



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

RIPROGETTAZIONE E OTTIMIZZAZIONE
TOPOLOGICA DI UNA STAFFA PER USO
MOTOCICLISTICO

DESIGN AND TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A BRACKET FOR
MOTORCYCLE USE

TESI DI LAUREA DI:

JACOPO TINARI

RELATORE:

PROF. MICHELE GERMANI

CORRELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

Alla mia famiglia

Prefazione

In questa tesi si andrà ad affrontare tutto ciò che ruota attorno alla tecnologia di Additive Manufacturing, andando a esaminare il concetto di ottimizzazione topologica, reso possibile grazie all'utilizzo di alcuni software CAE.

Inoltre verrà studiato e analizzato il caso di un componente meccanico, inizialmente realizzato con tecnologie convenzionali, riprogettato e pensato per essere ottenuto in tecnologia additiva.

Lo scopo sarà appunto quello di andare a valutare la possibilità di realizzazione di tale componente cercando di generare, a parità di massa, ottime alternative che soddisfino o migliorino i valori di rigidità strutturale di partenza.

Indice

1	Introduzione	1
2	Additive Manufacturing	3
2.1	Tipologie	5
2.1.1	Material Extrusion (ME)	5
2.1.2	Material Jetting (MJ)	6
2.1.3	Binder Jetting (BJ)	7
2.1.4	Sheet Lamination	8
2.1.5	Vat Photopolymerization	9
2.1.6	Powder Bed Fusion (PBF)	10
2.1.7	Directed Energy Deposition (DED)	11
2.2	Materiali	12
2.2.1	Materiali Metallici	13
2.2.2	Materiali Polimerici	14
2.2.3	Materiali Compositi	15
2.3	Vantaggi e svantaggi dell'AM	15
2.4	Confronto con tecnologie tradizionali	16
2.5	Trattamenti post-processing	17
3	Ottimizzazione topologica	19
3.1	Processo	21
3.2	Vantaggi	22
3.3	Generative design	22
4	Software utilizzati	24
4.1	Solid Edge 2020	25
4.2	Ansys 2020	27
5	Case study: riprogettazione e ottimizzazione di una staffa	28
5.1	Analisi staffa	29
5.1.1	Carichi e vincoli	30
5.1.2	Analisi statica	32
5.2	Riprogettazione staffa	34
5.3	Ottimizzazione topologica	35
5.3.1	Flusso di lavoro	36
5.3.2	Risultati ottenuti	38

5.3.3 Verifiche strutturali in Ansys e problematiche riscontrate	43
5.4 Riepilogo e confronto modelli ottenuti	46
6 Conclusioni	47
6.1 Sviluppi futuri	49
Ringraziamenti	51
Bibliografia	54

Elenco delle figure

Figura 2.1: Componente di un motore aereo realizzato dalla compagnia DRAMA	4
Figura 2.2: Vertebra cervicale ottenuta in AM.....	4
Figura 2.3: Pedale del freno usato nei campionati Motorsport	5
Figura 2.4: Schema stampante ME	6
Figura 2.5: Funzionamento stampa MJ.....	7
Figura 2.6: Schema stampante Binder Jetting	8
Figura 2.7: Schema Sheet Lamination (UAM)	9
Figura 2.8: Funzionamento processo di stampa SLA	9
Figura 2.9: Schema PBF, con l'utilizzo di un laser e relativo specchio	11
Figura 2.10: Rappresentazione del processo DED con fascio laser e polveri (A) e fascio elettronico e filo (B).....	12
Figura 2.11: esempio di trattamento post processing (Levigatura chimica).....	18
Figura 2.12: Rimozione supporti post stampa	19
Figura 3.1: Ottimizzazione topologica di un componente	20
Figura 3.2: Workflow OT	21
Figura 3.3: Esempi di soluzioni ottenute col software "CREO" in Generative Design.....	23
Figura 4.1: Logo Solid Edge	26
Figura 4.2: Logo ANSYS	27
Figura 5.1: Staffa con relativi componenti fissati su di essa.....	28
Figura 5.2: Assieme Ducati 1100.....	29
Figura 5.3: Staffa con numerazione fori.....	30
Figura 5.4: Schema forza considerata.....	31
Figura 5.5: Schema momento flettente considerato e vincoli applicati	32
Figura 5.6: Andamento Deformazione (in mm) da analisi statica	33
Figura 5.7: Andamento tensione (in MPa) da analisi statica	33
Figura 5.8: Componente riprogettato.....	34
Figura 5.9: Staffa riprogettata nell'assieme	35
Figura 5.10: Comandi presenti nel modulo di Generative Design	36
Figura 5.11: Workflow processo generativo ottenuto.....	38
Figura 5.12: Impostazioni di Manufacturing per primo modello	39

Figura 5.13: Impostazioni di Manufacturing per il secondo modello	39
Figura 5.14: Primo modello ottimizzato (no estensione materiale)	41
Figura 5.15: Secondo modello ottimizzato (70% estensione materiale)	42
Figura 5.16: Vincoli e carichi in ANSYS.....	44
Figura 5.17: Risultati deformazione totale e direzionale (lungo z) in mm.....	45
Figura 5.18: Risultati della tensione (in MPa)	46
Figura 6.1: Confronto forma e deformazioni	48

Elenco delle tabelle

Tabella 2-1: Tabella riassuntiva stampa-materiali (Fonte: Wohlers Associates, Inc).....	13
Tabella 2-2: Principali leghe usate in AM (Fonte: Martin et al. Nature, 2017)	14
Tabella 5-1: Tabella riassuntiva	47

1 Introduzione

Nell'elaborato viene inizialmente fornito un inquadramento generale sull'Additive Manufacturing andando in primis a discutere dei vari processi produttivi più in uso sul mercato, introdurre i tipi di materiali utilizzati evidenziando le loro caratteristiche e le loro limitazioni, i trattamenti post-processing che i componenti possono subire ed infine evidenziare quali sono i vantaggi e svantaggi di tale processo produttivo confrontandoli con le tecnologie tradizionali.

Il capitolo successivo sarà focalizzato invece sull'ottimizzazione topologica, uno degli argomenti cardine dello studio, ovvero un metodo (matematico) utilizzato per ottenere geometrie con forme tali per cui si abbiano riduzioni di materiale e buone proprietà meccaniche allo stesso tempo.

Nello specifico si andranno a evidenziare le principali caratteristiche e il suo processo, per poi passare ad introdurre un altro metodo conseguente alla nascita dell'ottimizzazione topologica che prende il nome di Progettazione generativa e concludere l'argomento analizzando i vantaggi e le finalità di questi.

Nel terzo capitolo si darà spazio ai software utilizzati durante lo studio, nello specifico nella fase di progettazione e di ottimizzazione, quali SolidEdge e Ansys.

Per concludere, i restanti capitoli saranno incentrati nel caso di studio di una staffa di supporto per uso motociclistico, dove si procederà andando a:

- Studiare il componente di partenza nella forma, nei carichi e ai vincoli alla quale è soggetta ottenendo rispettivamente l'andamento delle sue deformazioni e tensioni;
- Riprogettare il componente di partenza, maggiorandone il volume, in modo tale da ottenere risultati più accurati di ottimizzazione topologica (OT), mantenendo le stesse condizioni al contorno;

- Ottenere, tramite OT, vari modelli a parità di massa del componente di partenza e verificare le loro caratteristiche strutturali;
- Analizzare e confrontare i vari risultati ottenuti.

Per il componente preso in esame i valori dei carichi sono stati calcolati andando ad effettuare delle ipotesi di partenza per cui i risultati ottenuti potrebbero discostare leggermente dalla realtà.

2 Additive Manufacturing

La produzione additiva conosciuta anche come Additive Manufacturing (AM) è un processo produttivo che consente la realizzazione di oggetti utilizzando tecniche anche molto diverse tra loro, ma che si basano principalmente sulla deposizione di strati successivi di materiale in maniera selettiva, layer dopo layer. Ciò contrasta con quanto accade in alcune delle tecniche di produzione tradizionali in cui si procede per sottrazione da pieno tramite processi di lavorazione come fresatura, foratura o tornitura.

La nascita di questa tecnologia risale addirittura agli inizi del XX secolo, ma uno dei primi modelli lanciati sul mercato risale a fine anni '80 con il modello di prototipazione rapida SLA (stereolitografia), dove grazie ad un laser si aveva la foto polimerizzazione di una resina [1].

Purtroppo tale processo non venne preso molto in considerazione sino a primi anni di questo ventennio visto l'elevato costo e la limitazione tecnologica dell'epoca che continuò quindi a lasciare spazio alle tecnologie tradizionali.

Nell'AM, nonostante si abbiano varie alternative, è possibile evidenziare un unico processo di produzione comune per tutti.

In primis si parte con la realizzazione del modello al CAD, poi si passa nel convertire tale file in formato STL (Standard Triangulation Language) che viene elaborato dalla macchina per definire l'orientamento del pezzo, la direzione di accrescimento e di eventuali supporti, utilizzati principalmente per non deformare il componente ed anche sorreggerlo.

Una volta terminato ciò, attraverso appositi software, il modello è sottoposto allo *Slicing*, dove si vanno ad impostare tutti i parametri di stampa a partire dallo spessore degli strati, velocità, tempi ed altro, così da poter dare il via al processo di stampa vero e proprio.

Al termine del processo il componente può subire dei trattamenti al fine di migliorare la qualità superficiale e/o proprietà meccaniche.

Ad oggi la produzione additiva ha preso largo spazio in quasi tutti i settori e non più solo come prototipazione rapida ma soprattutto per realizzare parti funzionali “*functional parts*” specialmente in:

- **Campo aerospaziale**, dove è fondamentale cercare di ottenere componenti molto leggeri, resistenti e con geometrie complesse;



Figura 2.1: Componente di un motore aereo realizzato dalla compagnia DRAMA

- **Campo medico**, settore dove viene ampiamente usata per poter realizzare protesi, tutori ed anche, in futuro prossimo, vere e proprie riproduzioni di organi;



Figura 2.2: Vertebra cervicale ottenuta in AM

- **Campo automobilistico**, specialmente per quanto riguarda veicoli da competizione, ma non solo.



Figura 2.3: Pedale del freno usato nei campionati Motorsport

2.1 Tipologie

Per poter classificare le varie tipologie di processo additivo è necessario riferirsi alla recente normativa ISO/ASTM52900-15 (*Standard Terminology for Additive Manufacturing*) dove sono state definite sette categorie che verranno analizzate in maniera molto sintetica [2]:

2.1.1 Material Extrusion (ME)

La tecnologia ME si basa sull'utilizzo di un materiale, generalmente termoplastico che, attraverso un estrusore, viene scaldato fino ad uno stato semi-solido per poi essere depositato sullo strato di materiale sottostante.

La deposizione e l'indurimento progressivo degli strati consente la fabbricazione dal basso verso l'alto, difatti durante il processo di stampa, ad ogni layer si ha l'abbassamento del piatto o l'innalzamento della testina lungo l'asse z.

Le caratteristiche che contraddistinguono il Material Extrusion sono la finitura superficiale grezza dovuta all'altezza dei singoli layer (solitamente 200 μm), scarse proprietà meccaniche e l'uso frequente di materiali di supporto per evitare il collasso della struttura durante la stampa.

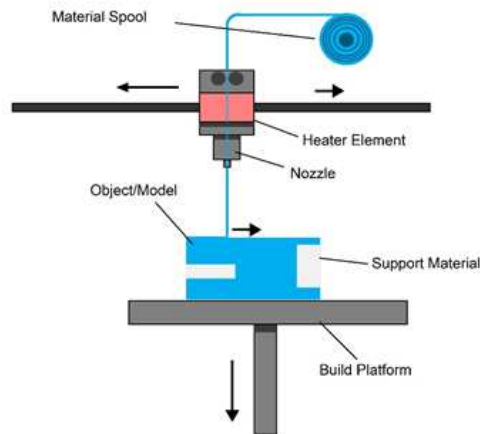


Figura 2.4: Schema stampante ME

2.1.2 Material Jetting (MJ)

Per quanto riguarda il MJ sfrutto una testina simile alle stampanti Inkjet, la differenza sta appunto nel materiale liquido che viene depositato sul piatto di stampa.

I materiali devono essere fotosensibili affinché possano solidificare sotto la luce ultravioletta (UV) generata da una sorgente posta di fianco la testina.

I più usati risultano essere cere, resine acriliche e fotopolimeri e a seconda del tipo che viene scelto possiamo identificare due sottogruppi di tale tecnologia:

- *MJM*
- *PolyJet*

Inoltre per quanto riguarda le principali caratteristiche si hanno buone finiture superficiali (spessore layer in media sui 15-20 μm), buone tolleranze ($\pm 20 \mu\text{m}$) e discrete proprietà meccaniche.

Un grande svantaggio riguarda le deformazioni che possono avvenire anche a temperatura molto ridotte (30 ÷ 60 °C).

