chiusura del movimentatore e le inevitabili colonnine di connessione con la piattaforma con cui si dovrà accoppiare una volta posto in funzione, il risultato finale è il seguente.



Figura 3.33-L'ormai familiare vista da sopra del manufatto, simile a quelle già viste in precedenza



Figura 3.34-L'aggiunta delle pareti laterali e delle colonnine si associa alla presenza dei rispettivi smussi ai sottosquadri

Come di consueto, vengono anche aggiunte le sezioni dell'oggetto per apprezzarne i particolari interni, scelta che in questo caso assume particolare importanza vista la grande complessità della struttura dei condotti.

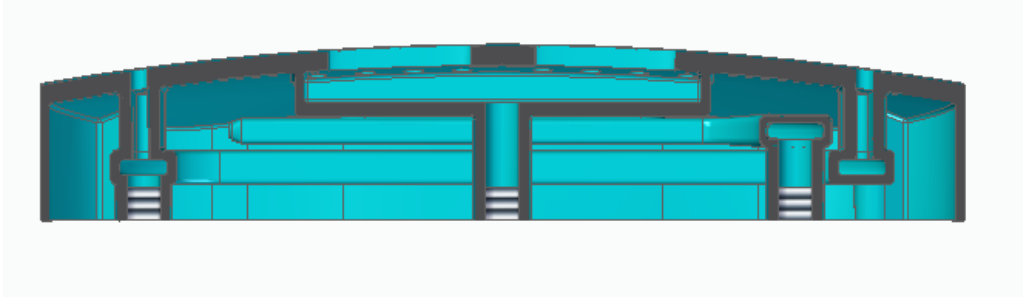


Figura 3.35-Possiamo notare come i condotti si sfiorino senza mai toccarsi del tutto, compiendo percorsi complessi ma mantenendo lo spazio compatto

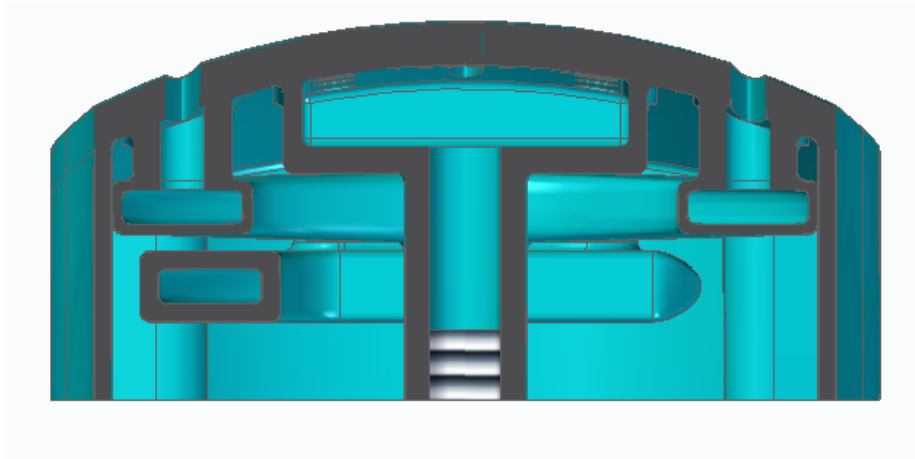


Figura 3.36-I sottosquadri sono stati eliminati sia all'esterno che all'interno del manufatto

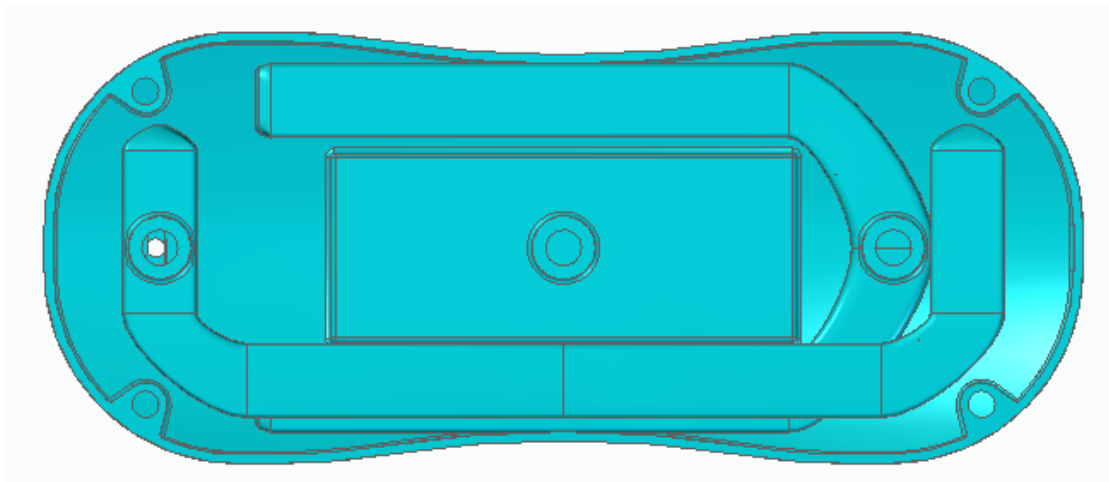


Figura 3.37-La vista inferiore del movimentatore completo

Ora, osservando la complessità delle forme che caratterizzano questa versione del manufatto, può risultare naturale chiedersi se non solo non sia esagerata, ma addirittura deleteria per il corretto funzionamento del prodotto: la presenza di canali chiusi rende difficile una lavorazione per migliorarne la finitura superficiale interna, con possibili conseguenze negative sull'efficienza del trasporto di fluido al loro interno. E non è forse vero che lavorare con canali relativamente lunghi e che presentano curvature porta a dissipazioni di energia?

Queste obiezioni sono effettivamente legittime, ma solo in una certa misura, ovvero guardando la questione da un punto molto ravvicinato. Allargando il proprio punto di vista, ci si rende conto che la realtà è ben diversa: bisogna infatti considerare che questo dispositivo si inserisce all'interno di una catena di altri componenti, quali tubazioni, valvole, sistemi di distribuzione, che si collegano in serie ad un sistema centralizzato di produzione del vuoto. In quest'ottica, la presunta complessità dei condotti di depressione del manufatto in esame ha un'influenza praticamente irrilevante nel calcolo totale delle perdite di carico del sistema. Inoltre, dobbiamo considerare che nella maggior parte del tempo questo prodotto lavorerà non in condizioni di trasporto della depressione, bensì di applicazione di depressione, per mantenere l'assorbente ben saldo sulla sua superficie, pertanto in condizioni statiche la complessità cui si è accennato in partenza diventa ininfluenza.

Il risultato raggiunto risulta quindi soddisfacente sotto molteplici punti di vista, sia quello della funzionalità, che risulta migliorata a seguito della riprogettazione, sia per quanto riguarda la dimostrazione delle capacità della manifattura additiva. Pertanto, si è ritenuto che questa iterazione potesse essere considerata quella definitiva e che il case study potesse essere terminato qui. La fase 5 rappresenta quindi il risultato finale dello studio.

Tuttavia, va notato che al momento questo è vero solo dal punto di vista concettuale. Vanno infatti eseguiti dei calcoli e delle verifiche su questo modello, per appurare se possa effettivamente essere non solo un valido sostituto all'oggetto di partenza, ma se possa addirittura superarlo in termini di qualità, convenienza e funzionalità.

Queste questioni saranno il tema del capitolo successivo.

4. Studio dei risultati

a. Verifica della resistenza in esercizio

A differenza della geometria iniziale, del cui corretto funzionamento in esercizio eravamo certi, appartenendo ad un oggetto già esistente ed utilizzato nella pratica produttiva, con il risultato ottenuto con la Fase 5 del lavoro ci troviamo in una sorta di terra inesplorata: essendo il manufatto elaborato caratterizzato da una geometria così profondamente diversa, ad eccezione del mero aspetto esterno, da quello che era l'oggetto di partenza, è più che lecito chiedersi se anch'esso sia in grado di operare correttamente una volta messo in funzione, o se invece questi cambiamenti di forma non portino con sé delle profonde criticità che potrebbero compromettere la sua efficienza.

Normalmente si procederebbe realizzando un prototipo dell'oggetto da esaminare per poi sottoporlo alle stesse sollecitazioni e carichi che caratterizzerebbero la sua "vita" lavorativa; tuttavia ciò comporterebbe un dispendio di materiale, tempo e denaro che può essere evitato sfruttando sapientemente i mezzi utilizzati finora.

Infatti, essendo l'interezza del progetto realizzata su SolidEdge in modo tale da generare un modello da fornire alla macchina per la stampa 3D, è possibile manipolare il suddetto modello per poter compiere delle simulazioni anche piuttosto complesse, in modo da riprodurre ogni tipo di stress e vincolo che si ritenga necessario; tutto questo permette di evitare di realizzare un prototipo fisico e le tempistiche sono dell'ordine dell'ora. È quindi questa la strada intrapresa per la verifica del comportamento in esercizio del manufatto e per la determinazione delle tensioni e delle deformazioni indotte.

