



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E
SCIENZE MATEMATICHE

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Additive manufacturing: ottimizzazione
topologica di una staffa**

**Additive Manufacturing: topology optimization
of a bracket**

Relatore: Chiar.mo/a
Prof. **Archimede Forcellese**

Tesi di Laurea di:
Edoardo Pretara

A.A. 2023/2024

Indice

INTRODUZIONE

Capitolo primo ADDITIVE MANUFACTURING

1.1 Storia

1.2 Campi di applicazione

1.3 Principali tecnologie

1.3.1 Vat Photopolymerization

1.3.2 Materiale Extrusion

1.3.3 Material Jetting

1.3.4 Binder Jetting

1.3.5 Powder Bed Fusion

1.3.6 Direct Energy Deposition

1.3.7 Sheet Lamination o Laminated Object Manufacturing

1.4 Flusso di lavoro

Capitolo secondo OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA

2.1 Ottimizzazione Topologica

2.2 Flusso di lavoro ottimizzazione topologica nell'ambiente ANSYS

2.2.1 Creare Sistemi di Analisi

2.2.2 Definire il Metodo di Ottimizzazione

2.2.3 Definire gli Obiettivi e Vincoli di progettazione

2.2.4 Ricreare la geometria CAD

2.3 Combinazione del metodo LSM e del metodo basato sulla Densità

2.4 Applicazioni

2.5 Sfide e Direzioni future

Capitolo terzo *CASO STUDIO: OTTIMIZZAZIONE DI UNA STAFFA DI SUPPORTO*

3.1 Generazione Feeder

3.2 Definizione del Metodo di Ottimizzazione

3.3 Definizione Obiettivo e Vincoli di risposta

3.4 Definizione dei vincoli di fabbricazione e dei vincoli di progettazione

3.5 Risoluzione e rimodellazione CAD

3.6 Risultato ottimizzazione

3.7 Realizzazione prototipo

Capitolo quarto *CONCLUSIONI*

Bibliografia

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni il settore manifatturiero ha subito una profonda trasformazione grazie alla quarta rivoluzione industriale, che prende il nome di Industria 4.0, che promuove l'integrazione di tecnologie digitali e sistemi intelligenti nel ciclo produttivo; questa integrazione è possibile grazie alle tecnologie abilitanti, tra queste è presente la Fabbricazione Additiva (in inglese Additive Manufacturing). Le altre tecnologie presenti sono:

- Robot Collaborativi;
- Realtà Aumentata;
- Simulazione
- Integrazioni Digitali;
- Industrial Internet;
- Cloud;
- Cybersecurity;
- Big Data e Analytics.

Queste tecnologie sono cruciali perché rappresentano i pilastri tecnologici su cui si basa l'industria 4.0, cioè sono il cuore dell'innovazione e della trasformazione digitale. Queste consentono alle aziende di aumentare l'efficienza, la flessibilità e la competitività, rendendo i processi produttivi più intelligenti, interconnessi e automatizzati. Infatti secondo un recente studio della Commissione per le attività produttive della Camera dei Deputati, le aziende che hanno già adottato alcune delle tecnologie chiave della quarta rivoluzione industriale all'interno dei propri asset hanno registrato una crescita dell'efficienza produttiva pari al 30-50%. [17][18]

L'Additive Manufacturing rappresenta una rivoluzione rispetto ai processi di fabbricazione sottrattiva; infatti come si vedrà in seguito nell'elaborato le varie tecnologie che rientrano nell'AM realizzano il prodotto finale attraverso la realizzazione di strati (layer) successivi di materiale sul piano di stampa.

Nello specifico in questo elaborato verranno analizzate le tecnologie attuali più utilizzate nei processi di fabbricazione additiva e il processo di ottimizzazione topologica di una staffa di supporto tramite la suite di programmi fornita da ANSYS.

Capitolo primo

ADDITIVE MANUFACTURING

I processi di Additive Manufacturing (AM) permettono la realizzazione di componenti tramite la generazione di strati successivi del materiale, queste tecnologie sono rivoluzionari se messe a confronto con i processi sottrattivi tradizionali. Questa caratteristica permette non solo di evitare lo spreco di materiale ma anche la realizzazione di pezzi con geometrie più complesse, non ottenibili con processi tradizionali, impostando la progettazione da un punto di vista puramente funzionale.

Altro vantaggio dell'AM riguarda il lato economico, infatti è possibile ridurre i costi di produzione iniziando da quelli di prototipazione, che rappresenta il collo di bottiglia nello sviluppo del prodotto; infatti, non si ha più la necessità di acquistare macchine apposite per la realizzazione del prototipo o affidarsi a terze parti.

1.1 Storia

Iniziamo a parlare di fabbricazione additiva quando nei primi anni del 2000 si volle definire un termine appropriato per tutti i processi additivi: il termine Additive Manufacturing (AM) viene introdotto nella normativa ASTM F2792-12a (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies). All'interno della stessa norma vengono definiti vari processi che rientrano in questa famiglia di tecnologie, tra cui i più importanti sono:

- Rapid Prototyping (RP): la realizzazione di prototipi funzionali, in brevi tempi, a partire dal CAD
- Rapid Manufacturing (RM): fabbricazione rapida di parti ad uso diretto partendo dal CAD
- Rapid Tooling (RT): fabbricazione rapida di inserti o utensili partendo dal CAD

La prima volta nella storia dove si inizia a parlare di processo additivo è il 1982 quando Chuck Hull inventò la stereolitografia, che utilizza come materiale i polimeri. In seguito nel 1986 Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase, studiando il processo di Hull, migliorarono la tecnologia e realizzarono la Selective Laser Sintering. Due anni dopo, nel 1988, Scott Crump idealizza la Fused Deposition Modeling, antenato delle più moderne stampanti 3D in commercio oggi, ma solo nel 1995 si ebbe la possibilità di realizzare oggetti comparabili a quelli ottenuti dall'industria tradizionale: ciò è stato possibile grazie alla tecnica del Selective Laser Melting, migliorando la tecnologia precedente del 1988. L'ultima grande innovazione c'è stata nel 2002 tramite lo sviluppo dell'Electron Beam Melting che migliora ulteriormente la tecnologia del Selective Laser Melting.

Ovviamente la ricerca non si è conclusa, nuove e innovative tecniche vengono ogni giorno sviluppate come ad esempio la RLP (Rapid Liquid Print), dai ricercatori del MIT, che permette di stampare oggetti all'interno di un fluido svincolandosi dalle limitazioni presenti nel Material Extrusion. [4][9]

1.2 Campi di applicazione

I campi di applicazione delle tecnologie di fabbricazione additiva sono ampi, vediamo alcuni esempi:

- Settore industriale
- Settore automobilistico e del motorsport
- Sport
- Settore medico
- Settore della moda
- Settore aerospaziale

1.3 Principali tecnologie

Nello standard in vigore, fornito dall'ente di standardizzazione americano ASTM International, è riportato che le tecnologie sono classificate in base a due categorie: il tipo di materiale utilizzato e il metodo di deposito del materiale sul piano di lavoro. Le tipologie di materiale utilizzato si dividono in:

- Polvere: tecniche basate sulla fusione di polvere tramite l'utilizzo di laser o fasci di elettroni per generare i vari strati. L'utilizzo di polvere permette la realizzazione di componenti ad elevata resistenza meccanica e con geometrie complesse. Le polveri principalmente utilizzate sono di tipo metallico, polimerica o ceramica.
- Solido: tecnologie basate sull'estrusione di materiale allo stato solido o semisolido per la realizzazione degli strati. Vengono utilizzate per applicazioni con geometria più semplice. I materiali principalmente utilizzati sono materiali plastici come PLA e l'ABS
- Liquido: Nei processi i materiali liquidi depositati sul piano di lavoro vengono fatti solidificare tramite l'utilizzo di luce ultravioletta o con altri processi di fotopolimerizzazione, l'utilizzo di questo materiale ci consente di ottenere superfici a elevata resistenza con finitura superficiali e con elevata risoluzione, per questo sono comuni nelle applicazioni di alta precisione. I materiali principalmente utilizzati sono le resine.

Combinando le tipologie di materiale e il metodo di deposito dello stesso si ottiene la seguente classificazione:

1. Vat Photopolymerization;
2. Material Extrusion;
3. Material Jetting;
4. Binder Jetting;
5. Powder Bed Fusion;
6. Direct Energy Deposition;
7. Sheet Lamination o Laminated Object Manufacturing.

1.3.1 Vat Photopolymerization

Categoria di tecnologie che hanno come principio di funzionamento la fotopolimerizzazione in vasca. La polimerizzazione degli strati avviene colpendo la resina liquida, all'interno per l'appunto di una vasca, con una sorgente luminosa. Una volta realizzato lo strato la piattaforma orizzontale, che ha anche la funzione di supporto per l'oggetto in fabbricazione, si sposta lungo l'asse z verso l'alto, questo processo viene ripetuto fino all'ottenimento della geometria finale. [2]

Le principali tecnologie sono:

- Stereolitografia (SLA): prima tecnologia per l'additive manufacturing realizzata. La polimerizzazione avviene puntualmente al passaggio della sorgente luminosa, cioè un fascio di luce UV, che segue la traiettoria lungo il piano x-y, dipendente dalla geometria finale. Si realizzano parti ad alta risoluzione e finitura superficiale

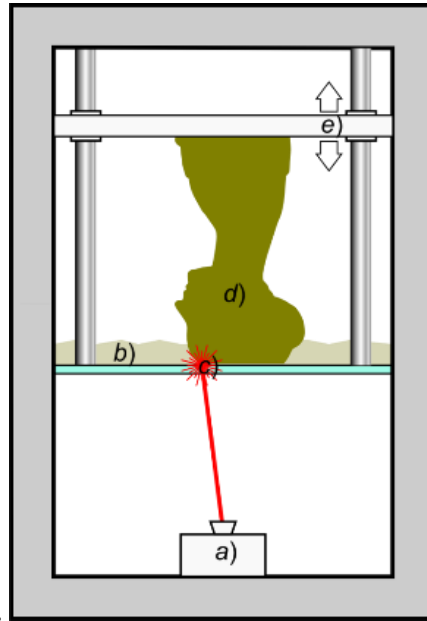


Figura 1.1 Schema SLA

- Digital Light Processing (DLP): la polimerizzazione viene effettuata simultaneamente su tutti i punti dello strato, e non puntualmente, tramite un proiettore o schermo LCD. Processo che velocizza la velocità di stampa ma realizza oggetti con finiture superficiali peggiori.

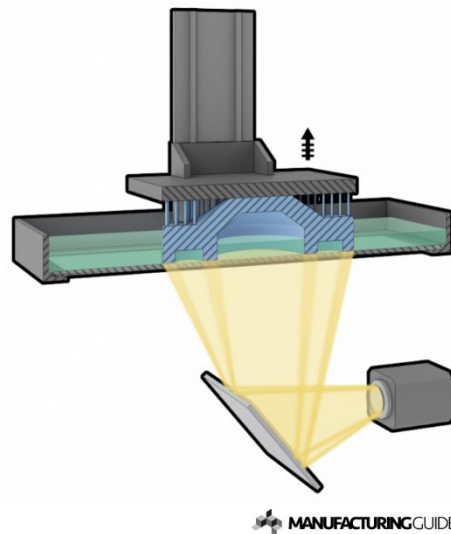


Figura 1.2 Schema DLP

1.3.2 Material Extrusion

Categoria di tecnologie che utilizzano il materiale allo stato semisolido, dove la formazione dello strato avviene per estrusione. L'ugello, che è la testa da dove viene estruso il filamento, deposita gli strati di materiale lungo una traiettoria, dipendente dalla geometria, lungo il piano XY, da cui deriva il nome XY-core, mentre il piatto di stampa si muove lungo l'asse Z. Esistono altre stampanti che vengono chiamate XZ-core dove la testa si muove lungo il piano XZ e il piatto lungo l'asse Y. Le parti che vengono realizzate tramite questa tecnologia sono caratterizzate da ottime proprietà chimiche e meccaniche, ma presentano una elevata rugosità superficiale e una porosità interna rilevante. [2]

All'interno del gruppo è presente una delle tecnologie più utilizzate per la realizzazione delle Stampanti 3D in commercio, cioè la Fused Filament Fabrication (FFF), utilizzata per lo stampaggio dei prototipi (**paragrafo 3.7**).

