



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Riprogettazione di un componente
meccanico attraverso l'uso di software
per l'ottimizzazione topologica e la
progettazione generativa**

**Design of a mechanical component through the use of software for
topology optimization and generative design**

Candidato:
Simone Forlano

Relatore:
Prof. Marco Mandolini

Anno Accademico 2019-2020



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Riprogettazione di un componente
meccanico attraverso l'utilizzo di software
per l'ottimizzazione topologica e la
progettazione generativa**

**Design of a mechanical component through the use of software for
topology optimization and generative design**

Candidato:
Simone Forlano

Relatore:
Prof. Marco Mandolini

Anno Accademico 2019-2020

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Alla mia famiglia e a Camilla

Sommario

In questo elaborato verrà trattato e descritto l'impiego delle tecniche di ottimizzazione topologica e progettazione generativa al fine di verificare le potenzialità di diversi software.

Analizzeremo i risultati ottenuti dai diversi software ed effettueremo un'analisi economica facendo delle considerazioni sulle strategie produttive.

Lo scopo di questo lavoro è quello di verificare l'efficacia di questi programmi e di generare un flusso di operazioni da seguire per poter effettuare l'ottimizzazione di un componente strutturale in ottica riduzione peso e tenendo conto dei vincoli tecnologici di due processi di produzione differenti.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Scopo e limitazioni	1
1.2	Obiettivi	2
2	Cenni di teoria	3
2.1	Programmi CAE e Analisi FEM	3
2.2	Ottimizzazione topologica	4
2.3	Tipologie di ottimizzazione	7
2.3.1	Size	8
2.3.2	Shape	8
2.3.3	Topology	8
2.3.4	Ottimizzazione Lattice	9
2.3.5	Obiettivi e vincoli dell'ottimizzazione topologica	11
2.4	Progettazione generativa	12
2.5	Produzione additiva	13
2.5.1	Tipologie	14
2.5.2	Materiali	15
2.5.3	Vantaggi e punti deboli	16
2.5.4	Differenze tra AM e tecnologie tradizionali	17
2.6	Processo di fonderia	17
2.6.1	Processo di fusione in terra	17
2.6.2	Processo di pressofusione	18
2.7	Materiali	19
2.7.1	Alluminio Serie 6000	19
2.7.2	AlSi9Cu3	20
2.7.3	AlSi10Mg	20
2.8	Software utilizzati	21
2.8.1	ANSYS 2020 R1	21
2.8.2	Solid Edge 2020	21
2.8.3	nTopology	21
3	Analisi staffa	23
3.1	I carichi agenti e vincoli	24
3.2	Analisi statica del componente attualmente in produzione	26

Indice

4	Ottimizzazione topologica staffa	29
4.1	Flusso di lavoro	29
4.2	La minimizzazione della cedevolezza con una massa obiettivo	30
4.3	ANSYS 2020 R1	30
4.4	Solid Edge 2020	33
4.5	nTopology	35
4.6	Risultati ottenuti e validazione modelli	37
5	Progettazione generativa staffa	45
5.1	Creazione del design space	46
5.2	Software utilizzato e flusso di lavoro	47
5.3	Risultati ottenuti	47
6	Flusso validazione modelli	51
6.1	Riepilogo deformazione totale dei modelli finali	52
7	Analisi economica	55
7.1	Software utilizzato	55
7.1.1	Flusso di lavoro su hyperlean LeanCOST	55
7.2	Analisi comparativa e strategia produttiva	56
8	Conclusioni	59
8.1	Considerazioni	59
8.2	Scenari futuri	60

Elenco delle figure

2.1	Ottimizzazione topologica di un componente	5
2.2	a)Ottimizzazione dimensionale b)Ottimizzazione di forma c)Ottimizzazione topologica	7
2.3	Workflow topology optimization	9
2.4	Struttura reticolare variabile in base alla tensione	9
2.5	Celle elementari	10
2.6	Progettazione generativa	12
2.7	Material Extrusion	14
2.8	Vat Photopolymerization	14
2.9	Powder Bed Fusion	15
2.10	Processo di fusione in terra	18
2.11	Pressofusione camera orizzontale	19
2.12	Pressofusione camera verticale	19
3.1	Staffa in esame	24
3.2	Staffa con condizioni al contorno	25
3.3	Vista frontale e laterale (unità <i>mm</i>)	25
3.4	Mesh tetraedrica	26
3.5	Deformazione totale staffa iniziale	27
3.6	Deformazione totale vista laterale e frontale	27
3.7	Stato tensionale staffa iniziale	28
4.1	Modifica spazio di progettazione	29
4.2	Workflow ANSYS Workbench	30
4.3	Differenze tra SIMP e LEVEL SET	31
4.4	A sinistra Workflow ANSYS Mechanical e a destra vincoli implementabili	32
4.5	Iterazioni per la convergenza	32
4.6	Percentuale riduzione massa/volume	33
4.7	Modulo progettazione generativa	33
4.8	Workflow ottimizzazione Solid Edge 2020	33
4.9	Condizioni al contorno	34
4.10	Estensione del materiale	34
4.11	Impostazioni di produzione e Generazione studio	35
4.12	Workflow nTopology	35
4.13	Ottimizzazione con vincoli per AM ANSYS 2020 R1	37
4.14	Ottimizzazione con vincoli per fusione ANSYS 2020 R1	37

Elenco delle figure

4.15	Deformazione ANSYS AM	38
4.16	Stato tensionale ANSYS AM	38
4.17	Deformazione ANSYS Fusione	39
4.18	Stato tensionale ANSYS Fusione	39
4.19	Ottimizzazione con vincoli per AM Solid Edge 2020	40
4.20	Ottimizzazione con vincoli per fusione Solid Edge 2020	40
4.21	Deformazione Solid Edge AM	41
4.22	Stato tensionale Solid Edge AM	41
4.23	Deformazione Solid Edge Fusione	42
4.24	Stato tensionale Solid Edge Fusione	42
4.25	Ottimizzazione con vincoli per AM nTopology	43
4.26	Deformazione nTopology AM	44
4.27	Stato tensionale nTopology AM	44
5.1	Soluzioni generative design	45
5.2	Spazio di progettazione maggiorato	46
5.3	Ottimizzazione con vincoli per AM	47
5.4	Ottimizzazione fusione	47
5.5	Deformazione Solid Edge AM Generative	48
5.6	Stato tensionale Solid Edge AM Generative	48
5.7	Deformazione Solid Edge Fusione Generative	49
5.8	Stato tensionale Solid Edge Fusione Generative	49
7.1	Analisi costo carpenteria metallica	56
7.2	Analisi costo ottimizzazione topologica ANSYS 2020	57
7.3	Analisi costo ottimizzazione topologica Solid Edge	57
7.4	Analisi costo progettazione generativa	57
7.5	Riepilogo totale analisi costi	58

Elenco delle tabelle

4.1	Ottimizzazione ANSYS 2020 R1	37
4.2	Ottimizzazione Solid Edge 2020	40
4.3	Ottimizzazione nTopology	43
5.1	Spazio di progettazione maggiorato	46
5.2	Progettazione generativa Solid Edge 2020	47
6.1	Tabella riassuntiva ottimizzazione topologica	52
6.2	Tabella riassuntiva progettazione generativa	52

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Scopo e limitazioni

Lo scopo di questa tesi è l'impiego delle tecniche di ottimizzazione topologica e progettazione generativa nel campo dell'ingegneria meccanica.

Il lavoro ha quindi come scopo l'approfondimento:

- degli aspetti tecnici dell'ottimizzazione topologica
- della verifica dei componenti ottimizzati
- dei vincoli tecnologici implementabili nei software in base a processi di produzione differenti
- della riprogettazione del componente meccanico in modo da effettuare un verifica e un'analisi economica
- di solidi non manifold

Andremo ad analizzare le prestazioni di tre programmi diversi su due processi di produzione differenti:

- Produzione Additiva
- Processo di Fonderia

Una volta ottenuti i risultati andremo a valutare la deformazione totale sui componenti ottimizzati effettuando l'analisi a parità di massa.

Infine andremo ad effettuare un'analisi economica per ottenere una stima di tempi e costi di produzione in modo da rilevare quale sia il processo di produzione migliore.

Per il componente preso in esame abbiamo ipotizzato dei carichi che non sono stati misurati nella realtà, questo potrebbe rappresentare una limitazioni alla ricerca e alla comparazione.

1.2 Obiettivi

Possiamo suddividere gli obiettivi di questo elaborato in quattro grandi macroaree:

1. CENNI di TEORIA

Nella prima parte dell'elaborato si affronta il tema generale dell'ottimizzazione topologica, presentando tutte le tipologie e sottolineandone vantaggi e svantaggi.

In secondo luogo, la discussione sarà incentrata sui processi di produzione presi in considerazione nell'elaborato e sui materiali utilizzati.

2. OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA e PROGETTAZIONE GENERATIVA

Presentazione del caso di studio in questione, comprensione di come oggi vengano utilizzate le tecniche di ottimizzazione strutturale, in che fase del progetto e con che risultati.

A seguito della scelta dei vincoli e dei carichi a cui sarà sottoposto il componente l'analisi sarà rivolta ai risultati delle ottimizzazioni in termini del miglioramento della deformazione totale del componente.

3. VERIFICA

Verifica dei componenti ottimizzati con l'obiettivo di capire se e come sia possibile inserire nel processo di progettazione classico una fase preliminare o conclusiva di ottimizzazione.

4. ANALISI ECONOMICA

Come ultima argomentazione verrà trattata l'analisi economica per la produzione di diversi lotti dei componenti ottimizzati con processi di produzione differenti.

Capitolo 2

Cenni di teoria

In questo capitolo andremo a trattare i principali argomenti teorici della rendendo la comprensione del testo più semplice.

2.1 Programmi CAE e Analisi FEM

I programmi **CAE**, Computer-Aided Engineering, (*ingegneria assistita dal computer*) sono software informatici utilizzati per la simulazione delle prestazioni di componenti, strutture o in sistemi complessi, tramite il calcolo numerico.

L'obiettivo principale è quindi la previsione di come si comporterà il componente o la struttura rispetto alle prestazioni ad esse richieste, prima di passare alla fase di costruzione fisica del modello così da migliorare la progettazione semplificando la soluzione dei problemi di progettazione in molti settori.

Tra i vantaggi della tecnologia CAE ci sono:

- Riduzione dei tempi di produzione e sviluppo
- Riduzione dei costi associati allo sviluppo del prodotto
- Miglioramento della qualità e della durabilità dei prodotti grazie alla possibilità di simulare e perfezionare il sistema in un ambiente virtuale tramite simulazioni informatiche anziché effettuare test su prototipi fisici.

Un processo **CAE** comprende in genere tre fasi:

- Nella prima fase, viene modellata la geometria o la rappresentazione del sistema, specificando le proprietà fisiche del progetto e definendo l'ambiente mediante vincoli o carichi applicati.
- In seguito il modello viene risolto usando una formulazione matematica appropriata del livello fisico (soluzione)
- Nella fase finale, vengono visualizzati e analizzati i risultati

Le applicazioni **CAE** sono compatibili con numerosi casi e discipline ingegneristiche:

- Analisi dinamica e analisi della sollecitazione di componenti o assiemi mediante l'analisi a elementi finiti (FEA)
- Analisi degli aspetti fluidi e termici mediante la fluidodinamica computazionale (CFD)
- Analisi degli aspetti dinamici e cinematici dei meccanismi (dinamica multi-body)
- Analisi acustica mediante l'analisi FEA o un metodo BEM
- Simulazione dei processi di produzione, ad esempio fusione, stampa e pressofusione

L'analisi strutturale ad elementi finiti, **FEM** (*Finite Element Method*) o **FEA** (*Finite Element Analysis*), consiste nell'analisi numerica del comportamento strutturale di un sistema.

Le analisi ad elementi finiti si basano sulla discretizzazione: il modello geometrico viene suddiviso in piccoli elementi attraverso una griglia geometrica definita **mesh**. La soluzione finale è data dall'unione delle soluzioni parziali calcolate per ogni elemento.

Un'analisi FEM permette di ricavare spostamenti, deformazioni e tensioni presenti in un sistema strutturale in relazione alle condizioni al contorno applicate.

2.2 Ottimizzazione topologica

Storicamente l'ottimizzazione topologica è nata nella fine degli anni '80 ma a causa delle tecniche di produzione tradizionale che guidavano la progettazione non si è sviluppata molto, in quegli anni bisognava tener conto di sottosquadri, angoli di sforno e altri vincoli perché i processi di produzione del tempo non consentivano la realizzazione di geometrie complesse.

Al giorno d'oggi la produzione additiva e lo sviluppo di nuove tecniche di produzione hanno consentito una notevole evoluzione ai software dedicati all'ottimizzazione topologica.

L'ottimizzazione topologica è un processo basato sull'analisi strutturale e non sull'esperienza del progettista che va a guidare il design del componente.

Come funziona?

Dato uno spazio di progettazione, definito il materiale e applicate le condizioni al contorno (carichi e vincoli come massime tensioni, massimi spostamenti e frequenze naturali), l'ottimizzazione topologica determina la geometria con una forma che rappresenti il miglior compromesso tra peso e prestazioni e che soddisfi gli obiettivi fissati.

In questo modo i progettisti possono adottare un approccio diverso, il lavoro del

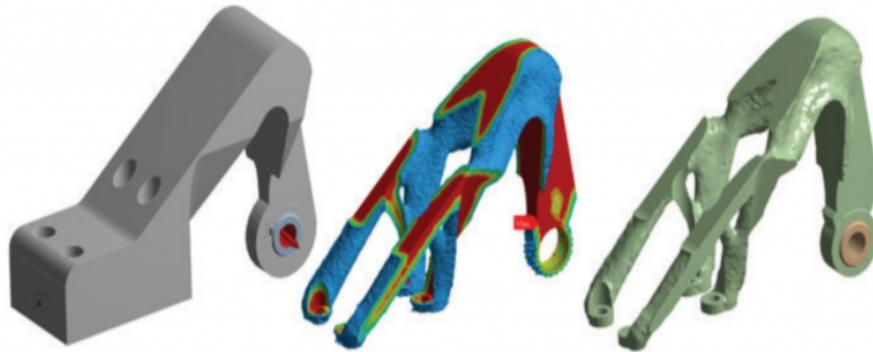


Figura 2.1: Ottimizzazione topologica di un componente

CAD e del CAE vengono sviluppati in parallelo, permettendo modifiche al progetto più veloci.

Quali sono i principali vantaggi?

- massimizzazione performance e design
- riduzione peso
- riduzione costi
- riduzione materiale di scarto (con l'additive andiamo a produrre solo ciò che è necessario)
- nuovi materiali con additive

L'ottimizzazione topologica si basa su un algoritmo capace di eliminare gli elementi ridondanti all'interno di un elemento finito, in base a criteri di carico assegnati e a vincoli geometrici in modo da realizzare modelli più leggeri e performanti.

In termini matematici il problema di ottimizzazione è formulato come la minimizzazione/massimizzazione di una funzione obiettivo $f(x)$ soggetta a vincoli. [1] Nelle simulazioni per l'ottimizzazione strutturale si possono avere più vincoli da rispettare e un solo obiettivo, mentre i parametri che definiscono il calcolo dell'ottimizzazione sono i seguenti:

- Variabili di progetto, parametri che possono subire variazioni durante l'ottimizzazione.
- Spazio di progettazione, zona del componente su cui lavorerà l'ottimizzazione
- Obiettivo, la funzione che viene massimizzata o minimizzata durante l'ottimizzazione, è una grandezza dello spazio di progettazione come ad esempio la massa, la rigidità, lo stress, lo spostamento e il momento d'inerzia.

Capitolo 2 Cenni di teoria

- Vincolo, restrizione associata ad un valore massimo/minimo di una grandezza del sistema. A differenza della funzione obiettivo, spesso le funzioni vincolo in una simulazione sono più di una e potrebbero essere grandezze come il massimo stress ammissibile o un range di frequenze proprie da evitare.

Una soluzione ottimale è quella che minimizza/massimizza la funzione obiettivo senza violare alcun vincolo.

2.3 Tipologie di ottimizzazione

I problemi di ottimizzazione strutturale possono essere di tre tipi:

- Size optimization (ottimizzazione dimensionale)
- Shape optimization (ottimizzazione della forma)
- Topology optimization (ottimizzazione topologica)

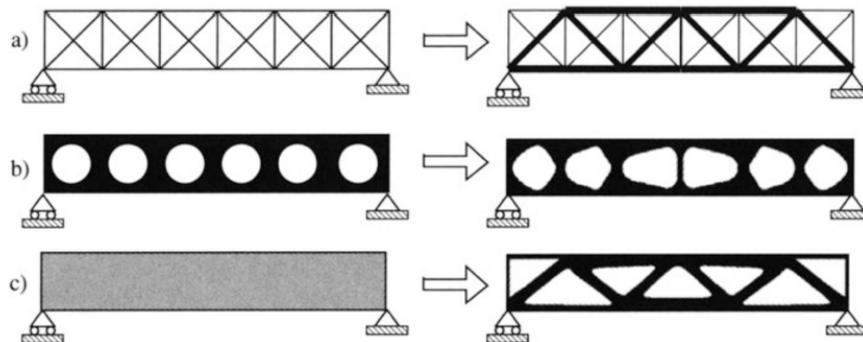


Figura 2.2: a) Ottimizzazione dimensionale
 b) Ottimizzazione di forma
 c) Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione dimensionale e l'ottimizzazione della forma sono stati i primi metodi di ottimizzazione sviluppati. L'ottimizzazione topologica ha un potenziale maggiore, in quanto permette di effettuare variazioni non solo sulla geometria del componente, ma anche sulla topologia cambiando le connessioni del pezzo, creando fori di alleggerimento e aggiungendo rinforzi.