È necessario però puntare l'attenzione su una questione importante: ricordiamo infatti che quella che sarà eseguita è una verifica di massima, e non un dimensionamento vero e proprio. Un dimensionamento avrebbe richiesto uno studio approfondito delle relazioni tra carichi, tensioni e spessori del manufatto, che invece qui è stato evitato; nel caso in questione, in fase di modellazione si è generata una geometria ritenuta opportuna, e su di essa sono state eseguite le verifiche riportate in seguito.

Inizialmente, è stata tentata una simulazione sull'intero oggetto assemblato, in modo tale da avere un risultato che tenesse conto del manufatto in toto, ma la geometria è risultata troppo complessa per poter essere gestita dal software, che in più istanze ha restituito un messaggio di errore. Si è così ricorsi ad un approccio diverso, sfruttando il fatto che effettivamente il comportamento sotto stress di un condotto non influenza quello degli altri: sebbene essi siano collegati tutti e tre alla stessa

superficie, questo non si ripercuote sul resto del condotto e quindi, di fatto, ci troviamo a lavorare con tre corpi distinti (sono stati presi in considerazione solo i condotti in quanto la pressione agisce solo su di loro, essendo gli unici componenti all'interno del quale si viene a creare depressione).

Non solo: trascurando il condotto centrale, i due rimanenti sono piuttosto simili per forma e dimensioni, pertanto, per semplificare ulteriormente il procedimento, si è scelto di eseguire la simulazione solamente su uno dei due, e supporre che i risultati fossero logicamente applicabili anche all'altro caso.

Il materiale con cui il movimentatore sarebbe stato realizzato è la poliammide 12 (PA 12), le cui caratteristiche, inserite nel software per rendere realistica la simulazione, sono le seguenti:

- Densità: 1,01-1,03 g/cm³ a 20°C
- Modulo Elastico: 0,9-1,2 GPa a 20°C
- Tensione di Rottura: 35-45 MPa a 20°C

Per quanto riguarda l'entità dei carichi, non avendo a disposizione le effettive depressioni di lavoro, per tutelarsi il più possibile ed inserire una sorta di coefficiente di sicurezza, è stato supposto di trovarsi nel caso peggiore possibile e comunque difficilmente raggiungibile, ovvero la condizione in cui all'interno di tutti i condotti si riesca a raggiungere un vuoto assoluto, risultando quindi in una spinta esterna ed uniforme circa pari a 100 kPa.

Per i vincoli invece si è immaginato che i vari condotti fossero fissati sia sulla base, dove si trovano le prese per i canali di depressione, sia sulla cima, dove, nel corpo intero, sarebbero uniti alla superficie superiore del movimentatore. In entrambe le posizioni sono quindi stati inseriti degli incastri per simulare questi vincoli.

Il primo corpo analizzato è il condotto centrale:

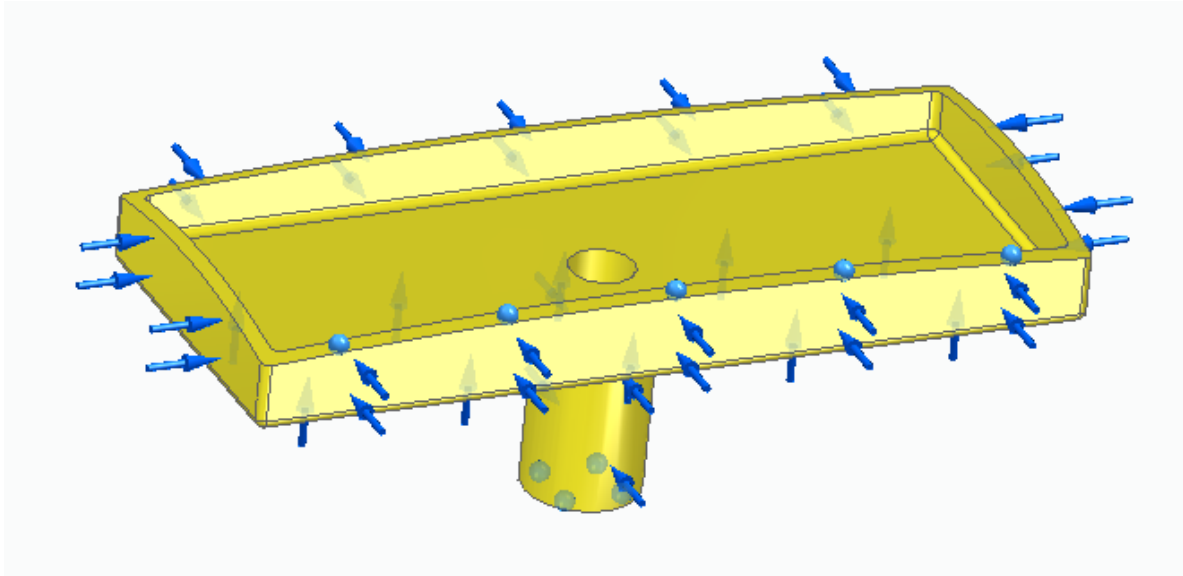


Figura 4.1-Le frecce rappresentano la pressione agente sulle facce, mentre le sfere mostrano i vincoli

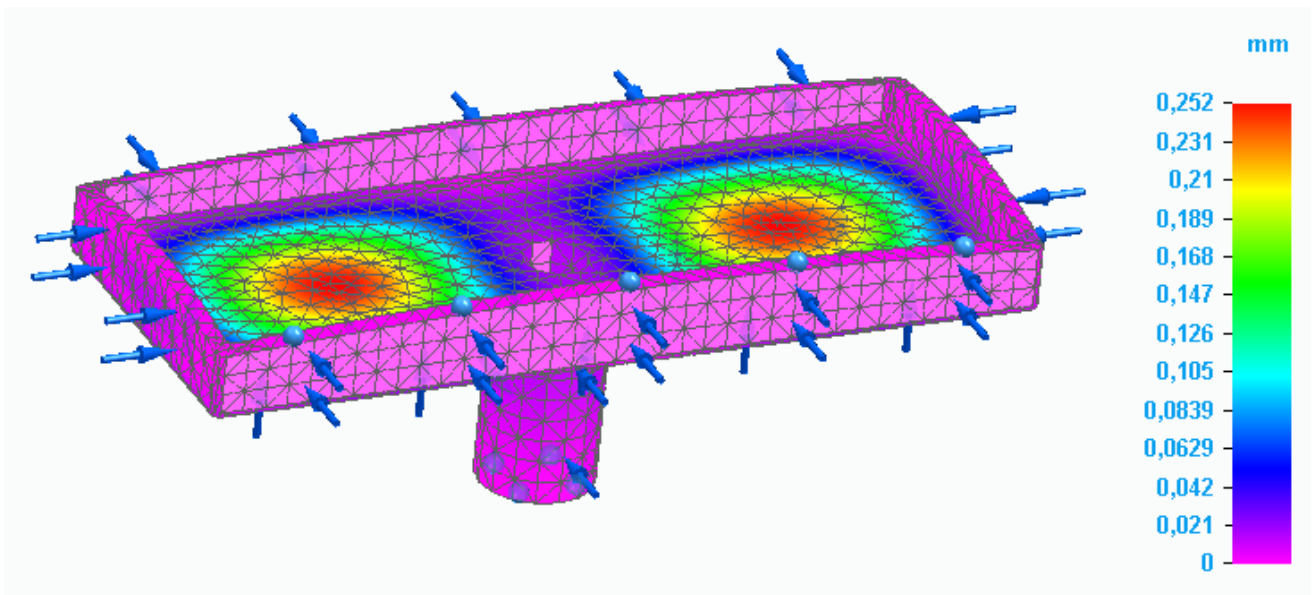


Figura 4.2-Il primo risultato della simulazione, in cui vengono messe in evidenza le deformazioni subite sotto i carichi imposti

