



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Fabbricazione Additiva

A.a. 2021/2022

Sessione di Laurea ottobre 2022

**Progettazione di componenti per
carrozzina a comando vocale tramite
Generative Design**

Relatori:

Stefano Pastorelli
Giorgio Chiandussi

Candidati:

Fabio Gibin
Matricola S288679

SOMMARIO

Il Generative Design è lo stile tipico di componenti meccanici ottenuti tramite le tecniche di Fabbricazione Additiva.

Sebbene tali processi siano utilizzati prevalentemente in ambito automotive e aerospaziale, note le regole che stanno alla base di una corretta progettazione, è possibile sfruttarne i vantaggi anche per applicazioni meno comuni.

È questo il caso del lavoro trattato in questa relazione, in cui verranno riprogettati tre componenti distinti, destinati ad essere montati su una carrozzina a comando vocale.

Inizialmente verrà trattata una parte introduttiva, il cui proposito è quello di fornire una panoramica generale sulle tecnologie più importanti e diffuse in ambito industriale, sia per metalli, sia per polimeri. A tal proposito, verranno analizzati il principio di funzionamento, la tipologia dei vari materiali (polvere, filamento, resina..), nonché i vantaggi e i limiti di ogni tecnica di Additive Manufacturing.

In seguito, arrivando alla parte più sostanziosa del lavoro, verrà eseguita la riprogettazione vera e propria di ciascun componente della carrozzina, partendo dalla geometria iniziale, ed analizzandone le specifiche di progetto, così come anche le problematiche a cui sono soggetti. Per ogni particolare si cercherà di imporre degli obiettivi (massimizzazione prima frequenza propria), dei vincoli (coefficiente di sicurezza minimo), comprendere quale materiale sia più idoneo per la progettazione in ottica di un Generative Design.

Verrà inoltre proposta un'ipotesi di messa in macchina, ovvero come disporre l'oggetto sul piatto di stampa, ricercando le inclinazioni ottimali, trattando adeguatamente le strutture di supporto per limitare l'utilizzo del materiale e per dare origine ad un componente ben solidale alla piattaforma di base.

In conclusione, al termine dei vari progetti, verrà eseguito un prototipo concettuale in acido polilattico, anche detto PLA, tramite la stampa 3D a filamento (*Fused Deposition Modelling*), anche come campione illustrativo del lavoro svolto e dei risultati ottenuti.

INDICE

SOMMARIO	3
INDICE	4
INTRODUZIONE	7
1 TECNICHE DI FABBRICAZIONE ADDITIVA	9
1.1 Tecniche principali per materiali metallici	11
1.1.1 Selective Laser Melting	11
1.1.2 Electron Beam Melting	15
1.2 Tecniche principali per materiali polimerici.....	18
1.2.1 Fused Deposition Modelling	18
1.2.2 Selective Laser Sintering	22
2 CARROZZINA A COMANDO VOCALE	25
2.1 Funzionalità e condizioni d'uso.....	25
2.2 Componenti elettronici	25
2.3 Componenti meccanici.....	26
3 STAFFA PER PORTA TOF	27
3.1 Descrizione componente originale	27
3.1.1 Funzionalità e specifiche di progetto.....	27
3.1.2 Problematiche e criticità	28
3.2 Analisi strutturale.....	29
3.2.1 Definizione delle condizioni di carico.....	29
3.2.2 Risultati analisi statica.....	32
3.3 Riprogettazione per Additive Manufacturing.....	34
3.3.1 Obiettivi e vincoli	34
3.3.2 Defeaturing	34
3.3.3 Definizione Design Space	35
3.3.4 Scelta del materiale.....	36
3.3.5 Ottimizzazione topologica	38
3.3.6 Ricostruzione Nurbs e generazione solido.....	43
3.4 Analisi risultati.....	50
3.5 Messa in macchina	55
3.6 Considerazioni finali	59
4 PORTA TELECAMERA.....	61

4.1 Geometria originale	61
4.1.1 Funzionalità	61
4.1.2 Aspetti critici	63
4.2 Analisi fem componente originale	64
4.2.1 Condizioni di carico	64
4.2.2 Risultati analisi	66
4.3 Processo di riprogettazione	68
4.3.1 Definizione obiettivi	68
4.3.2 Operazione di defeaturing	69
4.3.3 Definizione zone di progettazione	69
4.3.4 Ottimizzazione topologica	70
4.3.5 Generazione PolyNurbs	71
4.4 Analisi fem risultati	73
4.5 Ipotesi messa in macchina	75
4.6 Considerazioni finali	80
5 PORTA TOF ANTERIORE.....	82
5.1 Topologia originale.....	82
5.1.1 Specifiche di progetto	82
5.1.2 Aspetti critici	84
5.2 Studio fea topologia originale.....	85
5.2.1 Condizioni di carico	85
5.2.2 Risultati analisi	86
5.3 Scelta del materiale.....	87
5.3.1 Fornitori.....	87
5.3.2 Focus prove d’impatto	88
5.4 Riprogettazione per AM.....	91
5.4.1 Obiettivi e vincoli	91
5.4.2 Semplificazione geometria.....	91
5.4.3 Design e no design space	92
5.4.4 Ottimizzazione topologica	94
5.4.5 Generazione PolyNurbs	95
5.4.6 Analisi risultati.....	97
5.5 Messa in macchina.....	102
5.6 Considerazioni conclusive	104
6 CONCLUSIONI.....	105
7 BIBLIOGRAFIA.....	106

8 INDICE FIGURE.....	108
9 INDICE TABELLE.....	111
RINGRAZIAMENTI.....	112

INTRODUZIONE

Questa relazione si propone di descrivere lo sviluppo, le tecniche e i risultati ottenuti durante le diverse fasi di riprogettazione per successiva produzione mediante tecniche di Fabbricazione Additiva, di una serie di casi studio legati ad un prodotto ideato dalla start up *Alba Robot*.

Si tratta di un progetto innovativo, ovvero una carrozzina a comando vocale, la cui idea è nata dall'esigenza di permettere anche alle persone a ridotta mobilità di ritrovare la propria indipendenza, di muoversi autonomamente in *facilities* quali ospedali, aeroporti, musei.

L'obiettivo principale di questo prodotto è dunque quello di sfruttare l'intelligenza artificiale e gli assistenti vocali per creare una vera e propria flotta di veicoli a guida autonoma, interconnessi online nelle strutture sanitarie e pubbliche.

Per realizzare questo veicolo partendo da zero, si sono sviluppate varie versioni, implementando a poco a poco la funzionalità, l'ergonomia, la rigidità strutturale della suddetta carrozzina. Attualmente si è giunti al prototipo di IV generazione, illustrata in Figura 1.



Figura 1: carrozzina Alba Robot IV generazione

Tra i vari collaboratori e partners di *Alba Robot*, vi è anche la *R.Zenti*, un'azienda meccanica di Pianezza che si occupa, tra le varie mansioni, anche di stampa 3D. A tal proposito, trattandosi di un prototipo, molti dei componenti della carrozzina visibili nell'immagine precedente sono stati realizzati mediante la tecnica di Fabbricazione Additiva del *Fused Deposition Modelling*, ovvero quella che probabilmente è la più semplice e diffusa delle tecnologie che utilizzano i materiali polimerici.

La necessità di ricorrere a questo tipo di processo sta nel fatto che, attualmente, le geometrie non sono ancora totalmente definite, anzi è molto frequente apportare modifiche ai vari componenti, in base alle esigenze del caso. Di conseguenza, la stampa 3D si dimostra essere la soluzione ideale per limitare i costi, che lieviterebbero significativamente nel caso in cui, ad ogni

variazione di forma, fosse necessario ripetere le lavorazioni per asportazione di truciolo, oppure riprogettare uno stampo per lo stampaggio a iniezione.

Lo scopo principale di tali particolari in PLA è quello di supportare i componenti elettronici: per automatizzare i movimenti della sedia a rotelle, infatti, è necessaria una serie di telecamere e sensori, opportunamente collegati all'impianto elettrico, in grado di recepire gli ostacoli presenti nello spazio circostante.

Riguardo al modello di carrozzina attuale, la IV generazione appunto, sono state integrate delle piastre nere in alluminio sulle quali è stato possibile montare l'insieme dei vari componenti stampati in plastica, e che hanno permesso di implementare notevolmente la rigidità globale del prototipo.

Tuttavia, nel modello precedente, quello di III generazione, il ruolo di tali piastre era sostituito da una struttura a profilo tubolare anch'essa stampata in PLA mediante tecniche additive. Da qui si può intuire come la rigidità fosse notevolmente inferiore rispetto al modello attuale, a causa della differenza di modulo elastico tra plastica e metallo, compromettendo la stabilità di alcuni dei componenti appena discussi.

Ecco dunque che nasce la necessità di analizzare alcune delle geometrie, modificandone il design e implementandone le prestazioni in termini meccanici, grazie alle potenzialità dell'Additive Manufacturing.

Per la riprogettazione dei vari particolari verranno utilizzati i seguenti software:

1. Altair Inspire 2021;
2. Autodesk Fusion 360;
3. Autodesk Netfabb;

1 TECNICHE DI FABBRICAZIONE ADDITIVA

Le varie tecnologie di Fabbricazione Additiva sono molto diverse tra loro, in base al tipo di materiale, alla tipologia di sorgente energetica, fino alla qualità superficiale del prodotto ottenuto.

Tuttavia, è possibile identificare un denominatore comune, indipendentemente da tutti questi parametri. Nello specifico, per trattare un componente mediante tecniche additive è necessario partire dal file *.stl*, acronimo di *Standard Triangle Language* oppure *Standard Tessellation Language*, che consiste nella suddivisione del modello tridimensionale dell'oggetto, realizzato ad esempio da un software CAD, in una mesh triangolare che ne ripropone le superfici.

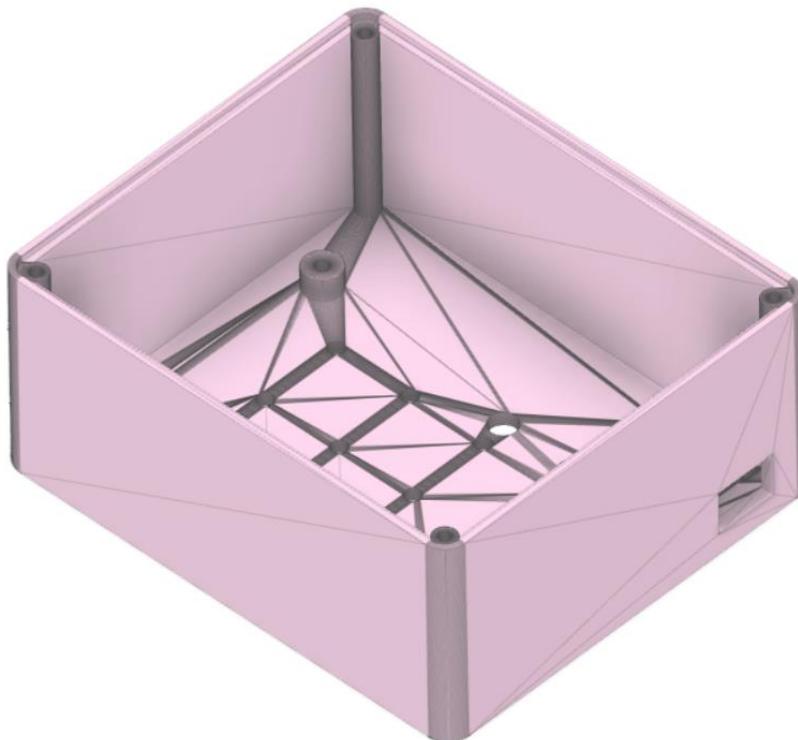


Figura 2: esempio file stl

In base alla dimensione di questi triangoli, che può essere più o meno piccola, è possibile garantire rispettivamente una maggiore precisione oppure una rappresentazione meno fedele del modello 3D. Come è possibile evincere dalla *Figura 22*, le zone più critiche non sono tanto le facce piane, in cui sono sufficienti pochi, grossi triangoli, ma piuttosto le zone curve, nelle quali necessariamente occorreranno triangoli più piccoli ed una tessellazione più fitta.

In qualunque caso, la generazione della mesh darà sempre luogo ad una certa percentuale di errore, la cosiddetta *sfaccettatura*, dovuta al fatto che i triangoli sono una geometria bidimensionale, mentre l'oggetto destinato alla stampa è tridimensionale. Di conseguenza si avrà uno scostamento di forma, anche se minimo, nella generazione del file *.stl*.

Inoltre, è opportuno tenere sempre conto della dimensione del suddetto documento: una mesh eccessivamente fitta, ovvero caratterizzata da triangoli molto piccoli e molto numerosi, è sinonimo di un *stl* estremamente pesante, che può mettere a dura prova le capacità del computer, piuttosto che della macchina che effettivamente stamperà il componente.

Per questo motivo è sempre buona pratica cercare di trovare il compromesso migliore che garantisca una buona qualità, senza eccessive sfaccettature, rappresentando il più fedelmente possibile il modello 3D, ma contemporaneamente evitando di generare un file troppo pesante. Successivamente alla realizzazione dei triangoli, l'altro fattore comune a tutte le tecniche di Fabbricazione Additiva è lo *slicing*, ovvero l'operazione in seguito alla quale l'oggetto viene diviso in "fette", in inglese "*slices*" appunto. Ciò è necessario in quanto, la fase di stampa vera e propria è costituita dalla realizzazione di singoli strati, *layer* lungo l'asse di costruzione, solitamente identificato con l'asse z.

Il software che esegue lo *slicing* è chiamato *slicer*, ed ha il compito primario di generare il file *.gcode*, ovvero una tipologia di linguaggio ISO comprensibile dalla macchina. In altre parole, il *gcode* permette di tradurre il percorso teorico di stampa, piuttosto che quello dell'utensile nelle macchine CNC ad asportazione di truciolo, in effettivi movimenti fisici.

Inoltre, durante la fase di *slicing* è possibile regolare, a seconda del tipo di tecnologia, una serie di parametri tra i quali, ad esempio, la temperatura del piatto di stampa, lo spessore del singolo layer, la velocità di stampa, la generazione dei supporti, la distanza tra due impulsi laser...

Di seguito si riporta la Figura 3, che mostra un esempio di *slicing* effettuato per un particolare destinato alla stampa tramite la tecnologia a polimeri FDM, di cui si parlerà nei capitoli successivi.

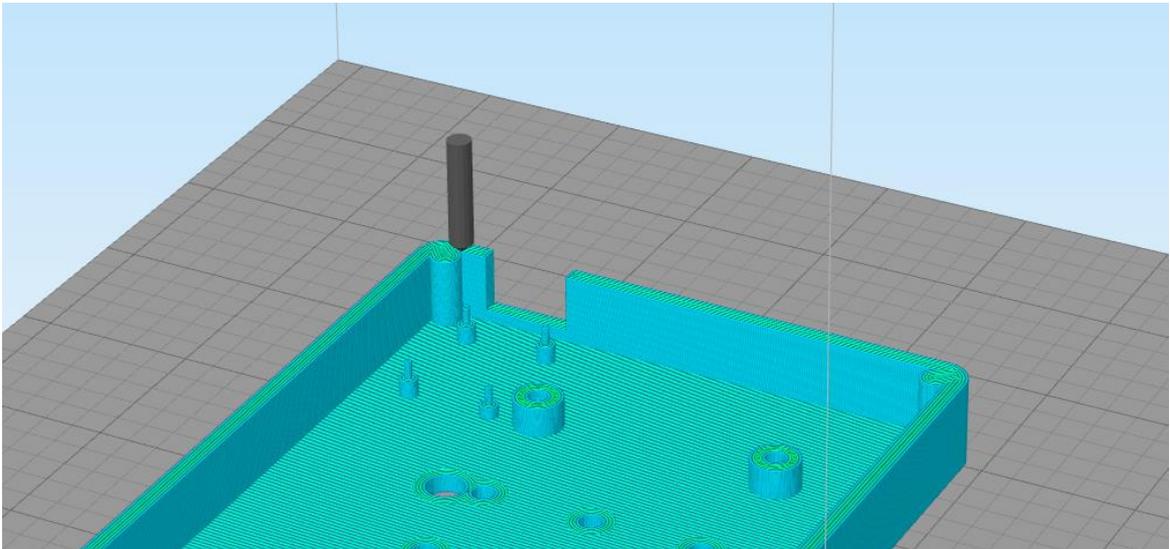


Figura 3: esempio di slicing

1.1 Tecniche principali per materiali metallici

1.1.1 Selective Laser Melting

La tecnologia più importante e probabilmente più conosciuta per i materiali metallici è il *Selective Laser Melting (SLM)*. Si tratta di una tecnica che basa il suo funzionamento sul cosiddetto *letto di polvere*. Per maggiore chiarezza si rimanda alla Figura 4 di seguito.

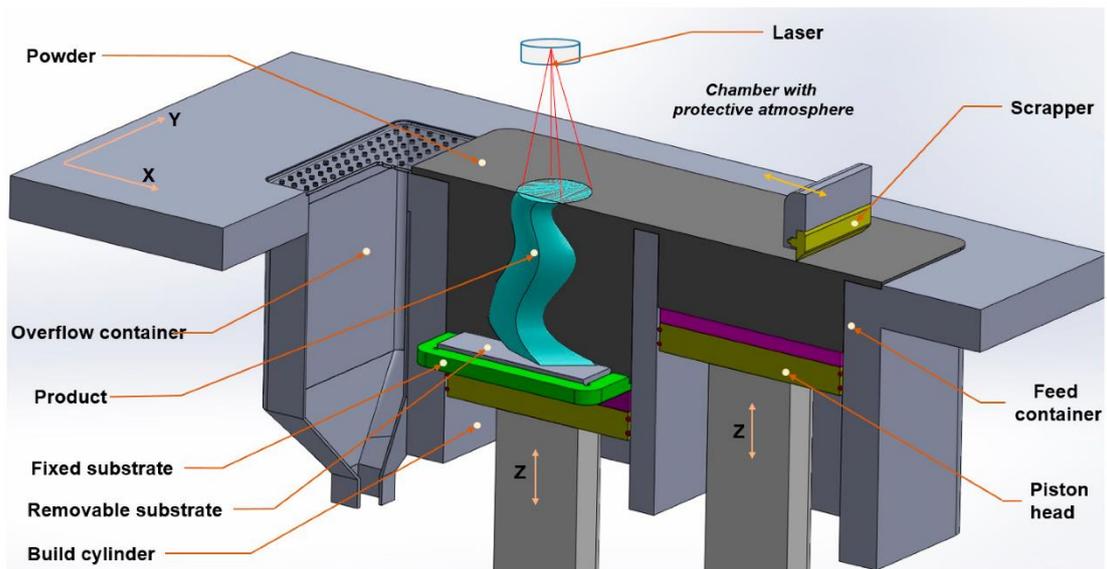


Figura 4: illustrazione processo SLM

Il processo inizia con il riempimento della camera principale con la materia prima, ovvero la polvere metallica. Quest'ultima viene spinta in superficie da un pistone, ed in seguito viene stesa in modo uniforme sulla piattaforma di stampa grazie ad una racla, simile ad una lama. Al termine della *build platform*, l'eccesso della polvere cade in un contenitore di recupero, per essere riutilizzata per la realizzazione di job successivi.

La fonte energetica in questo tipo di tecnologia è una sorgente laser CO₂ da 200 W ^[1] la quale, orientata tramite un'apposita lente, è indirizzata sullo strato di polvere ed è in grado di portare oltre la temperatura di fusione le singole particelle di materiale metallico della sola sezione interessata. Il processo di fusione e successiva solidificazione è talmente rapido che durante l'intero processo il gradiente di temperatura è dell'ordine dei 10⁶ gradi/s. ^[2]

Dal momento che la fase di raffreddamento è così rapida, il *Laser Powder Bed Fusion* (altro modo di indicare la stessa tecnica) è da considerarsi processo freddo.

Al termine della realizzazione del primo layer, la piattaforma di costruzione si abbassa lungo l'asse z, in modo tale da far ricominciare l'intero processo.

Nel *Selective Laser Melting* la camera di costruzione è mantenuta ad una pressione inferiore di quella atmosferica, sotto un gas inerte protettivo, come azoto o argon, per evitare ogni tipologia di reazione chimica tra polvere e ossigeno. ^[3]

Al termine della realizzazione dell'ultimo layer, la camera di lavoro viene aperta, il job estratto e il grosso della polvere in eccesso rimossa manualmente tramite un pennello, mentre le parti più difficili da rimuovere vengono aspirate da un aspirapolvere. Trattandosi di una tecnologia fredda, tale polvere in eccesso è semplice da rimuovere, scivola via senza opporre troppa resistenza (Figura 5), a differenza del processo di *EBM*, che verrà trattato nel capitolo successivo

Per quanto riguarda la risoluzione, ovvero il grado di dettaglio, tra le metodologie basate sulla polvere metallica, la tecnica SLM è quella che permette di avere una qualità superficiale ed un grado di dettaglio migliori rispetto alle altre tecnologie. Infatti, i singoli layers hanno uno spessore compreso tra i 15 ed i 45 μm , in base anche alla casa produttrice dei macchinari. ^[4]

Tuttavia, è importante precisare che i componenti ottenuti in seguito ad un processo di Additive Manufacturing sono sempre dei semilavorati, dunque non è possibile evitare un'adeguata finitura superficiale, soprattutto nelle zone di accoppiamento, critiche per un corretto comportamento funzionale dell'oggetto. In queste stesse zone è anzi necessario prevedere addirittura un sovrametallo pari a 1 mm di spessore, che solitamente viene rimosso sotto forma di truciolo mediante macchine CNC, in maniera tale da rispettare tutte le tolleranze richieste.



Figura 5: estrazione job e rimozione eccesso polvere

Oltre alla qualità superficiale, occorre anche tenere conto delle strutture di supporto: si tratta di veri e propri sostegni, il cui compito è quello di:

1. sostenere le parti sporgenti del corpo, che altrimenti tenderebbero a sprofondare nel letto di polvere;
2. collegare l'oggetto stampato alla piattaforma di costruzione, in modo tale da garantire ulteriore rigidità al sistema, ed evitare il distacco dalla medesima piattaforma. ^[3]

Al termine del processo additivo, i supporti possono essere staccati dalla base grazie all'ausilio di uno scalpello, mentre per rimuoverli dall'oggetto di solito si ricorre all'elettroerosione a filo. Per quanto riguarda i materiali utilizzati per *l*pbf, invece, essi possono essere:

1. Leghe di alluminio: la più usata è la *AlSi10Mg*, costituita dal 10% di silicio e dal 0.3% di magnesio. Il silicio è un elemento di lega fondamentale quando si ha a che fare con l'alluminio, poiché conferisce maggiore bagnabilità del materiale quando si trova allo stato liquido. Di conseguenza, in fase di solidificazione si riducono al minimo le porosità e la possibilità di formazione di cricche. L'*AlSi10Mg* è molto leggero e viene spesso usato nel settore aerospaziale. Le polveri per Additive di questa lega hanno un prezzo pari a circa 150 €/kg. ^[5]
2. Leghe di titanio: *Ti6Al4V*, contenente il 6% di alluminio ed il 4% di vanadio nella propria composizione chimica. Si tratta di un materiale caratterizzato da proprietà specifiche molto elevate, ovvero è in grado di garantire alte resistenze in rapporto alla propria densità, che è circa la metà di quella dell'acciaio. Inoltre, garantisce un buon

mantenimento delle proprietà meccaniche fino a 700°C. Per questo motivo anche il *Ti64* viene spesso usato in campo aeronautico. Le polveri sono estremamente costose, e raggiungono prezzi pari a 300 €/kg. [6]

3. Leghe ferrose: le leghe di acciaio sono meno usate nel settore additivo, in quanto spesso non giustificano l'alto valore aggiunto della tecnologia. Sono le polveri più economiche (60 €/kg), ma sono anche quelle che paradossalmente danno luogo a maggiori criticità con la tecnica *SLM*. Infatti, non è possibile utilizzare acciai ad alto tenore di carbonio, in quanto le alte temperature tendono a formare carburi infragilenti. Di solito ci si limita a leghe con massimo il 4% di carbonio. Ciononostante, le leghe ferrose più utilizzate sono la 316L e la 17-4 PH, con 17% di cromo, 4% di nichel, rafforzate per precipitazione. [7]
4. Superleghe a base nichel: le più diffuse sono l'*Inconel 718* e l'*Inconel 625*. Il nichel è un materiale più pesante dell'acciaio, impiegato di solito quando è necessaria un'ottima resistenza alle alte temperature. A differenza del titanio, che resiste fino a 700°C e poi tende ad ossidarsi, le leghe a base nichel tendono a passivarsi superficialmente, e generano tutta una serie di precipitati che possono essere sia benefici per la resistenza, sia dannosi. [8] Infatti, queste leghe sono soggette a numerosi studi per catalogare l'entità di queste seconde fasi, influenzate anche dalla tipologia di trattamento termico.

Una questione fondamentale riguarda i parametri di processo durante il *Selective Laser Melting*. Nelle tecnologie convenzionali, basate sull'asportazione di truciolo, tali parametri sono solamente tre: profondità di passata, velocità di taglio e velocità di avanzamento. Regolando opportunamente queste grandezze, è possibile ottimizzare la finitura superficiale del pezzo, piuttosto che i tempi di taglio.

Le tecnologie additive, non basandosi sull'asportazione di truciolo, hanno dei parametri completamente diversi, legati prevalentemente alla sorgente energetica.

Il primo è sicuramente la potenza del laser: gli studi effettuati sui campioni hanno dimostrato che i valori più comuni si aggirano tra i 160 W e i 200 W.

Il secondo parametro è il tempo di esposizione al raggio: per supplire a potenze minori è possibile prolungare il tempo di esposizione per generare un adeguato pozzetto di fusione. Valori tipici sono compresi in un range tra 60 e 150 µs.

Infine, vi sono la *Hatch Distance* e la *Point Distance*, misurate in µm, che rappresentano gli "interassi" tra i vari impulsi del laser (Figura 6). [9]

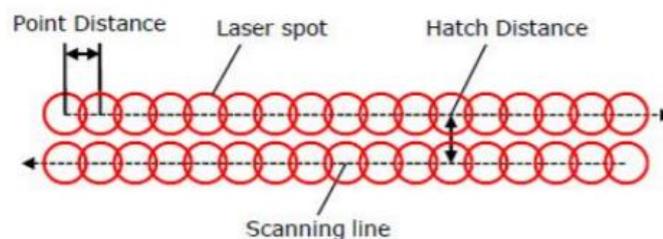


Figura 6: point distance e hatch distance

Solitamente valori ottimali di HD e PD sono rispettivamente 80-150 µm e 50-80 µm.

Per quanto riguarda pregi e limiti, il principale vantaggio della tecnica *Lpbf* sta nel fatto che, a causa dell'elevatissimo gradiente termico tra fusione e raffreddamento, la microstruttura che ne consegue è estremamente fine (arrivando sino a 500 nm), [10] e di conseguenza il materiale garantisce la massima resistenza possibile allo snervamento, ovviamente nei limiti della tipologia di materiale. Inoltre, impostando correttamente tutti i parametri di processo visti in precedenza,

è possibile ottenere una densità pari al 100%, ovvero scompaiono quasi del tutto le porosità, che rappresentano probabili fonti di cricche, dannose per le proprietà meccaniche. Il limite allo snervamento è dunque prossimo alla *Ultimate Tensile Strength*.^[11]

I componenti che si ottengono tramite *SLM*, quindi, garantiscono una resistenza statica migliore di quelli ottenuti, ad esempio, per fonderia, in quanto durante la colata, si formano sempre porosità più o meno grandi che infragiliscono l'oggetto.

Bisogna però prestare attenzione, in quanto avere un grano eccessivamente fine, può risultare anche controproducente, in primo luogo per le applicazioni ad elevate temperature, le quali (idealmente) richiederebbero un monocristallo, in modo che il corpo non sia soggetto a creep, ed in secondo luogo a causa delle tensioni residue.

Queste ultime sono le tensioni a cui è sottoposto il componente stampato in seguito al rapido raffreddamento. Il gradiente termico improvviso tende a contrarre l'oggetto,^[12] il quale, se non fosse per l'ausilio dei supporti, sarebbe propenso a staccarsi dalla *build platform*, oppure in alternativa a deformarsi plasticamente.

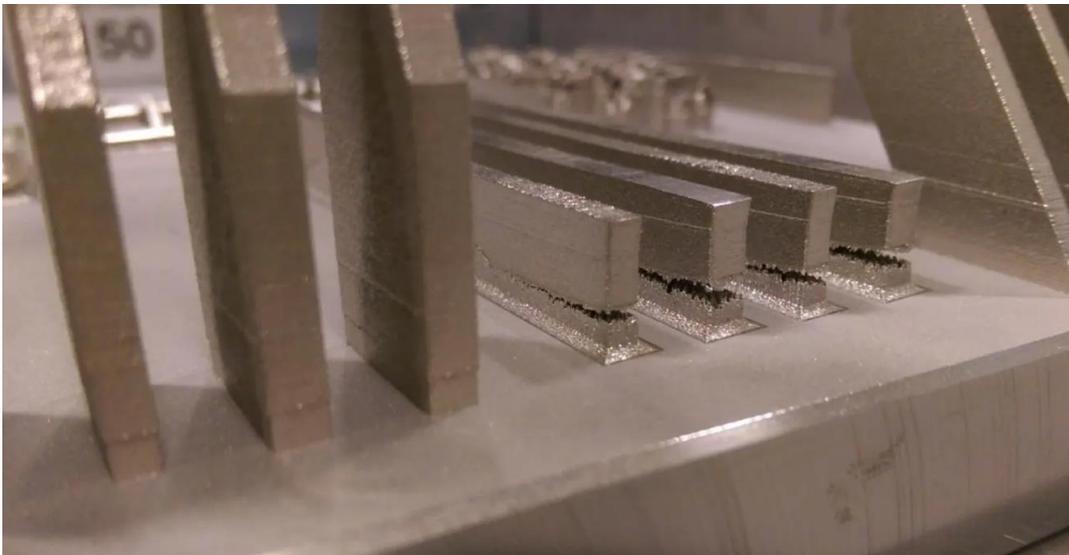


Figura 7: effetto stress residui

La Figura 7 è un esempio di rottura catastrofica in seguito alle tensioni residue. Per questo motivo, il concetto fondamentale sta nel fatto che occorre sempre trovare un adeguato compromesso tra finezza del grano e proprietà meccaniche, intervenendo spesso con un trattamento termico di *distensione (stress relieving)* in forno, a temperature variabili in base al tipo di materiale, per attenuare gli stress residui, ingrossare leggermente la microstruttura, e garantire un comportamento più duttile.^[13]

1.1.2 Electron Beam Melting

Altra tecnologia a letto di polvere è l'*Electron Beam Melting (EBM)*. A differenza dell'*Lpbf*, in questo caso la fonte energetica non è un laser, bensì un fascio elettronico generato da un filamento di tungsteno riscaldato oltre i 2000°C. Gli elettroni vengono accelerati, mediante una differenza di potenziale, in un'apposita colonna, raggiungendo velocità prossime al 40% di quella della luce.

Il fascio elettronico passa attraverso due lenti consecutive. La prima è chiamata *lente di focalizzazione* ed ha lo scopo di *focalizzare* oppure *defocalizzare* gli elettroni sul piatto di stampa, per una ragione fondamentale che verrà spiegata nelle righe successive. La seconda lente invece è una *lente di deflessione*, e serve per direzionare il fascio in una determinata zona del letto di polvere, al fine di portare a fusione la sezione interessata (Figura 8).

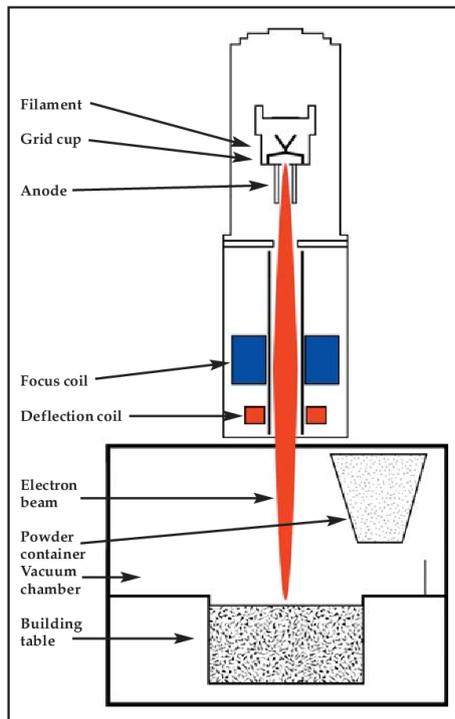


Figura 8: processo EBM

Diversamente da quanto visto in precedenza, il calore non viene assorbito dalla polvere sotto forma di fotoni, ma è frutto di una trasformazione di energia, in particolare partendo dall'energia cinetica degli elettroni in movimento, a seguito dell'impatto sul letto di polvere si genera energia termica. Questa ragione, unita al fatto che il fascio elettronico ha una potenza maggiore rispetto al laser (3 kW vs 200 W), fa sì che la profondità di penetrazione sia maggiore rispetto all'*SLM*.

Il processo produttivo inizia con la distensione dello strato di polvere: dalla tramoggia in cui è raccolta, le particelle metalliche vengono depositate sul piatto di costruzione e il singolo layer viene livellato per renderlo uniforme. Successivamente, grazie alla lente di focalizzazione, si *pre-riscalda* il letto di polvere. Questo passaggio è estremamente importante, in quanto è alla base di gran parte delle differenze che ci sono rispetto al processo con il laser. ^[14]

Per realizzare tale riscaldamento, la prima lente, quella di focalizzazione appunto, "apre" il fascio di elettroni, estendendolo a tutta la superficie del letto. In questo modo è possibile riscaldare l'intero layer depositato, raggiungendo temperature prossime a quella di fusione, in genere 800-900°C.

Terminato il riscaldamento, la lente ri-focalizza il fascio, concentrandolo nuovamente in una zona ristretta. A questo punto interviene la seconda lente, quella di deflessione, che orienta gli elettroni sulla sezione da fondere.

Conclusa questa fase, la piattaforma di costruzione si abbassa lungo l'asse verticale z, ed il ciclo ricomincia, fino ad ottenere il job completo.

Il processo *EBM*, pertanto, non è un processo freddo come *SLM*, ma è caldo: il job ha bisogno di diverse ore per raffreddarsi. La ragione per cui è necessario preriscaldare la polvere è di tipo fisico. Si è detto infatti che il calore deriva dall'energia cinetica del fascio elettronico. Se le particelle metalliche non fossero calde, all'atto dell'impatto tra elettroni e polvere, si genererebbe una sorta di "esplosione", una vera e propria nuvola di polvere, causata dall'energia

cinetica che si trasferisce sul metallo. Avendo invece un letto riscaldato, tale effetto è attenuato. Per immaginare meglio la situazione, si immagini un pallone che impatta prima una piccola collinetta di sabbia asciutta, ed in seguito una di sabbia bagnata. Naturalmente si solleva minor quantità di polvere nel secondo caso, quindi la sabbia bagnata, umida è analoga alle particelle metalliche preriscaldate.

La sorgente energetica a fascio elettronico porta con sé anche un'altra differenza rispetto al caso precedente. L'intero processo *EBM* deve avvenire in vuoto: non è più sufficiente un'atmosfera inerte, ma occorre un vuoto più spinto, fino a 10^{-5} Pa nel cannone elettronico e 10^{-3} nella camera di lavoro. Questa necessità si spiega col fatto che, diversamente dai fotoni, gli elettroni hanno una propria massa e se non vi fosse un vuoto spinto, si rischierebbe che la loro traiettoria venga deviata dall'interazione atomica con le molecole presenti lungo il percorso. ^[15]

Al termine della deposizione dell'ultimo layer, come detto, inizia fase di raffreddamento dell'intera camera di lavoro. Concluso tale processo, è possibile estrarre il job e rimuovere la polvere in eccesso tramite sabbiatura, che consiste nello spruzzare polvere ad alta pressione. Ciò è necessario in quanto, a seguito del riscaldamento delle particelle metalliche, queste tendono a sinterizzare, compattandosi e aderendo le une con le altre. Non è sufficiente usare un semplice pennello come nel caso di *Lpbf*. La polvere usata per praticare la sabbiatura deve essere necessariamente la stessa usata durante la costruzione, al fine di evitare ogni tipo di contaminazione (Figura 9). Questi materiali, per svolgere correttamente il loro lavoro, infatti, devono rispettare requisiti molto rigorosi, a partire dal fatto che le particelle devono essere di forma sferica, per agevolare un corretto scorrimento quando viene depositato il layer.



Figura 9: processo di sabbiatura

Per quanto riguarda la qualità superficiale, l'*Electron Beam Melting* presenta una rugosità maggiore rispetto al caso del laser. La polvere di partenza è più grossolana (tra 45 e 100 μm) ed anche lo spessore del layer aumenta, arrivando ad un range compreso tra i 100 e 200 μm . ^[16]

Ne consegue che i particolari ottenuti tramite questa tecnologia, sono molto più ruvidi, porosi rispetto all'*SLM*.

Inoltre, a causa del preriscaldamento della polvere, la microstruttura si presenta con un grano di dimensioni maggiori. Questo per via del fatto che il gradiente termico è molto meno accentuato:

il processo a caldo permette di mantenere pressoché costante la temperatura, con un raffreddamento che impiega anche dieci ore a completarsi. I componenti realizzati per *EBM* hanno dunque una maggiore predisposizione per la resistenza a creep, mentre risulta leggermente penalizzata la resistenza allo snervamento, con una differenza più marcata tra *YS* e *UTS*. Come nel caso precedente, i particolari ottenuti con questa tecnologia sono sempre dei semilavorati, quindi bisogna tenere conto del processo di finitura superficiale e del sovrametallo per le zone di accoppiamento, pari a 2 mm. ^[17] Inoltre, possono essere sempre necessari opportuni trattamenti termici, come solubilizzazione e invecchiamento, tenendo però presente che, proprio grazie al preriscaldamento della polvere, questa subisce già in macchina un trattamento termico preliminare, che può risultare particolarmente utile se il componente finale deve resistere a temperature elevate.

In quanto alle tipologie di materiali:

1. Leghe di titanio: anche in questo caso è molto usata la *Ti6Al4V*.
2. Superleghe a base nichel: *Inconel 718*, *Inconel 625*, utilizzate per una buona resistenza a creep. Questa tipologia di materiale si ricollega perfettamente al discorso fatto in precedenza: essendo leghe che variano la loro resistenza e le loro proprietà meccaniche in base alla tipologia di trattamento termico, trattandole tramite *EBM* è possibile accelerare questo passaggio, effettuando già un trattamento preliminare in camera di lavoro, a causa del lento raffreddamento unito alle alte temperature.
3. Leghe di alluminio: solitamente non sono trattate tramite questa tecnologia, per via del fatto che, essendo l'alluminio un materiale bassofondente, tende ad evaporare quando è investito dal potente fascio elettronico.
4. Leghe ferrose: si possono trattare ma non sono molto diffuse, dal momento che le proprietà ferromagnetiche di questa tipologia di materiali causerebbero un'interazione tra i propri elettroni e quelli del fascio, i quali verrebbero deviati, compromettendo il buon esito della stampa. ^[18]
5. *TiAl4822*: è un materiale intermetallico molto interessante, con composizione chimica pari al 48% di alluminio, 48% di titanio, 2% cromo e 2% niobio. Ha una resistenza specifica maggiore delle superleghe, a causa della sua leggerezza (densità pari a 4 g/cm³). Ha la particolarità di essere utilizzato per realizzare le palette di turbina degli ultimi stadi del ciclo turbogas, dove pressione e temperatura sono notevolmente più basse rispetto ai primi stadi (700°C vs 1200°C). ^[19]

Infine, la tecnica additiva *Electron Beam Melting* è ancora più complessa dell'*Lpbf* per ciò che concerne i parametri di processo. Infatti, per trovare il miglior compromesso in termini di densità, resistenza, coesione dei layers, assenza di porosità, granulometria, occorre tenere conto di decine di parametri diversi. Per citare alcuni esempi, oltre a quelli discussi per il caso precedente, sono altrettanto significativi: corrente e diametro del fascio elettronico, temperatura della piastra di costruzione, spessore del layer, temperatura di preriscaldamento, strategia di scansione.

1.2 Tecniche principali per materiali polimerici

1.2.1 Fused Deposition Modelling

È probabilmente la tecnica più diffusa, più semplice e più economica, che permette da un lato di realizzare prototipi funzionali, dall'altro di sviluppare nuovi polimeri ingegneristici, sempre più performanti.

La tecnica del *Fused Deposition Modelling (FDM)* si basa sull'utilizzo di un materiale polimerico termoplastico, avvolto in apposite bobine e inserito in un canale che conduce ad un ugello. Quest'ultimo, durante la fase di stampa, si riscalda e fonde il polimero, inizialmente allo stato solido, rendendolo morbido e viscoso. Una volta fuoriuscito dall'ugello, il materiale si deposita sul piatto di stampa, che può essere magnetico, flessibile, in vetro, oppure in alluminio, e si realizza una sezione dopo l'altra, sino a saturare l'altezza z richiesta. ^[20]

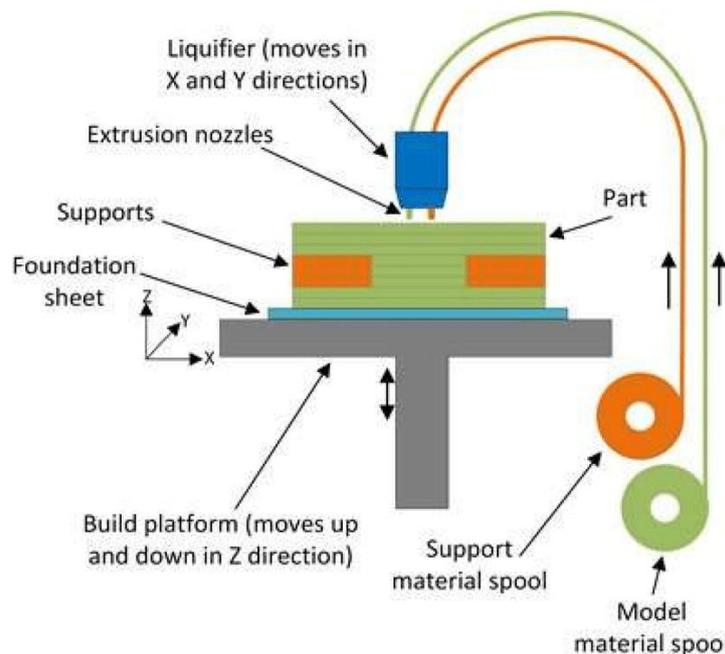


Figura 10: schematizzazione FDM

Al termine della stampa, è sempre buona pratica lasciare raffreddare il componente per qualche minuto, dopodiché è possibile rimuoverlo dalla piattaforma di costruzione a mano, oppure con l'ausilio di una spatola e un martello.

Così come accadeva per le tecnologie dei metalli, anche in questo caso sono necessari le strutture di supporto, al fine di sostenere le zone sporgenti. La Figura 10 mostra che il materiale utilizzato per realizzare i supporti è diverso da quello usato per stampare il componente, ma in realtà ciò non accade necessariamente, bensì dipende dal modello di stampante.

Infatti, sul mercato esistono macchine *FDM* per ogni fascia di prezzo, in base alle dimensioni, alla qualità hardware e software, ai materiali che può trattare. Ecco di seguito alcune delle caratteristiche più importanti per questo tipo di tecnologia: ^[21]

1. Tipologia di struttura. Esistono macchine per il *Fused Deposition Modelling* a struttura *cartesiana*, oppure di tipo *Delta*, ovvero i cosiddetti *Delta Robot*. Nel primo caso il piatto di stampa e l'estrusore compiono delle traslazioni lungo i tre assi xyz . Non sono presenti

dei bracci di collegamento con la struttura, ed i movimenti avvengono tramite cinghie o viti trapezoidali. Nella struttura di tipo *Delta*, invece, l'estrusore è collegato al reso della struttura tramite dei bracci, i quali possono muoversi sia traslando lungo l'asse *z*, tramite giunti prismatici, sia compiere delle rotazioni attraverso dei giunti rotativi. Così facendo, l'ugello riesce a raggiungere tutte le zone del piatto di stampa, muovendosi sul piano *xy*. Una struttura cartesiana ha assi più rigidi, è più semplice da calibrare e predilige la stampa di geometrie più larghe alla base, ma penalizza l'altezza massima raggiungibile. La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra le due tipologie di stampanti.



Figura 11: struttura delta



Figura 12: struttura cartesiana

2. Supporti solubili. In alcuni modelli vi è la possibilità di avere due estrusori differenti per depositare il materiale principale e quello di supporto. A differenza delle macchine mono estrusore, in cui eliminare i supporti può risultare un'operazione non banale, specie per i materiali più performanti, avere due ugelli distinti da un lato allunga inevitabilmente i tempi di stampa, ma dall'altro offre la possibilità di realizzare supporti solubili in soluzioni acquose. Pertanto, non è necessario preoccuparsi dell'accessibilità alle strutture di sostegno tramite pinze o scalpelli: è sufficiente immergere il corpo nella soluzione ed attendere lo scioglimento dei supporti.
3. Tipologia di camera di lavoro. Le varie macchine per *FDM* possono avere una camera aperta oppure chiusa. Nel primo caso, l'ambiente circostante comunica direttamente con l'oggetto in fase di stampa. Ciò significa che non è fattibile, ad esempio, riscaldare la camera, in quanto il calore tenderebbe a disperdersi. Questa tipologia di macchine si ha quando si stampano materiali poco performanti da un punto di vista meccanico, come il PLA (di cui si parlerà nelle righe successive). Dall'altra parte invece, si ha la camera chiusa, la quale permette di isolare il componente, garantendo allo stesso tempo un raffreddamento più lento e un gradiente termico meno marcato, da cui ne consegue uno stress residuo meno significativo. È necessaria quando si trattano materiali che emettono fumi in fase di stampa, come l'ABS.

4. Asse z indipendente. Solitamente, nella maggior parte dei macchinari, quando si stampano più oggetti contemporaneamente, il file *.gcode* prevede che si realizzi il primo layer per tutti i componenti, poi il secondo...e così via fino all'ultimo. Tuttavia, esistono alcune stampanti che presentano il cosiddetto asse z *indipendente*, ovvero si realizza dapprima l'intera geometria del primo oggetto, poi si stampa tutto il secondo particolare... fino all'ultimo componente del job. La motivazione che sta alla base di questa scelta riguarda la qualità del pezzo finito: quando si stampa il primo layer per tutti i particolari, quando l'estrusore ritorna al punto di partenza per iniziare lo strato successivo, quello sottostante ha già iniziato a raffreddarsi, e ne risente la resistenza meccanica finale. Con il secondo approccio, invece, ogni strato aderisce perfettamente a quello precedente, ancora caldo e pastoso, garantendo la massima resistenza possibile, compatibilmente col tipo di materiale.
5. *FDM e CNC*. Esistono alcune tipologie di macchine con una piccola fresa a controllo numerico incorporata (Figura 14). Quest'ultima si trova all'interno della camera di lavoro e offre la possibilità di levigare l'oggetto stampato per garantire la massima qualità superficiale possibile. Solitamente la fresa dispone di cinque utensili intercambiabili, in maniera tale che durante la prima passata si esegua una sgrossatura, mentre nella successiva una finitura. Così facendo si accorciano notevolmente i tempi di produzione, in quanto non è più necessario ricercare bassi livelli di rugosità tramite spessori dei layer troppo ridotti.