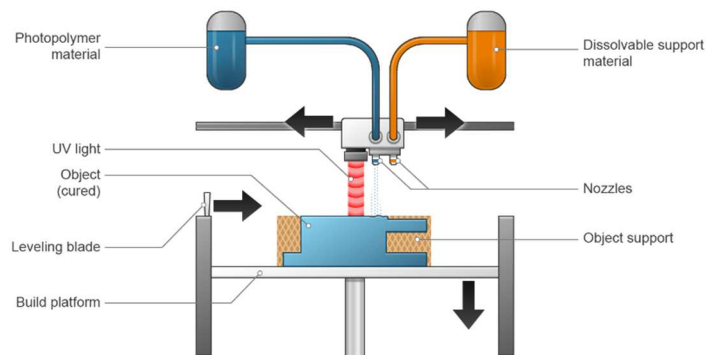


Figura 2.5: Funzionamento stampa MJ

2.1.3 Binder Jetting (BJ)

Il Binder Jetting è un processo additivo che utilizza due materiali, uno di costruzione a base di polvere (metallica, plastica o compositi) e un legante solitamente in forma liquida che fuoriesce da una testina.

Un letto di polveri viene steso sul precedente e in maniera selettiva si lega allo strato sottostante.

Questo tipo di processo viene molto utilizzato per presentare prototipi o modelli a scopo dimostrativo, vista la loro fragilità a causa dall'incollaggio a temperatura ambiente. Allo stesso tempo presenta molti aspetti positivi quali: la buona finitura ottenibile post lavorazione (fino a 3 μm), il volume di produzione elevato e il basso costo del processo.

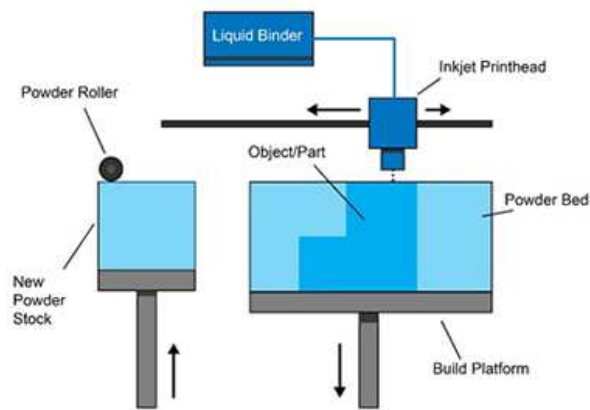


Figura 2.6: Schema stampante Binder Jetting

2.1.4 Sheet Lamination

Questo processo di Additive consiste nell'unione di fogli di materiali che vengono opportunamente tagliati e sovrapposti tra loro strato dopo strato.

Esistono due differenti tecnologie che prendono il nome di produzione additiva ad ultrasuoni (UAM) e la produzione additiva di oggetti laminati (LOM).

Nella prima si utilizzano fogli o nastri di metallo, che sono legati insieme mediante saldatura ad ultrasuoni, mentre nella seconda utilizzo fogli di carta come materiale di costruzione e un adesivo al posto del processo di saldatura.

Gli aspetti più evidenti di tali processi sono il basso costo, la velocità del processo e altezze dei singoli layer abbastanza importanti ($100 \div 200 \mu\text{m}$).

Per quanto riguarda la resistenza e l'integrità del modello dipende dall'adesivo utilizzato ed infine per la post lavorazione per l'UAM deve essere effettuato su CNC.

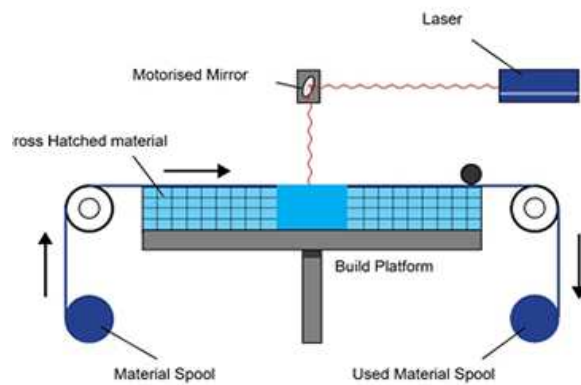


Figura 2.7: Schema Sheet Lamination (UAM)

2.1.5 Vat Photopolymerization

Anche qui come nel caso precedente esistono dei sottogruppi di tale tecnologia, la più diffusa è la stereolitografia (SLA) mentre l'altra è la DLP ovvero il processo a luce "digitale" (digital light processing).

Qui si utilizza una resina fotopolimerica liquida, strato dopo strato, per poter realizzare il modello e, per far polimerizzare o comunque far indurire la resina, si utilizza una luce ultravioletta.

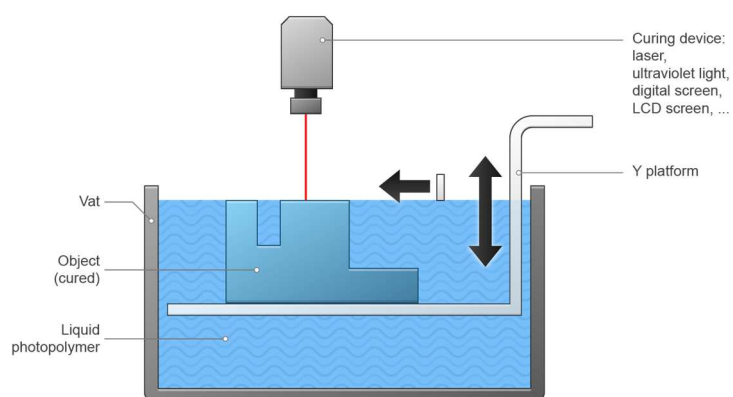


Figura 2.8: Funzionamento processo di stampa SLA

Questo processo non necessita di supporti, come ad esempio per il ME, risultano essere abbastanza fragili per sostenere grossi carichi, hanno proprietà meccaniche isotropiche e presentato molto spesso fenomeni di *curling* ovvero dei ritiri durante la solidificazione che causano forti tensioni interne e in alcuni casi fenomeni di arricciamento della parte.

2.1.6 Powder Bed Fusion (PBF)

Il processo di fusione a letto di polveri sfrutta energia termica per fondere e solidificare una regione dello strato di polveri depositato, strato dopo strato.

Completato uno strato, la piattaforma mobile si muove verso il basso e un elemento mobile orizzontale (solitamente un rullo) deposita nuova polvere per lo strato successivo e la polvere non processata viene recuperata per poi essere riutilizzata.

Esistono anche qui varie famiglie di questa tecnologie. Le differenze sostanziali riguardano il tipo di fascio luminoso utilizzato e le condizioni di lavoro durante il processo di stampa.

Le più comuni sono:

- *Selective Laser Sintering (SLS)*
- *Selective Laser Melting (SLM)*
- *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*
- *Electron Beam Melting (EBM)*

I primi 3 processi utilizzano tutti un laser come fonte luminosa per solidificare le polveri (con uno specchio per direzionarlo), mentre nell'ultimo processo viene usato un fascio di elettroni direzionati da magneti rotanti.

Il PBD è sicuramente uno dei processi più utilizzati quando si ha la necessità di utilizzare metalli come materiale. Infatti oltre alla vasta gamma di polveri metalliche adottare si è visto come i modelli ottenuti abbiano una ottima resistenza a trazione, paragonabili ai processi tradizionali anche se risultano essere più fragili a causa della loro elevata porosità interna.

Altre caratteristiche di questa tecnologia additiva sono la lunga permanenza dei pezzi in camera di stampa, per fattori legati alla qualità, e il problema del restringimento e della deformazione ($\approx 3\%$).

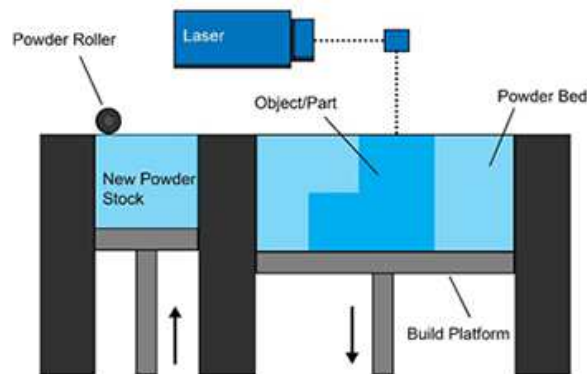


Figura 2.9: Schema PBF, con l'utilizzo di un laser e relativo specchio

2.1.7 Directed Energy Deposition (DED)

L'ultima tecnologia additiva tra quelle indicate dalla normativa è il Directed Energy Deposition, dove la polvere viene trasportata da un gas inerte chiamato di protezione, che permette al materiale di essere soffiato lungo la traiettoria del fascio laser (o elettronico) in modo selettivo.

Il fascio viene erogato simultaneamente alla polvere attraverso un ugello che può muoversi in più direzioni (4 o 5 assi) rispetto ad altri presenti negli processi precedenti e così permettere al materiale di essere depositato da qualsiasi angolo e lato.

Ciò porta ad una costruzione non più limitata a strati orizzontali consecutivi come si è solito osservare.

L'Energia del laser fonde parzialmente le particelle di metallo, che si fondono completamente solo a contatto con il bagno di fusione creando un legame metallico tra la polvere e il substrato.

Oltre alle polveri che nella stragrande maggioranza sono metalliche, è possibile anche utilizzare del filo, sfavorito però a causa della riduzione di precisione nel processo.

Gli spessori che possono assumere i layer variano da $90 \div 200 \mu\text{m}$ con discrete finiture superficiali, che possono essere migliorate attraverso i processi post-processing.

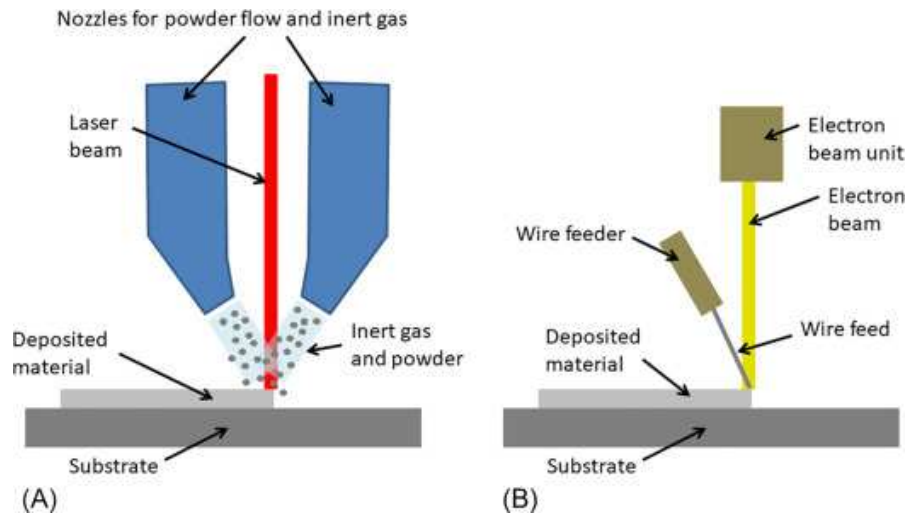


Figura 2.10: Rappresentazione del processo DED con fascio laser e polveri (A) e fascio elettronico e filo (B)

2.2 Materiali

Per quanto riguarda i materiali si è visto che è possibile usufruire di una vasta gamma ed anche in diversi stati come solidi, liquidi o anche polveri.

Negli ultimi anni si cerca sempre più di espandere questo catalogo per ricercare delle alternative valide, economiche e funzionali.

Attualmente possiamo considerare 3 principali categorie, ovvero materiali metallici, polimerici e compositi, i quali verranno analizzati più nel dettaglio. [3]

Esistono anche altre tipologie come per esempio quelli ceramici che sono numericamente limitati e difficili da lavorare a causa della loro bassa tenacità e l'alto punto di fusione.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva [4] che mostra i possibili materiali utilizzabili nei vari processi additivi riportati precedentemente:

	Material extrusion	Material jetting	Binder jetting	Vat photopolymerization	Sheet lamination	Powder bed fusion	Directed energy deposition
Polymers, polymer blends	X	X	X	X	X	X	
Composites	X	X	X	X	X	X	
Metals	X	X	X		X	X	X
Graded/hybrid metals					X		X
Ceramics	X	X	X	X		X	
Investment-casting patterns		X	X	X		X	
Sand molds and cores	X		X			X	
Paper/wood	X				X		

Tabella 2-1: Tabella riassuntiva stampa-materiali (Fonte: Wohlers Associates, Inc)

2.2.1 Materiali Metallici

L'uso dei materiali metallici, usati con più frequenza nel Powder Bed Fusion e nel Directed Energy Deposition, permettono di ottenere componenti nella produzione additiva con ottime proprietà meccaniche ma con costi molto più elevati.

Generalmente i metalli utilizzati vengono usati in stato di polveri e per renderli tali si fa uso di un processo chiamato atomizzazione, che permette di ottenere particelle sferiche, di granulometria ben definita e con una composizione chimica omogenea.