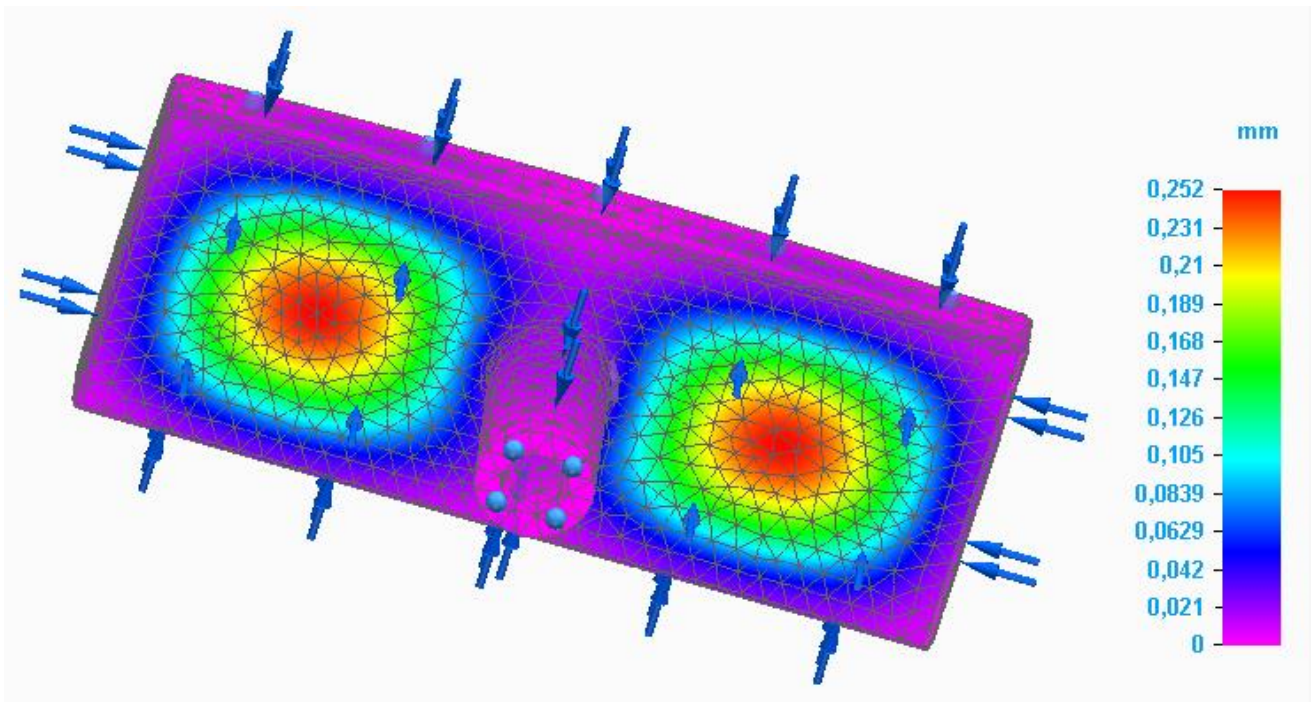


Figura 4.3-Vista da sotto dello stesso risultato della simulazione

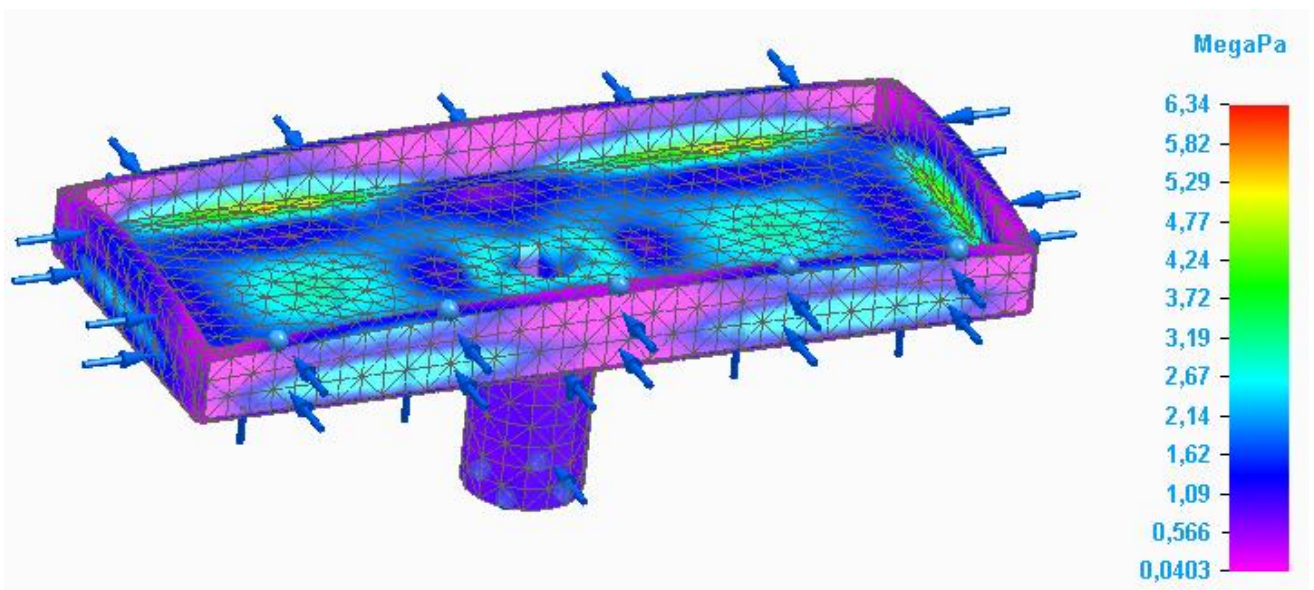


Figura 4.4-I risultati della simulazione sotto forma di tensioni indotte

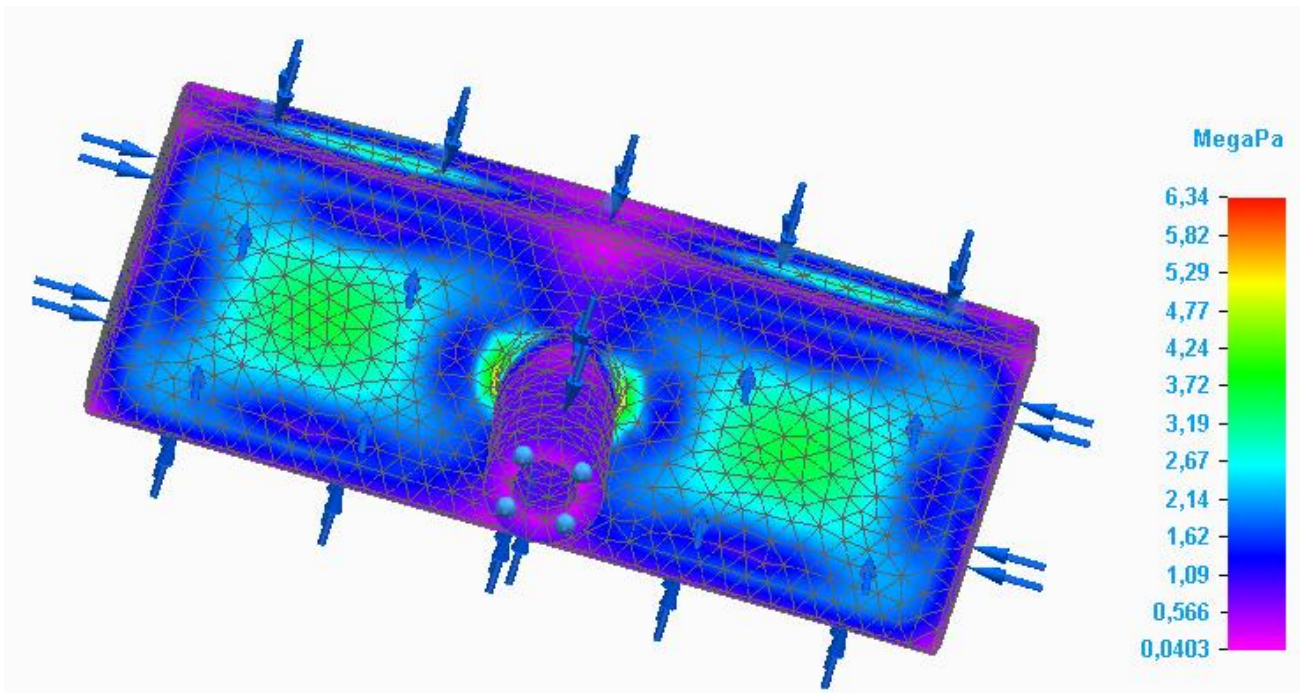


Figura 4.5-Vista dal basso

Come si evince osservando le immagini e la legenda sui colori che le accompagna, siamo ampiamente entro i limiti di accettabilità in ogni punto del componente: le tensioni, pur nelle zone rappresentate in rosso, si mantengono su un valore massimo pari a circa $1/6$ del carico di rottura del materiale, e gli spostamenti arrivano al più ad $1/4$ di millimetro, deformazione appena osservabile ad occhio nudo. Possiamo quindi concludere che il condotto centrale non ha problemi di funzionamento una volta in esercizio.

Passiamo ora ad analizzare uno dei due condotti laterali che, ricordiamolo, è rappresentativo anche del comportamento del terzo ed ultimo condotto.