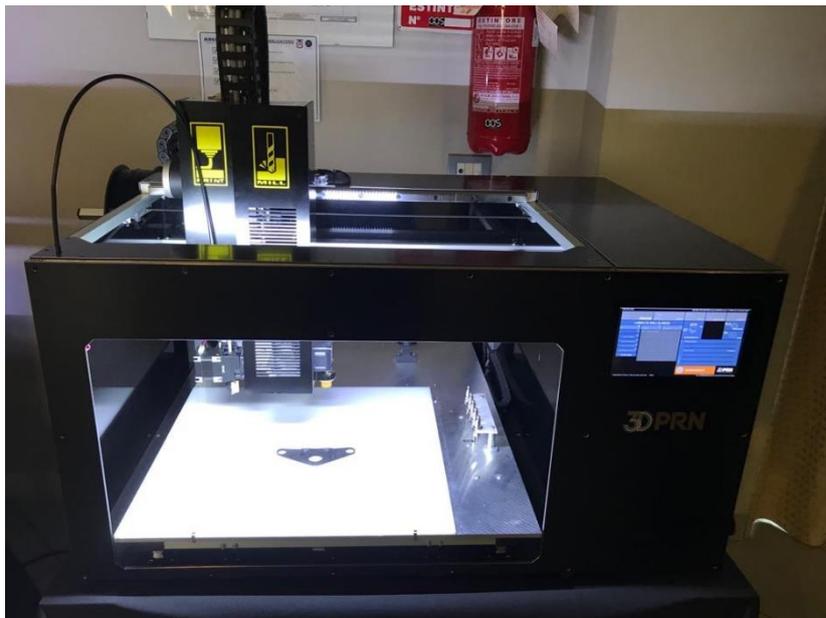


Figura 13: FDM con fresa incorporata

I materiali trattabili con questo tipo di tecnologia sono molteplici, in base alle proprietà meccaniche e alla facilità di stampa. Per comprendere se un polimero sia facilmente stampabile o no, occorre tenere conto di un parametro fondamentale: la *temperatura di transizione vetrosa* (T_g).^[22] Tale grandezza è la temperatura alla quale il materiale inizia a rammollirsi, diventare viscoso e pastoso. Microscopicamente, le catene che costituiscono il polimero sono propense a scorrere le une sulle altre. Oltre la T_g , il materiale plastico tende invece a diventare progressivamente più fluido, sino a raggiungere la temperatura di fusione (T_m). Questo discorso

vale però soltanto per i termoplastici, che possono essere fusi e riciclati. I termoindurenti invece, nel momento in cui si supera la temperatura critica T_g , si degradano e diventano inutilizzabili. La difficoltà a cui si va incontro per stampare correttamente tramite *FDM*, trova riscontro nella vicinanza tra le due temperature appena discusse. In particolare, se un polimero possiede una T_g ed una T_m molto ravvicinate, sarà molto difficile utilizzarlo nel processo additivo, e occorreranno macchine molto performanti. Allo stesso tempo, però, questo è sinonimo di proprietà meccaniche elevate. Viceversa, se il materiale ha un intervallo di temperatura ampio tra T_g e T_m , la difficoltà sarà minore, così come la resistenza meccanica. Pertanto, è sempre opportuno valutare la scelta del polimero in base alle proprie necessità.

I materiali più comuni per la tecnica dell'*FDM* sono: ^[23]

1. PLA: è il più comune, anche per usi amatoriali. È facile da trattare ma non garantisce alte resistenze. Viene estruso alla temperatura di 210-215°C, è atossico e non produce fumi;
2. ABS: offre maggiori proprietà meccaniche, ma genera fumi tossici, motivo per cui solitamente si tratta con stampanti a camera chiusa. La temperatura di questo materiale, in fase di estrusione, si aggira intorno a 250°C;
3. PC: il policarbonato è molto usato quando viene richiesta una buona resistenza all'impatto. Inoltre, offre il vantaggio di avere poco ritiro in fase di raffreddamento. Per trattarlo tramite questa tecnologia servono già delle stampanti più performanti.
4. PEEK: è un polimero che solitamente viene trattato tramite laser, a causa dell'estrema difficoltà nella stampa. Occorrono macchine altamente performanti per ottenere particolari da questo polimero, che tuttavia presenta proprietà meccaniche simili a quelle dell'alluminio.
5. PVA: così come il PLA, ha il vantaggio di essere biodegradabile, e non produce fumi durante la stampa. Le sue proprietà meccaniche sono leggermente superiori a quelle dell'acido polilattico, ma ha il limite di essere igroscopico;
6. TPU: si tratta di un elastomero a base di poliuretano, utilizzato per realizzare prodotti morbidi e flessibili. È altamente resistente alle abrasioni e sopporta le radiazioni dei raggi UV, quindi è possibile realizzare oggetti destinati all'esterno.
7. Polimeri compositi: per il *Fused Deposition Modelling* esistono anche particolari materiali rinforzati con carbonio, vetro, kevlar, alluminio.

1.2.2 Selective Laser Sintering

Un'altra tecnologia che permette di realizzare componenti con una buona resistenza meccanica è la *Sinterizzazione Selettiva Laser (SLS)*. Il principio di funzionamento è il medesimo dell'*SLM* per i metalli. Anche in questo caso, infatti, si parte da un materiale polimerico sotto forma di polvere, precedentemente setacciata (Figura 14).

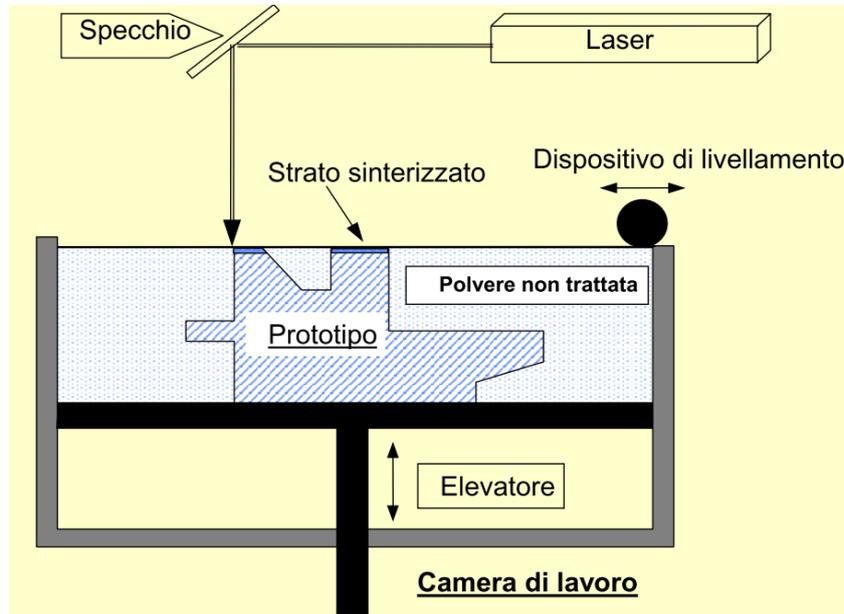


Figura 14: processo di Selective Laser Sintering

La macchina è costituita da una piattaforma di costruzione mobile lungo l'asse z, sulla quale viene depositato lo strato di polvere mediante un dispositivo di livellamento. Il materiale in eccesso viene raccolto in un'apposita camera, in modo tale da permetterne il recupero. Come per l'EBM, la tecnologia in questione, è di tipo caldo, infatti la camera di lavoro è mantenuta ad una temperatura prossima a quella di fusione del polimero, in modo tale da minimizzare i ritiri durante la solidificazione.

Dopo aver depositato il layer, si passa alla fase di sinterizzazione vera e propria: il laser a CO₂, avente una potenza variabile tra i 30 W e i 50 W in base al modello di macchina, fornisce l'energia necessaria per fare in modo che le particelle aderiscano le une alle altre. In realtà, non si arriva ad una vera e propria fusione, come accadeva nel caso dei metalli, ma piuttosto avviene una *sinterizzazione*, come suggerisce il nome stesso. [24]

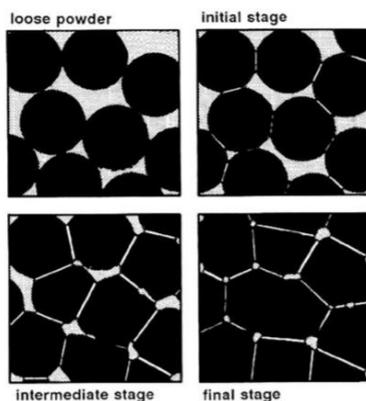


Figura 15: sinterizzazione

Per capire la differenza tra i due processi, occorre osservare la Figura 15. Inizialmente le particelle di polvere sono distanziate tra di loro, e non aderiscono le une alle altre. Nel momento in cui viene fornito calore, i granelli si saldano tra di loro, rimanendo uniti. Naturalmente senza il pozzetto di fusione ci sarà sempre un certo grado di porosità, ed una tendenza ad una maggiore fragilità, tuttavia questa tecnica è utile perché non necessita di alcun post-trattamento particolare, ad eccezione della pulizia finale dalla polvere in eccesso.

Dopo aver realizzato il primo layer, la piattaforma si abbassa ed il ciclo ricomincia depositando un nuovo strato di polvere.

Un'analogia con la *Fusione Selettiva Laser* è la copertura della camera tramite gas inerte, in particolare azoto, utilizzato per evitare l'ossidazione della polvere.

Al termine del job, occorre attendere il tempo necessario al raffreddamento, per fare in modo di evitare possibili deformazioni, dopodiché è possibile estrarre l'intera piattaforma e ripulire i componenti dalla polvere in eccesso. Per rimuovere la parte più sostanziosa di materiale si ricorre all'uso di un pennello, mentre per eliminare le particelle di polvere più difficili è possibile usare aria compressa unita a piccole sferette di vetro. La polvere scartata può essere poi riciclata per stampe successive, mischiandola con del materiale vergine.

Il grande vantaggio di questa tecnologia sta però nella sua elevata produttività.

In primo luogo, infatti, non sono necessarie le strutture di supporto: il letto di polvere è già esso stesso un supporto e, data la ridotta densità del materiale polimerico rispetto al metallo, l'oggetto non tende a sprofondare durante il processo additivo.

In secondo luogo, l'SLS permette di saturare completamente l'asse z, ovvero offre la possibilità di inserire all'interno del job un oggetto sopra l'altro. Solitamente questo non è fattibile per le altre tecnologie, perché c'è sempre bisogno dei supporti, che andrebbero ad attaccarsi non più alla piattaforma di base, bensì all'oggetto sottostante, compromettendone la qualità superficiale. Infine, per massimizzare ulteriormente la produttività, il processo consente di poter inserire nuovi componenti nello *slicer* anche a job avviato. Questo permette di evitare pause non necessarie: la macchina continua a lavorare fintanto che non si giunge al termine dell'ultimo componente inserito, o della polvere (Figura 16).

Un altro aspetto vantaggioso della *Sinterizzazione Selettiva Laser* è il fatto di permettere di trattare con maggiore facilità tutti quei materiali performanti che, tramite *Fused Deposition Modelling*, erano critici a causa dell'intervallo ristretto tra la temperatura di transizione vetrosa e quella di fusione. Con questa tecnica, invece, pur rimanendo un parametro critico, la temperatura viene controllata con maggior precisione, anche grazie alla sorgente laser, la quale è, come detto in precedenza, di potenza inferiore se paragonata all'SLM.

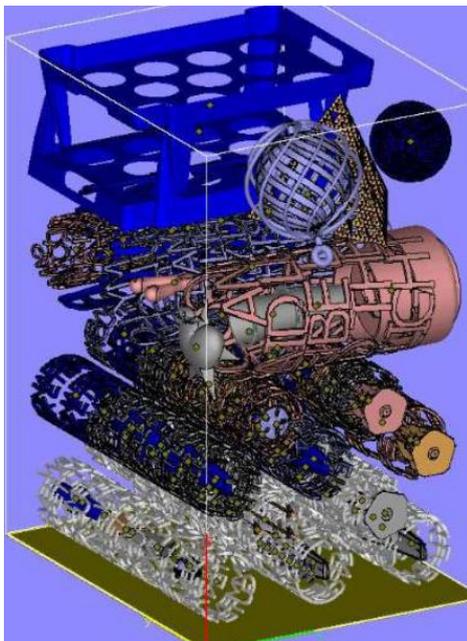


Figura 16: esempio slicing SLS

Questo si spiega col fatto che un materiale polimerico non ha la stessa temperatura di fusione di un metallo. Pertanto, se si usasse il laser utilizzato per fondere le polveri metalliche, il polimero arriverebbe ben oltre la fusione, tenderebbe a degradarsi, e si sprecherebbe energia inutilmente.

Per quanto riguarda la qualità superficiale, la tecnica SLS garantisce buone prestazioni in termini di tolleranze dimensionali e rugosità; lo spessore del layer varia in un intervallo compreso tra 80 μm e 150 μm . [25]

Un limite della tecnologia, invece, è la ridotta disponibilità di materiali. Pur esistendo molte varietà di polimeri, infatti, quelli disponibili in forma di polvere sono molto meno di quelli a filamento avvolti in bobine. Senza dubbio, il materiale più performante è il *peek*, già trattato nella tecnica del *Fused Deposition Modelling*, che garantisce proprietà meccaniche simili all'alluminio. Per fare un confronto, il polimero in questione presenta una resistenza allo snervamento oltre i 95 Mpa, un allungamento a rottura del 20% e un mantenimento delle proprietà per uso prolungato ad alte temperature fino a 260°C^[44], mentre la lega *Al 2011 T3* ha un YS di 210 Mpa e un allungamento a rottura del 12%.^[45]

Altro polimero termoplastico utilizzato è sicuramente il nylon, sotto forma di *poliammide 12 (Pa 12)*. Si tratta di un materiale molto usato per la realizzazione di prototipi funzionali, che presenta uno snervamento di 48 Mpa ed una buona flessibilità. La Figura 17 mostra un esempio di un componente automotive riprogettato in ottica Additive Manufacturing, realizzato tramite questa tecnologia, con il polimero appena discusso.



Figura 17: prototipo funzionale realizzato tramite SLS, materiale: PA 12

2 CARROZZINA A COMANDO VOCALE

2.1 Funzionalità e condizioni d'uso

Come accennato nella parte introduttiva, il progetto *Alba* nasce con l'obiettivo di creare un veicolo in grado di orientarsi e muoversi in modo autonomo all'interno di strutture pubbliche come aeroporti e ospedali. Gli utilizzatori a cui è destinato questo tipo di tecnologia sono i soggetti con *ridotta* mobilità articolare, in quanto, se quest'ultima fosse totalmente assente, non si potrebbe comunque fare a meno di una persona di supporto. In tal caso, dunque, è evidente che il fine ultimo del progetto, ovvero la garanzia di indipendenza ed autonomia, verrebbe compromesso, ponendo di fatto sullo stesso piano la carrozzina a comando vocale e quella manuale tradizionale.

Per realizzare il progetto, e creare un mezzo autonomo, capace di muoversi opportunamente negli ambienti indoor pubblici, si è partiti da una normale sedia a rotelle commerciale, aggiungendo a poco a poco una serie di componenti elettronici in grado di osservare e ascoltare ciò che accade nell'ambiente circostante. Volendo fare una metafora, è possibile affermare che tali oggetti siano di fatto il cervello, gli occhi e le orecchie del veicolo, senza i quali non sarebbero possibili gli spostamenti automatici.

Dall'altra parte, però, se è vero che è necessario introdurre l'elettronica per i motivi appena discussi, non si può prescindere dall'introduzione di alcuni nuovi componenti meccanici, i quali fungono da vero e proprio sostegno proprio per la sensoristica appena discussa.

2.2 Componenti elettronici

Di seguito si riporta una breve analisi di quali siano, nel dettaglio, questi componenti elettronici e quale sia il loro ruolo specifico.

1. Batteria: fornisce l'energia necessaria all'alimentazione di tutto l'impianto elettrico. È posta sotto la seduta del passeggero, contenuta da un'apposita scatola di alluminio;
2. Motori: sono posti direttamente sulle ruote e consentono gli spostamenti del mezzo;
3. Assistente vocale: grazie a questo componente, che per inciso non è altro che *Alexa* di Amazon, viene recepito l'input vocale dell'utente, il quale viene comunicato ai motori per effettuare lo spostamento;
4. Telecamere: fondamentali per rilevare oggetti e ostacoli posti nell'ambiente circostante, le telecamere sono poste ai quattro angoli della carrozzina, in maniera tale da avere una panoramica totale di ciò che è presente nelle vicinanze. Nello specifico, vi sono due tipologie di videocamere, la prima fatta a schedina, denominata *tof*, dalle dimensioni di $52 \times 14 \text{ mm}^2$ ^[47], e la seconda sviluppata da *Intel*, modello *RealSense™ D435*, $90 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$,^[48]
5. Sensori a ultrasuoni: strumenti che completano il ruolo delle telecamere.



Figura 18: schedina tof



Figura 19: telecamera Intel D435

2.3 Componenti meccanici

Per quanto riguarda i supporti meccanici, invece, essi sono stati realizzati tramite il *Fused Deposition Modelling*, utilizzando l'acido polilattico come materiale. Un vantaggio di questa tipologia di processo sta nella leggerezza che caratterizza i suoi prodotti: sfruttando il nido d'ape per il riempimento del volume interno, infatti, i componenti ottenuti tramite FDM sono in grado di mantenere una massa estremamente contenuta, rispetto al medesimo volume ottenuto per stampaggio a iniezione.

Per citare qualche esempio, si elencano alcuni dei particolari plastici più importanti:

1. Porta tof: sede per le schedine tof, discusse nel capitolo precedente. Ve ne sono due tipologie completamente differenti, quello anteriore e quello posteriore (destri e sinistri);
2. Porta telecamera: supporto per telecamera D435, montato sulla parte anteriore della carrozzina.
3. Staffa Porta tof: è l'oggetto sul quale è montato il porta tof
4. Porta joystick: componente di contenimento per il joystick di controllo manuale.



Figura 20: porta joystick

3 STAFFA PER PORTA TOF

Terminata l'introduzione preliminare sulle tecniche più interessanti per la Fabbricazione Additiva, è ora possibile trattare la parte di riprogettazione vera e propria, che consiste nell'analizzare tre componenti della carrozzina e riadattarli in ottica di un *Generative Design*.

Il primo particolare è la *Staffa porta tof*.

3.1 Descrizione componente originale

3.1.1 Funzionalità e specifiche di progetto

Innanzitutto, occorre capire a cosa serve l'oggetto ed esaminare le specifiche di progetto.

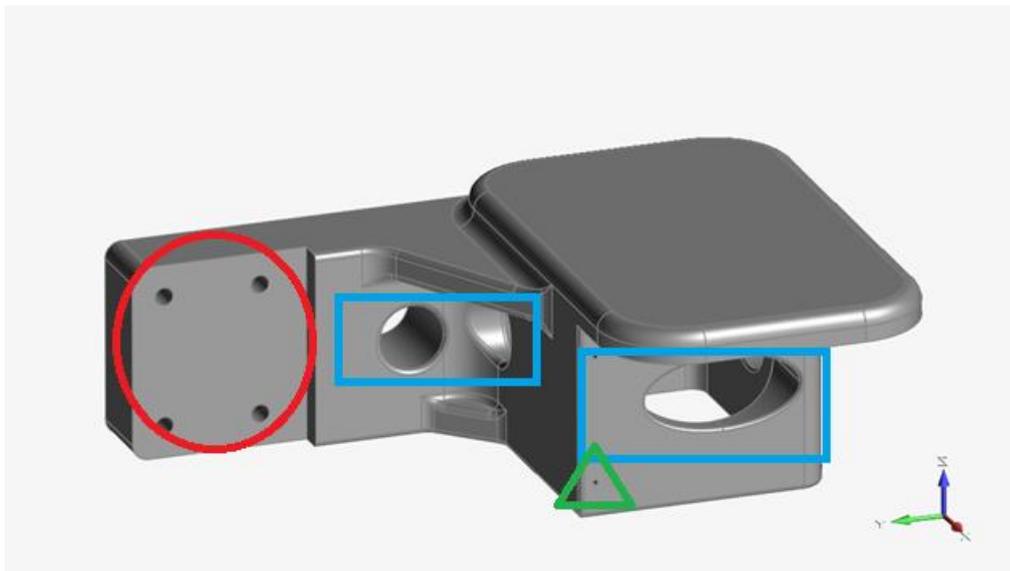


Figura 21: componente originale

In Figura 21 è riportata la geometria del componente originale: trattandosi di un prototipo funzionale, è stato realizzato in materiale polimerico, in particolare PLA, tramite stampa 3D.

Si nota subito la presenza di vari fori. In particolare, quelli cerchiati in rosso corrispondono ai fori di fissaggio sulla piastra di sostegno (M3), mentre quelli aventi diametro maggiore, riquadrati in colore blu, sono stati realizzati per permettere il passaggio dei cavi facenti parte dell'impianto elettrico.

Vi sono infine quattro prefori aventi diametro pari a 1.5 mm, uno dei quali è evidenziato dal triangolo verde, che hanno lo scopo di consentire il fissaggio dei porta tof.

In realtà i fori previsti a progetto sono filettati M3. Tuttavia, quando si realizzano zone di accoppiamento tramite processi additivi, è sempre buona pratica prevedere del materiale in eccesso, che poi può essere rimosso tramite utensili più precisi, in modo da garantire una filettatura ottimale. Nel caso specifico, trattandosi di un foro relativamente piccolo e di un materiale polimerico, si è optato per l'uso di viti autofilettanti. Il perforo serve quindi da guida per la punta della vite, la quale, sprofondando nella plastica, crea la madre vite.

Per quanto riguarda i tof, essi sono delle piccole schede elettroniche, di dimensioni 15 x 25 mm², nelle quali è presente una telecamera che raccoglie i dati visivi di input e li trasmette alla scatola elettrica principale, la quale a sua volta trasmette il segnale di movimento ai motori delle ruote.

L'insieme di tutte le telecamere costituisce "gli occhi" della carrozzina: senza di esse, non ci sarebbe modo di sapere la posizione dell'oggetto, né tantomeno di rilevare gli ostacoli presenti lungo il percorso.

Nell'immagine si possono anche notare due nervature laterali, che hanno il ruolo di rinforzo della struttura, ed uno scarico posto nella parte inferiore dell'oggetto, al fine di ridurre il peso.

Infine, la zona piana raccordata situata sulla parte superiore è stata progettata in questo modo per garantire una migliore estetica.

3.1.2 Problematiche e criticità

Durante i test della carrozzina ci si è resi conto che la staffa in questione era soggetta a problemi di vibrazioni. Il PLA infatti, non essendo uno dei termoplastici più performanti, non è in grado di garantire una rigidità ottimale e tendeva ad oscillare durante il movimento della sedia a rotelle. È possibile immaginarsi sin da subito quale sia la parte critica dell'oggetto: si tratta della più piccola sezione dopo i fori di fissaggio per le viti.

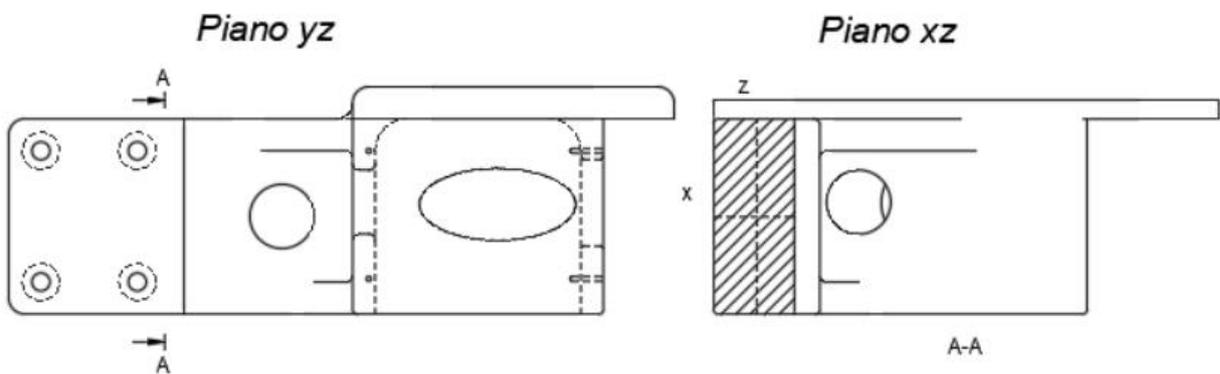


Figura 22: messa in tavola

Dalla messa in tavola dell'oggetto (Figura 22) si riesce a comprendere meglio quanto affermato nelle righe precedenti: la sezione A-A, evidenziata dalla campitura, è quella in corrispondenza della quale avviene un cambio di geometria, e tende a far flettere l'oggetto intorno agli assi x e z , per effetto del suo stesso peso, pur essendo ridotto. La conseguenza di questo comportamento è una freccia nella parte scarica del componente (ovvero la parte opposta rispetto ai fori di fissaggio), che modifica ad ogni movimento la posizione delle telecamere, le quali perdono il riferimento della posizione e compromettono il corretto funzionamento del prototipo.

Questo comportamento si verifica nonostante il prodotto finale sia destinato ad un ambiente indoor: occorre quindi realizzare una geometria in grado di sopperire a questa carenza di rigidità, pur mantenendo masse limitate.

Un secondo problema, invece, è rappresentato dall'ingombro del componente verso l'esterno. Per rendere chiaro il posizionamento dell'oggetto è opportuno osservare la Figura 23. Emerge chiaramente che il particolare è posto dietro alla ruota e lateralmente rispetto alla scatola nera del supporto batteria.

La stessa situazione si presenta dal lato destro: la staffa in questione è totalmente simmetrica rispetto al piano mediano della sedia, sia in termini di geometria, sia in termini di posizione.



Figura 23: montaggio staffa su carrozzina

La criticità risiede nei *carichi accidentali*: trattandosi di un oggetto leggero e poco resistente, un urto di qualsiasi tipo può portare il materiale a rottura, nella sezione in cui è maggiormente sollecitato. Durante i test effettuati nella sede di Alba Robot, questa problematica si è ripresentata in più occasioni: la staffa, essendo all'altezza degli stinchi, è spesso soggetta a urti involontari da parte della gamba, piuttosto che contro altri oggetti.

Ora, ad un primo impatto questo può risultare controintuitivo: se la carrozzina è stata ideata per essere autonoma e garantire indipendenza ai soggetti con ridotta mobilità, per quale motivo è necessaria una seconda persona che spinga il mezzo?

Tuttavia, occorre tenere conto di due aspetti fondamentali:

In primo luogo, se da una lato è vero che il progetto è nato con l'idea di garantire autonomia e sicurezza, è altrettanto vero che, in caso di necessità, piuttosto che di un malfunzionamento, la sedia deve essere in grado di funzionare come il modello classico, con l'accompagnatore di supporto alle spalle della persona con disabilità motorie.

Dall'altra parte, esistono una serie di circostanze in cui terze parti debbano spostare il mezzo manualmente, magari per riporlo nella locazione corretta al termine dell'utilizzo, o magari per stoccarlo in magazzino prima della consegna, oppure ancora durante lo stesso trasporto. In questi contesti, può capitare che la carrozzina subisca un urto accidentale sulla staffa porta tof, causandone la rottura.

Queste motivazioni, unite al fatto che si tratta di un progetto innovativo, ad alto valore aggiunto, giustificano la necessità di una riprogettazione, così come anche la ricerca di un design generativo, organico, free form.

3.2 Analisi strutturale

3.2.1 Definizione delle condizioni di carico

Per simulare un'analisi strutturale, al fine di verificare il comportamento dell'oggetto originale, è opportuno definire sia i vincoli, ovvero incastri, cerniere, carrelli e ogni altro mezzo di blocco di gradi di libertà, sia i carichi, ipotizzando diverse sollecitazioni in contesti differenti.

I risultati forniti indicheranno quale di queste condizioni sarà effettivamente la più critica, e quest'ultima diventerà la specifica di progetto principale, ovvero quella che, se rispettata, garantisce la resistenza del componente anche per tutte le altre situazioni.

Il primo step per eseguire un'analisi attendibile è impostare sul software di calcolo, ovvero *Altair Inspire*, le caratteristiche del materiale utilizzato. A tal proposito, come si è detto nelle pagine precedenti, la staffa originale è acido polilattico (PLA), ma poiché non compare nella libreria dei materiali del programma, è necessario inserirlo manualmente, con tutte le sue proprietà meccaniche. Quest'ultime sono riassunte nella Tabella 1. ^{[26] [27]}

PROPRIETÀ MECCANICHE PLA				
ρ [g/cm ³]	E [GPa]	YS (printed) [MPa]	ν [/]	YS (filo) [MPa]
1.24	2.5	40	0.36	57

Tabella 1: proprietà meccaniche materiale originale

È possibile notare che la tensione di snervamento del polimero stampato è inferiore a quella del medesimo materiale, ma avvolto in bobina sotto forma di filo. Questo comportamento è dovuto al fatto che, quando si analizza il filamento, il PLA è “continuo” per tutta la sua lunghezza e non ci sono indebolimenti. Quando si valutano le proprietà del polimero stampato invece, simulando una sollecitazione nella direzione di estrusione, che solitamente è indicata con z, lo snervamento avviene precocemente: in questo contesto, infatti, il polimero oppone resistenza grazie alla forza coesiva dei singoli layers, ma certamente è meno performante in termini meccanici rispetto al filo.

Occorre anche tenere conto dell’anisotropia del materiale a seguito della stampa: nei processi additivi, che si tratti di materiali metallici o polimerici, vi è sempre una differenza di prestazioni in base alla direzione del carico applicato. Solitamente si prende come riferimento proprio la direzione di costruzione z, al fine di essere il più conservativi possibile, poiché lungo x e y è meno rilevante l’effetto dei layers, e le proprietà meccaniche sono superiori.

Dopo aver inserito i dati del materiale sulla libreria di *Inspire*, occorre preoccuparsi della definizione dei vincoli. In questo caso specifico, la staffa porta toff è avvitata alla piastra di sostegno grazie quattro viti a testa svasata M5 (Figura 24).

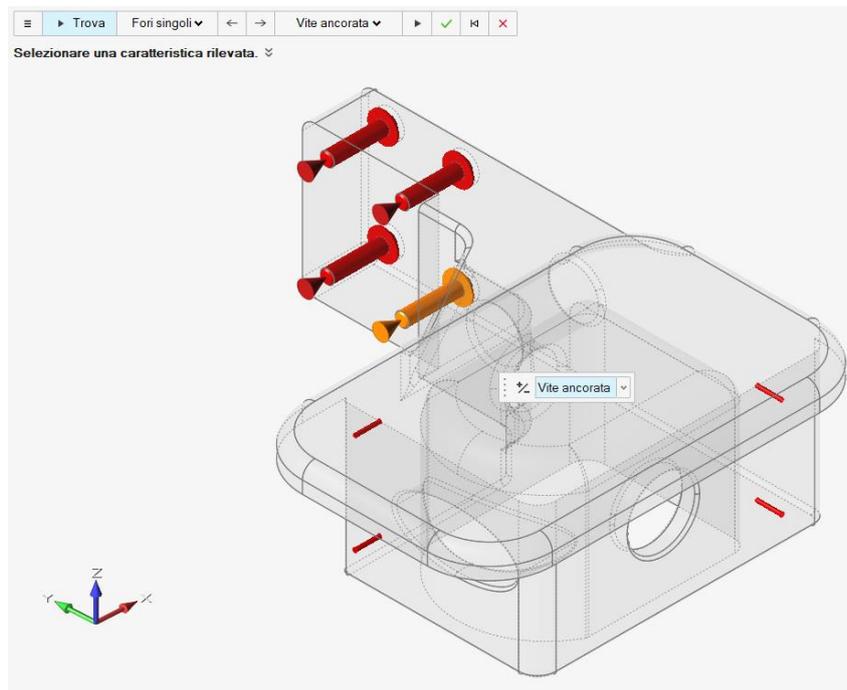


Figura 24: definizione vincoli

Successivamente è possibile determinare quali siano i carichi effettivamente applicati al corpo. Non conoscendo con esattezza il valore degli sforzi a cui è sottoposto il componente, dal momento che, come detto in precedenza, si tratta per la maggior parte di carichi accidentali, è buona pratica ipotizzare dei valori verosimili, che siano tuttavia conservativi.

Così facendo, al termine della progettazione, se l'oggetto sarà in grado di resistere a carichi simili, sicuramente svolgerà in modo corretto la sua funzione anche con sforzi inferiori.

Per determinare il reale valore della forza applicata, tuttavia, è necessario effettuare una rapida conversione. Si ricorda infatti, che trattandosi di carichi impreveduti, è molto probabile che essi avvengano sotto forma di urto. Ora, una forza che impatta contro un oggetto in un breve istante di tempo, sicuramente genererà un grande energia, che equivale ad una forza nettamente maggiore se si vuole simulare l'urto sotto forma di carico statico.

Per eseguire tale conversione occorre conoscere la massa del particolare soggetto all'urto, la sua velocità, ma soprattutto il tempo di decelerazione.

Anche in questo caso, si possono effettuare delle ipotesi coerenti con la realtà.

La conversione si basa sulla seguente relazione: ^[28]

$$F_i = \frac{m * v}{t_d}$$

in cui F_i rappresenta la forza di impatto che si vuole inserire nel modello di calcolo.

È noto, ad esempio, che la massa della carrozzina, comprensiva di telaio, batteria e tutti gli altri componenti, sia pari a 55 kg, e che durante l'impatto essa si concentri completamente sulla staffa porta tof. Inoltre, si immagina che il carico sia causato accidentalmente da un operatore durante il riposizionamento del mezzo negli appositi spazi, e che avvenga alla velocità massima di 6 km/h (1.67 m/s).

La decelerazione è improvvisa, e causa l'arresto immediato dell'oggetto in un lasso di tempo molto limitato: un valore tipico di Δt è 0.1 secondi.

Svolgendo il calcolo si ottiene una forza di impatto pari a 915 N.

Nel modello 3D, questo carico viene applicato nei punti di impatto più verosimili, nonché più critici, in varie direzioni per simulare la maggior parte dei casi possibili.

L'altra forza applicata è invece il peso di una persona che pone tutta la sua massa sulla parte piana della staffa. A differenza di quello calcolato precedentemente, questo è di tipo statico e pertanto non ha bisogno di conversioni.

Infine, per completezza, occorre inserire la forza peso dell'oggetto stesso, anche se è già possibile immaginare che essa sarà veramente poco influente rispetto agli altri carichi in gioco. A tal proposito è opportuno fare una precisazione. Dal momento che il componente è stato realizzato tramite *FDM*, la reale massa non è quella indicata nel modello CAD, in quanto nella stampa 3D si ha sempre un riempimento inferiore al 100%. In questo caso, ad esempio, simulando l'anteprima di stampa nello slicer, con un riempimento pari al 20%, la reale massa è pari a 264 grammi, ovvero 2.6 N.

Tuttavia, una volta definita la geometria definitiva, qualunque essa sia, nel caso in cui il materiale fosse plastico, è improbabile che il componente verrà realizzato tramite *FDM*. È molto più plausibile che si opterà per un processo di tipo convenzionale, ovvero lo stampaggio ad iniezione, il quale prevede riempimento unitario, come riportato nel modello CAD.

Carichi	Valori
Statici [N]	1000
Dinamici [N]	915

Tabella 2: carichi staffa porta tof

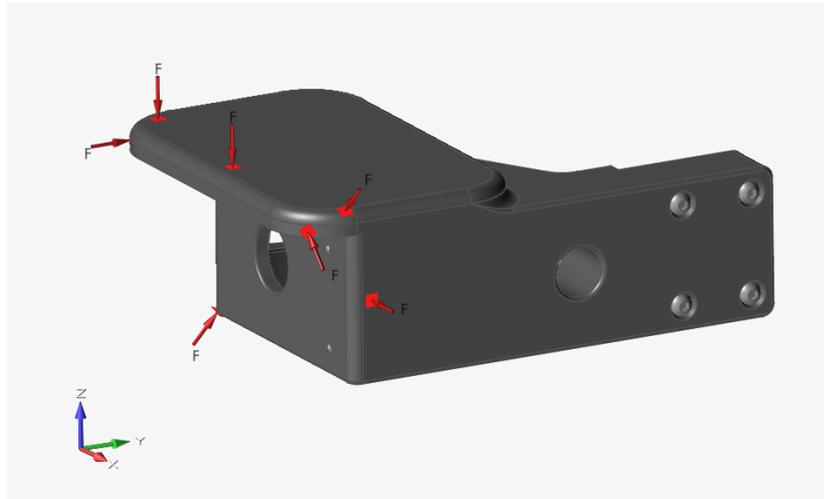


Figura 25: posizione carichi applicati

3.2.2 Risultati analisi statica

La simulazione eseguita su *Inspire* ha fornito risultati coerenti con quanto ci si aspettava: il materiale polimerico non soltanto dà luogo a frecce eccessive, compromettendo la posizione delle schedine tof, ma è anche soggetto a rottura nella sezione critica di cui si è discusso nelle pagine precedenti.

In particolare, le situazioni più critiche sono le seguenti:

1. Per quanto riguarda lo spostamento, la condizione di carico più onerosa è la numero 9: urto di 915 N applicato nel punto indicato in Figura 26. La staffa subisce una freccia massima pari a 5.4 mm in direzione -x, a 4.9 mm in direzione y e a 4.5 mm in direzione -z. Osservando l'immagine è possibile notare il perimetro del corpo indeformato, rappresentato in colore nero. Si precisa che in questo caso specifico non vi è alcun vincolo sulla freccia massima ammissibile: se ne riporta il valore solamente per completezza.
2. Per ciò che concerne il coefficiente di sicurezza, invece, occorre analizzare la condizione di carico numero 4: si tratta nuovamente di un urto accidentale, con lo stesso modulo della forza, ma punto di applicazione diametralmente opposto al primo. In questo caso la sezione più sollecitata arriva ad avere un coefficiente di sicurezza del valore di 0.9. Ciò significa che il materiale in quell'intorno sarà soggetto a snervamento, o peggio a rottura (Figura 27).

Riassunto dati input	Valori
Materiale	PLA
Spostamento massimo [mm]	5.4
Coefficiente di sicurezza minimo	0.9
Massa riempimento 20% (stampa 3D) [g]	264
Massa riempimento unitario (CAD) [g]	710
Volume [cm ³]	573

Tabella 3: dati input staffa originale

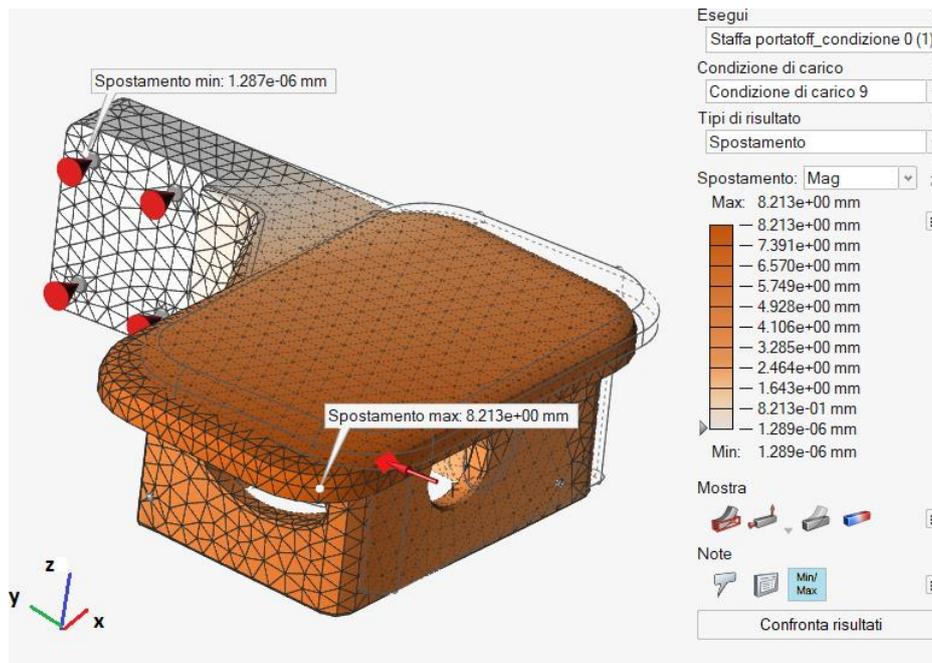


Figura 26: analisi spostamento massimo

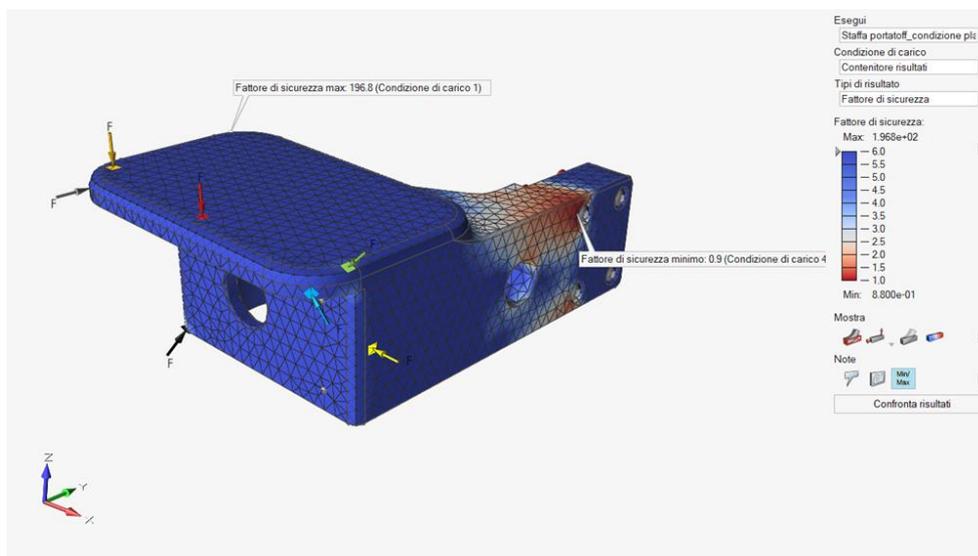


Figura 27: analisi CS minimo

Prima di passare alla parte di riprogettazione è opportuno specificare che l'analisi appena effettuata si riferisce ad un modello 3D pieno, mentre l'oggetto reale, come già discusso, presenta un riempimento del pari al 20%. Ciò tuttavia non pregiudica il nuovo progetto: sicuramente, se si è verificato che anche con il 100% del materiale, il componente non avrebbe resistito correttamente, diminuendo di 4/5 la quantità di PLA sicuramente il comportamento sarebbe stato ancor più catastrofico.

3.3 Riprogettazione per Additive Manufacturing

3.3.1 Obiettivi e vincoli

Dopo aver effettuato l'analisi statica della geometria di partenza, è possibile procedere con la riprogettazione vera e propria del componente. Avendo stabilito quali sono le criticità ed i valori di riferimento per quanto riguarda freccia e coefficiente di sicurezza, è possibile imporre degli obiettivi che "guideranno" la realizzazione del nuovo design.

A tal proposito, noti i problemi legati alle vibrazioni, la scelta più sensata è quella di imporre come obiettivo la massimizzazione della prima frequenza propria dell'oggetto, mentre come vincolo un coefficiente di sicurezza minimo pari a 1.2. Il componente, infatti, non svolge una funzione strutturale, pertanto è più vincolante un ottimo livello di rigidità, che eviti oscillazioni durante il moto della carrozzina, piuttosto che un coefficiente di sicurezza sovrastimato.

La geometria in grado di soddisfare i vincoli sin qui discussi, permetterà di garantire che l'oggetto mantenga la sua integrità in ognuna delle condizioni di carico ipotizzate nelle pagine precedenti. Allo stesso tempo, inoltre, si risolveranno le problematiche legate alle vibrazioni che compromettevano la posizione delle telecamere (Tabella 4).

Obiettivi	Vincoli
Massimizzazione prima frequenza propria	CS minimo: 1.2

Tabella 4: obiettivi e vincoli riprogettazione staffa

3.3.2 Defeaturing

Il primo passo per effettuare la riprogettazione per Additive Manufacturing è il cosiddetto *defeaturing*, che è il termine usato per indicare la rimozione delle *features*, ovvero delle lavorazioni secondarie incluse nella geometria originale.

In questo caso, le funzioni non indispensabili ai fini del design generativo sono, ad esempio, i raggi di raccordo, le nervature, i fori per il passaggio dei cavi elettrici, eventuali smussi.

In altre parole, in questa prima fase si esegue una semplificazione della geometria, in modo tale da agevolare l'elaborazione del software durante l'ottimizzazione topologica.

Il risultato ottenuto al termine di questo processo è quello mostrato nella Figura 28.

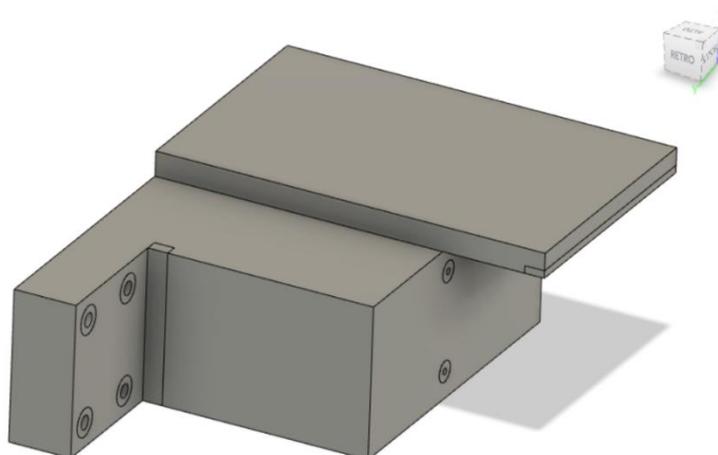


Figura 28: operazione di defeaturing

3.3.3 Definizione Design Space

Successivamente alla semplificazione della geometria iniziale, è di fondamentale importanza la definizione delle zone di progettazione. I software in grado di realizzare un *Generative Design* necessitano infatti di una distinzione tra le zone sulle quali sarà possibile modificare la topologia, e quelle che invece non possono variare. Queste ultime, solitamente si identificano con tutte quelle aree che garantiscono il montaggio o l'accoppiamento meccanico del componente sulla parte restante del complessivo. Un esempio tipico sono le sedi per cuscinetti, i fori per viti o bulloni, alloggiamenti per perni o dadi.

A tal proposito, nell'ambito dell'*Additive Manufacturing*, si parla di *Design Space* e *No Design Space*, che stanno ad indicare quali porzioni della geometria sono soggette, appunto, allo studio del nuovo design e quali invece dovranno rimanere uguali sino al termine della riprogettazione. Nel caso in questione, la staffa porta tof è costituita da una serie di fori filettati M3 per l'aggancio del porta tof situato nella parte posteriore, e dalle quattro fori passanti per il fissaggio del componente alla piastra motore.

Tuttavia, occorre precisare che le zone *No Design Space* non sono esclusivamente le zone di accoppiamento, ma anche quelle che *agevolano* il fissaggio stesso. Di solito è buona pratica identificare dei datum di riferimento, ovvero delle geometrie teoricamente esatte che permettono di garantire un corretto posizionamento dell'oggetto durante in montaggio, in termini di parallelismo e perpendicolarità rispetto ai piani di riferimento.

Osservando il design originale, è possibile identificare queste zone immaginandosi un ipotetico montaggio: la staffa viene *appoggiata* alla piastra mediante lo spessore mostrato in Figura 29; dopodiché è possibile movimentarla fino a quando non si trova l'allineamento coi fori di fissaggio.

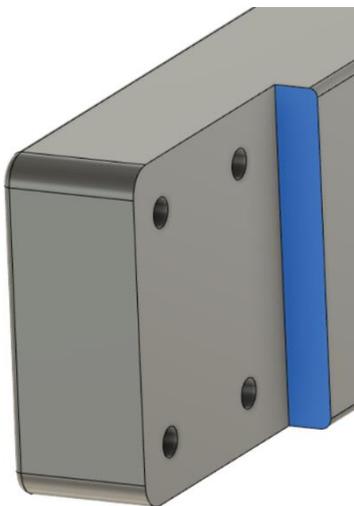


Figura 29: spessore originale per battuta su piastra motore

Non necessariamente la zona di non design deve avere un'altezza pari a quella originale: è accettabile anche un'estensione inferiore, ma il requisito fondamentale è che la superficie sia abbastanza ampia tale da permettere uno scorrimento significativo per garantire il fissaggio.