L'obiettivo dell'ottimizzazione topologica è di trovare la miglior distribuzione di materiale all'interno dello spazio di progettazione per dei casi di carico e delle condizioni al contorno assegnati.

Questo obiettivo si sposa perfettamente con la produzione additiva, la quale consente di produrre componenti con geometrie complesse e il cui costo è poco influenzato dalla complessità della forma ma molto condizionato dalla quantità di materiale utilizzato.

Oggi l'ottimizzazione topologica risulta utile anche per componenti da produrre in maniera tradizionale in quanto è possibile inserire vincoli di fabbricazione dei pezzi. I vincoli di fabbricazione possono evitare che l'ottimizzazione crei cavità all'interno di volumi chiusi o possono tener conto dei sottosquadri e degli spessori minimi o della direzione di estrazione nel caso dello stampaggio ad iniezione.

In ambito ingegneristico è possibile distinguere tre differenti approcci di ottimizzazione:

2.3.1 Size

L'ottimizzazione dimensionale è la più semplice. La forma della struttura è conosciuta e può variare la dimensione delle parti che la compongono.

Prendendo come esempio una trave costituita da elementi caratterizzati dalla stessa sezione costante, l'obiettivo potrebbe essere quello di ridurre la sezione della trave senza alterarne la disposizione. Il diametro trovato sarà il miglior risultato per cui risulti minimizzata/massimizzata una grandezza fisica come la cedevolezza, lo stress o la deformazione.

L'utilizzo di un'ottimizzazione dimensionale implica che la progettazione della struttura sia già in una fase conclusiva ed è impossibile da applicare nelle prime fasi progettuali. [2]

2.3.2 Shape

L'ottimizzazione della forma ha l'obiettivo di determinare la migliore forma del contorno del dominio, infatti la topologia della struttura è già determinata e non può essere modificata. Anche in questo caso non è consentita la formazione di nuove parti o la generazione di fori. Nell'ottimizzazione di forma, le variabili di progetto possono essere la distribuzione dello spessore di un elemento della struttura, il diametro e la forma di un foro.

L'ottimizzazione della forma, come quella dimensionale, trova principalmente impiego nelle fasi avanzate del progetto.

2.3.3 Topology

L'ottimizzazione topologica è la forma di ottimizzazione strutturale più generale, consiste nel trovare la migliore distribuzione di materiale nella struttura determinando il numero, il posizionamento e l'interconnessione dei vuoti e dei pieni all'interno del dominio di progetto.

Ciò che distingue l'ottimizzazione topologica rispetto le altre tipologie sono la forma e la topologia della struttura non conosciuta a priori e questo rende l'ottimizzazione topologica una strategia interessante perché può essere applicata nelle fasi iniziali della progettazione, così da prevedere in anticipo la distribuzione ottimale del materiale e ridurre il numero di tentativi del normale processo progettuale, dove le verifiche strutturali avvengono in fase più avanzata.

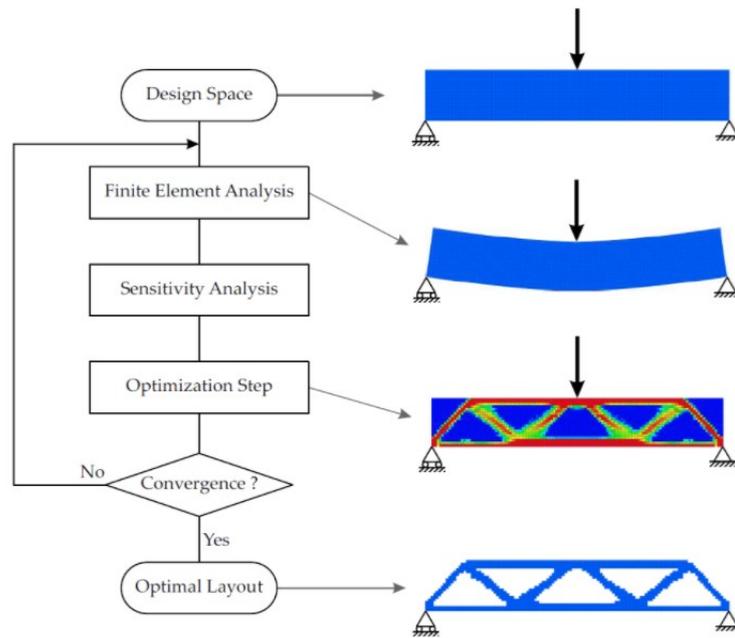


Figura 2.3: Workflow topology optimization

2.3.4 Ottimizzazione Lattice

Nell'ottimizzazione tramite strutture reticolari andiamo a sostituire il volume con una struttura reticolare o una struttura reticolare a densità variabile.

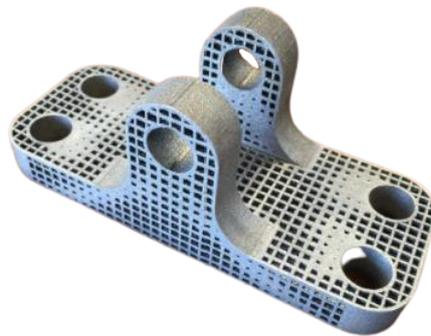


Figura 2.4: Struttura reticolare variabile in base alla tensione

Ogni reticolo è caratterizzato dalla ripetizione periodica di un elemento base chiamato cella, i quali vengono impilati tra loro in diverse disposizioni e in cui la maggior parte del volume occupato è costituito da vuoti. La densità relativa e l'ordine di impilamento delle celle sono le variabili di progetto quindi le proprietà meccaniche finali possono essere controllate agendo su questi parametri.

In Figura 2.5 sono raffigurate diverse tipologie di celle elementari che possono essere implementate in un componente. Si parla di biomimetica in quanto queste strutture reticolari si ispirano a strutture reticolari biologiche come nidi di insetti,

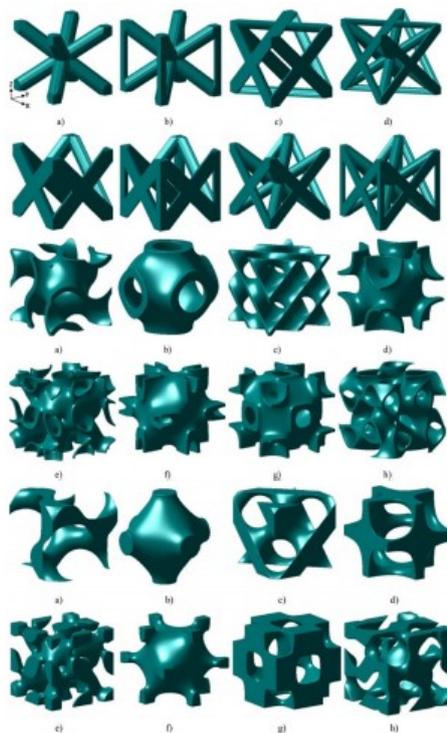


Figura 2.5: Celle elementari

gusci e ossa dove la minimizzazione della massa è sempre un requisito fondamentale, queste strutture verranno realizzate tramite l'utilizzo della produzione additiva. Le strutture reticolari (o strutture lattice) forniscono elevate proprietà meccaniche garantite da particolari forme geometriche, esse mostrano elevata rigidità, buoni rapporti proprietà/peso ed ottime capacità di assorbimento dell'energia rispetto ad altri tipi di materiali utilizzati nelle classiche costruzioni alleggerite come l'honeycomb o il foam.

2.3.5 Obiettivi e vincoli dell'ottimizzazione topologica

Un'analisi di ottimizzazione della topologia include i seguenti vincoli di progettazione:

- Vincolo di massa
- Vincolo di volume
- Vincolo di stress
- Vincolo di frequenza naturale
- Vincolo di spostamento

Per l'Obiettivo possiamo decidere se massimizzare o minimizzare:

- Cedevolezza o Flessibilità (inverso della rigidità)
- Volume
- Massa

Per i vincolo di produzione possiamo scegliere i seguenti sottotipi:

- Spessore
- Direzione di estrazione
- Estrusione
- Simmetria

Questi obiettivi e vincoli verranno trattati in modo più approfondito nel capitolo 4.

2.4 Progettazione generativa

L'ottimizzazione topologica e la progettazione generativa hanno lo stesso obiettivo, quello di creare la miglior geometria possibile in termini di peso e prestazioni. La progettazione generativa utilizza l'ottimizzazione topologica come base per giungere a soluzioni più innovative e veloci, in modo da produrre progetti ad alte prestazioni e pronti per la produzione. Nella progettazione generativa vengono generate diverse soluzioni, basandosi sui vincoli reali della produzione e sui requisiti meccanici del componente mentre l'ottimizzazione topologica è un metodo matematico che ottimizza la distribuzione del materiale all'interno dello spazio di progettazione, quindi l'ottimizzazione topologica toglie al componente iniziale parti superflue per renderlo più leggero mentre la progettazione generativa si concentra sulla realizzazione di un componente migliore.

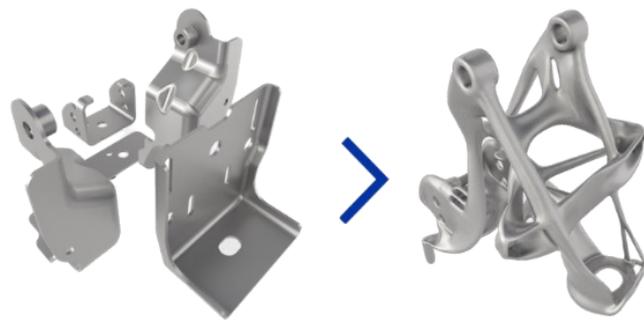


Figura 2.6: Progettazione generativa

La progettazione generativa produce una soluzione geometrica organica, con massa ridotta, di un materiale specifico ottimizzato all'interno di uno spazio definito, che tiene conto di carichi e vincoli ammissibili. Il Generative Design ribalta la progettazione tradizionale che prima progetta e poi verificare la geometria ottenuta, invece il processo generativo determina rapidamente la migliore soluzione che soddisfi tutti i requisiti di progettazione. Il design generativo permette di:

- Accelerare lo sviluppo del prodotto riducendo le attività di progettazione e verifica
- Produrre geometrie che difficilmente potrebbero essere ovvie per un progettista
- Sfruttare pienamente le tecnologie di produzione avanzate, come la produzione additiva

2.5 Produzione additiva

La produzione additiva (additive manufacturing AM) è l'insieme di processi che permettono la fabbricazione di un oggetto tridimensionale attraverso la sovrapposizione di materiale in maniera selettiva, strato dopo strato (layer by layer).

Inizialmente questa tecnologia era concepita per la prototipazione rapida, successivamente, grazie all'ampliamento della gamma di materiali utilizzati, ha dato la possibilità di produrre parti con geometrie complesse e la flessibilità di progettazione ha subito un notevole sviluppo. I processi AM consentendo quindi un minore utilizzo di materiale e una maggiore libertà nella forma del pezzo, ampliando in modo esponenziale la gamma di geometrie e complessità realizzabili. [3]

Il flusso di lavoro necessario alla produzione di oggetti tridimensionali tramite le tecnologie di AM si compone di alcuni passaggi che rimangono inalterati nonostante le diverse tecnologie disponibili. Il flusso di lavoro è composto dei seguenti passaggi:

- Si inizia dalla modellazione CAD dell'oggetto che successivamente deve essere realizzato
- Il modello viene convertito in file STL (Standard Triangulation Language)
- Lo step successivo è lo slicing, le informazioni del modello vengono trasferite alla stampante sotto forma di istruzioni con un linguaggio macchina (G-code)
- Realizzazione del modello, la stampante realizza la parte layer by layer. Lo spessore dello strato è molto importante in quanto determina la qualità finale dell'oggetto stampato.
- Fase finale di post produzione (post-processing), l'oggetto può essere rimosso dalla sede di stampa e vengono tolte le strutture di supporto. Tali attività richiedono l'utilizzo di ulteriori macchinari e strumenti. Ad esempio, le parti stampate partendo da polveri metalliche richiedono la rimozione del pezzo dalla piatto di stampa e l'eliminazione di eventuali strutture di supporto.

Le funzioni delle strutture di supporto sono principalmente tre:

- Fissare la parte al piatto di stampa
- Asportare calore dal pezzo
- Impedire la deformazione del pezzo

2.5.1 Tipologie

Secondo la normativa ISO/ASTM 529000:2015(E) ci sono sette diverse tipologie di produzione additiva:

- Material Extrusion (ME): modellazione a deposizione fusa, deposizione di strati successivi di materiale erogato in maniera selettiva tramite un ugello riscaldato. Questo permette la formazione di sezioni perpendicolari all'asse Z (direzione di costruzione).

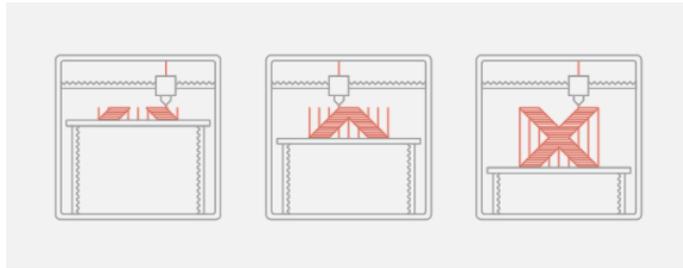


Figura 2.7: Material Extrusion

- Material Jetting (MJ): permette la costruzione di parti utilizzando goccioline di un fotopolimero liquido, le quali vengono polimerizzate mediante l'uso di una luce UV.
- Binder Jetting (BJ): processo in cui un agente legante allo stato liquido viene depositato in modo selettivo permettendo di unire in maniera puntiforme e progressiva i singoli granelli di un letto omogeneo di polvere.
- Sheet Lamination: processo additivo nel quale i fogli di materiale vengono legati tra loro mediante saldatura a ultrasuoni fino a formare una parte.
- Vat Photopolymerization: solidificazione di strati successivi di un fotopolimero allo stato liquido, presente all'interno di un'apposita vasca, viene polimerizzato e quindi indurito tramite l'utilizzo di una luce ultravioletta UV.

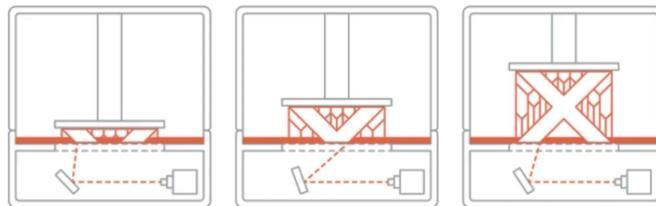


Figura 2.8: Vat Photopolymerization

- Powder Bed Fusion (PBF): sinterizzazione di strati successivi di materiali in polvere, processo in cui opportune regioni di un letto di polvere vengono sinterizzate attraverso l'uso di energia termica. Ogni volta che viene completato

uno strato la piattaforma mobile si muove verso il basso e un elemento mobile orizzontale deposita nuova polvere per lo strato successivo.

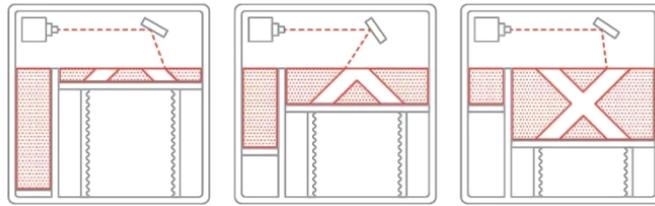


Figura 2.9: Powder Bed Fusion

- Directed Energy Deposition (DED): polvere trasportata da un gas inerte che permette al materiale di essere soffiato lungo la traiettoria del fascio laser in modo selettivo. L'energia del laser fonde parzialmente le particelle di metallo, che si fondono completamente a contatto con il bagno di fusione creando un legame metallico tra la polvere e il substrato, quest'ultimo o il laser vengono spostati per permettere al bagno di fusione di solidificarsi e di produrre così una piccola zona rialzata di metallo solido (traccia)

Oggi siamo in grado di simulare solo quattro tipi di tecnologie, sia con materiali plastici che metallici:

- Powder Bed Fusion (PBF)
- Direct Energy Deposition (DED)
- Material Extrusion (FDM) (sperimentale)
- Binder Jetting (BJ) (sperimentale)

2.5.2 Materiali

Le tecnologie di AM prevedono l'utilizzo di varie tipologie di materiali, di cui due risultano di grande interesse nel settore dell'ingegneria industriale:

- Metalli: permettono di ottenere prestazioni meccaniche molto elevate ma richiedono tecnologie più complicate e costose. Il numero di materiali metallici oggi a disposizione per i processi di produzione additiva sono numerosi ed in continuo aumento. Un designer può scegliere tra una varia gamma di materiali, che comprendono:
 - Acciaio
 - Leghe di titanio
 - Leghe di alluminio
 - Leghe di cobalto-cromo

- Leghe a base di nichel

I materiali metallici appartenenti al precedente elenco sono tipicamente lavorati tramite processi di PBF e DED.