Il processo di stampa inizia nel software, che elabora il file STL orientando il modello per il processo di compilazione e simulando tutta la fase di stampaggio generando, se necessario, le strutture di supporto per evitare il collasso della struttura. Per una buona qualità di stampa è importante impostare i corretti parametri della stampante tramite l'utilizzo di software di slicing. I parametri di stampa che possono essere impostati da questi software sono:

- Diametro del Nozzle
- Altezza layer
- Infill (percentuale di riempimento)
- Informazione sul materiale

L'ugello, che si sposta sul tavolo di lavoro in base alla geometria finale, deposita una piccola quantità materiale che si solidifica a contatto con il tavolo o altro materiale, questa quantità viene chiamata "strada"; una volta generato lo strato, le strade vengono depositate una accanto all'altra, il movimento lungo l'asse z può essere effettuato dal tavolo o dall'ugello a seconda del tipo di stampante, e si ricomincia a depositare le strade per formare il nuovo strato.

Il materiale che viene utilizzato determina la temperatura di fusione a cui deve arrivare la hot-end. I materiali che possono essere utilizzati sono:

- Polimeri termoplastici come PLA (acido polilattico), ABS , policarbonati, nylon e plastiche riciclate. Sono i materiali più utilizzati perché di facile reperibilità e sono disponibili in una varietà di formulazioni per adattarli a tutte le esigenze;
- Compositi a matrice polimerica come fibre di vetro e fibre di carbonio, richiedono come processo di post-produzione di polimerizzazione. Utilizzato nelle applicazioni strutturali;
- Miscele di ceramica come zirconia e fosfato di calcio, richiedono come processo di post-produzione di deceraggio e sintetizzazione. Utilizzate per realizzare ceramiche strutturali componenti piezoelettrici;
- Miscele di metallo come acciaio inossidabile, titanio e inconel (superlega a base nichel-cromo), richiedono come processo di post-produzione di deceraggio e sintetizzazione. Utilizzate per la fabbricazione di utensili, attrezzature e parti meccaniche;
- Miscele di metallo e ceramica come acciaio inossidabile, ferro e zirconia stabilizzata con ittrio, richiedono come processo di post-produzione di deceraggio e sintetizzazione. Utilizzata per realizzare parti meccaniche e impianti. [3][12][13]

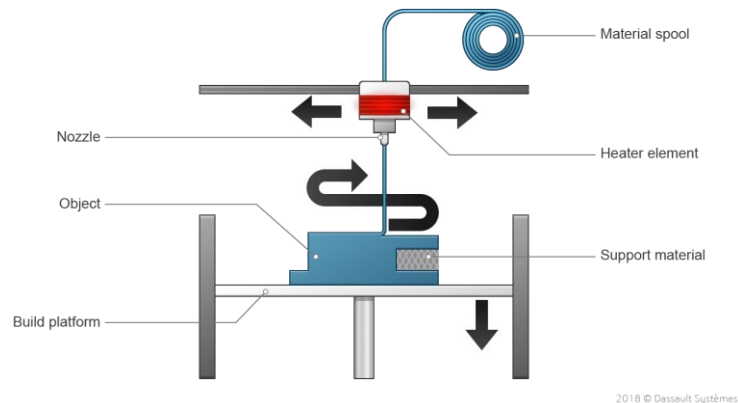


Figura 1.3 Schema FFF

1.3.3 Material Jetting

Categoria di tecnologie che hanno funzionamento simile al principio di stampa delle stampanti inkjet 2D, infatti la testina è alimentata con materiale allo stato liquido. Inoltre si ha la possibilità, se necessario, di utilizzare un secondo materiale solubile per realizzare gli elementi di supporto.

All'interno della categoria possiamo individuare le tre tecnologie più importanti:

- Polyjet (MJ): utilizza come materiale resine fotopolimere termoindurente che vengono riscaldate per ottimizzare la viscosità. Le gocce vengono spruzzate lungo la traiettoria, dipendente dalla geometria, sul piano x-y, poi grazie al calore dei raggi UV avviene la polimerizzazione della resina. Si procede in questo modo fino ad avere la geometria finale. Il materiale di supporto è solubile in acqua e si ottengono parti ad elevato livello elastico e con proprietà meccaniche medio-alte;

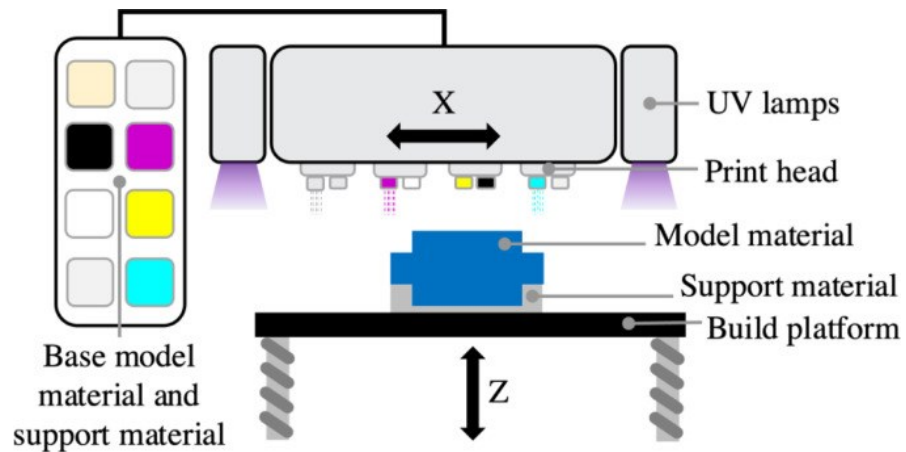


Figura 1.4 Schema MJ

- NanoParticle Jetting (NPJ): utilizza come materiale nanocariche solide in sospensione liquida. Durante lo stampaggio, attraverso due testine che spruzzano sia il materiale di costruzione che quello di supporto, la camera di stampa è mantenuta ad alta temperatura in modo tale da consentire l'evaporazione del rivestimento liquido in cui è sospesa il materiale. Si ottengono così strati ultrafini del materiale da costruzione;

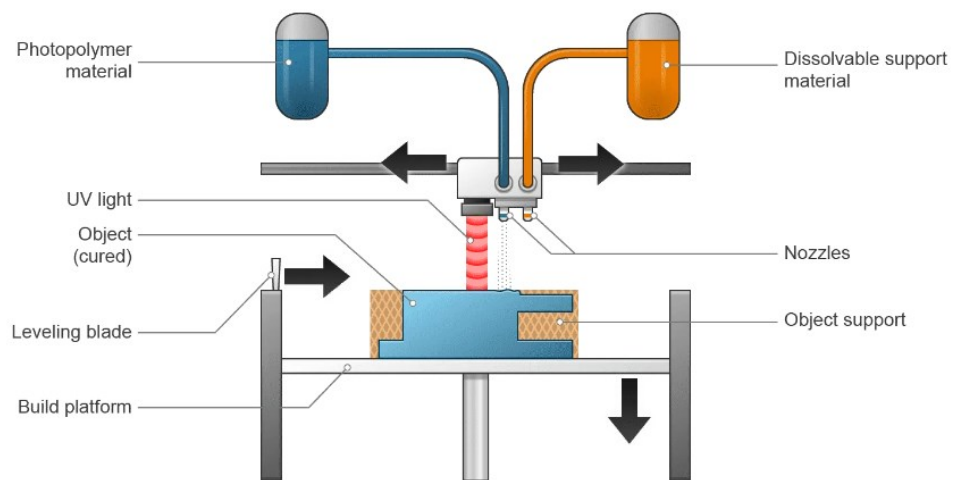


Figura 1.5 Schema NPJ

- Drop On Demand (DOD): utilizza come materiale polveri che vengono portate allo stato liquido all'interno di un serbatoio riscaldato: il materiale viene depositato tramite due testine che spruzzano sia il materiale di

costruzione che quello di stampa, in questo modo la deposizione è puntuale, anziché continua. Questa tecnologia utilizzata per realizzare modelli in cera per processi di fonderia a cera persa. [2][13]

1.3.4 Binder Jetting

Categoria di tecnologie basate sulla deposizione a getto di un legante liquido su un letto di polvere distribuito sul piano di lavoro mediante spatola o rullo. Il processo di stampa avviene in fasi:

1. Deposizione della polvere sul piano di stampa;
2. La testina deposita il legante lungo la traiettoria, definita dalla geometria finale, con conseguente formazione dello strato;
3. Il piano si abbassa lungo l'asse z e ricomincia il processo di stampaggio fino all'ottenimento del pezzo;
4. Rimozione della polvere intorno al pezzo che non è stata utilizzata nella formazione del layer.

I pezzi realizzati tramite questo processo sono molto porosi, fragili e hanno un costo molto più economico rispetto ad altri processi.

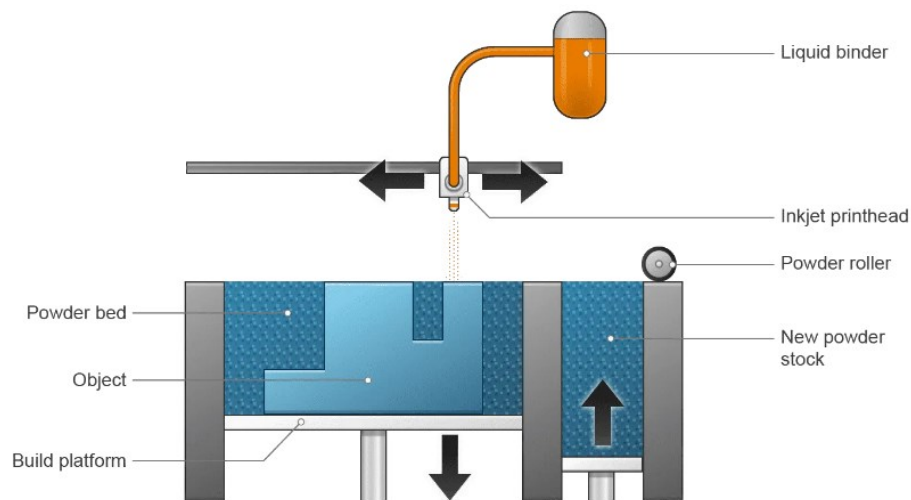


Figura 1.6 Schema Binder Jetting

1.3.5 Powder Bed Fusion

Categoria di tecnologie basate sul portare a fusione polveri metalliche, disposte sul piano di stampa, tramite l'utilizzo di energia termica. Il processo di stampa avviene in fasi:

1. Deposizione della polvere sul piano di stampa mediante rullo o spatole;
2. Fusione selettiva delle polveri ottenuta orientando il fascio di energia lungo la traiettoria, definita dalla geometria finale, con conseguente formazione dello strato. Necessità di supporto in quanto le parti potrebbero sfondare, dato il loro eccessivo peso, sulla polvere degli strati precedenti;
3. Il piano di stampa si abbassa lungo la direzione Z e ricomincia il processo fino all'ottenimento del pezzo finale;
4. Rimozione polvere non interessata alla fusione e riutilizzata e rimozione dei supporti.