Tra i più in uso si ha:

- Acciaio
- Leghe di Cobalto-Cromo
- Alluminio e sue leghe
- Titanio e sue leghe

Al contrario di come si pensi il numero di leghe attualmente stampabili è in piccolissima parte [5]. Difatti su circa 5000 leghe attualmente conosciute pochissime sono compatibili con i processi di stampa per problematiche dovute alla loro temperatura di fusione e soprattutto alle dinamiche relative alla solidificazione molto rapida (velocità di circa 10^5 K/s) che portano microstrutture non tollerate e con formazione di cricche interne.

Alloys	Metal Powder
Cobalt Based Powders	CoCr (ASTM F75)
	CoCr28Mo6 (ASTM F799)
Nickel Based Powders	Inconel 625
	Inconel 713
	Inconel 718
	Inconel 738
	Inconel 939
	Hastelloy X 276
	Haynes® 230
Aluminum Based Powders	AlSi7Mg
	AlSi10Mg
	AlSi12
	AlSi9Cu3
	Scalmalloy® (Airbus Group)
Iron Based Powders	Stainless Steel 304L (1.4306)
	Stainless Steel 316L (1.4404)
	Stainless Steel 17-4PH (1.4542)
	Stainless Steel 15-5PH (1.4545)
	Mould Steel (1.2344)
	Maraging Steel (1.2709)
	CORRAX Precipitation Hardening SS
Titanium Based Powders	Titanium Grade 2
	Titanium Ti6Al4V
	Titanium Ti6Al7Nb
Other Alloys	Invar (1.3912)
	Nitinol 55
	Bronze

Tabella 2-2: Principali leghe usate in AM (Fonte: Martin et al. Nature, 2017)

2.2.2 Materiali Polimerici

Per quanto riguarda i materiali polimerici in Additive hanno un largo uso per la loro elasticità di utilizzo in svariati campi, bassi costi e minor rigidità rispetto anche alle altre tipologie.

Si possono identificare 2 macro gruppi ovvero quelli termoplastici e termoindurenti i quali si differenziano sostanzialmente per il numero di volte che possono essere rifusi.

I principali materiali polimerici sono:

- PLA
- ABS
- PVA
- HDPE
- Nylon

Tra questi, i primi due sono preferiti in processi additivi dove si ha l'estrusione del materiale, ad esempio nel ME, per le loro caratteristiche di fusione e il loro comportamento amorfo.

Mentre per i materiali che vengono utilizzati sotto forma di polveri si procede all'operazione di macinazione criogenica o coestrusione per renderli tali.

2.2.3 Materiali Compositi

Come ultima tipologia si introducono i materiali compositi ottenuti combinando due o più elementi, dove da una matrice di partenza vengono aggiunti elementi come fibre o altro che ne aumentano le proprietà meccaniche e fisiche.

Possiamo distinguere 3 sottogruppi:

- Compositi a matrice metallica
- Compositi a matrice polimerica
- Compositi a matrice ceramica

2.3 Vantaggi e svantaggi dell'AM

Attualmente la tecnologia additiva si sta affermando sempre più e ad oggi possiamo affiancarla senza nessun problema alle tecnologie tradizionali. Difficilmente una sostituirà l'altra o viceversa perché in ognuno dei processi si hanno benefici e svantaggi.

Per quanto riguarda alcuni dei vantaggi di spicco dell'AM notiamo la:

- Realizzazione di componenti di volume ridotto e conseguente riduzione di peso
- Maggiore libertà progettuale
- Geometrie molto complesse
- Riduzione degli scarti
- Possibilità di produrre un unico componente che con altre tecnologie non risulta possibile
- Basso costo manodopera
- Alto grado di personalizzazione
- Abbattimento dei costi per utensili, stampi o e altre attrezzature

Ma d'altro canto ci sono anche alcuni punti deboli come [6]:

- Elevati costi di materiali e macchine
- Tensioni residue e distorsioni
- Limitato spazio di produzione, dipendente dalla macchina
- Spessore minimo layer limitato in alcuni processi e porosità
- Tempi di produzione lunghi
- Necessità di trattamenti post processing

2.4 Confronto con tecnologie tradizionali

Con le tecnologie tradizionali intendiamo i processi *sottrattivi* (tornitura, fresatura, rettifica), quelli di *fonderia* e quelli di *stampaggio*.

La prima differenza che si nota con i processi di AM e quelli sottrattivi è appunto il fatto che nel primo aggiungo materiale per arrivare al prodotto finale, riducendo anche al minimo gli sprechi, mentre nel secondo parto da un pieno per arrivare alla geometria finale.

Mentre relazionandoci al tipo di microstruttura che si ottiene in Additive, cioè una microstruttura molto fine dovuta al rapido e uniforme raffreddamento lungo tutto il pezzo, è possibile ottenere rispetto ad un processo di fusione migliori qualità sotto l'aspetto meccanico, chimico e fisico.

Infatti nel casting la velocità di raffreddamento non risulta essere uniforme come in AM visto che la superficie esterna a contatto con la forma tende a raffreddarsi più velocemente della zona interna. Ciò porta a microstrutture differenti all'interno del pezzo (grani allungati e maggiorati) rispetto all'esterno (grani fini) con conseguente variazione delle sue proprietà fisiche, chimiche e meccaniche.

Infine per i processi di stampaggio, nonostante diano ottimi risultati a livello globale risultano in alcuni casi sostituibili dai processi additivi per questioni legate ad esempio legate alla produzione, costo e tempistiche di produzione degli stampi e ai lotti di produzione.

2.5 Trattamenti post- processing

Come accennato nei paragrafi precedenti quasi tutti i processi di stampa necessitano di trattamenti post lavorazione che ne migliorano la finitura superficiali, le loro proprietà meccaniche o anche semplicemente per rimuovere i supporti. [7] [2].

Per poter migliorare le proprietà meccaniche (in materiali polimerici) si procede con un processo chiamato *Infiltration* nel quale si stende una resina epossidica superficialmente con lo scopo di riempire le cavità presenti nel pezzo e ridurre così la porosità con conseguente miglioramento delle proprietà meccaniche e superficiali.

Per i processi di sola finitura superficiale si utilizzano svariate metodologie anche a seconda del tipo di materiale.

Per i polimerici solitamente si attuano processi di *verniciatura* o *levigatura chimica*, nel quale il componente viene immerso in dei bagni di solventi chimici. Il risultato che ne viene fuori è visibile in Figura 2.11: esempio di trattamento post processing (Levigatura chimica).

Mentre per i materiali metallici e compositi si preferisce utilizzare metodi come *l'abrasione a vasca vibrante, a ultrasuoni, sabbiatura e elettro placcatura*.

In questi ultimi tempi ci sono sviluppi molto incoraggianti sull'utilizzo di laser che, lavorando su ogni singolo strato, permettono di migliorare notevolmente la superficie della parte. Ad oggi è possibile solamente su superfici piane o comunque con forme abbastanza semplici.



Figura 2.11: esempio di trattamento post processing (Levigatura chimica)



Figura 2.12: Rimozione supporti post stampa

3 Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica (OT) è un metodo matematico utilizzato per la modifica e riprogettazione di componenti. Lo scopo è quello di andare a ottimizzare il layout del materiale per ottenere un modello finale con peso ridotto e con performance migliori.

Questo tipo di ottimizzazione deve tener conto allo stesso tempo dei limiti imposti dal progettista sulla geometria di partenza come vincoli, carichi e altre condizioni al contorno.

Nel processo, i software non tengono conto dell'estetica o della facilità di fabbricazione essendo l'algoritmo matematico basato esclusivamente sull'analisi strutturale (FEM). Tutto ciò portò ad un rallentamento nello sviluppo di tale processo che, nonostante sia nato nei primi anni '80, non venne preso molto in considerazione dato che i modelli generati risultavano con una geometria abbastanza complessa per esser realizzati con le tecnologie tradizionali.

Mentre al giorno d'oggi con l'affermarsi delle tecnologie additive e il miglioramento dei metodi tradizionali si è superato quasi completamente questo scoglio sui problemi di produzione e si può dire che avanzano di pari passo.

Esistono vari tipi di ottimizzazione oltre quella *topologica*, come l'ottimizzazione *della forma* e *dimensionale* le quali sono, tra l'altro, le prime ad essere state adottate [8].

In quella di forma la struttura viene già determinata dal componente di partenza e non può essere modificata. Le uniche modifiche possibili riguardano ad esempio la distribuzione dello spessore di un elemento della struttura, diametri e forme dei fori.

Comportamento simile si ha nella ottimizzazione dimensionale dove anche qui la forma della struttura già è nota a priori e si possono fare leggere variazioni sulla dimensione delle parti.

Una differenza sostanziale tra l'ottimizzazione topologica e quelle discusse sta nell'utilizzo in differenti fasi progettuali oltre che nella forma ottenuta. Difatti per quella di forma e dimensionale, limitate a geometrie già scelte, possono essere attuate solo a fine fase progettuale a differenza della OT che può essere applicata anche agli inizi (non avendo nessun tipo di vincolo).



Figura 3.1: Ottimizzazione topologica di un componente

3.1 Processo

Il processo di ottimizzazione topologica è standard per tutte le varie casistiche che si studiano. Possiamo racchiudere il tutto in queste 4 fasi:

1. Ottenuto il modello CAD, si procede con applicare forze, vincoli e con la selezione delle zone che per il processo di OT deve far rimanere inalterate;
2. Fatto ciò si segue con l'analisi strutturale agli elementi finiti (FEM) per individuare la rigidità della struttura e evidenziare i punti più sollecitati;
3. A questo punto si ha l'inizio dell'ottimizzazione che, basandosi sui parametri inseriti nel punto 1, sui risultati delle analisi e su gli ulteriori parametri come la massa target, mi permette di ottenere in output il risultato finale;
4. Solitamente, si conclude effettuando nuove prove al fine di ottenere risultati migliori dei precedenti.

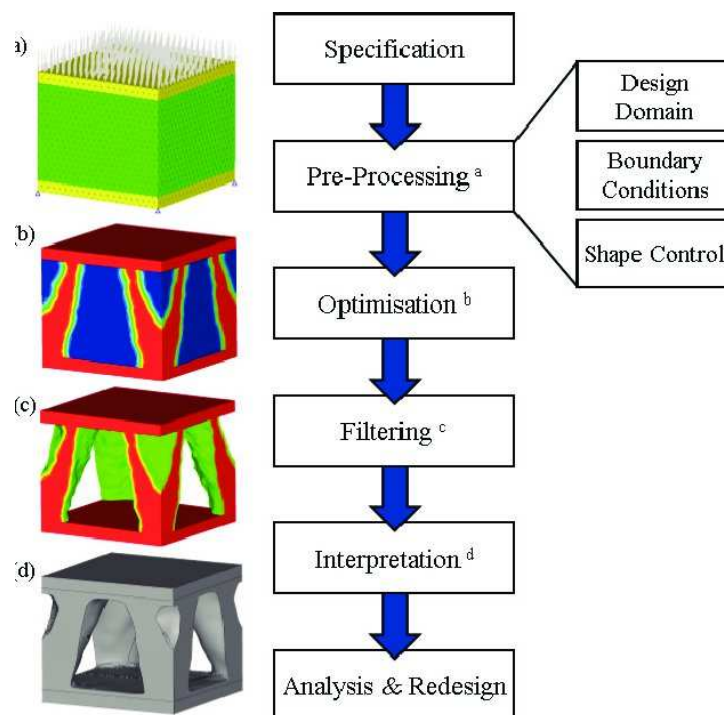


Figura 3.2: Workflow OT

3.2 Vantaggi

I vantaggi che la ottimizzazione topologica ha da offrire sono:

- Creare soluzioni efficaci in termini di costo e peso
- Minor spreco di materiale, specialmente se pensato con produzione additiva, e conseguente minor impatto ambientale
- Ridurre le fasi di post-processo
- Ottenere geometrie complesse e innovative, difficilmente realizzabili e pensabili per un essere umano.

3.3 Generative design

Il generative design, o progettazione generativa, è un metodo per creare in modo autonomo progetti ottimali a partire da un insieme di requisiti stabiliti in partenza.

Ottimizzazione topologica e progettazione generativa comunemente vengono considerati come la stessa cosa. In fondo hanno gli stessi obiettivi, ma in realtà il secondo è un concetto molto più recente che estende i limiti che si hanno con l'OT.

In parole povere: l'ottimizzazione topologica converge su un'unica soluzione basata solo su obiettivi funzionali, vincoli e carichi, trovando una soluzione alla volta. La progettazione generativa invece elabora simultaneamente più soluzioni basate sia su requisiti funzionali che non ingegneristici.

Inoltre si può dire che, con la ottimizzazione topologica si è vincolati e influenzati per forza di cose dal componente di partenza che rimane immutato, mentre con questo nuovo metodo non è così. Impostando tutto ciò di fondamentale (anche riguardo la produzione) vengono generate soluzioni da zero, anche del tutto innovative, che solamente tramite un computer possono essere elaborate.