- Polimeri: Tra i polimeri solamente i termoplastici possono essere utilizzati per la produzione additiva. I principali materiali polimerici sono:
 - PLA
 - PVA
 - PETG
 - Nylon
 - ABS
 - HDPE

2.5.3 Vantaggi e punti deboli

L'utilizzo della produzione additiva offre molti vantaggi, rendendola una vera alternativa alle tecniche di produzione tradizionali. Tra i principali vantaggi abbiamo:

- Possibilità di realizzare in un unico pezzo oggetti che tradizionalmente sono realizzati in diversi componenti singoli
- Libertà in fase di progettazione
- Leggerezza del componente
- Prototipazione rapida
- Flessibilità (risparmio tempo e denaro)
- Riduzione materiali di scarto
- Geometrie complesse
- Nuovi materiali
- Diverse tipologie di riempimenti interni

Mentre i principali limiti sono:

- Grandi volumi di produzione
- Anisotropia
- Tempo di stampa
- Produzione in serie

- Struttura microporosa
- Mancanza di fusione
- Distorsioni

2.5.4 Differenze tra AM e tecnologie tradizionali

Entrambe le tecnologie hanno i loro vantaggi. La produzione è stata sempre affrontata in modo sottrattivo, si parte dal pieno e tramite asportazione di truciolo si arriva al componente, mentre nell'additive manufacturing non si sottrae più materiale ma si aggiunge strato per strato.

Sul mercato sono disponibili molte tecnologie e materiali differenti e tramite questo processo non è necessario creare uno stampo per la produzione dei componenti. Le microstrutture ottenute con i processi di produzione additiva non possono essere ottenute in egual maniera con i tradizionali processi di produzione. Nei processi di AM viene fusa una piccola quantità di materiale per volta, la quale è soggetta ad una rapida e concentrata solidificazione, permettendo quindi di ottenere una microstruttura raffinata e molto più uniforme rispetto a quella ottenibile con un normale processo di fusione. Questa caratteristica permette di ottenere con l'AM parti che presentano qualità e proprietà meccaniche molto elevate, simili a quelle ottenibili con processi di forgiatura.

Lo stampaggio a iniezione è una tecnica di produzione tradizionale, con questo processo, vengono prodotte parti iniettando materiale in una cavità dello stampo, fino a quando non si raffredderà e assumerà la forma finale. Lo stampaggio a iniezione è una buona soluzione per la produzione di grandi volumi ma bisogna realizzare stampi per ogni geometria e la loro difficoltà nell'apportare modifiche li rende costosi e poco flessibili.

Nei processi di fusioni, il fronte di solidificazione si propaga dalla superficie esterna verso l'interno della parte. L'andamento del fronte di solidificazione permette di ottenere una microstruttura raffinata sulla superficie esterna e una struttura a grani grandi nella parte interna, sinonimo di qualità e proprietà meccaniche inferiori.

2.6 Processo di fonderia

Il processo di fonderia si basa su una colata e sulla successiva solidificazione di metallo fuso entro cavità opportunamente realizzate.

La scelta del processo di fonderia dipende dal prodotto da realizzare in termini di complessità geometrica, finiture superficiali, materiale, volume di produzione e costi.

2.6.1 Processo di fusione in terra

La fusione in terra o colata in sabbia è uno dei procedimenti di fusione più utilizzati per la produzione di pezzi metallici in piccola serie.

Consiste nell'effettuare l'operazione di formatura dello stampo, la colata del metallo fuso all'interno di uno stampo composto da una terra speciale, (terra da fonderia) e un'operazione di sformatura che consiste nella rottura alla fine del processo per poterne estrarre il pezzo.

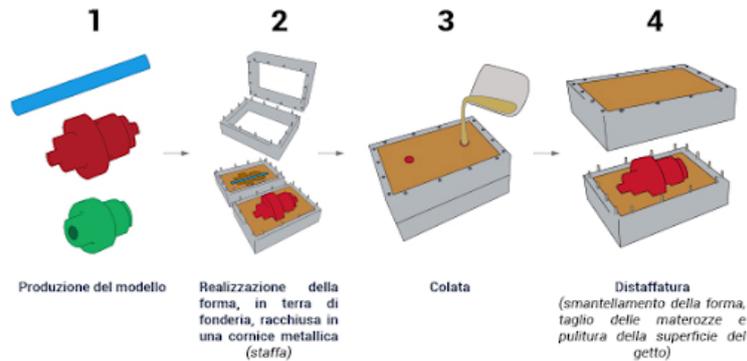


Figura 2.10: Processo di fusione in terra

2.6.2 Processo di pressofusione

Nel processo di pressofusione avremo un'applicazione diretta di pressione tramite un sistema di pompaggio, il fuso viene spillato dal forno e posto dentro un cilindro non riscaldato, per questo motivo è chiamata anche colata in camera fredda.

In questo modo la temperatura del fuso è molto più bassa e il metallo durante il riempimento si trova allo stato bifasico liquido-solido.

La pressione applicata può raggiungere anche i 150 MPa e questo porta ad avere una struttura più fine e meno soffiature.

Uno svantaggio di questo processo è dato dall'usura a causa del materiale denso che una volta versato mediante una siviera all'interno della camera di spinta è forzato ad entrare nella cavità con pressioni tra i 20 e i 70 MPa . [4]

La pressofusione può essere fatta in due modi:

- Pressofusione in camera orizzontale: in questo caso avremo un'ampia superficie del fuso esposta all'aria questo porta allo sviluppo di ossidi a causa dell'esposizione fuso-aria, come in Figura 2.11.
- Pressofusione in camera verticale: tramite questo sistema risolveremo problemi dovuti alla rimozione dei residui di colata che avverrà verso l'alto attraverso il contropistone. In questo caso avremo una formazione di ossidi limitata in quanto la superficie libera del fuso è poco estesa, come in Figura 2.12.

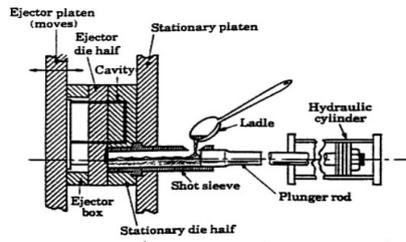


Figura 2.11: Pressofusione camera orizzontale

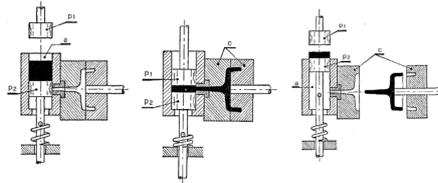


Figura 2.12: Pressofusione camera verticale

2.7 Materiali

I materiali che andremo a descrivere saranno utili per capire in modo più approfondito l'analisi economica e la conseguente strategia produttiva.

2.7.1 Alluminio Serie 6000

Le **leghe di alluminio**, dette anche **leghe leggere**, sono leghe ottenute con la combinazione tra alluminio, rame, zinco, manganese, silicio o magnesio.

Le principali caratteristiche di queste leghe sono:

- Bassa densità: il peso specifico è tra i più bassi dei materiali strutturali (2,7 g/cm³ contro i 7,9 g/cm³ dell'acciaio)
- Resistenza a corrosione
- Elevata conduttività termica ed elettrica
- Elevata duttilità
- Basso punto di fusione

Le leghe di alluminio della serie 6000, chiamata anche Anticorodal, hanno come principali elementi di lega il silicio e il magnesio. Sono leghe con buona saldabilità e possono essere estruse per questo sono idonee alla produzione di profili a una o più cavità.

2.7.2 AISi9Cu3

Designazione: EN AB ed AC 46000

Il processo di rifusione dei pani deve essere svolto nella maniera più veloce possibile ed è necessario evitare il surriscaldamento. Gli attrezzi di ferro che possono andare a contatto con il metallo liquido devono essere appositamente verniciati per evitare inquinamenti della lega.

La lega EN 46000 è consegnata sottoforma di pani prodotti con il processo della colata continua, questo comporta i seguenti vantaggi:

- Minor presenza di ossidi
- Struttura fine ed omogenea
- Ridotto contenuto di idrogeno
- Minor rischio di esplosione del pane in fase di fusione dovuto alla minor presenza di cavità di ritiro
- Miglior resa metallica dovuta all'elevata qualità superficiale del pane

Questa lega da pressocolata è impiegata per la produzione di getti complessi e con pareti sottili, resistente alle alte temperature.

Su questa lega non vengono generalmente effettuati trattamenti termici ma per aumentare le proprietà meccaniche si possono effettuare questi trattamenti:

- Tempra a 520 °C per 6-10 ore
- Invecchiamento artificiale a 160°C per 8-12 ore

2.7.3 AISi10Mg

Questa lega ha buone caratteristiche di fusione e viene in genere utilizzata per produrre parti molto sottili dalle geometrie complesse. Offre buona resistenza e durezza ed è quindi largamente utilizzata per modelli che devono sopportare carichi elevati.

Convenzionalmente le realizzazioni in questa lega di alluminio vengono sottoposte a trattamenti termici per migliorare le proprietà meccaniche, ad esempio con un ciclo di solubilizzazione ed invecchiamento artificiale.

Il processo di laser sintering è caratterizzato da una fusione e una ri-solidificazione estremamente rapide, questo produce nel componente costruito una metallurgia e proprietà meccaniche simili a quelle delle parti fuse trattate termicamente.

2.8 Software utilizzati

In questo elaborato confronteremo i risultati delle ottimizzazioni topologiche di tre software:

- **Ansys 2020 R1** software di simulazione ingegneristica
- **Solid Edge 2020** software di progettazione ibrida 2D/3D
- **nTopology** software di progettazione ingegneristica per la produzione avanzata

2.8.1 ANSYS 2020 R1

Il software Ansys è usato in ogni settore industriale, consente di risolvere complessi problemi di ingegneria permettendo di ottimizzare lo sviluppo dei prodotti e ridurre i costi associati a prove sperimentali.

La piattaforma Ansys presenta vari moduli e può creare simulazioni che testano la durabilità di un prodotto, la distribuzione della temperatura, i movimenti dei fluidi e le proprietà elettromagnetiche.

2.8.2 Solid Edge 2020

Solid Edge è un software di modellazione 2D/3D, è utilizzato nello sviluppo e realizzazione di prodotti in ogni settore tecnologico. Permette di modellare componenti singoli in modalità sincrona o ordinata, oppure di creare assiemi più complessi e consente la messa in tavola di parti e assiemi.

Solid Edge è dotato di vari moduli aggiuntivi che permettono di gestire tutti gli aspetti del processo di sviluppo prodotto:

- Progettazione
- Superfici
- Stampa 3D
- Simulazione, strumento di analisi a elementi finiti integrato
- Progettazione generativa

2.8.3 nTopology

nTopology è un software di progettazione e simulazione di nuova generazione in grado di risolvere i problemi di progettazione presenti sui comuni software parametrici, infatti la piattaforma consente di progettare quello che si vuole indipendentemente dalla forma e geometria.

La piattaforma nTopology permette di ottenere molti vantaggi, come:

Capitolo 2 Cenni di teoria

- Libertà di progettazione, non si è più limitati dalla forma e dalla geometria della parte da realizzare
- Flussi di lavoro riutilizzabili
- Combina geometria avanzata, simulazioni e dati sperimentali per generare risultati ottimizzati
- Collaborazione con diversi che integrati tra loro permettono di ottenere il miglior risultato

La piattaforma nTop utilizza un'interfaccia di programmazione visiva basata su blocchi. I blocchi nTop sono funzioni che svolgono compiti particolari, come realizzare mesh, applicare forze, svuotare un componente o eseguire un'operazione booleana.
[5]

Capitolo 3

Analisi staffa

In questo capitolo presenteremo il caso di studio della tesi.

Il componente che verrà analizzato è una staffa attualmente in produzione e realizzata con un processo di carpenteria, la staffa è realizzata in alluminio serie 6000, presenta un'estremità con quattro fori di fissaggio e una superficie cilindrica che rimarrà invariata anche dopo l'ottimizzazione topologica, per evitare successivi problemi di montaggio, mentre nell'estremità opposta presenta una forcina per il collegamento di un altro componente tramite un perno.

Il componente è composto da cinque pezzi e ha una massa iniziale di 1165g:

- Forcina realizzata con un processo di taglio laser e piegatura della lamiera
- Due ali di rinforzo tagliate con un processo di taglio laser
- Profilato a sezione circolare cava
- Estremità circolare ottenuta per stampaggio con quattro fori

Infine i pezzi sono stati assemblati tra di loro mediante un'operazione di saldatura. Il modello iniziale fornito è un file STEP composto dall'insieme dei cinque pezzi, per questo motivo prima di realizzare l'analisi statica abbiamo semplificato il modello rimuovendo tutti i cordoni di saldatura e i raggi di raccordo superflui, una volta fatto questo abbiamo unito i pezzi in un solo componente in modo da semplificare l'analisi statica.

L'analisi statica è di tipo lineare, il termine lineare significa che la risposta calcolata è linearmente correlata alla forza applicata mentre il termine statico indica che le forze non variano nel tempo, o che la variazione del tempo è insignificante e può quindi essere tranquillamente ignorata.

L'analisi statica lineare presuppone che tutti i carichi vengano applicati lentamente e gradualmente fino a raggiungere il valore massimo, dopodiché, i carichi rimangono costanti (invarianti nel tempo). I carichi variabili nel tempo che inducono forze inerziali o di smorzamento possono portare ad un'analisi dinamica.

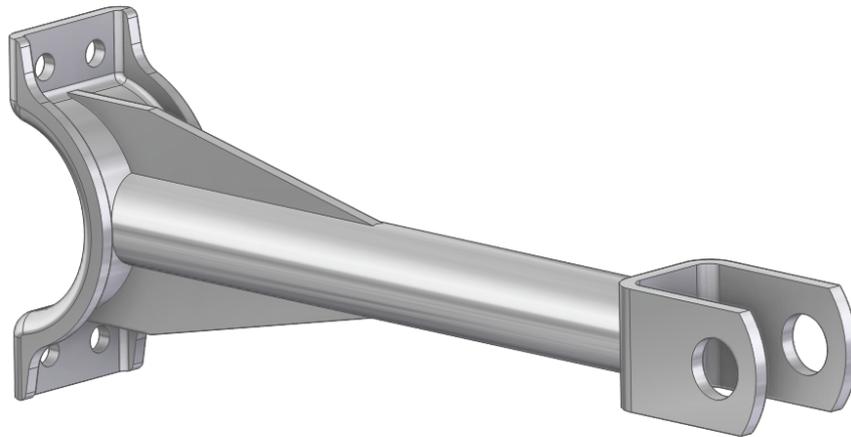


Figura 3.1: Staffa in esame

3.1 I carichi agenti e vincoli

Per effettuare l'analisi statica e di deformazione della staffa definiamo delle condizioni al contorno che possono essere diverse a seconda del problema fisico da modellare. Sul componente in esame utilizzeremo solo carichi meccanici trascurando i carichi termici.

I vincoli posti sul modello limitano il movimento durante l'analisi agli elementi finiti, quando inizia l'analisi, i vincoli vengono applicati ai nodi o agli elementi associati alla geometria selezionata.

In questo caso andremo a definire:

- Quattro vincoli fissi sui fori di fissaggio in modo da rimuovere tutti e sei gradi di libertà del componente
- Carico applicato alle due superfici cilindriche della forcella che richiede le seguenti informazioni:
 - Geometria: andremo a selezionare le due facce cilindriche del foro nella forcella
 - Direzione e valore della forza: selezionando l'opzione componenti andremo a inserire i componenti $X=200\text{N}$, $Y=0\text{N}$, $Z=-800\text{N}$ della forza
 - Distribuzione del carico: l'entità del carico è distribuito proporzionalmente sulle due superfici cilindriche dove verrà alloggiato il perno

3.1 I carichi agenti e vincoli

- Carico gravitazionale che viene calcolato moltiplicando l'accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$) per la massa del modello (1165g), i carichi gravitazionali richiedono le seguenti informazioni:
 - Densità del materiale
 - Geometria applicata automaticamente all'intero modello
 - Direzione del carico

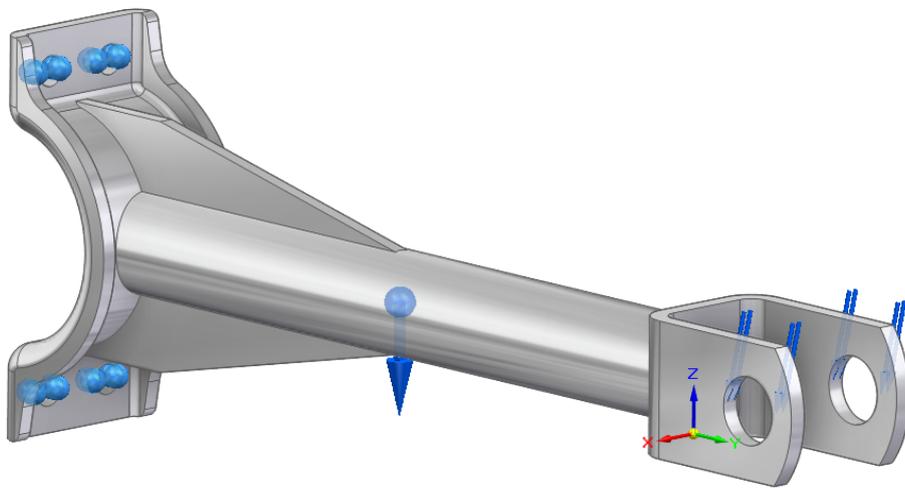


Figura 3.2: Staffa con condizioni al contorno

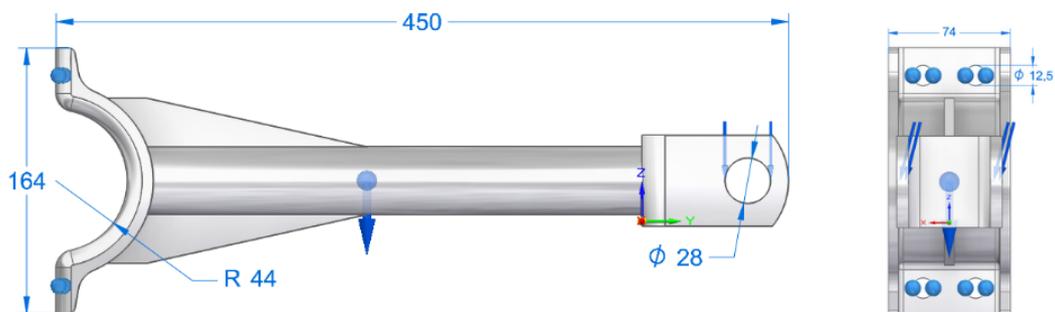


Figura 3.3: Vista frontale e laterale (unità mm)

3.2 Analisi statica del componente attualmente in produzione

Tutte le analisi statiche lineari verranno fatte sulla piattaforma nTopology in modo da poter confrontare tutti i risultati.