Le principali tecnologie che fanno parte della categoria sono:

- Selective Laser Melting (SLM): la sorgente del fascio luminoso è un laser fisso direzionato verso un sistema di lenti mobile. Possibilità di utilizzare polveri in materiale termoplastico, in questo caso non è necessario l'utilizzo di supporti in quanto il pezzo può essere autosostenuto dalla polvere degli strati precedenti. I principali materiali utilizzati sono: la poliammide, alumide e materiali simili alla gomma;

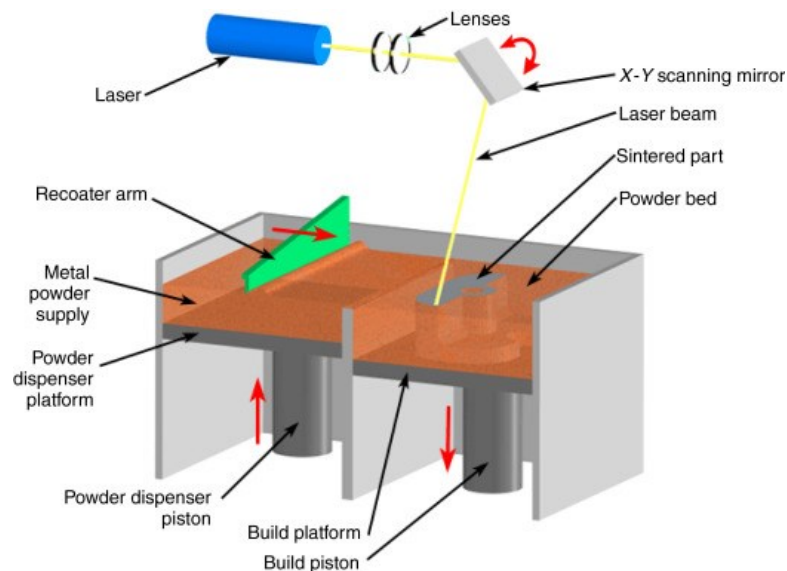


Figura 1.7 Schema SLM

- Electron Beam Melting (EBM): per portare le polveri a fusione si utilizza un fascio di elettroni, cioè un fascio sottile di elettroni ad alta velocità.

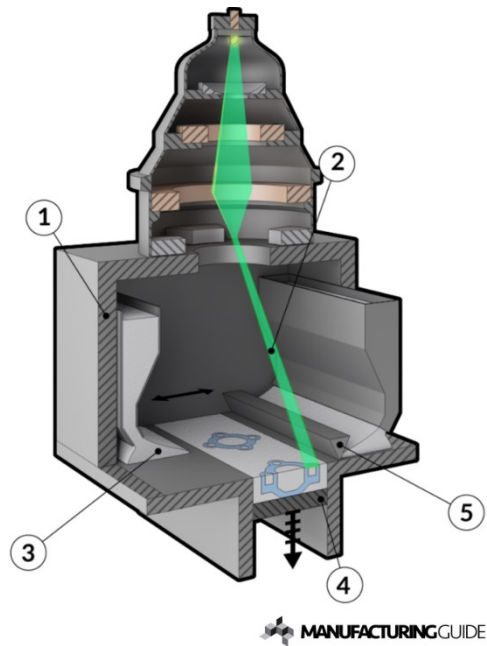


Figura 1.8 Schema EBM

1.3.6 Direct Energy Deposition

Categoria di tecnologie basate sul fondere il materiale, in polvere o in filamento, mentre viene depositato lungo la traiettoria: la fusione avviene tramite una sorgente di calore concentrata fornita da laser, ossia fascio di elettroni o arco elettrico. Il processo ha una duplice funzione: quella di riparare o aggiungere parti a componenti già esistenti o di creare nuovi componenti composti da materiali diversi.

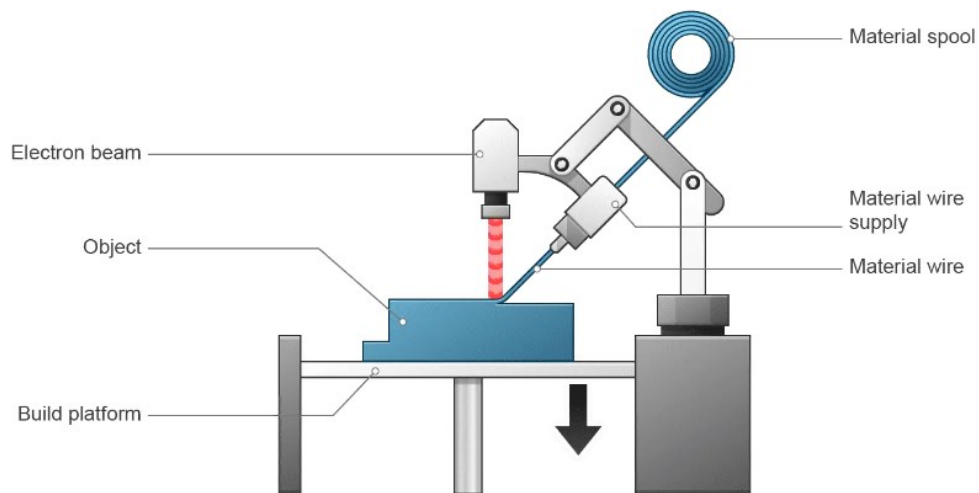


Figura 1.9 *Schema Direct Energy Deposition*

1.3.7 Sheet Lamination o Laminated Object Manufacturing

Categoria di tecnologie dove più strati di materiale in fogli vengono impilati e laminati per realizzare l'oggetto desiderato. La laminazione, ossia l'unione di ciascuno strato, può avvenire tramite colla termoattivabile e un rullo di laminazione riscaldato per saldatura ad ultrasuoni o brasatura. Ad alta produttività e mantenendo costi contenuti queste tecnologie permettono di realizzare componenti con ridotte tensioni di ritiro e con ridotti problemi di distorsione.

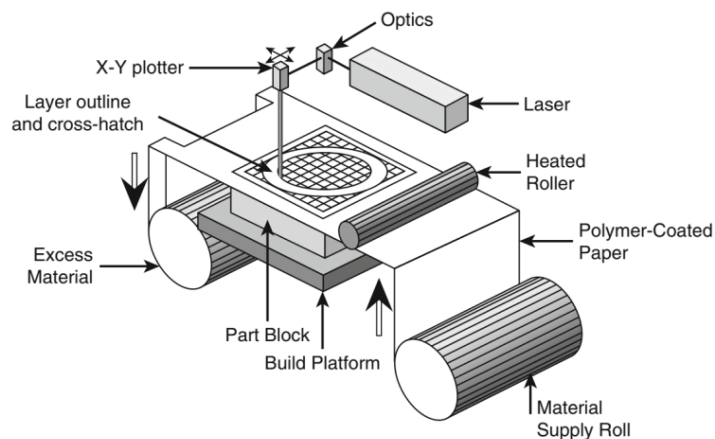


Figura 1.10 *Schema Sheet Lamination*

1.4 Flusso di lavoro

Il flusso di lavoro nei processi di fabbricazione additiva è suddiviso nelle seguenti fasi:

1. Progettazione e preparazione del modello 3D: si parte dalla creazione del modello 3D tramite programmi di CAD;
2. Simulazione del processo: si divide l'oggetto in layer (strati) e si simula il processo tramite programmi appositi. Questa fase, oltre ad individuare i parametri del processo (ad esempio la quantità di materiale, il tipo di ugello e il tempo necessario alla realizzazione) ci permette di verificare se la geometria presenta punti critici di difficile realizzazione. Questa è l'ultima fase dove è possibile modificare la geometria del pezzo;
3. Fase realizzativa: impostando i parametri fondamentali si ottiene la realizzazione del pezzo layer by layer (un esempio di parametri da impostare è il tipo di riempimento, che vedremo nel dettaglio nel terzo capitolo);
4. Operazioni post-processing; le principali operazioni sono:
 - a) Rimozioni dei supporti: alcune tecnologie durante il processo di stampa hanno bisogno di generare un supporto necessario a prevenire il collasso; la rimozione può avvenire meccanicamente o chimicamente;
 - b) Bonding: processo di assemblaggio delle parti del pezzo, che viene diviso perché il suo volume totale è maggiore rispetto al volume di costruzione della stampante;
 - c) Finitura superficiale: scelta del processo basata sull'obiettivo che si deve raggiungere, degli esempi di processi per migliorare la finitura sono burattatura e sabbiatura;
5. Controllo del pezzo finito: si verifica che il pezzo abbia le caratteristiche geometriche e tecniche richieste. [2][3]

Capitolo secondo

OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA

L'ottimizzazione topologica (TO) è una metodologia computazionale utilizzata per determinare la distribuzione ottimale del materiale all'interno di uno spazio di progettazione definito, migliorando le prestazioni e riducendo al minimo l'uso delle risorse. Riveste un ruolo cruciale in diverse industrie, in particolare nella manifattura additiva, nell'aerospaziale e nella progettazione di dispositivi medici, dove consente la creazione di componenti leggeri e strutturalmente efficienti senza compromettere l'integrità. Particolarmente degna di nota, l'ottimizzazione topologica ha attirato l'attenzione per il suo contributo alle pratiche di progettazione sostenibile, in quanto facilita la conservazione dei materiali e la riduzione dei costi nei processi di produzione. La sua integrazione con tecnologie emergenti, come il machine learning e gli approcci basati sui dati, è destinata a ottimizzare ulteriormente i flussi di lavoro di progettazione e a migliorare la capacità di risposta a vincoli complessi.

Questo capitolo tratta le fasi necessarie alla realizzazione di ottimizzazione topologica di una componente meccanica realizzata con processi di fabbricazione tradizionali, quindi la geometria ottenuta è vincolata dai limiti di progettazione.



Figura 2.1 Esempio di ottimizzazione topologica

2.1 Ottimizzazione Topologica

L'obiettivo fondamentale dell'ottimizzazione topologica è determinare un layout ottimale del materiale all'interno di un volume predefinito. Il processo di ottimizzazione può essere formulato tramite vari modelli matematici, che in genere coinvolgono una funzione obiettivo definita in base alla conformità strutturale. Ad esempio, nel metodo SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) ampiamente utilizzato, il progetto mira a minimizzare la conformità rispettando i vincoli sulla frazione volumetrica del materiale.

Il problema generale di ottimizzazione topologica consiste nel trovare una distribuzione del materiale che una funzione obiettivo F soggetta a vincoli $G_i \leq 0$, con $i = 1, \dots, M$, questo problema può essere espresso nella forma:

$$\min_{\rho} F(u(\rho), \rho) = \int f(u(\rho), \rho) dV,$$

$$\text{s. t } G_0 = \int \rho(x) dV - V_0 \leq 0,$$

$$G_i(u(\rho), \rho) \leq 0, i = 1, \dots, M$$

$$\rho(x) \in \{0,1\} \quad \forall x \in \Omega$$

dove:

- u : rappresenta il campo di stato che soddisfa un'equazione;
- $\rho(x)$: variabile di densità;
- f : funzione locale.