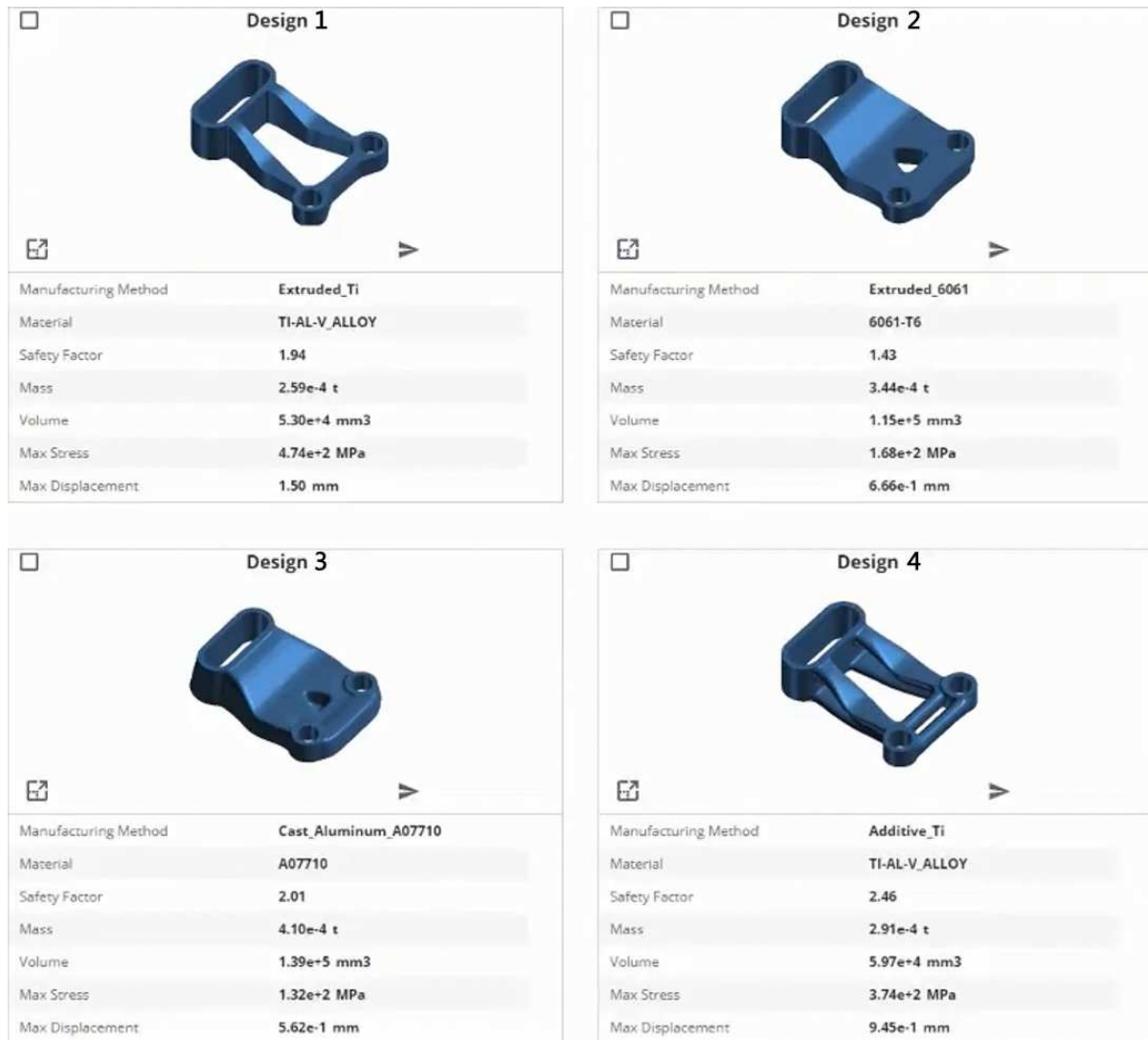


Figura 3.3: Esempi di soluzioni ottenute col software "CREO" in Generative Design

4 Software utilizzati

Per il lavoro di tesi sono stati utilizzati due software:

- Solid Edge 2020
- Ansys 2020

i quali hanno permesso di poter analizzare il componente nella sua forma di partenza, riprogettarlo, ottimizzarlo e infine analizzarlo nuovamente per ottenere risultati validi e confrontabili.

Questi due rientrano nei software chiamati CAE (Computer Aided Engineering) [9], ovvero programmi informatici per la simulazione delle prestazioni del componente, grazie a opportuni algoritmi matematici.

Lo scopo è migliorare il prodotto e semplificare la soluzione dei problemi di progettazione in un'ampia gamma di settori. La tecnologia CAE interessa la simulazione, la convalida e l'ottimizzazione di prodotti e processi.

Solid Edge oltre che software CEA rientra anche come software CAD (Computer Aided Design) visto che è in grado di progettare modelli in 2D e/o 3D.

Un processo CAE comprende in genere tre fasi:

- Pre-processing
- Soluzione
- Post-processing.

Nella prima fase, si modella la geometria o la rappresentazione del sistema e si specificano le proprietà fisiche del progetto, definendo l'ambiente mediante vincoli o carichi applicati. In seguito il modello viene risolto usando una formulazione matematica appropriata del livello fisico sottostante. Nella fase di post-processing, i risultati vengono messi a disposizione per la revisione ed eventuale approvazione.

Tra i vantaggi che la tecnologia CAE ci permette di ottenere ci sono la riduzione dei tempi, dei costi associati allo sviluppo del prodotto e il miglioramento della qualità e della durabilità dei prodotti.

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

- Analisi dinamica e analisi della sollecitazione di componenti e 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)
- Simulazione dei processi di produzione, ad esempio fusione, stampa e pressofusione
- Ottimizzazione del prodotto o del processo.

4.1 Solid Edge 2020

Solid Edge è un software di modellazione 2D/3D realizzato da Siemens PLM Software ed 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 attraverso la definizione di relazioni di vincolo statico o cinematico. Permette la messa in tavola di parti oppure di assiemi, anche attraverso la visualizzazione “esplosa”.

SE è dotato di vari moduli aggiuntivi che permettono di gestire in maniera agevole tutti gli aspetti del processo di sviluppo prodotto: progettazione, simulazione, gestione dati etc.

Il moduli utilizzati nel caso di studio sono stati quelli di “progetto generativo” e “simulazione”.

Il modulo simulazione è uno strumento di analisi ad elementi finiti integrato e facile da usare, che consente al progettista di convalidare digitalmente i progetti di parti e assiemi all'interno dell'ambiente Solid Edge.

Grazie ad esso si riduce significativamente la necessità di prototipi fisici, riducendo in tal modo i costi di materiali e test, risparmiando tempo di progettazione.

Mentre per quanto riguarda il modulo di progetto generativo è un'estensione del software che permette, una volta impostati carichi, vincoli, zone da conservare e massa target, di ottenere dei risultati di ottimizzazione topologica.



Figura 4.1: Logo Solid Edge

L'unica limitazione di SE incontrata con tale programma è stato il non poter studiare, tramite analisi FEM, i componenti ottimizzati a causa della loro geometria complessa, del formato del solido generato e dalle limitazioni stesse del programma. Per questo si è dovuto implementare un secondo software, ANSYS, per poter simulare tali componenti.

4.2 Ansys 2020

Il software ANSYS permette di essere utilizzato per molti settori e per vari scopi a seconda delle necessità, grazie all'enorme potenza di calcolo e gli svariati moduli presenti.

Tra i più utilizzati si possono evidenziare:

- ANSYS WORKBENCH
- ANSYS MECHANICAL (integrato nel *Workbench*)
- ANSYS ADDITIVE
- ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics)
- ANSYS ELECTROMAGNETICS SUITE



Figura 4.2: Logo ANSYS

Nel nostro caso si è utilizzato il modulo Mechanical [10] con il quale è possibile simulare vari scenari quali l'analisi termica stazionaria e transitoria (conduzione, convezione e irraggiamento) e l'analisi strutturale e lineare. E' possibile accoppiare l'analisi meccanica all'analisi fluidodinamica qualora si voglia prendere in considerazione gli sforzi derivanti da carichi di fluidodinamica.

Oltre a queste funzionalità, con ANSYS è stato possibile lavorare il file di estensione *.stl* (ottenuto in SE), riparando la geometria del modello (non considerata come solido) per la corretta esecuzione delle analisi FEM.

5 Case study: riprogettazione e ottimizzazione di una staffa

In questo capitolo si introdurrà lo studio effettuato su un componente meccanico, nello specifico di una staffa di supporto per uso motociclistico che verrà riprogettata e ottimizzata al fine di ottenere dei modelli, a parità di massa, che risultino efficaci a livello di utilizzo (ovvero rientrano in valori tollerabili di deformazione e tensione) e pensati per un'ipotetica produzione con processi additivi.

La staffa di supporto è montata su una Ducati monster 1100 [vedi Figura 5.2: Assieme Ducati 1100] e il suo scopo è quello di permettere il fissaggio della pedana di appoggio per il piede, della leva del cambio e di un eventuale para tacchi.

Il componente è montato sul motoveicolo tramite il perno passante di fissaggio del forcellone mono braccio al blocco motore e un secondo perno, di dimensioni ridotte, avvitato sul carter sinistro.

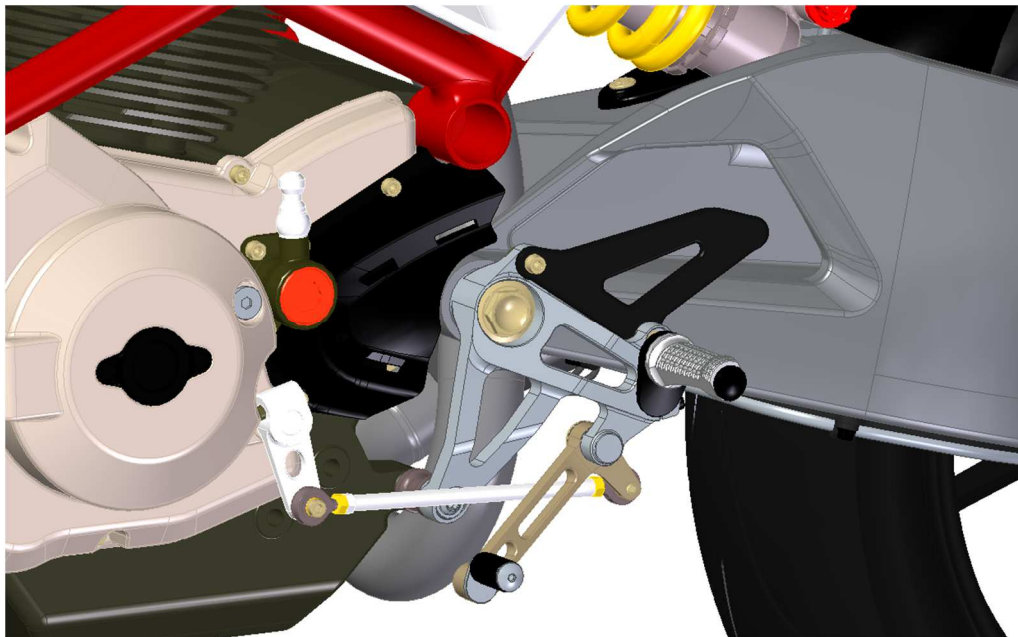


Figura 5.1: Staffa con relativi componenti fissati su di essa

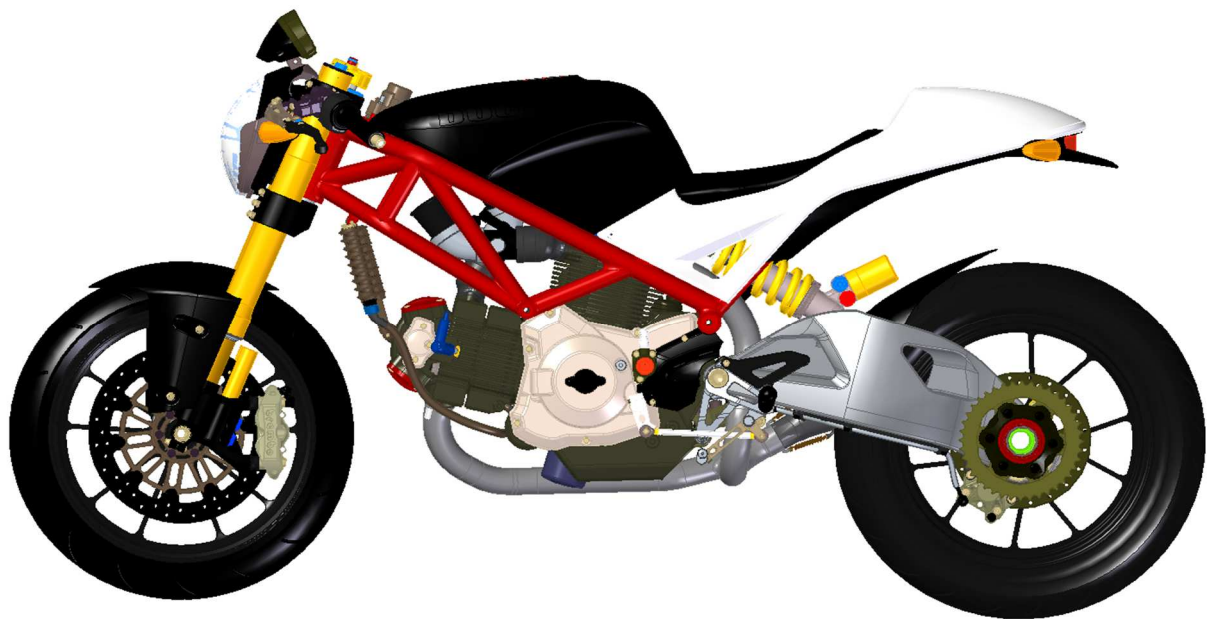


Figura 5.2: Assieme Ducati 1100

5.1 Analisi staffa

Lo studio è partito andando a studiare nel dettaglio il componente di partenza in modo da individuare i carichi e vincoli cui è sottoposto.