L'analisi statica iniziale verrà svolta sul componente con la sezione circolare cava poi per lo sviluppo dell'ottimizzazione topologica andremo a riempire il foro interno.

Dopo aver definito i vincoli fissi, la forza peso e la forza applicata all'estremità andiamo a definire le proprietà del materiale da utilizzare e a realizzare una mesh tetraedrica con una lunghezza del bordo della cella di 3mm in quanto lo spessore minimo del componente è di 7mm.

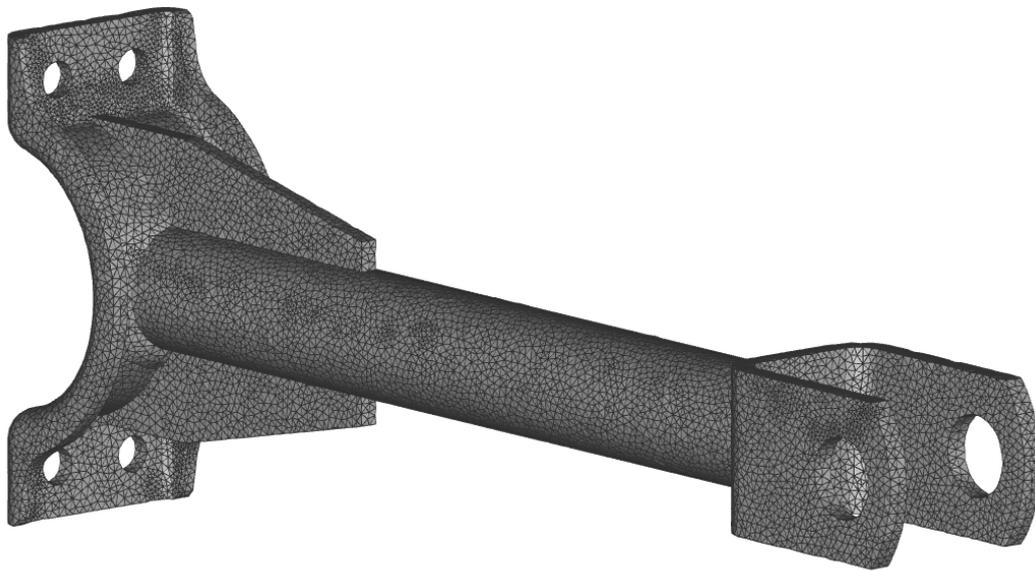


Figura 3.4: Mesh tetraedrica

L'analisi ci fornisce una deformazione totale e una deformazione direzionale sugli assi X, Y e Z, noi considereremo la deformazione totale anche per le prossime analisi e comparazioni.

Dall'analisi risulta che la deformazione totale è di $2mm$, utilizzando una fattore di scala del 20% per la visualizzazione della deformazione notiamo che questa è presente anche sull'asse X a causa della forza $X=200N$ per questo motivo nelle future ottimizzazioni topologiche utilizzeremo due casi di carico:

- Carico 1: $X = 200N, Y = 0N, Z = -800N$
- Carico 2: $X = -200N, Y = 0N, Z = -800N$

Un componente può avere forze opposte che possono essere uguali o diverse, nel nostro caso la staffa si muove in due direzioni opposte allora possiamo utilizzare i casi di carico che consentono di tenere conto delle diverse sollecitazioni applicate in

3.2 Analisi statica del componente attualmente in produzione

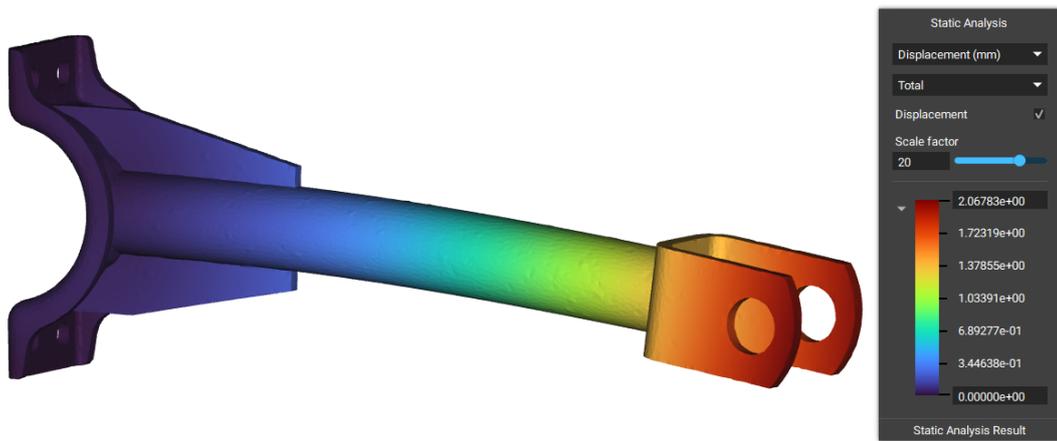


Figura 3.5: Deformazione totale staffa iniziale

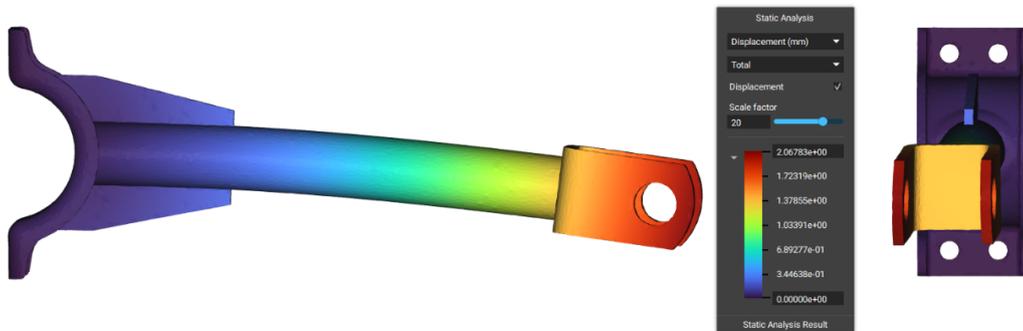


Figura 3.6: Deformazione totale vista laterale e frontale

diverse fasi di utilizzo.

La maggior parte dei componenti reali viene sottoposta a carichi variabili per questo possiamo specificare diversi carichi e condizioni al contorno, in modo che la parte ottimizzata possa funzionare senza rompersi in qualsiasi condizioni.

I casi di carico vengono applicati in ordine, non si annullano a vicenda matematicamente e restituiscono un singolo risultato.

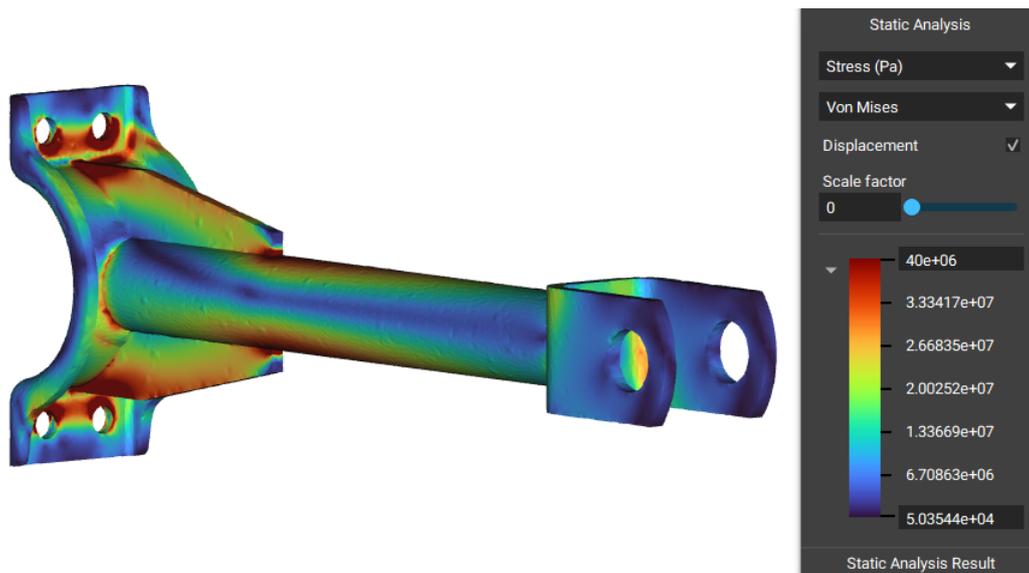


Figura 3.7: Stato tensionale staffa iniziale

Lo stato tensionale iniziale aveva un valore massimo di 230MPa questo è dovuto a punti singolari (nei nodi degli elementi e in prossimità dei vincoli) non significativi. Tutto il resto del pezzo ha valori molto più bassi, per questo abbiamo abbassato il valore massimo a 40MPa così da avere una visione più chiara dell'andamento della tensione nel pezzo

Dalla scala colorimetrica possiamo osservare che la staffa iniziale raggiunge una tensione massima di 40MPa nelle zone rosse che sono in prossimità delle ali di rinforzo e nei fori di fissaggio della staffa.

Capitolo 4

Ottimizzazione topologica staffa

4.1 Flusso di lavoro

Come presentato nel capitolo 3 per effettuare l'ottimizzazione topologica andremo a modificare ulteriormente la staffa riempiendo la sezione circolare cava, come mostrato in Figura 4.1.

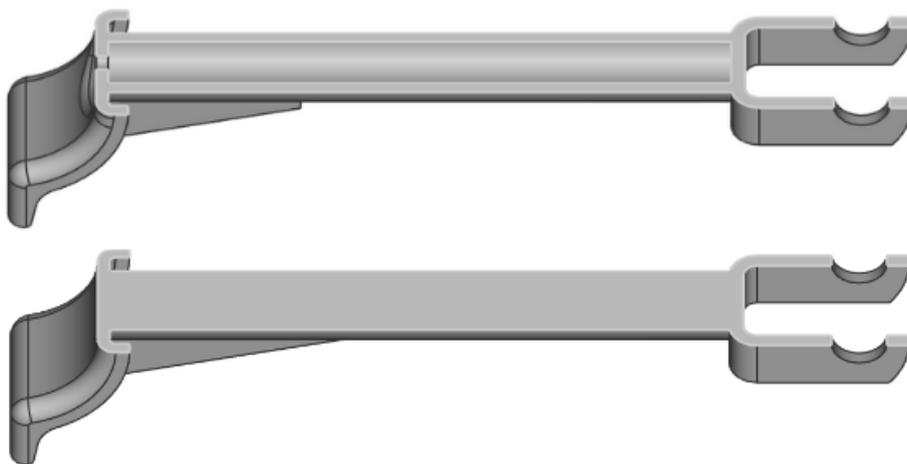


Figura 4.1: Modifica spazio di progettazione

Adesso esportiamo un modello STEP solido che possiamo importare nei software di ottimizzazione topologica, i passaggi per effettuare un'ottimizzazione topologica verranno analizzati prossimamente.

Il risultato di un'ottimizzazione ha come risultato una geometria mesh, questo può rappresentare un problema per la validazione del componente e un problema per effettuare modifiche alla geometria perché la modellazione parametrica non opera con questo tipo di geometria.

Nel capitolo 6 parleremo della validazione dei risultati e presenteremo dei metodi per trasformare una geometria mesh in una geometria solida modificabile facilmente con programmi di modellazione parametrica.

Su ogni software realizzeremo due ottimizzazioni:

- Una per la **produzione additiva**, utilizzando come materiale **AlSi10Mg**
- Una per la **pressofusione**, utilizzando come materiale **AlSi9Cu3**

utilizzeremo sempre lo stesso modello con le stesse condizioni al contorno ma andremo a cambiare i vincoli tecnologici e il materiale.

4.2 La minimizzazione della cedevolezza con una massa obiettivo

Tutte le ottimizzazioni saranno realizzate con l'obiettivo di minimizzare la cedevolezza fino a raggiungere una massa tra gli 800/900g 800/900g, in questo modo avremo un riduzione di peso di circa il 25% partendo dalla staffa iniziale.

Tutti i modelli ottimizzati avranno una massa confrontabile questo permetterà di effettuare un'analisi statica con le stesse condizioni al contorno e andremo a valutare la deformazione massima.

4.3 ANSYS 2020 R1

Nel nostro caso dell'ottimizzazione topologica di un componente utilizzeremo i seguenti moduli:

- **ANSYS Workbench** piattaforma che si basa su un'innovativa vista schematica del progetto, lega insieme l'intero processo di simulazione e si possono realizzare analisi multifisiche con un approccio drag-and-drop per selezionare i moduli.

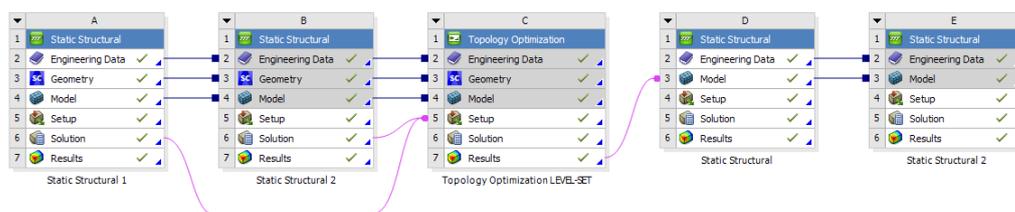


Figura 4.2: Workflow ANSYS Workbench

Analizzando la Figura 4.2 notiamo che sono state inserite due analisi statiche strutturali per tener conto dei casi di carico opposti (trattati nel capitolo 3.2), questi due blocchi hanno tre collegamenti in comune:

- **Dati ingegneristici** che riguardano il materiale
- **Geometria**
- **Modello** che comprende vincoli e carichi

poi è stato aggiunto il blocco dell'ottimizzazione topologica che ha in ingresso il materiale, la geometria, il modello e il risultato di tutte e due le analisi statiche. Infine i risultati dell'ottimizzazione topologica sono collegati a delle analisi statiche strutturali per la validazione del risultato.

- **ANSYS Mechanical** Questa piattaforma permette di svolgere analisi strutturali, ottimizzazioni topologiche e creare strutture lattice di varia densità. L'ottimizzazione topologica può essere svolta con due algoritmi:
 - **SIMP** (Solid Isotropic Material with Penalization) basato sulla densità degli elementi
 - **LEVEL SET** si occupa dei contorni del modello con morphing per il processo di ottimizzazione



Figura 4.3: Differenze tra SIMP e LEVEL SET

In questo elaborato non analizzeremo il funzionamento dei due algoritmi ma utilizzeremo l'algoritmo LEVEL SET.

Nella Figura 4.3 è osservabile che l'algoritmo LEVEL SET fornisce come risultato un geometria più liscia (smoothed), quasi pronta per la produzione.