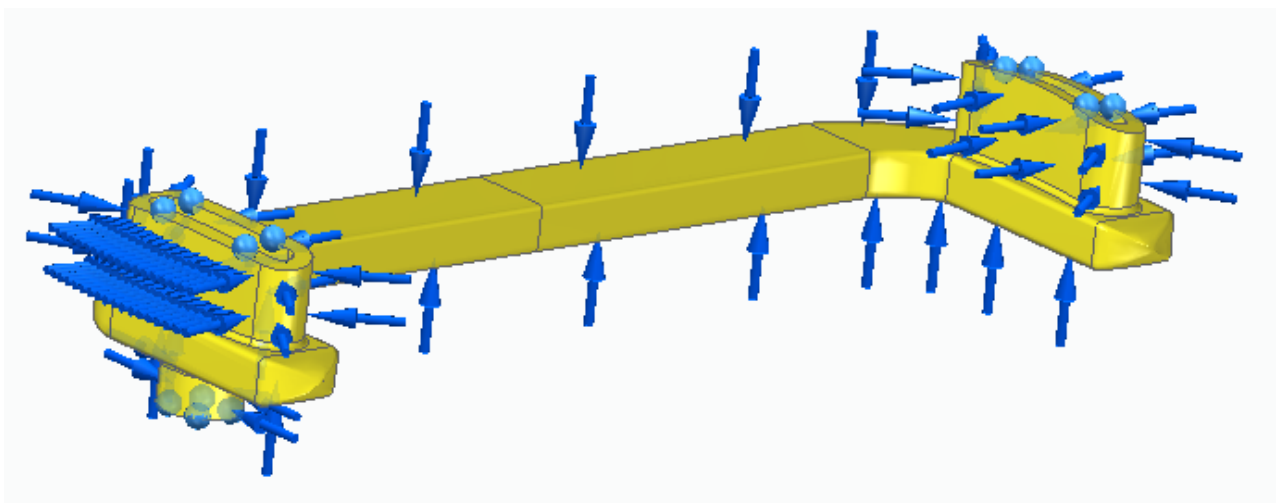


Figura 4.6-Il condotto studiato, col suo sistema di carichi e vincoli

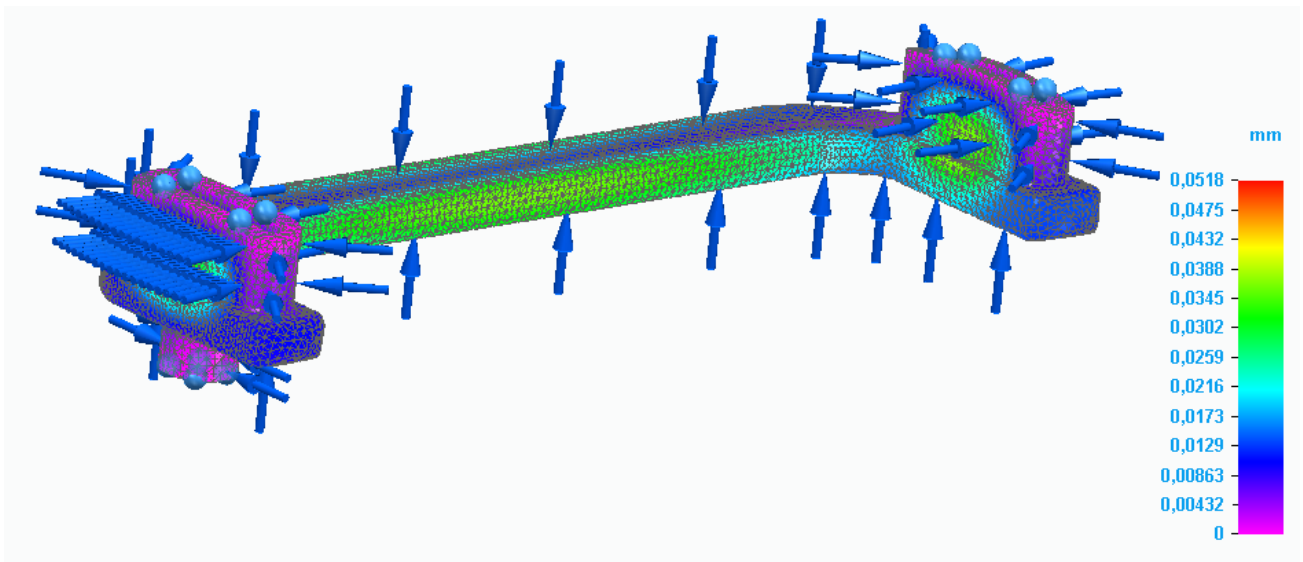


Figura 4.7-Rappresentazione delle deformazioni dopo l'applicazione dei carichi

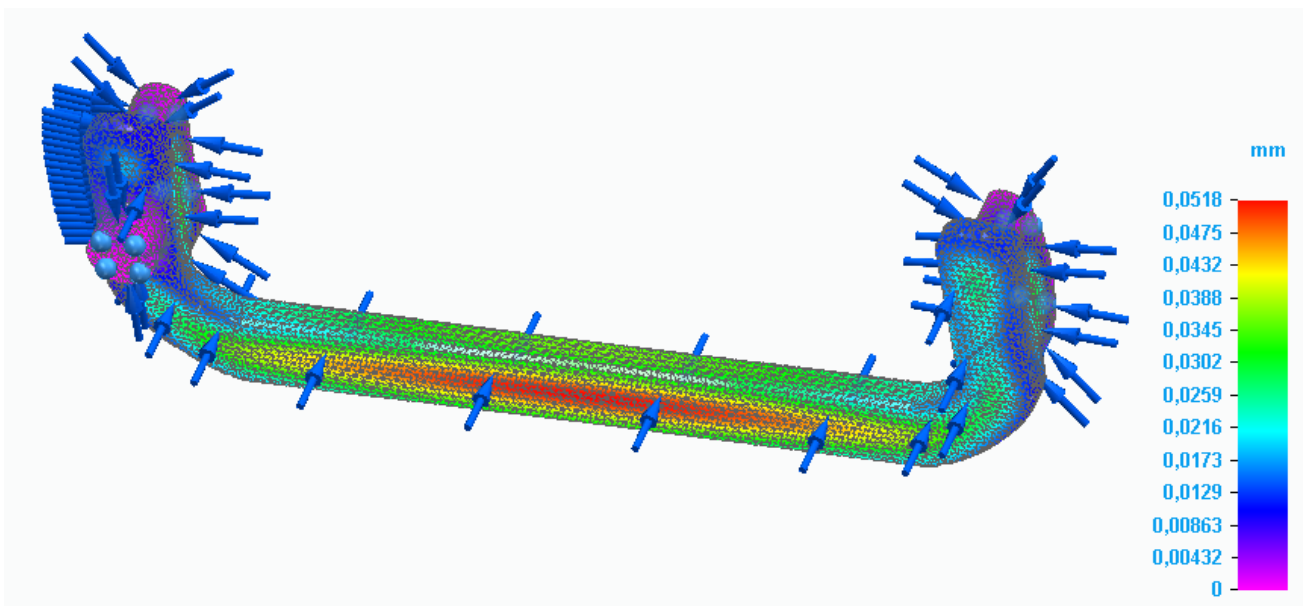


Figura 4.8-Vista da sotto del risultato precedente

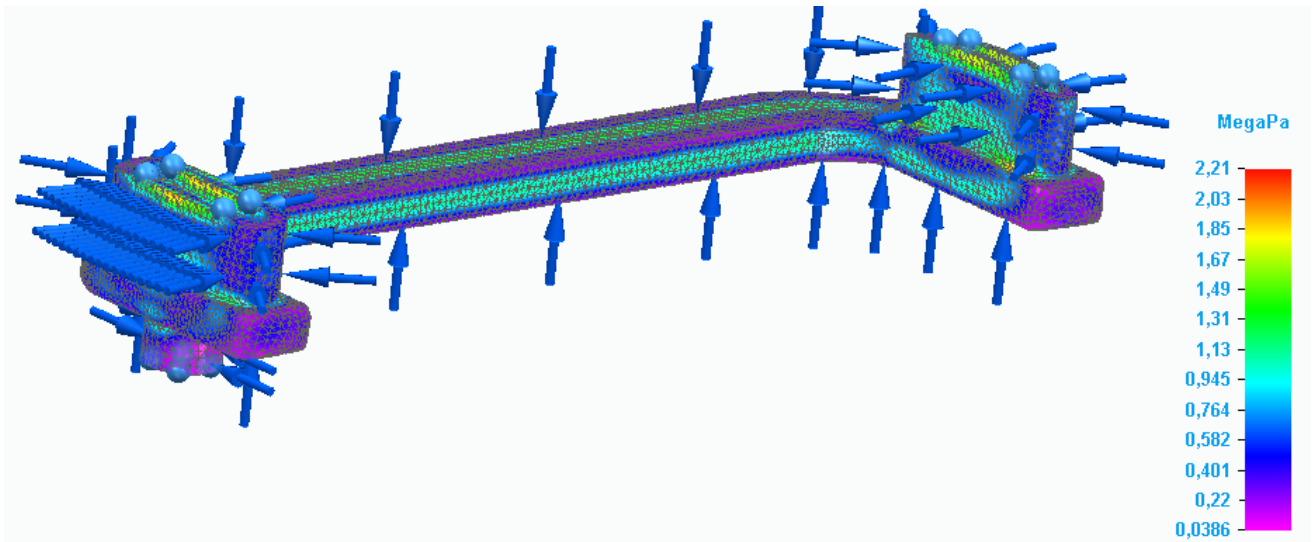


Figura 4.9-In questa immagine vengono invece riportate le tensioni che si generano nell'oggetto