Nel caso in questione si è scelto di impostare una larghezza pari a 8 mm, un'altezza pari a 10 mm e uno spessore di 5 mm.

Un discorso analogo può essere fatto per l'accoppiamento con i porta tof: la parte piana inferiore garantisce una superficie "ideale" di appoggio, sulla quale si potrà ricercare l'esatta concentricità con i fori filettati durante il montaggio.

Al termine della distinzione della zona di progettazione e di non progettazione, il componente si presenta come in Figura 30.

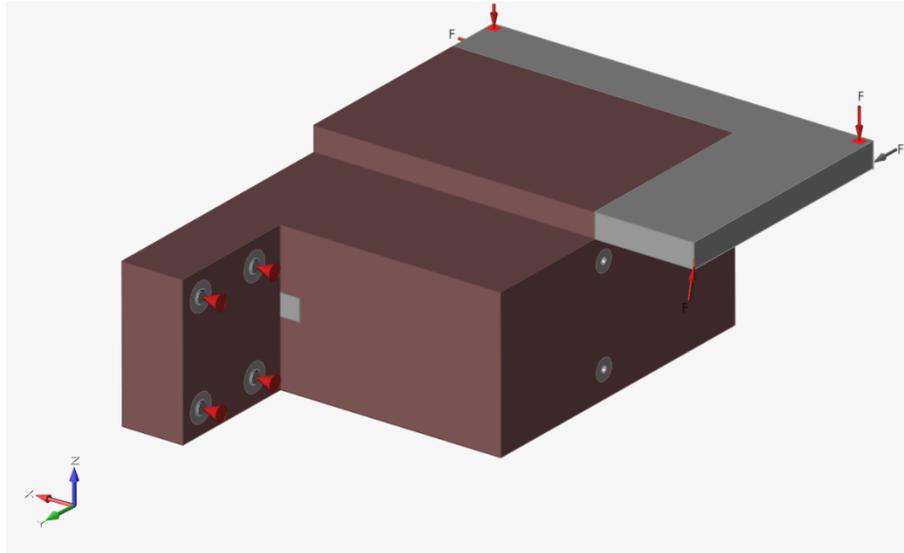


Figura 30: Design e No Design Space

3.3.4 Scelta del materiale

Imprescindibile per un'adeguata riprogettazione, è la scelta della tipologia di materiale. Esso deve essere in grado di garantire una corretta funzionalità del componente, riducendo al minimo le vibrazioni e dunque massimizzando quanto più possibile la rigidità. Il parametro fisico di riferimento a tal proposito è certamente il modulo elastico: tanto più è maggiore questo valore, minore sarà la cedevolezza del materiale.

Contemporaneamente, però, non è possibile tralasciare la densità del materiale, in quanto, sebbene non vi siano vincoli di peso, sarebbe opportuno cercare di ridurre quanto più possibile la massa della staffa.

Infine, bisogna anche tenere in conto la tensione limite di snervamento del materiale, poiché da questo valore possono dipendere una resistenza entro un certo livello di sicurezza, oppure una rottura catastrofica dell'oggetto, dal momento che in caso di snervamento esso diverrebbe inutilizzabile.

Compresi i parametri fisici su cui occorre ragionare, emerge chiaramente che, viste le dimensioni della staffa porta tof, così come anche l'entità dei carichi applicati, le strade percorribili sono le seguenti:

1. Optare per un polimero termoplastico ingegneristico, molto leggero rispetto ad un metallo, ma penalizzato in termini di modulo di Young;
2. Scegliere una lega metallica leggera, sicuramente non come un polimero, ma d'altra parte capace di garantire una maggiore rigidità.

Prima di analizzare le due opzioni è doveroso fare alcune considerazioni di carattere pratico. In questa fase, infatti, si sono scartate a priori materiali metallici quali leghe di titanio, di acciaio o di nichel. Le prime per via del costo significativo: le polveri di Ti6Al4V possono raggiungere la cifra di 300 €/kg. Per quanto riguarda l'acciaio e le superleghe a base nichel, invece, certamente resisterebbero con una netta superiorità rispetto all'alluminio, tuttavia sarebbero esageratamente pesanti, e per il tipo di applicazione è possibile scartarle dall'elenco dei materiali plausibili.

Tornando alle opzioni discusse in precedenza, per effettuare una scelta appropriata è necessario ripensare all'esigenza funzionale del componente, ovvero quella di garantire le minime vibrazioni

possibili. Inoltre, la staffa porta tof è un caso particolarmente critico rispetto ai componenti di cui si discuterà nelle pagine successive, in quanto è più facilmente soggetta a urti e carichi accidentali, sporgendo sia lateralmente sia posteriormente rispetto all'ingombro della carrozzina.

Per queste ragioni, è lecito orientarsi verso una lega metallica piuttosto che su un polimero, considerando anche il fatto che qualunque termoplastico, seppur altamente performante, ad esempio il *peek*, non sarà mai in grado di raggiungere le stesse soglie dell'alluminio, sia in termini di modulo elastico, sia in quelli di tensione di snervamento.

A tal proposito, nello schema successivo è possibile osservare le proprietà meccaniche del termoplastico in questione, dichiarati sul datasheet del fornitore di polveri *EOS*.^[29]

Peek proprietà meccaniche	Valori
Densità [g/cm ³]	1.315
Tensione di snervamento [MPa]	90
Modulo elastico [MPa]	4250
Allungamento a rottura [%]	2.8

Tabella 5: proprietà peek EOS

La Tabella 5 conferma quanto affermato nelle righe precedenti: il peek, seppur estremamente resistente per essere un "semplice" termoplastico, è lontano dal raggiungere i 70 GPa del modulo di Young delle leghe di alluminio, oltre alla particolare limitazione legata al prezzo: una bobina di filamento di peek, dalla massa di 750 g, arriva infatti a costare oltre i 600 €, cifra ben maggiore delle polveri di alluminio.^[49]

Dopo aver intrapreso la strada del materiale metallico, è altresì fondamentale scegliere la specifica lega di alluminio, sia in termini di composizione chimica, sia in base ai fornitori presenti sul mercato.

In merito alla prima questione, è possibile optare per la lega più diffusa nel settore Additive, ovvero la *AlSi10Mg*, mentre per quanto riguarda la casa produttrice di polveri, si è scelto di appoggiarsi a *3D Systems*, la quale, rispetto a *EOS*, fornisce dei datasheet più completi per questa specifica lega. Il fornitore, infatti, non si limita a comunicare le proprietà meccaniche, ma ne specifica anche l'anisotropia lungo la direzione z di costruzione, e soprattutto come esse variano in base a trattamenti termici differenti, quali distensione o invecchiamento ad esempio.

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche meccaniche, che saranno da inserire all'interno della libreria dei materiali di *Inspire*, per effettuare l'analisi fem al termine della riprogettazione (Tabella 6):^[30]

3D Systems, AlSi10Mg	Valori
Spessore layer [μm]	30
Trattamento termico SR2	Invecchiamento a 190° per 6 h
Modulo elastico [GPa]	65
Tensione di snervamento lungo z [MPa]	250
Densità [g/cm ³]	2.7
Allungamento a snervamento lungo z [%]	5.2
Densità relativa con layer 3 μm [%]	99.9

Tabella 6: proprietà meccaniche AlSi10Mg, 3D Systems

È interessante notare l'ultimo parametro riportato in tabella, ovvero la densità relativa, che è un indicatore di quanto è saldabile il materiale, e quale percentuale di porosità ci si può aspettare al termine del processo di Additive Manufacturing: 99.9 % è un valore molto positivo, in quanto significa che il materiale sarà meno soggetto alla formazione e alla conseguente propagazione di eventuali cricche. Inoltre, avendo una densità praticamente unitaria, la lega è anche in grado di resistere meglio agli urti rispetto al medesimo materiale ottenuto per fonderia, nel quale c'è sempre una certa percentuale di porosità.

3.3.5 Ottimizzazione topologica

Prima di procedere con l'esecuzione dell'ottimizzazione topologica, è opportuno spiegare di che cosa si tratta e come opera il software per ottenere i risultati.

L'ottimizzazione topologica è una tecnica di simulazione basata sulla successione di varie iterazioni, al termine delle quali si ottiene una convergenza del risultato, in termini di volume del componente, della sua rigidezza, della tecnologia produttiva, nonché dei carichi applicati alla geometria.

Al termine della sequenza di iterazioni, questo strumento permette di sintetizzare una forma innovativa e organica del prodotto, ottenendo una geometria impossibile da replicare utilizzando le tecniche convenzionali quali fonderia o asportazione di truciolo.

Durante il processo, inoltre, il solutore numerico è in grado di identificare quelle zone del volume necessarie al raggiungimento del target, ovvero le zone dell'oggetto in cui c'è effettivo bisogno di materiale, e di distinguerle da quelle in cui, al contrario, esso costituirebbe solamente un peso aggiuntivo.

Laddove si identifichi un'area "scarica" dalle varie sollecitazioni, infatti, il processo di ottimizzazione rimuove il materiale, rendendo possibile un notevole alleggerimento del componente, pur mantenendo un'adeguata rigidezza globale.

L'ottimizzazione topologica si dimostra uno strumento ideale soprattutto nella fase di realizzazione di prototipia concettuale, durante la quale accade spesso di dover ricercare varie proposte di forma che soddisfino l'esigenza funzionale piuttosto che i gusti del cliente, ma tale strumento ha il vantaggio di poter essere applicato anche in ogni altro contesto, dalle esigenze termiche, a quelle strutturali.^[31]

La moltitudine di materiali esistenti per l'Additive Manufacturing rende possibile il design di svariati componenti, quali ad esempio palette di turbine, basamenti per macchine di misura, componenti automotive oppure aerospaziali.

A seconda delle esigenze, inoltre, l'ottimizzazione può essere eseguita con l'obiettivo di massimizzare la rigidezza della struttura, vincolando il volume ad una determinata percentuale di quella iniziale, oppure di minimizzare la massa del componente, imponendo un coefficiente di sicurezza minimo da rispettare, oppure ancora di massimizzare la prima frequenza propria, al fine di limitare le vibrazioni durante il funzionamento del componente stesso.

Di seguito viene riportato un esempio del processo di ottimizzazione topologica, che dà luogo a forme organiche tipiche del *Generative Design*:

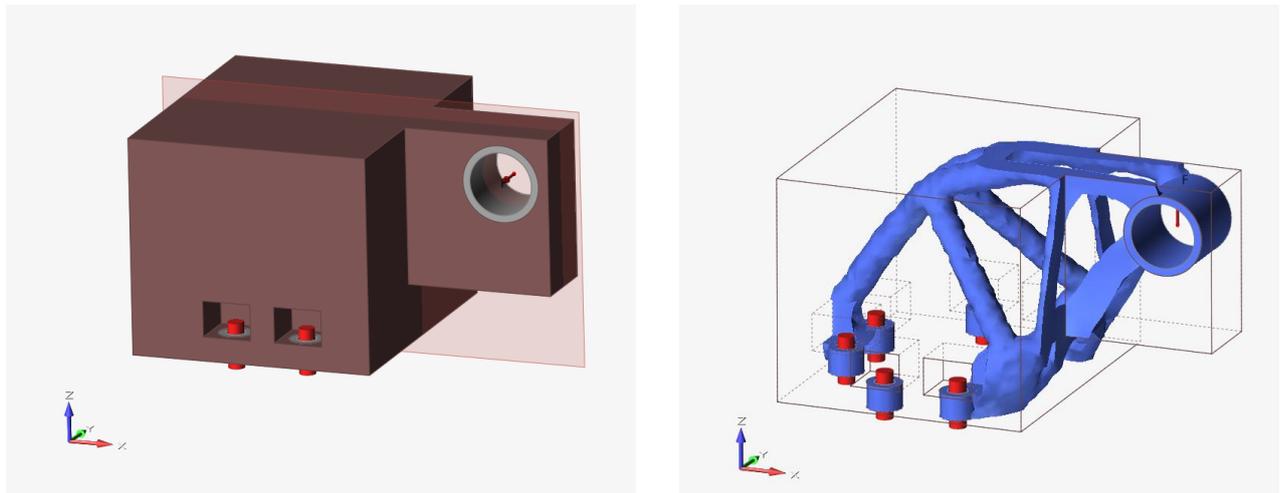


Figura 31: esempio ottimizzazione topologica

Il solutore numerico che gestisce le iterazioni ed esegue le analisi agli elementi finiti è *Optistruct*, che si basa sull'applicazione di un metodo numerico chiamato *SIMP*, acronimo di *Solid Isotropic Material with Penalization*, il quale prevede la distribuzione ottimale del materiale nelle zone di progettazione.

Il risultato, in termini matematici, consiste nella determinazione della densità relativa ρ ad ogni elemento attivo dello spazio di progetto, contenuto in un certo dominio Ω .

In particolare, la densità è la funzione di progettazione e può variare in un range compreso tra 0 ed 1: nelle zone in cui gli elementi hanno densità relativa nulla non necessitano di materiale, mentre quelle in cui si ha densità unitaria saranno fondamentali per garantire rigidezza e resistenza.

Moltiplicando la matrice di rigidezza e di massa degli elementi attivi con il valore di densità relativa, si riesce a variare la distribuzione di rigidezza e di massa con continuità.

Il principale limite dell'approccio *SIMP* sta nel fatto che è molto frequente ottenere valori di densità relativa intermedi, i quali diventano difficili da interpretare da un punto di vista fisico, poiché non è ben chiaro se in quel caso il materiale sia realmente necessario o no.

Per rimediare a questo problema, l'algoritmo in questione utilizza un fattore di penalizzazione esponenziale $p > 1$, per fare in modo che i valori di densità intermedi risultino meno favorevoli, in quanto la rigidezza a cui danno origine è piccola in confronto al costo (cioè il volume di materiale).^[32]

Per ottenere un modello costituito principalmente da soli 0 e 1, usualmente si prende $p > 3$.

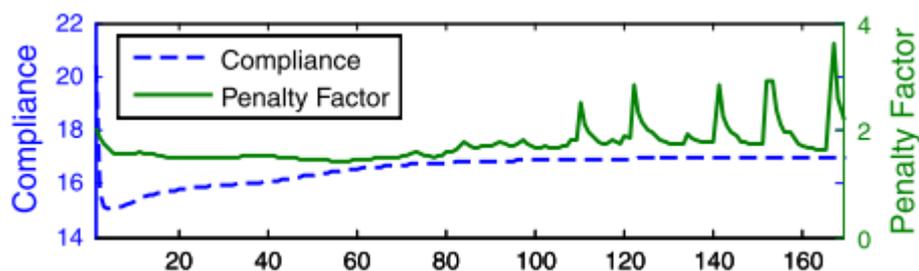


Figura 32: cedevolezza vs fattore di penalizzazione applicato ad una trave

Il primo tentativo di ottimizzazione topologica effettuato sulla staffa porta tof è stato condotto con l'ottica di massimizzare il primo modo normale del componente, note le esigenze funzionali di cui si è discusso in precedenza. I parametri da impostare per ottenere il nuovo design sono sia i supporti che vincolano l'oggetto, presi da una qualsiasi condizione di carico, sia lo spessore minimo delle superfici.

Per quest'ultimo si è impostato 8 mm, con l'ottica di ridurre il numero di iterazioni, e di conseguenza la durata del calcolo da parte del software.

Spessori ridotti, infatti, sono sinonimo di mesh più fitta e più piccola, che causano un maggior peso del modello, in termini di calcolo.

In seguito a questo primo tentativo, sono emersi risultati che necessitano di una discussione (Figura 33).

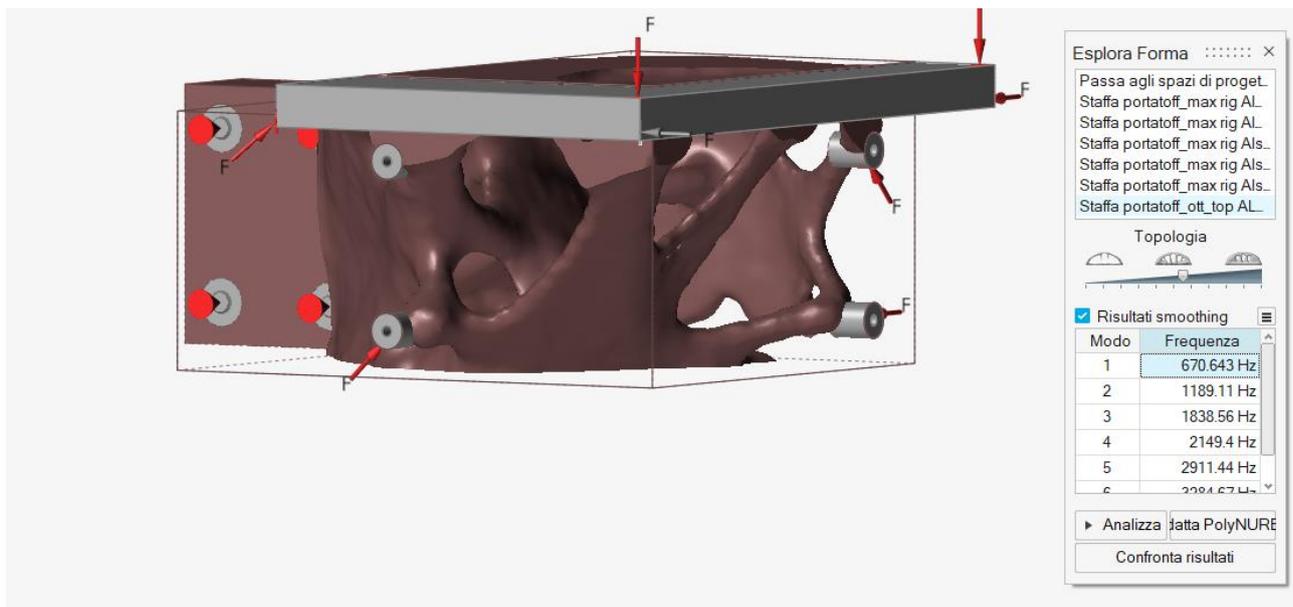


Figura 33: max prima frequenza, spessore minimo 8 mm

In particolare, il primo parametro che occorre osservare è il valore evidenziato a destra nell'immagine. Esso rappresenta la massima prima frequenza teoricamente ottenibile per questo oggetto. Naturalmente si tratta soltanto di un valore indicativo, in quanto allo stato attuale la porzione di staffa in colore scuro è soltanto una superficie priva di massa. Al termine del lavoro di riprogettazione si dovrà stabilire se effettivamente ci si è avvicinati al valore massimo teorico, oppure se è necessario apportare altre modifiche per incrementare ulteriormente la prima frequenza di risonanza.

La seconda considerazione riguarda invece la zona dei fissaggi sulla piastra. Osservando la figura, si nota chiaramente che l'ottimizzazione topologica non ha apportato alcuna modifica di forma in quell'area specifica, lasciando il componente con la stessa quantità di materiale di partenza.

Questo può rappresentare un potenziale problema per due aspetti fondamentali, dipendenti tra loro. In primo luogo, si va contro i principi della Fabbricazione Additiva, secondo i quali occorre sempre realizzare oggetti caratterizzati da una complessità geometrica: se le forme sono troppo semplici, allora è il caso di affidarsi ai più economici processi convenzionali.

Inoltre, nel caso in cui si realizzasse una geometria così come indicata in figura, si andrebbe incontro ad un consumo notevole di materiale. Questo porta con sé non soltanto un incremento di massa notevole, ma soprattutto un costo oneroso, in quanto le polveri per AM sono tutt'altro che economiche (Figura 34).

Per queste motivazioni, è parso opportuno integrare la ricerca della massima frequenza, con un adeguato alleggerimento. Si è dunque eseguita una seconda ottimizzazione, questa volta di massima rigidità, impostando il volume finale al 20% di quello originale, e uno spessore minimo nuovamente di 8 mm.

Il risultato, visibile in Figura 35, evidenzia come effettivamente in questo caso la staffa risulti più alleggerita, sia nella zona dei fissaggi con la piastra, sia nella parte interna, come se fosse letteralmente svuotato dal materiale in eccesso. L'obiettivo, dunque, è quello di incrementare la prima frequenza di risonanza rispetto al caso originale, conservando però la leggerezza che caratterizza il Generative Design.

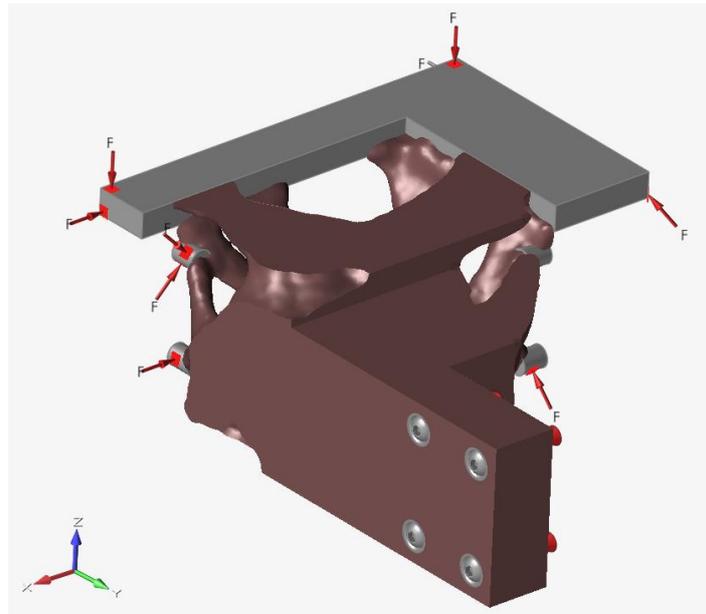


Figura 34: particolare zona fissaggio, max frequenza

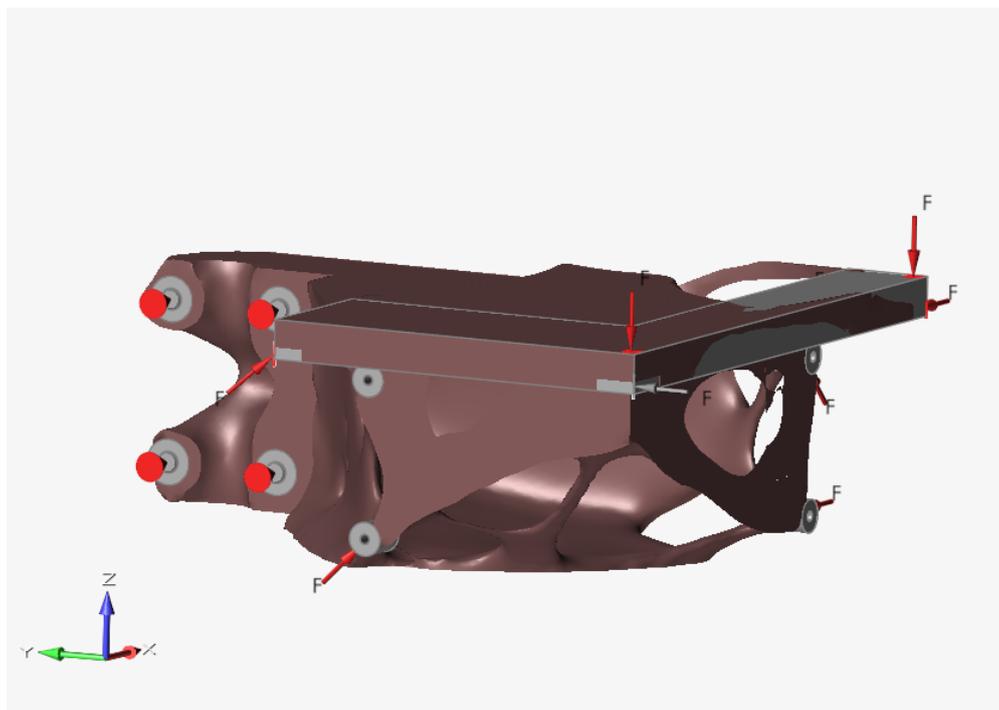


Figura 35: max rigidità 20%, spessore minimo 8 mm

Per determinare se questa geometria generata dal software possa essere accettata o meno, è opportuno eseguire un'analisi fem statica, al fine di analizzare se resista alle sollecitazioni impostate.

Durante tale analisi, occorre ricordarsi di spuntare l'opzione relativa a tutte le condizioni di carico, in maniera tale da evidenziare quella più critica.

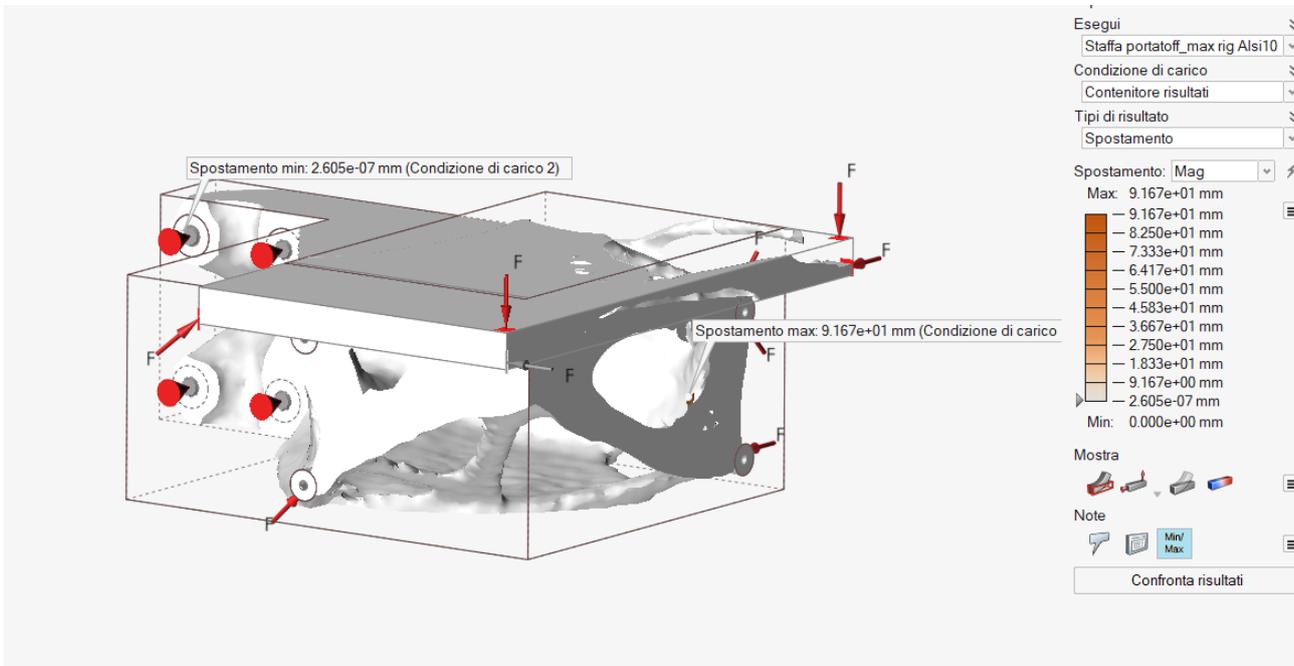


Figura 36: analisi freccia massima

I risultati mostrano che l'oggetto ottimizzato ha le potenzialità per resistere alle varie sollecitazioni: naturalmente lo spostamento minimo coincide con la zona vincolata alla piastra tramite le viti di fissaggio, mentre c'è una zona limitata che si dimostra particolarmente critica. Infatti, la freccia in quel punto sale improvvisamente fino a raggiungere il valore di circa 90 mm. Questo comportamento fa riflettere sul fatto che molto probabilmente si tratta di un errore numerico emerso durante l'analisi, e che sarà possibile intervenire durante la ricostruzione per risolvere l'inconveniente.

Osservando la Figura 37, si nota infatti che quella parte dell'oggetto è quasi "staccata", isolata dal resto delle superfici e pertanto non partecipa in modo continuo alla resistenza dei carichi, bensì manifesta un comportamento a sé.

Trattandosi di analisi con decine di migliaia di triangoli, nell'ambito delle ottimizzazioni topologiche, questo comportamento è tutt'altro che una rarità. Spesso, infatti, i risultati ottenuti danno luogo a zone del modello che non sembrano garantire un'adeguata resistenza, soprattutto in aree in cui sono presenti bruschi cambi di geometria o intagli.

Tuttavia, la maggior parte delle volte, il problema si risolve aggiungendo un raccordo, piuttosto che aumentando lo spessore della parete, motivo per cui, allo stato attuale, non preclude l'accettazione del modello.

Non bisogna dunque aspettarsi di ottenere gli stessi identici risultati, in termini di spostamento, di coefficiente di sicurezza, oppure del primo modo normale, analizzando e confrontando le superfici ottenute dall'ottimizzazione topologica con l'oggetto solido finale ricostruito.

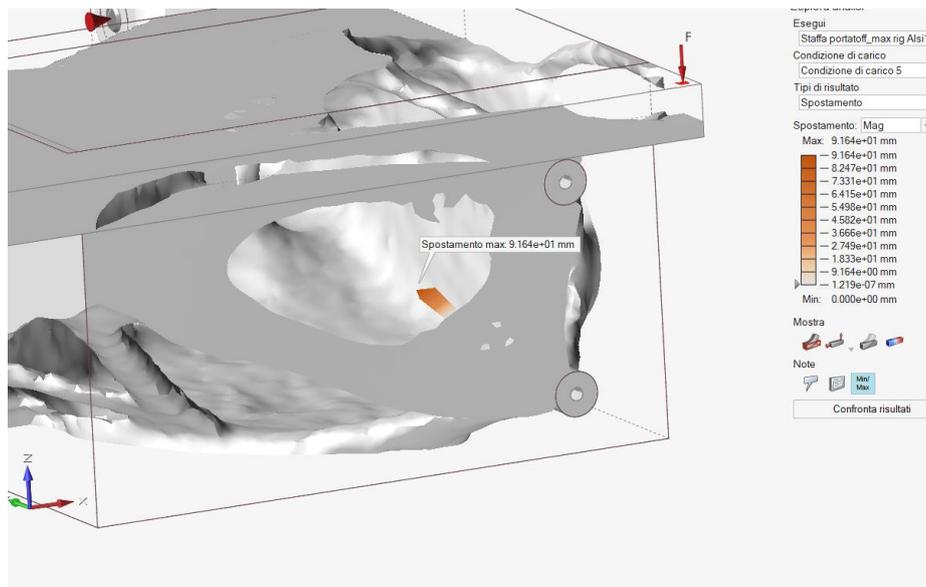


Figura 37: focus errore numerico

Prima di passare alla ricostruzione delle superfici, occorre fare una precisazione in merito alla zona piana del *No Design Space*. Se si osservano attentamente le ultime due immagini e le si confrontano con la Figura 30, relativa al capitolo sulla distinzione delle zone di progettazione da quelle fisse, ci si rende conto che la parte superiore, quella sotto la quale giace il porta tof è stata soggetta a modifiche topologiche da parte di Inspire. Questo si spiega col fatto che in realtà l'ottimizzazione è stata eseguita in una fase in cui quella specifica area di *No Design* era stata concepita più stretta. In seguito, pensando alla necessità funzionale, nonché estetica, di coprire i cavi contenuti nel porta tof, è stato necessario allargarla.

Questo non pregiudica il risultato ottenuto, in quanto come è evidente dall'analisi agli elementi finiti, la geometria garantisce un buon livello di rigidità. Bisogna soltanto tenere presente che la zona piana superiore sarà costituita dal 100% del materiale iniziale.

3.3.6 Ricostruzione Nurbs e generazione solido

Una volta scelto il modello di superfici generate al termine delle iterazioni dell'ottimizzazione, occorre ricostruire il solido, cercando di creare in un certo senso "armonia" tra resistenza meccanica ed estetica.

Per procedere con la ricostruzione del modello, Inspire mette a disposizione uno strumento chiamato *PolyNurbs*, che consiste nell'avvolgimento della geometria ottimizzata tramite delle *Nurbs*, appunto, le quali sono le nuove superfici che diventeranno solide in seguito all'esportazione del file in formato *Parasolid* oppure *Step*.

Le superfici generate dalle *PolyNurbs* sono interamente libere di essere deformate secondo esigenze progettuali: è possibile infatti allungare o accorciare le singole facce, acuminare o arrotondare gli spigoli, trascinare i vertici e torcere le singole sezioni.

In questo modo, se a seguito di un'analisi fem si ottenessero dei risultati non conformi alla resistenza ricercata, si avrebbe la possibilità di modificare la geometria senza dover ricostruire il modello dall'inizio.

Quando due tratti di *PolyNurbs* differenti sono prossimi a incontrarsi, è possibile unirli tramite un "ponte" di collegamento, il quale genera un tratto di superficie che connette due facce delle due *Nurbs* distinte.

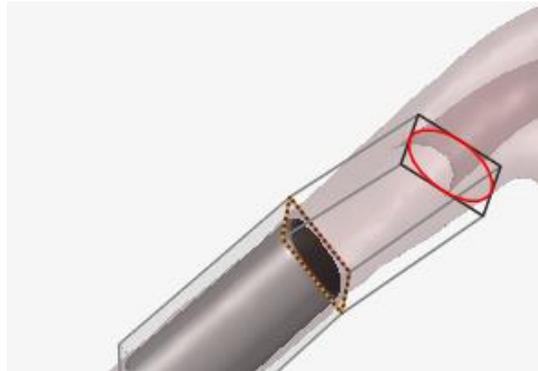


Figura 38: generazione PolyNurbs

Un altro strumento estremamente utile è la *PolyNurbs* generatrice: si tratta di una sfera creata automaticamente nello spazio di lavoro, che successivamente può essere spostata nella zona di interesse. Una volta scelta la posizione che più soddisfa il progettista, la sfera generatrice può essere modellata cercando di replicare le zone dell'ottimizzazione che difficilmente si potrebbero ottenere con il comando visto in precedenza.

Nel caso della staffa porta tof, questo strumento è stato utilizzato specialmente per ottenere la zona del componente prossima ai quattro fori di fissaggio: lo strumento di avvolgimento non sarebbe stato di alcun ausilio in tal caso, in quanto le superfici "di base", risultato delle iterazioni dell'ottimizzazione topologica, non presentavano una geometria reticolare simile a quella della Figura 31.

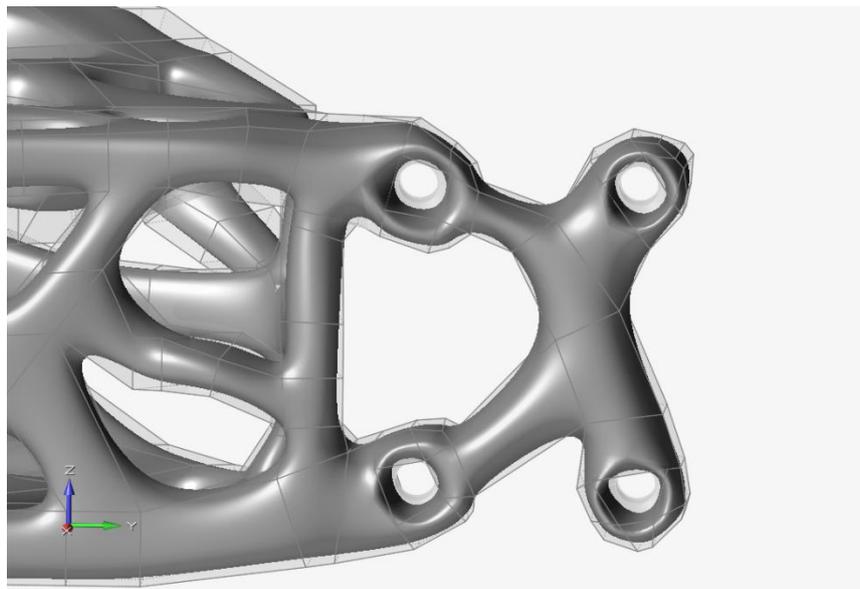


Figura 39: zona PolyNurbs attacco M5

Una volta che si è soddisfatti del modello ricostruito, non è possibile eseguire subito l'analisi fem, in quanto, come già ripetuto, le Nurbs sono superfici e non solidi.

Al fine di comprendere se la geometria ipotizzata resista effettivamente alle sollecitazioni o no, occorre esportare soltanto la PolyNurbs, priva di massa, in un formato standard quale *Step*, oppure *Parasolid*. Successivamente, si importa il nuovo modello solido all'interno dell'ambiente di lavoro: apparentemente si otterranno così due copie della stessa geometria, ma soltanto una potrà essere utilizzata per le simulazioni agli elementi finiti.

Pertanto, occorre cancellare le superfici, che fisicamente non posseggono massa, e mantenere invece l'oggetto tridimensionale solido.

A questo punto, non è ancora possibile lanciare l'analisi, in quanto è necessario trattare le zone di interazione tra gli spazi di progettazione e i *No Design Space*.

In seguito alla ricostruzione del modello, infatti è inevitabile il fatto che le superfici generate dalle Nurbs, compenetrino all'interno delle zone a geometria fissa, di non progettazione.

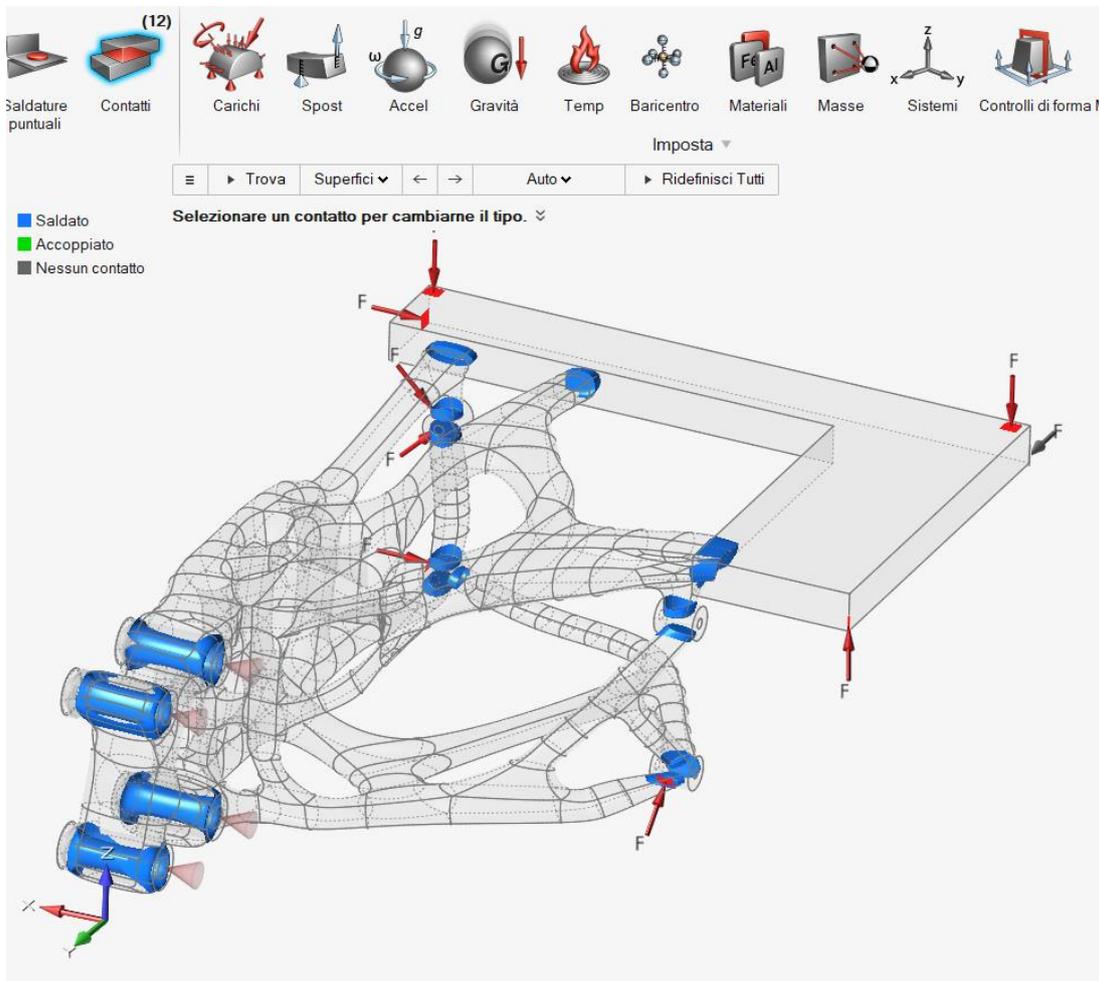


Figura 40: zone di contatto

Come è possibile notare nella Figura 40, emerge chiaramente che, in seguito all'importazione del modello *Step*, le zone di contatto non sono piane, come invece dovrebbero essere, bensì si estendono per tutto il tratto in cui la nuova geometria interseca i *No Design Space*.

Per risolvere correttamente il problema, si utilizza l'operazione booleana di sottrazione, andando ad impostare come target il nuovo design progettato, mentre come strumenti di asportazione si scelgono le aree a geometria fissa.

In questo modo si eliminano le zone superflue di *Design space*, lasciando esclusivamente delle aree di contatto piane, che vengono interpretate dal software come delle saldature tra una zona e l'altra.

In questa fase occorre ricordarsi di spuntare l'icona relativa al mantenimento degli strumenti, altrimenti al termine dell'operazione booleana vengono rimossi automaticamente i corpi usati come utensili, mentre invece è fondamentale mantenerli per eseguire la simulazione fem.

Di seguito viene riportata la Figura 41 che mostra il risultato di quanto descritto.

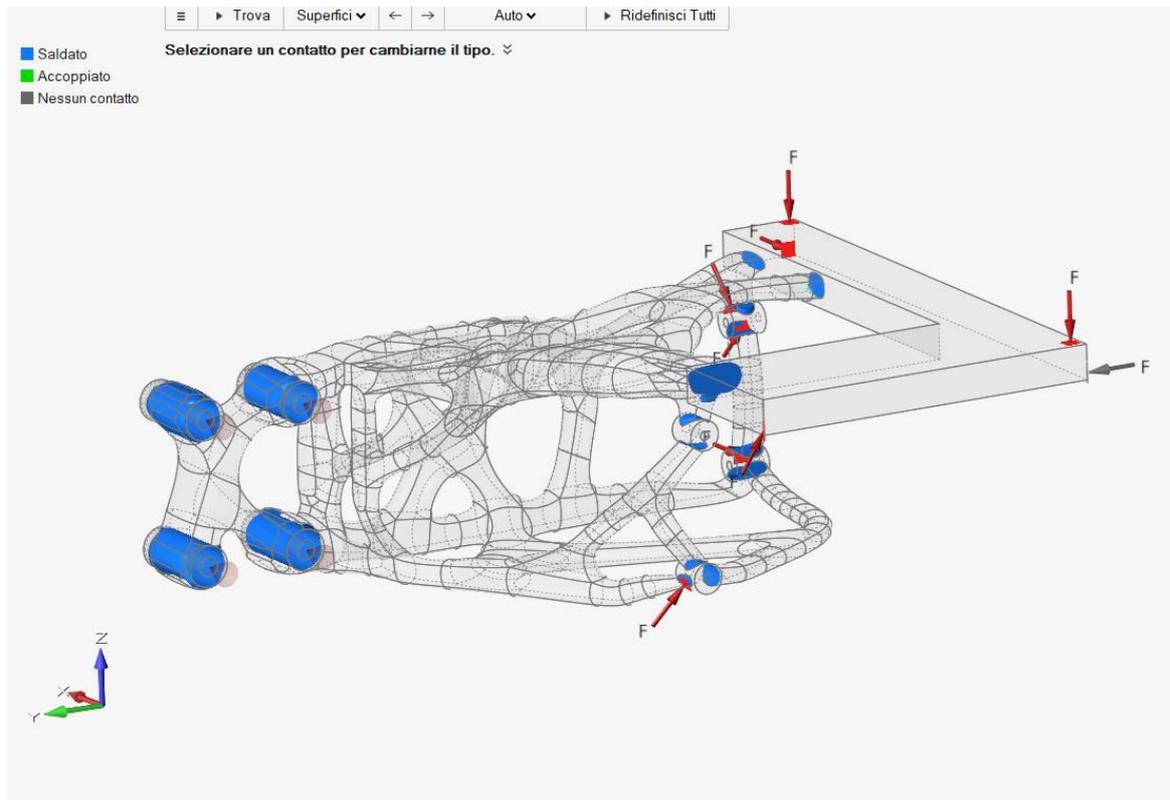


Figura 41: contatti dopo operazione booleana di sottrazione

Una volta appurato che i contatti sono stati impostati correttamente, è possibile eseguire l'analisi.

In questa fase, per raggiungere l'obiettivo desiderato, molto spesso è necessario effettuare vari tentativi, modellando l'insieme delle *PolyNurbs* laddove il componente non dovesse resistere alle sollecitazioni. Nel caso in questione, il primo tentativo è stato quello riportato nella Figura 42.

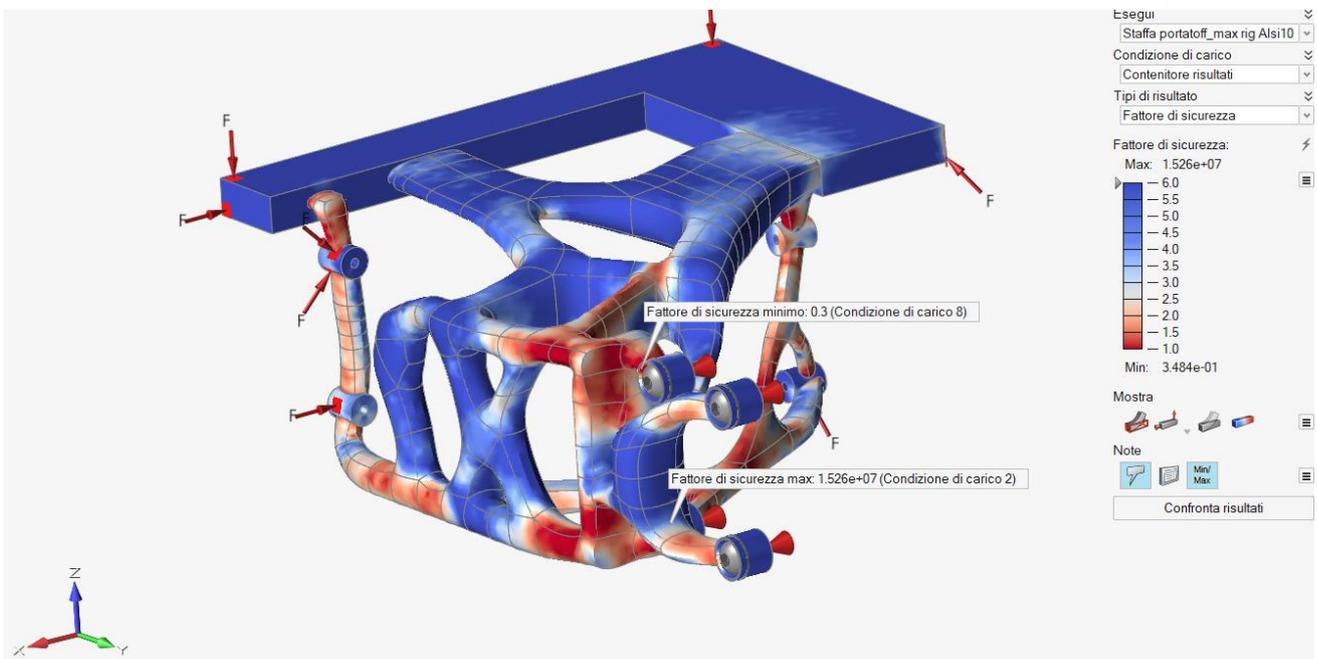


Figura 42: primo tentativo di ricostruzione

Come si evince dalla figura, in questa prima configurazione, parecchi tratti di materiale sarebbero stati soggetti ad un coefficiente di sicurezza inferiore al limite impostato. Questo perché inizialmente le due sedi per le viti di fissaggio M5 più esterne (a destra nell'immagine), non erano direttamente collegate alle due sedi adiacenti (a sinistra). Di conseguenza, dopo svariate prove consistite nell'ispessimento delle superfici, si è compreso che per ottenere un particolare in grado di resistere ai vari carichi era necessario connettere in modo diretto le due zone di non progettazione.