Per prima cosa si è scelto il materiale della staffa. Nel nostro caso si è optato per l'alluminio 6061, una tra le leghe più utilizzate per applicazioni strutturali che trova enorme impiego grazie alle buone resistenze raggiunte in seguito al trattamento termico di bonifica. Le principali caratteristiche fisico/chimiche sono:

- Bassa densità ($2,70 \text{ g/cm}^3$)
- Basso punto di fusione ($582 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Modulo di elasticità lineare elevato (69000 N/mm^2)
- Buoni valori di conducibilità termica e elettrica.

Procedendo, si sono analizzati i carichi e i relativi punti dove sono applicati. Per far ciò si sono studiati i singoli componenti che vanno fissati sulla staffa e da questi studi è stato possibile effettuare anche delle semplificazioni.

Riguardo il para tacchi collegato sulla staffa tramite i perni 1 e 2, visibili in Figura 5.3: Staffa con numerazione fori, essendo ottenuto in fibra di carbonio e, scaricando il suo peso su ben 2 perni, risulta avere forze e momenti trascurabili vista la loro piccola entità.

Stessa cosa per i carichi e momenti sviluppati nel perno 5, sede di alloggiamento della leva del cambio, che, come si vedrà a breve, risulteranno trascurabili rispetto alle forze e momenti agenti sul perno 4.

Nei restanti perni non agiscono alcun tipo di carichi mentre per i vincoli gli studi si concentreranno esclusivamente sul perno 3 e 6.

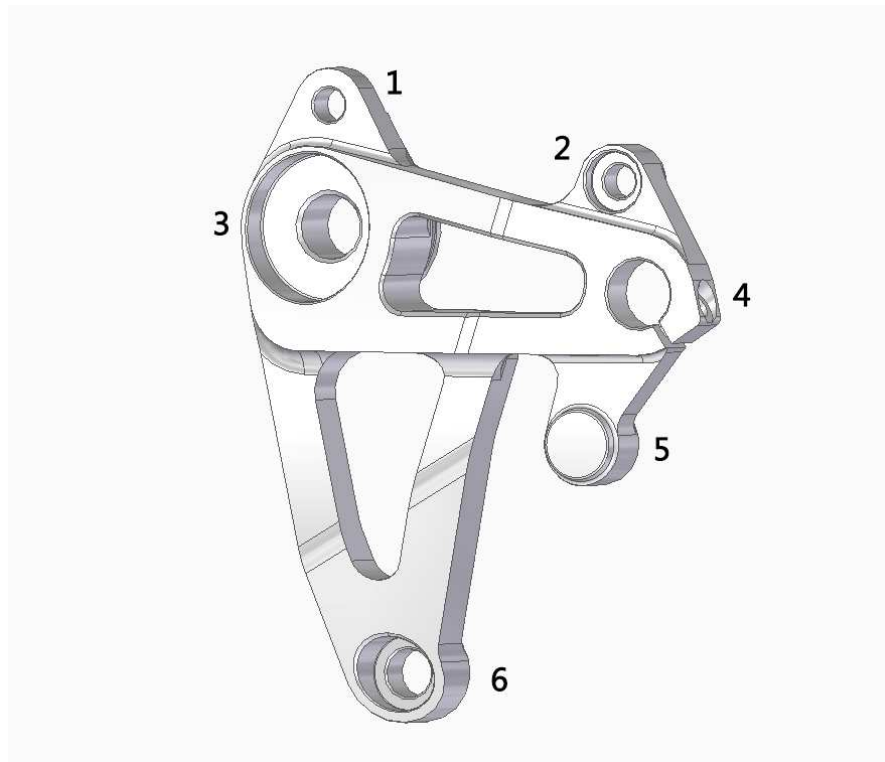


Figura 5.3: Staffa con numerazione fori

5.1.1 Carichi e vincoli

Tirando le somme per la parte riguardante i carichi si è considerato solo il perno 4, quello sui cui è montata la pedana di appoggio.

L'ipotesi alla base dello studio è stato considerare una condizione limite in cui un conducente risultasse in piedi sulla moto così da scaricare il suo peso unicamente sulle pedane di appoggio.

Il peso del conducente scelto è stato di 150 kg, e il carico che si ottiene, ripartito equamente sulle singole pedane (di destra e sinistra), risulta essere di 740 N lungo la direzione Z.

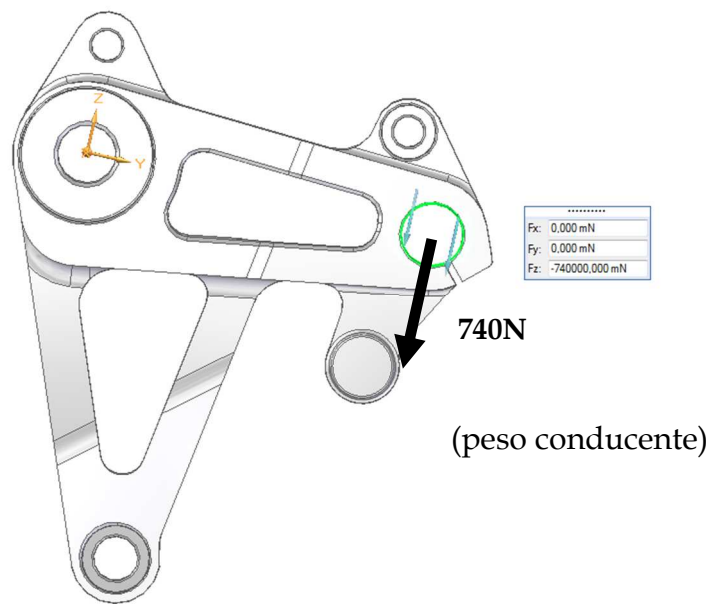


Figura 5.4: Schema forza considerata

Tale forza genera sul foro un momento flettente che viene applicato utilizzando la regola della mano destra e specificandone il vettore di applicazione. Nel nostro caso sul perno si sviluppa un momento di 27 Nm (entrante positivo).

Infine per quanto riguarda i vincoli, come già introdotto precedentemente, verranno applicati solo nei perni dove la staffa viene tenuta salda alla moto, ovvero i fori 3 e 6, e saranno di tipo fisso. Momenti e vincoli sono visibili in Figura 5.5: Schema momento flettente considerato e vincoli applicati.

Tutto ciò ci permette di poter avviare senza problemi le prime analisi FEM sul componente originale.

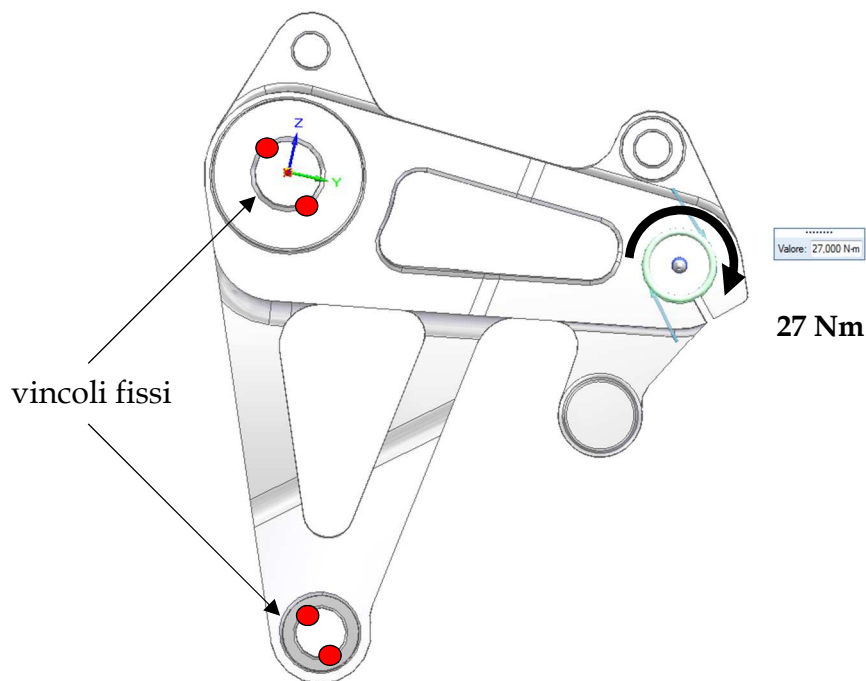


Figura 5.5: Schema momento flettente considerato e vincoli applicati

5.1.2 Analisi statica

Attraverso il modulo di simulazione di SE è stato possibile effettuare la prima analisi statica del componente di partenza in modo tale da avere una base di riferimento e analizzare le tensioni e le deformazioni sviluppate.

Per l'utilizzo del modulo di simulazione si procede andando inizialmente a scegliere il tipo di materiale, per poi seguire con l'applicazione di forze, momenti e vincoli applicati ed infine prima di lanciare la simulazione si definisce la mesh.

Infatti per poter applicare il metodo ad elementi finiti, un passaggio fondamentale è la frammentazione del dominio di calcolo. Si passa da un modello continuo ad un modello discretizzato e generalmente le mesh possono essere di tipo triangolare o quadrilateri. L'analisi FEM è tanto più accurata tanto più il numero di mesh è elevato, ma di conseguenza l'elaborazione dei calcoli risulterà più lunga.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti di tensione e deformazione. I maggiori valori di tensioni si hanno in corrispondenza dei raccordi e spigoli, mentre per le deformazioni, visto il grande valore ottenuto nelle vicinanze del foro della pedana di

appoggio, si è pensato di introdurre l'ipotesi in cui all'interno di tale foro ci fosse la presenza di un perno con lo scopo di limitare la deformazione della superficie cilindrica.