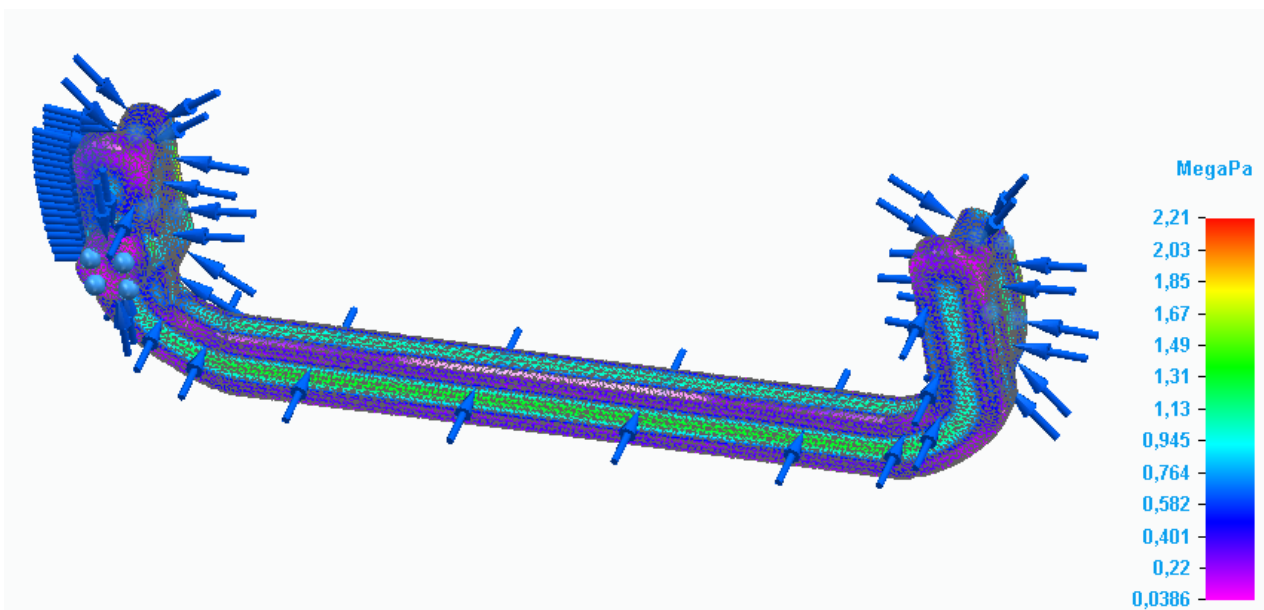


Figura 4.10-Lo stesso risultato è osservato da un'angolazione diversa

Anche in questo caso i risultati sono più che confortanti, in misura anche maggiore rispetto a quanto si osservava per il condotto precedentemente esaminato: la tensione massima scende addirittura a 2 MPa, lontana anni luce dalla tensione di rottura del materiale, e la deformazione massima è appena di 5 centesimi di millimetro, ampiamente entro i limiti di accettabilità. Anche questo componente quindi risulta più che idoneo per una sua effettiva messa in funzione.

Come già detto, per quanto riguarda il terzo condotto non si è ritenuto necessario operare una simulazione, in quanto ci si aspettava ragionevolmente di ottenere dei risultati perfettamente compatibili con quanto già osservato, in particolare col secondo caso, vista la grande somiglianza di spessori, forme e morfologia dei due componenti, oltre ovviamente all'uguaglianza perfetta dei carichi e, concettualmente, dei vincoli.

Possiamo pertanto affermare che il manufatto nella sua interezza supera a pieni voti la verifica sulla sua effettiva capacità di funzionare una volta posto sotto i carichi tipici della sua vita lavorativa.

b. Verifica della realizzabilità del prototipo

Lo step successivo nel percorso di verifiche di questa nuova geometria per il manufatto è stato di verificare che fosse effettivamente possibile realizzare il modello 3D costruito in SolidEdge, e che una volta realizzato non ci fossero difformità critiche tra l'oggetto virtuale e quello fisico. Pertanto, si è proceduti alla creazione di un prototipo concreto che potesse mettere in luce la presenza o meno di questi aspetti; questo prototipo è stato realizzato in poliammide 12 con la tecnica del Selective Laser Sintering, appartenente alla famiglia del Powder Bed Fusion, direttamente dall'azienda all'interno della quale si è svolta l'attività di tirocinio, la Prosilas.

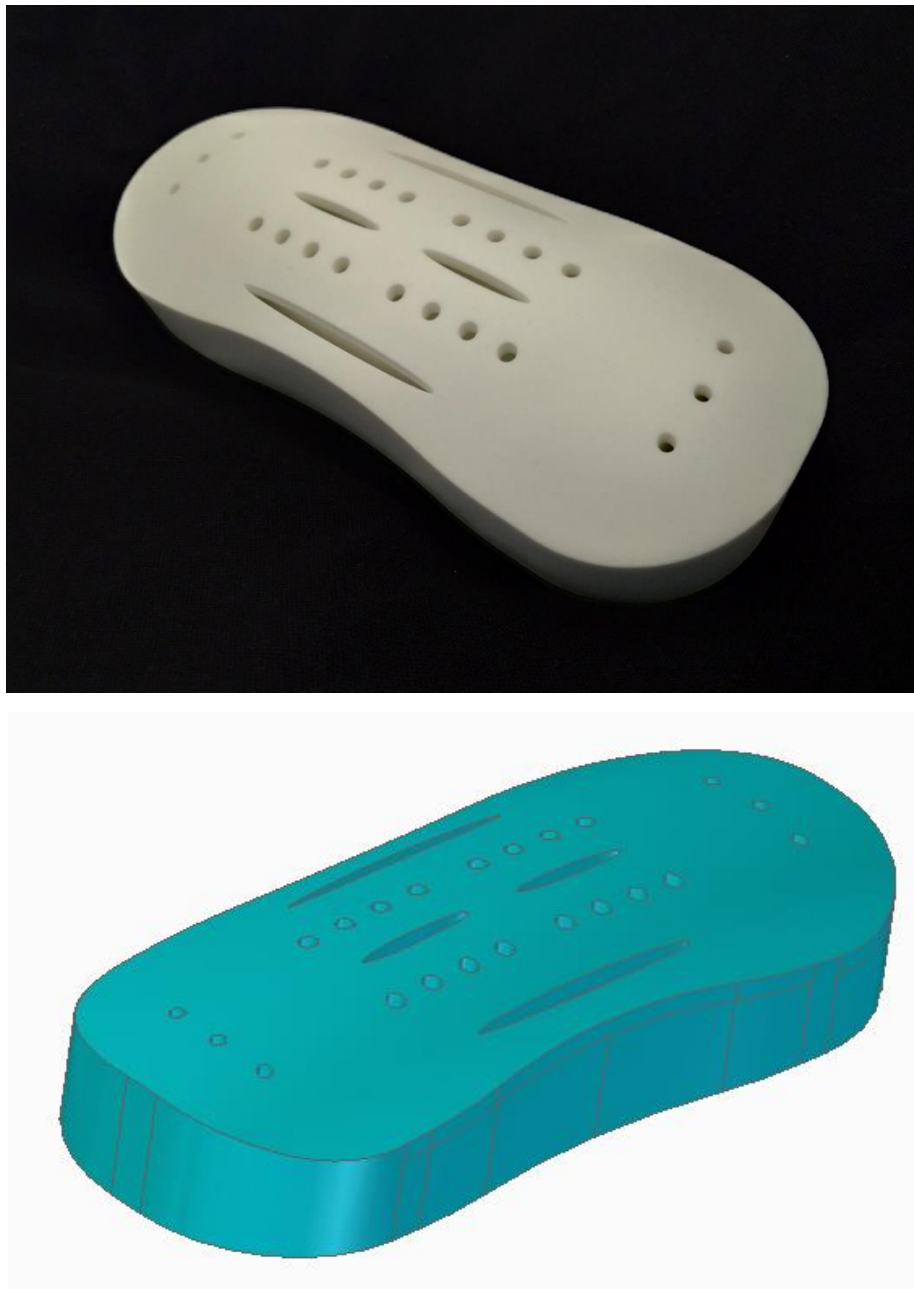


Figura 4.11-Confronto dell'aspetto esterno

Come possiamo notare, per quanto riguarda la geometria del manufatto e le sue forme non risultano differenze sostanziali tra il modello virtuale e quello reale; andiamo ora ad effettuare una verifica delle dimensioni.