La natura discreta delle variabili di progetto ($\rho \in \{0,1\}$) rende il problema difficilmente risolvibile per i numerosi gradi di libertà, infatti per superare queste difficoltà, si utilizzano variabili di progetto continue ($0 \leq \rho \leq 1$), che permettono di applicare algoritmi di ottimizzazione basati su gradienti e di ottenere la convergenza in tempi computazionalmente ragionevoli. Questa strategia porta alla formulazione continua dell'ottimizzazione topologica:

$$\min_{\rho} F(u(\rho), \rho) = \sum_i \int f(u(\rho), \rho) dV,$$

$$s. t \ G_0 = \sum_i \rho(x) dV - V_0 \leq 0,$$

$$G_i(u(\rho), \rho) \leq 0, i = 1, \dots, N$$

$$0 \leq \rho_i \leq 1, i = 1, \dots, N$$

dove N è il numero totale di elementi. [5]

2.2 Flusso di lavoro ottimizzazione topologica nell'ambiente ANSYS

Il flusso di lavoro per la realizzazione di una generica ottimizzazione topologica è diviso in più fasi:

1. Creare sistemi di analisi;
2. Specificare le condizioni di contorno necessarie all'analisi;
3. Definire il metodo di ottimizzazione;
4. Applicare gli obiettivi e vincoli di progettazione;
5. Risolvere;
6. Ricreazione della geometria CAD;
7. Analisi strutturale della nuova geometria ottimizzata.

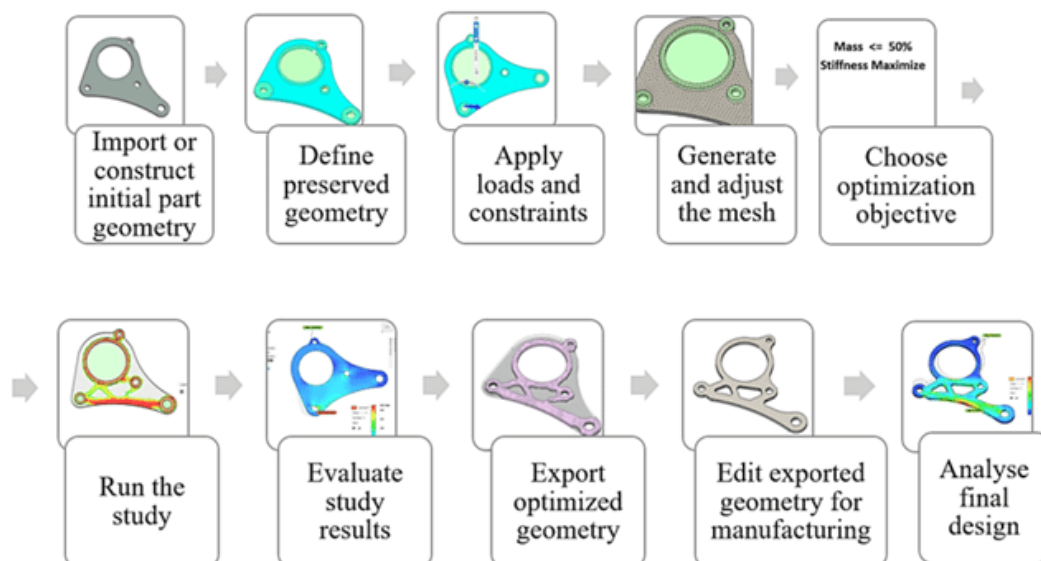


Figura 2.2 Flusso di lavoro per ottimizzazione di una staffa

2.2.1 Creare sistemi di analisi

Questa è la fase dove si effettua l'analisi degli elementi finiti (FEM), facendo riferimento alla **figura 2.2** si ha che per creare il Sistema di Analisi, necessaria alla realizzazione dell'ottimizzazione, bisogna

- Importare la geometria iniziale;
- Generare le mesh;
- Definire i vincoli applicati alla componente e definire le forze applicate;
- Definire l'obiettivo dell'analisi FEM ed eseguire la simulazione;
- Analizzare i risultati che andranno utilizzati nelle fasi successive.

I tipi di analisi FEM che la suite di ANSYS permette di realizzare sono:

- Risposta armonica: utilizzata per verificare la risposta di un componente, allo stato stazionario, sottoposto a carichi variabili sinusoidalmente con il tempo;
- Modale: utilizzata per determinare le caratteristiche del materiale come frequenze naturali e forme modali;
- Statico strutturale: utilizzata per determinare la risposta di un componente sottoposto a carichi costanti;
- Stato stazionario termico: utilizzata per determinare la risposta di un componente sottoposto a carichi termici costanti.

2.2.2 Definire il metodo di ottimizzazione

In questa fase definiamo il metodo di ottimizzazione che il programma andrà ad utilizzare; infatti scegliere il tipo di ottimizzazione più opportuno è fondamentale importanza per garantire che il processo di progettazione raggiunga gli obiettivi desiderati, considerando vincoli specifici e le caratteristiche del sistema. Questo perché i diversi metodi di ottimizzazione offrono approcci diversi per modificare la geometria, influenzando le prestazioni, la fabbricabilità e il costo. Ogni metodo è progettato per ottimizzare aspetti specifici come massa, rigidità, frequenze naturali, resistenza o altri criteri; vediamo quali sono i tipi di ottimizzazione disponibili:

- Basata sulla densità: è un metodo computazionale utilizzato per determinare la distribuzione ottimale del materiale all'interno di uno spazio di progettazione, con l'obiettivo di massimizzare le prestazioni riducendo al minimo l'uso di materiale,
- Basata sul set di livelli (LSM): è una tecnica potente utilizzata per evolvere i contorni e le forme dei materiali all'interno del dominio di ottimizzazione. Consente di rappresentare e modificare dinamicamente geometrie complesse durante il processo di ottimizzazione, risultando particolarmente utile per ottenere un controllo preciso sulla topologia della distribuzione del materiale.

2.2.3 Definire gli obiettivi e vincoli di progettazione

Per poter procedere alla risoluzione dell'ottimizzazione bisogna definire gli obiettivi, i vincoli di progettazione e altre condizioni di contorno.

L'“Object” serve a definire l'obiettivo che si vuole raggiungere, gli obiettivi disponibili sono:

- Massa/Volume;
- Sollecitazione;
- Cedevolezza;

- Criterion;
- Deformazione plastica accumulata;
- Frequenza;
- Cedevolezza Termica.

I vincoli di risposta servono per far sì che il design soddisfi requisiti prestazionali specifici o limiti imposti, inoltre servono a garantire che il processo di ottimizzazione non comprometta le proprietà critiche della struttura o del sistema, rispettando le specifiche progettuali e funzionali. I vincoli disponibili sono:

- Vincolo di volume;
- Vincolo di massa;
- Vincolo del baricentro;
- Momento d'inerzia;
- Vincolo di conformità;
- Vincolo di spostamento;
- Vincolo della forza di reazione;
- Vincolo di sollecitazione globale;
- Vincolo di frequenza naturale;
- Conformità termica;
- Vincolo di temperatura;
- Vincolo di criterio.

Oltre ai vincoli di progettazione è possibile inserire anche vincoli di fabbricazione. I vincoli di fabbricazione sono importanti in quanto il processo potrebbe generare design non ottenibili con nessun tipo di processo; quindi la scelta del vincolo va presa in base al processo con cui verrà realizzato il pezzo finale. I processi disponibili dipendono dal metodo di ottimizzazione scelto:

Tabella 2.1

<i>Basato sulla densità</i>	<i>LSM</i>
Dimensione dell'asta	Dimensione dell'asta
Direzione di estrazione	Direzione di estrusione
Estrusione	AM Overhang Constraint
AM Overhang Constraint	Alloggiamento

Anche caso i vincoli di progettazione definibili dipendono dal tipo di ottimizzazione scelto:

Tabella 2.2

<i>Basato sulla densità</i>	<i>LSM</i>
Ripetizione ciclica	Ripetizione ciclica
Simmetria	Simmetria
Uniformità	Ripetizione del modello
Ripetizione del modello	

Dopo la definizione degli obiettivi, dei vincoli di risposta, dei vincoli di fabbricazione e i vincoli di progettazione si procede con la risoluzione. [1]

2.2.4 Ricreare la geometria CAD

Il risultato del processo non è sufficiente a realizzare l'ultima fase perché il modello generato dal software è una configurazione basata su vincoli e algoritmi che non la rendono adatta all'uso pratico e quindi alla realizzazione, questo avviene soprattutto se la geometria iniziale è complessa. Realizzare il nuovo modello CAD serve a migliorare il risultato ottenuto, partendo dai punti critici che lo caratterizzano come superfici complesse o intricate non lavorabili e pareti troppo sottili.

2.3 Combinazione del metodo LSM e del metodo basato sulla Densità

La combinazione del metodo dei livelli di contorno con il clustering basato sulla densità fornisce un framework robusto per la segmentazione delle immagini, sfruttando i punti di forza di entrambi gli approcci per affrontare sfide complesse, come confini deboli e densità variabili delle regioni.

Nel processo combinato, il metodo dei livelli di contorno evolve una curva che rappresenta i confini tra le diverse regioni dell'immagine; questa curva è inizialmente definita come un livello di una funzione implicita, che è positiva all'interno delle regioni di interesse e negativa all'esterno. La sua evoluzione è regolata da un'equazione differenziale parziale, che la fa adattare ai cambiamenti nei dati dell'immagine.

Il clustering basato sulla densità viene utilizzato per identificare le aree ad alta densità di punti nell'immagine, che corrispondono a cluster distinti, per cluster si intende un gruppo di dati che condivide caratteristiche simili. Questi cluster sono determinati da due parametri principali: Epsilon (ϵ), che definisce il raggio di vicinanza attorno a ogni punto, e MinPts, il numero minimo di punti necessari per formare un cluster. Il metodo di clustering aiuta a distinguere le regioni dense da quelle sparse, fornendo informazioni cruciali sulle caratteristiche locali dell'immagine, come la densità e la struttura dei dati.

La combinazione dei due metodi avviene attraverso l'integrazione delle informazioni di densità del clustering nel processo di evoluzione del livello di contorno. In pratica, il clustering fornisce una guida per l'evoluzione della curva dei livelli di contorno, affinando la segmentazione in modo dinamico in base alle caratteristiche locali dell'immagine. Ad esempio, in aree con densità di punti simili, la curva si adatta per seguire meglio i contorni delle regioni, mentre nelle aree con densità più bassa, l'evoluzione dei contorni è controllata per evitare il disturbo causato da rumori o outliers.

Questa integrazione consente di segmentare immagini con confini deboli e regioni di densità variabile in modo più preciso e robusto, migliorando la qualità della segmentazione rispetto all'uso isolato di uno dei due metodi.

2.4 Applicazioni

L'ottimizzazione topologica ha guadagnato una notevole attenzione in diverse industrie, in particolare nell'ambito della manifattura additiva (stampa 3D). Come si è visto precedentemente in questo capitolo, l'utilizzo di design ottimizzati comporta la riduzione dei tempi di produzione e di conseguenza l'abbassamento dei costi.

Di seguito sono riportate alcune delle principali applicazioni dell'ottimizzazione topologica in diversi settori:

- **Aerospaziale:** l'ottimizzazione topologica è fondamentale per progettare componenti leggeri ma strutturalmente solidi. Ad esempio, SOGECLAIR aerospace ha adottato un processo di progettazione basato su strumenti di ingegneria assistita al calcolatore (CAE), integrando l'ottimizzazione topologica con il software Altair's OptiStruct e la produzione additiva a strati (ALM). Questo approccio ha permesso agli ingegneri di ottimizzare la progettazione di componenti critici, come i piloni dei motori, riducendo il peso senza compromettere l'integrità strutturale.