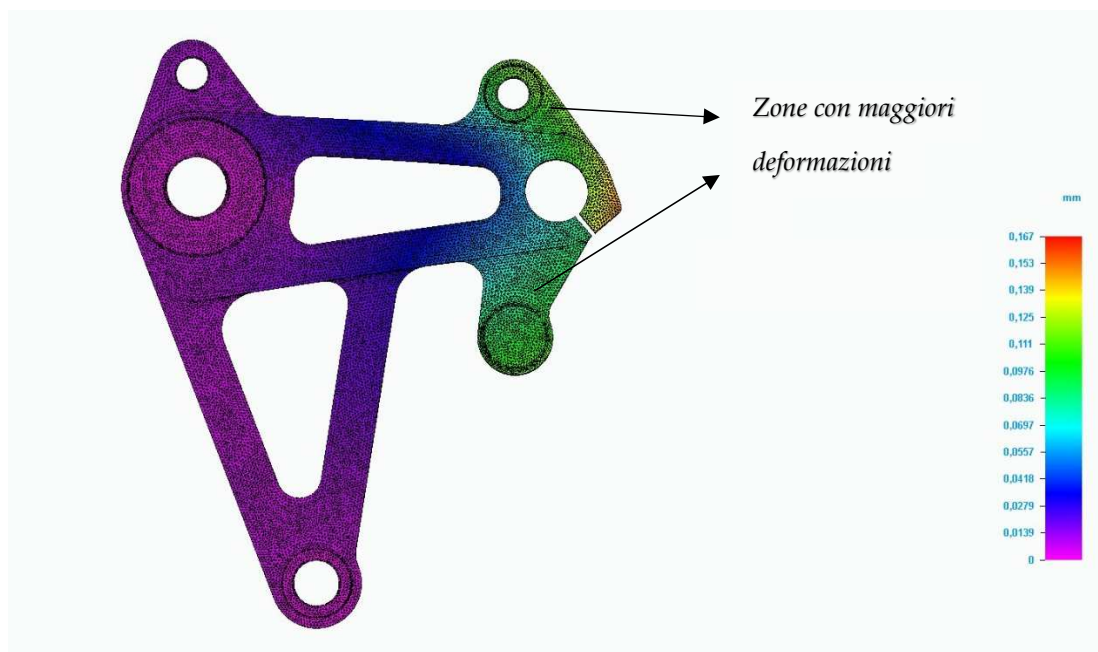


Figura 5.6: Andamento Deformazione (in mm) da analisi statica

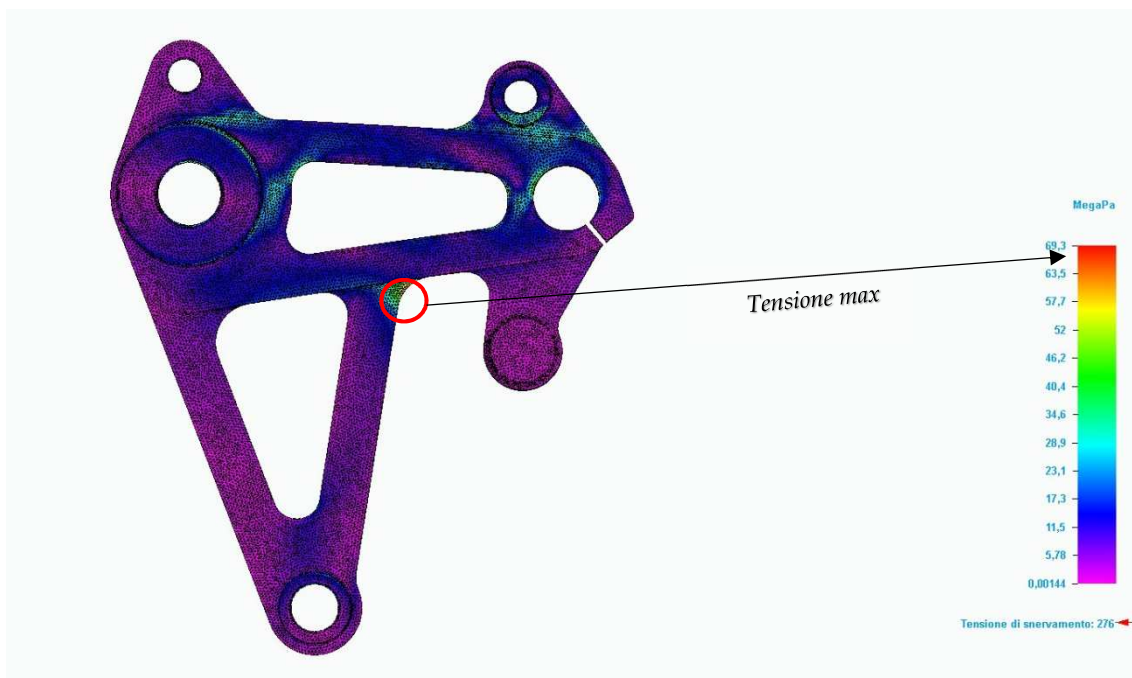


Figura 5.7: Andamento tensione (in MPa) da analisi statica

5.2 Riprogettazione staffa

Una volta terminata l'analisi strutturale, al fine di ottenere delle soluzioni valide e ottimali dall'ottimizzazione topologica, si è pensato di riprogettare la staffa, cercando di aumentarne il proprio volume.

Partendo da una massa iniziale di 0.295 kg, si è arrivati ad un massa di 0.810 kg del nuovo componente, quindi un incremento di circa 3 volte superiore.

Le zone dove si è cercato di aggiungere materiale sono state principalmente quelle centrali tra i vari perni, dove la staffa risultava avere degli scavi vista la scarsa sollecitazione alla quale era sottoposta (come precedentemente visualizzato nell'analisi statica).

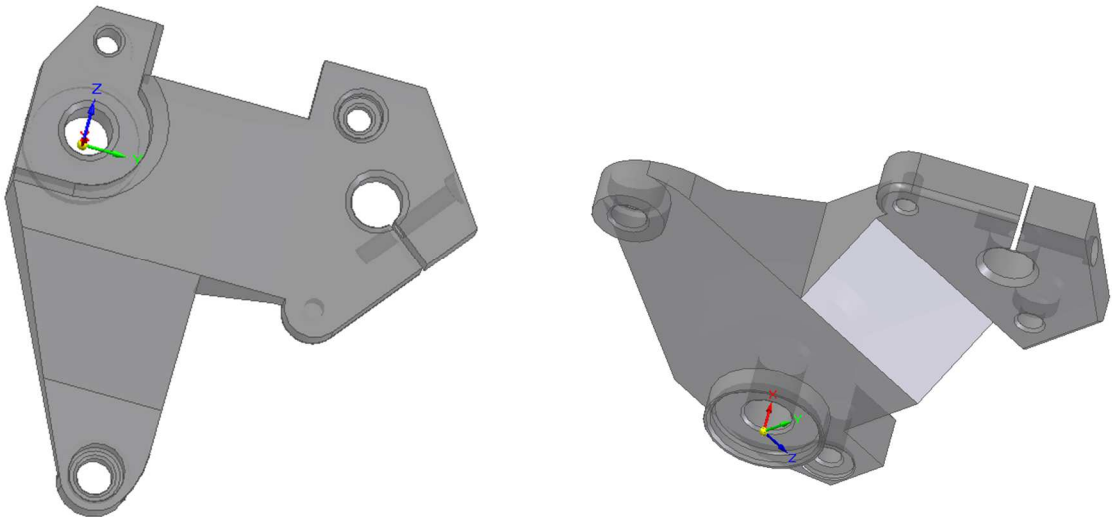


Figura 5.8: Componente riprogettato

Il componente è stato ottenuto mantenendo le stesse condizioni al contorno di quello originale, ovvero tutti i vari fori, e tenendo anche in considerazione i componenti circostanti nell'assieme per non generare interferenze o sovrapposizioni.

Gli elementi a stretto contatto della staffa che si sono dovuti considerare per la realizzazione sono stati i leveraggi della leva del cambio, lo spessore di un eventuale paratacchi, i punti di battuta sul carter e forcellone, le varie lunghezze delle viti ed anche l'ipotetica ampiezza che la leva del cambio ha durante l'uso (soprattutto per quanto riguarda la selezione delle marce in su). Di seguito si riportano alcune immagini della staffa nell'assieme.

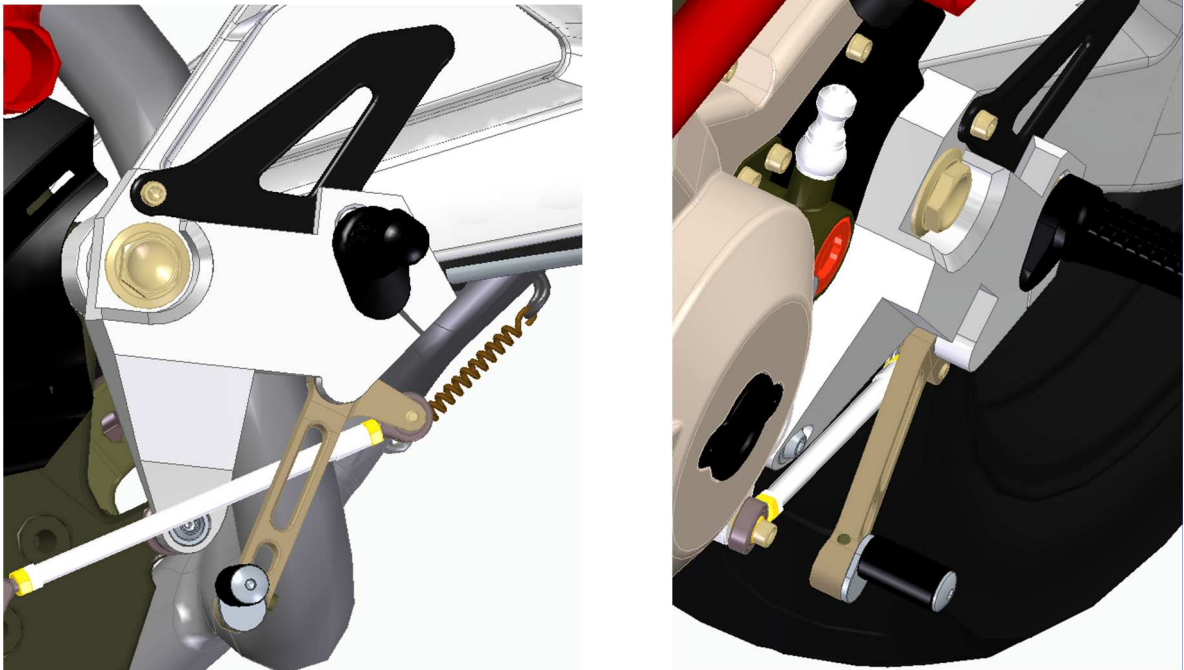


Figura 5.9: Staffa riprogettata nell'assieme

5.3 Ottimizzazione topologica

Una volta terminato il nuovo componente maggiorato, si è intrapreso uno dei punti fondamentali dello studio, ovvero la ottimizzazione topologica del componente attraverso il modulo di "progetto generativo" fornito dal software SE.

Nel nostro studio si sono voluti ottenere 2 modelli che si differenziassero tra loro per la scelta dei parametri di estensione del materiale al fine di avere più paragoni su cui effettuare lo studio. Nello specifico i risultati scelti sono:

- Senza parametri di estensione del materiale (MODELLO 1);
- Con estensione del materiale posta come un mix di strutture a pareti sottili e a puntoni (MODELLO 2).

Tali modelli ovviamente per poter essere confrontabili, sono stati realizzati mantenendo la massa target uguale alla staffa originaria di partenza, ovvero 0.295 kg ed entrambi partendo dal componente maggiorato.

Prima di procedere con i risultati, analisi e modelli ottenuti si procede col descrivere in maniera accurata il procedimento per poter arrivare a tali modelli.

5.3.1 Flusso di lavoro

Come punto di partenza per l'ottimizzazione topologica dei componenti si seleziona il modulo di progetto generativo presente in Solid Edge nella barra dei comandi.

La scheda che appare di seguito in Figura 5.10: Comandi presenti nel modulo di Generative Design, mostra tutti i comandi disponibili in tale modulo. Essa è organizzata da sinistra verso destra secondo operazioni cui il progettista deve effettuare in sequenza affinché il software esegua un'ottimato elaborazione del componente, rendendolo particolarmente adatto per la produzione additiva.



Figura 5.10: Comandi presenti nel modulo di Generative Design

In primis si procede col selezionare il componente *.par* che si vuole ottimizzare e si seleziona sul comando "crea studio generativo" il quale permette di poter avviare un nuovo studio e, nel caso di più prove su lo stesso componente (come nel nostro), avere due modelli e due studi in contemporanea, senza nessuna perdita di dati, parametri o altro.

Andando avanti si sceglie il materiale che si vuole utilizzare tramite un'apposita "*Tabella materiali*" dove sono presenti tutti i materiali salvati nel database del software con le loro relative proprietà come densità, modulo di elasticità e tanto altro.

Arrivati a questo punto, prima di procedere con l'inserimento dei carichi e dei vincoli (come per l'analisi statica), si devono evidenziare quelle zone del componente che il programma non deve andare a modificare in qualsiasi modo, lasciandole così immutate. Nella staffa si è agito su tutti i perni e sui punti di battuta che si hanno durante il montaggio sul telaio.

Per far ciò si utilizza il comando "*Mantieni Regione*" dove oltre alla semplice selezione delle parti si va ad inserire un opportuno offset da rispettare nella generazione.

Ora è possibile procedere con l'applicazione dei carichi, che possono essere *Forze*, *Pressioni o Momenti di Forza*, nella direzione e nella intensità scelte e, stessa cosa, per quanto riguarda i vincoli, che in SE purtroppo sono limitati ai semplici vincoli *Fisso*, *Bloccato* e di *Spostamento*.

Le simulazioni con Solid Edge prendono in considerazione solo casi di sollecitazione statiche, perciò non possono essere scritte espressioni di forze oscillanti né in modulo né in direzione.

Infine si procede andando a impostare i parametri dell'ottimizzazione attraverso il comando "*Genera*" dove si aprirà una schermata in cui è possibile selezionare le percentuali di riduzione di massa e la qualità dell'operazione di ottimizzazione, dove tanto più la qualità sarà spinta tanto più i tempi di attesa aumenteranno.

Ulteriori parametri, più specifici per un eventuale processo di stampa in additive sono selezionabili nel comando "*Impostazioni di Manufacturing*" nel quale vengono impostati i valori di estensione e estrusione del materiale.

Al termine di tutto ciò si può visualizzare il componente ottimizzato, con il suo relativo workflow sviluppato ed, inoltre, con il comando “*Mostra tensione*” è possibile identificare l'andamento delle tensione visivamente ma senza nessun valore numerico e soddisfacente (per far ciò si devono utilizzare altri software più adatti per le simulazione, come Ansys).