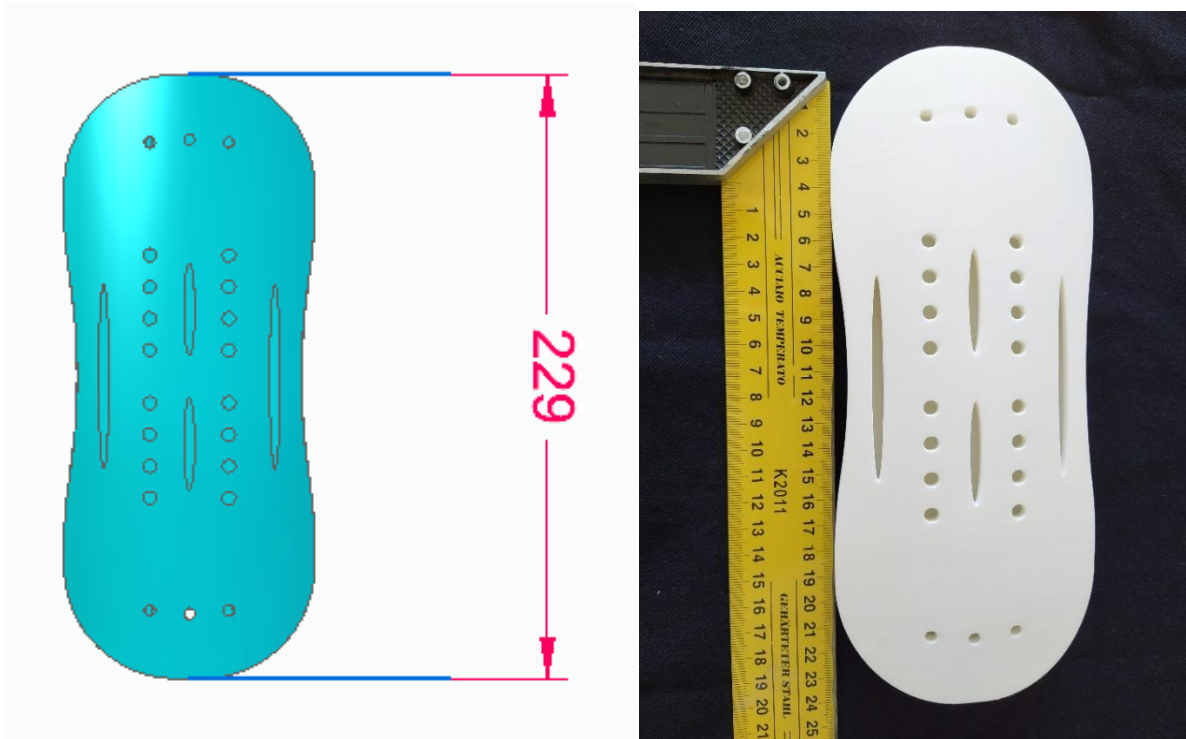


Figura 4.12-Confronto delle misure di lunghezza

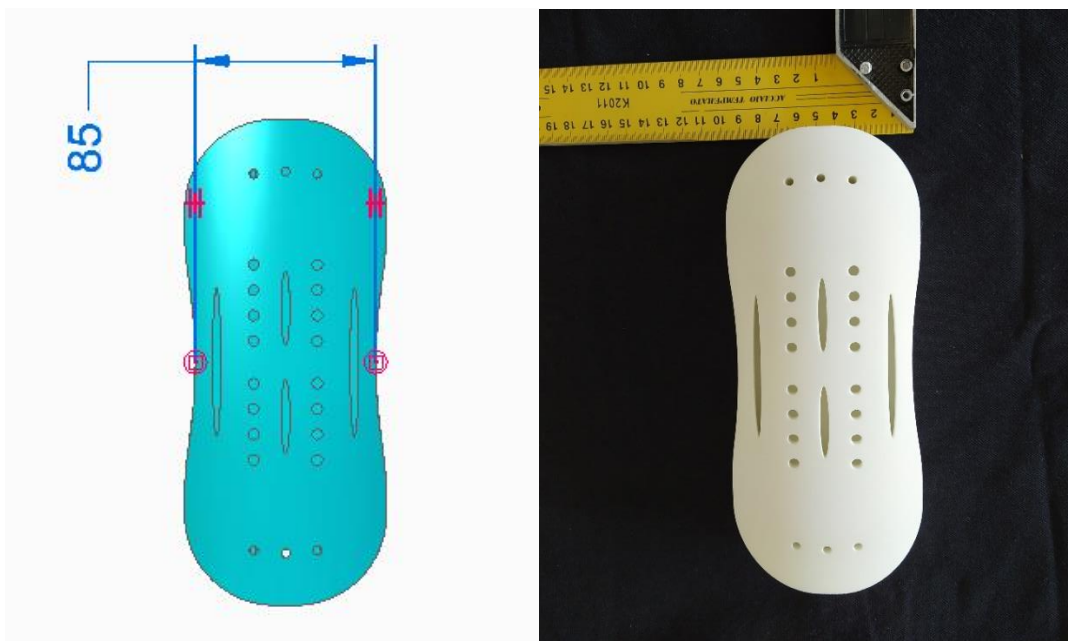


Figura 4.13-Confronto delle misure di larghezza

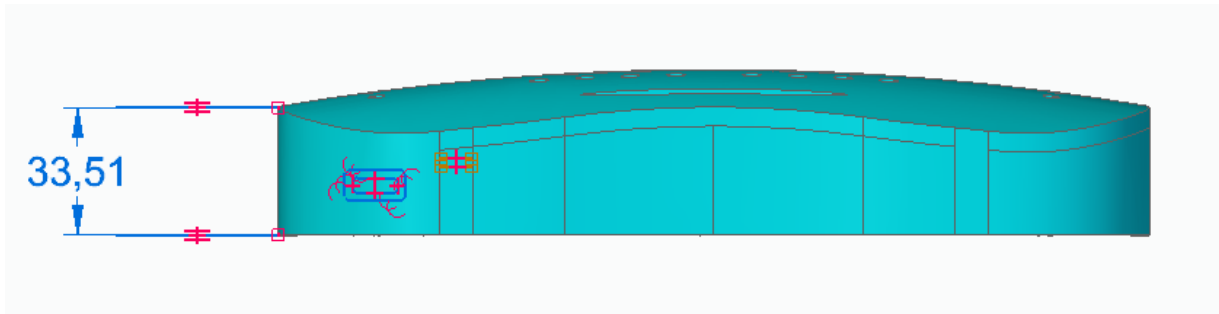


Figura 4.14-Confronto delle misure di altezza

Anche per quanto riguarda le dimensioni quindi vediamo come la realizzazione fisica del prodotto sia perfettamente in linea con quanto programmato nel software CAD, a meno di minuscoli errori dell'ordine del millimetro che potrebbero tranquillamente essere imputati agli strumenti di misura.

Un aspetto su cui vale la pena puntare l'attenzione è la finitura superficiale: sebbene essa risulti più che accettabile su gran parte della superficie dell'oggetto, vi sono alcuni punti in cui la sua qualità subisce dei bruschi abbassamenti, come nell'immagine di seguito mostrata.



Figura 4.15-Dettaglio di una zona ad alta ruvidità

Questo è ovviamente un aspetto negativo della realizzazione in stampa 3D, ma va altresì notato che problematiche come questa possono essere facilmente risolte con processi di sabbiatura o simili, previsti anche nel caso di lavorazioni tradizionali. Pertanto, se sotto questo punto di vista le tecniche additive non portano vantaggi netti al processo di produzione, se non altro non risultano più svantaggiose delle lavorazioni classiche.

Esaminiamo ora gli interni dell'oggetto, molto più complessi dal punto di vista della geometria e fondamentali per quanto riguarda il funzionamento: una loro analisi potrà fornirci quindi una risposta chiara e netta sulla questione dell'effettiva realizzabilità del prodotto.



Figura 4.16-Confronto della parte interna dei modelli

Nonostante l'intricata struttura di canali che si incastrano tra di loro lasciandosi in mezzo solo minuscoli spazi vuoti, la tecnica di SLS è riuscita egregiamente a riprodurre ogni particolare senza sbavature, restituendoci un manufatto che rispecchia fedelmente la sua controparte virtuale.

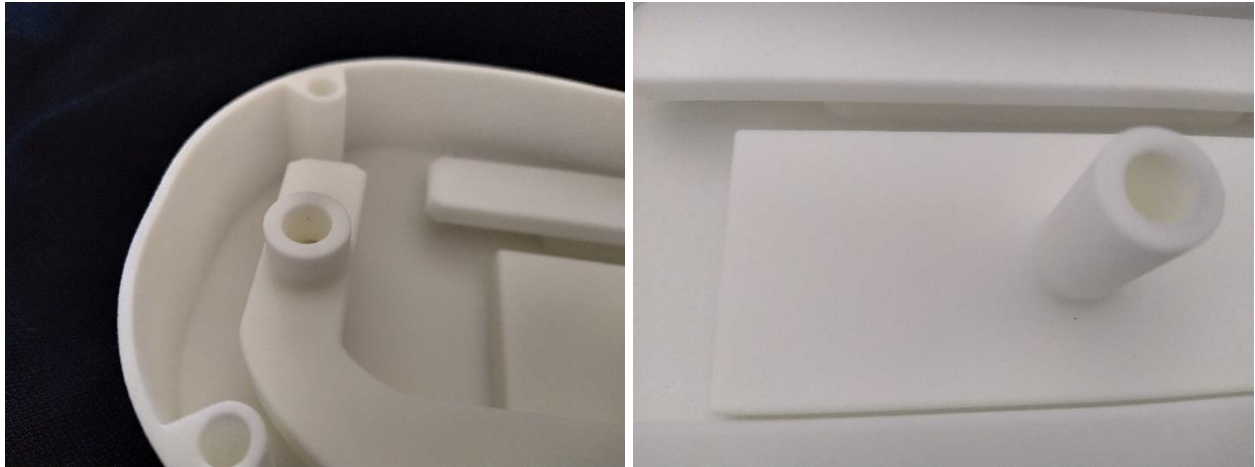


Figura 4.17-Dettaglio su alcuni particolari per evidenziare la precisione di questa tecnica

Anche nel caso della realizzazione di smussi al posto dei sottosquadri non rimaniamo delusi, e possiamo osservare come, nonostante le dimensioni richieste fossero piuttosto ridotte, non ci sono state difficoltà nella creazione del manufatto, che presenta le stesse caratteristiche di arrotondamento degli spigoli interni del modello virtuale.