Il processo di progettazione innovativo non solo ha accelerato lo sviluppo, ma ha anche migliorato le prestazioni complessive, soddisfacendo i rigorosi requisiti di sicurezza ed efficienza del settore;

- **Dispositivi medici:** l'ottimizzazione topologica trova applicazione soprattutto nella creazione di impianti personalizzati per il paziente. Software come 3DXpert permettono la progettazione e l'ottimizzazione di geometrie anatomiche complesse, producendo impianti più leggeri e resistenti. Questa ottimizzazione è cruciale per migliorare l'adattamento e la funzionalità dei dispositivi medici personalizzati, con conseguente miglioramento dei risultati clinici e riduzione dei costi di produzione;
- **Manifattura e industria:** le aziende stanno sfruttando l'ottimizzazione topologica per ottimizzare i processi e ridurre gli sprechi di materiale. Ad esempio, l'azienda britannica Gen3D ha sviluppato Sulis, un software che fornisce feedback immediati sui progetti geometrici e ottimizza i layout di stampa. Questo strumento supporta vari settori, tra cui aerospaziale e automotive, consentendo ai progettisti di ridurre i tempi di sviluppo e i costi, mantenendo l'integrità dei prodotti.

2.5 Sfide e Direzioni future

L'ottimizzazione topologica ha compiuto importanti progressi, ma continua a presentare diverse sfide che ne limitano le applicazioni pratiche.

Una delle principali difficoltà è legata alle limitazioni del Metodo degli Elementi Finiti (FEM), che viene comunemente utilizzato in TO; quest'ultimo soffre di vari problemi numerici, come l'incapacità di rappresentare con precisione la geometria strutturale e la bassa continuità tra gli elementi finiti adiacenti, il che porta a inefficienze nel generare mesh di alta qualità. Per superare questi limiti, sono stati esplorati approcci alternativi come l'Analisi IsoGeometrica (IGA), che integra la rappresentazione geometrica e l'analisi numerica in un unico quadro matematico, risolvendo così alcune delle carenze del FEM.

Mentre l'ottimizzazione topologica continua a evolversi, sono emerse diverse direzioni future per migliorarne le potenzialità. Una delle aree più promettenti è lo sviluppo di metodi ITO basati sui dati, che sfruttano l'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico per ridurre significativamente i costi computazionali legati ai processi di ottimizzazione. Questo potrebbe portare a progetti più efficienti e a tempi di risposta più rapidi nelle applicazioni ingegneristiche.

Un'altra area cruciale di ricerca futura è l'applicazione dell'ITO nella manifattura additiva. Questo campo consente di integrare i vincoli di produzione già nella fase di progettazione concettuale, garantendo che le strutture ottimizzate siano non solo teoricamente efficienti, ma anche realizzabili in termini di produzione. Considerando fattori come le tecniche di deposizione dei materiali e l'adesione degli strati durante l'ottimizzazione, i progettisti possono creare strutture ottimizzate sia per le prestazioni che per la realizzabilità.

Inoltre, è necessaria una maggiore ricerca per esplorare i benefici dell'IGA nella risoluzione di specifici problemi dell'ottimizzazione topologica, come la gestione dei vincoli geometrici e l'assicurazione della compatibilità con requisiti di progettazione complessi. L'adozione di algoritmi avanzati, come l'ottimizzazione strutturale evolutiva bidirezionale (BESO) e i

metodi del campo di fase, sta mostrando promettenti risultati nel perfezionamento dei processi di ottimizzazione per strutture complesse. Infine, innovazioni come il metodo dei Componenti Morfabili/Voids (MMC/V) e nuove strategie numeriche per il calcolo parallelo potrebbero migliorare ulteriormente l'efficienza e l'efficacia dei metodi ITO.

Capitolo terzo

CASO STUDIO: OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA DI UNA STAFFA DI SUPPORTO

In questo capitolo si vuole riportare il lavoro svolto per la realizzazione dell'ottimizzazione topologica di una staffa di supporto, rappresentata in **figura 3.1**, che ha come obiettivi la riduzione della massa del 45% e minimizzare la cedevolezza, mantenendo invariate le caratteristiche meccaniche.

La staffa di supporto per cuscinetto, di cui si vuole fare l'ottimizzazione, è un componente comune nelle superfici di controllo di vari aeromobili e rappresenta una piattaforma ideale per applicare l'AM. Essendo un componente dinamico che interagisce con parti in movimento, il supporto per cuscinetto deve rispettare un determinato ingombro geometrico e sopportare grandi forze di carico in diverse direzioni che nel caso studio preso in considerazione sono le forze F_1 , F_2 , F_3 . L'ottimizzazione potrebbe portare a significativi risparmi di peso e contribuire a ridurre il consumo di carburante degli aerei.

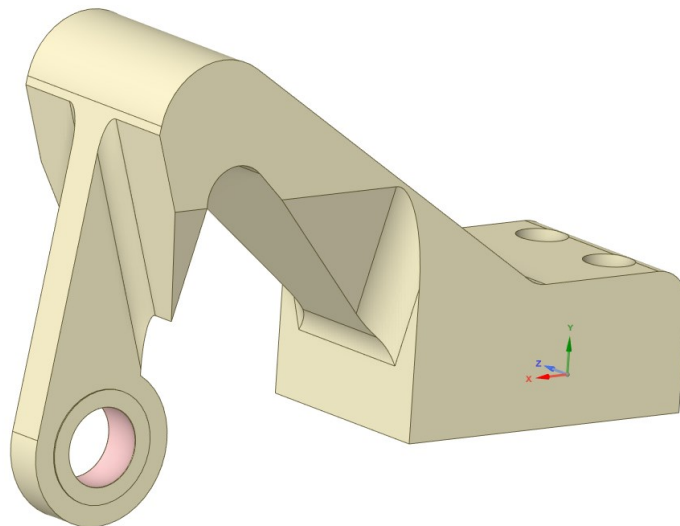


Figura 3 *Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.* **1** Geometria di partenza

La staffa è sottoposta a tre carichi costanti differenti:

Caso 1. $F_1 = (5600 \text{ N}, 0 \text{ N}, 0 \text{ N})$;

Caso 2. $F_2 = (5900 \text{ N}, -5900 \text{ N}, 0 \text{ N})$;

Caso 3. $F_3 = (0 \text{ N}, -11200 \text{ N}, 0 \text{ N})$;

ed è fissata tramite bulloni contro una piastra di accoppiamento ad alta rigidità.

Il materiale che compone il pezzo è il 15-5HP conforme AMS5826, quest'ultimo è un acciaio inossidabile ad alta resistenza e temprato per precipitazione. È largamente impiegato nei settori aerospaziale, chimico e petrolchimico grazie alle sue eccellenti proprietà di resistenza alla corrosione, elevata forza a fatica e ottime caratteristiche meccaniche anche a temperature elevate. La sua composizione chimica è:

- Cromo: 14,0-15,5%;
- Nichel: 3,5-5,5%;
- Rame: 2,5-4,5%;
- Carbonio: $\leq 0,07\%$;
- Manganese e Silicio: $\leq 1,00\%$ ciascuno;
- Molibdeno: $\leq 0,5\%$;
- Fosforo: $\leq 0,03\%$;
- Zolfo: $\leq 0,015\%$.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche il materiale ha una tensione di snervamento $\sigma_s = 1000 \text{ Mpa}$, una tensione a rottura $\sigma_r = 1200 \text{ Mpa}$ circa, e Modulo di Yung $E = 200 \text{ GPa}$.

Il trattamento a cui è stato sottoposto per avere queste caratteristiche meccaniche è stato l'H925 [15], cioè un trattamento di invecchiamento che migliora la durezza e la resistenza a trazione.

Le fasi realizzative del processo sono le seguenti:

1. Generazione Sistema di Analisi;
2. Definizione del Metodo di Ottimizzazione
3. Definizione dell'Obiettivo e Vincoli di risposta;
4. Definizione dei vincoli di fabbricazione e dei vincoli di progettazione;
5. Risoluzione e rimodellazione CAD;

6. Verifica del CAD finale.

3.1 Generazione Sistema di Analisi

Per iniziare definiamo le caratteristiche del materiale, come: densità tensione di snervamento, e il modulo elastico; per poi procedere con l'analisi Statico Strutturale. Quest'ultima è un ambito fondamentale dell'ingegneria che si concentra sulla valutazione del comportamento delle strutture sottoposte a carichi statici, garantendone sicurezza, stabilità e conformità agli standard di progettazione. Riveste un ruolo essenziale in diversi settori dove viene applicata alla progettazione e alla valutazione delle componenti meccaniche. L'importanza dell'analisi statico-strutturale risiede nella sua capacità di prevedere come le strutture risponderanno a diverse condizioni di carico, prevenendo così guasti catastrofici e migliorando la durata dei sistemi ingegnerizzati.

Per effettuare l'analisi bisogna generare le mesh con dimensioni di 3mm, si fa riferimento alla **figura 3.2**; in seguito si devono definire i vincoli e i carichi applicati al sistema, in questo caso studio si definisce come vincolo strutturale il Fixed Support, condizione che impedisce alle superfici selezionate di muoversi e deformarsi, e si definiscono le forze che agiscono sull'alloggiamento del cuscinetto.

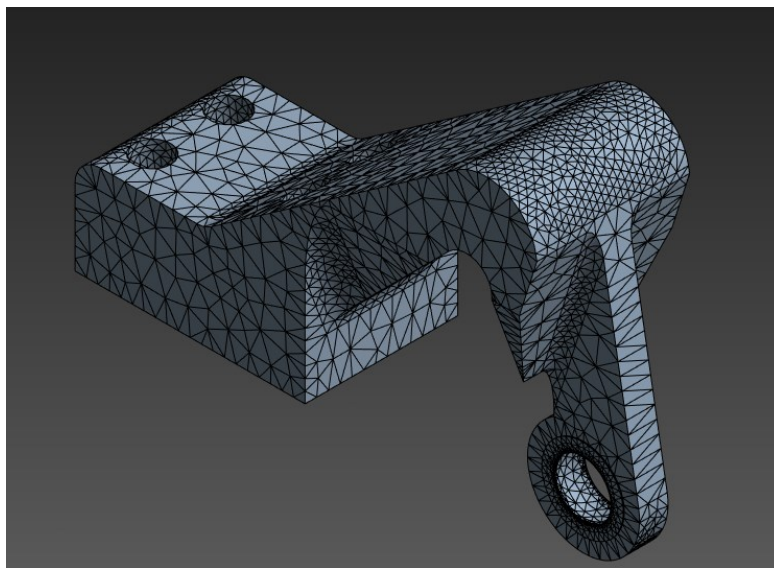


Figura 3 Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato. **2 Mesh**

Dopo aver definito vincoli strutturali e condizioni di contorno si esegue la simulazione e si ottengono le tre mappe delle sollecitazioni equivalenti che rappresentano lo stato di sollecitazione della staffa.

Dalla risposta della staffa, si fa riferimento alle *figure 3.3, 3.4, 3.5*, si nota che la sollecitazione maggiore avviene quando si applica la forza F_2 ; quindi quando si andrà a definire il vincoli di riposta nell'ottimizzazione verrà utilizzato il vincolo di stress equivalente definendo come massima tensione equivalente quella ottenuta nel Caso 2.