A tal proposito, la geometria ipotizzata per raggiungere lo scopo, è quella riportata nella Figura 39, già riportata nelle pagine precedenti.

Altra considerazione fondamentale durante la fase di riprogettazione è quella di verificare gli ingombri presso le zone di accoppiamento, per assicurarsi che il componente possa garantire al meglio i propri aspetti funzionali, e che non vi siano problemi durante il montaggio.

In particolare, le zone più critiche sono:

1. La zona per il fissaggio del porta tof;
2. La piastrina verticale che va in battuta con la piastra motore.

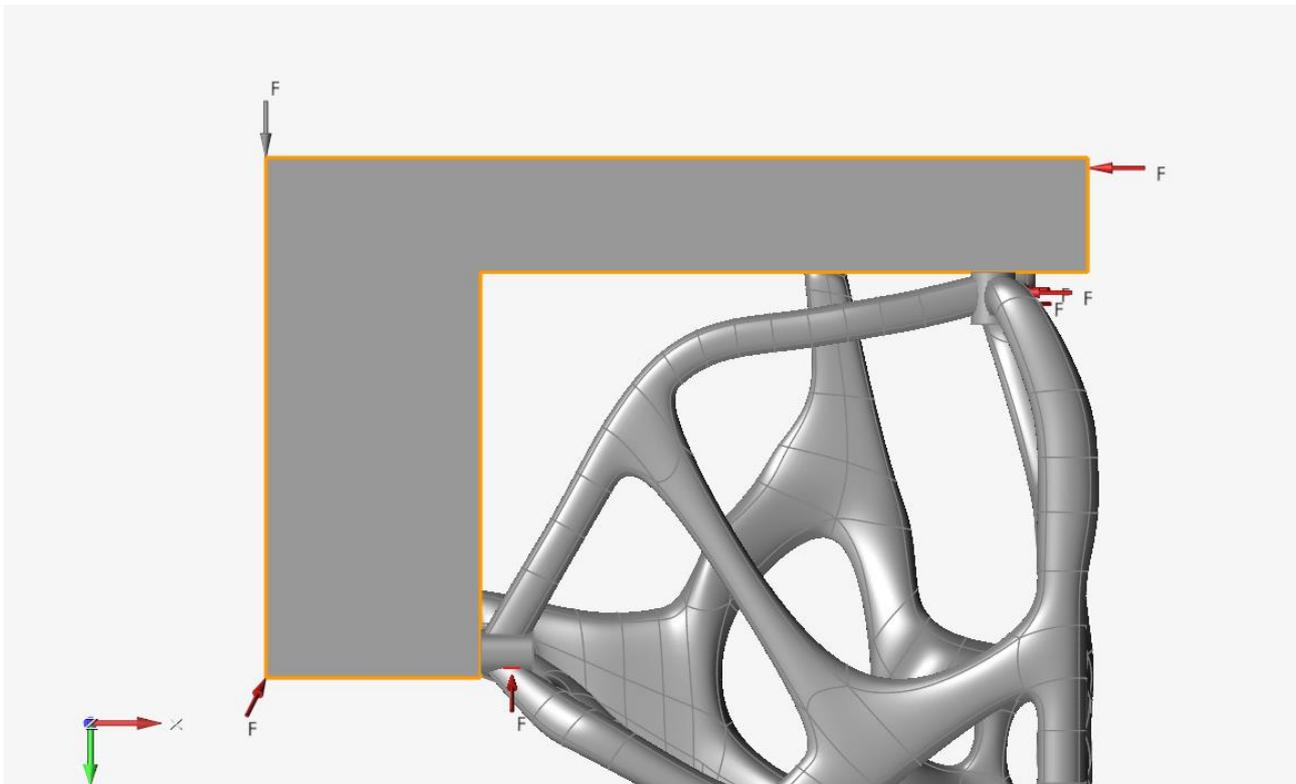


Figura 43: verifica funzionale con porta tof

Per quanto riguarda il primo punto, è necessario osservare la vista del componente dal basso (Figura 43). Il porta tof, infatti, raggiunge lo stesso ingombro della zona di non progettazione evidenziata dal contorno arancione. Pertanto, se le *Nurbs* non superano quel limite, è possibile affermare che l'oggetto non interferirà con il componente adiacente durante il montaggio.

Passando invece alla seconda zona critica, questa volta occorre posizionarsi frontalmente e in pianta.

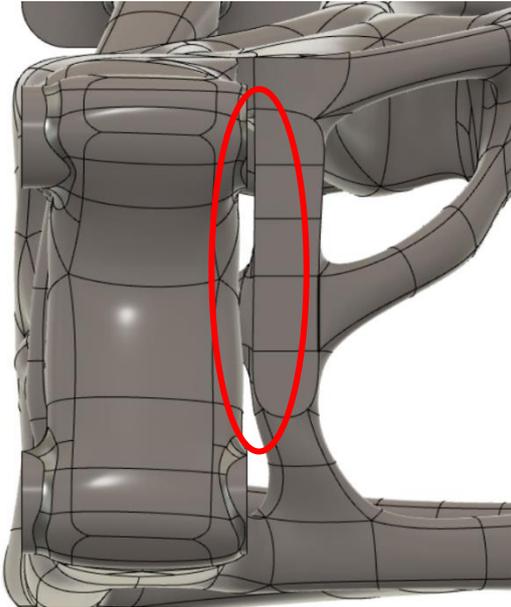


Figura 44: vista frontale

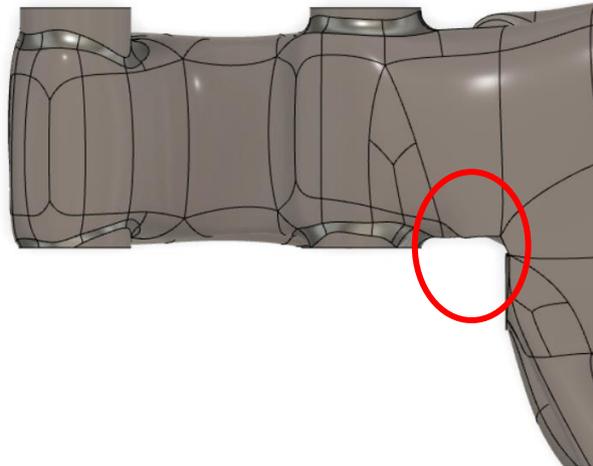


Figura 45: vista in pianta

In particolare, è necessario verificare che la piastrina verticale che facilita il montaggio della staffa, permettendo di allineare i quattro fori, non superi l'estensione dei cilindretti (Figura 44), ma soprattutto che non vi sia materiale che si frappone davanti alla piastrina stessa, poiché in tal caso, essa non svolgerebbe più il suo ruolo funzionale. Durante il posizionamento del componente, infatti, vi sarebbe interferenza tra la zona cerchiata in rosso e la parete della piastra motore (Figura 45).

Verificati gli ingombri, ed inspessite le pareti sufficientemente da garantire un'adeguata resistenza meccanica, il design del solo spazio di progettazione ottenuto come risultato finale è quello riportato nella Figura 46.

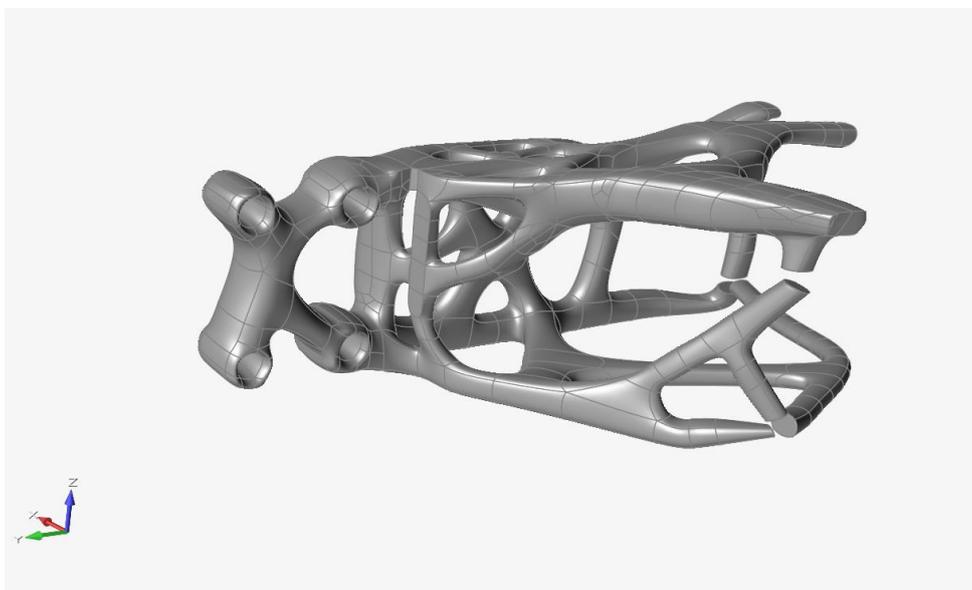


Figura 46: Design Space, geometria finale

Prima di riportare i risultati numerici, che verranno discussi nel capitolo successivo, è opportuno integrare anche le zone di *No Design Space*, in modo tale da ottenere un corpo unico. Allo stato attuale, infatti, i vari corpi solidi sono ancora riconosciuti come entità separate. Per raggiungere l'obiettivo, si usano nuovamente le operazioni booleane, ma questa volta si lavora con l'*unione* e non la *sottrazione*. È sufficiente selezionare il corpo di destinazione, ovvero la nuova geometria progettata, ed anettere le zone rimaste inalterate (Figura 47).

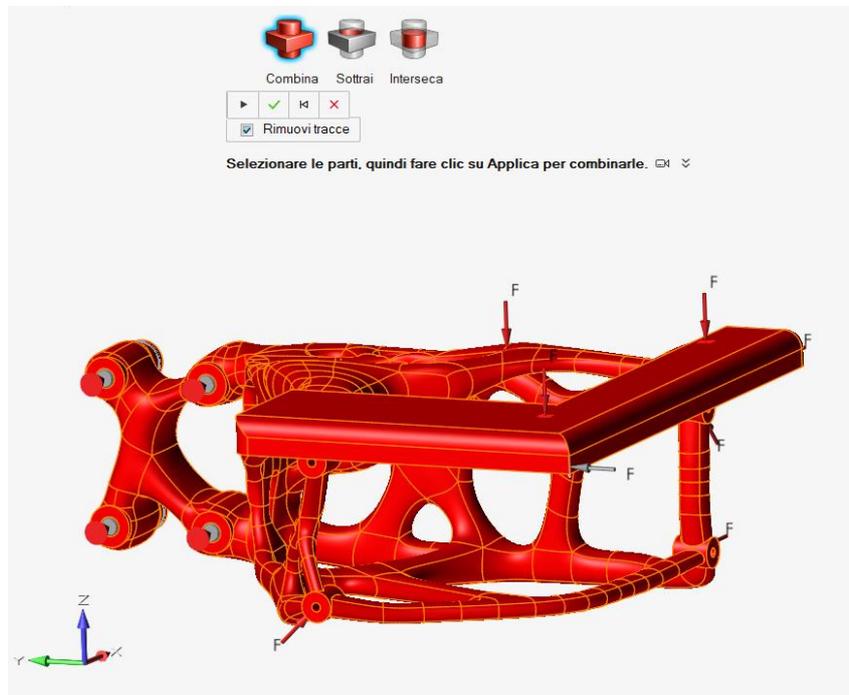


Figura 47: operazione di unione booleana

Ultimo, per completare la definizione del design prima di eseguire l'analisi fem, è la definizione dei raggi di raccordo, non soltanto per una questione estetica, ma anche per attenuare i bruschi cambi di geometria in quelle aree in cui i cilindretti, sedi per le viti, si uniscono al *Design Space*. L'operazione di unione booleana discussa nelle righe precedenti, infatti, sebbene abbia creato un unico corpo, non ha definito alcun raccordo.

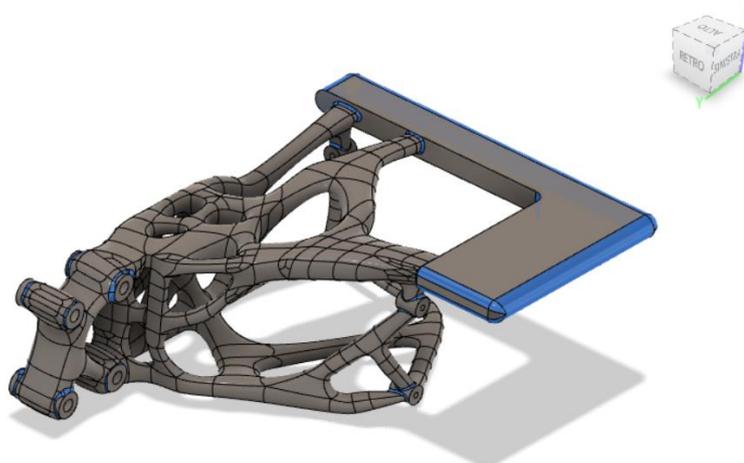


Figura 48: raggi di raccordo

3.4 Analisi risultati

Dopo aver fissato la geometria finale, è possibile eseguire tutte le simulazioni di verifica, per accertarsi che il componente resista ai carichi accidentali ipotizzati.

È opportuno specificare che, al termine della riprogettazione, è stato necessario inserire nuovamente alcune condizioni di carico, dal momento che, a seguito delle varie operazioni booleane di sottrazione e di unione, spesso accade che alcune forze o vincoli vengano persi.

Pertanto, prima ancora di eseguire l'analisi, si sono aggiornate le forze, arrivando ad avere un totale di dodici condizioni di carico differenti (Figura 49).

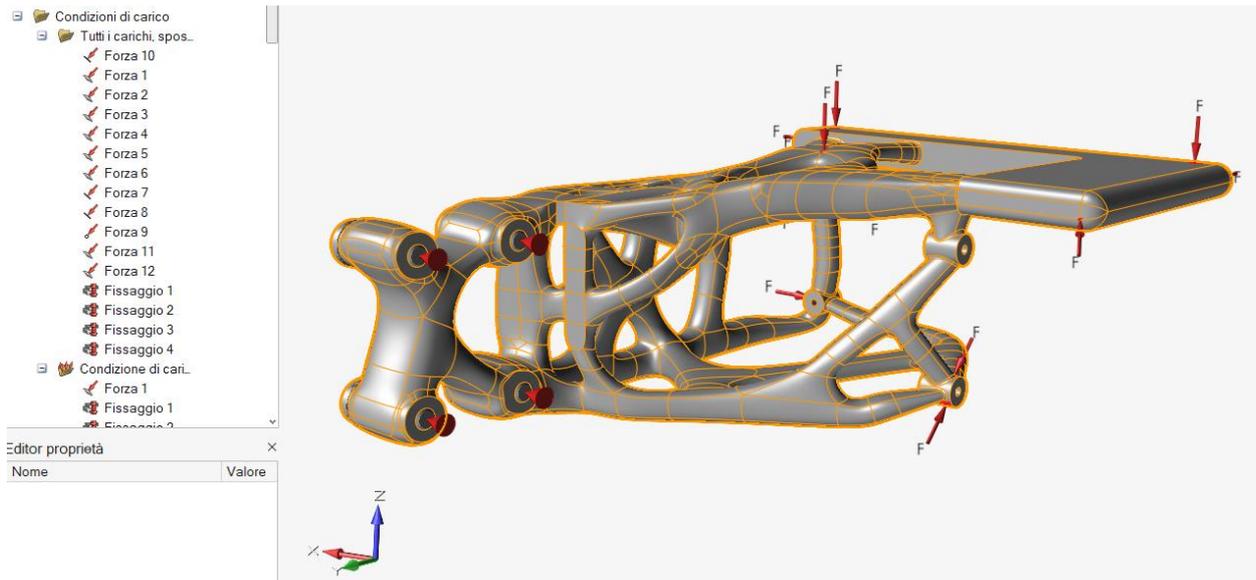


Figura 49: condizioni di carico aggiornate

Un'opzione interessante all'interno dell'ambiente di analisi è la determinazione dei *Modi Normali*. Nelle pagine precedenti si è visto come eseguire l'ottimizzazione per massimizzare la prima frequenza propria. In questo caso, invece, si esegue la verifica, andando a spuntare l'apposita casella nel menù di analisi. Ciò che si otterrà, saranno le prime n frequenze di risonanza, espresse in Hz.

Concettualmente, maggiore è il valore del primo modo, e minore sarà il rischio di avere vibrazioni eccessive del componente.

Nel caso della staffa porta tof, ad esempio, si è scelto di calcolare i primi cinque autovalori che si ottengono durante la condizione di carico numero 13, che in realtà rappresenta l'oggetto vincolato e soggetto esclusivamente al suo peso. Di fatto è come se si calcolasse la matrice di rigidezza senza alcuna forzante esterna.

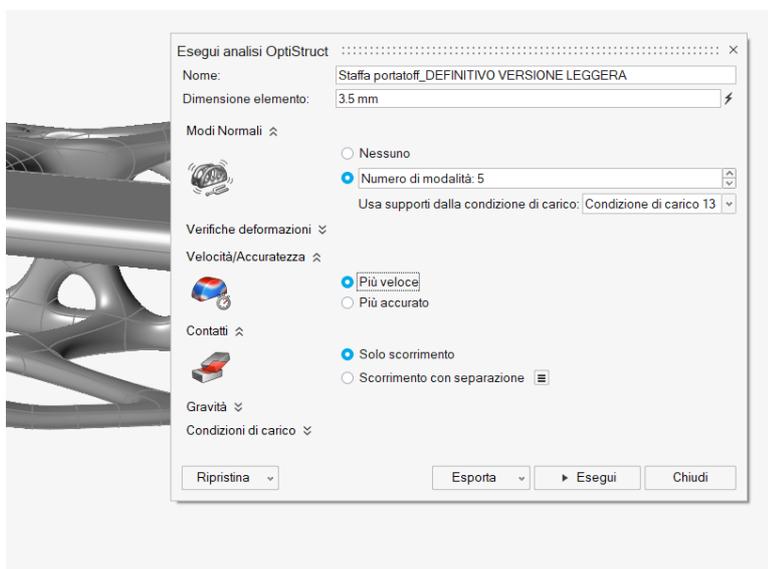


Figura 50: menu analisi: modi normali

I risultati emersi a seguito dell'analisi, dimostrano che l'oggetto con il nuovo design generativo, possa soddisfare le esigenze progettuali.



Figura 51: frequenza risonanza nuova geometria, AlSi10Mg

La frequenza di risonanza più bassa, che è anche la più critica si aggira intorno ai 300 Hz, equivalenti a 1885 rad/s, che è un valore notevolmente alto considerando il fatto che la carrozzina a comando vocale è progettata per muoversi all'interno di strutture pubbliche, nelle quali vi è un suolo liscio, che limita la propagazione delle vibrazioni (Figura 51).

Dal momento che era stato trascurato nelle analisi iniziali, è opportuno verificare lo stesso valore nel componente originale realizzato in PLA:

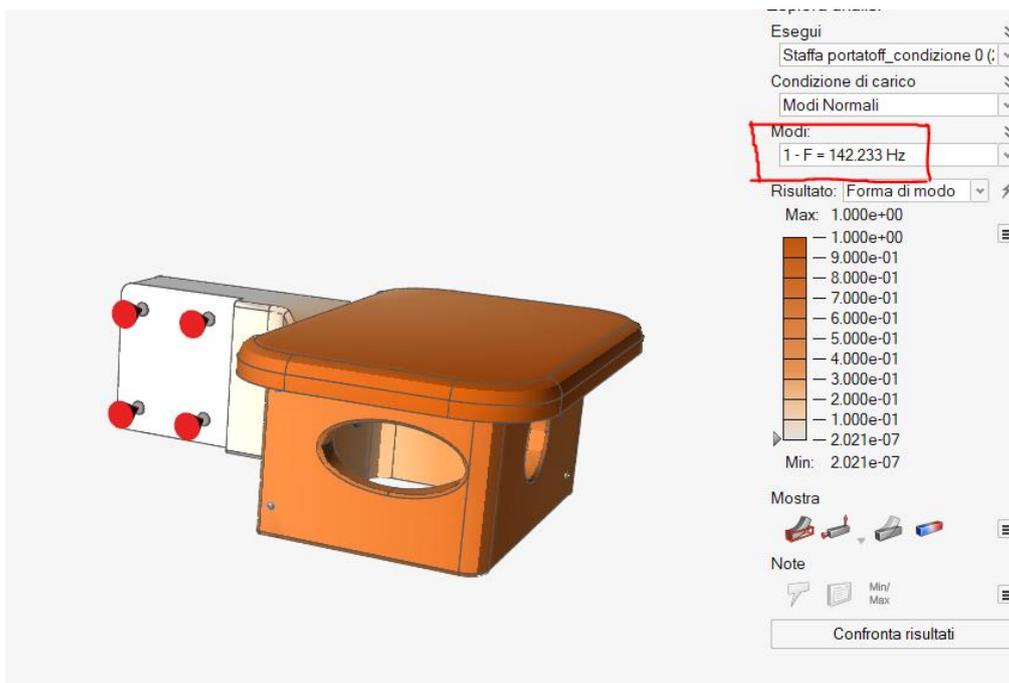


Figura 52: frequenza risonanza componente originale

Come ci si aspettava, grazie all'unione di un materiale molto più performante dell'acido polilattico, e di un design completamente riprogettato, la prima frequenza naturale del particolare realizzato in AlSi10Mg risulta essere più del doppio di quella originale (Figura 52). Occorre inoltre ricordarsi che l'analisi è da considerarsi con un grado di riempimento unitario (100%), mentre nella realtà la staffa porta tof è stata realizzata, con solo il 20% del pieno, con una struttura a nido d'ape, fattore che amplifica ulteriormente la criticità del primo modo normale. Tale ragionamento, naturalmente è limitato a questa prima serie di componenti, i quali svolgono per ora ancora la funzione di prototipi funzionali.

È interessante osservare l'analisi della prima frequenza di questa nuova geometria, impostando però il materiale di partenza, al fine di comprendere un concetto tipico di questi processi.

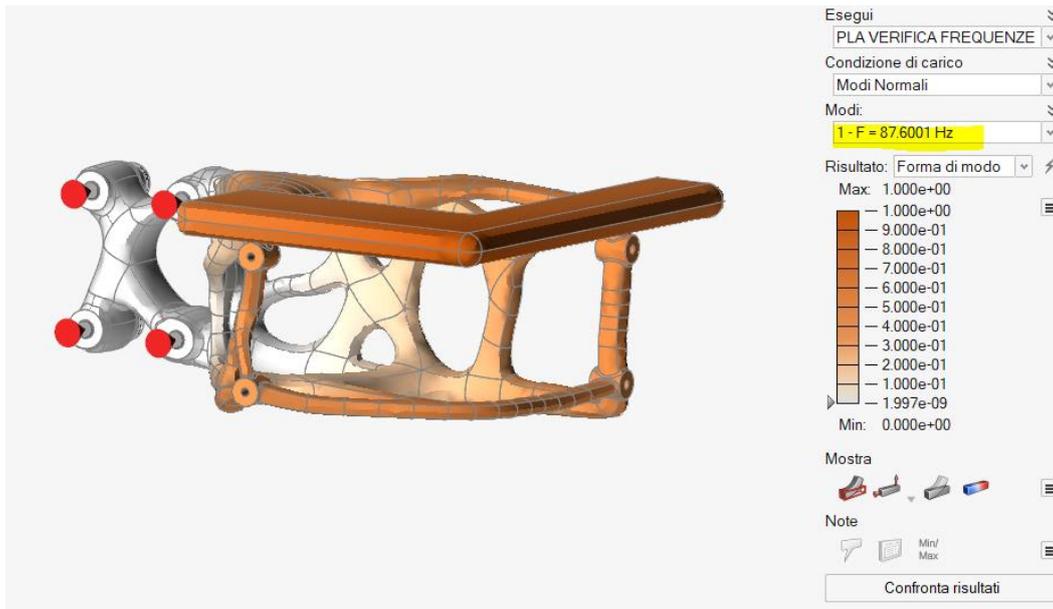


Figura 53: analisi modi normali PLA nuova geometria

In Figura 53 è possibile osservare come, lo stesso design, realizzato in PLA, dia origine ad una prima frequenza di risonanza pari a circa 87 Hz. Questo perché, ovviamente, a parità di materiale, se l'oggetto è alleggerito vi è meno "massa" che sopporta le sollecitazioni, o che limita le vibrazioni.

Al contrario, prendendo la geometria di partenza e impostando la medesima lega metallica AlSi10Mg, si sarebbe ottenuto un oggetto certamente con un primo modo normale superiore a 142 Hz, ma dall'altra parte molto pesante, e quindi fuori luogo per il contesto analizzato (Figura 54).

Il concetto di fondo è che, nell'ambito del Generative Design, non bisogna mai focalizzarsi su un materiale, piuttosto che su una forma: un design non adatto con un certo materiale può essere invece appropriato con un'altra lega.

È importante, dunque, ricercare sempre il compromesso ottimale tra geometria, leggerezza, resistenza, materiale.

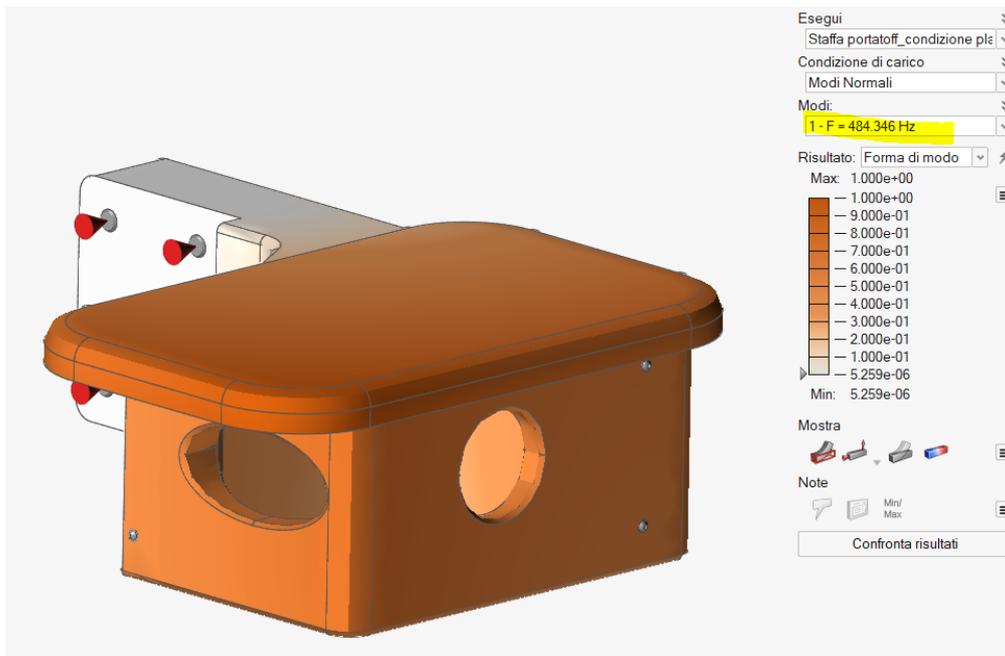


Figura 54: analisi frequenza AISI10Mg geometria originale

Dopo aver analizzato e discusso ampiamente i valori della prima frequenza dell'oggetto, è altrettanto importante verificare che il componente resista alle sollecitazioni in termini di resistenza allo snervamento. Occorre dunque analizzare il coefficiente di sicurezza e comprendere se esso sia sempre maggiore del limite minimo imposto come vincolo.

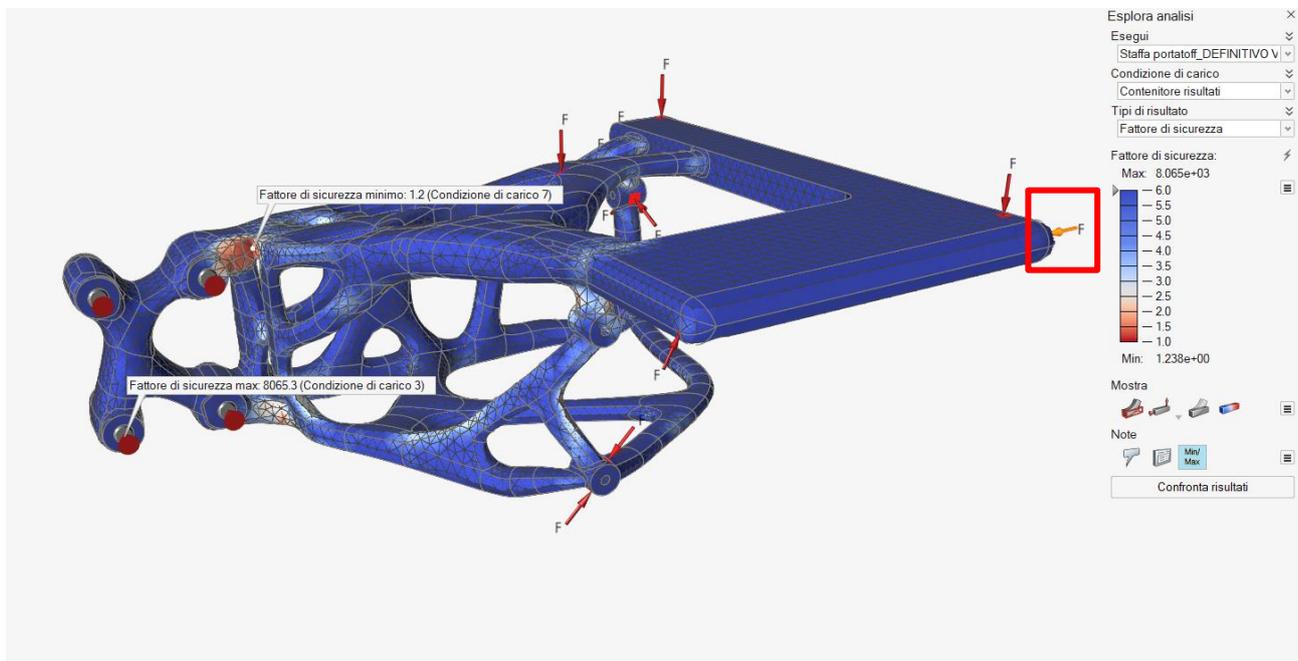


Figura 55: coefficiente di sicurezza, caso peggiore

Come nei casi precedenti, anche per il coefficiente di sicurezza è possibile andare ad impostare la visualizzazione del *contenitore risultati*, che fornisce in automatico l'andamento del CS nelle condizioni più gravose. Nello specifico, il carico che sollecita maggiormente la struttura è la forza della condizione 7, riquadrata in Figura 55.

La suddetta forza provoca una tensione di Von Mises pari a 202 Mpa (Figura 56) in corrispondenza della zona prossima alla piastrina verticale e ai cilindretti sedi delle viti, da cui ne consegue un coefficiente di sicurezza pari a 1.2, rispetto alla tensione limite di snervamento del materiale AlSi10Mg, del valore di 250 Mpa.

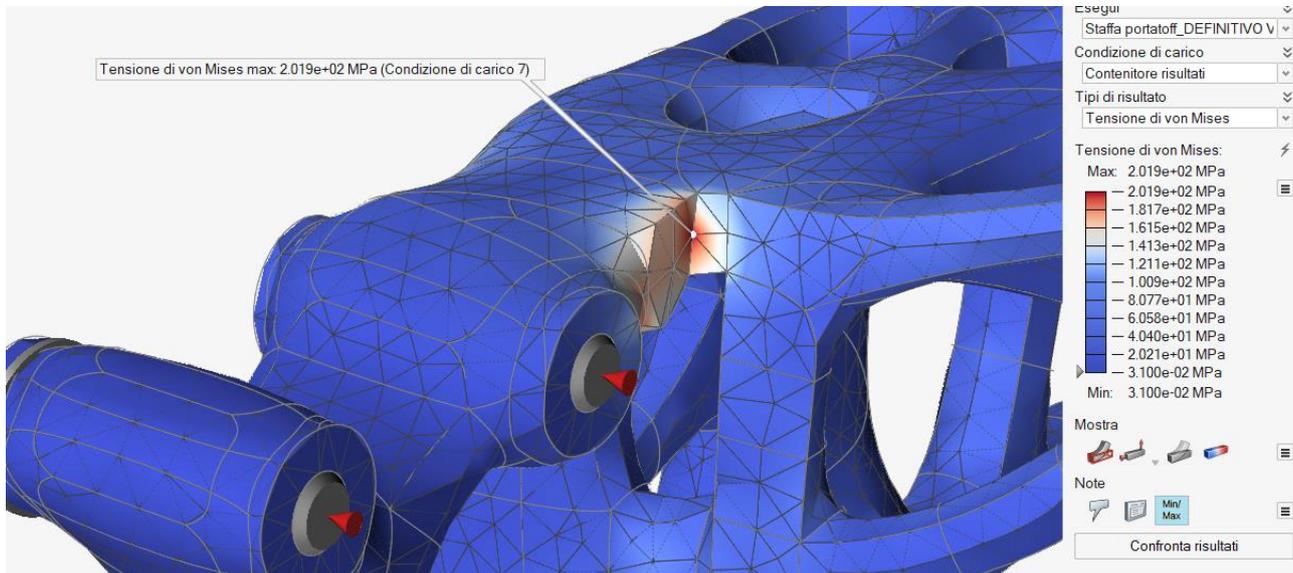


Figura 56: tensione di Von Mises

Durante la ricostruzione della *PolyNurbs* si era tentato di sostituire lo spigolo con un profilo più curvilineo, quasi come fosse un raggio di raccordo, ma eseguendo l'analisi del coefficiente di snervamento era emerso che esso fosse inferiore all'unità, motivo per cui si è optato per la soluzione attuale.

Prima di passare alla trattazione di un'eventuale messa in macchina per la stampa del componente, è doveroso riservare uno spazio anche per analizzare la massa della nuova staffa. Nella Tabella 7 riportata di seguito vengono riassunti i parametri fisici principali:

Nuovo componente: parametri fisici	Valori
Densità [g/cm ³]	2.7
Volume [cm ³]	203
Massa [g]	548

Tabella 7: parametri fisici nuova geometria

Osservando i dati, ad un primo impatto verrebbe da pensare che la riprogettazione abbia dato luogo ad un componente più pesante di quello originale, che si ricorda avere una massa pari a 248 grammi, ottenuto con un grado di riempimento pari al 20%. Tuttavia, occorre precisare due concetti fondamentali. In primo luogo, infatti, non bisogna dimenticarsi che la staffa originale, realizzata in acido polilattico, rappresenta soltanto un prototipo funzionale: ciò significa che, una volta che si fosse stabilita in modo definitivo la geometria, essa sarebbe stata realizzata molto probabilmente in un'altra tipologia di materiale. Ipotizzando, ad esempio, che si fosse scelto di realizzarlo verosimilmente in alluminio, la massa sarebbe stata pari a 1.55 chilogrammi.

In secondo luogo, oltre che la massa, è buona pratica confrontare anche il volume del pezzo originale con quello riprogettato. Così facendo, è possibile avere una chiara idea di quanto risulta "svuotato" il nuovo componente. Se poi l'oggetto iniziale e quello finale fossero davvero realizzati con la stessa lega, la variazione in volume coinciderebbe con quella in massa.

La Tabella 8 riassume questo aspetto molto importante.

Riassunto risultati	Valori
Prima frequenza propria [Hz]	300
Coefficiente di sicurezza	1.2
Carichi (statici/dinamici) [N]	1000/915
Materiale	AlSi10Mg
Massa [g]	550
Volume [cm ³]	203

Tabella 8: riassunto dati output staffa porta tof

3.5 Messa in macchina

Terminata la fase di riprogettazione, è opportuno fornire un'ipotesi di messa in macchina, al fine di avere una traccia da seguire nel caso in cui, in futuro, si decidesse di realizzare fisicamente il componente.

A tal proposito, è bene ricordare un concetto molto importante espresso sin dalle prime pagine, ovvero il fatto che i processi di Fabbricazione Additiva danno luogo ad oggetti che rappresentano dei semilavorati, non dei prodotti finiti. Occorre dunque tenere conto di un eventuale processo di finitura, se richiesto, ma soprattutto dei cosiddetti *sovrametalli*, ovvero l'eccesso di materiale nelle zone di accoppiamento, che in seguito andrà rimosso tramite lavorazioni di tipo convenzionale (asportazione di truciolo).

Nel caso in questione, le aree critiche corrispondono a tutti i fori di fissaggio, e alla piccola piastrina, ricostruita con le PolyNurbs durante la riprogettazione finale.

Nel processo di *Selective Laser Melting*, valori tipici per il sovrametallo variano tra 0.5 mm e 1 mm, mentre per ciò che concerne i fori, può essere utile costruire un profilo *a goccia* per evitare di ricorrere all'utilizzo dei supporti.

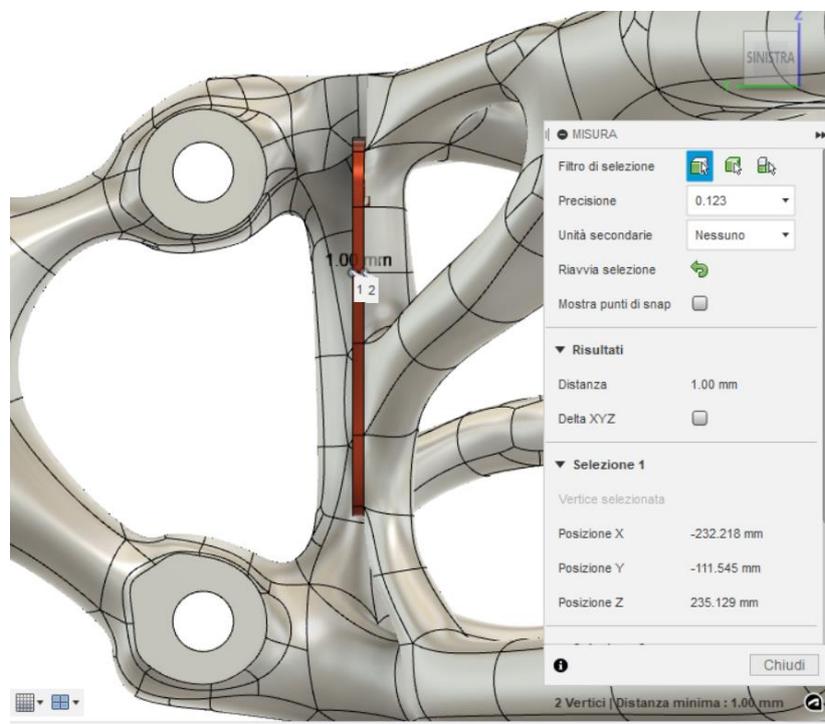


Figura 57: piastrina sovrametallo

Oltre alla realizzazione della forma a goccia, occorre anche rimuovere le svasature, che andranno eseguite con un apposito strumento solo successivamente alla stampa.

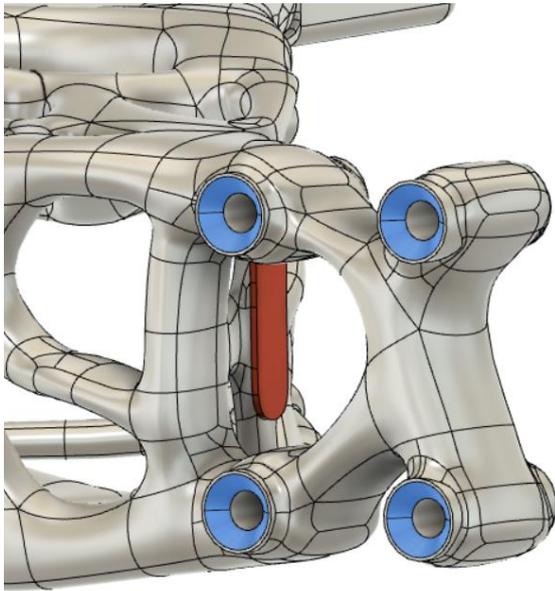


Figura 59: rimozione svasature

8 Fac

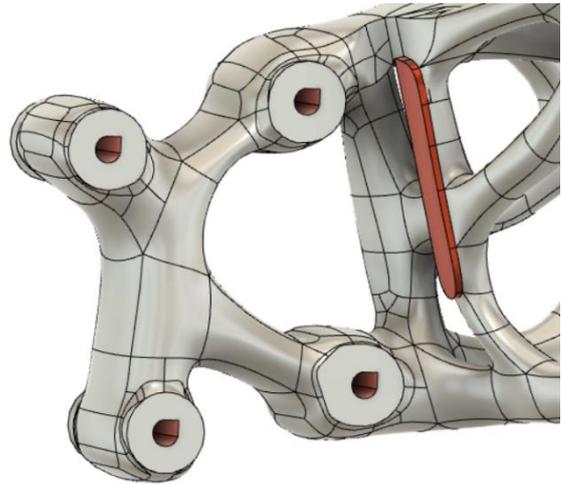


Figura 58: profilo a goccia

Tecnicamente vi sarebbe infine anche il sovrametallo della parte piana di copertura del porta tof, in quanto, a rigor di logica, anche questa è una zona di interfaccia con un altro componente. Tuttavia, in realtà, il fatto che tale superficie sia lasciata con la finitura superficiale *as build*, non pregiudica assolutamente il montaggio dell'oggetto adiacente. Inoltre, un sovrametallo così esteso causerebbe un aumento di costi notevole, data l'ampiezza della zona da fresare, motivo per cui, se non è davvero necessario è preferibile tralasciarlo in quest'area. (Figura 60).

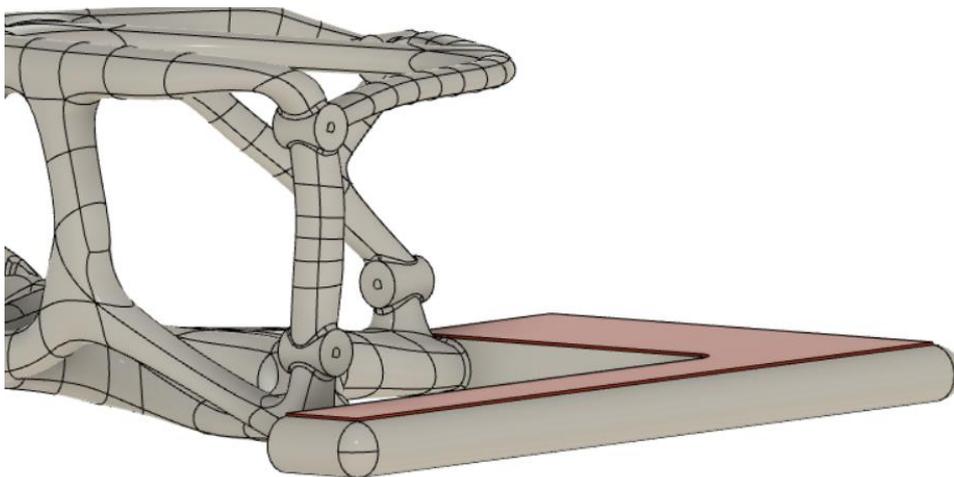


Figura 60: sovrametallo piastra copertura porta tof

Per stabilire un possibile orientamento in macchina si è utilizzato il software di Autodesk *Netfabb*, nel quale, dopo aver selezionato una macchina con camera di lavoro sufficientemente grande da contenere il pezzo, si analizzano varie configurazioni di stampa.

Di solito nei processi additivi si cerca sempre di trovare il giusto compromesso tra velocità di stampa, legata al numero dei layers, e alla quantità dei supporti.

È meglio evitare disposizioni in macchina con pezzi posizionati verticalmente, poiché vi saranno più strati e quindi si impiegherà più tempo, ma allo stesso tempo può capitare che neanche disporli orizzontalmente non sia la scelta migliore, in quanto si riempirebbe di supporti l'oggetto. La scelta che è sembrata più coerente con quanto discusso è riportata nella Figura 61, ed è stata utilizzata per avere un'idea di come orientare le punte delle gocce dei fori.

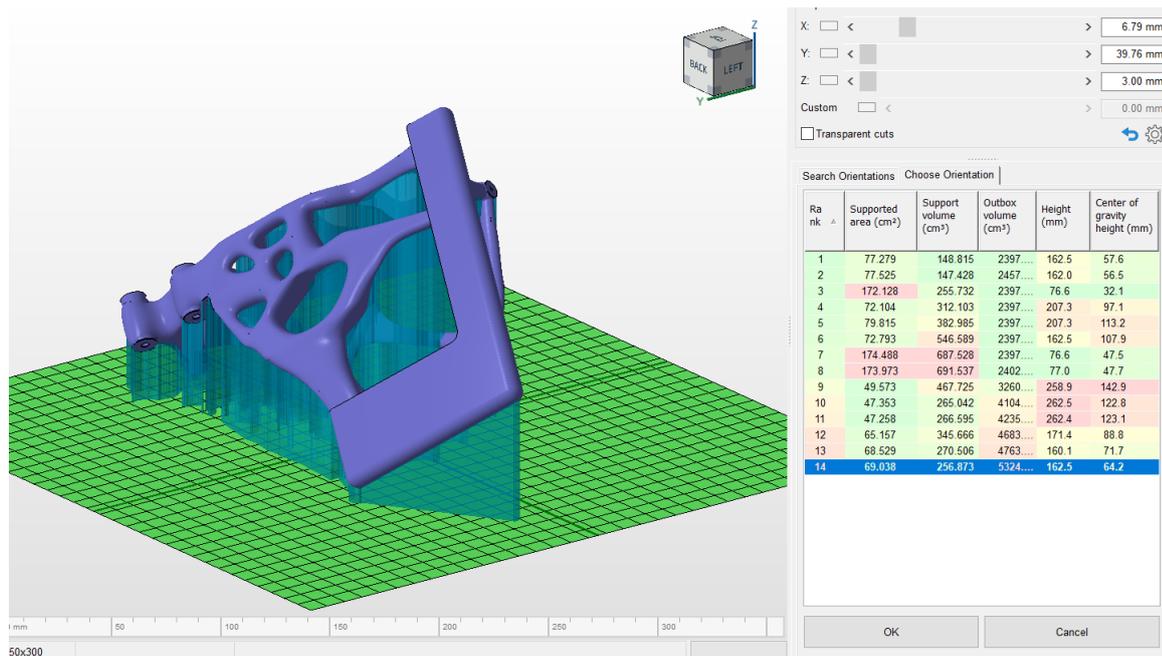


Figura 61: scelta orientamento

In figura si può notare che si è scelto l'ultimo di quattordici orientamenti differenti, a cui corrisponde un'area supportata pari a circa 69 cm^2 , ed un'altezza massima pari a 162.5 mm .

La macchina designata per questa simulazione è la *EOS M270*, che garantisce un'area di lavoro pari a $250 \times 250 \times 215 \text{ mm}^3$.

La verifica dell'ingombro massimo del componente è facilmente verificabile nuovamente su *Inspire*, ed è pari a $204 \times 160 \times 75 \text{ mm}^3$, pertanto si ha la certezza che il volume di stampa della macchina sia sufficientemente grande da contenere il pezzo (Figura 62).