Anche sotto questo punto di vista quindi, l'esame viene superato brillantemente, nonostante alcuni aspetti minori evidenziati, e il manufatto risulta pertanto pienamente ed efficacemente realizzabile, non subendo alcuna alterazione nel processo di creazione.

c. Analisi dei costi e dei vantaggi produttivi

Esaminiamo ora l'ultimo aspetto che determina se e quanto l'utilizzo delle tecniche additive per la realizzazione di questo manufatto sia stata una scelta corretta, ovvero l'aspetto economico/produttivo. Per fare ciò, dobbiamo confrontare i costi e i tempi di produzione delle due versioni del manufatto: la prima, ovvero quella precedente allo studio descritto in questa tesi, se fosse realizzata con tecniche di asportazione di truciolo; la seconda, risultato dei vari processi di studio, considerando il suo ottenimento mediante Selective Laser Sintering.

Cominciamo dunque dalla prima: in questo caso dobbiamo considerare che il manufatto è in realtà costituito da due componenti distinti, la parte di copertura e la soletta, che quindi devono essere realizzati separatamente; essendo questa la situazione, vengono effettuati due diversi processi di calcolo, mostrati nelle tabelle seguenti.

Il materiale considerato è, come già precedentemente indicato, la poliammide 12, mentre per il processo di realizzazione è stato supposto che si scegliesse l'asportazione di truciolo.

Poiché il processo prevede la rimozione di materiale per realizzare il pezzo finito, l'oggetto di partenza sarà un blocco di materiale di dimensioni pari agli ingombri massimi del componente finale maggiorate di 0,5 mm per lato. Conoscendo quindi il volume di partenza e quello finale, ottenuto dalle proprietà del modello 3D su SolidEdge, è stato possibile calcolare il volume di materiale da asportare; questo valore va poi diviso per la velocità di asportazione del materiale mediante le macchine utensili, ottenendo così il tempo totale di lavorazione. Dal tempo totale di lavorazione e dal costo orario per le lavorazioni (stimato), si è giunti infine al costo totale della lavorazione.

A questo va sommato infine il costo del materiale, riferito ovviamente al blocco di partenza; il costo dei processi CAM (Computer-Aided Manufacturing), indispensabili per passare dal modello virtuale alle istruzioni da fornire alle macchine CNC; il costo dei posizionamenti, doppi per entrambi i componenti.

Materiale	Poliammide 12; 1,02 g/cm ³
Volume del blocco pieno	100x234x45=1.053.00 mm ³
Volume oggetto finito	117.111,233 mm ³
Massa oggetto finito	119,45 g
ΔV	935.888,767 mm ³
$\Delta V/h$	150.000 mm ³ /h
Ore di lavorazione	6,25 h
Costo orario delle lavorazioni	40 €/h
Costo totale lavorazioni	250 €
Costo totale piazzamenti	45 €
Costo processi CAM	40 €
Costo specifico materiale	0,075 €/g
Massa blocco di partenza	1074,06 g
Costo totale materiale	80,55 €
Costo totale oggetto	415,55 €
Materiale	Poliammide 12; 1,02 g/cm ³
Volume del blocco pieno	105x239x22=552.090 mm ³
Volume oggetto finito	82.641,122 mm ³
Massa oggetto finito	84,29 g
ΔV	469.448,878 mm ³
$\Delta V/h$	150.000 mm ³ /h
Ore di lavorazione	3,13 h
Costo orario delle lavorazioni	40 €/h
Costo totale lavorazioni	125,2 €
Costo totale piazzamenti	30 €
Costo processi CAM	20 €
Costo specifico materiale	0,075 €/g
Massa blocco di partenza	563,13 g
Costo totale materiale	42,23 €
Costo totale oggetto	217,43 €

Queste due tabelle contengono i dati parziali, riferiti rispettivamente alla parte di copertura e alla soletta che compongono il manufatto nella sua versione di partenza; mettendo insieme i valori risultanti, otteniamo:

Tempo totale di realizzazione con tecniche sottrattive	9,38 h
Massa totale del manufatto realizzato con tecniche sottrattive	203,74 g
Costo totale manufatto realizzato con tecniche sottrattive	632,98 €

Come vediamo, sia per quanto riguarda i costi di realizzazione e i relativi tempi, ci troviamo su valori piuttosto alti; inoltre va considerato che, essendo questo processo produttivo basato sull'asportazione di truciolo, gran parte del materiale di partenza verrà scartato, per forza di cose, durante la lavorazione. Di fatto quindi, benché siano necessari in tutto 1637,2 grammi di poliammide per realizzare correttamente i due pezzi finiti, in realtà questi hanno una massa di soli 203,74 grammi, pertanto vediamo come ben l'87,56% del materiale venga sprecato: dei 122,78€ spesi in totale per il materiale, solo 15,27€ sarebbero stati necessari per acquistare il materiale che costituisce effettivamente l'oggetto finale.

Andiamo ora a guardare al processo di realizzazione mediante la tecnica di Selective Laser Sintering.

Anche in questo caso ovviamente il materiale impiegato è la poliammide 12, stavolta sotto forma di polvere; la macchina utilizzata è in grado di sinterizzare, con ogni passata, uno strato di materiale spesso 0,12 mm. Ovviamente gli oggetti da realizzare, così come quello in esame in questo studio, vengono caricati nella macchina in modo tale da occupare la minore altezza possibile. Conoscendo l'altezza totale da realizzare e lo spessore solidificato con ogni passata, è possibile calcolare il numero totale di passate necessario per completare l'interezza del manufatto. Introducendo anche il tempo che ogni passata impiega per essere compiuta, possiamo ricavare il tempo totale di realizzazione del pezzo. Si è considerato che processi aggiuntivi, quali soffiatura e sabbiatura, non influissero sul tempo totale di realizzazione.

I dati relativi alla realizzazione con SLS della versione riprogettata del movimentatore sono riportati nella tabella seguente.

Altezza oggetto	43,34 mm
Spessore strato deposto ad ogni passata	0,12 mm
Tempo necessario per ogni passata	30 s
Numero totale passate	$43,34/0,12=361,17 \Rightarrow 362$
Tempo totale di realizzazione con SLS	181 min => 3,017 h
Volume dell'oggetto realizzato	199085,224 mm ³
Massa dell'oggetto realizzato con SLS	203 g
Processi aggiuntivi	Sabbiatura e soffiatura
Costo totale realizzazione con SLS	160 €

In grassetto sono stati evidenziati i dati più significativi di entrambe le tipologie di processo, in modo tale da poterle confrontare più agevolmente. Come si nota immediatamente, il ricorso all'SLS risulta più vantaggioso rispetto alle tecniche di lavorazione per asportazione di truciolo sotto tutti e tre gli aspetti fondamentali presi in considerazione: innanzitutto il costo totale della realizzazione, che nel caso dell'SLS si riduce addirittura a quasi $\frac{1}{4}$ di quanto avremmo avuto ricorrendo alle tecniche tradizionali; questo inoltre si accompagna ad uno spreco di materiale praticamente nullo, costituendo quindi un ulteriore elemento a favore delle tecniche additive. Inoltre, anche sotto il profilo delle tempistiche abbiamo due valori molto distanti tra loro, 3 ore da una parte e quasi 10 dall'altra, differenza che nel caso di una produzione di un numero di pezzi medio-alto diventa talmente incisiva da far risultare il ricorso alle lavorazioni per asportazione di truciolo un'opzione neanche lontanamente praticabile. Infine, la massa del manufatto realizzato con l'SLS risulta, seppur in maniera quasi irrisoria, minore di quella ottenuta con l'asportazione di truciolo: sebbene questo non sia una conseguenza diretta del metodo di realizzazione, è comunque un merito da riconoscere alle tecniche additive, in quanto la variazione di geometria a monte di questo piccolo abbassamento della massa è stato possibile solo prevedendo una realizzazione del prodotto con la stampa 3D.