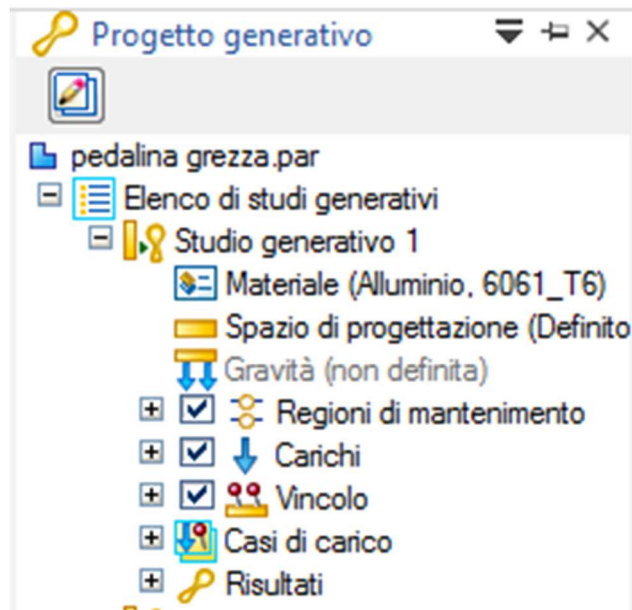


Figura 5.11: Workflow processo generativo ottenuto

5.3.2 Risultati ottenuti

Come già introdotto nell'inizio del quinto paragrafo, seguendo correttamente il flusso di lavoro nel modulo di progettazione generativa ed utilizzando una buona qualità di elaborazione si sono ottenute due soluzioni ottimizzate.

La prima è quella nella quale nelle impostazioni relative all'additive manufacturing non si è agito sui parametri di estensione ed estrusione del materiale.

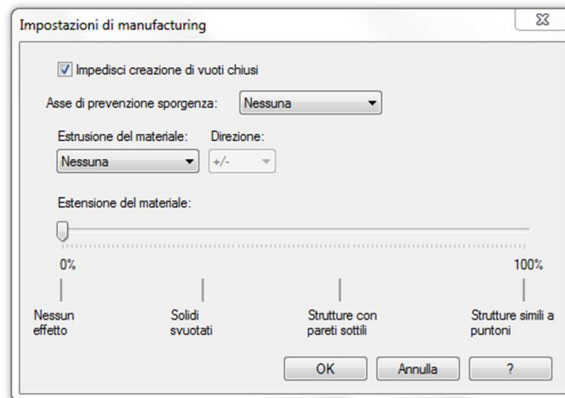


Figura 5.12: Impostazioni di Manufacturing per primo modello

Mentre per quanto riguarda il secondo modello ottimizzato, si è pensato di andare a modificare l'estensione del materiale scegliendo per la precisione il 70%, che corrisponde ad una struttura ibrida in cui si hanno sia strutture con pareti sottili sia strutture simili a puntoni, sicuramente più adatte per essere prodotte con tecnologie additive bensì che con i classici metodi tradizionali visto soprattutto la complessità geometrica che si va a generare.

Durante le svariate prove si è provato a spingere l'estensione del materiale al 100%, cioè con un modello nel quale si avevano quasi esclusivamente strutture simili a puntoni, ma ciò non è stato possibile visto che le ottimizzazioni che ne venivano fuori non risultavano valide (esempio fori staccati dal restante pezzo) vista sia la non semplicità del pezzo riprogettato sia le limitazioni del programma.

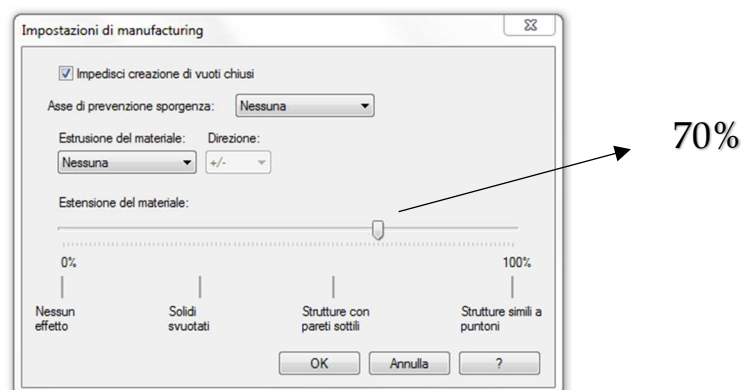


Figura 5.13: Impostazioni di Manufacturing per il secondo modello

Dalla Figura 5.14: Primo modello ottimizzato (no estensione materiale) notiamo ciò che ne è venuto fuori riguardo il primo modello ottimizzato.

La prima cosa che salta all'occhio è come la parte centrale, ovvero il materiale compreso tra i perni 3-4 e 3-6 (come da numerazione indicata in Figura 5.3: Staffa con numerazione fori), sia stato quello più asportato per arrivare alla massa target di 0.295 kg.

Difatti tra i perni 3-4 il software si è spinto molto nella rimozione del materiale visto che nelle vicinanze non si ha la presenza di carichi e momenti applicati e di conseguenza tale zona non risulta molto sollecitata. Lì la struttura della staffa presenta due "linee" principali con una di supporto posta orizzontalmente che funge di collegamento per una maggiore stabilità.

Mentre per la zona compresa tra i perni 3-6 la forma ottenuta è differente da quella precedente. In primis la percentuale di massa asportata risulta essere minore, data la maggiore sollecitazione alla quale è sottoposta per i carichi e momenti applicati presenti nel perno di alloggiamento della pedalina (6).

La geometria in quella zona risulta essere simile a quella del pezzo preso in partenza per la OT, cioè quello riprogettato, con la sola differenza che in questo si ha un ampio scavo centralmente.

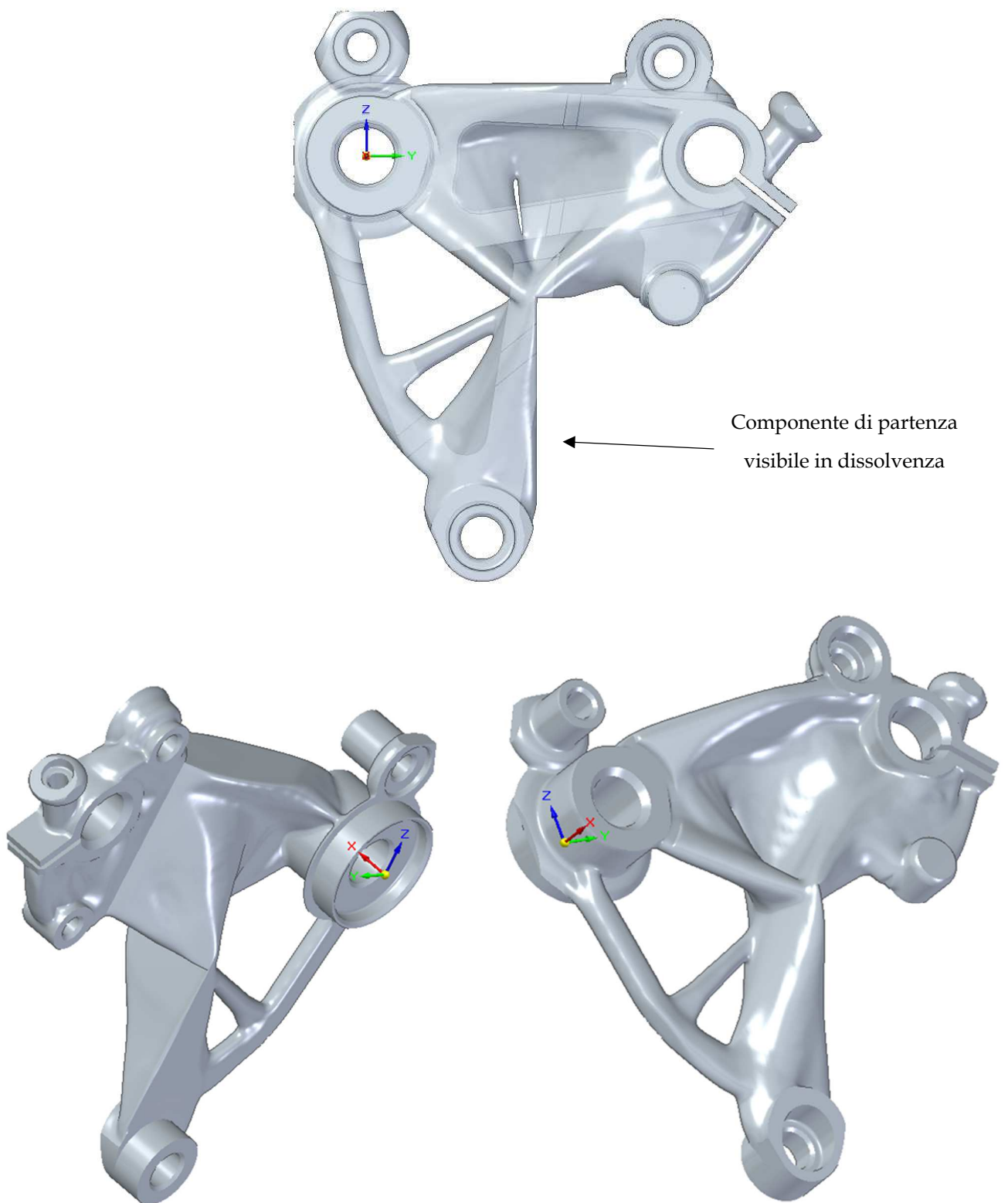


Figura 5.14: Primo modello ottimizzato (no estensione materiale)

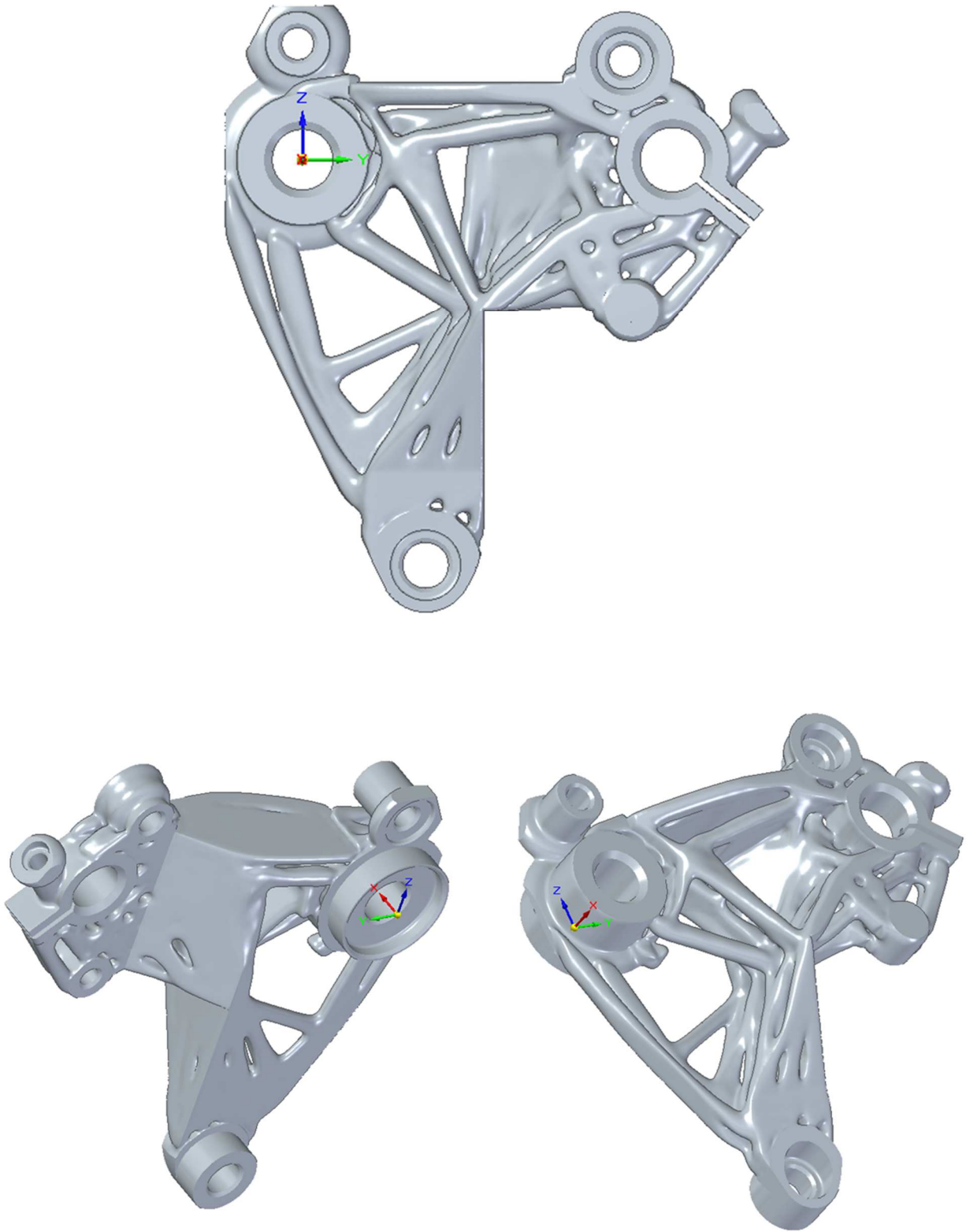


Figura 5.15: Secondo modello ottimizzato (70% estensione materiale)

Nella stessa maniera dalla Figura 5.15: Secondo modello ottimizzato (70% estensione materiale) è possibile osservare i risultati generati dal secondo processo generativo, in cui si erano settati i parametri di estensione del materiale.