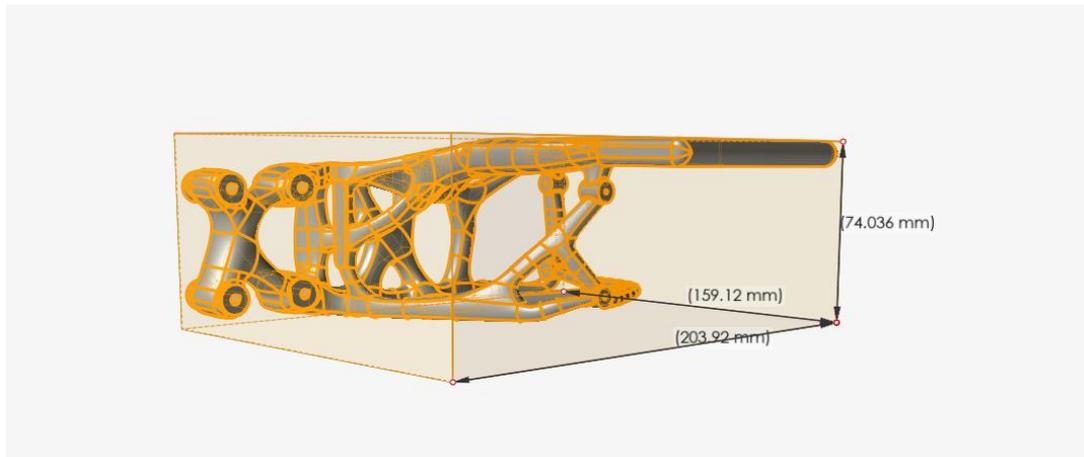


Figura 62: parallelepipedo ingombri massimi

Lo step successivo consiste nel trasformare i supporti in strutture solide, in quanto, nella Figura 61 la rappresentazione era solamente schematica e le strutture di supporto erano costituite da “fili” monodimensionali.

All'interno dello slicer *Netfabb* si ha la possibilità di customizzare completamente la generazione di tali strutture, partendo dalla forma e dall'altezza di distacco rispetto alla *build platform*, fino all'impostazione dell'angolo critico oltre il quale i supporti sono necessari. Tuttavia, il parametro più interessante è la generazione dei cosiddetti *supporti angolari* (Figura 63). Per comprendere tale concetto, si immagini che normalmente i sostegni tendono ad essere generati perpendicolarmente rispetto alla base di costruzione, proiettati verticalmente come se si usasse un filo a piombo. Ciò molto spesso rappresenta la soluzione più semplice e più pratica, tuttavia, quando si ha a che fare con geometrie complesse, può accadere che i supporti non cadano all'interno della base, bensì siano sostenuti da una porzione del componente stesso collocata più in basso.

Questo provoca maggiori difficoltà nella loro rimozione al termine del processo additivo, in quanto diventa più complesso usare, eventualmente, martello e scalpello per staccarli.

Grazie ai supporti angolari, invece, la struttura di sostegno ha la possibilità di “piegarsi”, aggirare l'ostacolo, e collegarsi direttamente con l'area di stampa.

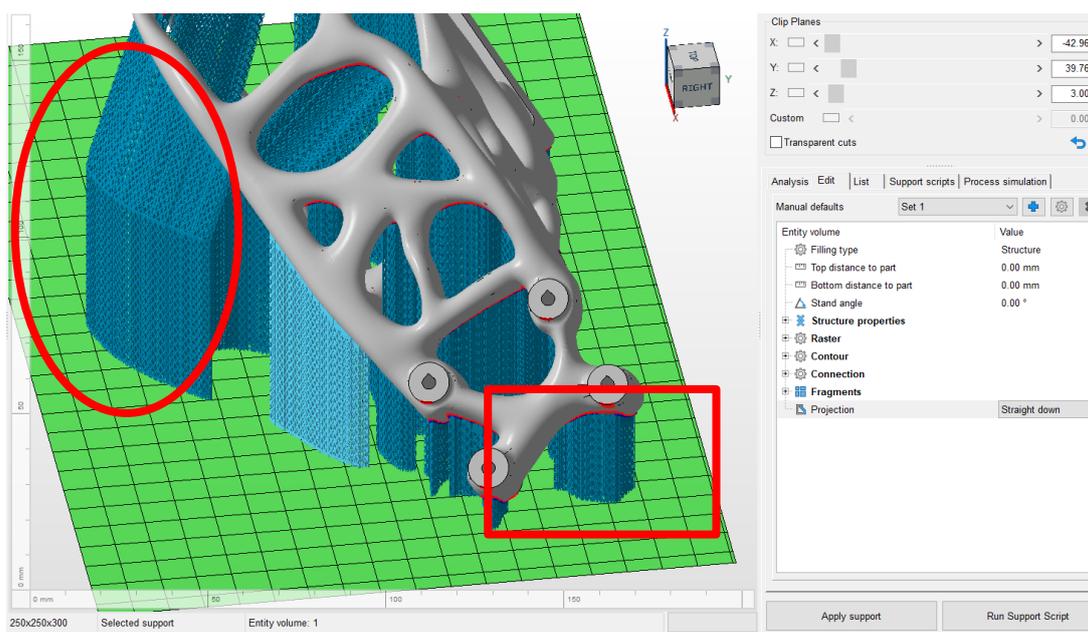


Figura 63: supporti angolari (cerchiato) vs supporti dritti (riquadrate)

Al termine della personalizzazione di tali strutture di sostegno, la proposta di messa in macchina ultimata si presenta come nella Figura 64.

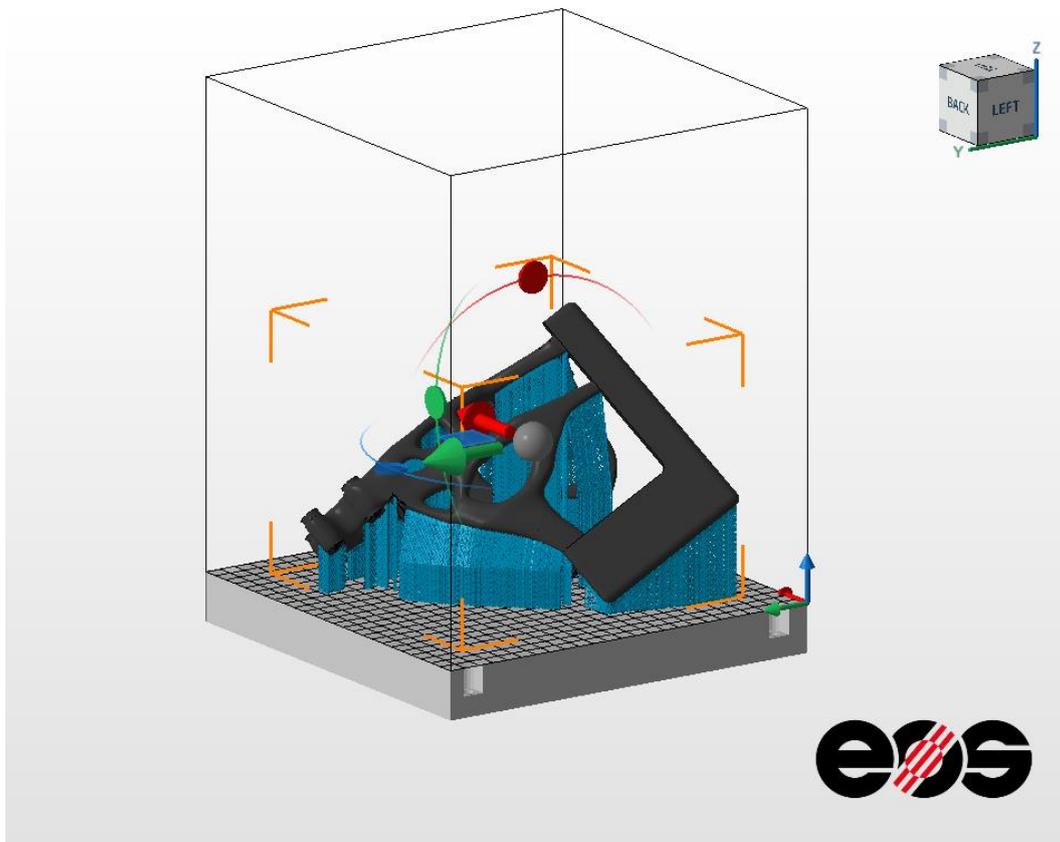


Figura 64: proposta messa in macchina

3.6 Considerazioni finali

Per concludere la trattazione della staffa porta tof, è bene confrontare i risultati ottenuti e confrontarli con quelli relativi ai processi convenzionali, al fine di comprendere se effettivamente valga la pena affidarsi alle tecnologie additive o no.

	GEOMETRIA ORIGINALE	GENERATIVE DESIGN
Prima frequenza propria [Hz]	142	300
Coeff. Sicurezza minimo	0.9	1.2
Materiale	PLA	AlSi10Mg
Massa [g]	264	550
Volume [cm ³]	573	203
Risparmio volume [cm ³]	/	370
Risparmio percentuale [%]	/	64.6

Tabella 9: confronto tra geometria iniziale e finale

Riprendendo i dati elencati nella Tabella 9, sono evidenti i vantaggi dell'Additive Manufacturing. Il nuovo design permette infatti di incrementare notevolmente la prima frequenza propria di risonanza, con un incremento pari al 111%, rispettando sempre il vincolo sul limite imposto sul coefficiente di sicurezza.

L'altro aspetto vantaggioso emerge confrontando i due volumi: grazie ai processi di ottimizzazione, il nuovo componente risulta molto più alleggerito rispetto al design iniziale, in termini di quantità di materiale, ma allo stesso tempo con una geometria estremamente complessa. Questo è in linea con le regole del Generative Design, secondo cui, nella maggior parte dei casi, i processi additivi trovano giustificazione proprio quando le forme sono impossibili da replicare coi metodi convenzionali.

L'unico punto sfavorevole è la massa, che al termine della riprogettazione risultata più che raddoppiata. Tuttavia, come già discusso, questo è una conseguenza del fatto che si è scelta una lega di alluminio, mentre l'oggetto originale era realizzato in PLA.

Per un confronto più corretto sul peso, occorrerebbe sapere quale sia il materiale definitivo per la staffa, con quale processo verrebbe realizzata: si rimarrebbe fedeli alla stampa 3D, oppure si opterebbe per lo stampaggio a iniezione? Si continuerebbe a parlare di polimeri, oppure potrebbe essere realizzata in metallo?

Al termine di queste analisi, è possibile affermare che, per questo primo componente, i benefici del Generative Design giustificano i costi maggiori.

4 PORTA TELECAMERA

Terminata la trattazione della staffa di sostegno per il porta tof, si passa ora alla riprogettazione del secondo componente, ovvero il porta telecamera.

4.1 Geometria originale

4.1.1 Funzionalità

Analogamente al caso precedente, per iniziare è opportuno analizzare la topologia originale dell'oggetto, comprendendo le specifiche di progetto e la sua funzionalità sulla carrozzina.

Il componente in questione è montato nella parte anteriore della sedia a rotelle, lateralmente rispetto ai braccioli, ed è presente sia dal lato destro, sia da quello sinistro.



Figura 65: porta telecamera, posizione su carrozzina

Come suggerisce lo stesso nome, il particolare ha lo scopo di essere un supporto per una telecamera, la quale, proprio come le schedine tof, ha la funzione di fornire e di comunicare alla scheda elettrica principale la posizione del mezzo in ogni istante, rilevando la presenza di eventuali ostacoli e partecipando insieme alle altre telecamere alla "scansione" dell'ambiente circostante.

Il collegamento con l'impianto elettrico avviene tramite uno specifico connettore, posto lateralmente sulla destra.

Il porta telecamera presenta un doppio scarico sulla faccia superiore e inferiore, che ha lo scopo di garantire il passaggio dell'aria necessario al raffreddamento della telecamera, nel caso in cui si scaldasse e le ventole interne si avviassero per trasportare parte del calore verso l'ambiente esterno.

Le nervature visibili in Figura 65 hanno la funzione sia di collegamento tra la parte di sostegno della telecamera e quella di fissaggio, sia di rinforzo, per ostacolare la flessione durante eventuali urti. Inoltre, tale scelta progettuale è stata in qualche modo "obbligata" dal fatto che, di fianco a tali nervature, sono presenti i fori di fissaggio tra l'oggetto in questione e la telecamera, appunto. I suddetti fori sono passanti, non filettati, aventi diametro 3.2 mm, con la svasatura iniziale, in quanto ospiteranno viti M3 con testa svasata. Per distanziare la telecamera dalla parete interna del componente, sono stati realizzati due spallamenti cilindrici, coassiali ai fori (Figura 66).

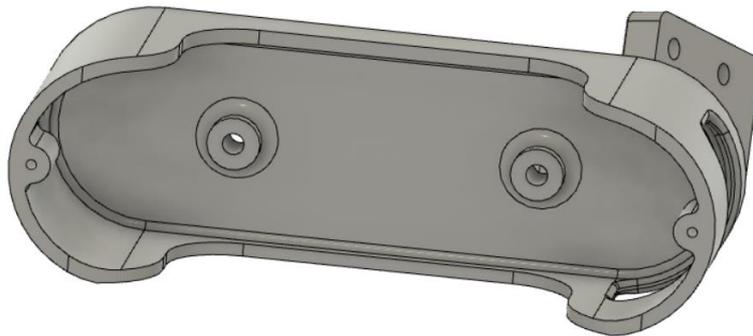


Figura 66: sedi M3 per collegamento telecamera

Per quanto riguarda gli altri tre fori di fissaggi, invece, essi collegano, in questa versione di carrozzina, il porta telecamera alla struttura tubolare realizzata tramite stampa 3D.

Anche in questo caso, misurando il diametro, che è pari 3.2 mm, i fori saranno le sedi per viti M3, ma questa volta non più a testa svasata, bensì a testa cilindrica con cava esagonale. Ecco dunque che si giustifica la lamatura per contenere la testa della vite la quale, secondo catalogo, avrà un diametro massimo di 5.68 mm.^[46]

Poiché la lamatura è stata realizzata con un diametro pari a 6.8 mm, si ha la certezza che la testa abbia lo spazio sufficiente per entrare nell'apposita sede. (Figura 67).

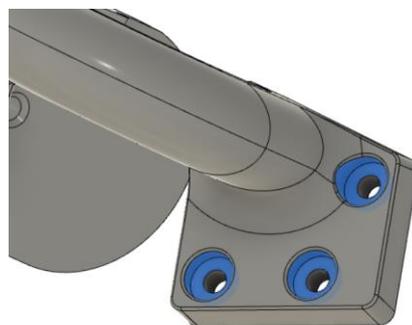


Figura 67: lamatura per viti M3 a testa cilindrica

Ultima, ma non per importanza, è la spianatura progettata sulla parte inferiore dell'oggetto. Questa caratteristica del porta telecamera non serve ad accoppiare il componente con altri elementi della carrozzina, ma semplicemente è un artificio per agevolare il buon esito del Fused Deposition Modelling, in quanto garantisce una base ampia di appoggio, da cui derivano una maggiore stabilità in fase di stampa, un maggiore contrasto al ritiro in fase di raffreddamento, ed anche una minore necessità delle strutture di supporto.

Per completezza, si riporta la Figura 68, raffigurante la messa in tavola dell'oggetto, comprensive delle quote relative ai suoi ingombri massimi.

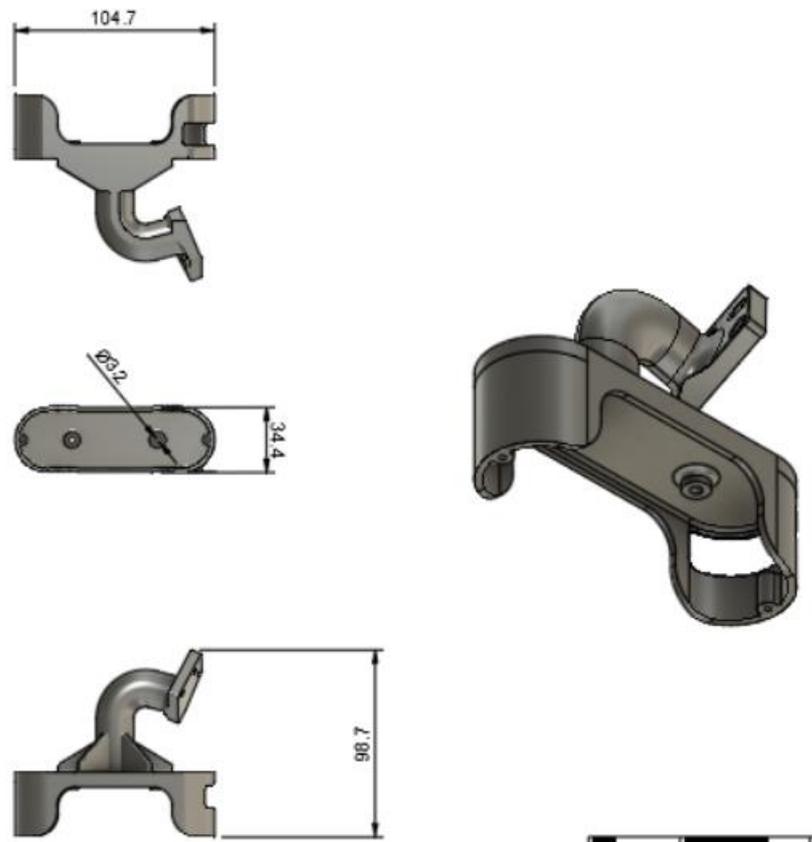


Figura 68: messa in tavola porta telecamera

4.1.2 Aspetti critici

Dal momento che il componente originale, trattandosi di un prototipo, è stato realizzato in PLA, come nel caso precedente, anche questa volta un aspetto problematico è legato alle vibrazioni e alla resistenza agli urti. L'oggetto, essendo collegato ad una struttura tubolare nel medesimo materiale, non tende a garantire un'eccellente rigidità. Tuttavia, occorre precisare il fatto che, anche se fosse realizzato in un materiale estremamente rigido, come ad esempio un ceramico, in futuro sarebbe opportuno intervenire anche sulla struttura tubolare di sostegno, in quanto è lei la maggiore responsabile delle vibrazioni in questo caso specifico, più che il porta telecamera in sé.

Ciononostante, è comunque necessario lavorare su una riprogettazione che veda il componente realizzato in un materiale differente, che potrebbe essere sia una lega metallica leggera, sia un polimero più rigido dell'acido polilattico.

Per quanto riguarda la resistenza agli urti, essa rappresenta il vero ostacolo principale da superare, in quanto il porta telecamera, proprio come la staffa porta tof, si trova in una zona della carrozzina in cui potrebbe essere soggetto ad impatti accidentali.

Durante i test eseguiti nella sede di *Alba Robot*, non si sono verificati incidenti che hanno portato il pezzo alla rottura, come invece era accaduto per la staffa, di conseguenza si intuisce che il prototipo in questione è nel complesso meno critico di quello riprogettato nei capitoli precedenti. Tuttavia è comunque necessario riadattare la topologia del componente, tramite un nuovo design generativo, sia per orientarsi verso una conformità di stile tra tutti i particolari, sia per adattare la nuova geometria ad un nuovo materiale che sia più tenace del PLA.

4.2 Analisi fem componente originale

4.2.1 Condizioni di carico

Si passa ora a definire i carichi a cui è sottoposto l'oggetto. Anche in questo caso, trattandosi per la maggior parte di carichi accidentali, si rivela opportuno ipotizzare una serie di urti nelle posizioni più critiche, al fine di stabilire come si comporta e come reagisce il porta telecamera nella sua configurazione originale.

Per una maggiore chiarezza, si rimanda alle immagini seguenti, nelle quali è possibile avere una panoramica iniziale sulle aree immaginate per un eventuale impatto.

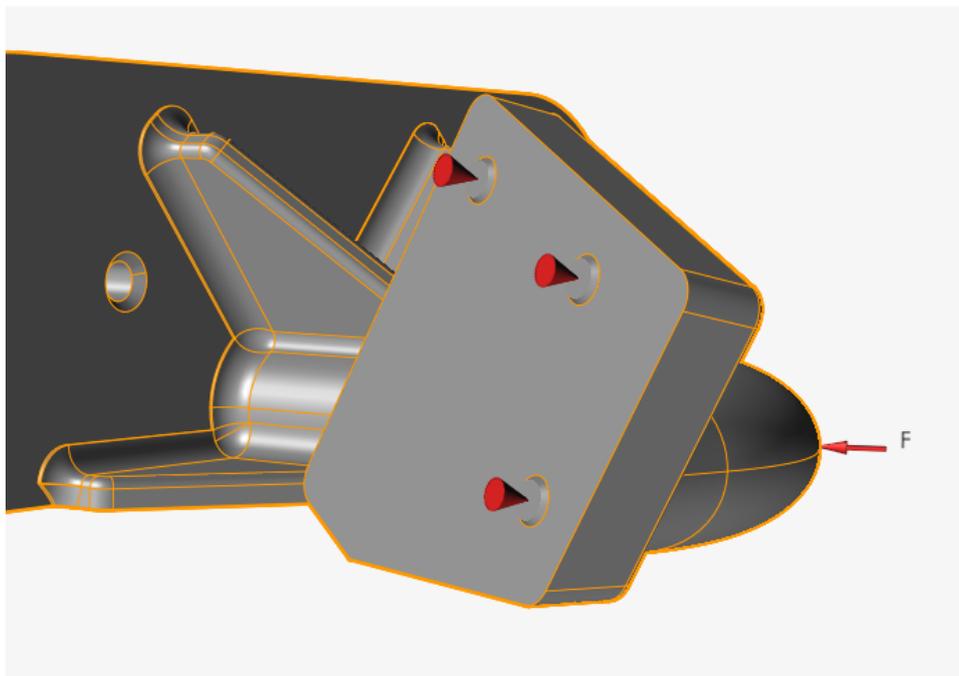


Figura 69: incastri cedevoli

In primo luogo, è necessario provvedere alla definizione dei vincoli di fissaggio, che nel caso in questione corrispondono a tre incastri cedevoli, i quali simulano il comportamento delle viti M3, avvitate nelle apposite sedi con la lamatura.

Successivamente si passa all'inserimento dei carichi veri e propri, responsabili delle sollecitazioni a cui sarà sottoposto il componente.

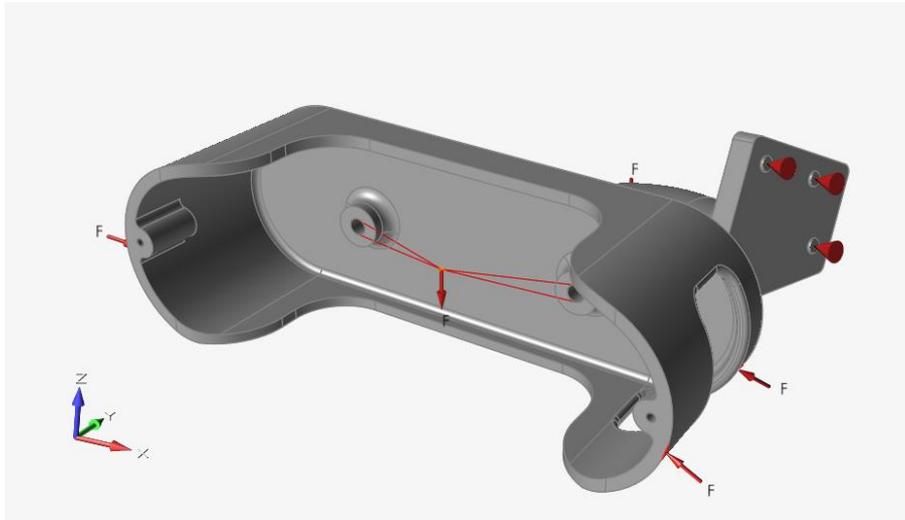


Figura 70: carichi pt. 1

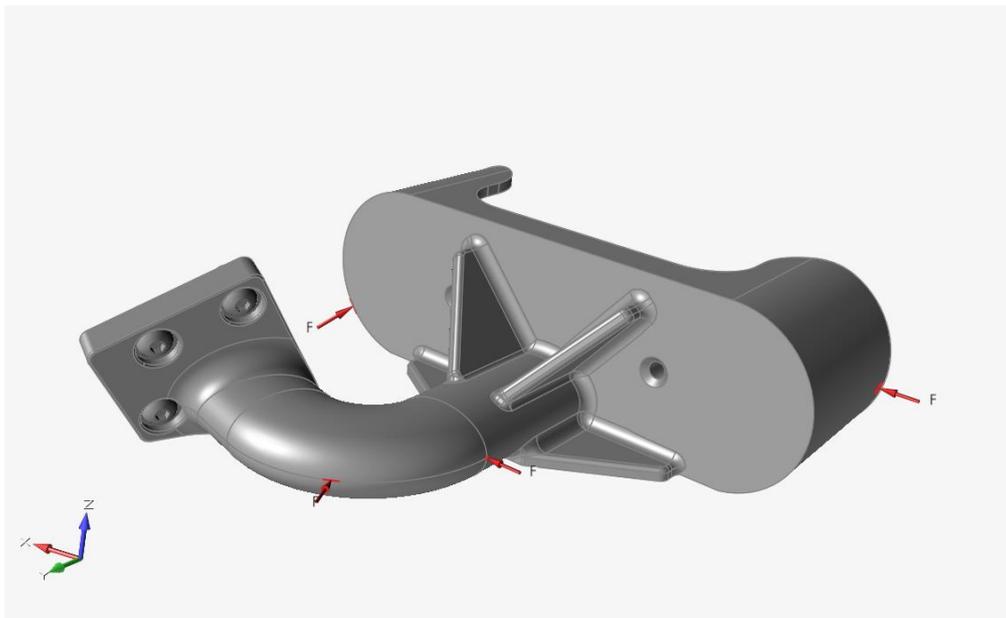


Figura 71: carichi pt. 2

La posizione delle varie forze è stata scelta facendo in modo che il braccio rispetto alla zona di incastro sia il massimo possibile, e dunque la sollecitazione che ne deriva sia più onerosa da sopportare. Nella parte frontale non sono stati inseriti carichi di tipo impulsivo, per il fatto che un impatto in quella zona dell'oggetto sarebbe improbabile: nella zona frontale della sedia a rotelle, infatti, sporgono le pedaline di appoggio, ed è molto più facile che siano queste ultime ad impattare contro un ostacolo, piuttosto che il porta telecamera.

Per completezza, inoltre, si è scelto di riportare la forza relativa al peso della videocamera, ripartito equamente tra i due spallamenti, sedi delle viti M3. All'interno del software *Inspire*, tale divisione è resa possibile grazie allo strumento dei *connettori*.

Sostanzialmente si tratta di “fili” infinitamente rigidi, grazie ai quali è possibile applicare una forza ad una determinata distanza, oppure ad una zona cilindrica anziché ad un punto concentrato. Naturalmente, già prima della definizione di tale carico, si poteva immaginare che esso sarebbe stato molto meno impattante rispetto agli altri, a causa della massa davvero ridotta della telecamera; tuttavia si è scelto di inserirlo nelle sollecitazioni globali, anche per trattare lo strumento dei *connectors*, non discusso per il componente precedente.

Un aspetto fondamentale è la definizione del modulo delle forze d’urto. Quando si è discusso della staffa porta tof, era stato utilizzato un metodo che permetteva di trasformare un carico impulsivo, in uno di tipo statico, conoscendo solamente la massa, la velocità dell’oggetto e il suo tempo di decelerazione.

Anche con il porta telecamera è possibile ripetere lo stesso ragionamento, impostando nuovamente i valori discussi nel capitolo precedente, ovvero una massa di 55 chilogrammi e una velocità massima pari a 6 km/h ed un tempo di decelerazione pari a 0.1 secondi.

Nonostante l’oggetto sia meno esposto agli urti, infatti, è sempre opportuno restare conservativi e ipotizzare il caso peggiore possibile.

Applicando dunque la relazione vista nei capitoli precedenti, in base alla quale

$$F_i = \frac{m * v}{t_d}$$

Sostituendo i valori di cui sopra, si ottiene una forza analoga al caso precedente, pari a 915 N.

Per quanto riguarda la forza peso della telecamera, si suppone che essa abbia una massa non superiore a 200 grammi, viste anche le dimensioni, e pertanto che il peso non superi i 2 N.

Carichi	Valori
Statici [N]	2
Dinamici [N]	915

Tabella 10: carichi porta telecamrra

4.2.2 Risultati analisi

Dopo aver impostato i valori corretti alle varie forze, è possibile eseguire l’analisi agli elementi finiti, analizzando lo spostamento, il coefficiente di sicurezza e i modi normali per quanto riguarda le frequenze di risonanza.

Partendo dal primo parametro, risulta che la freccia massima è data dalla condizione di carico numero 6, la quale corrisponde alla forza evidenziata in colore giallo (Figura 72) e che il valore di tale spostamento è prossimo addirittura a 21 mm risultanti.

A questo proposito è doveroso fare una breve digressione, omessa per la staffa porta tof. L’indicazione della freccia rappresenta, in questo caso, solamente un’aggiunta rispetto ai valori del coefficiente di sicurezza e della frequenza di risonanza.

Infatti, non vi è nessun vincolo sullo spostamento massimo ammissibile in seguito all’impatto. Paradossalmente, l’oggetto potrebbe spostarsi anche di una freccia pari a 50 mm, ma se il primo modo normale fosse sufficientemente alto, e il rispetto del limite di snervamento fosse verificato, l’oggetto potrebbe benissimo essere considerato valido.

Ne sono un esempio le ali degli aerei, soggette ad enormi spostamenti durante i voli, ma che tuttavia non oltrepassano il limite di sicurezza che porterebbe a rottura catastrofica.

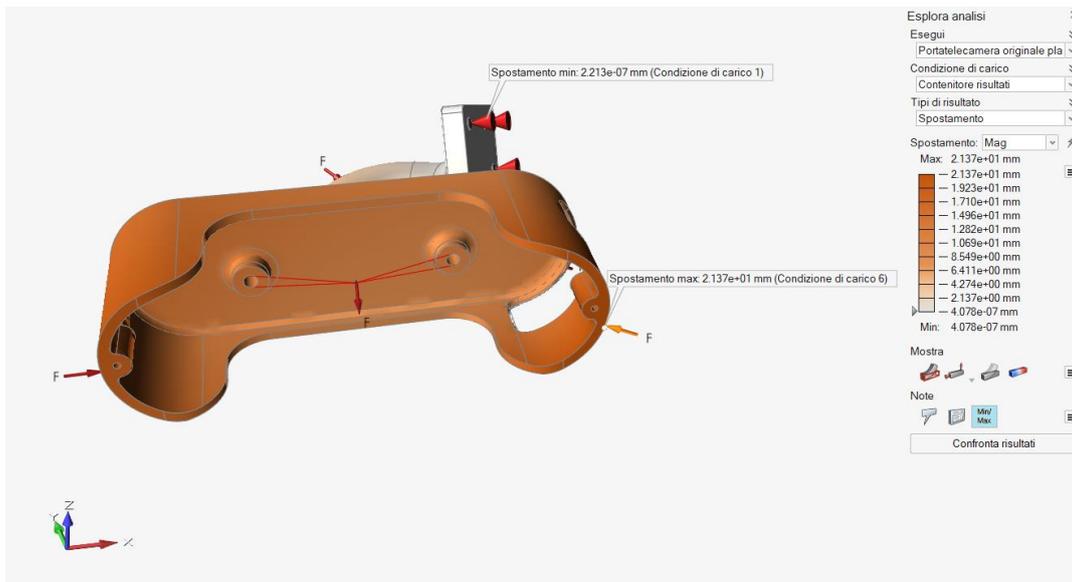


Figura 72: analisi fem, spostamento massimo

Passando invece al coefficiente di sicurezza, si può notare che le sollecitazioni maggiori sono concentrate nella zona a sezione ellittica che collega il corpo principale alla zona piana, sede dei fori M3. Il porta telecamera tende a flettere intorno all'incastro, gravando sul profilo ellittico, nel quale il CS è inferiore all'unità.

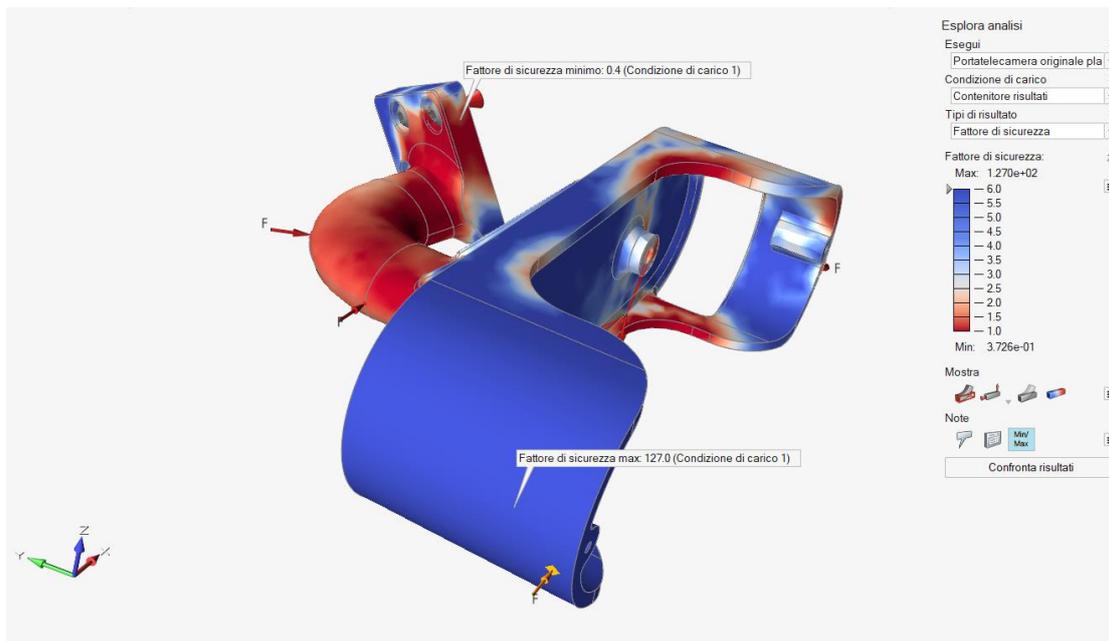


Figura 73: analisi fem, coefficiente di sicurezza minimo

Per concludere, vi è l'analisi relativa ai modi normali, secondo la quale il primo autovalore che dà luogo a risonanza coincide con una frequenza pari a circa 146 Hz (Tabella 11), considerando il peso proprio dell'oggetto, ma anche quello della telecamera, che è presente in tutte le condizioni di carico e che in questo caso viene considerato come una forzante esterna.

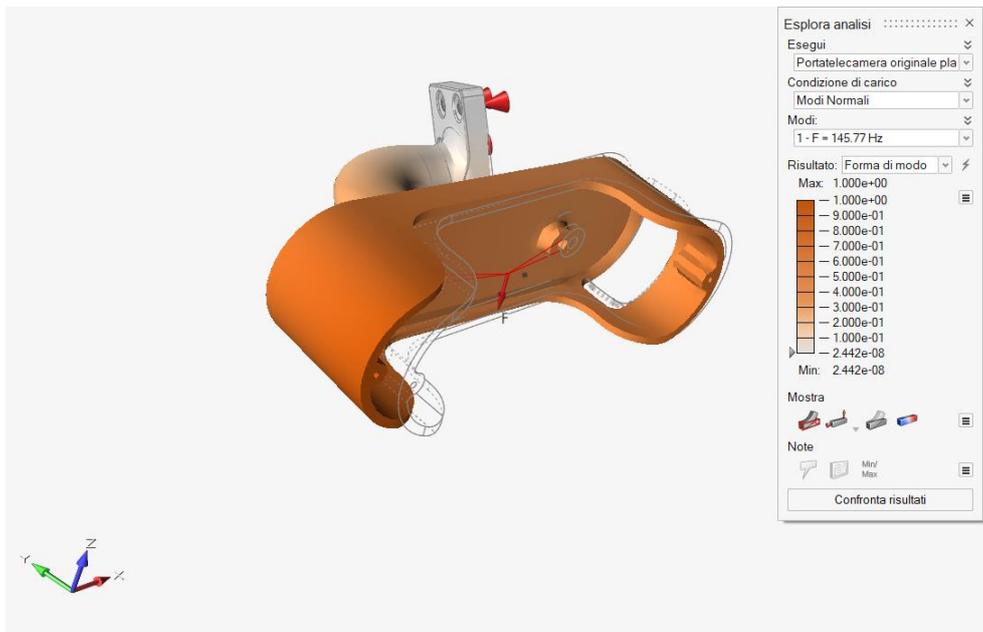


Figura 74: analisi fem, modi normali

Riassunto dati input	Valori
Materiale	PLA
Primo modo normale [Hz]	146
Coefficiente di sicurezza minimo	0.4
Massa riempimento 10% (stampa 3D) [g]	35
Massa riempimento unitario (CAD) [g]	56
Volume [cm ³]	45.5

Tabella 11: dati input porta telecamera originale

4.3 Processo di riprogettazione

4.3.1 Definizione obiettivi

Proprio come per la staffa vista nei capitoli precedenti, per eseguire la riprogettazione mediante Additive Manufacturing, è necessario imporre degli obiettivi e dei vincoli da rispettare. Si è detto che un aspetto critico è legato agli urti ed alle vibrazioni, in quanto la telecamera, muovendosi, tende a perdere i riferimenti della posizione.

È evidente, dunque, che l'obiettivo prioritario a seguito della riprogettazione, sia quello di incrementare la prima frequenza propria dell'oggetto, cercando di massimizzarla tramite le opportune ottimizzazioni.

Per quanto riguarda il vincolo invece, si impone un coefficiente di sicurezza minimo pari a 1.2, che garantisca una resistenza meccanica adeguata senza incorrere in rottura o snervamento.

Obiettivi	Vincoli
Massimizzazione prima frequenza propria	CS minimo: 1.2

Tabella 12: obiettivi e vincoli riprogettazione porta telecamera

4.3.2 Operazione di defeating

Stabiliti obiettivi e vincoli, occorre provvedere alla semplificazione della geometria, ovvero il *defeaturing*, al fine di agevolare l'operazione di ottimizzazione topologica che verrà trattata in seguito. Per prima cosa, dunque, si eliminano tutti i raggi di raccordo, assai presenti nella geometria originale.

Successivamente si estendono le pareti superiore e inferiore, per livellarle con le porzioni laterali già sporgenti verso l'esterno.

Infine, si trasformano le nervature di rinforzo con un profilo di rivoluzione, esteso fino alla spianatura della parete inferiore. Per questa zona specifica, occorrerà prestare particolare attenzione nel lasciare lo spazio necessario all'inserimento delle viti nelle apposite sedi. La nuova superficie creata, infatti, copre totalmente i fori svasati, ma questo non rappresenta alcun problema in questa fase preliminare.

Al termine dell'operazione di defeating, il porta telecamera si presenta come nella Figura 75.

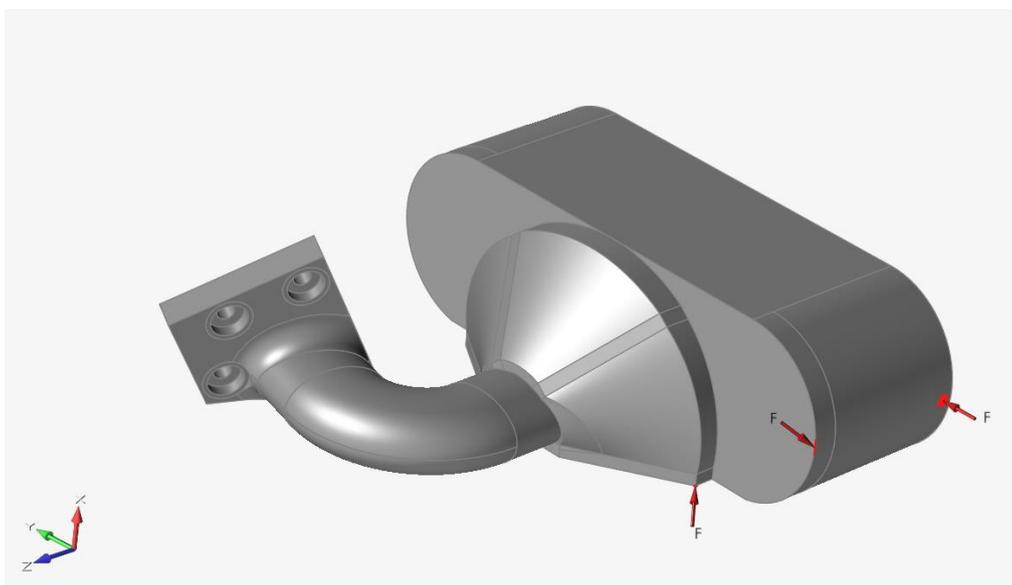


Figura 75: operazione di semplificazione geometria

4.3.3 Definizione zone di progettazione

Una volta che si è semplificata la geometria, è possibile procedere con la distinzione degli spazi di progettazione dalle zone di *No Design*, come già svolto per il componente precedente.

Per l'oggetto in questione, sono di fondamentale importanza le sedi per le viti di fissaggio con la struttura tubolare di sostegno, le due sedi per l'attacco della telecamera, ed inoltre la sede per consentire il passaggio del connettore laterale, il cui scopo è quello di collegare la videocamera con la scheda elettrica principale.

Il resto della geometria non presenta altre particolari limitazioni, compresa la parte "ad uncino" che svolge il ruolo di collegamento tra la zona ad asola, sede della telecamera, e la parte prismatica nella quale vi sono i tre fori di ancoraggio. Questa area specifica verrà discussa all'interno del capitolo riguardante la riprogettazione, proprio per il fatto di poter oltrepassare le zone di ingombro delimitate dalla geometria originale.

Al termine del processo discusso, si ottiene il componente mostrato nella Figura 76.

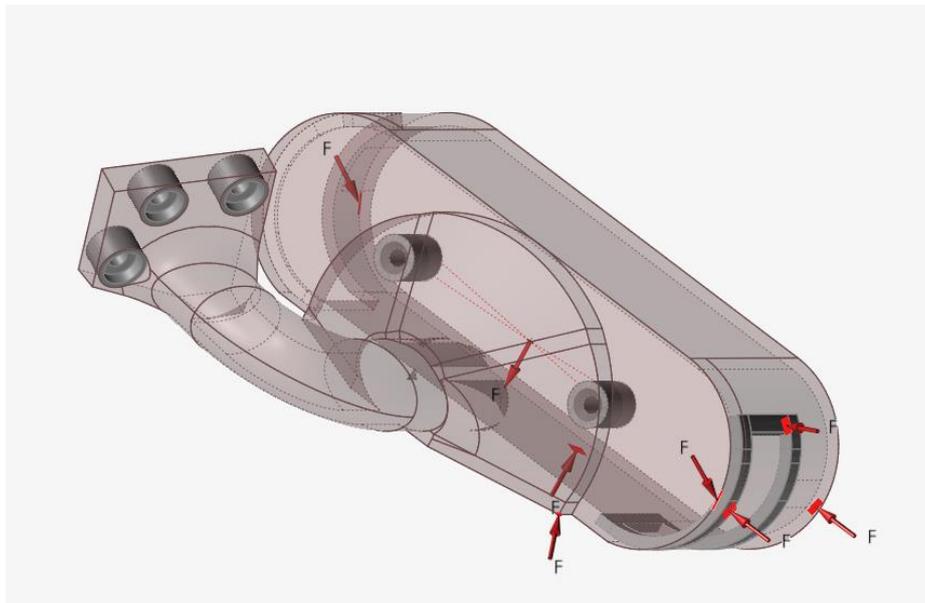


Figura 76: distinzione *Desing* e *No Design Space*

4.3.4 Ottimizzazione topologica

A questo punto della riprogettazione, è possibile eseguire l'ottimizzazione topologica del porta telecamera. Come nel caso della staffa porta tof, dal momento che l'obiettivo primario è quello di limitare le vibrazioni del componente durante il funzionamento della carrozzina, si è scelto di eseguire un'ottimizzazione di massimizzazione della frequenza.

In altri termini, al fine di evitare il più possibile oscillazioni varie, si ricerca la geometria per la quale l'oggetto inizi a vibrare in condizioni di risonanza alla frequenza più alta possibile. Maggiore è il valore del primo modo normale, espresso in Hz, minore sarà l'impatto delle vibrazioni sull'oggetto durante l'esercizio, in quanto le frequenze agenti saranno più "distanti" dal valore critico di risonanza.

Il materiale ipotizzato in questa è nuovamente la lega metallica AlSi10Mg, la quale garantisce ancora una volta un ottimo compromesso tra proprietà meccaniche e leggerezza.

Prima di scegliere in modo definitivo, l'idea iniziale per questo componente era quella di optare per un polimero termoplastico, da trattare tramite SLS, che offrisse un buon compromesso tra rigidità e tenacità. Nel capitolo relativo al terzo ed ultimo particolare verrà trattata un'intera sezione riguardo alla scelta di tale materiale; tuttavia, momentaneamente è sufficiente specificare il fatto che, a seguito dell'analisi del coefficiente di sicurezza, il porta telecamera non sarebbe stato in grado di sopportare le sollecitazioni, scendendo ben oltre il limite minimo imposto.

La Figura 77 mostra il risultato ottenuto al termine dell'ottimizzazione topologica.

È possibile notare il fatto che, stando ai valori riportati dal programma, la prima frequenza modale del porta telecamera, realizzato in AlSi10Mg, potrebbe raggiungere il valore potenziale pari a circa 986 Hz, il che rappresenterebbe una cifra significativamente alta, che soddisferebbe di gran lunga gli obiettivi ricercati.

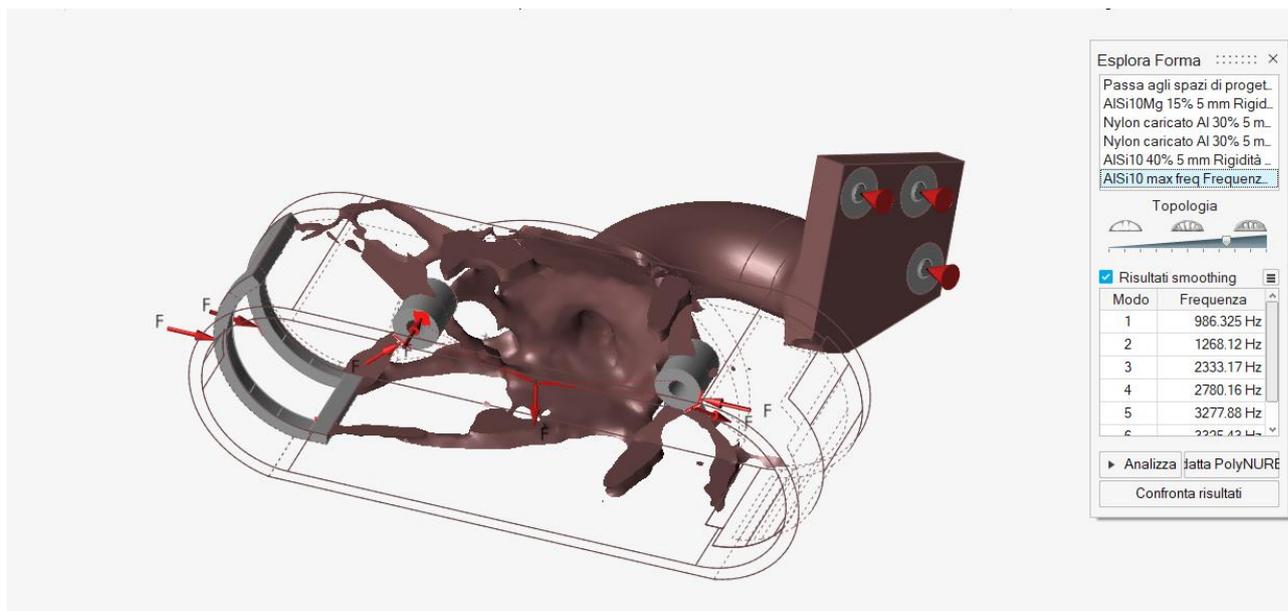


Figura 77: ott. top. massimizzazione prima frequenza propria

4.3.5 Generazione PolyNurbs

Seguendo nuovamente i passi svolti per il componente precedente, al fine di ottenere un corpo solido, è necessario dapprima ricostruire la superficie esterna sfruttando lo strumento delle PolyNurbs e servendosi dell'ausilio dell'ottimizzazione come linea guida.

È possibile notare che nel lato destro dell'immagine, sembra non esservi la minima presenza di materiale, pertanto si è deciso di cercare, per quanto possibile, di mantenere una simmetria con il lato opposto, eccezione fatta per la sede del connettore, presente solamente da una parte.