Appare quindi evidente come, anche sotto gli aspetti economico/produttivi appena esposti, l'AM risulti vincitore sulle tecniche tradizionali.

5. Conclusioni

Ricapitoliamo ora i risultati raggiunti con questo studio e il percorso seguito per ottenerli.

Innanzitutto, lo scopo dello studio svolto era quello di valutare se e come l'impiego di tecniche di realizzazione additiva potesse essere vantaggioso in sostituzione a quelle tradizionali, nelle fasi di prototipazione ma anche di produzione vera e propria di pezzi finiti. In particolare, è stato preso in esame il caso di un movimentatore per assorbenti igienici. Quello svolto è quindi a tutti gli effetti uno studio di fabbricazione, suddiviso in due fasi.

Dapprima ci si è limitati ad analizzare i benefici che una produzione mediante stampa 3D dell'oggetto avrebbe comportato. In questa fase, va sottolineato, non sono stati implementati cambiamenti nella geometria del pezzo, e l'AM è stato introdotto nel ciclo di produzione esclusivamente in sostituzione alle comuni tecniche di produzione.

La seconda fase invece si differenzia notevolmente dalla precedente, mettendo in atto una riprogettazione di massima che, tramite un redesign piuttosto incisivo, punta a sfruttare appieno tutti i possibili vantaggi che l'Additive Manufacturing può offrire: ecco quindi che il pezzo subisce una pesante modifica sotto il punto di vista della geometria, rimodellata per sfruttare le enormi libertà di design consentite dal ricorso alle tecniche additive e spinta ben oltre i limiti di quello che le tecniche tradizionali potrebbero realizzare, in modo da ottenere un incremento sostanziale della funzionalità.

Sono poi state necessarie delle verifiche: non solo per accertarsi che la nuova geometria del manufatto fosse in grado di funzionare correttamente una volta messa in funzione, dubbio più che legittimo essendosi allontanata grandemente da quella di partenza, ma anche per appurare che il modello virtuale realizzato col software SolidEdge potesse essere replicato con sufficiente accuratezza in un oggetto fisico, e che questo processo fosse economicamente vantaggioso.

Queste verifiche sono state eseguite e superate con successo sotto ogni punto di vista, perciò risulta corretto affermare che per il caso preso in esame le tecniche di Additive Manufacturing possano essere considerate a tutti gli effetti sia dei sostituti efficaci e validi alle tecniche di lavorazione convenzionali, sia delle alternative superiori e più potenti, grazie alle quali è possibile accedere ad un potenziale vastissimo di possibilità di design che permettono di incrementare notevolmente la funzionalità del dispositivo.

6. Ringraziamenti

Il percorso che mi ha portato qui, a questo tanto agognato e sognato traguardo, è stato più duro di quanto sinceramente mi aspettassi: i due anni e mezzo che ho impiegato per completare il mio ciclo di studi magistrale sono stati difficili, faticosi, a volte tanto insoddisfacenti da farmi chiedere se fosse effettivamente la scelta giusta per me.

Ed ora mi trovo qui, alla fine di un'era della mia vita, con quegli stessi momenti difficili ormai alle spalle, domati e superati; e se non fosse stato per merito della moltitudine di persone straordinarie che mi circondano, nulla di tutto questo sarebbe potuto accadere, e non sarei qui a scrivere queste parole.

Christian e Luca, vi devo più di quanto vorrei ammettere. Non dimenticherò mai i pomeriggi passati insieme nella sala TV a ridere per tre ore e studiare per una. Sono tutt'ora convinto che senza questo efficace metodo sarei ancora impantanato su Progettazione Funzionale.

E se da una parte, dentro l'università, avevo il loro sostegno, all'esterno ero (e sono) tartassato dalla gentile follia di quel gruppo di folli che chiamo "amici". Grazie a Mako, Filippo, Federico, Raffaele, Daniele e Matteo, Matteo e Daniele, Francesca, Jacopo, Giada, Elena ed Eleonora per esserci sempre stati per parlare quando avevo bisogno di parlare, per distrarmi quando avevo bisogno di distrarmi, per divertirmi quando avevo bisogno di divertirmi. Non so quale celestiale combinazione di casualità abbia portato questo gruppo di persone ad unirsi, ma la ringrazio.

Grazie mamma, papà, nonno, nonna, zia, Lorenzo e Luca. Dio solo sa quanti sacrifici abbiate dovuto fare per starmi vicino, per non farmi mai sentire solo in ogni momento, per affrontare le difficoltà delle vostre vite e della mia. Grazie per tutto quello che mi avete dato, e che sarete pronti a darmi nel futuro.

Ma questa non è l'unica famiglia che mi ha dato tanto. Da quando li ho conosciuti, i Poggi hanno sempre fatto di tutto per farmi sentire uno di loro, trattandomi non come un'aggiunta alla loro famiglia, ma come parte di essa, e questo affetto così prorompente non smette mai di stupirmi. Grazie di cuore.

La persona che però devo ringraziare più di tutti, l'ultimo fiore ad ornare la corona di alloro della mia laurea, sei tu Agnese. Tu, con la tua tenacia, la tua pazienza, la tua radiosità, mi hai rimesso in piedi più volte di quante tu voglia ammettere, e senza di te non avrei avuto la forza di giungere dove sono

ora. “We are still kids, but we’re so in love / Fighting against all odds”, e tu me lo dimostri continuamente. Ti sono debitore, e ti sono grato.

Infine, una menzione speciale va fatta per le persone che mi hanno sostenuto nel mio percorso di tirocinio, ovvero il personale della Prosilas, che nonostante la mole di lavoro cui sono stati sottoposti nonostante la quarantena, sono sempre stati molto più che disponibili nell’assecondare le mie richieste e chiarire i miei dubbi; in particolare devo ringraziare l’ing. Vincenzo Foti, il mio tutor, che oltre a provvedere alla supervisione del lavoro svolto, ha dimostrato una rara sensibilità nell’aiutarmi a districare le questioni più complesse, spesso a scapito del suo tempo libero, offrendomi un aiuto insostituibile nella compilazione di questa tesi.

Grazie di cuore a tutti.

7. Bibliografia e sitografia

Articoli e studi

- *Design rules for Additive Manufacturing: A categorization*, M. Mani, P. Witherell, J. Jee
- *(Re)Design for Additive Manufacturing*, S. Hällgren, L. Pejryd, J. Ekengren
- *A comparison of Traditional Manufacturing vs Additive Manufacturing, the best method for the job*, T. Pereira, J. V. Kennedy, J. Potgieter
- *Design strategies for the process of Additive Manufacturing*, C. Klahn, B. Leutenecker, M. Meboldt
- *Design for 3D printing: Progettazione di uno stabilizzatore attivo per action camera GoPro*, D. Caprioli, R. Gatti
- *Come abbattere tempi e costi di attrezzaggio con la fabbricazione additiva*, “Le monografie di Meccanica”
- *Case study: Conversione di componenti meccanici da CNC a SLS*, V. Foti
- *Support structures for Additive Manufacturing: A review*, J. Jiang, X. Xu, J. Stringer
- *Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing*, A. R. Torrado, C. M. Shemelya, J. D. English, Y. Lin, R. B. Wicker, D. A. Roberson
- *Current status and applications of additive manufacturing in dentistry: A literature-based review*, M. Javaid, A. Haleem
- *Polymers for 3D printing and customized Additive Manufacturing*, S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt
- *Sviluppo di metodologie di calcolo numerico per la simulazione dello stampaggio ad iniezione di materiali polimerici*, G. P. Menichino
- *Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications*, C. M. González-Henríquez, M. A. Sarabia-Vallejos, J. Rodríguez-Hernandez
- *3D-Printed prosthetics roll off the presses*, S. J. Bhatia, S. Sharma

Sitografia

- amfg.ai, *3D Printing support structures: A complete guide*
- selltek.it, *La stampa 3D nel settore automotive*

- animalventures.com, *Additive Manufacturing vs Traditional Manufacturing*
- manufacturinglounge.com, *Additive vs Subtractive Manufacturing: What's the difference?*
- manufacturinglounge.com, *The definitive guide to designing for Additive Manufacturing*
- it.wikipedia.org, *vari*
- gesrepair.com, *What are the pros and cons of Additive Manufacturing?*
- meccanicanews.com, *Additive Manufacturing*
- matmatch.com, *Polyamide 12*
- spilasers.com, *Practical Applications and uses for Additive Manufacturing*
- omnexus.specialchem.com, *3D Printing/Additive Manufacturing using polymers - Complete guide*
- prosilas.com, *Poliammide*
- 3erp.com, *Rapid Prototyping Advantages and Applications*
- 3dhubs.com, *Automotive 3D Printing Applications*

Bibliografia

- *Metodi di scelta dei processi*, A. Forcellese
- *Lavorazione per asportazione di truciolo*, N. Scuor
- *Plastics for Orthotics & Prosthetics*, Curbell Plastics