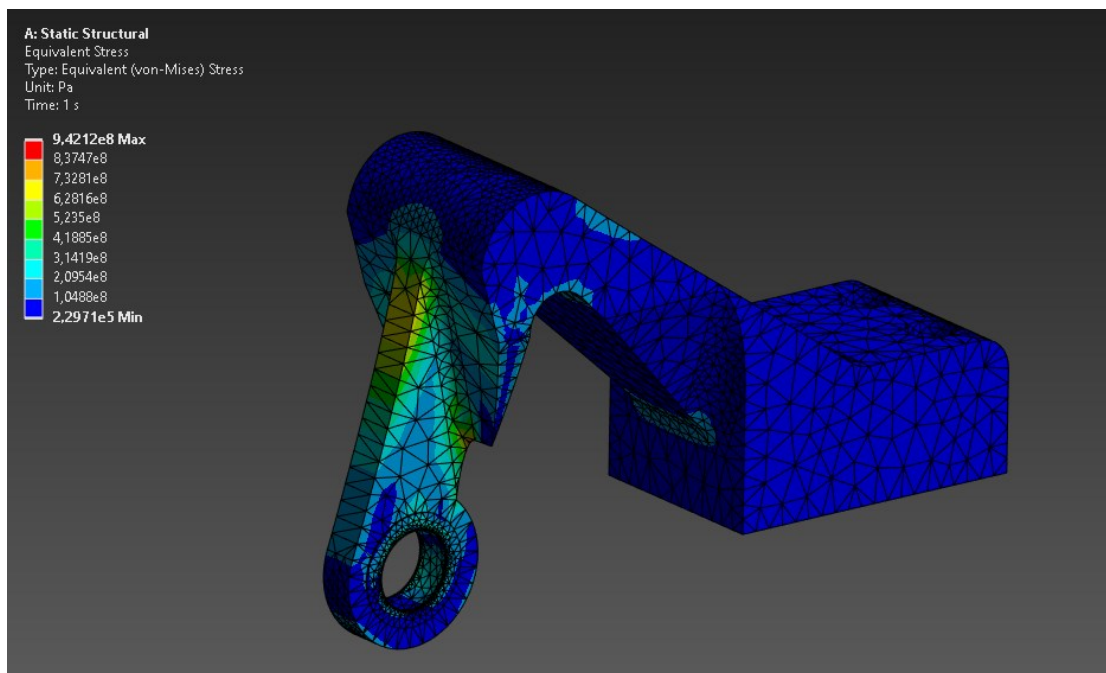


Figura 3 Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato. *3* Mappa delle tensioni equivalenti F_1

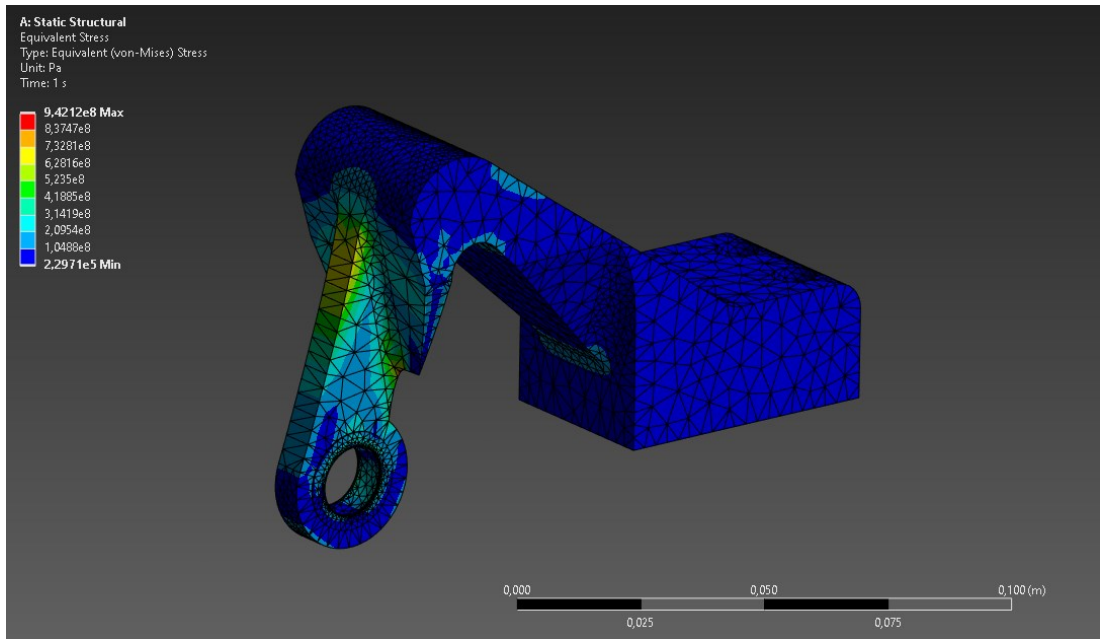


Figura 3.4 Mappa delle tensioni equivalenti F_2

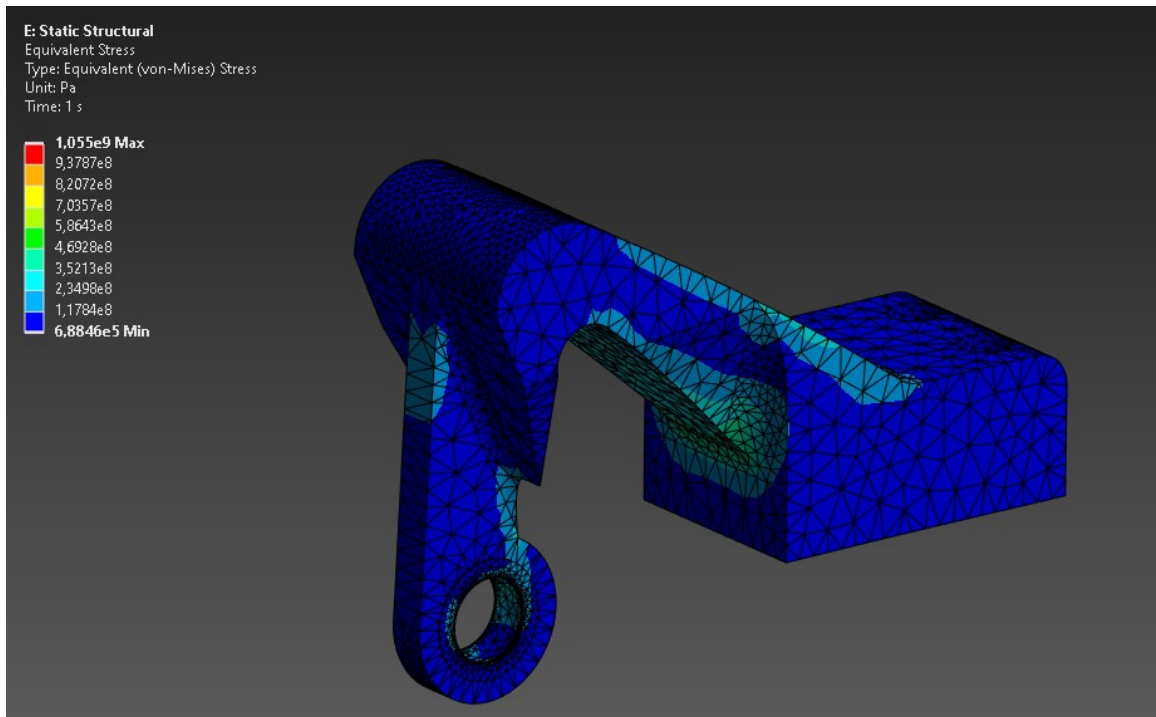


Figura 3.5 Mappa delle tensioni equivalenti F_3

3.2 Definizione del Metodo di Ottimizzazione

In questo caso studio si è scelto di utilizzare l'ottimizzazione topologica basata sulla densità, questo è il metodo più diffuso ed è fondamentale in molte applicazioni ingegneristiche, e viene utilizzata maggiormente quando l'obiettivo è quello di ridurre al minimo la massa.

Questo approccio rappresenta la struttura attraverso una variabile di densità $\rho(x) \in [0, 1]$, che può variare tra vuoto ($\rho=0$) e materiale pieno ($\rho=1$), e permettendo l'uso di algoritmi di ottimizzazione basati sul gradiente. La relazione tra densità e proprietà del materiale, come il modulo di elasticità, viene interpolata mediante funzioni specifiche, tra cui il metodo SIMP (Simplified Isotropic Material with Penalization) e il metodo RAMP (Rational Approximation of Material Properties). Nel SIMP, ad esempio, le proprietà del materiale sono modellate da una legge di potenza $E(\rho) = \rho^p E_0$, dove p è il parametro di penalizzazione che favorisce soluzioni discrete (0-1). Il valore tipico del parametro, $p=3$ bilancia la convergenza, cioè l'ottimizzazione porta ad una soluzione ben definita e stabile, e la realizzabilità fisica, cioè realizzabile nella realtà.

Un vantaggio fondamentale dell'ottimizzazione basata sulla densità è la flessibilità; infatti questo approccio viene esteso per applicazioni multifisiche, come problemi di acustica, flusso e trasferimento di calore.

3.3 Definizione Obiettivo e Vincoli di risposta

Si definisce l'obiettivo che si vuole raggiungere, cioè, minimizzare la massa e la cedevolezza, inoltre il software permette anche di specificare l'importanza nel caso di più obiettivi; quindi si è impostato un peso di 1 per la massa e 0,5 per la cedevolezza.

Come vincolo di risposta si definisce il vincolo di stress equivalente di Von-Mises locale, definendo come massima tensione supportabile $\sigma_{\max} = 942.12$ MPa, che si ottiene dalla mappa delle tensioni quando applichiamo la F_2 .

3.4 Definizione dei vincoli di fabbricazione e dei vincoli di progettazione

Il vincolo di fabbricazione e il vincolo di progettazione inseriti:

- AM Overhang Constraint (Vincolo sugli sbalzi): utilizzato per garantire che la geometria progettata sia stampabile senza necessità di supporti aggiuntivi limitando gli sbalzi sulla geometria, in questo caso si è imposto come angoli limite 50° . Per sbalzo si intende una parte della stampa che si estende in direzione di un angolo limite che senza supporti adeguati causa il collasso o la deformazione dello sbalzo;

- Vincolo di simmetria: utilizzato per avere un modello simmetrico rispetto ad un piano, se usato con solo AM Overhang Constraint dobbiamo selezionare come piano di simmetria, il piano della direzione di fabbricazione.

3.5 Risoluzione e rimodellazione CAD

Dopo aver ottenuto la configurazione ideale passiamo alla realizzazione del modello CAD, ***figura 3.6***, come risultato abbiamo ottenuto una diminuzione di massa 407g, si è passato da 859g della staffa di partenza a 451g della geometria rimodellata.