Come mostrato in Figura 4.4 nel modulo Mechanical andremo a:

- Realizzare la Mesh
- Definire le forze sul foro della forcella e la forza di gravità
- Impostare vincoli fissi sui quattro fori
- Definire la regione di ottimizzazione e lo spessore delle zone da lasciare fuori dall'analisi chiamate exclusion region
- Impostare l'obiettivo di minimizzare la cedevolezza per tutti e due i casi di carico
- inserire un vincolo sulla direzione di estrazione lungo l'asse Z e un vincolo sulla massa (Figura 4.4).
- Smoothing del risultato dell'ottimizzazione topologica

Capitolo 4 Ottimizzazione topologica staffa

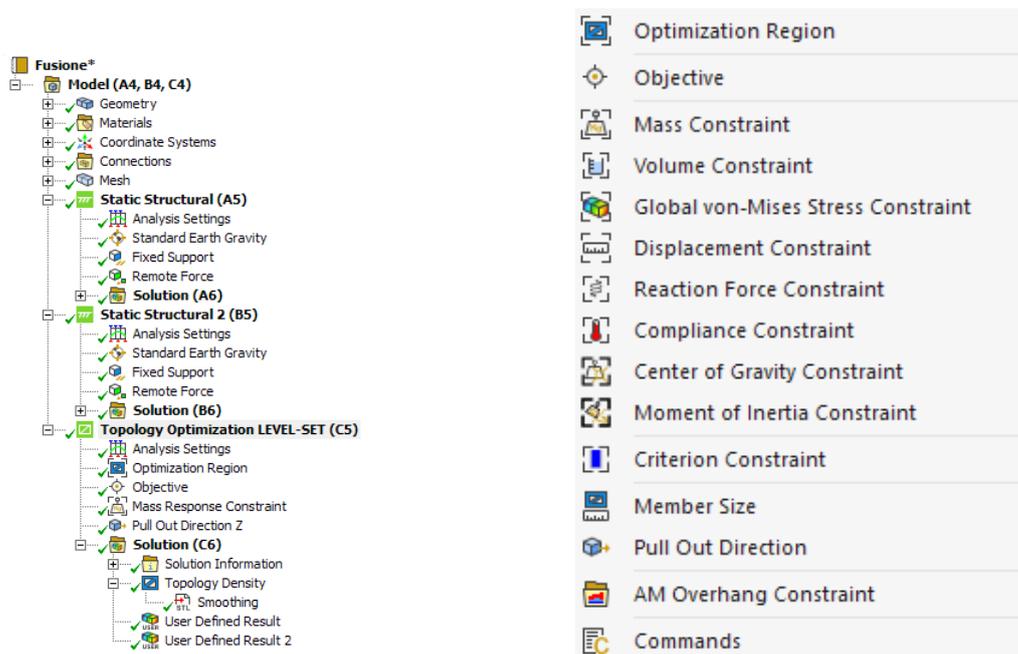


Figura 4.4: A sinistra Workflow ANSYS Mechanical e a destra vincoli implementabili

Nella sezione (C6) della Figura 4.4 possiamo trovare dei grafici sulla convergenza delle funzioni, dove avremo sull'asse X il numero delle iterazioni e sull'asse Y il vincolo e l'obiettivo, Figura 4.5.

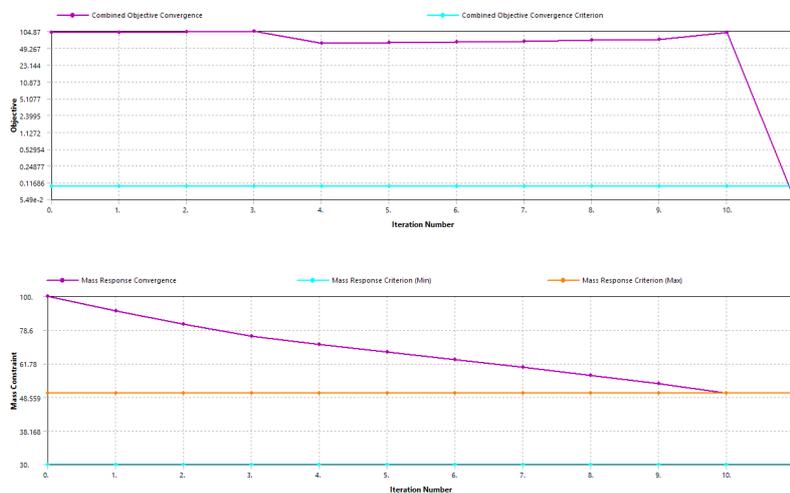


Figura 4.5: Iterazioni per la convergenza

Nella Figura 4.6 possiamo osservare il volume o la massa iniziale e finale e la percentuale di riduzione massa/volume che è di circa il 50%.

Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	1.e-006
<input type="checkbox"/> Maximum	1.
<input type="checkbox"/> Average	0.46597
<input type="checkbox"/> Original Volume	6.457e-004 m ³
<input type="checkbox"/> Final Volume	3.2147e-004 m ³
<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	49.785
<input type="checkbox"/> Original Mass	1.7821 kg
<input type="checkbox"/> Final Mass	0.88725 kg
<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	49.785

Figura 4.6: Percentuale riduzione massa/volume

4.4 Solid Edge 2020

Il modulo di progettazione generativa in Solid Edge fornisce una soluzione geometrica a massa ridotta con una qualità della superficie pronta per la stampa, infatti i risultati sono pronti per la produzione tramite processi additivi o possono essere ulteriormente perfezionati per produzione tradizionale.

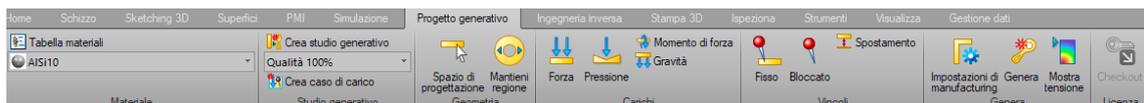


Figura 4.7: Modulo progettazione generativa



Figura 4.8: Workflow ottimizzazione Solid Edge 2020

Come possiamo vedere nella Figura 4.7 e nella Figura 4.8, la progettazione generativa viene eseguita tramite un semplice flusso di lavoro:

- Definiamo lo spazio di progettazione

Capitolo 4 Ottimizzazione topologica staffa

- Definiamo il materiale che può essere scelto dalla tabella materiali
- Selezioniamo le regioni da mantenere inalterate andato a specificare lo spessore (zone rosse 5mm)
- Applichiamo i casi di carico e la forza peso (freccie viola)
- Applichiamo i vincoli (sfere rosa)

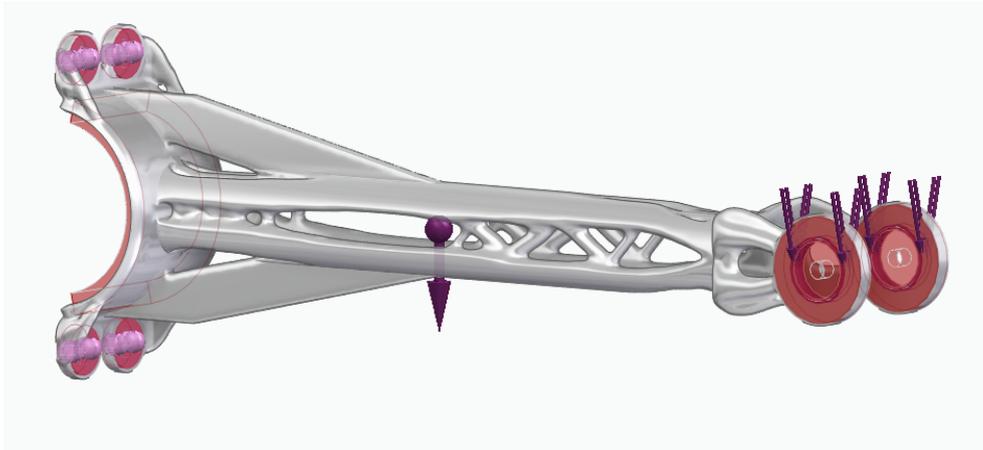


Figura 4.9: Condizioni al contorno

- Scegliamo i vincoli di produzione in base al processo di produzione, è possibile scegliere tra:
 - Asse di prevenzione sporgenza, in modo da non creare sottosquadri
 - Impedire la creazione di vuoti chiusi
 - Scegliere la direzione di estrusione del materiale per mantenere uno spessore della sezione trasversale costante durante l'ottimizzazione
 - Definire un valore percentuale per specificare la modalità di distribuzione del materiale

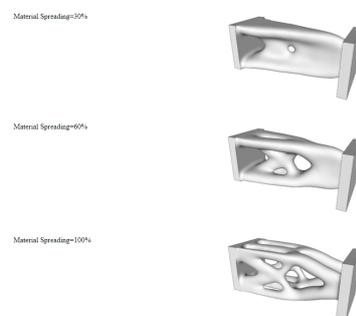


Figura 4.10: Estensione del materiale

- Generiamo la soluzione andato a scegliere la qualità dello studio e la quantità di massa da ridurre

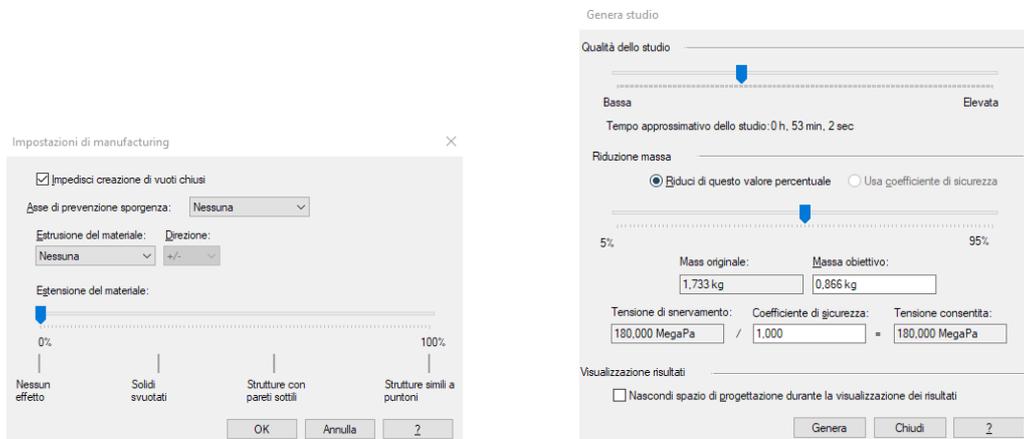


Figura 4.11: Impostazioni di produzione e Generazione studio

4.5 nTopology

La piattaforma nTopology offre un ampio set di strumenti per l'alleggerimento strutturale come l'ottimizzazione topologica, le strutture reticolari o strutture gyroid, lo shell variabile e le nervature di rinforzo sulla superficie.

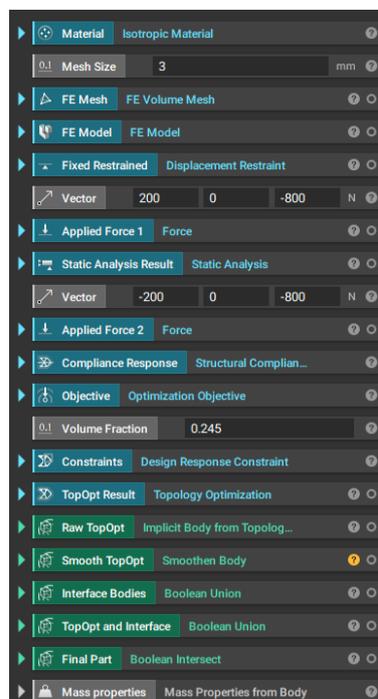


Figura 4.12: Workflow nTopology

Capitolo 4 Ottimizzazione topologica staffa

Nella Figura 4.12 vengono mostrati tutti i blocchi utilizzati per realizzare l'ottimizzazione topologica della staffa in esame con obiettivo la minimizzazione della cedevolezza e vincolo di riduzione sul volume.

I vincoli implementabili in nTopology sono solo tre:

- Vincolo di simmetria
- Regioni passive (zone da mantenere inalterate)
- Vincolo sulla direzione di estrusione, nella versione in uso non può essere utilizzato per tutta la geometria

4.6 Risultati ottenuti e validazione modelli

In questo sottocapitolo presenteremo le diverse ottimizzazioni topologiche e valideremo le geometrie con le stesse condizioni al contorno iniziali.

Le ottimizzazioni sono state svolte cercando di mantenere gli stessi vincoli e carichi in tutti in software in modo da poter confrontare i risultati della deformazione totale della staffa.

Partiamo dalle ottimizzazioni realizzate con il software Ansys 2020 R1:

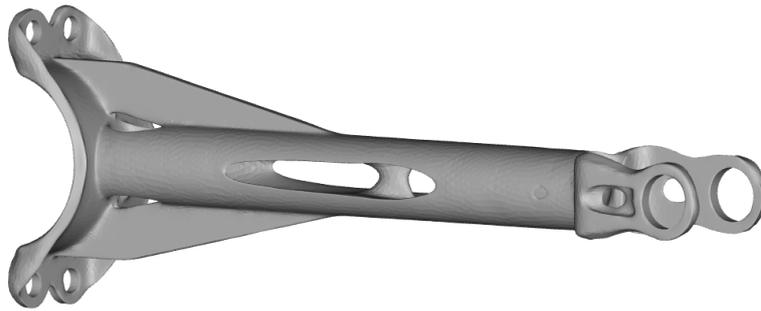


Figura 4.13: Ottimizzazione con vincoli per AM ANSYS 2020 R1

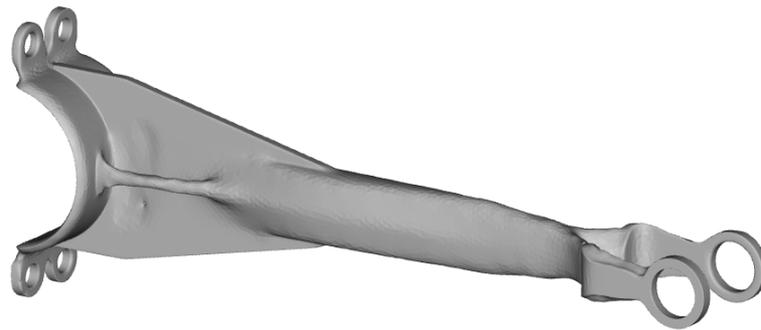


Figura 4.14: Ottimizzazione con vincoli per fusione ANSYS 2020 R1

La Figura 4.13 e la Figura 4.14 mostrano rispettivamente i risultati ottenuti dell'ottimizzazione topologica con vincoli per la produzione additiva e con vincoli per il processo di fusione e la Tabella 4.1 mostra la riduzione di massa.

	Staffa iniziale	Staffa AM	Staffa Fusione
Massa [g]	1165	845	881
Deformazione Totale [mm]	2	2,5	4,6

Tabella 4.1: Ottimizzazione ANSYS 2020 R1

Ora valuteremo la deformazione totale e lo stato tensionale del componente ottimizzato per la produzione additiva:

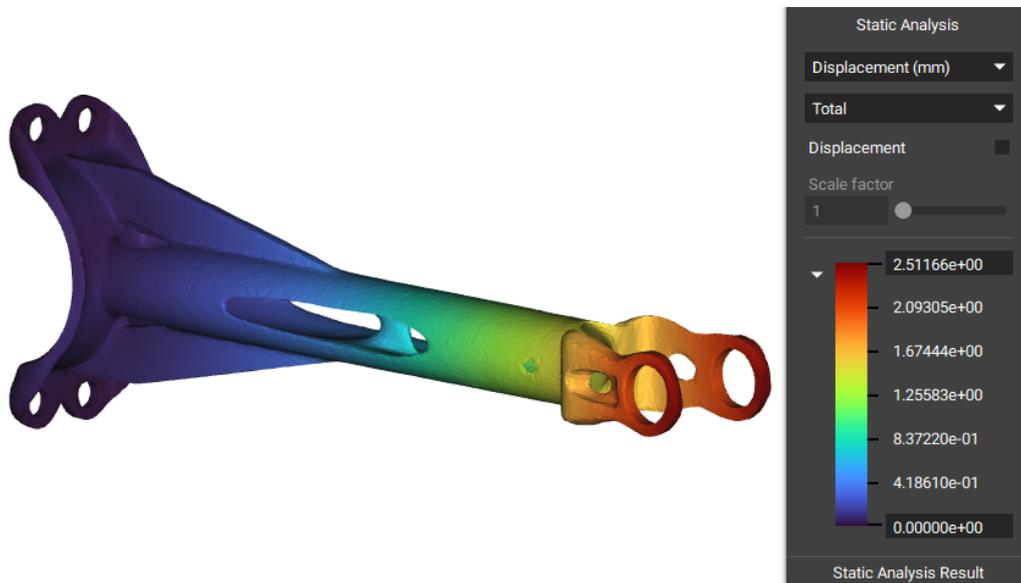


Figura 4.15: Deformazione ANSYS AM

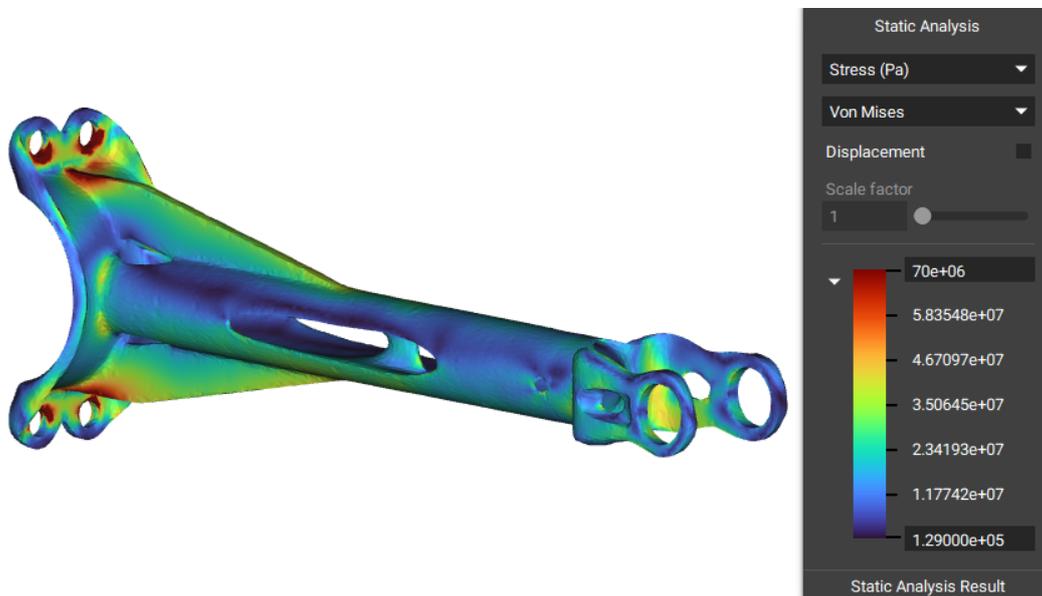


Figura 4.16: Stato tensionale ANSYS AM

4.6 Risultati ottenuti e validazione modelli

Analizziamo la deformazione totale e lo stato tensionale del componente ottimizzato per il processo di fusione:

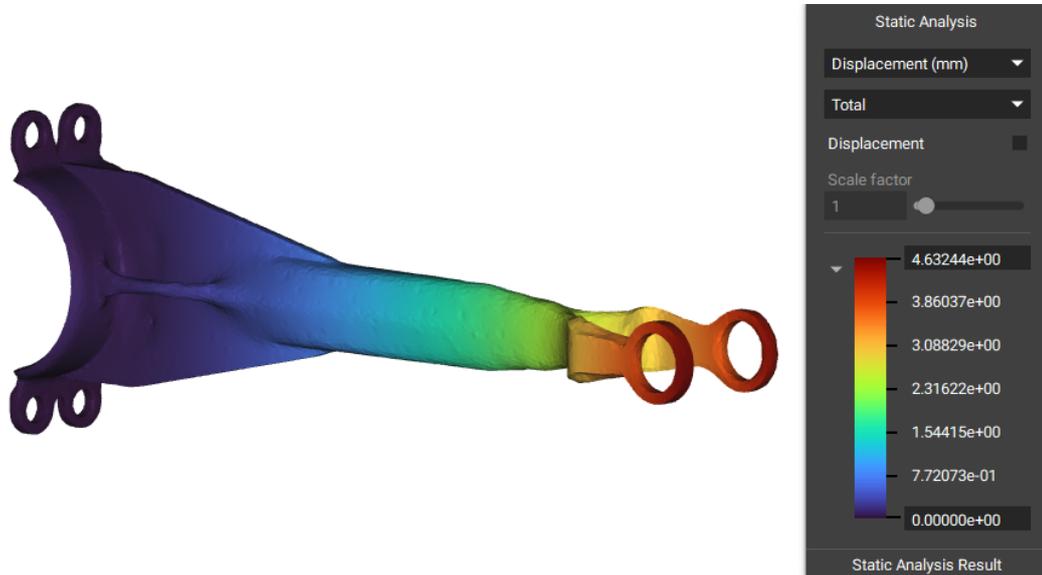


Figura 4.17: Deformazione ANSYS Fusione

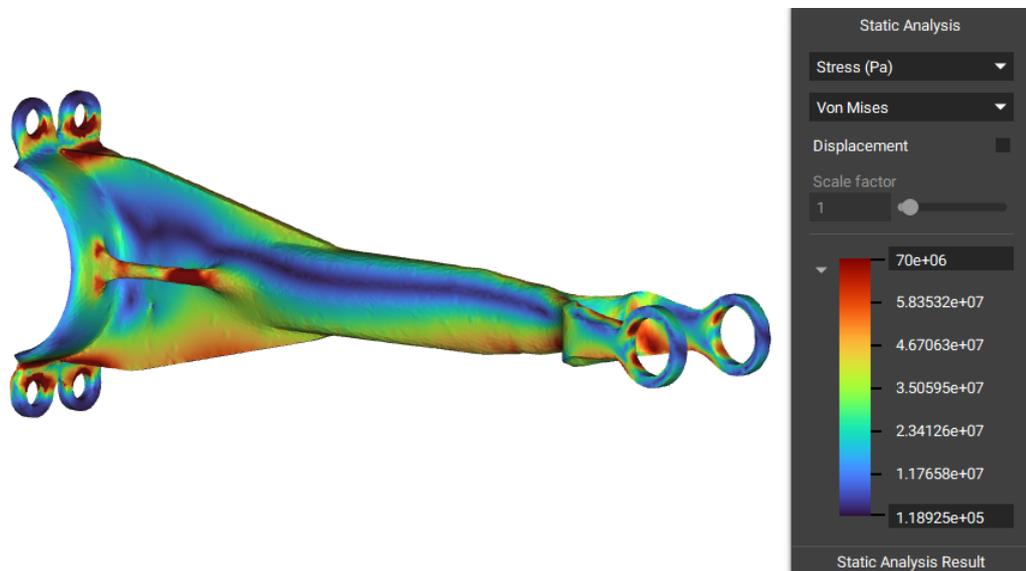


Figura 4.18: Stato tensionale ANSYS Fusione

Le ottimizzazioni realizzate con Solid Edge 2020 sono:

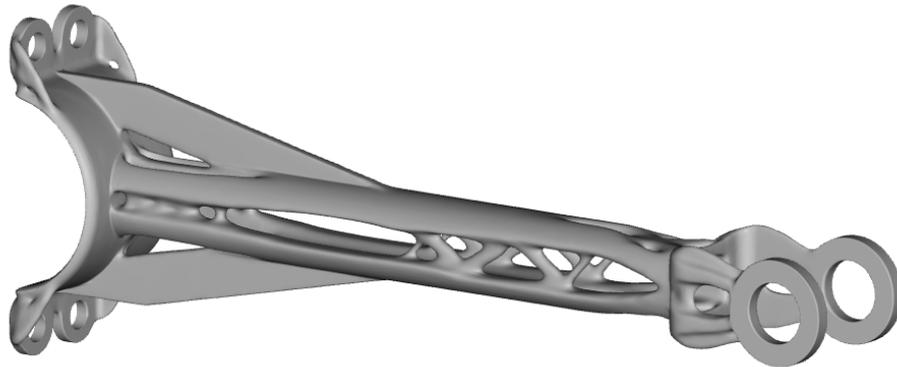


Figura 4.19: Ottimizzazione con vincoli per AM Solid Edge 2020

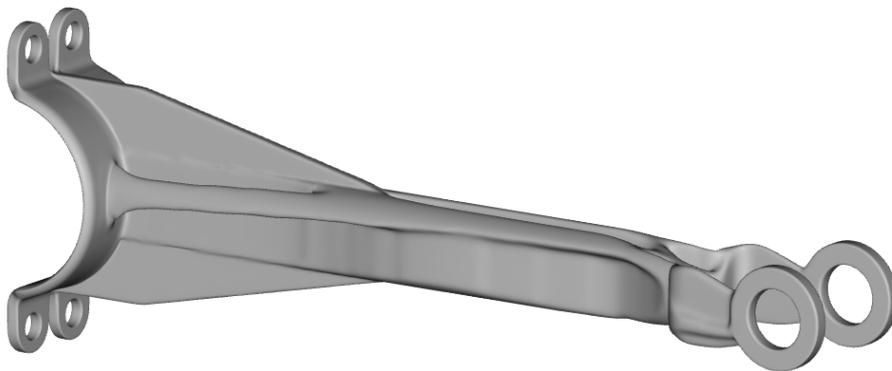


Figura 4.20: Ottimizzazione con vincoli per fusione Solid Edge 2020

	Staffa iniziale	Staffa AM	Staffa Fusione
Massa [g]	1165	880	888
Deformazione Totale [mm]	2	2,9	4,3

Tabella 4.2: Ottimizzazione Solid Edge 2020

4.6 Risultati ottenuti e validazione modelli

Elaboriamo la deformazione totale e lo stato tensionale del componente ottimizzato per la produzione additiva:

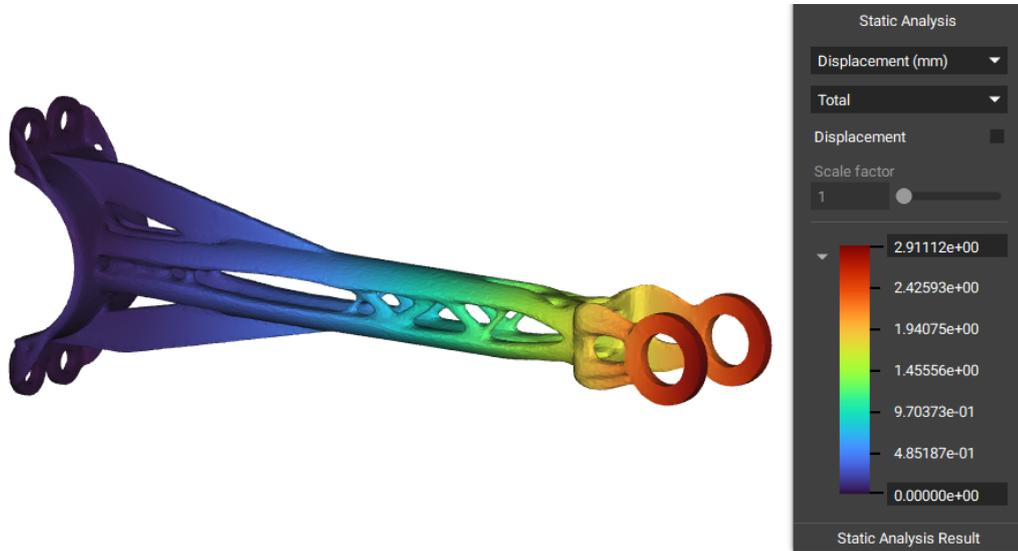


Figura 4.21: Deformazione Solid Edge AM

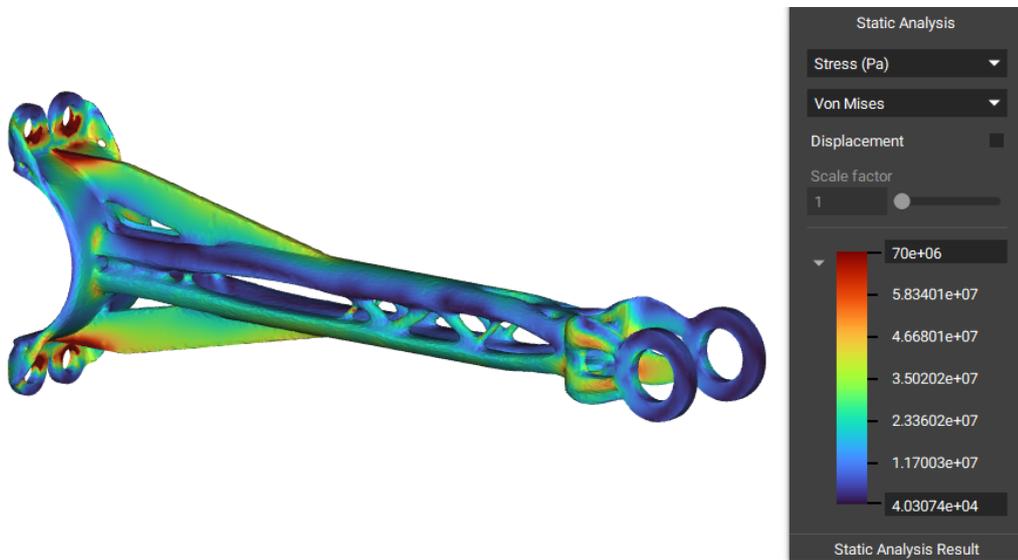


Figura 4.22: Stato tensionale Solid Edge AM

Ora Studieremo la deformazione totale e lo stato tensionale del componente ottimizzato per il processo di fusione:

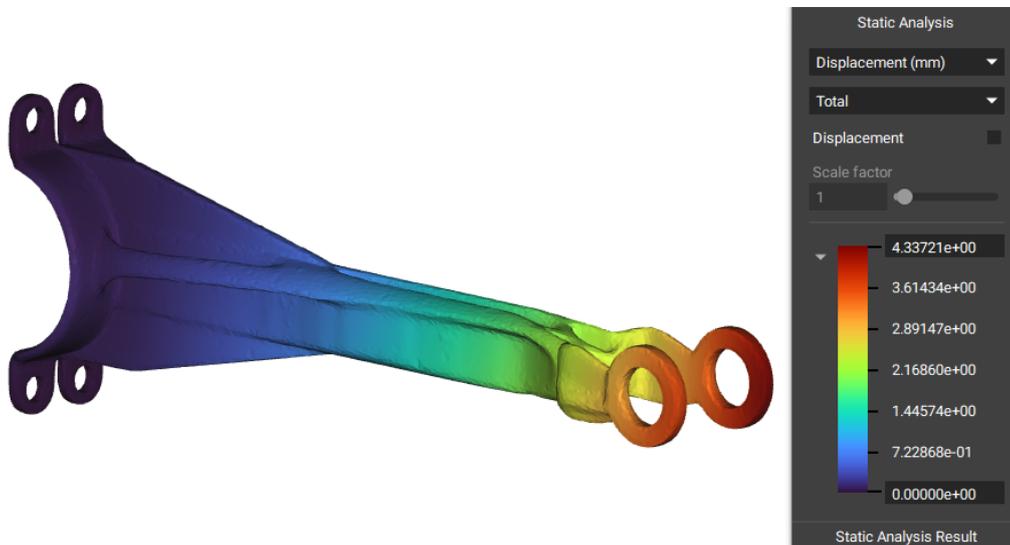


Figura 4.23: Deformazione Solid Edge Fusione

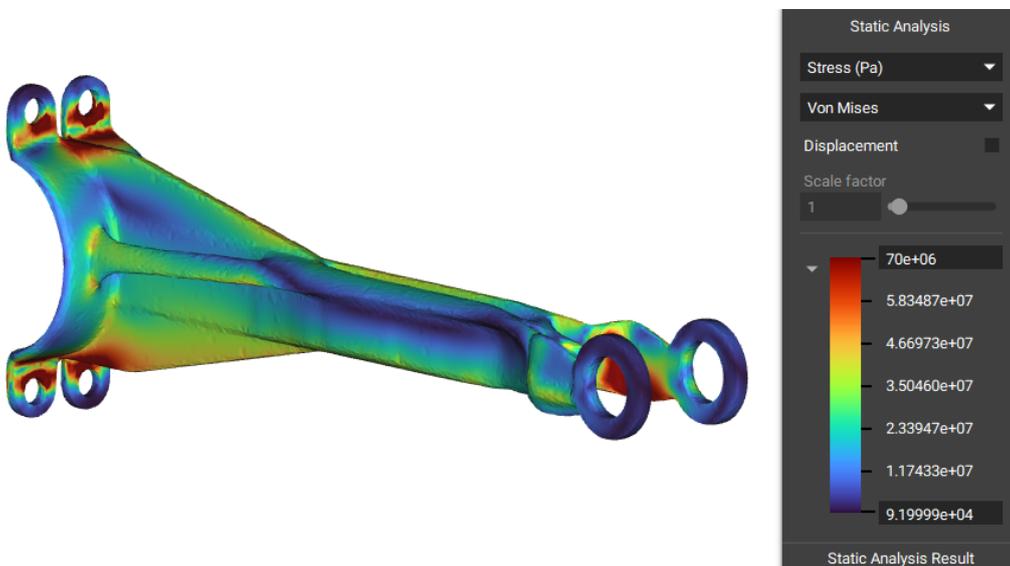


Figura 4.24: Stato tensionale Solid Edge Fusione

Con nTopology abbiamo realizzato una sola ottimizzazione in quanto nella versione utilizzata non erano ancora implementabili i vincoli tecnologici per tutta la geometria

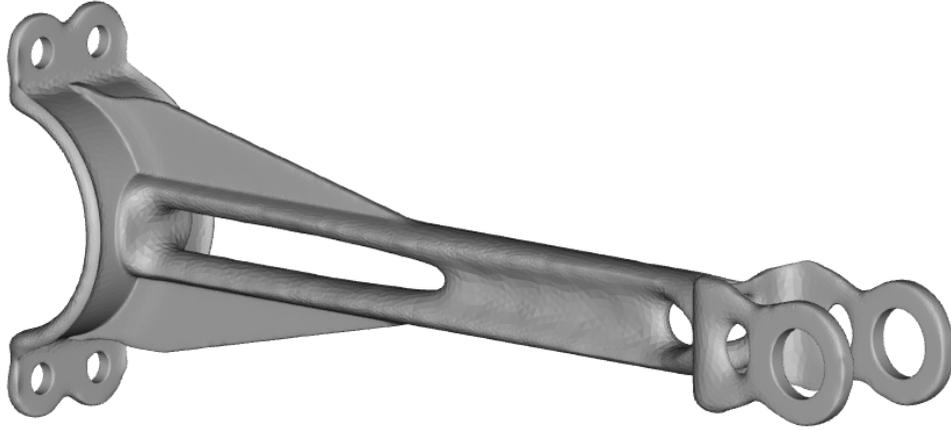


Figura 4.25: Ottimizzazione con vincoli per AM nTopology

	Staffa iniziale	Staffa AM
Massa [g]	1165	836
Deformazione Totale [mm]	2	6,3

Tabella 4.3: Ottimizzazione nTopology

Infine consideriamo la deformazione totale e lo stato tensionale del componente ottimizzato per la produzione additiva:

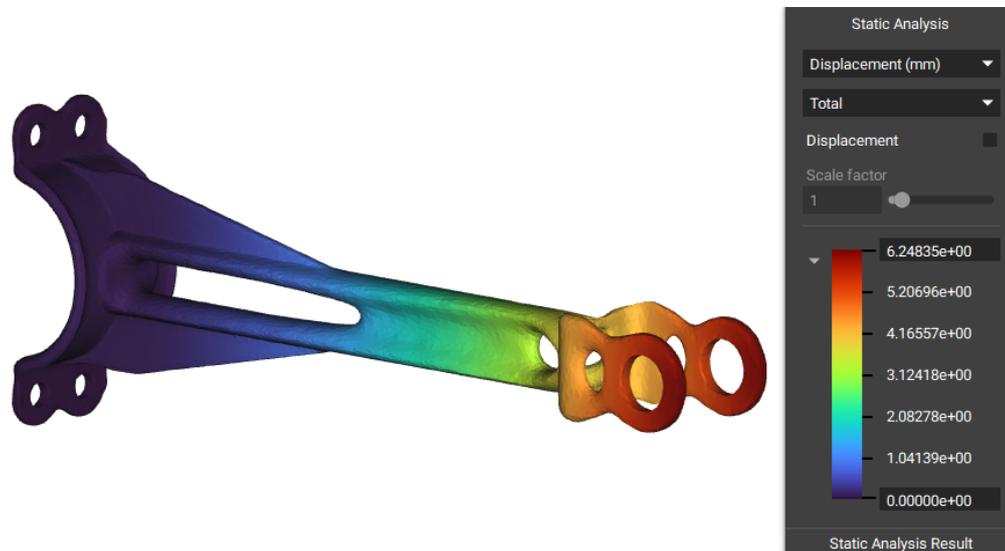


Figura 4.26: Deformazione nTopology AM

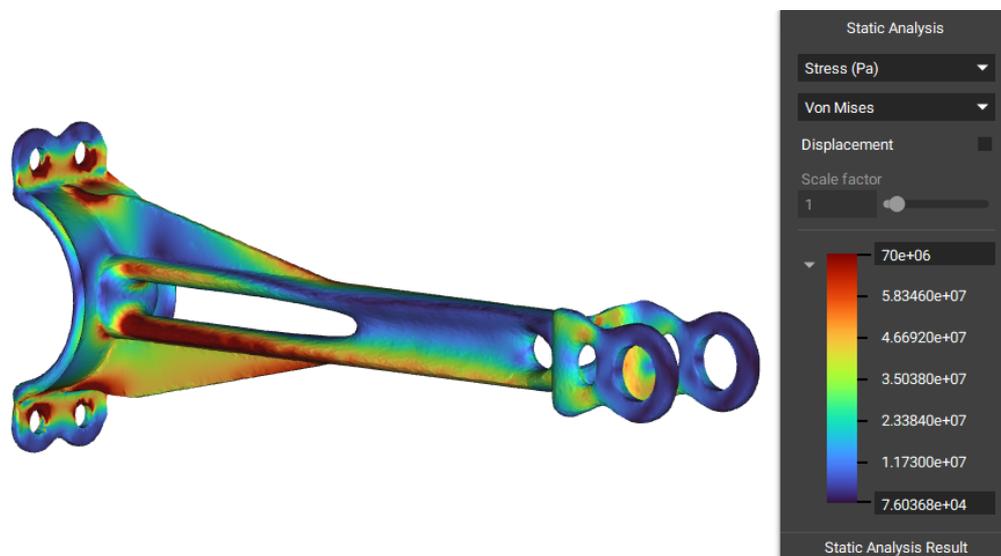


Figura 4.27: Stato tensionale nTopology AM

Capitolo 5

Progettazione generativa staffa

Il design generativo è un processo che determina la forma più efficiente in base a:

- Spazio di progettazione
- Materiale
- Vincoli
- Sollecitazioni definite

Il design generativo porta la progettazione da assistita dal computer a guidata dal computer, con il design tradizionale il progettista da la forma al componente in base a obiettivi di progettazione mentre con il design generativo gli algoritmi generano automaticamente forme in base alle opzioni di progettazione.

Il processo spesso si traduce in forme organiche simili a quelle viste in natura, quello che il progettista deve fare è guidare il software nell'area di lavoro, definendo vincoli, carichi e materiali in modo da affidare al generative design la forma da scegliere, in questo modo vengono generate diverse soluzioni basate sui reali vincoli della produzione e sui requisiti di performance del componente, come nella Figura 5.1.



Figura 5.1: Soluzioni generative design

Questo non significa che il software fa tutto il lavoro del progettista perché deve impostare i vincoli per la creazione del componente considerando l'applicazione finale, il peso, le forze, il materiale e in alcuni casi modificare la geometria per la produzione.

Una volta posto l'obiettivo si possono creare varie soluzioni diverse sulle quali vengono fatte delle analisi.

Il progettista deve mettere insieme conoscenze di produzione additiva e meccanica classica per valutare il componente finale, quindi serve un nuovo modo di pensare e di vedere i componenti diverso da quello tradizionale. [6]

5.1 Creazione del design space

Per determinare la forma più efficiente abbiamo realizzato uno spazio di progettazione con un volume molto maggiore rispetto quello della staffa iniziale, questo design space indica il massimo ingombro che il componente può occupare.

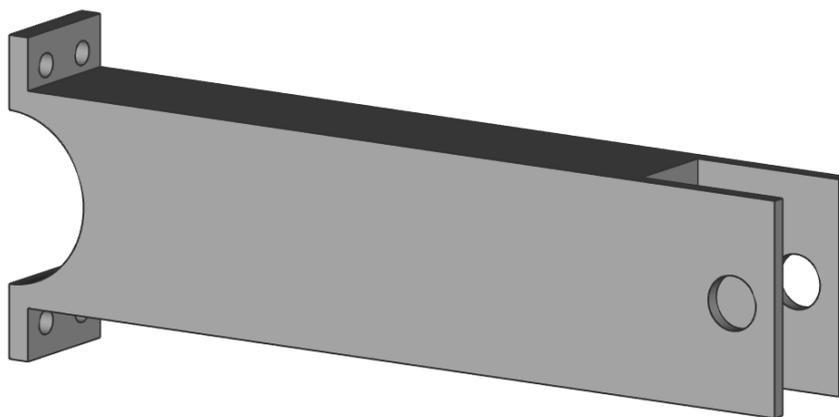


Figura 5.2: Spazio di progettazione maggiorato

	Staffa iniziale	Staffa volume maggiorato
Massa [g]	1165	7000
Voulme [cm^3]	423,6	2542,6

Tabella 5.1: Spazio di progettazione maggiorato

Come possiamo vedere nella Tabella 5.1 e nella Figura 5.2 abbiamo incrementato il volume del 83% partendo da un volume iniziale di $423,6 \text{ cm}^3$ fino ad arrivare a $2542,6 \text{ cm}^3$ per la staffa con spazio di progettazione maggiorato.

5.2 Software utilizzato e flusso di lavoro

Per questa analisi abbiamo utilizzato il software Solid Edge 2020 con il suo modulo di progettazione generativa, il flusso di lavoro resta uguale a quello eseguito precedentemente per l'ottimizzazione topologica, illustrato nella sottosezione 4.2. Quindi lo studio è eseguito con gli stessi casi di carico, l'unica cosa che varia è la definizione dello spazio di progettazione iniziale che adesso è molto più grande.

5.3 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti saranno molto diversi da quelli precedenti in termini di forma ma abbiamo cercato di mantenere inalterata la massa del componente, che rimane intorno ai 950g. Il momento di inerzia di un corpo è funzione della sua geometria, in particolare di come è distribuita la massa al suo interno, vedremo che il software tende a distribuire la massa in maniera tale da essere più distante dal suo asse di rotazione.

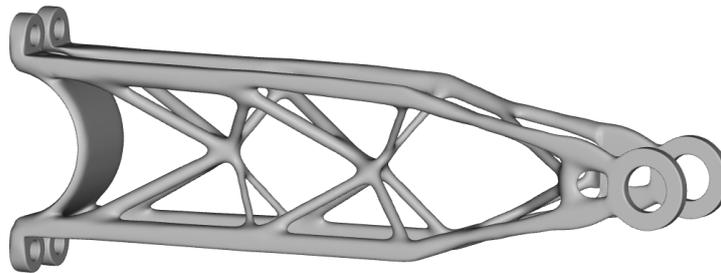


Figura 5.3: Ottimizzazione con vincoli per AM

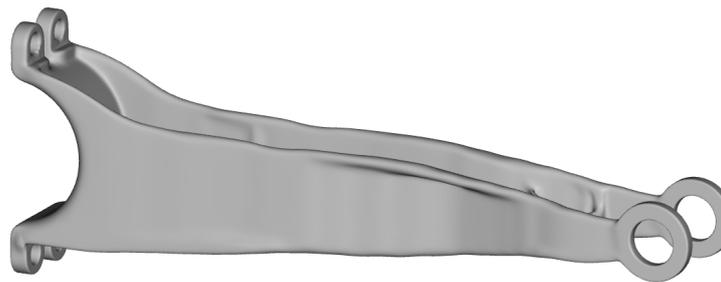


Figura 5.4: Ottimizzazione fusione

	Staffa volume maggiorato	Staffa AM	Staffa fusione
Massa [g]	7000	918	940
Voulme [cm^3]	2542,6	333,8	342

Tabella 5.2: Progettazione generativa Solid Edge 2020

Ora valuteremo la deformazione totale e lo stato tensionale del componente ottimizzato per la produzione additiva:

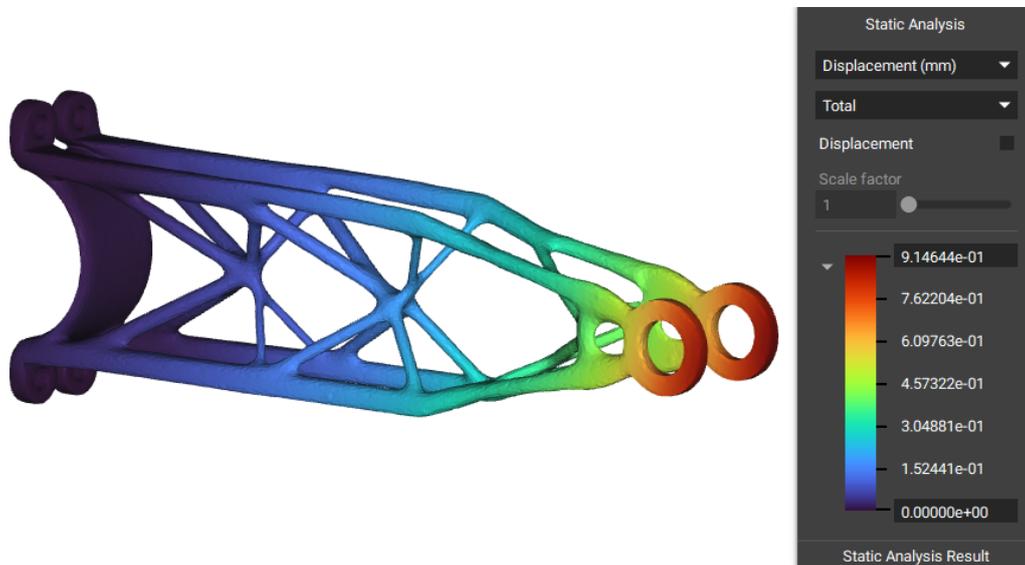


Figura 5.5: Deformazione Solid Edge AM Generative

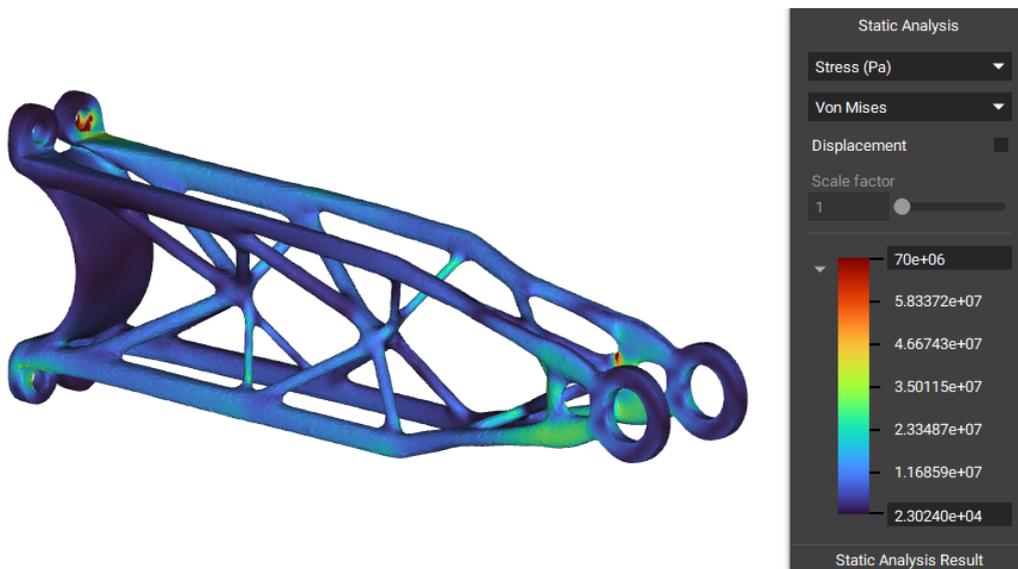


Figura 5.6: Stato tensionale Solid Edge AM Generative

5.3 Risultati ottenuti

Analizziamo la deformazione totale e lo stato tensionale del componente ottimizzato per il processo di fusione:

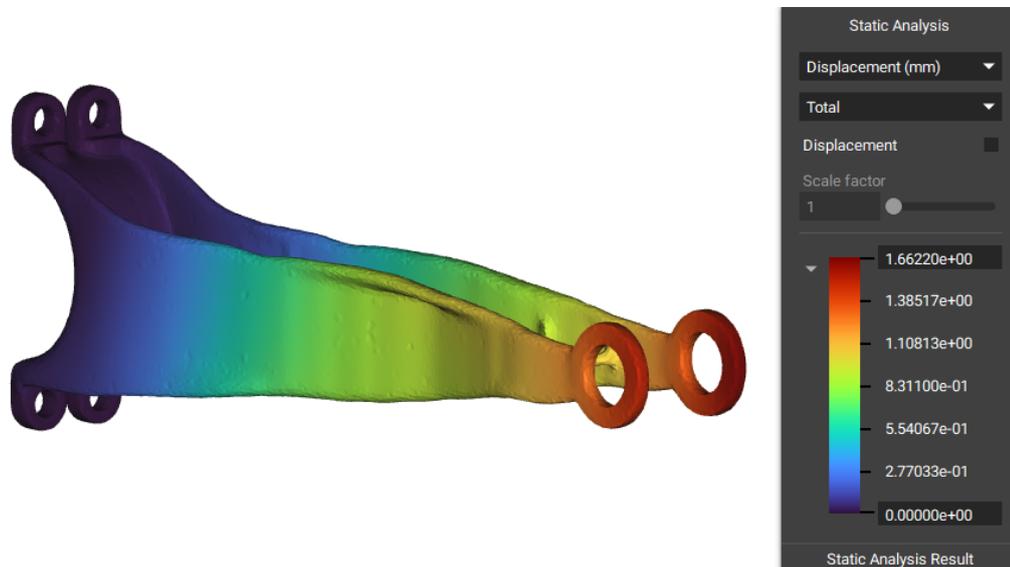


Figura 5.7: Deformazione Solid Edge Fusione Generative

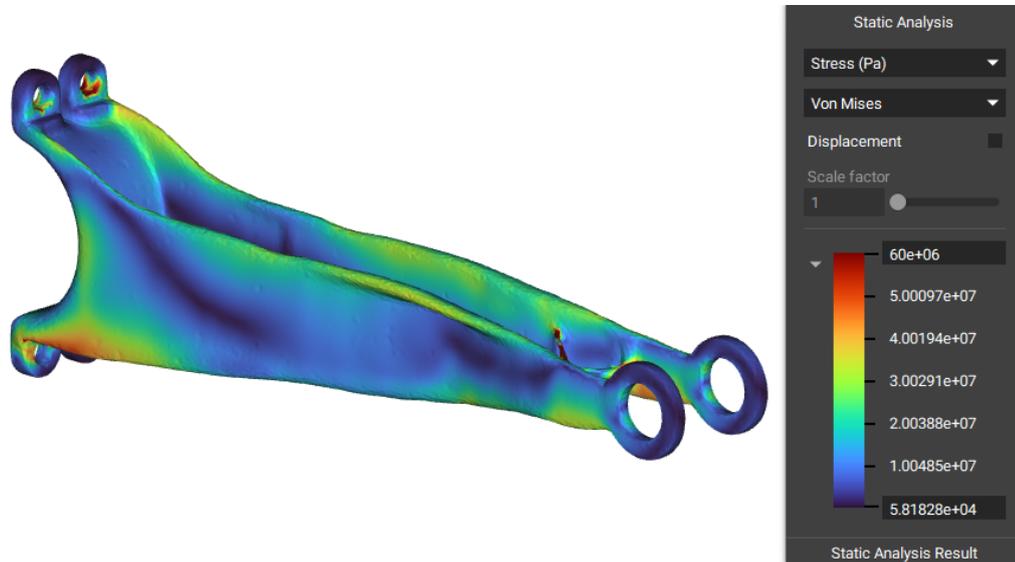


Figura 5.8: Stato tensionale Solid Edge Fusione Generative

Capitolo 6

Flusso validazione modelli

La validazione di tutti i modelli ottimizzati verrà fatta tramite un'analisi statica lineare sul software nTopology in modo da poter confrontare i risultati, tutti i modelli una volta ottimizzati hanno come risultato una geometria mesh che molte volte presenta vari problemi, come:

- Geometria non manifold
- Elementi che si sovrappongono o si intersecano
- Fori non precisi

Questi problemi rendono molto difficile la validazione del modello in quanto è difficile applicare le condizioni al contorno su un mesh, solo ANSYS 2020 R1 consente svolgere la validazione in modo molto semplice e senza andare a ridefinire le condizioni al contorno.