In un primo momento, durante la ricostruzione si è tentato di mantenere gli stessi ingombri della geometria originale. Tuttavia, a seguito dell'analisi dei risultati, è emerso che il componente avrebbe avuto difficoltà a sopportare alcuni dei carichi imposti, con tensioni pericolosamente prossime al limite di snervamento del materiale. Per questa ragione, agganciandosi a quanto accennato nelle pagine precedenti, si è scelto di rinforzare ulteriormente la zona curva del porta telecamera, tramite la generazione di una sorta di nervatura (Figura 78).

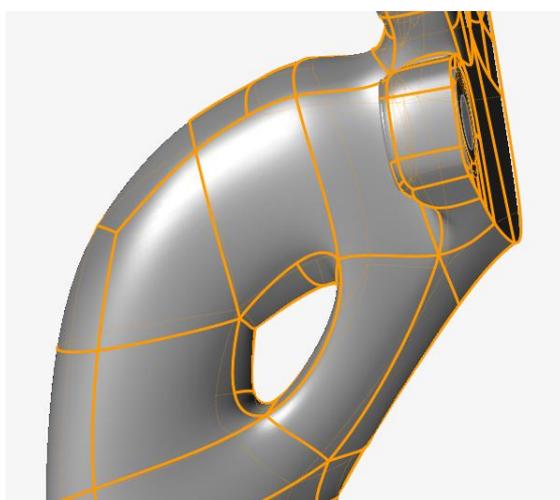


Figura 78: deviazione linee guida ottimizzazione topologica

Inoltre, la nervatura in questione non ha solamente lo scopo di rinforzo, ma ha anche il vantaggio di limitare la generazione dei supporti in fase ipotetica di stampa. Durante la riprogettazione, infatti, è sempre buona pratica pensare a quale possa essere un orientamento plausibile in macchina dell'oggetto, in maniera tale da poter intervenire su zone specifiche ed effettuare piccole modifiche, evitando la necessità di supporti inutili.

È proprio questo il caso del componente sottoposto a progettazione, in cui, avendo già in mente un possibile orientamento, si ha avuta la possibilità di modificare leggermente la geometria per garantire maggiore resistenza meccanica, ma allo stesso tempo evitare le strutture di sostegno sotto la parte finale dell'"uncino".

Un'alternativa accettabile sarebbe stata quella di modificare completamente la zona di connessione tra asola, sede della telecamera, e profilo prismatico per il fissaggio tramite viti M3. In tal caso si sarebbe provveduto a disegnare tramite CAD un nuovo profilo di collegamento tra le due zone, progettandolo in modo tale da limitare la concentrazione delle tensioni e renderlo per sua natura più resistente.

Al termine del processo di ricostruzione delle PolyNurbs, dopo varie modifiche alla struttura, e dopo essersi assicurati che la nuova configurazione consenta il passaggio della telecamera, la nuova geometria si presenta come mostrato nella Figura 79.

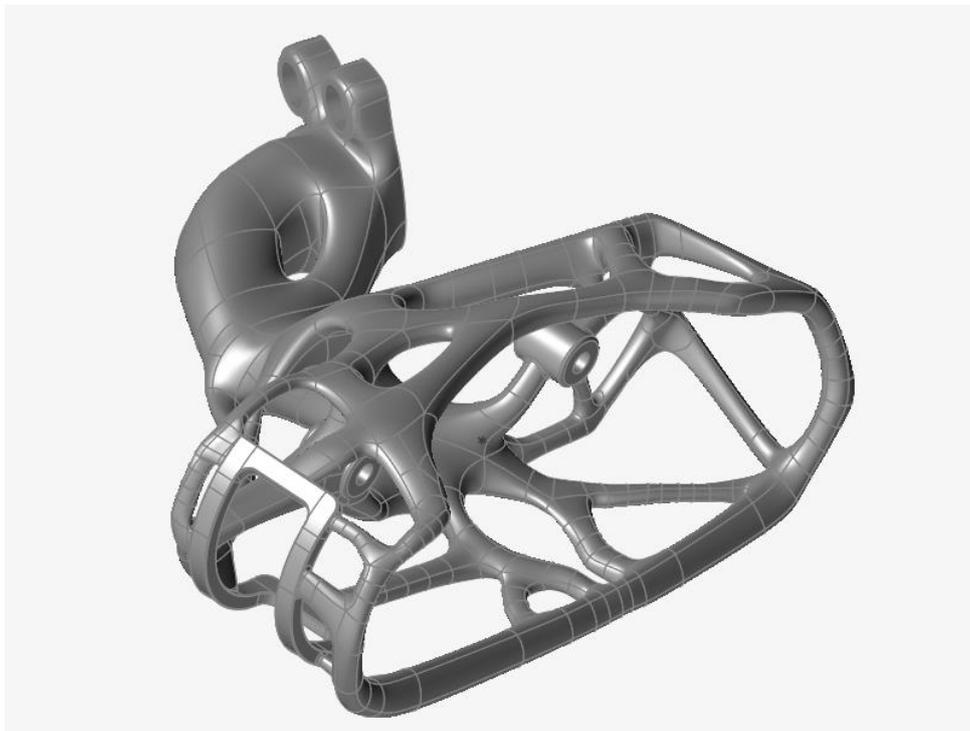


Figura 79: nuova geometria porta telecamera

È opportuno ricordare nuovamente che la geometria allo stato attuale non è ancora solida: occorre dunque esportare il file in formato *Parasolid/Step* ed eseguire le analisi statiche su tale modello.

4.4 Analisi fem risultati

Per avere conferma del buon esito della riprogettazione, è opportuno effettuare la verifica tramite la simulazione fem. Per fare ciò, occorre prima di tutto integrare il nuovo design della zona a geometria variabile, appena ricostruita tramite nurbs, e le aree che invece non hanno subito alcuna modifica. Come già fatto per la staffa porta tof, dunque, si ricorre all'utilizzo dell'operazione booleana di sottrazione, al fine di definire correttamente le zone di contatto. Così facendo, l'interazione tra *Design* e *No Design Space* è vista dal programma come zona di saldatura.

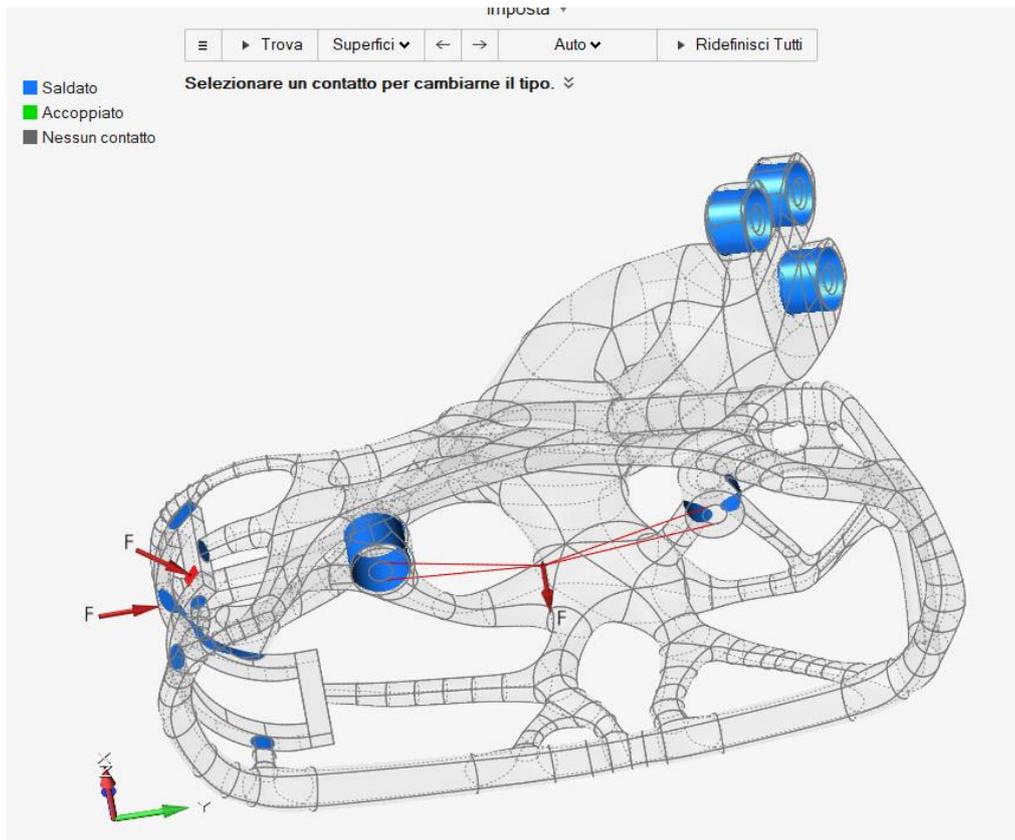


Figura 80: definizione zone di contatto

Appurato che i contatti siano bidimensionali e che non vi siano zone rimaste isolate, è possibile procedere con l'analisi statica.

Nota la problematica principale legata alle vibrazioni, il principale parametro da verificare è la prima frequenza propria del componente, per capire se ci si è avvicinati al valore potenzialmente ottenibile, suggerito in maniera indicativa dal software al termine dell'ottimizzazione topologica. Contemporaneamente, tuttavia, non bisogna mai tralasciare la verifica del rispetto del coefficiente di sicurezza minimo: un componente estremamente rigido, infatti, è comunque inutile da un punto di vista funzionale, se non è in grado di resistere meccanicamente alle sollecitazioni, evitando la rottura.

Di seguito vengono riportate le due analisi di cui discusso nelle righe precedenti.

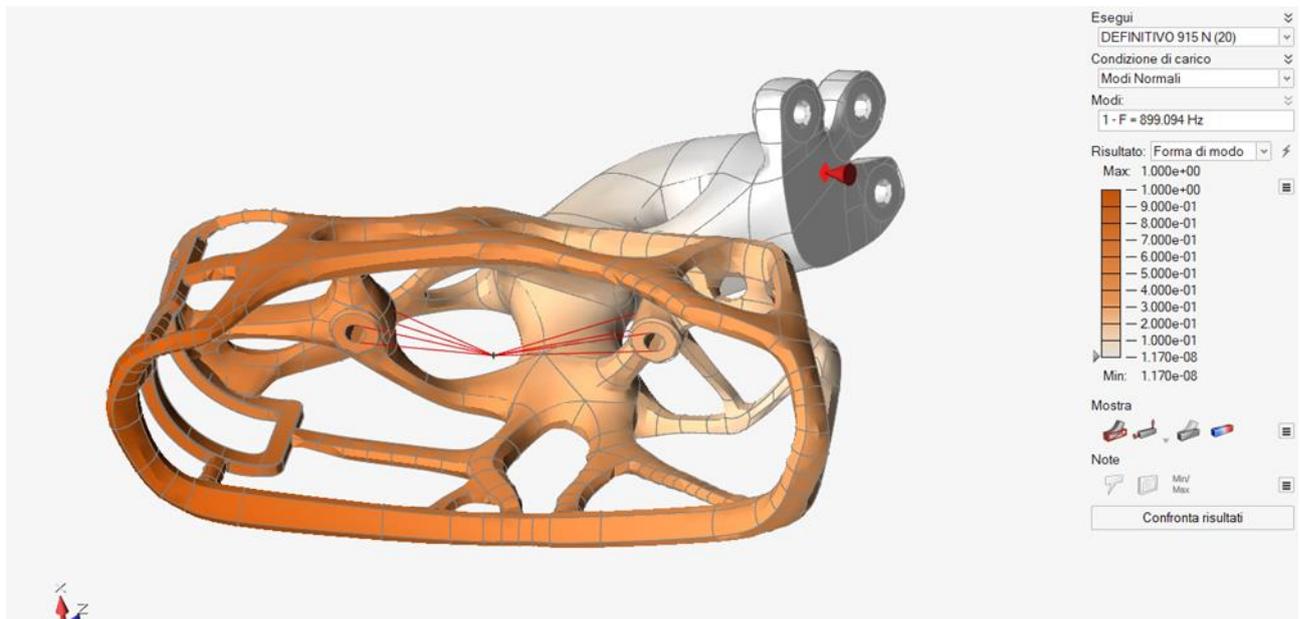


Figura 81: verifica prima frequenza di risonanza

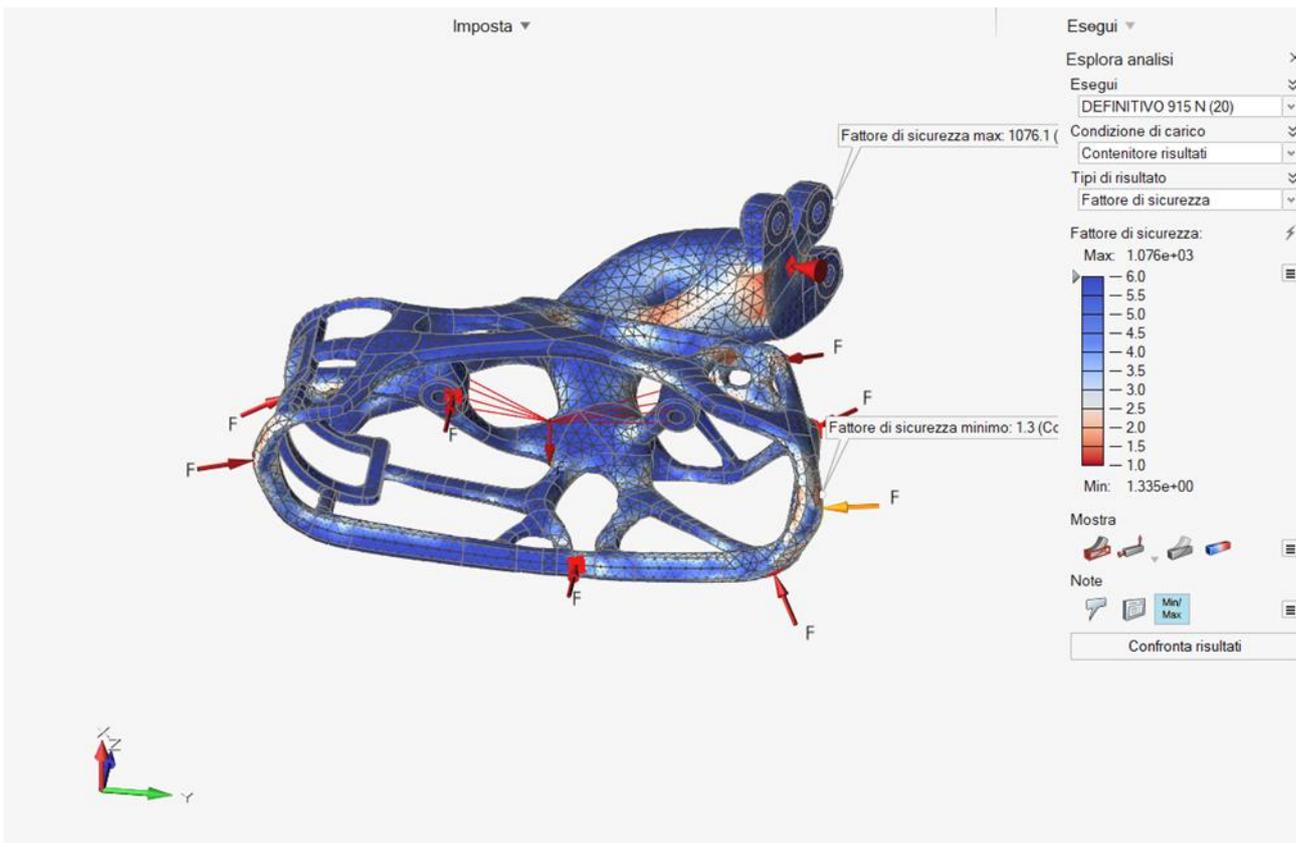


Figura 82: verifica CS minimo

Come è possibile evincere dalla Figura 81, la nuova geometria progettata per il porta telecamera, ipotizzato in lega leggera di alluminio AlSi10Mg, soddisfa l'obiettivo di incrementare in modo significativo la prima frequenza propria dell'oggetto, avvicinandosi notevolmente alla soglia indicata in fase di ottimizzazione topologica.

Il primo modo normale del componente, infatti, risulta essere pari a 899 Hz, valore che si discosta davvero poco dal valore teorico massimo raggiungibile (986 Hz).

Si nota dunque la differenza rispetto al componente precedentemente analizzato: la staffa porta tof si era discostata maggiormente rispetto al valore massimo ottenibile, in quanto si è cercato di non trascurare anche l'aspetto legato al peso (e dunque al costo). In questo caso, invece, è possibile affermare che i due obiettivi siano stati contemporaneamente soddisfatti in un'unica, nuova distribuzione del materiale.

Per quanto riguarda l'analisi del coefficiente di sicurezza minimo (Figura 82), si osserva come le tensioni massime generate siano inferiori al limite di snervamento: il CS, infatti, non scende oltre il valore di 1.3, garantendo sempre la sicurezza di una corretta funzionalità del componente.

L'ultimo aspetto da analizzare è quello legato ai parametri fisici: anche in questo caso, ricorrendo all'alluminio, è inevitabile un incremento della massa, che sale a 94 grammi, mentre il volume si riduce di oltre il 23%. A tal proposito, si osservi la Tabella 13.

Riassunto risultati	Valori
Prima frequenza propria [Hz]	899
Coefficiente di sicurezza	1.3
Carichi (statici/dinamici)	2/915
Materiale	AlSi10Mg
Massa [g]	94
Volume [cm ³]	35

Tabella 13: riassunto dati output porta telecamera

4.5 Ipotesi messa in macchina

Per questo secondo particolare della carrozzina, si è scelto di utilizzare lo slicer disponibile su Inspire, anziché Autodesk Netfabb usato in precedenza, in maniera tale da analizzare soluzioni alternative per raggiungere il medesimo scopo.

Tuttavia, prima di proceder con la messa in macchina, è opportuno verificare se sia necessaria la presenza di sovrametalli.

Nel caso del porta telecamera, le zone più critiche ai fini dell'accoppiamento sono le sedi per le viti M3, dalle quali, tra l'altro, può risultare difficoltoso rimuovere eventuali supporti. Per questo motivo, è opportuno prevedere del materiale aggiuntivo, che allo stesso tempo sia in grado di autosostenersi ed evitare i sostegni. Anziché il profilo a goccia, in questo caso si è scelto di limitarsi alla realizzazione di semplici quadrati orientati nella direzione di stampa, in maniera tale che il vertice superiore sia posto verticalmente e che il lato formi un angolo di 45° rispetto alla verticale.

Così facendo, l'apertura diventa autoportante, e può essere ripresa in fase successiva alla stampa tramite una punta di trapano o fresa. Per maggiore chiarezza si rimanda alla Figura 83.

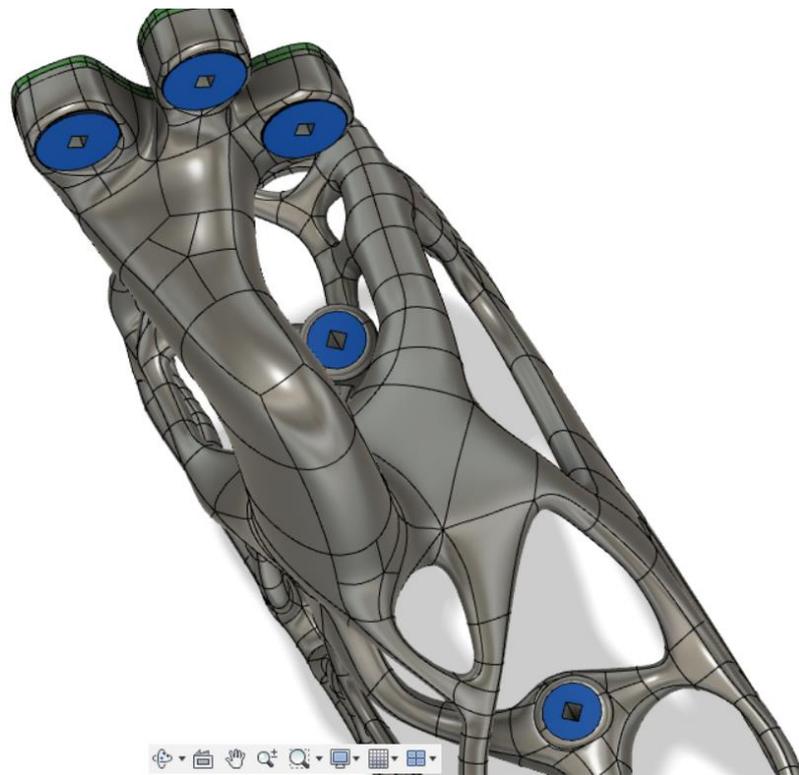


Figura 83: sovrametalli fori fissaggio

Si noti come, per realizzare questa geometria, sia necessario rimuovere le lamature e le svasature dei vari fori previste a progetto (Figura 84): queste ultime verranno realizzate successivamente tramite appositi strumenti, per garantire il corretto alloggiamento per la testa delle viti. In questa fase è di fondamentale importanza verificare a priori della realizzazione dell'oggetto, che gli utensili per l'asportazione del sovrametallo abbiano spazio sufficiente per raggiungere la zona interessata e procedere alla rimozione del truciolo.

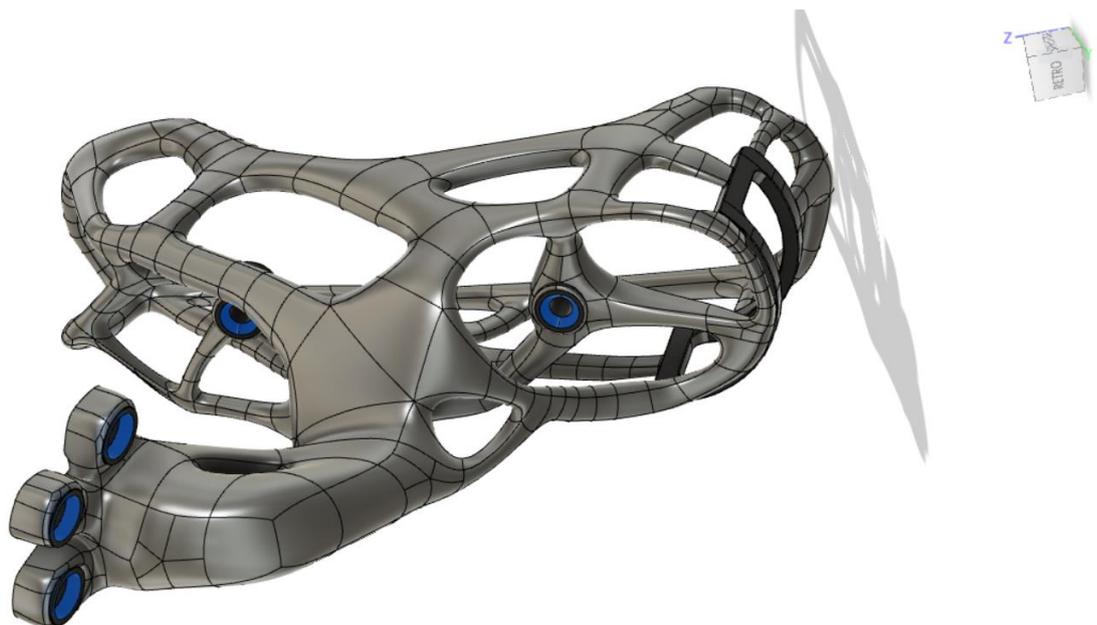


Figura 84: svasature e lamature a posteriori della stampa

Appurato che il componente sia stato aggiornato con tutti i sovrametalli necessari, oltre che ai vari raggi di raccordo, è possibile procedere con la proposta di messa in macchina per la stampa. Come primo passo, è necessario individuare un macchinario sufficientemente grande da contenere il componente. A tal proposito, è noto a priori che l'oggetto sia di dimensioni contenute, ma per completezza è bene definire precisamente i suoi ingombri di massima.

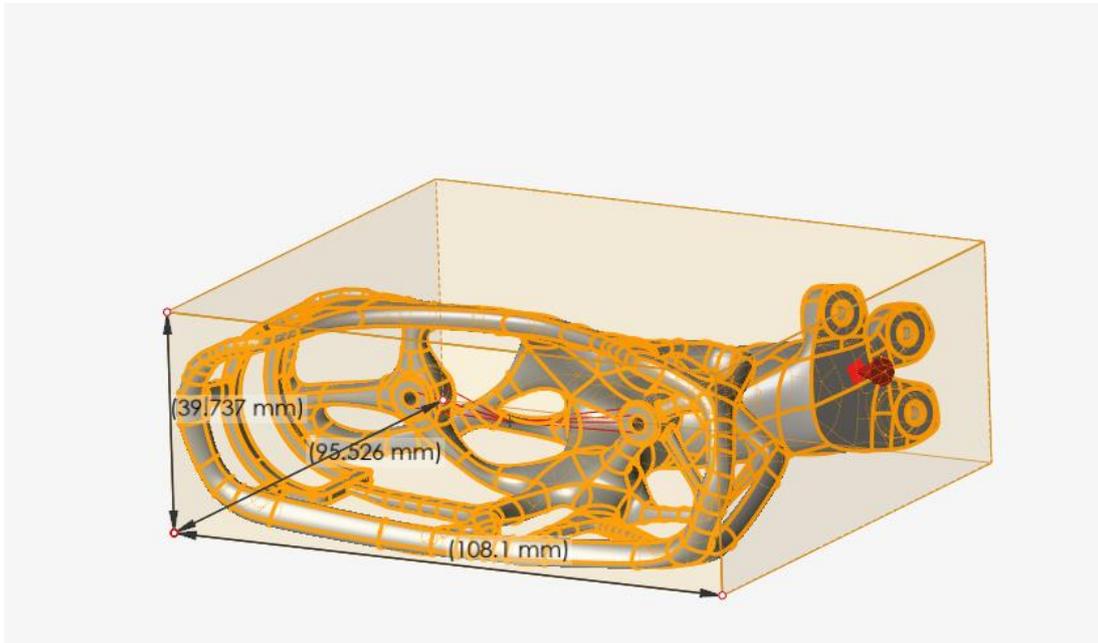


Figura 85: ingombri massimi porta telecamera

Come ci si aspettava, le dimensioni sono notevolmente limitate: il porta telecamera presenta una lunghezza massima di 109 mm, altezza 40 mm e profondità 96 mm, quantità che garantiscono la scelta di praticamente tutte le macchine che utilizzano la tecnologia del *Laser Powder Bed Fusion*. Ciononostante, è opportuno precisare il fatto che, nel caso in cui questi oggetti dovessero effettivamente essere realizzati in futuro tramite le tecnologie di Additive Manufacturing, dal momento che questo componente, così come la staffa porta tof riprogettata nel capitolo precedente, si realizzerebbero con la medesima lega di alluminio *AlSi10Mg*, sarebbe opportuno stamparli in un unico job.

Rispetto a due stampe separate, infatti, in questo modo si ripartirebbero i costi macchina, rendendo possibile un risparmio economico.

Dopo aver identificato un macchinario adeguato, si passa ora alla disposizione vera e propria del pezzo sul piatto di stampa.

Anche all'interno di Inspire è possibile impostare il posizionamento dell'oggetto che più soddisfa le necessità del progettista. Nel caso in questione si è scelto di minimizzare le strutture di supporto, ottenendo un risultato analogo a quello mostrato in Figura 86.

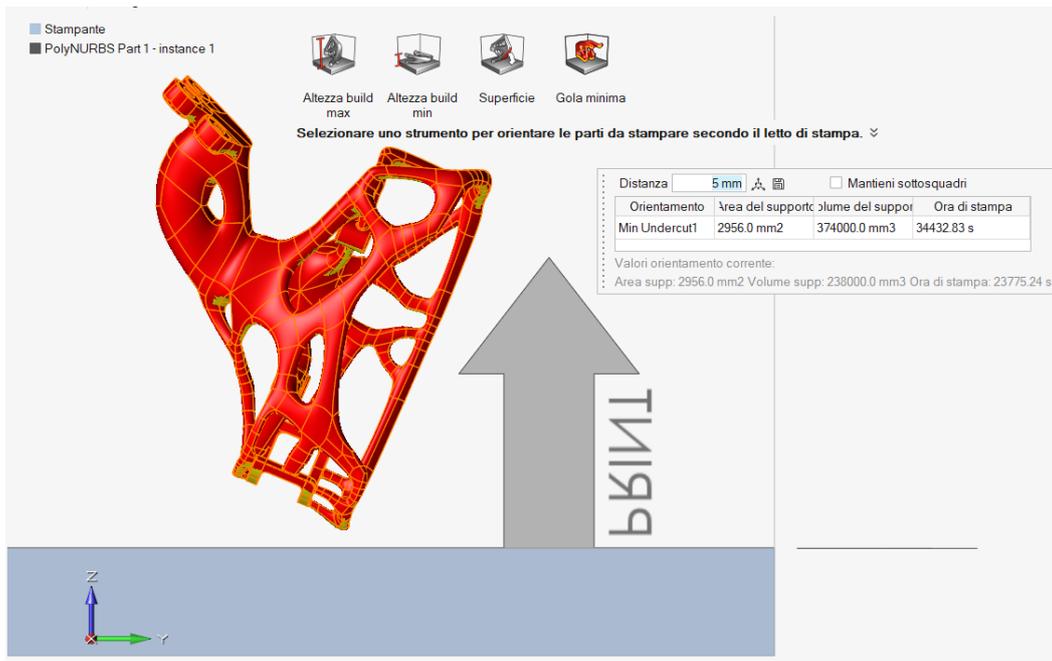


Figura 86: disposizione in macchina

Come si evince dall'immagine, la disposizione ipotizzata prevede di inclinare il componente all'incirca di 45°, per limitare i supporti necessari a sostenere le zone sporgenti, le quali sono evidenziate in giallo.

È interessante focalizzarsi per un istante sulla nervatura aggiunta nella zona ad uncino, la quale come previsto, si estende quasi parallelamente alla direzione di stampa, e pertanto non necessita di alcun sostegno.

Per proseguire con lo studio della messa in macchina, è ora fondamentale effettuare la generazione delle strutture di supporto: proprio come Netfabb, anche all'interno di Inspire tali strutture vengono automaticamente disposte perpendicolarmente alla *build platform*, processo che tuttavia non agevola il risparmio di materiale (Figura 87).

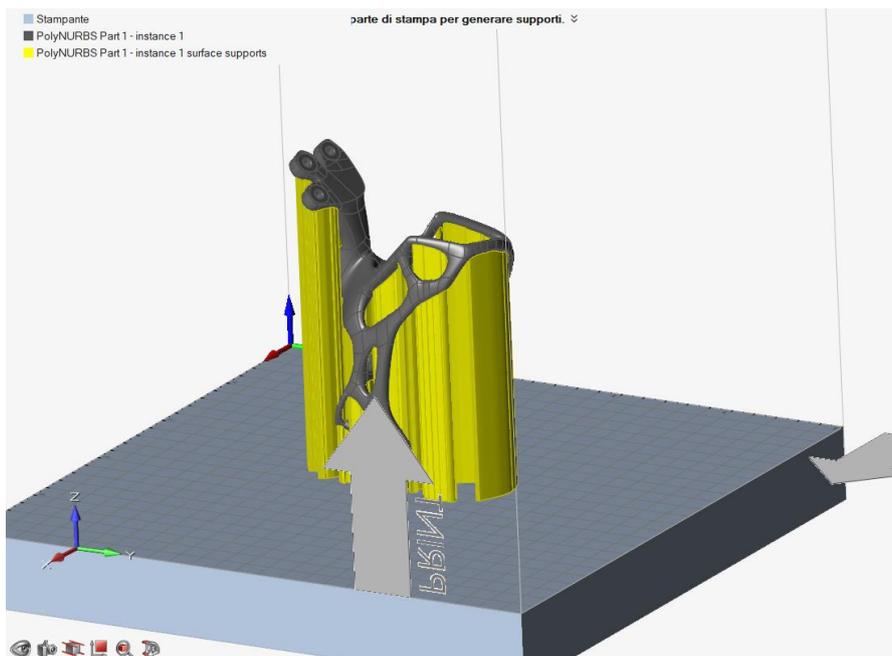


Figura 87: supporti "classici" verticali

Per cercare di ridurre ulteriormente i sostegni, è possibile personalizzare il loro layout. Nello specifico, ciò che risulta essere interessante è il cosiddetto *supporto ad albero*, di cui è mostrata un'immagine a titolo di esempio (Figura 88).

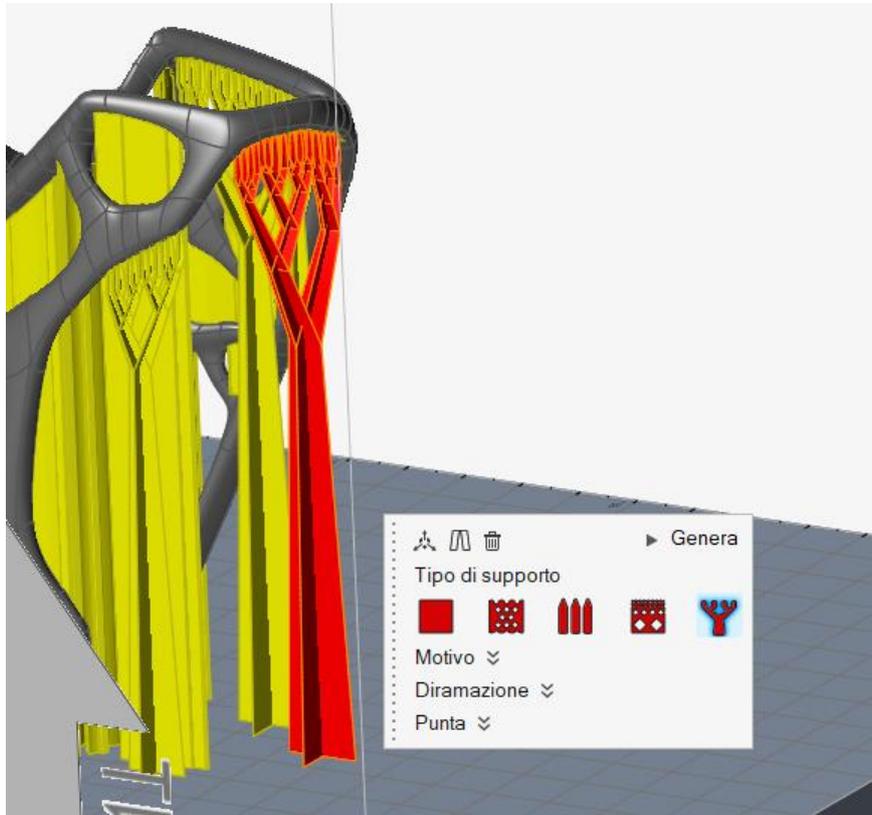


Figura 88: supporti ad albero

Sostanzialmente, prendendo una serie di sostegni originariamente verticali, il supporto ad albero elimina di fatto la base delle strutture più laterali, mentre conserva soltanto quelli nella zona centrale. Quest'ultima, osservando nuovamente la figura, può essere paragonata al tronco di un albero, da cui appunto ne deriva il nome.

A mano a mano che la quota z cresce durante la stampa, dal busto principale dell'albero iniziano a diramarsi i rami secondari, i quali sono i veri responsabili del sostegno del pezzo.

Tramite questo artificio, si incorre in un risparmio notevole di materiale, e di conseguenza di costi, dal momento che le polveri metalliche per Additive Manufacturing sono pur sempre parecchio costose.

Se si utilizzasse la tecnologia del *Fused Deposition Modelling* si avrebbe altresì una riduzione notevole dei tempi di stampa, dal momento che l'ugello eviterebbe di depositare tutto il materiale sottostante i "rami".

Purtroppo, ciò non accade con il *Selective Laser Melting*, o comunque è un risparmio quasi trascurabile, poiché la racla deposita sempre l'intero strato di polvere metallica sul piatto di stampa. L'unico tempo effettivamente risparmiato, pertanto, è quello necessario al laser per fondere il materiale extra dei supporti, ma è davvero un tempo irrisorio al termine dell'intero processo.

Al termine della generazione di tutte le strutture di sostegno ad albero, il porta telecamera si presenta come mostrato in Figura 89.

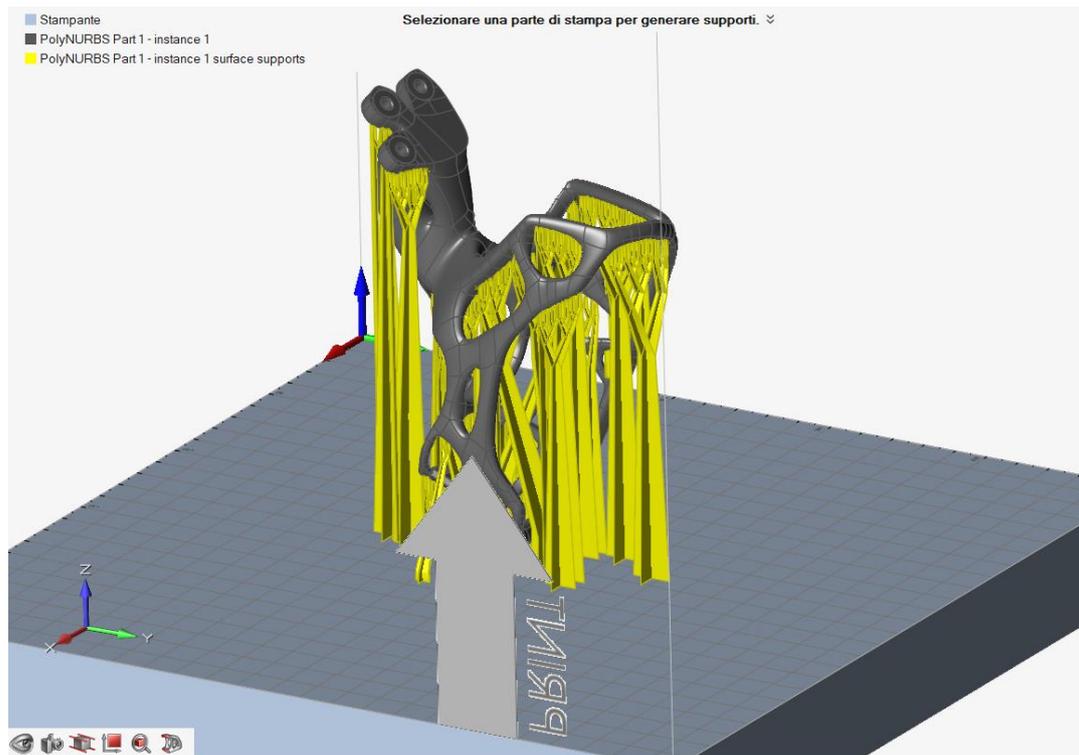


Figura 89: supporti completi

Oltre a tenere in considerazione un risparmio di materiale, non bisogna dimenticare quanto discusso nel capitolo precedente, relativamente al fatto che i supporti devono preferibilmente cadere direttamente sulla base di appoggio, piuttosto che sull'oggetto stesso. Dopo aver completato la generazione di tutte le strutture di sostegno, dunque, è opportuno modificare l'inclinazione di quei supporti che appoggiano sul porta telecamera, generando di fatto dei veri e propri supporti ad angolo. Così facendo si incrementa l'adesione tra l'oggetto stampato e la piattaforma di base, incrementando le probabilità del buon esito del processo additivo.

4.6 Considerazioni finali

Per concludere, è opportuno confrontare in modo sintetico i risultati ottenuti con i dati di input del componente originale, in modo tale da analizzare quale sia la soluzione costruttiva più appropriata.

	GEOMETRIA ORIGINALE	GENERATIVE DESIGN
Prima frequenza propria [Hz]	145	899
Coeff. Sicurezza minimo	0.4	1.3
Materiale	PLA	AlSi10Mg
Massa [g]	35	94
Volume [cm³]	45.5	35
Risparmio volume [cm³]	/	10.5
Risparmio percentuale [%]	/	23.1

Tabella 14: confronto soluzioni costruttive

La Tabella 14 lascia pochi dubbi al riguardo: il lavoro di riprogettazione ha dato origine ad un design che, insieme al nuovo materiale AlSi10Mg, permette di incrementare significativamente la prima frequenza di risonanza, che raggiunge un valore pari a circa il sestuplo di quello iniziale. Vi è altresì un risparmio sul volume, che diminuisce di oltre il 23%, anche se in questo caso l'alleggerimento è meno marcato rispetto alla staffa porta tof.

Il solo svantaggio, proprio come è accaduto per il componente precedente, sta nell'aumento di massa, inevitabile passando da polimero a metallo.

Tuttavia, visti i miglioramenti evidenti, soprattutto in merito allo scopo primario di massimizzare il primo modo normale, è possibile affermare che, anche per il porta telecamera, è conveniente affidarsi ai processi di Fabbricazione Additiva.

5 PORTA TOF ANTERIORE

5.1 Topologia originale

5.1.1 Specifiche di progetto

L'ultimo componente da sottoporre a riprogettazione è il porta tof *anteriore*. Come suggerisce il nome, l'oggetto in questione rimanda alla staffa porta tof analizzata in precedenza. Quest'ultima aveva infatti lo scopo di sostenere il porta tof *posteriore*. Sebbene la sua funzionalità sia praticamente la stessa, ovvero quella di sostenere le schedine dotate di telecamera (i *tof* appunto), ciò che cambia radicalmente rispetto al "gemello" posteriore è la topologia. Per avere un'idea preliminare di come sia fatto il componente, si rimanda alla Figura 90, in cui è possibile anche avere un confronto con il suo duale posteriore (Figura 91), sebbene non verrà incluso nella trattazione.

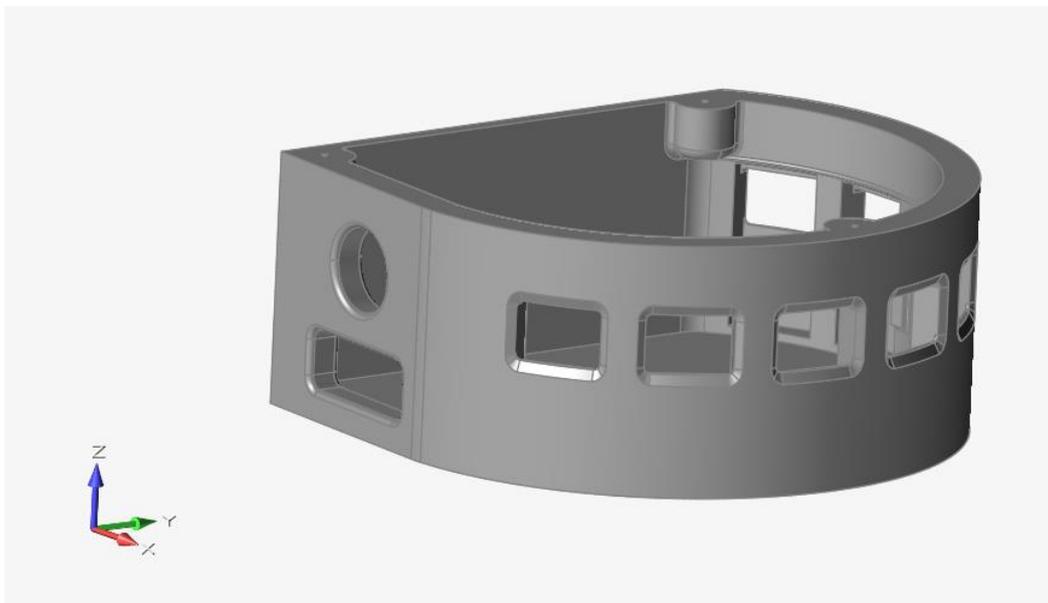


Figura 90: porta tof anteriore

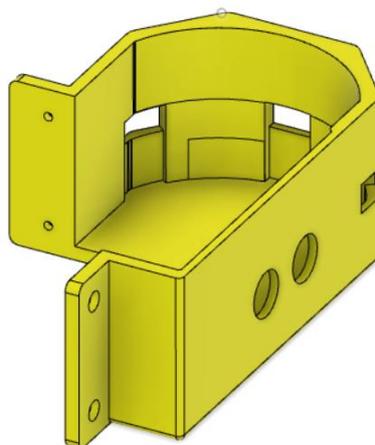


Figura 91: porta tof posteriore

Tra gli oggetti trattati sino a questo momento, il porta tof anteriore è sicuramente quello che presenta dimensioni più ridotte. Si tratta infatti di una piccola scatola $102 \times 86 \times 42 \text{ mm}^3$, con spessore delle pareti variabile tra i 3 mm e i 2.5 mm, all'interno delle quali vi è uno spazio vuoto per contenere la scheda elettronica e i cavi che collegano le telecamere con il circuito elettrico principale.

Tale scheda appoggia su tre piccoli cilindri, che la sostengono e la rialzano di un dislivello pari a 1.5 mm rispetto alla base di appoggio vera e propria. Oltre alla funzione di sostegno, questi cilindretti sono molto importanti anche per il fatto che costituiscono le sedi per avvitare la scheda al porta tof, tramite l'utilizzo di piccole viti M2, poste a triangolo nelle zone più distanti della scheda stessa.

Le finestre che si possono notare sulla parte curva laterale fungono da apertura per consentire ai tof di acquisire l'immagine dell'ambiente esterno, e comunicarla alla scheda madre tramite l'impianto elettrico. Così facendo, l'insieme di tutte le schedine elabora ogni ostacolo posto nei dintorni della carrozzina. Rimandando alla Figura 92, inoltre, si nota che nella parte interna delle finestre, vi sono dei piccoli cunei: essi fungono da incastro per i tof, al fine di evitare il più possibile che essi siano soggetti a movimenti non solidali alla sedia a rotelle, quando quest'ultima è in movimento.

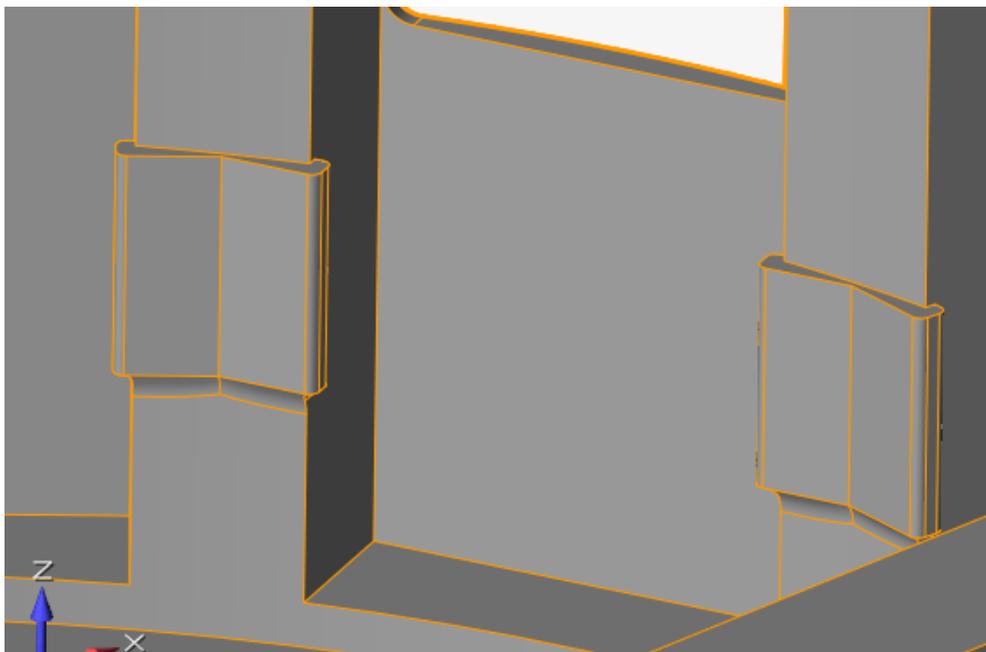


Figura 92: focus ganci bloccaggio schedine

Successivamente vi è la parte superiore, nella quale vi sono tre borchie cilindriche, raccordate con il resto della struttura, su cui sono visibili altrettanti prefori per viti M3, aventi lo scopo di accoppiare il componente al resto della carrozzina. Trattandosi di prototipi realizzati in PLA, non è stato necessario stampare l'oggetto con i fori della profondità corretta, in quanto si sono utilizzate delle viti autofilettanti in grado di scavare la plastica e creare in automatico la madre vite.