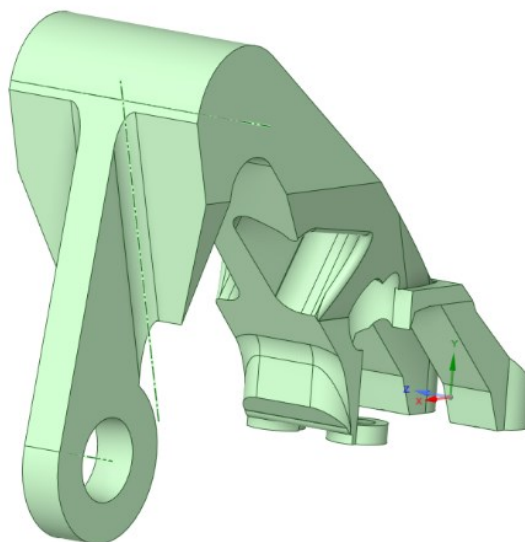
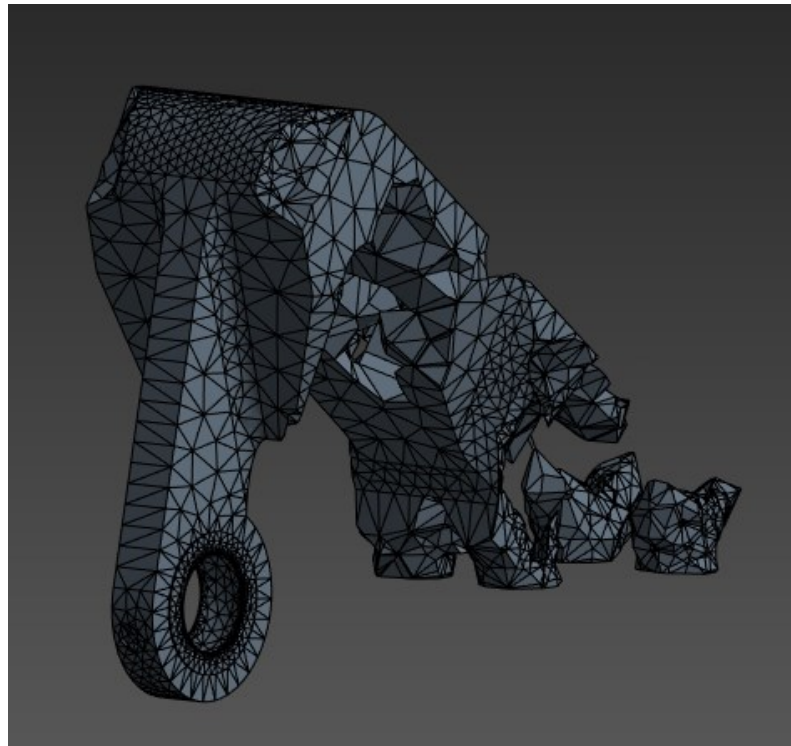


Figura 3.6 Differenza tra il modello ideale e quello rimodellato

3.6 Risultato ottimizzazione

Nonostante la riduzione di quasi la metà della massa le caratteristiche meccaniche sono rimaste, e come nella geometria di partenza la forza che sollecita maggiormente il pezzo è la forza F_2 . Mettendo a confronto le risposte ottenute dall'analisi statico strutturale, **figure 3.7, 3.8, 3.9**, la differenza di tensione nel punto critico è di 200 MPa; quindi, la geometria ottimizzata ha un comportamento migliore rispetto alla base di partenza con $\sigma_{\max} = 744$ Mpa.

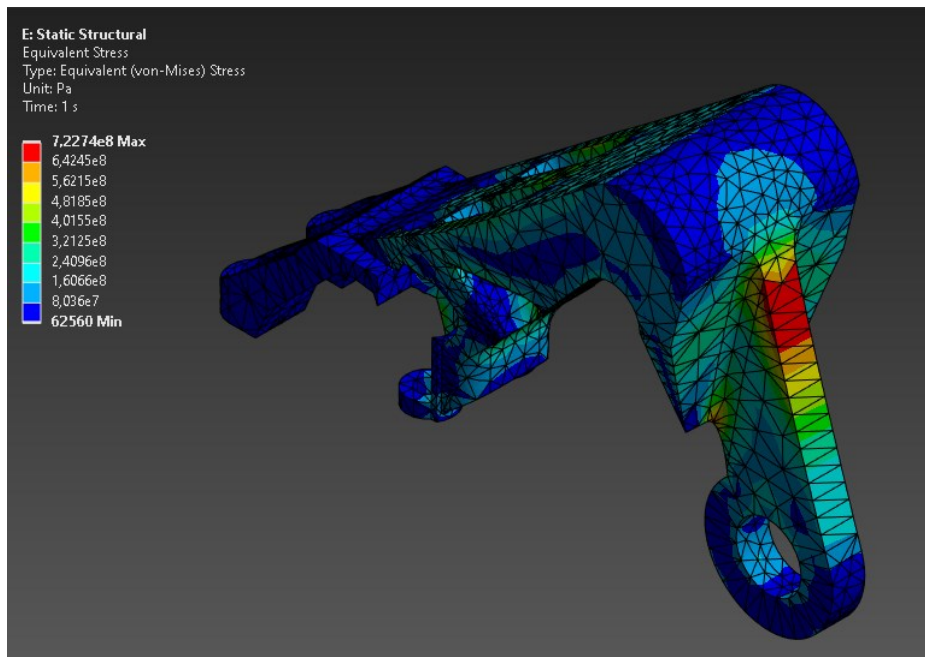


Figura 3.7 Mappa delle tensioni equivalenti F_1

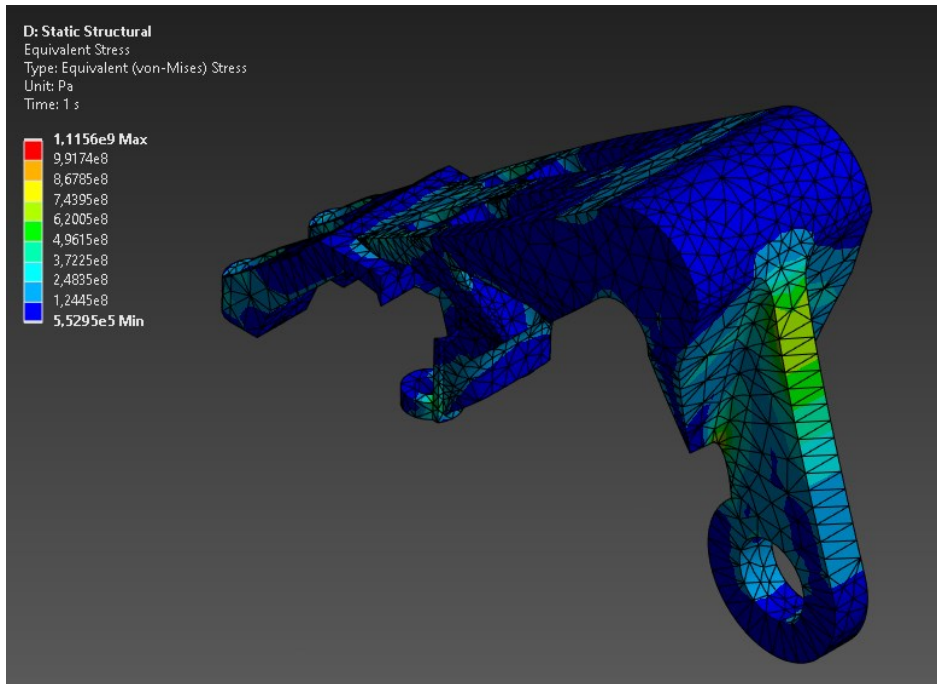


Figura 3.8 Mappa delle tensioni equivalenti F_2

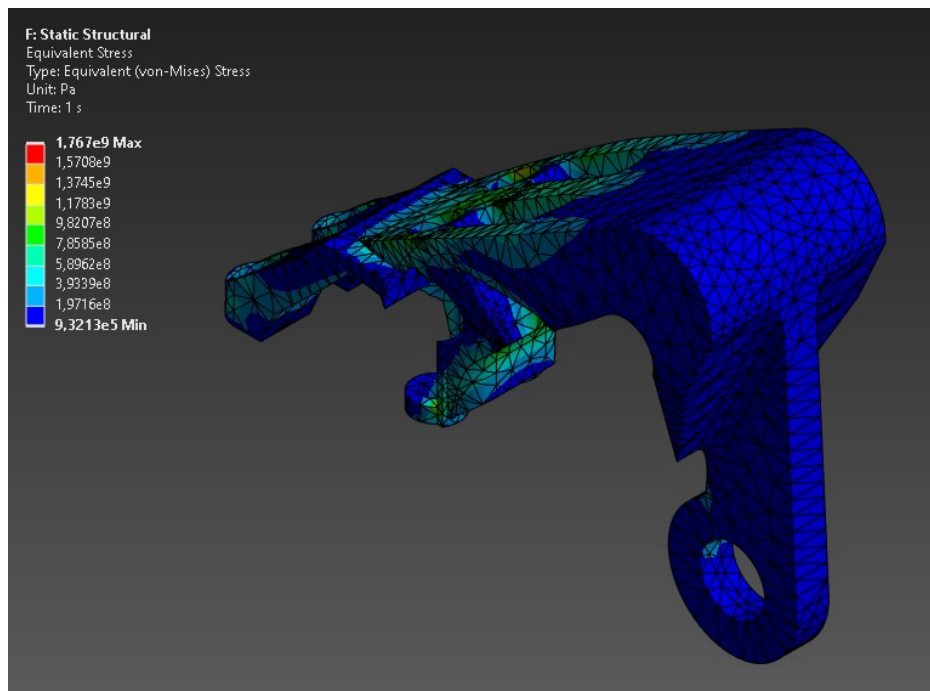


Figura 3.9 Mappa delle tensioni equivalenti F_3

3.7 Confronto Geometrie

Se messa a confronto la geometria ottenuta dall'ottimizzazione e quella data dalla Porxicad si vede che la differenza di massa è di soli 8g, con il componente che pesa 459g. Dallo stato di sforzo ottenuto dall'analisi statico strutturale, *figure 3.10, 3.11, 3.12*, si evince che il componente della Proxicad reagisce meglio; infatti nel caso di applicazione della F_2 il punto critico è sollecitato con una tensione $\sigma = 644$ Mpa rispetto alla tensione $\sigma = 744$ Mpa del pezzo ottimizzato.