Tutte le altre geometrie devono essere trasformate in modelli solidi (stl to step) in modo da eliminare tutti i problemi e svolgere l'analisi statica, questi motivi hanno spinto alla scelta di nTopology per la validazione.

La piattaforma nTopology consente di trasformare una qualsiasi geometria mesh, anche danneggiata in un modello CAD tramite opportuni passaggi può generare una griglia di voxel (cubi) da una mesh di superficie, è possibile specificare la dimensione del voxel per catturare tutti i dettagli della parte ma la voxelizzazione non conserva spigoli vivi e angoli, una volta fatto questo si procede con una mesh quadrangolare e poi si crea il modello CAD che è esportabile come file STEP e si procede con l'analisi statica.

6.1 Riepilogo deformazione totale dei modelli finali

I risultati di tutte le analisi statiche sono state riassunte in queste due tabelle:

	Staffa iniziale	ANSYS Topology Optimization		Solid Edge Topology Optimization		nTopology
		Additive	Casting	Additive	Casting	Additive
Materiale	<i>AlSerie6000</i>	<i>AlSi10Mg</i>	<i>AlSi9Cu</i>	<i>AlSi10Mg</i>	<i>AlSi9Cu</i>	<i>AlSi10Mg</i>
Massa [g]	1165	845	881	880	888	836
Deformazione totale [mm]	2	2,5	4,6	2,9	4,3	6,3

Tabella 6.1: Tabella riassuntiva ottimizzazione topologica

La Tabella 6.1 mostra l'analisi statica lineare di tutte le geometrie ottimizzate topologicamente, nella prima riga sono presenti i software utilizzati, nella seconda riga le geometrie ottimizzate che sono divise in base al processo di produzione.

Notiamo che una volta effettuata l'ottimizzazione topologica la deformazione totale aumenta, questo è dovuto all'alleggerimento del componente iniziale di circa 300g e spesso una riduzione di massa implica una riduzione della resistenza meccanica. Osserviamo che per i due componenti realizzati per fusione, la deformazione totale è doppia rispetto al caso di produzione additiva questo può essere dovuto alla differenza del materiale o ai vincoli di estrusione da rispettare nell'ottimizzazione.

	Staffa iniziale	Solid Edge Generative Design	
		Additive	Casting
Materiale	<i>AlSerie6000</i>	<i>AlSi10Mg</i>	<i>AlSi9Cu</i>
Massa [g]	1165	918	940
Deformazione totale [mm]	2	9,15	1,7

Tabella 6.2: Tabella riassuntiva progettazione generativa

Mentre la Tabella 6.2 mostra i risultati dell'analisi statica lineare della geometria realizzata tramite progettazione generativa che è stata eseguita solo con Solid Edge 2020.

6.1 Riepilogo deformazione totale dei modelli finali

Per la progettazione generativa il risultato della staffa realizzata per il processo di fusione (Figura 5.4) è molto interessante perché è più leggera di $225g$ dalla staffa iniziale e sottoposta agli stessi carichi arriva ad una deformazione massima di $1,7mm$, una deformazione minore del progetto iniziale.

Per la staffa realizzata tramite produzione additiva la deformazione totale arriva a $9,15mm$, andando ad analizzare questo valore vediamo che la deformazione maggiore è data dalla forza sull'asse X di $200N$, questo può essere dato dal fatto che la struttura reticolare con puntoni della geometria non supporta bene i carichi laterali.

Capitolo 7

Analisi economica

In questo capitolo andremo ad effettuare un'analisi economica su diversi lotti di produzione per ottenere una stima dei tempi e costi per quattro processi in modo da rilevare quale sia il processo di produzione migliore.

7.1 Software utilizzato

Per l'analisi abbiamo utilizzato hyperlean LeanCOST, un software innovativo per la stima dei tempi, dei costi di produzione e per la generazione dei preventivi.

LeanCOST analizza ed estrae automaticamente le caratteristiche geometriche del modello e associa un ciclo di lavorazione.

I principali vantaggi sono:

- Calcolo del preventivo, generato a partire da un qualsiasi modello 3D
- Identificazione della miglior strategia produttiva, permette di simulare tempi e costi del ciclo produttivo di scenari alternativi in funzione delle quantità

7.1.1 Flusso di lavoro su hyperlean LeanCOST

Per il modello iniziale realizzato attraverso la carpenteria metallica andiamo a importare l'assieme e il software crea automaticamente la BOM (Bill of Materials) riconoscendo automaticamente la struttura del prodotto. Poi eseguiamo la costificazione di tutte le parti.

Per il modelli ottimizzati topologicamente la geometria del prodotto viene riconosciuta e si procede con l'analisi automatica della geometria del prodotto, così vengono estratti i parametri geometrici a partire dal caricamento dei modelli CAD.

Infine è possibile variare e simulare i costi in funzione delle quantità, tutti i costi e le quantità sono state esportate in Microsoft Excel per determinare i diagrammi costi/quantità.

7.2 Analisi comparativa e strategia produttiva

Con LeanCOST abbiamo realizzato una analisi economica su tutti i componenti considerando sei volumi di produzione differenti:

- 1 pezzo
- 10 pezzi
- 100 pezzi
- 1000 pezzi
- 10000 pezzi
- 100000 pezzi

Questo software considera le macchine e i tempi di produzione e in base al volume da produrre va a variare i processi, così automatizza sempre più il processo di produzione.

Per esempio, nel caso della fusione in terra per la produzione di un pezzo considera l'impianto di fusione manuale poi aumentando la produzione considera un impianto automatico, così anche per la foratura e fresatura prima manuale e poi automatica con un centro di lavoro.

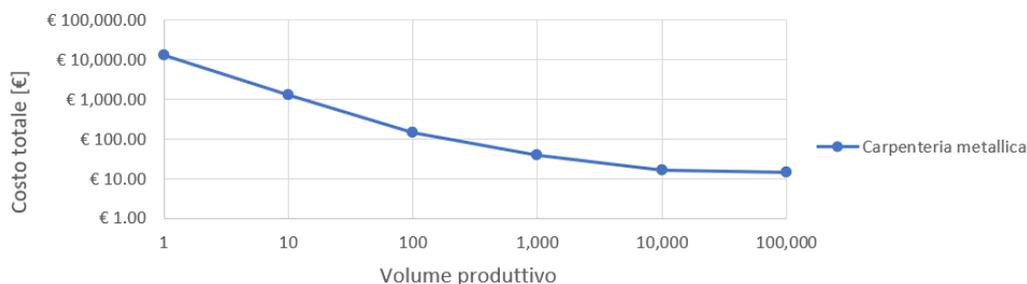


Figura 7.1: Analisi costo carpenteria metallica

Nel componente in produzione tramite il processo di carpenteria andiamo a considerare come costi tutti i tagli, le piegature, i fori e le operazioni di assemblaggio e saldatura. In questo caso anche con un volume di produzione di 10000 pezzi il costo dei componenti (materia prima) rimane alto mentre nel caso della pressofusione il costo della materia prima cala all'aumentare della produzione.

7.2 Analisi comparativa e strategia produttiva

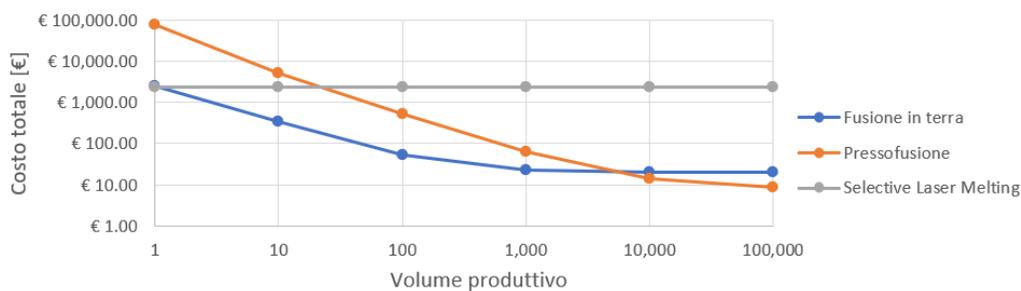


Figura 7.2: Analisi costo ottimizzazione topologica ANSYS 2020

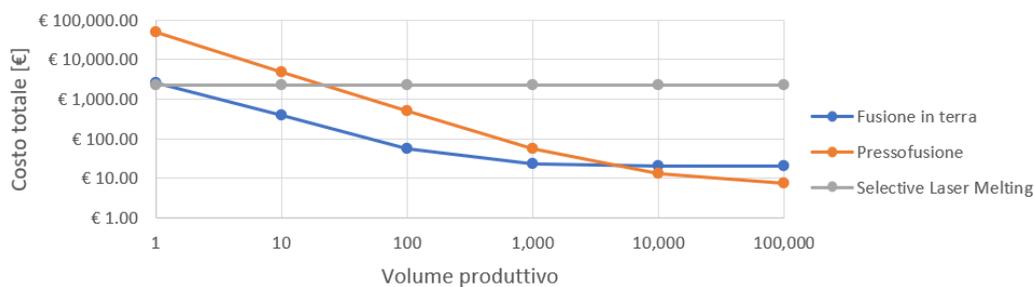


Figura 7.3: Analisi costo ottimizzazione topologica Solid Edge

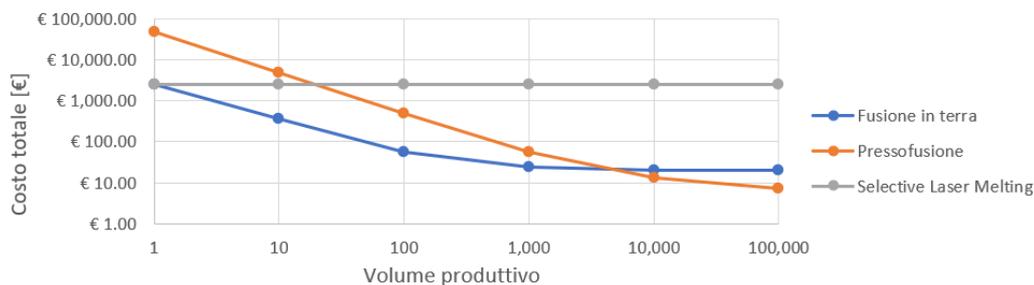


Figura 7.4: Analisi costo progettazione generativa

Nella Figura 7.2, Figura 7.3 e nella Figura 7.4 andiamo a graficare i sei volumi di produzione per tre processi di produzione differenti.

Osservando i tre grafici vediamo che le curve dei costi sono all'incirca uguali per le tre ottimizzazioni effettuate con software diversi, avremo che il costo dei componenti realizzati con la produzione additiva rimane costante mentre per i componenti realizzati con processi di fusione il costo si abbassa.

Adesso andiamo ad unire uno dei tre grafici con l'analisi del costo per carpenteria metallica:

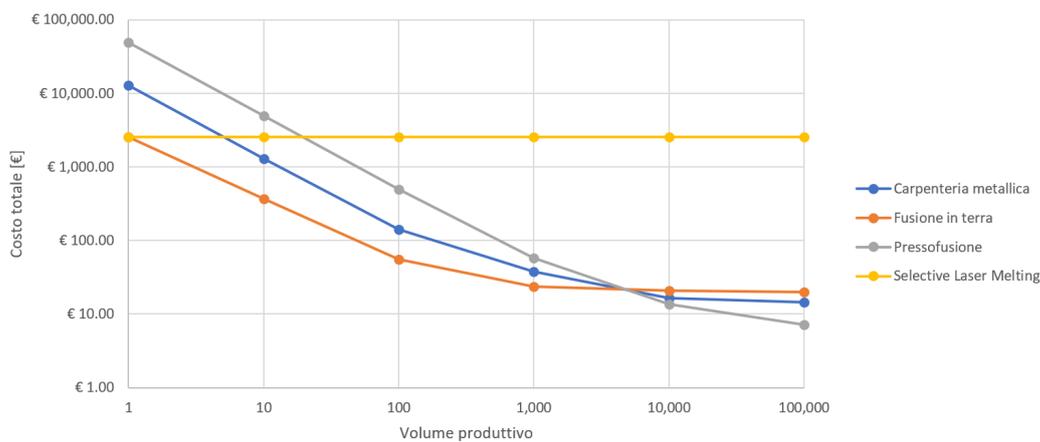


Figura 7.5: Riepilogo totale analisi costi

Nella Figura 7.5 siamo andati a raggruppare i costi del componente attualmente in produzione più i costi di produzione degli altri processi.

Da questi grafici possiamo osservare che il costo del componente realizzato attraverso la produzione additiva è invariante rispetto al volume di produzione, rimane costante, mentre per gli altri processi notiamo una diminuzione dei costi con l'aumentare del volume di produzione.

Nel grafico riepilogativo vediamo che per la realizzazione di prototipi è possibile utilizzare la produzione additiva o il processo di fusione in terra ma arrivando ad un volume di produzione di 10 pezzi la produzione additiva non è più conveniente.

Notiamo che per un volume di produzione di circa 8000 pezzi le curve dei costi del processo di pressofusione, fusione in terra e carpenteria metallica si intersecano, in questo punto possiamo utilizzare uno dei tre processi ma arrivando a 10000 pezzi risulta più conveniente utilizzare il processo di pressofusione.

Con l'aumentare del volume produttivo i costi della fusione in terra e della pressofusione scendono rapidamente in quanto l'ammortamento del modello e della formatura per la fusione in terra, e l'ammortamento dello stampo per la pressofusione viene diviso gradualmente sul numero dei pezzi.

Il processo di produzione additiva risulta vantaggioso solamente per la produzione di un solo componente.

Capitolo 8

Conclusioni

8.1 Considerazioni

Questo elaborato vuole verificare la validità dei risultati delle ottimizzazioni e a fornire ulteriori spunti di approfondimento.

Dopo avere usato i diversi software possiamo elencare dei punti a vantaggi e svantaggi dei relativi software:

ANSYS è il software più complesso ma anche quello più completo e prestante, dà la possibilità di inserire moltissimi vincoli di produzione e di rispettare molti obiettivi. ANSYS è l'unico software che ha la validazione del componente integrata una volta finita l'ottimizzazione, per tutti gli altri bisogna effettuare un'analisi FEM separata.

Solid Edge 2020 con il suo modulo di progettazione generativa è il software più veloce, intuitivo e con un'interfaccia user friendly. I suoi risultati possono essere utilizzati nei modelli di assemblaggio accanto ai tradizionali modelli e il modello ottimizzato può essere posizionato su fogli di disegno. Solid Edge dà la possibilità di mostrare la sollecitazione delle forme ottimizzate ma non ha nulla a che vedere con la validazione di ANSYS.

nTopology rivoluziona il modo di progettare un componente ma per adesso richiede un flusso di lavoro più lungo e complesso per l'ottimizzazione topologica, permette di utilizzare pochi vincoli di produzione rispetto agli altri software. nTopology è stato scelto per le analisi statiche per il vantaggio dei suoi flussi di lavoro riutilizzabili che una volta impostati possono essere usati per diverse geometrie cambiando pochi parametri.

I nuovi software di ottimizzazione topologica e progettazione generativa aprono nuove frontiere legate alla riduzione del peso dei componenti, eliminare la massa in eccesso è un vantaggio di chi produce perché utilizza un minor quantitativo di materia prima ma è un vantaggio anche per chi utilizza i componenti più leggeri, perché richiedono meno dispendio di energie e quindi costi minori, legati al trasporto o al movimento degli stessi.

8.2 Scenari futuri

Penso che in futuro l'alleggerimento dei componenti sarà molto importante sia nel campo dell'automotive per veicoli elettrici e sia nel campo dell'aerospazio.

Una delle tecnologie più prestanti è l'ottimizzazione con reticoli strutturali variabili in base alle sollecitazioni (lattice optimization), ad oggi risulta molto complesso simulare strutture complesse realizzate in questo modo perché c'è bisogno di una grande potenza di calcolo.

I vantaggi ottenuti dalla progettazione generativa daranno al progettista la possibilità di realizzare nuove morfologie prime inimmaginabili, a volte è possibile ottenere risultati migliori di quelli ottenuti tramite l'ottimizzazione topologica.

Saranno quindi i computer a progettare in futuro? L'intervento del progettista rimane indispensabile perché dovrà valutare i risultati forniti dal software come delle linee guida intorno alle quali progettare, tenendo in considerazione le diverse caratteristiche che i progetti hanno di volta in volta.

Bibliografia

- [1] Martin Steinert Anna Olsen Evangelos Tyflopoulos, David Tollnes Flem. State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs. *Researchgate*, August 2018.
- [2] S.Airoldi. Impiego di tecniche di ottimizzazione topologica nel processo di design. *Politecnico di Milano*, 2013/2014.
- [3] A.Forcellese. Slides additive manufacturing. *Università Politecnica delle Marche*, 2020.
- [4] A.Forcellese. Slides fonderia. *Università Politecnica delle Marche*, 2020.
- [5] L.Norsica. Progettazione di componenti in additive manufacturing attraverso la simulazione con sistema cae. *Università Politecnica delle Marche*, 2019/2020.
- [6] *Generative design optimize shapes to achieve design goals*. Siemens, 2017.