Termina il tutto la presenza di due aperture sul lato posteriore: una circolare avente diametro pari a 14 mm, sede di un sensore di posizione, e l'altra rettangolare $25 \times 10 \text{ mm}$ con lo scopo di consentire il passaggio del connettore USB.



Figura 93: montaggio su carrozzina

5.1.2 Aspetti critici

A differenza della staffa e del porta telecamera, l'oggetto in questione presenta molti meno aspetti critici. Date le dimensioni estremamente ridotte, la sua forma compatta, e l'assenza di bracci eccessivamente lunghi che possano dare luogo a flessioni significative, il porta tof è molto meno soggetto a problemi legati alle vibrazioni. Per fare un esempio banale, è possibile pensare a quanto possa essere resistente un uovo se si prova a schiacciarlo con una mano: le tensioni si distribuiscono lungo tutto il guscio, evitando che quest'ultimo si rompa.

Per il porta tof vale pressoché lo stesso ragionamento: l'assenza di leve evita che vi siano punti deboli in cui si possa verificare un superamento del limite di snervamento, mentre le vibrazioni, così come si constaterà nel capitolo relativo alle analisi, hanno valori di risonanza elevati già per la geometria originale.

L'obiettivo è dunque quello di mantenere tale livello di rigidità, naturalmente sempre verificando il rispetto del coefficiente di sicurezza minimo.

Ciò che costituisce un punto di forza, tuttavia, può essere anche causa di alcuni problemi legati alla futura riprogettazione. Le dimensioni ridotte infatti, talvolta ostacolando la definizione degli spazi di progettazione. Pertanto, occorre prestare molta attenzione a quali aree possano essere realmente esenti da vincoli di accoppiamento, data appunto la limitata disponibilità di spazio.

Obiettivi	Vincoli
Massimizzazione prima frequenza propria	CS minimo: 1.2

Tabella 15: obiettivi e vincoli riprogettazione porta tof

5.2 Studio fea topologia originale

5.2.1 Condizioni di carico

Conclusa la trattazione dei parametri di progetto, si passa ora ad analizzare la resistenza del componente, verificandone il comportamento in seguito ai carichi imposti, l'eventuale superamento del coefficiente di sicurezza minimo, nonché la prima frequenza di risonanza. Ancora una volta, per determinare l'intensità delle forze agenti, si ricorre all'ausilio della relazione già trattata nei capitoli precedenti, al fine di convertire un carico impulsivo in uno statico.

Dal momento che i parametri necessari all'ottenimento del risultato rimangono invariati, ovvero velocità massima pari a 6 km/h, massa di 55 kg e decelerazione in 0.1 s, il modulo delle forze generate in seguito all'urto è pari a 915 N.

Ovviamente è sempre buona pratica ipotizzare le condizioni di carico che generino le sollecitazioni peggiori, posizionando, cioè, le forze in modo tale da ottenere il massimo momento flettente.

Carichi	Valori
Statici [N]	/
Dinamici [N]	915

Tabella 16: carichi porta tof anteriore

All'atto pratico, ciò coincide con l'applicare i carichi nei punti il più distante possibile dalla zona vincolata (incastro, cerniera...).

Per prima cosa, dunque, occorre impostare i vincoli all'interno di Inspire.

Il porta tof è vincolato tramite i tre fori posti superiormente. Ciò significa che, sostanzialmente, l'intera parete piana superiore è come se fosse incastrata al resto della struttura. Di conseguenza è automaticamente nota la posizione delle forze che costituiranno le varie condizioni di carico: esse saranno poste negli estremi inferiori, sia sulle pareti piane, sia su quella curva. Completa il tutto un carico aggiuntivo, posto nella parete inferiore del porta tof, che simula l'impatto di tale area con un oggetto sporgente rialzato, come ad esempio un tavolo, una ringhiera...

Al termine dell'impostazione di tutti i carichi, l'oggetto si presenta come mostrato in Figura 94.

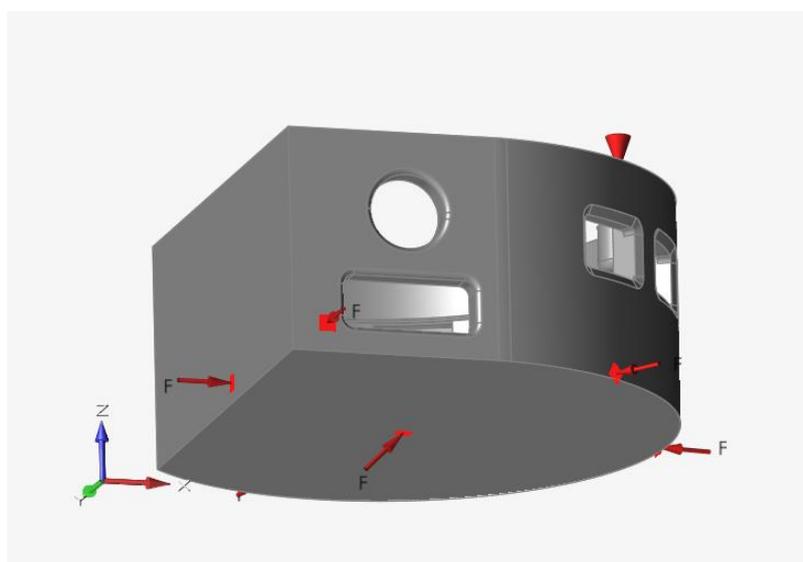


Figura 94: condizioni di carico

5.2.2 Risultati analisi

Come anticipato nelle righe precedenti, ciò che è importante osservare in seguito all'analisi agli elementi finiti è il coefficiente di sicurezza minimo e la prima frequenza propria dell'oggetto.

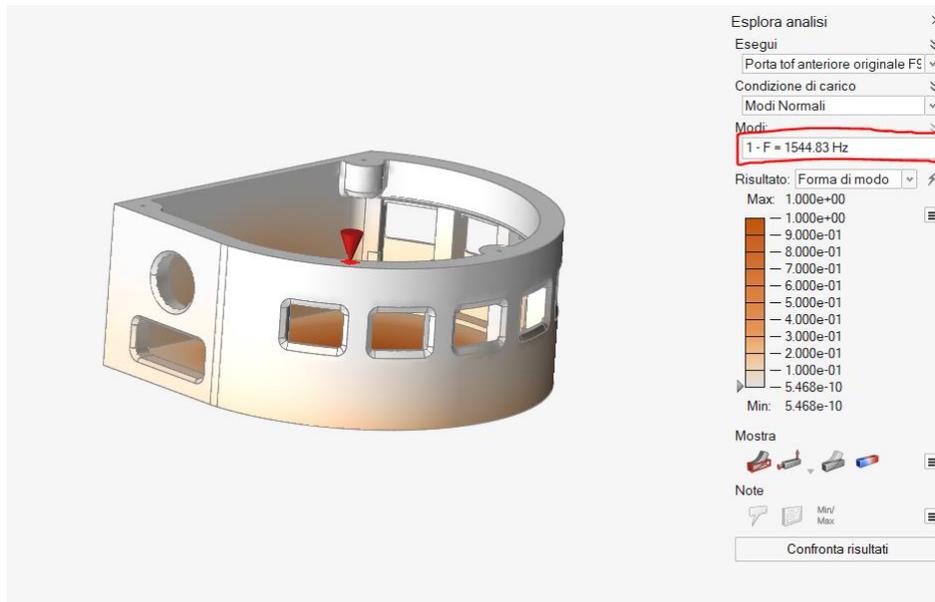


Figura 95: analisi prima frequenza propria

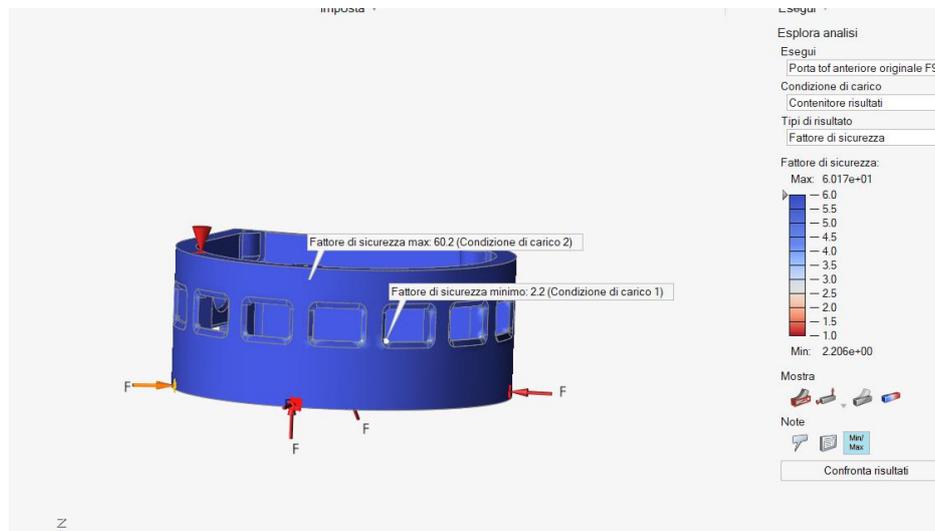


Figura 96: analisi CS minimo

Riassunto dati input	Valori
Materiale	PLA
Primo modo normale [Hz]	1544
Coefficiente di sicurezza minimo	2.2
Massa riempimento 10% (stampa 3D) [g]	61
Massa riempimento unitario (CAD) [g]	81.6
Volume [cm ³]	65.8

Tabella 17: riassunto dati input porta tof originale

Come emerge dalla Figura 97, che riporta l'elenco completo di tutti i nylon disponibili della seconda azienda, la scelta risulta essere assai vasta: vi sono polimeri resistenti al calore, ritardanti di fiamma, resistenti agli urti, rigidi, elastomerici, adatti al contatto con alimenti...

Confrontando tutte le varie possibilità dei due fornitori, le opzioni più idonee sono riportate nell'elenco seguente: ^[33] ^[34]

1. *Duraform EX Plastic*, 3D Systems;
2. *Duraform Pro X AF+*, (*caricato alluminio*), 3D Systems;
3. *PA 2201 Natural*, EOS;
4. *PA 12 MD (caricato alluminio)*, EOS.

Per scegliere il polimero maggiormente adatto all'esigenza del porta tof anteriore, occorre necessariamente osservare i datasheet, confrontando i parametri fisici/meccanici più importanti, ovvero:

1. Densità;
2. Modulo di Young;
3. Tensione limite di snervamento;
4. Resistenza agli urti.

Ai fini della realizzazione del componente in questione, sono di importanza secondaria i parametri termici, in quanto la carrozzina non verrà mai sottoposta a temperature elevate, o sbalzi termici critici.

La Tabella 18 riassume tutte le grandezze elencate sopra, per le varie polveri plausibili, ma anche per il PLA e per la lega di alluminio ipotizzata per i componenti precedenti, in modo tale da poter fare un confronto: ^[35] ^[36] ^[37] ^[38] ^[39] ^[40]

MATERIALE	ρ [g/cm ³]	E [MPa]	Rp ₀₂ [MPa]	Res. Urti [??]
<i>Duraform EX Plastic</i>	1.01	1517	37	74 J/m
<i>Duraform Pro X AF+</i>	1.31	4340	37	54 J/m
<i>PA 2201 Natural</i>	0.95	1700	45	4.8 kJ/m ² (C)
<i>PA 12 MD</i>	1.36	3800	48	4.6 kJ/m ² (C)
<i>PLA</i>	1.24	2500	40	2.7 kJ/m ² (I)
<i>AlSi10Mg</i>	2.7	65000	250	4 J

Tabella 18: proprietà meccaniche polimeri

5.3.2 Focus prove d'impatto

Osservando la tabella ci si rende conto immediatamente di due aspetti molto importanti. In primo luogo, è possibile notare che se si predilige la rigidità, e quindi il modulo elastico, si ha una perdita in termini di resistenza all'impatto.

Si pensi infatti ai materiali ceramici: sono estremamente rigidi, ma al primo urto si innescano cricche che spesso portano a rottura fragile. Discorso diametralmente opposto vale, ad esempio, per materiali elastomerici, caratterizzati da un allungamento a rottura molto alto, ma moduli elastici ridotti.

Di conseguenza, occorre trovare un polimero che soddisfi entrambe le esigenze, identificando quale possa essere l'ottimo compromesso tra rigidità e tenacità.

Ed è proprio riguardo a questa proprietà che si introduce il secondo aspetto interessante, ovvero l'impossibilità di effettuare una comparazione delle resistenze agli impatti dei vari polimeri. Questo a causa del fatto che ogni datasheet dei vari fornitori riporta unità di misura differenti, che di fatto rendono impossibile un confronto.

A seguito di una ricerca in merito a questa problematica, è emerso che tale distinzione dipende dalla tipologia di prova effettuata in fase di collaudo del materiale.

Nello specifico, esistono due test principali per la verifica della resistenza all'impatto: la prova *IZOD* e la prova *CHARPY*. I due test differiscono sostanzialmente a causa delle norme a cui devono fare riferimento. Come ulteriore complicazione, ognuna di queste norme, prevede l'utilizzo di campioni standard, aventi dimensioni specifiche differenti.

In particolare:

1. il test di Charpy rimanda alla norma ISO 179 ^[41] ^[42], la quale prevede di utilizzare provini di dimensioni pari a 55 x 10 x 10 mm³. L'unità di misura utilizzata in questo caso può essere il Joule [J], oppure kJ/m².
2. la prova Izod invece non fa fede ad un'unica normativa, bensì varia in base al fatto che si tratti di normativa europea o americana. Nel primo caso la norma di riferimento è la ISO 180, la quale prevede campioni di dimensioni 80 x 10 x 4 mm³. In tal caso l'unità di riferimento è kJ/m². In base alle norme americane invece, si rimanda alla ASTM D256, secondo la quale il provino debba avere misure pari a 64 x 12.7 x 3.2 mm³, e l'unità di misura relativa alla resistenza all'urto sia J/m. ^[43]

Si nota dunque, come in alcuni casi l'indicazione della tenacità sia rapportata in base all'unità di lunghezza, in altri rispetto alla sezione, mentre in altri ancora non sia depurata delle dimensioni del provino.

Ultima sostanziale differenza, è altresì la metodologia con cui viene condotto il test. Infatti, non è il solo il campione a variare, ma anche il suo fissaggio nelle apposite macchine.



Figura 98: prova di Charpy

Osservando la Figura 98, si intuisce come nel test di Charpy, il provino venga disposto orizzontalmente, ancorato da entrambi i lati.

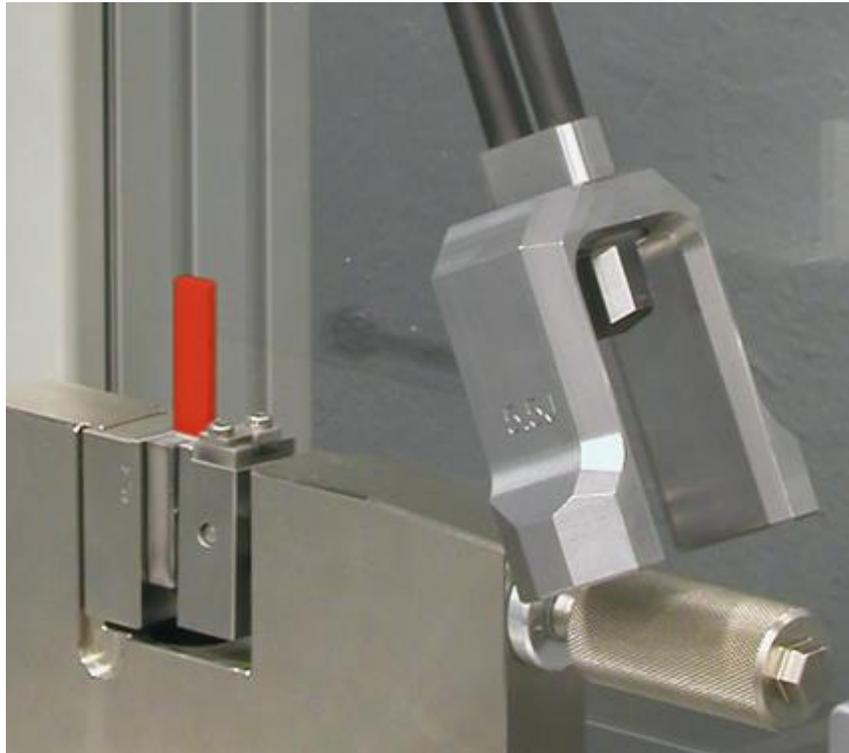


Figura 99: test Izod

Al contrario, nel test Izod (Figura 99), l'elemento sacrificale è ancorato solamente da un lato, e viene disposto verticalmente.

Comprese le differenze delle due tipologie di test, note le dimensioni dei campioni, occorre convertire i valori in modo tale da ottenere la medesima unità di misura per ogni materiale disponibile. A tal proposito, è preferibile effettuare le equivalenze prediligendo solo le grandezze specifiche (quindi metriche oppure superficiali), evitando dunque di utilizzare i soli Joule. Questo perché appare evidente che se un campione ha sezione e lunghezza maggiori di un altro, sicuramente avrà un limite di sopportazione all'impatto maggiore, se lo si esprime senza usare le unità specifiche.

Per fare un esempio, ipotizzando di prendere il provino Izod, per trasformare da J/m a kJ/m² è opportuno moltiplicare per il valore dello *spessore* del campione, e successivamente dividere per la sezione.

Decidendo di riportare tutti i valori di tenacità in kJ/m², i valori aggiornati sono riportati nella Tabella 19.

MATERIALE	Tenacità [kJ/m ²] (Charpy)
<i>Duraform EX Plastic</i>	5.8
<i>Duraform Pro X AF+</i>	4.3
<i>PLA</i>	2.7
<i>AlSi10Mg</i>	40

Tabella 19: valori di tenacità normalizzati

Analizzando i risultati ottenuti, e ricordando il fatto che si ricerca un materiale che garantisca un buon compromesso tra resistenza all'urto e rigidezza (modulo di Young), la scelta definitiva per

il materiale in cui si ipotizza di realizzare il porta tof anteriore è il *DURAFORM EX PLASTIC AF+*, ovvero polveri di nylon caricate con alluminio, il quale permette di incrementare il modulo elastico rispetto al nylon tradizionale.

5.4 Riprogettazione per AM

5.4.1 Obiettivi e vincoli

Proprio come per i componenti analizzati in precedenza, e le problematiche a cui essi sono soggetti, l'obiettivo a cui si cerca di ambire è quello di ricercare in ogni caso una massimizzazione della prima frequenza propria dell'oggetto, anche se il punto di partenza in questo caso è già ottimo rispetto ai due casi visti nei capitoli soprastanti.

Per quanto riguarda i vincoli, invece, non bisogna mai dimenticarsi del fatto che l'oggetto deve resistere alle sollecitazioni esterne senza rompersi. Di conseguenza, si impone un coefficiente di sicurezza minimo pari a 1.2, che assicura di non oltrepassare mai la tensione limite di snervamento.

5.4.2 Semplificazione geometria

A questo punto è possibile procedere con l'operazione di *defeaturing*, ovvero la semplificazione della geometria del porta tof, già discussa nei capitoli precedenti, al fine di agevolare l'elaborazione dell'ottimizzazione topologica da parte del software.

Trattandosi di un oggetto di dimensioni contenute, con una geometria già semplice per sua natura, questa fase del lavoro risulta essere più agevolata rispetto alla staffa o al porta telecamera. Infatti, in primo luogo si procede eliminando tutti i raggi di raccordo presenti nelle borchie cilindriche, mentre successivamente si procede rimuovendo i fillet presenti anche sulle finestre nella parete piana (Figura 100).

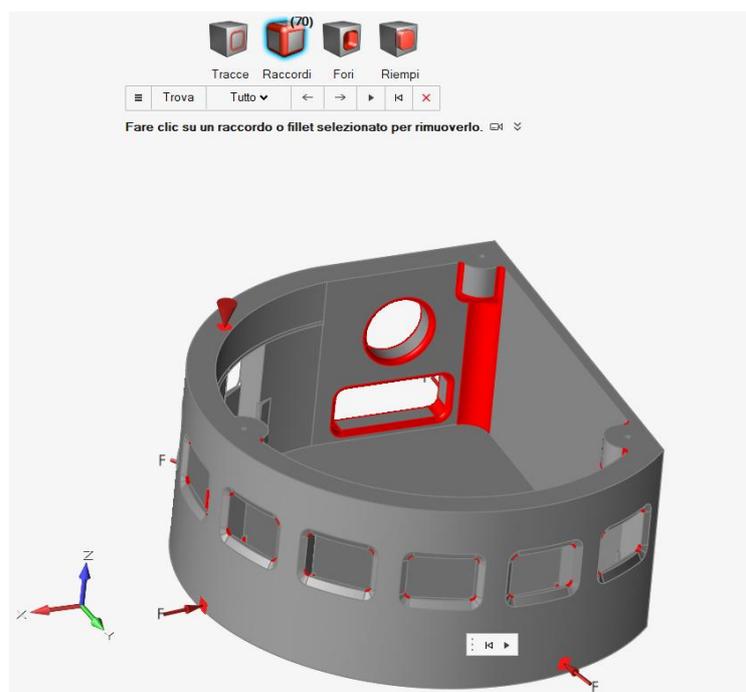


Figura 100: semplificazione geometria

Infine, per completare il defeaturing, è possibile rimuovere anche gli smussi sulle aperture presenti nella parete cilindrica, le quali consentono l'incastro delle schedine tof e la visuale sull'ambiente circostante.

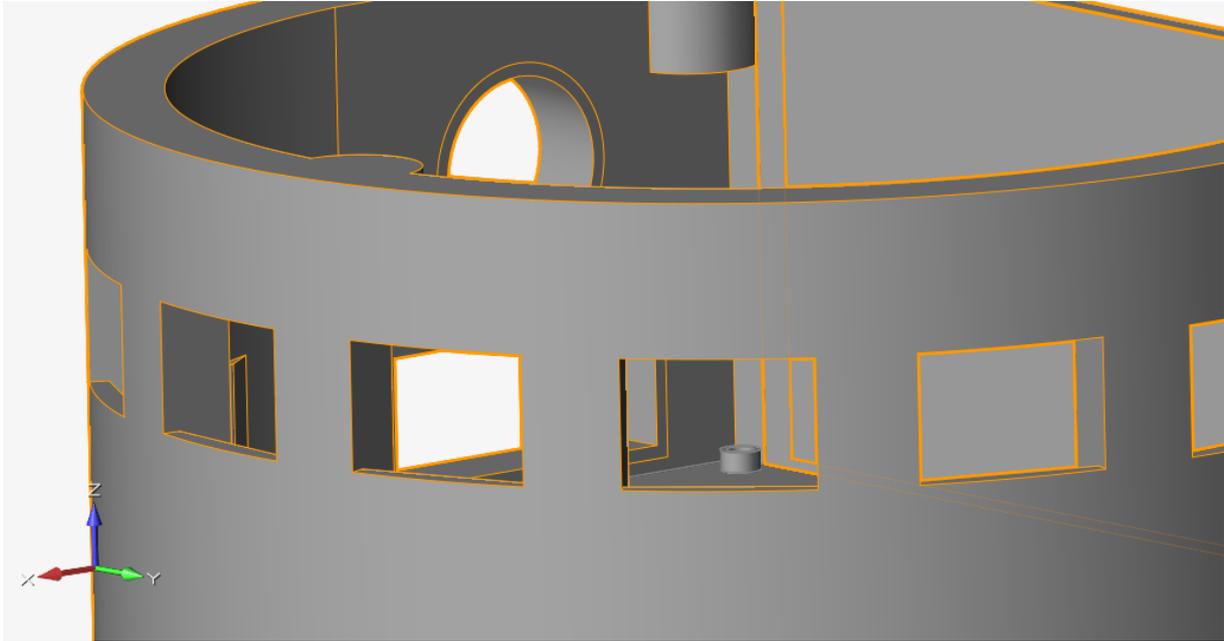


Figura 101: rimozione smussi finestre

5.4.3 Design e no design space

Terminata la fase di semplificazione della geometria, è ora possibile distinguere le zone di progettazione da quelle fisse, di non progettazione. Ed è proprio in questa fase che emergono alcune problematiche che spingono ad un momento di riflessione.

Volendo dividere Design e No Design Space, infatti, ci si rende immediatamente conto del fatto che l'operazione non risulta così banale. Nello specifico, non è per nulla chiaro quali siano le zone realmente prive di vincoli di forma.

Partendo dalla porzione superiore dell'oggetto, è possibile fare le seguenti considerazioni:

1. la parete esterna superiore non può essere modificata, in quanto funge da appoggio con il componente al quale verrà fissato il porta tof;
2. le borchie cilindriche devono essere mantenute fisse, in quanto costituiscono le sedi per le viti di fissaggio;
3. la parete piana posteriore, quella in cui sono presenti il foro per il sensore e la finestra per consentire l'attacco USB, potrebbe essere considerata come zona di Design Space. Tuttavia, all'atto pratico, emergerebbe il fatto che lo spazio a disposizione in quella zona è troppo limitato: i fori avrebbero bisogno di un certo offset di spessore, per garantire un minimo materiale che unisca le zone di progettazione ai No Design Space. Di conseguenza, anche quest'area non può che essere lasciata invariata (Figura 102);

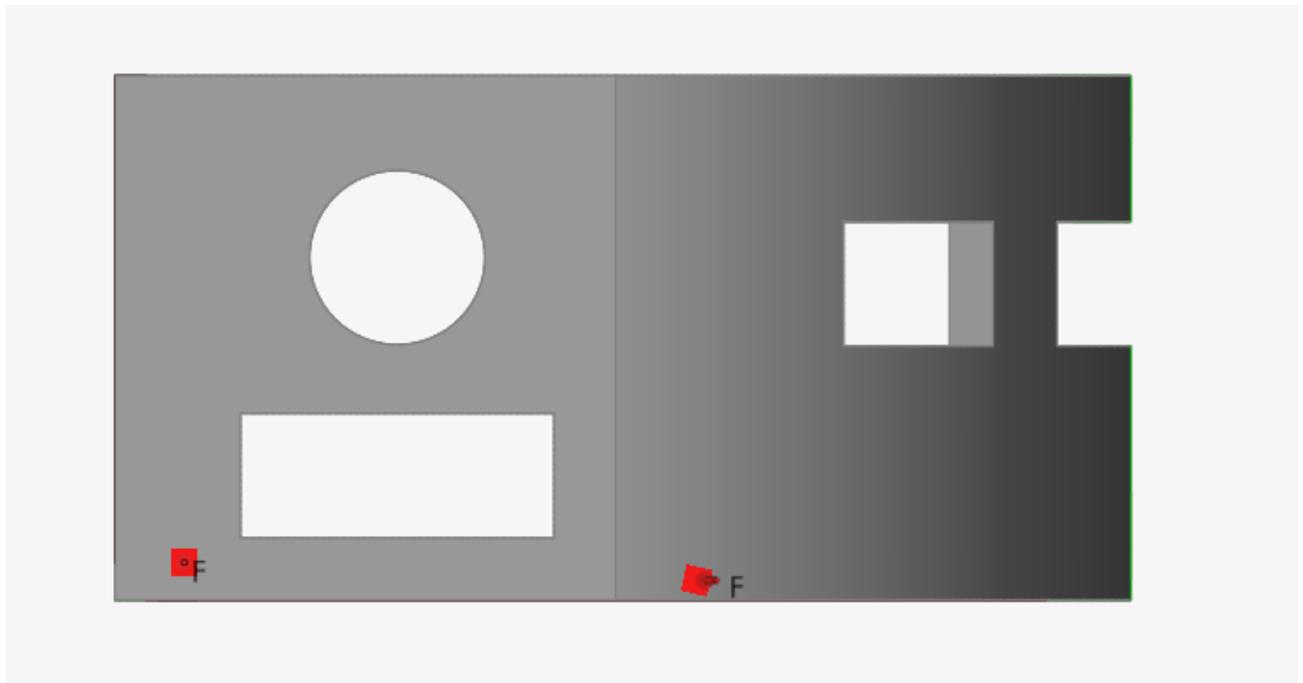


Figura 102: focus parete posteriore

4. la parete cilindrica è quella che impone maggiori limitazioni. Infatti, le sedi per le schede non consentono tassativamente alcuna modifica. Esse sono progettate in maniera tale che i tof si incastrino, appoggino sulla parete interna, e vengano tenuti in posizione dai gancetti posti anch'essi internamente. Tutti questi dettagli non possono essere soggetti a variazioni di forma, altrimenti verrebbe meno la funzionalità dell'oggetto. Inoltre, le varie finestre sono separate solamente da 7 millimetri di materiale, ovvero uno spessore troppo ridotto per lasciare spazio alla generazione di una nurbs (si ricorda infatti che occorre sempre tenere conto dell'eventuale offset dai bordi interni del foro).

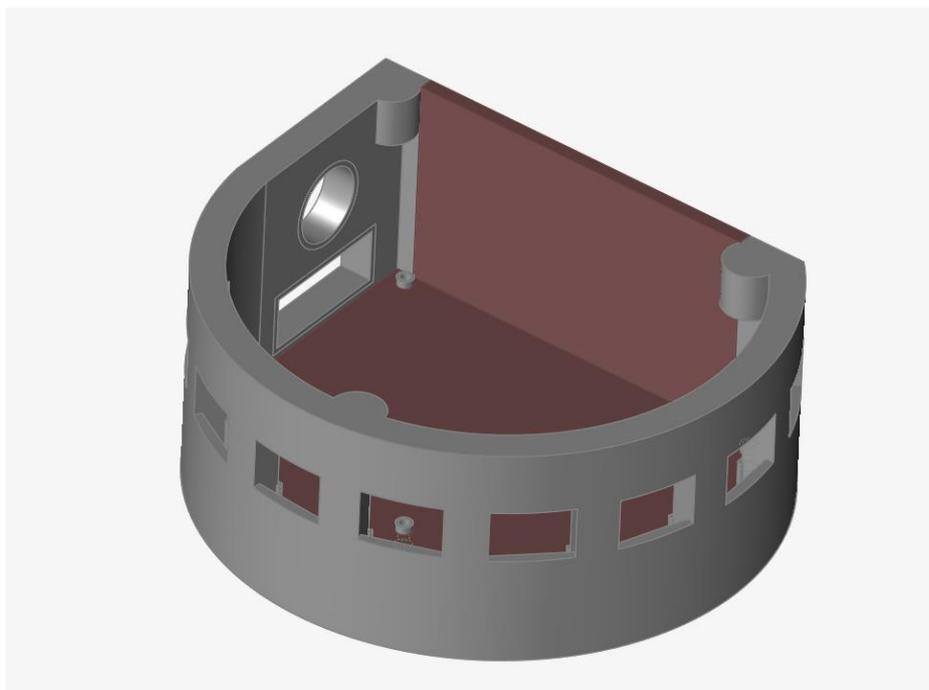


Figura 103: definizione zone di progettazione

A causa di tutti questi aspetti appena elencati, si intuisce come le uniche zone che lasciano spazio ad una certa libertà di forma, e che possano effettivamente essere considerate *Design Space* siano la parete di base, eccezione fatta ovviamente per i cilindretti per il fissaggio delle viti, e la parete laterale semplice, senza alcuna finestra o foro. Il porta tof, si presenta dunque come mostrato in Figura 103.

5.4.4 Ottimizzazione topologica

Conclusa la designazione degli spazi di progettazione, si passa ora all'ottimizzazione topologica. Come per i componenti precedenti, anche in questo caso l'obiettivo è quello di ricercare la massima prima frequenza propria dell'oggetto.

Note le varie condizioni di carico, dunque, si avvia l'esecuzione dell'ottimizzazione, impostando come vincolo di fissaggio l'unico incastro presente che blocca il movimento del componente.

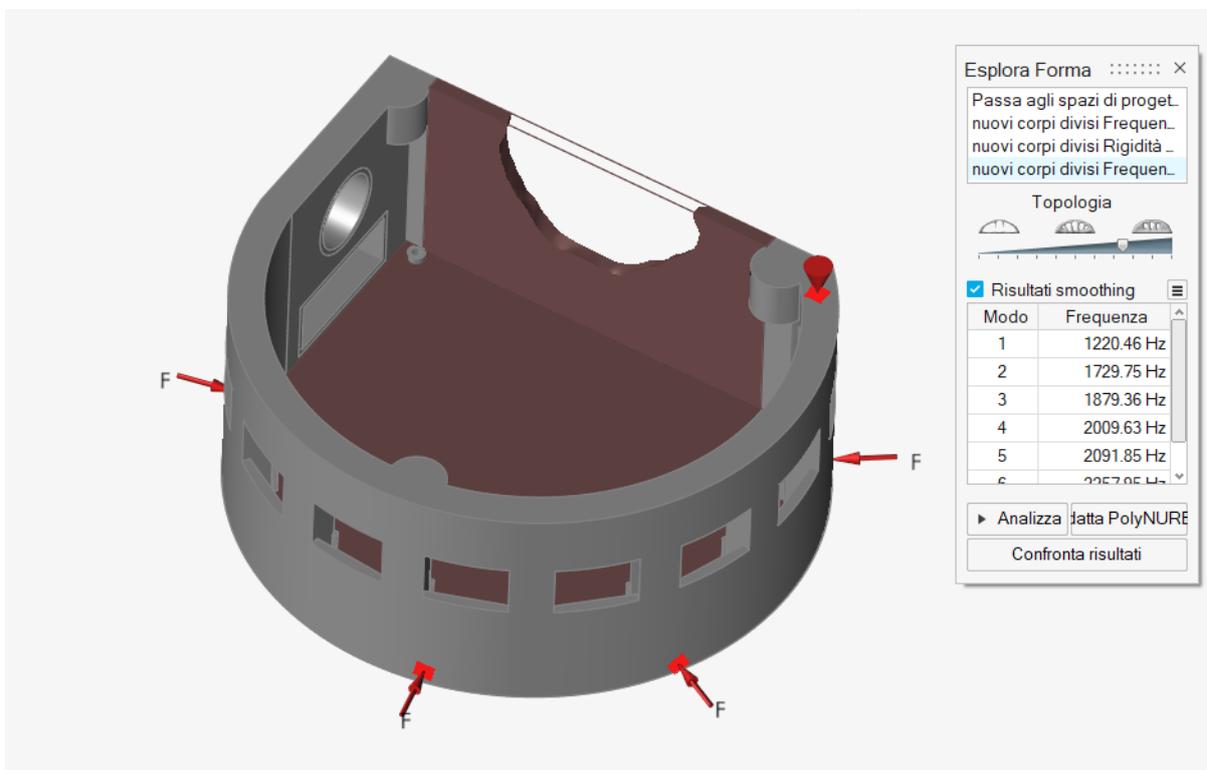


Figura 104: risultato ottimizzazione max frequenza

Come è possibile osservare nella Figura 104, le iterazioni non sembrano aver condotto ad una variazione così sostanziale della topologia, rispetto a quella originale. È chiaro, infatti, che la base di appoggio rimane totalmente invariata, mentre la parete laterale presenta sì una riduzione di materiale, ma non così sostanziale.

Si nota inoltre, che l'obiettivo di massimizzare la prima frequenza di risonanza, rispetto ai componenti precedenti, non sembra condurre ad un effettivo miglioramento.

In altre parole, se per la staffa porta tof ed il porta telecamera, a seguito dell'ottimizzazione topologica, il valore potenzialmente raggiungibile dal primo modo normale era notevolmente superiore a quello che si aveva in origine, con il porta tof anteriore non sembra valere lo stesso discorso, se si è intenzionati a realizzarlo in nylon.

Infatti, i 1220 Hz, seppur rimanendo un valore comunque molto alto, sono inferiori ai 1545 Hz iniziali.

Si nota dunque come la geometria estremamente compatta dell'oggetto, ostacola il lavoro di riprogettazione, e sostanzialmente mette di fronte a tre strade alternative.

Come prima opzione, è possibile proseguire con la generazione delle PolyNurbs, mantenendo l'idea originale di realizzare il nuovo componente in nylon caricato alluminio. Questo permetterebbe di mantenere una massa estremamente limitata, simile a quella originale, a discapito di una modica perdita in termini di frequenza di vibrazione.

La seconda soluzione, banalmente, è quella di abbandonare l'idea del Generative Design e mantenere la geometria originale. In tal caso, come materiale si potrebbe utilizzare sia il PLA, se si vogliono limitare al massimo i costi, oppure la lega di nylon proposta, ammesso che esista per lo stampaggio ad iniezione.

La terza soluzione è quella di effettuare un'altra ottimizzazione topologica, cambiando però materiale, e optando per l'AlSi10Mg. Così facendo, si implementerebbe sicuramente il primo modo normale, in quanto l'alluminio è di gran lunga più rigido del nylon, ma in compenso si incorrerebbe in costi maggiori, e un incremento di peso.

Dal momento che lo scopo primario di quanto svolto sinora è la realizzazione di componenti che siano caratterizzati da un Generative Design, la scelta definitiva coincide con la prima ipotesi: come già detto, infatti, seppur inferiore al valore originale, la prima frequenza propria dell'oggetto risulta comunque notevolmente alta, e non dovrebbe dare luogo ad alcun problema di vibrazioni.

5.4.5 Generazione PolyNurbs

Il passo successivo è la generazione delle superfici che costituiranno il nuovo modello. In questo caso, poiché non vi sono ramificazioni che consentono la creazione rapida delle nurbs, risulta estremamente utile lo strumento della sfera primitiva generatrice, dalla quale è possibile ricreare l'intera parete laterale.

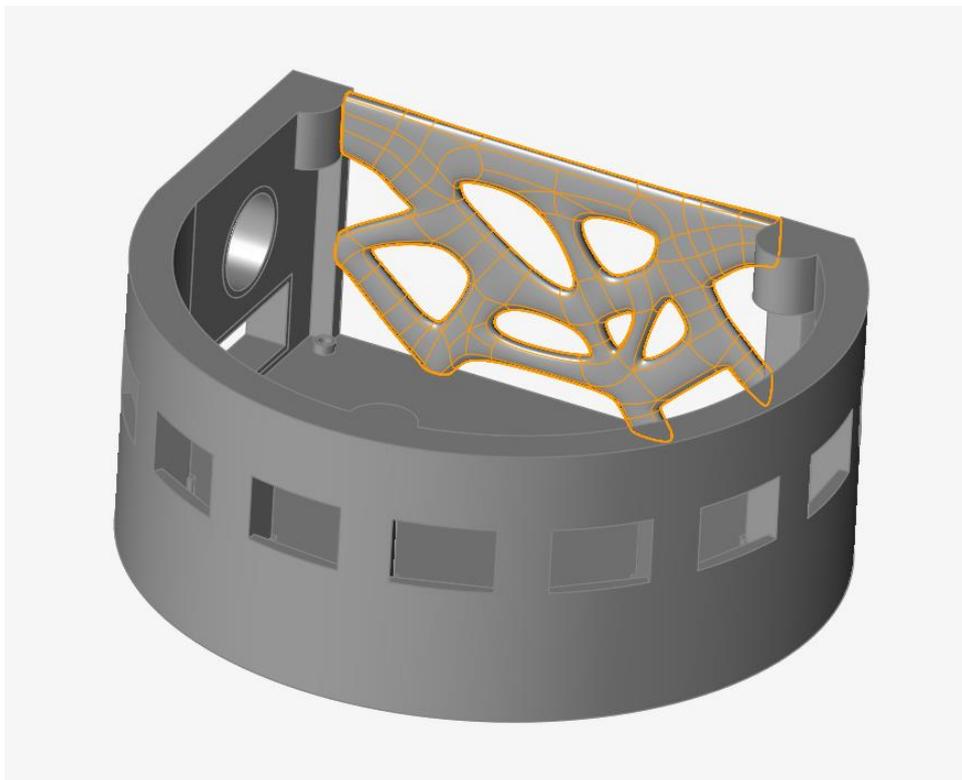


Figura 105: generazione PolyNurbs

La Figura 105 mostra il risultato della ricostruzione. È possibile notare come, di fatto, si è intervenuti modificando leggermente quanto suggerito dal risultato dell'ottimizzazione, in quanto la differenza rispetto alla geometria originale in tal caso sarebbe stata veramente minima. La sola porzione di materiale in cui si aveva libertà di modificare la forma è stata riadattata per ricercare lo stile del design generativo richiesto.

Per quanto riguarda la parete di base, invece, si è scelto di non apportare alcuna modifica rispetto al design di partenza, seguendo dunque i suggerimenti dell'ottimizzazione topologica, anche a causa del fatto che tale zona potrebbe essere più facilmente soggetta a urti da parte di oggetti sporgenti a quota elevata.

Dall'altra parte, questa è una situazione molto più complicata da verificarsi per la parete laterale soggetta a modifiche della forma, in quanto si tratta del lato orientato direttamente all'interno della carrozzina, verso le gambe dell'utente.

È importante specificare il fatto che, in questo caso, a differenza dei componenti analizzati nei capitoli precedenti, non vi sono aree particolarmente problematiche durante la ricostruzione, a delineare ancora una volta la semplicità dei Design Space.

Per completezza, si è scelto comunque di ipotizzare una modifica anche della parete di base, in modo tale da avere due opzioni finali per il componente, qualora lo si desidera.

In tal caso occorrerà prestare attenzione al rispetto del coefficiente di sicurezza minimo, per le motivazioni di cui si è discusso nelle righe di sopra. Il vantaggio, in compenso, sarebbe quello di ottenere una maggiore armonia, a livello estetico, tra le due pareti modificate, che giustificerebbero maggiormente la scelta del Generative Design.

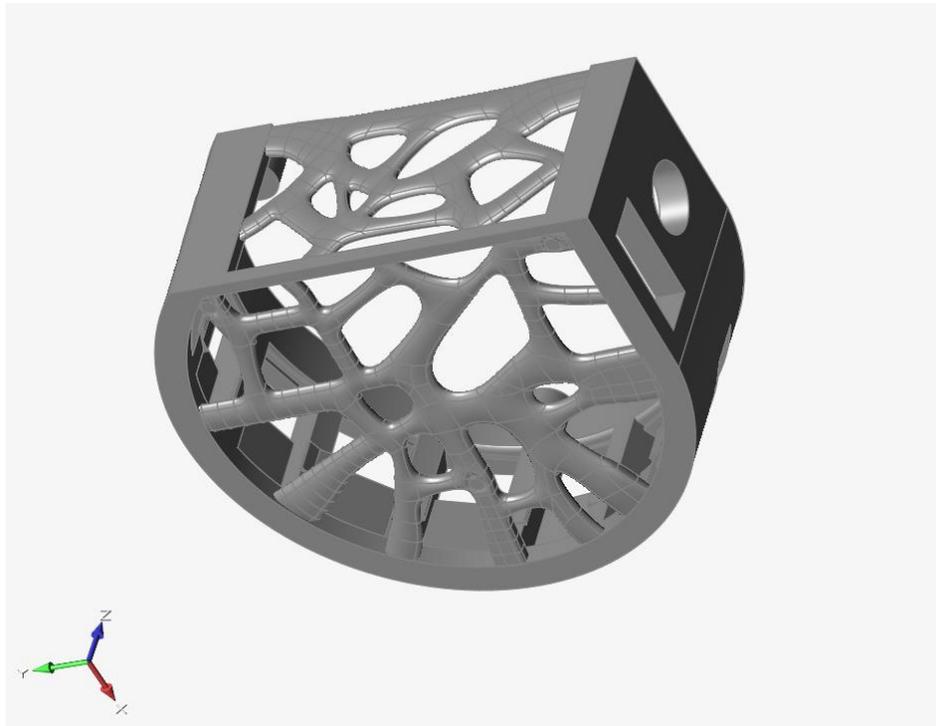


Figura 106: soluzione alternativa

5.4.6 Analisi risultati

Avviandosi verso la conclusione della progettazione, una volta soddisfatti delle superfici create, si passa all'esportazione del modello tridimensionale in formati universali (*Parasolid o Step*), al fine di trattare un oggetto solido dotato di massa.

Successivamente, non bisogna dimenticarsi di adattare correttamente le zone di contatto tra le zone fisse e quelle riprogettate, simulando a tutti gli effetti delle saldature, che sostanzialmente è quanto avverrebbe nella realtà in fase di stampa.

Sfruttando le operazioni booleane, dunque, si ottiene un risultato uguale a quello mostrato in Figura 107.

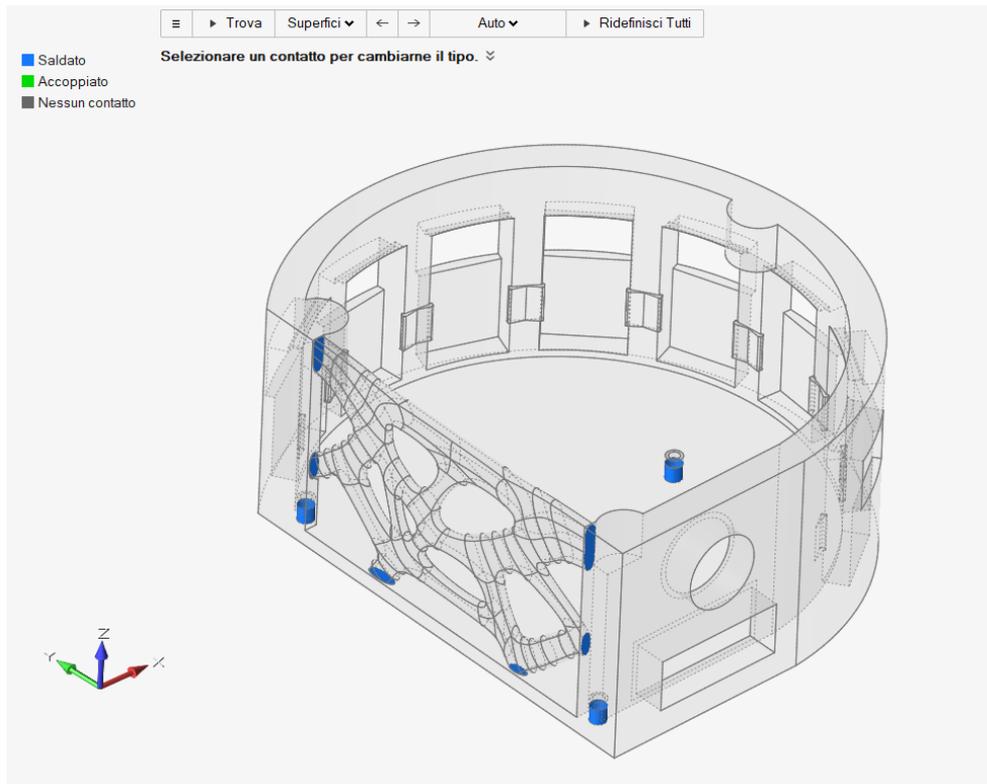


Figura 107: sistemazione contatti

Dopo essersi assicurati che i contatti sono definiti nella maniera opportuna, è possibile eseguire l'analisi fem, prestando particolare attenzione al valore della prima frequenza propria dell'oggetto. Osservando la Figura 108 emerge che tale valore risulta pari a 1240 Hz, che è sì inferiore ai 1545 Hz iniziali, ma inaspettatamente è superiore dei 1220 Hz massimi teorici previsti. Nella configurazione alternativa, invece, a seguito di un ulteriore alleggerimento dell'oggetto, il primo modo normale diminuisce ancora, raggiungendo il valore minimo di 957 Hz, il quale marca ancora più la differenza rispetto alla topologia originale, inducendo inevitabilmente a chiedersi se valga davvero la pena realizzare il porta tof con tali modifiche (Figura 109).