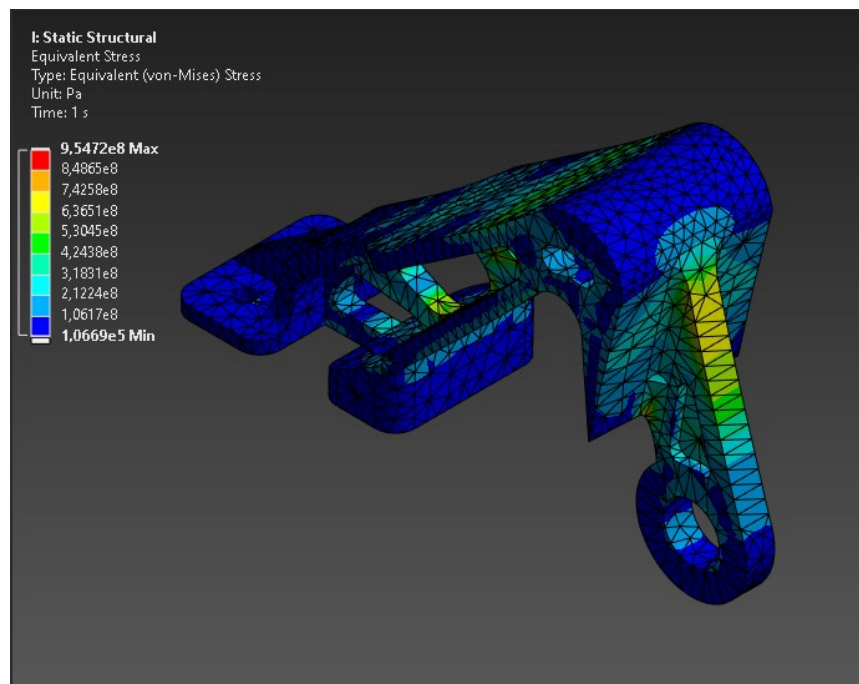


Figura 3.10 Mappa delle tensioni equivalenti F_1

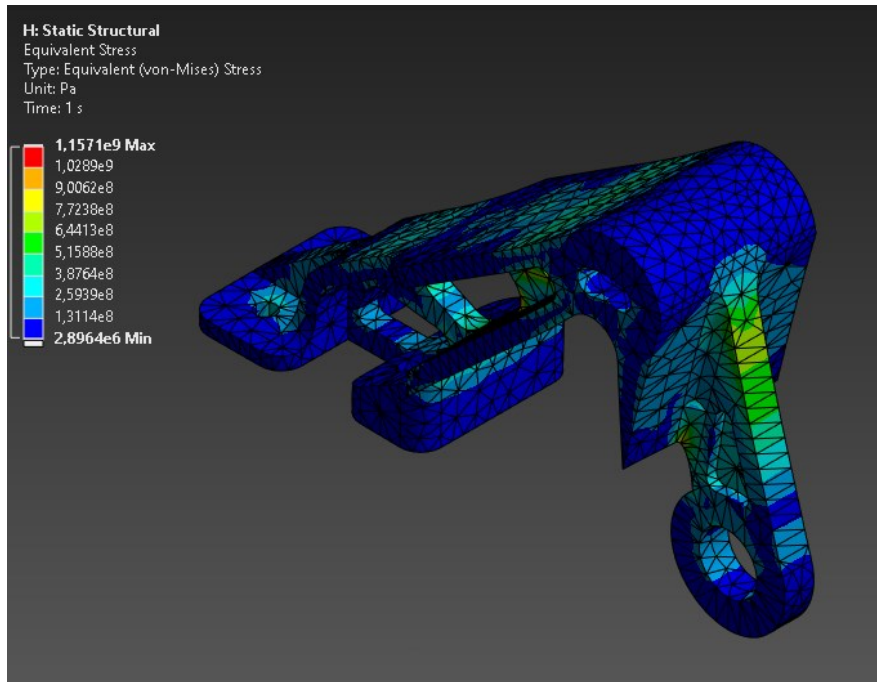


Figura 3.11 Mappa delle tensioni equivalenti F_2

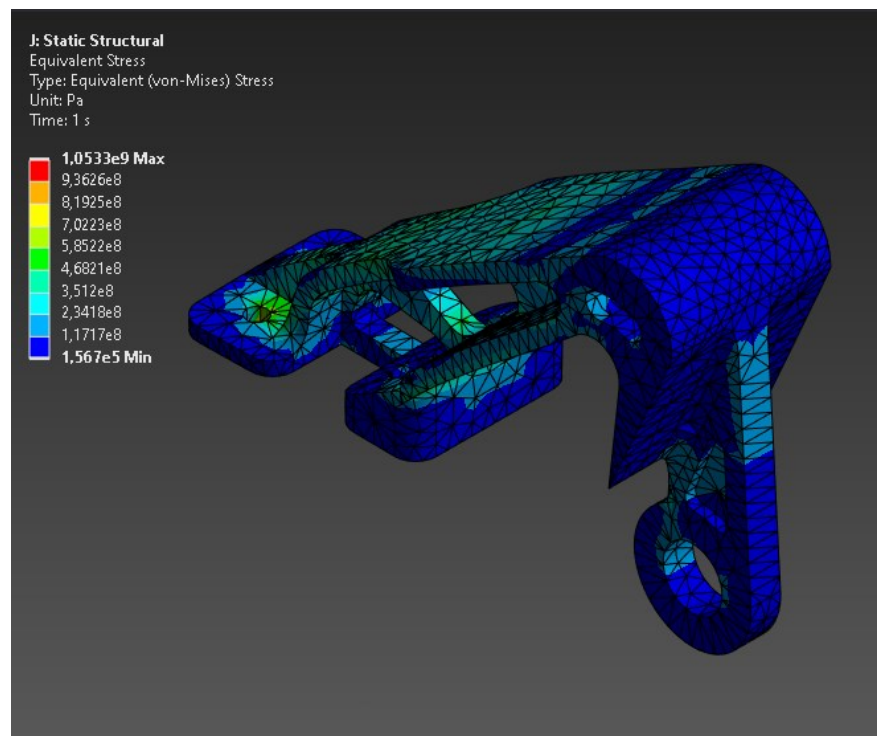


Figura 3.12 Mappa delle tensioni equivalenti F_3

3.8 Realizzazione Prototipo

La realizzazione del prototipo è stata realizzata tramite stampante Ultimaker S7, stampante 3D con tecnologia FFF, impostata per la realizzazione di un'oggetto da esposizione e non funzionale. I parametri di stampa scelti sono:

- Materiale: Tough PLA;
- Percentuale di riempimento: 15%;
- Tipo di riempimento: Griglia.

Considerando i parametri di stampa dalla simulazione del software di slicing otteniamo che il pezzo di base pesa 60g mentre il pezzo ottimizzato pesa 45g; nel peso bisogna considerare anche la presenza dei supporti, si vedono nella **figura 3.13**, fondamentali per la riuscita dello stampaggio, che poi andranno rimossi alla fine del processo di fabbricazione.

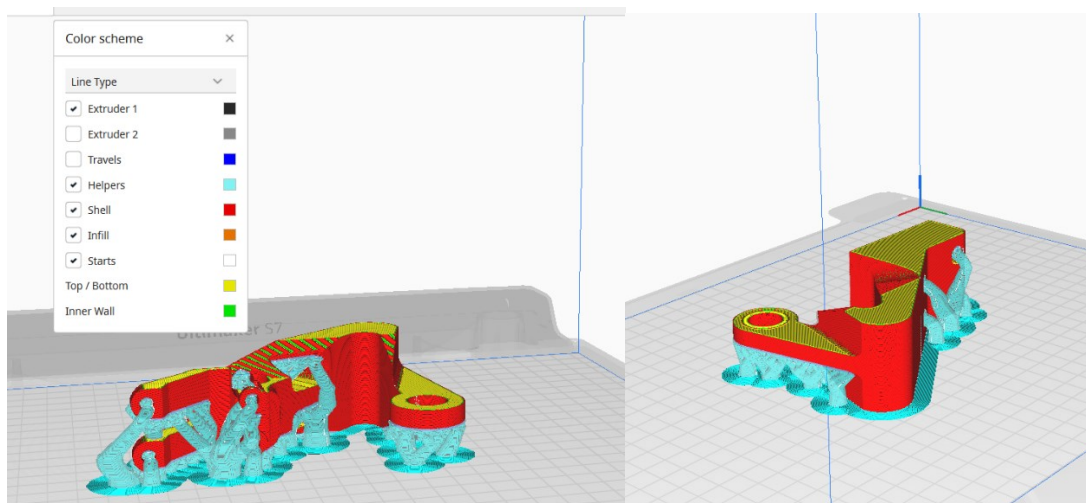


Figura 3.13 simulazione fase di stampaggio dei prototipi, a sinistra il prototipo ottimizzato e a destra il prototipo di base

Infine nella *figura 3.10* si può vedere la differenza tra il design ottimizzato e il design di partenza.



Figura 3.10 Confronto tra i due prototipi, a sinistra quello con la geometria ottimizzata mentre a destra quello con la geometria di partenza

Capitolo quarto

CONCLUSIONI

Il caso studio presentato ha dimostrato l'efficacia dell'ottimizzazione topologica come strumento per raggiungere obiettivi ambiziosi di riduzione della massa senza compromettere le prestazioni strutturali del componente. I risultati ottenuti sono stati:

- Massa del design ottimizzato è di 407g, cioè una riduzione del 47,5% in linea con la richiesta del 45%
- L'ottimizzazione ha portato anche ad un miglioramento della risposta alle sollecitazioni: nel punto più sollecitato quando applichiamo la forza F_2 si ha una tensione $\sigma=744$ MPa, **figura 3.8**, rispetto della tensione $\sigma=942$ MPa, **figura 3.4**, che raggiunge lo stesso punto, alle stesse condizioni, del design di partenza

La metodologia utilizzata ha permesso di identificare le regioni critiche per la distribuzione del materiale, ottimizzando la geometria in funzione dei carichi applicati e dei vincoli progettuali. Ciò ha portato non solo a un risparmio significativo di materiale, ma anche a una soluzione più efficiente in termini di sostenibilità e performance. Ovviamente utilizzando altri programmi o anche aggiungendo o modificando i vincoli di risposta e le condizioni di progettazione e fabbricazione si ottengono design diversi ma altrettanto validi, come si può vedere nel **paragrafo 3.8** dove si analizza la risposta statica di un'altra geometria.

Questo risultato conferma il potenziale dell'ottimizzazione topologica per affrontare le sfide attuali nel design di componenti meccanici, in particolare nei settori in cui la riduzione di peso è cruciale, come l'industria aerospaziale, automobilistica e della produzione additiva. Inoltre, il processo seguito pone le basi per ulteriori miglioramenti, includendo l'integrazione con tecniche di produzione avanzate.

Da questa ottimizzazione e dalla realizzazione dei prototipi si può passare alla fase successiva dello studio: la realizzazione del design ottimizzato in acciaio 15-5 tramite l'utilizzo del Binder Jetting, del Direct Energy Deposition e del Powder Bed Fusion. Dopo l'ottenimento dei tre pezzi si passa al test in laboratorio per la validazione delle simulazioni e infine si sceglie, in base ai risultati del test e ai possibili costi di produzione, qual è il processo tecnologico migliore per iniziare la produzione in serie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Topology Optimization for Designers Help (guida all'ottimizzazione topologica per progettisti all'interno del modulo di Topology Optimization in ANSYS)

- [2] Additive Manufacturing (professore Archimede Forcellese, Tecnologia Meccanica del corso di laurea in Ingegneria Meccanica Triennale dell'Università Politecnica delle Marche)

- [3] Tesi di Laurea di P.Pastuglia "Ottimizzazione topologica di componenti meccanici in Additive Manufacturing con il software Siemens NX". Università Politecnica delle Marche, a.a. 2019/2020

- [4] Tesi di Laurea di E.Marini "L'adozione dell'Additive Manufacturing nel settore della componentistica auto e il suo impatto sulle performance aziendali". Politecnico di Torino, a.a. 2017/2018

- [5] Topology optimization approaches (Ole Sigmund, Kurt Maute)

- [6] <https://www.roboze.com/it/risorse/introduzione-all-additive-manufacturing-definizione-come-funziona-applicazioni.html>

- [7] <https://www.rapidliquidprint.com/>

- [8] <https://www.01factory.it/come-funziona-rapid-liquid-printing-mit/>

- [9] <https://www.ilprogettistaindustriale.it/additive-manufacturing-una-storia-di-brevetti/>

- [10] <https://www.zerounoweb.it/cio-innovation/hitachi-vantara-riassetto-strategico-e-data-platform-olistica/>

- [11] <https://www.aircraftmaterials.com/data/alstst/ams5862D.html>

- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication

- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing_processes
- [14] https://it.wikipedia.org/wiki/Modellazione_a_deposizione_fusa
- [15]] https://www.sidex.it/schede_tecniche/acciaio-17-4ph/
- [16] <https://www.asceville.org/best-structural-engineering-software/>
- [17] <https://make-group.it/industria-4-0-tecnologie-abilitanti/>
- [18] <https://www.focusindustria40.com/tecnologie-abilitanti-transizione-4-0/>
- [19] <https://draftsmagic.com/10-best-structural-analysis-software-in-2024-a-structural-engineers-guide/>
- [20] <https://draftsmagic.com/10-best-structural-analysis-software-in-2024-a-structural-engineers-guide/>
- [21] <https://blog.zwsoft.com/structural-engineering-software/>
- [22] <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-020-00503-w>
- [23] <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/23/3686>
- [24] <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>
- [25] <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/12/1025>
- [26] <https://arxiv.org/abs/2207.13695>
- [27] <https://www.italia3dprint.it/guida-infill/>