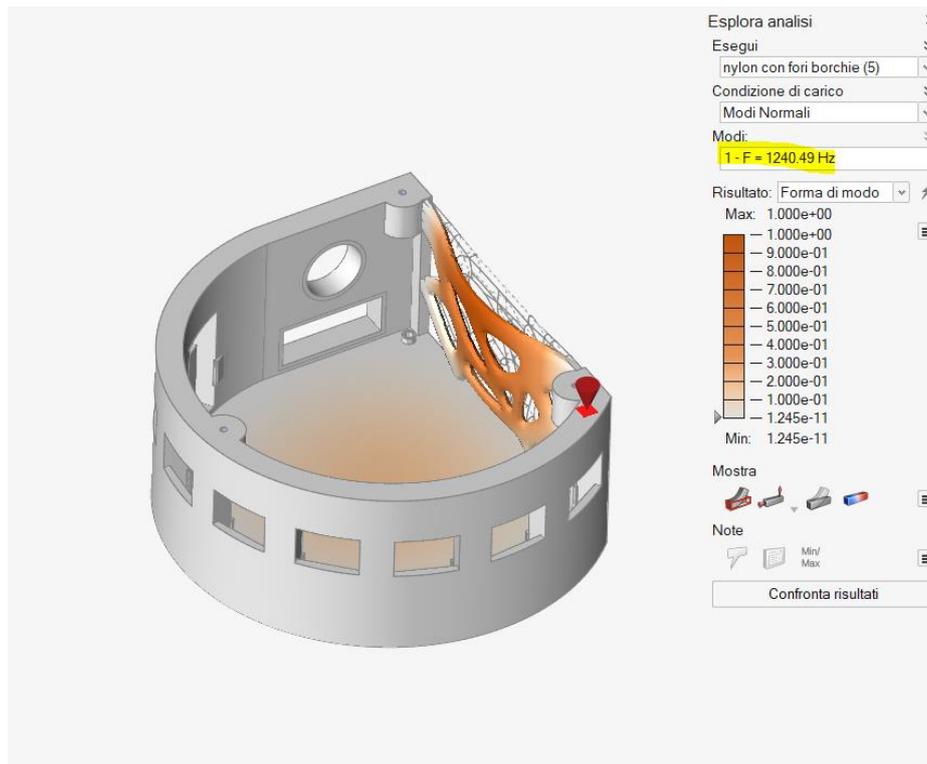


Figura 108: modifica alla sola parete posteriore

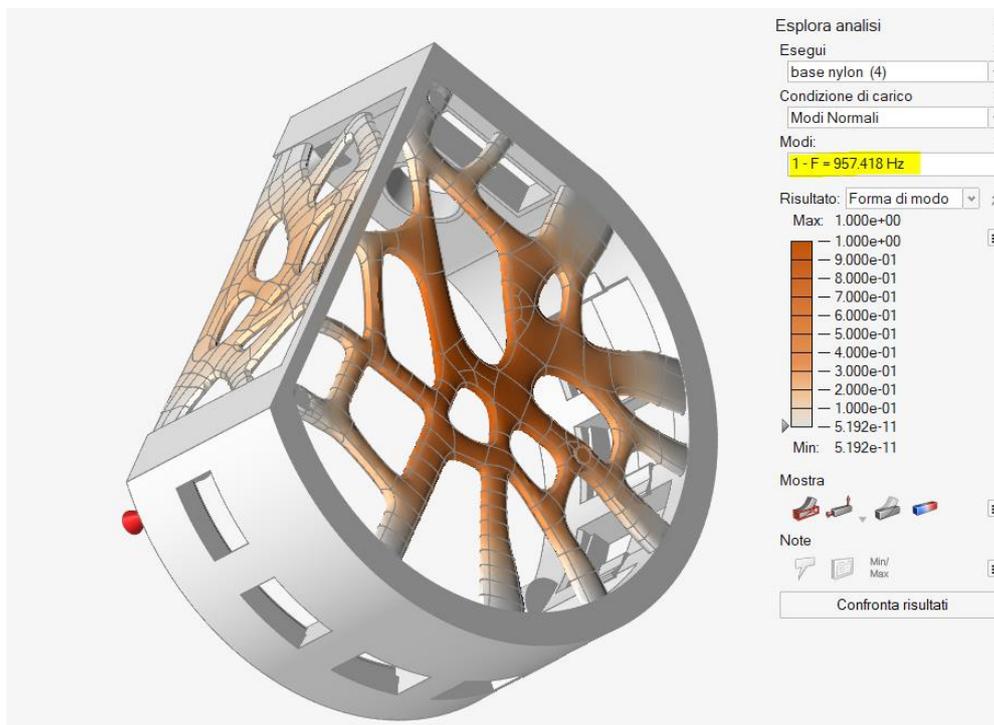


Figura 109: modifica a parete posteriore e base

Come già detto più volte, l'altro aspetto da controllare è il non superamento del limite di snervamento, dal momento che si vogliono realizzare componenti che garantiscono una resistenza alle sollecitazioni senza andare incontro a deformazione plastica o, peggio ancora, a rottura.

A tal proposito, analizzando il coefficiente di sicurezza nelle varie condizioni di carico, emerge quanto riportato nella Figura 110.

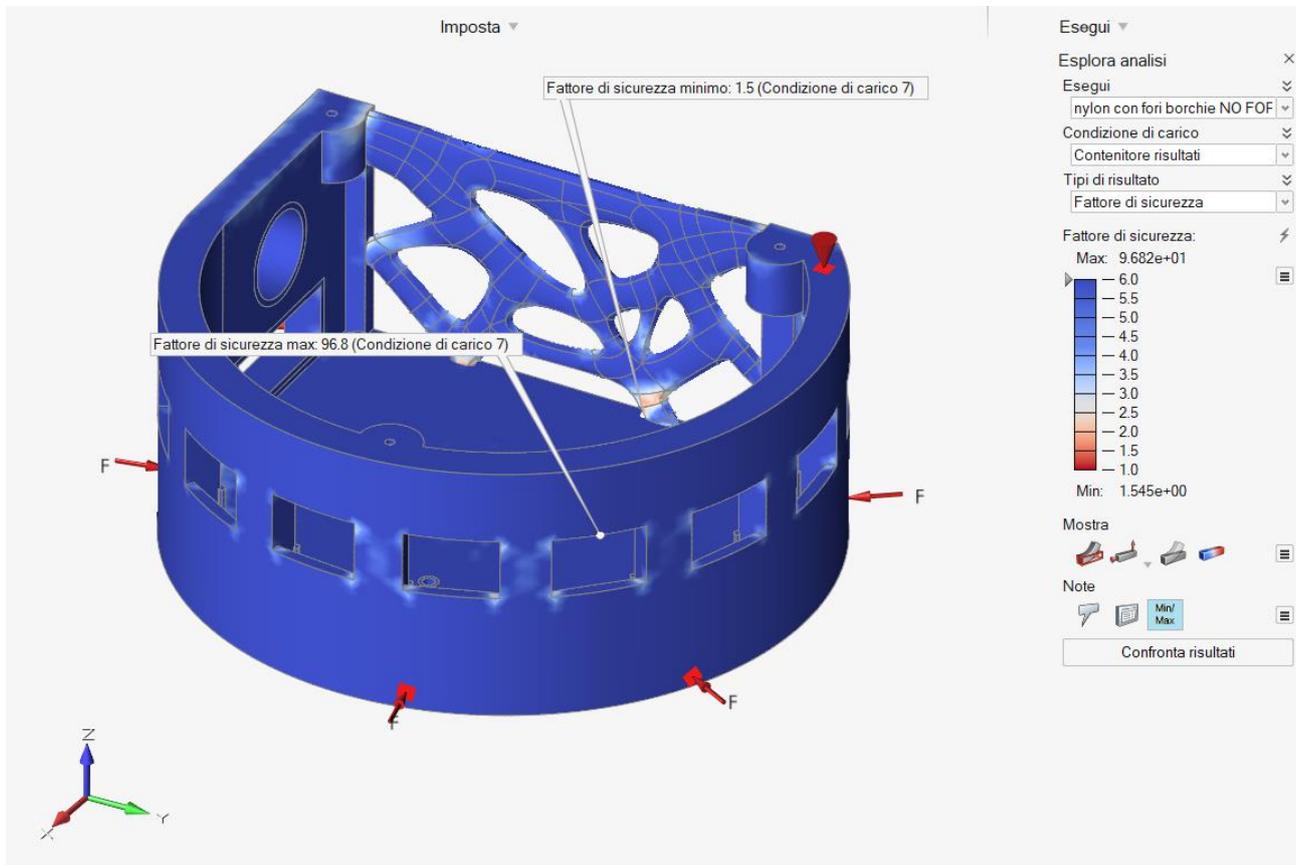


Figura 110: analisi CS minimo

La nuova geometria progettata rispetta il vincolo sul CS minimo, che è pari a 1.5 in base all'analisi fem. Tuttavia, occorre prestare attenzione al caso in cui la forza agente sul componente sia applicata direttamente sulla nuova parete dal design generativo.

Pur avendo spessore simile a quello originale, infatti, pari a 2.5 mm, l'assenza di una superficie "continua", intera, sulla quale possano dissiparsi e distribuirsi le tensioni, provoca una loro intensificazione in tutta la parete, soprattutto nelle zone di interfaccia tra *Design* e *No Design Space*. Come conseguenza, il coefficiente di sicurezza minimo è di gran lunga inferiore al vincolo imposto.

Normalmente un comportamento di questo tipo annullerebbe l'accettabilità del design, ma in questo caso è possibile ragionare nell'ottica di fare un'eccezione, sulla base del fatto che quella specifica parete è, come già accennato in precedenza, difficilmente soggetta alla forza ipotizzata, essendo rivolta verso l'intero della carrozzina (Figura 111).

Ciò che invece non può che essere scartata, è la seconda configurazione, quella che prevede la modifica anche della parete di base. In tal caso, l'impatto sulla superficie in questione sarebbe più verosimile, qualora si urtasse contro un oggetto sporgente. Si rimanda alla Figura 112 per maggiore chiarezza.

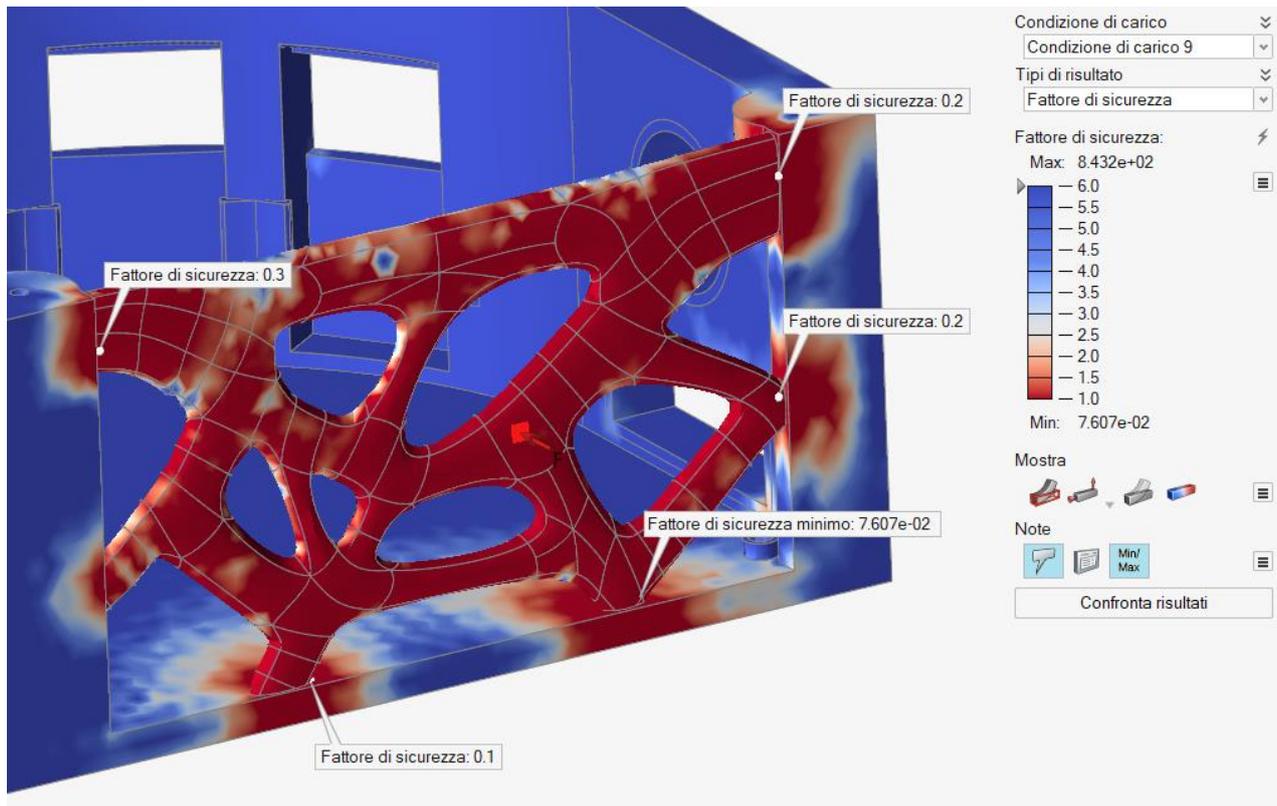


Figura 111: CS in seguito ad impatto su parete laterale interna

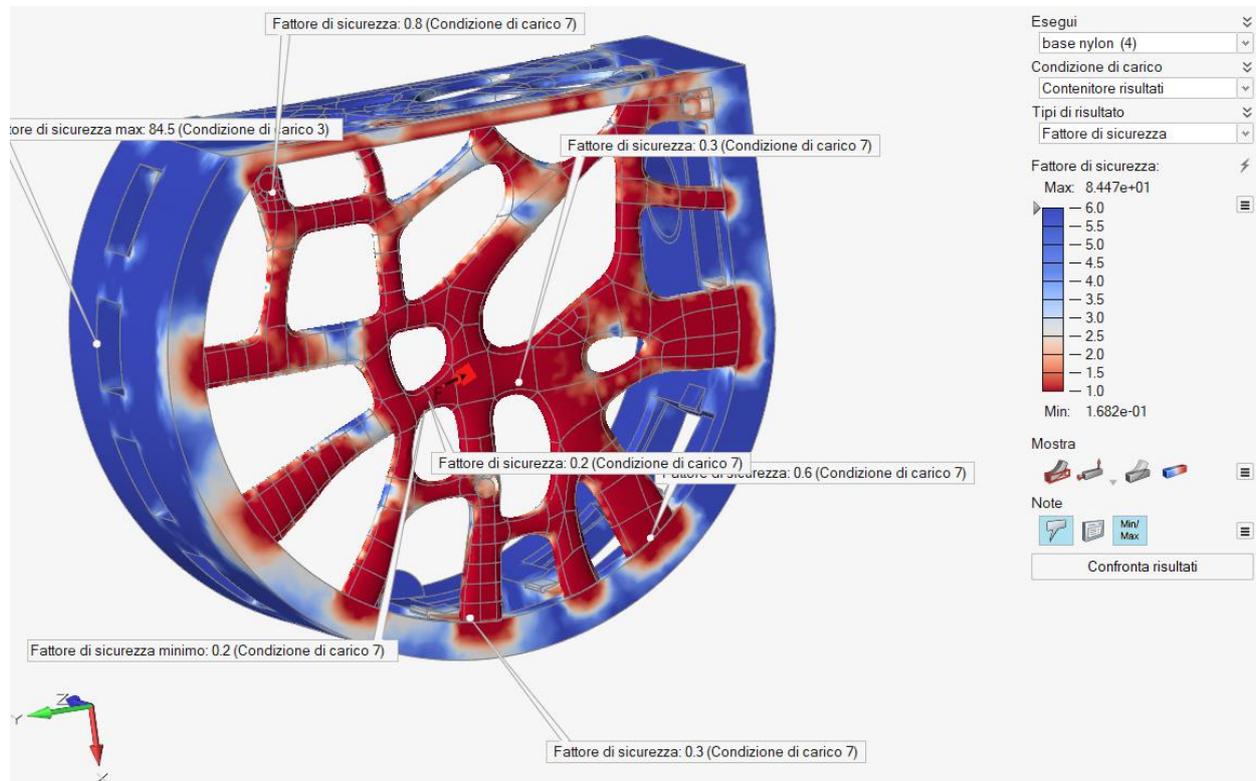


Figura 112: CS in seguito a impatto su parete di base

Come step finale, è possibile utilizzare l'operazione booleana di unione per ridurre tutte le varie parti ad un unico componente (Figura 113), in maniera tale da poterlo trattare in seguito per la messa in macchina.

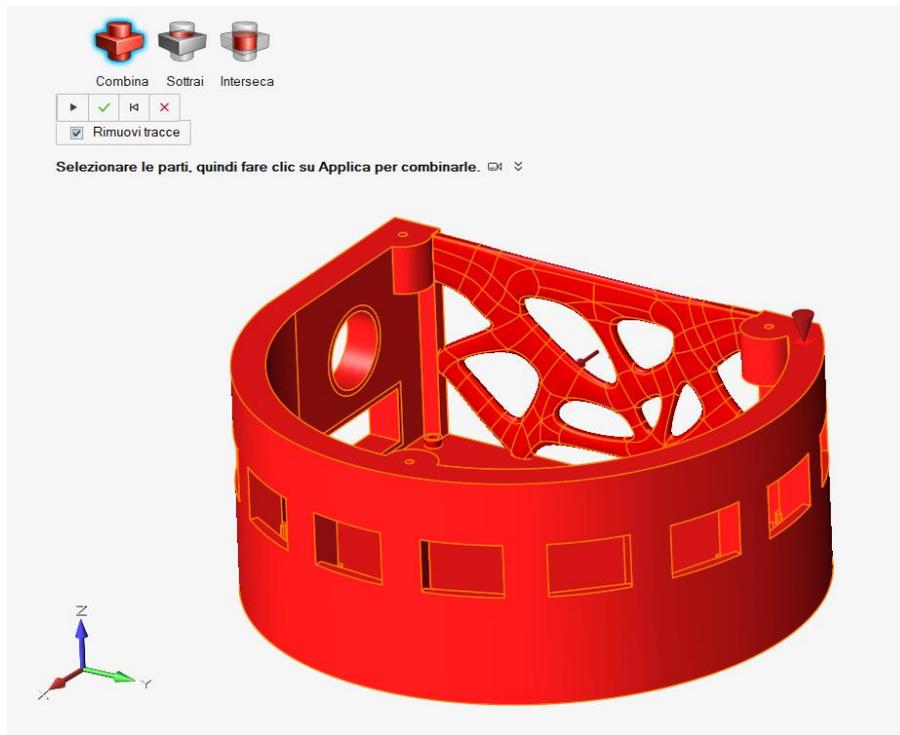


Figura 113: unione booleana

Infine, occorre non dimenticarsi di completare il tutto con l'inserimento dei raggi di raccordo e degli smussi rimossi in precedenza. In questo caso specifico è possibile osservare come molti dei fillet inseriti in realtà siano gli stessi presenti nella geometria originale, che erano stati eliminati durante il defeaturing. Questo perché le pareti laterali non hanno subito alcuna modifica rispetto al modello di partenza.

Ciò che invece risulta completamente aggiornato, è tutto l'insieme dei raccordi nelle zone di interfaccia tra le aree riprogettate e quelle rimaste invariate (Figura 114).

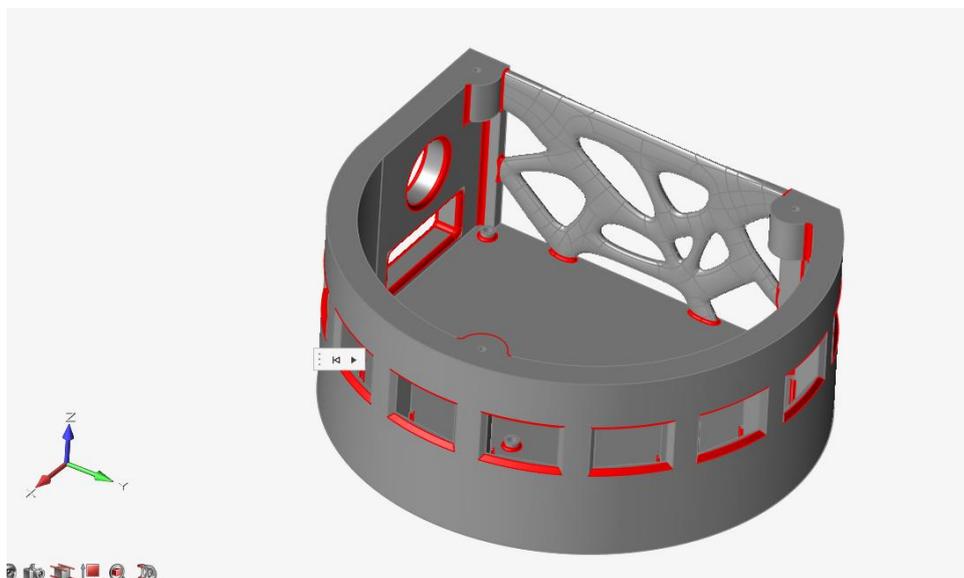


Figura 114: generazione fillet

L'ultimo paragrafo dell'analisi, non può che riguardare il risparmio di volume, al fine di comprendere se effettivamente ci siano state variazioni consistenti rispetto al design originale.

Riassunto risultati	Valori
Prima frequenza propria [Hz]	1240
Coefficiente di sicurezza	1.5
Carichi (statici/dinamici) [N]	0/915
Materiale	Duraform ProX AF+ (nylon caricato alluminio)
Massa [g]	81.4
Volume [cm ³]	62.2

Tabella 20: riassunto dati output porta tof anteriore

La Tabella 20 riassume tutti i risultati ottenuti al termine della progettazione. La prima frequenza di risonanza dell'oggetto raggiunge il valore di picco pari a 1240 Hz, che resta un limite molto alto, seppur inferiore all'originale. Si nota inoltre che il volume, inizialmente pari a 65.8 cm³, risulta praticamente invariato, a 62.2 cm³, con una riduzione del solo 5.5%.

In compenso, sfruttando la leggerezza del nylon sviluppato da 3D Systems, si è riusciti a mantenere una massa limitata, che praticamente risulta dimezzata rispetto a quella che si avrebbe avuta qualora si fosse utilizzata una lega di alluminio, dati i valori di densità.

Questi risultati inducono nuovamente a riflettere sul fatto se sia davvero opportuno optare per il Generative Design anche per un oggetto simile, in quanto, come si è visto, i vantaggi che ne conseguono sono tutt'altro che evidenti.

Eccezione fatta per il mantenimento di una massa ridotta, infatti:

- 1 la prima frequenza propria di risonanza non è incrementata, bensì si è ridotta;
- 2 il risparmio di volume è quasi inesistente;
- 3 l'unica porzione di oggetto modificata sembra quasi "estranea" al resto del componente;
- 4 le proprietà meccaniche sarebbero sicuramente inferiori rispetto allo stampaggio a iniezione.

5.5 Messa in macchina

Trattandosi di un processo di *Selective Laser Sintering*, un'agevolazione rispetto al processo duale per i metalli (*SLM*) è il fatto che non siano necessari i supporti. Questo perché è il letto di polvere stesso a svolgere il ruolo di sostegno.

Anche per le polveri metalliche sarebbe così, se non fosse per la maggiore densità del materiale: all'atto della fusione, infatti, nel processo di *SLM* il *powder bed* non è in grado di sorreggere il peso dell'oggetto, che tenderebbe a sprofondare.

In quanto all'aspetto legato al processo, dunque, la scelta di realizzare il porta tof in materiale polimerico offre minori complicazioni rispetto all'AlSi10Mg.

Per quanto riguarda la messa in macchina vera e propria, è necessario tenere presente quali sono le zone più critiche dell'oggetto. In particolare, per la corretta funzionalità del componente, sono di fondamentale importanza soprattutto le finestre e gli agganci per le schedine, dal momento che se fossero stampati in modo inappropriato, si metterebbe a rischio l'incastro dei tof.

Per limitare la possibilità di alterazioni della forma, l'ipotesi di messa in macchina suggerita è quella che prevede l'appoggio dell'oggetto sulla propria base. Questo si discosta radicalmente da quanto svolto per gli altri componenti, in cui si è ricercato sempre il migliore compromesso tra quantità di supporti e tempo di stampa.

In questo caso, però, non essendovi sostegni, appoggiare l'oggetto sulla base sembra la scelta più logica, in quanto i ganci interni che svolgono il ruolo di bloccaggio delle schede, così facendo sarebbero costruiti avendo una solida base piana, perpendicolare all'asse di costruzione. Come ulteriore sicurezza, si è realizzato un raggio di raccordo alla base, in maniera tale da evitare i supporti anche se si utilizzasse un altro tipo di tecnologia. Per maggiore chiarezza si rimanda alla Figura 92.

All'atto pratico, quindi, le uniche zone "critiche" sarebbero le pareti orizzontali delle varie aperture, le quali richiederebbero strutture di sostegno per la loro intera lunghezza. Tuttavia, questo non rappresenta un problema insormontabile, in quanto in caso di mancato accoppiamento, sarebbe possibile limare un sottile strato di materiale, in modo tale da garantire il gioco necessario all'inserimento delle varie schedine. Questo naturalmente si potrebbe fare anche coi metalli, ma con i polimeri risulta ancora più semplificato.

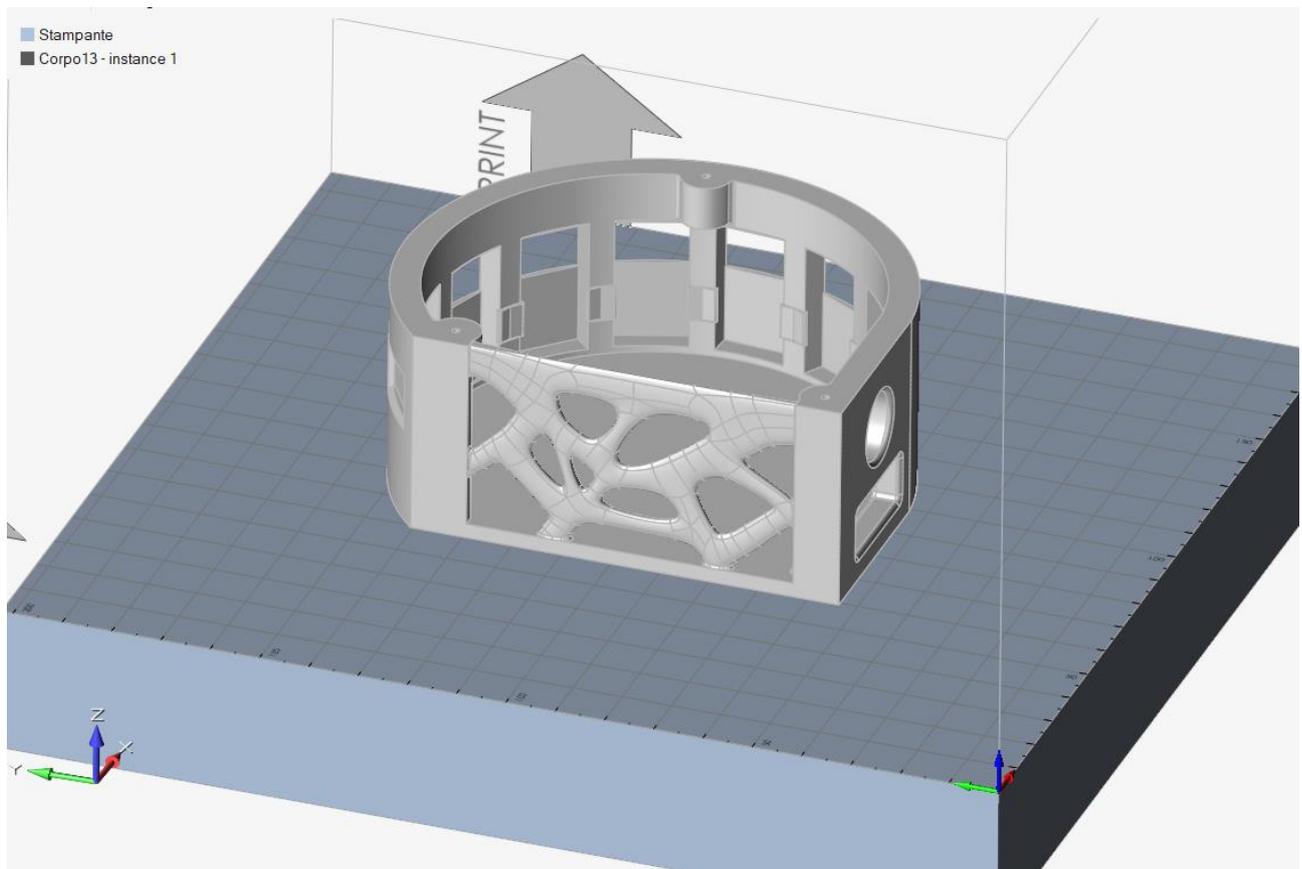


Figura 115: messa in macchina

5.6 Considerazioni conclusive

Per componente, ancora più dei precedenti, è obbligatorio confrontare i valori principali ottenuti, in modo da capire se sia opportuno affidarsi alle tecniche additive. Si rimanda alla Tabella 21 per analizzare i dati riassuntivi.

	GEOMETRIA ORIGINALE	GENERATIVE DESIGN
Prima frequenza propria [Hz]	1544	1240
Coeff. Sicurezza minimo	2.2	1.5
Materiale	PLA	Duraform ProX AF+
Massa [g]	61	81.4
Volume [cm³]	65.8	62.2
Risparmio volume [cm³]	/	3.6
Risparmio percentuale [%]	/	5.5

Tabella 21: confronto finale

A differenza di quanto accaduto per i due componenti precedenti, è palese il fatto che per il porta tof anteriore non vi siano miglioramenti. Infatti, l'obiettivo principale della riprogettazione, ovvero la massimizzazione della prima frequenza propria, non soltanto non è stato raggiunto, ma addirittura è peggiorato rispetto al componente realizzato in PLA.

Normalmente questo basterebbe a far ricadere la scelta sui metodi convenzionali, tuttavia, dal momento che il valore della frequenza risultante al termine della riprogettazione è comunque molto alto, potrebbe essere ancora conveniente optare per il Generative Design.

Ciò che allontana in maniera irreversibile da tale scelta costruttiva, però, è il fatto che la nuova geometria sembra in un certo senso una forzatura, e non trova l'armonia organica che caratterizzava i due componenti precedenti. Il fatto che vi sia una variazione di volume così ridotta, va a conferma di quanto detto.

Di conseguenza, in questo caso specifico ricorrere ai processi additivi sembra più una scelta di design, che non di necessità funzionale e pertanto è preferibile affidarsi alle metodologie costruttive tradizionali.

6 CONCLUSIONI

Il lavoro sin qui svolto, ha permesso di fornire una panoramica piuttosto ampia su quelli che sono gli aspetti principali legati alla realizzazione di un componente in Generative Design, tramite l'utilizzo di processi di Fabbricazione Additiva.

I vari componenti della carrozzina sono stati l'esempio ideale per trasmettere un importante insegnamento, ovvero il fatto che non è sempre scontato il buon esito della progettazione tramite queste tecnologie.

Talvolta può accadere che un particolare oggetto non giustifichi la scelta di optare per i processi additivi, perché i benefici che se ne trarrebbero non sarebbero tali da motivare l'investimento economico molto maggiore rispetto alle tecnologie di tipo tradizionale.

Ciò è emerso chiaramente con l'ultimo componente studiato, ovvero il porta tof anteriore: nonostante qualche modifica, infatti, i dati delle analisi hanno rivelato chiaramente che si è andati incontro ad un peggioramento delle proprietà meccaniche, soprattutto nell'ottica di massimizzare la prima frequenza propria.

Come già detto nei capitoli precedenti, sebbene il valore raggiunto sia comunque molto alto, e sicuramente non vi saranno problemi legati alle vibrazioni, è comunque opportuno porsi un dubbio legittimo sul fatto se sia realmente necessario il Generative Design per un oggetto simile. Dall'altra parte invece, per il porta telecamera e la staffa porta tof, vale il ragionamento diametralmente opposto.

La maggior libertà di modificare la geometria, unita all'assenza di un numero eccessivo di dettagli di forma che rendono impossibile l'ottimizzazione topologica (come, ad esempio, le sedi per i tof sulla parete cilindrica del porta tof anteriore), consentono di andare incontro ad un lavoro di riprogettazione molto più fluido e spontaneo, dando origine a miglioramenti tangibili in termini di proprietà meccaniche.

Ciò che ne consegue è comunque una geometria molto più complessa rispetto all'originale, che teoricamente è quanto dovrebbe sempre accadere per motivare il ricorso alle tecniche di Additive Manufacturing (per geometrie semplici si utilizzano infatti tecniche convenzionali, a prezzi inferiori), tuttavia la differenza è tangibile nella possibilità di modificare la topologia iniziale: se la maggior parte degli spazi sono destinati a rimanere invariati, è il caso di valutare attentamente la scelta di ricorrere al Generative Design.

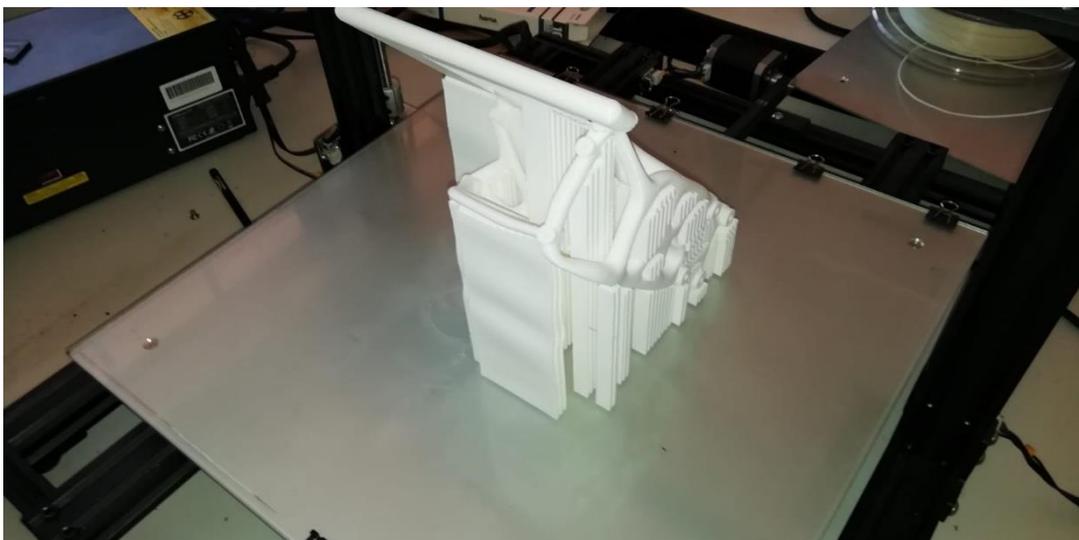


Figura 116: staffa porta tof prototipo funzionale

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Materiali per additive manufacturing metallico, linee generali, *Prof. P. Fino*
- [2] Diagrammi di stato + trattamenti termici su leghe metalliche prodotte per Additive manufacturing, *Dott. G. Marchese*, pag 40
- [3] Tecniche di Additive Manufacturing per metalli, *Prof. L. Iuliano*, pag 11
- [4] Metal powders for AM processes, *Prof. P. Fino*, pag 6
- [5] <https://www.msosupplies.com/products/alsi10mg-aluminum-based-metal-powder-for-additive-manufacturing-3d-printing?variant=32224600424506>
- [6] Materiali per additive Leghe di Ti, *Prof. P. Fino*, pag 7-10
- [7] Materiali per additive Leghe di Fe, *Prof. P. Fino*, pag 4, 11
- [8] Trattamenti termici per Additive Manufacturing, *Dott. Giulio Marchese*, pag 24-29
- [9] Materiali per additive manufacturing metallico, linee generali, *Prof. P. Fino*, pag 6,7
- [10] Trattamenti termici per Additive Manufacturing Esercitatore: *Dott. Giulio Marchese*, pag 14
- [11] Tecniche di Additive Manufacturing per metalli, SLM, *Prof. L. Iuliano*, pag 8
- [12] Tecniche di Additive Manufacturing per metalli, SLM, *Prof. L. Iuliano*, pag 10
- [13] Trattamenti termici per Additive Manufacturing, *Dott. Giulio Marchese*, pag 3-8
- [14] Tecniche di Additive Manufacturing per metalli, LETTO DI POLVERE CON EBM, *Prof. L. Iuliano*, pag 1-12
- [15] Tecniche di Additive Manufacturing per metalli, LETTO DI POLVERE CON EBM, *Prof. L. Iuliano*, pag 15-17
- [16] Metal powders for AM processes, *Prof. P. Fino*, pag 6
- [17] Tecniche di Additive Manufacturing per metalli, LETTO DI POLVERE CON EBM, *Prof. L. Iuliano*, pag 68
- [18] Materiali per additive Leghe di Fe, *Prof. P. Fino*, pag 6
- [19] Materiali per additive Leghe TiAl, *Prof. P. Fino*
- [20] Fused Deposition Modelling, *Prof. L. Iuliano*, pag 6
- [21] Le stampanti 3D a deposito di filamento (FDM) *Prof. F. Colombo*, pag 15-19
- [22] Materiali per Additive Manufacturing Polimerico, *Prof. P. Fino*, pag 10
- [23] Materiali per Additive Manufacturing Polimerico, *Prof. P. Fino*, pag 3-8
- [24] Selective Laser Sintering, *Prof. L. Iuliano*, pag 7-11
- [25] Selective Laser Sintering, *Prof. L. Iuliano*, pag 12-18
- [26] SCHEDA TECNICA Prusament PLA di Prusa Polymers, pag 2
- [27] Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications. A comprehensive review, pag 6
- [28] <https://ingegnerisidiventa.com/2019/02/25/dinamica-dellimpatto/>
- [29] Material Data Sheet EOS PEEK
- [30] 3D Systems LaserForm AlSi10Mg, datasheet
- [31] Bendsoe M. P., Sigmund O. Topology Optimization. Theory, Methods and Applications, second edition, *Springer Verlag*, Berlin, 2004
- [32] A new adaptive penalization scheme for topology optimization, *A. Dadalau A. Hafila A. Verl*
- [33] <https://it.3dsystems.com/materials/plastic>
- [34] <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials>
- [35] DuraForm EX Plastic datasheet, 3D Systems
- [36] DuraForm ProX AF+ datasheet, 3D Systems
- [37] PA 2201 for EOSINT P datasheet, EOS
- [38] Alumide PA12-MD(Al) datasheet, EOS

- [39] Impact property enhancement of poly (lactic acid) with different flexible copolymers, *N Likittanaprasong, M Seadan, S Suttiruengwong*, pag 5
- [40] Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting, *K. Kempena, L.Thijsb, J. Van Humbeeckb and J.-P. Krutha*, pag 6
- [41] <https://www.element.com/nucleus/2016/charpy-vs-izod-impact>
- [42] <https://www.sis.se/api/document/preview/912362/>
- [43] <https://www.intertek.com/polymers/testlopedia/notched-izod-impact-astm-d256/>
- [44] Selective Laser Sintering, *Prof. L. Iuliano*, pag 34
- [45] <https://www.comefimetalli.it/lega2011.asp>
- [46] <https://www.gandini.it/www/vitidadi/index.cfm?fuseaction=frm&ctg=12&languageid=it&idarticolor=Vg2J%2FNBsAMT%2BQ1c%3D&uid=297>
- [47] <https://docs.rs-online.com/0b5c/0900766b816b6e9b.pdf>
- [48] <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/>
- [49] <https://www.3dstoremonza.it/categoria-prodotto/materiali-stampa-3d-sharebot/filamenti-stampa-3d/filamenti-peek-stampa-3d/>

8 INDICE FIGURE

Figura 1: carrozzina Alba Robot IV generazione	7
Figura 2: esempio file stl	9
Figura 3: esempio di slicing	10
Figura 4: illustrazione processo SLM.....	11
Figura 5: estrazione job e rimozione eccesso polvere	12
Figura 6: point distance e hatch distance	13
Figura 7: effetto stress residui	14
Figura 8: processo EBM.....	15
Figura 9: processo di sabbiatura	16
Figura 10: schematizzazione FDM.....	18
Figura 11: struttura delta	19
Figura 12: struttura cartesiana.....	19
Figura 13: FDM cin fresa incorporata	20
Figura 14: processo di Selective Laser Sintering	22
Figura 15: sinterizzazione.....	22
Figura 16: esempio slicing SLS.....	23
Figura 17: prototipo funzionale realizzato tramite SLS, materiale: PA 12.....	24
Figura 18: schedina tof.....	26
Figura 19: telecamera Intel D435.....	26
Figura 20: porta joystick.....	26
Figura 21: componente originale	27
Figura 22: messa in tavola.....	28
Figura 23: montaggio staffa su carrozzina	29
Figura 24: definizione vincoli	30
Figura 25: posizione carichi applicati	32
Figura 26: analisi spostamento massimo	33
Figura 27: analisi CS minimo	33
Figura 28: operazione di defeaturing.....	34
Figura 29: spessore originale per battuta su piastra motore	35
Figura 30: Design e No Design Space	36
Figura 31: esempio ottimizzazione topologica	39
Figura 32: cedevolezza vs fattore di penalizzazione applicato ad una trave.....	39
Figura 33: max prima frequenza, spessore minimo 8 mm	40
Figura 34: particolare zona fissaggio, max frequenza	41
Figura 35: max rigidezza 20%, spessore minimo 8 mm	41
Figura 36: analisi freccia massima	42
Figura 37: focus errore numerico	43
Figura 38: generazione PolyNurbs	44
Figura 39: zona PolyNurbs attacco M5	44
Figura 40: zone di contatto	45
Figura 41: contatti dopo operazione booleana di sottrazione	46
Figura 42: primo tentativo di ricostruzione	46
Figura 43: verifica funzionale con porta tof.....	47
Figura 44: vista frontale	48
Figura 45: vista in pianta	48

Figura 46: Design Space, geometria finale.....	48
Figura 47: operazione di unione booleana	49
Figura 48: raggi di raccordo	49
Figura 49: condizioni di carico aggiornate	50
Figura 50: menu analisi: modi normali	50
Figura 51: frequenza risonanza nuova geometria, AISi10Mg.....	51
Figura 52: frequenza risonanza componente originale	51
Figura 53: analisi modi normali PLA nuova geometria	52
Figura 54: analisi frequenza AISI10Mg geometria originale	53
Figura 55: coefficiente di sicurezza, caso peggiore.....	53
Figura 56: tensione di Von Mises	54
Figura 57: piastrina sovrametallo	55
Figura 58: profilo a goccia	56
Figura 59: rimozione svasature	56
Figura 60: sovrametallo piastra copertura porta tof	56
Figura 61: scelta orientamento	57
Figura 62: parallelepipedo ingombri massimi.....	58
Figura 63: supporti angolari (cerchiato) vs supporti dritti (riquadrato)	58
Figura 64: proposta messa in macchina.....	59
Figura 65: porta telecamera, posizione su carrozzina	61
Figura 66: sedi M3 per collegamento telecamera	62
Figura 67: lamatura per viti M3 a testa cilindrica	62
Figura 68: messa in tavola porta telecamera.....	63
Figura 69: incastri cedevoli	64
Figura 70: carichi pt. 1.....	65
Figura 71: carichi pt. 2.....	65
Figura 72: analisi fem, spostamento massimo	67
Figura 73: analisi fem, coefficiente di sicurezza minimo	67
Figura 74: analisi fem, modi normali	68
Figura 75: operazione di semplificazione geometria	69
Figura 76: distinzione Desing e No Design Space	70
Figura 77: ott. top. massimizzazione prima frequenza propria	71
Figura 78: deviazione linee guida ottimizzazione topologica	71
Figura 79: nuova geometria porta telecamera	72
Figura 80: definizione zone di contatto	73
Figura 81: verifica prima frequenza di risonanza.....	74
Figura 82: verifica CS minimo.....	74
Figura 83: sovrametalli fori fissaggio	76
Figura 84: svasature e lamature a posteriori della stampa	76
Figura 85: ingombri massimi porta telecamera	77
Figura 86: disposizione in macchina	78
Figura 87: supporti "classici" verticali	78
Figura 88: supporti ad albero.....	79
Figura 89: supporti completi.....	80
Figura 90: porta tof anteriore	82
Figura 91: porta tof posteriore	82
Figura 92: focus ganci bloccaggio schedine	83
Figura 93: montaggio su carrozzina	84

Figura 94: condizioni di carico.....	85
Figura 95: analisi prima frequenza propria	86
Figura 96: analisi CS minimo	86
Figura 97: disponibilità polveri nylon 3D Systems	87
Figura 98: prova di Charpy	89
Figura 99: test Izod.....	90
Figura 100: semplificazione geometria	91
Figura 101: rimozione smussi finestre	92
Figura 102: focus parete posteriore	93
Figura 103: definizione zone di progettazione	93
Figura 104: risultato ottimizzazione max frequenza	94
Figura 105: generazione PolyNurbs	95
Figura 106: soluzione alternativa.....	96
Figura 107: sistemazione contatti.....	97
Figura 108: modifica alla sola parete posteriore	98
Figura 109: modifica a parete posteriore e base.....	98
Figura 110: analisi CS minimo	99
Figura 111: CS in seguito ad impatto su parete laterale interna	100
Figura 112: CS in seguito a impatto su parete di base.....	100
Figura 113: unione booleana	101
Figura 114: generazione fillet	101
Figura 115: messa in macchina	103
Figura 116: staffa porta tof prototipo funzionale.....	105

9 INDICE TABELLE

Tabella 1: proprietà meccaniche materiale originale	30
Tabella 2: carichi staffa porta tof	32
Tabella 3: dati input staffa originale	32
Tabella 4: obiettivi e vincoli riprogettazione staffa	34
Tabella 5: proprietà peek EOS.....	37
Tabella 6: proprietà meccaniche AlSi10Mg, 3D Systems.....	37
Tabella 7: parametri fisici nuova geometria	54
Tabella 8: riassunto dati output staffa porta tof	55
Tabella 9: confronto tra geometria iniziale e finale.....	59
Tabella 10: carichi porta telecamra	66
Tabella 11: dati input porta telecamera originale	68
Tabella 12: obiettivi e vincoli riprogettazione porta telecamera	68
Tabella 13: riassunto dati output porta telecamera.....	75
Tabella 14: confronto soluzioni costruttive	80
Tabella 15: obiettivi e vincoli riprogettazione porta tof	84
Tabella 16: carichi porta tof anteriore	85
Tabella 17: riassunto dati input porta tof originale	86
Tabella 18: proprietà meccaniche polimeri	88
Tabella 19: valori di tenacità normalizzati	90
Tabella 20: riassunto dati output porta tof anteriore	102
Tabella 21: confronto finale	104

RINGRAZIAMENTI

Essendo giunto alla conclusione di questo elaborato, nonché del percorso di studi universitari, ci tengo a ringraziare le persone che hanno contribuito alla realizzazione di tali risultati.

In primo luogo, un sincero ringraziamento va al Prof. Pastorelli, il quale, mi ha seguito per tutta la durata di quest'ultimo semestre, non soltanto in qualità di relatore di tesi, ma anche di tutor accademico durante lo svolgimento del mio tirocinio curricolare.

Ringrazio altresì il correlatore, il Prof. Chiandussi, per i preziosi consigli in fase di realizzazione del suddetto elaborato.

Grazie ai miei genitori, per avermi offerto la possibilità di studiare, a mio fratello, per l'infinita pazienza che porta nei miei confronti e all'intera squadra di Alba Robot, senza la cui disponibilità non sarebbe stato possibile nemmeno iniziare la tesi.

Un pensiero speciale va ai miei amici storici del liceo, continua garanzia di allegria e spensieratezza, soprattutto alle dieci meno dieci, dopo qualche Dragoon ben piazzata, ma anche ai nuovi amici universitari incontrati durante il percorso, e alla loro complicità per affrontare al meglio le mille mila ore di lezione.

Grazie alla Zenti e ai suoi pilastri, per avermi accolto come stagista e per il loro costante sostegno durante questi ultimi mesi, ma soprattutto ci tengo a ringraziare in modo particolare il mio mentore, che dopo sole quattro paia di occhiali ed un "colibrì" nuovo di zecca, continua a condividere con me insegnamenti impagabili ed è riuscito a farmi scoprire un settore direttamente legato ai miei studi di cui nemmeno sapevo l'esistenza.