Le prima differenza che si nota paragonandolo al primo modello di certo è la diversa distribuzione del materiale all'interno della staffa, difatti specialmente nella parte sinistra della parte la struttura elaborata da Solid Edge è una a puntoni mentre nella parte di destra si ha più un mix tra pareti sottili e strutture a puntoni (come d'altronde era l'input iniziale inserito come parametro).

Per il resto la massa ottenuta risulta sempre 0.295 kg e le zone con più modifiche da parte del programma sono simili a quelle del primo risultato.

5.3.3 Verifiche strutturali in Ansys e problematiche riscontrate

Una volta ottenuto tutto ciò dall'ottimizzazione topologica in SE, per valutare se i risultati a livello strutturale erano validi, si è fatta una analisi delle tensioni e delle deformazioni, come fatto inizialmente sulla staffa di partenza.

Per far ciò si è dovuto utilizzare un differente software, ANSYS, visto che Solid Edge non permette l'analisi di componenti venuti fuori dal progetto generativo a causa della complessità della geometria che il programma non può gestire.

Il tutto però ha portato alcune problematiche dovute ai diversi formati e alle relative conversioni che si sono fatte tra i due sistemi.

In primis si è cercato di lanciare all'interno di ANSYS il file in formato *.stp* (dati di oggetti 3D salvati in STEP), ma vista la mole di dati che il pacchetto portava con sé non si riusciva a lanciarlo in alcuna maniera nel programma, allora si è optato per convertire il file *.par* nativo del software Siemens in formato *.stl* (formato dove la superficie del solido viene discretizzata in mesh triangolari), utilizzato molto spesso nell'ambito della prototipazione rapida.

Con tale formato si è riusciti a lavorare in Ansys, ma prima di procedere con l'analisi, a causa di alcune intersezioni tra mesh il software non riusciva a considerarlo come solido e per "fixare" ciò si è dovuti agire manualmente sulle singole mesh e risolvere il problema.

Per quanto riguarda il primo modello non si sono avuti grossi problemi, mentre per il secondo modello, a causa di un numero molto elevato di intersezioni, non è stato possibile recuperare correttamente il file e di conseguenza gli studi che ne seguiranno riguarderanno solo il primo modello nel quale non sono stati inseriti i parametri di estensione del materiale.

L'analisi strutturale è stata ottenuta impostando come sempre i vincoli, ovvero nei due perni di fissaggio sul telaio e i relativi carichi e momenti applicati.

Non potendo applicare direttamente il momento applicato (causa assenza comando) sul perno di alloggiamento della pedalina, si è ottenuto uno equivalente attraverso l'applicazione di due forze uguali e contrarie, come visibile in Figura 5.16: Vincoli e carichi in ANSYS, di entità pari a 1800N al fine di generare un momento di 27 Nm.

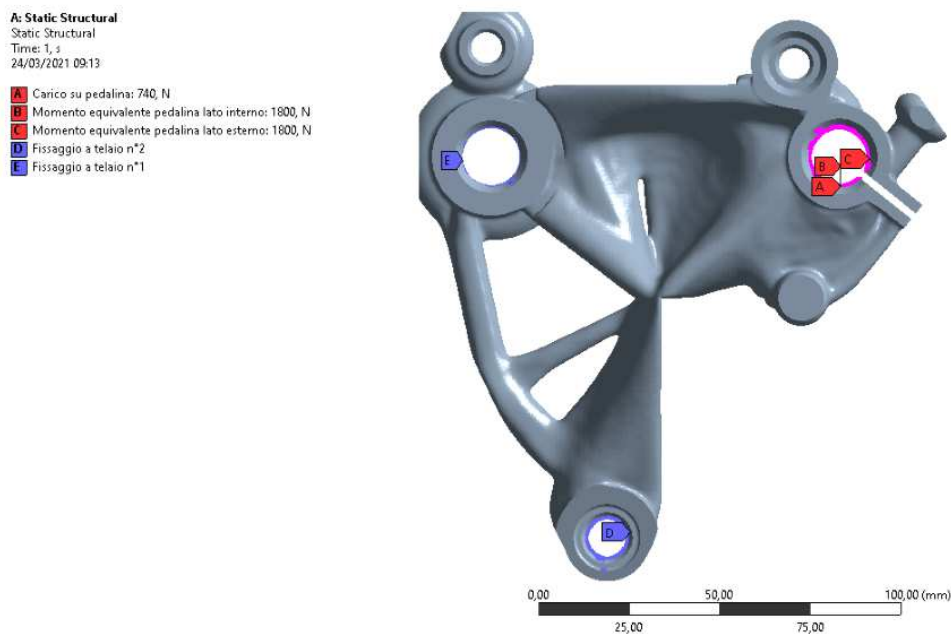


Figura 5.16: Vincoli e carichi in ANSYS

I risultati che ne sono venuti fuori al livello di deformazione sono i seguenti:

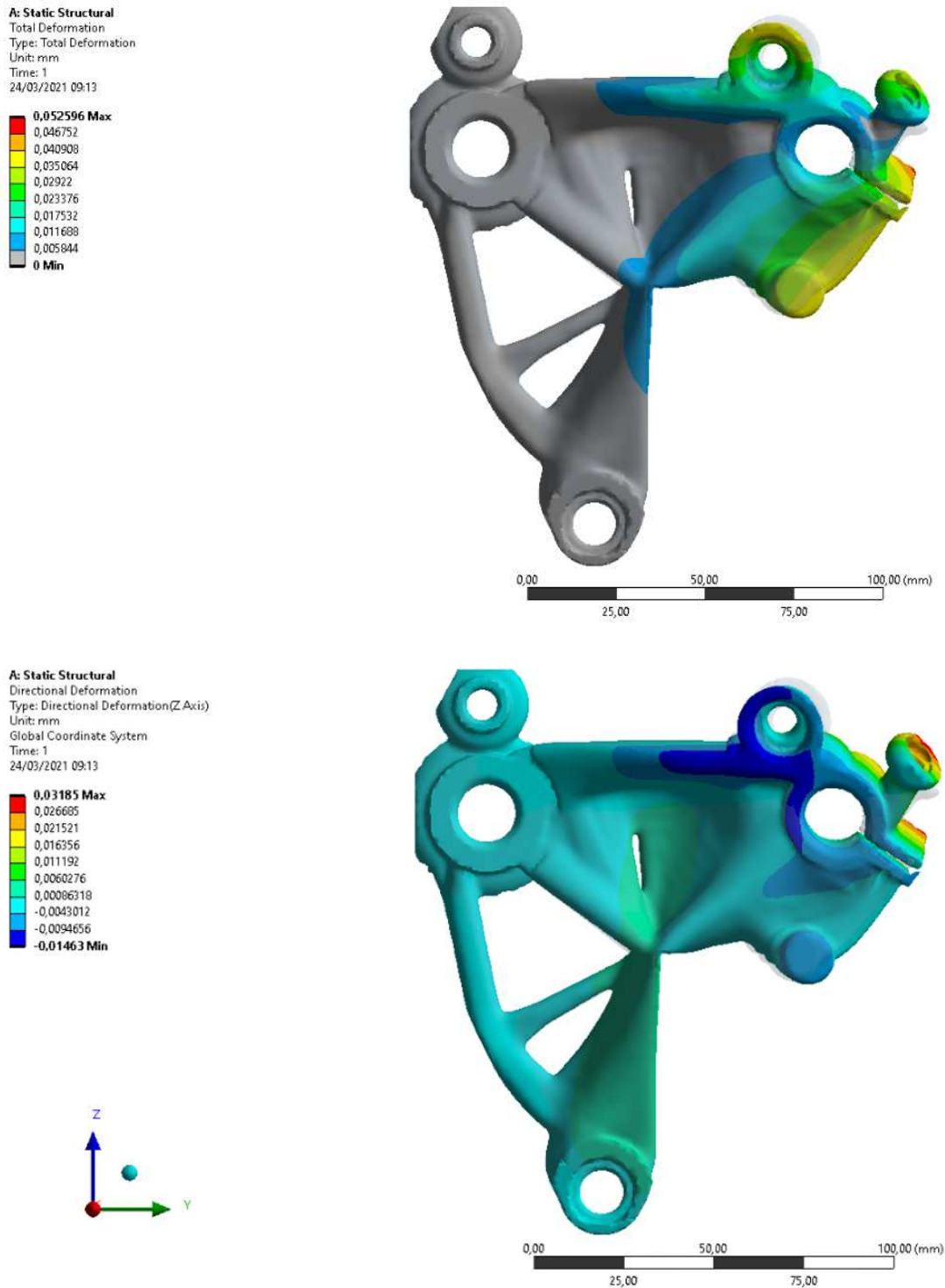


Figura 5.17: Risultati deformazione totale e direzionale (lungo z) in mm

Si nota come dagli output che sono stati forniti la deformazione persiste, come anche nei precedenti casi, nella zona dove il conducente va a scaricare il proprio peso e per le tensioni il comportamento è iterabile.

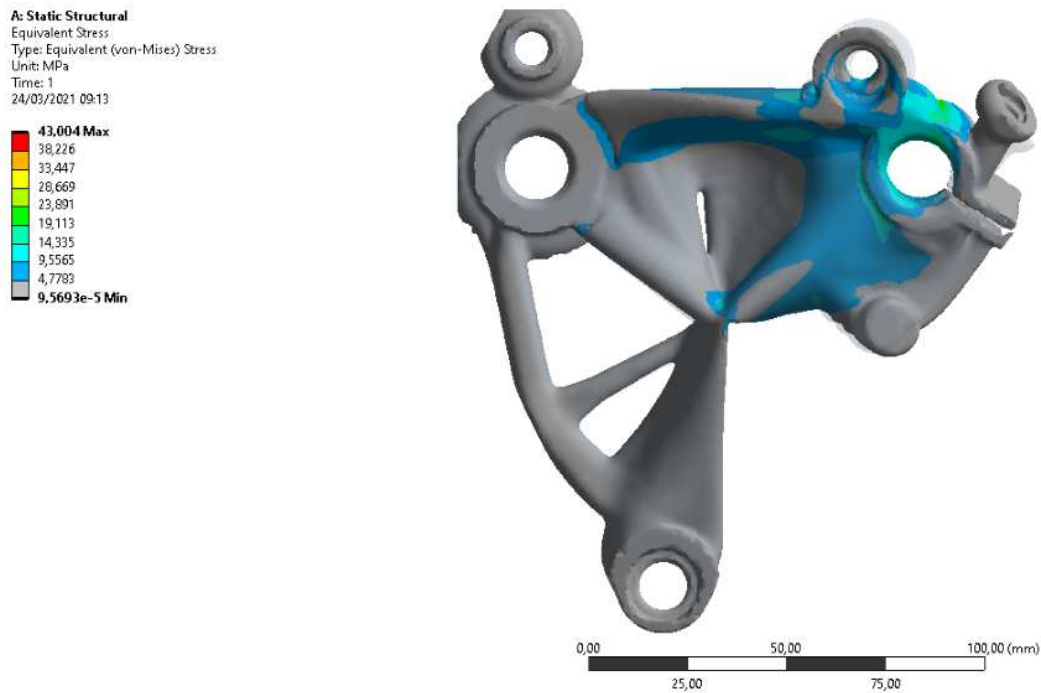


Figura 5.18: Risultati della tensione (in MPa)

5.4 Riepilogo e confronto modelli ottenuti

Prima di tirare le somme circa lo studio proposto si riassumono i pesi, i valori di deformazione e di tensione di tutti i componenti analizzati, anche della staffa maggiorata (non utile ai fini del nostro case study, ma comunque interessante per avere una migliore idea complessivamente di ciò che si è analizzato).

Anticipando ciò che viene elencato in Tabella 5-1: Tabella riassuntiva, salta subito all'occhio come a parità di massa tra il componente di partenza e quello ottimizzato si abbiano risultati molto buoni da parte di quest'ultimo, anzi di gran lunga migliori.

	Staffa originale	Staffa ottimizzata	Staffa maggiorata
PESO	0,295 kg	0,295 kg	0,810 kg
DEFORMAZIONE (max)	0,167 mm	0,053 mm	0,036 mm
TENSIONE (Von Mises)	69,3 MPa	43 MPa	35,1 MPa

Tabella 5-1: Tabella riassuntiva

6 Conclusioni

Arrivati al termine del lavoro di tesi possiamo mettere in chiaro quello che si è esaminato e concluso.

Partendo da una staffa pensata e realizzata con tecniche tradizionali, si è arrivati ad individuare un nuovo modello pensato più per un eventuale produzione additiva che ci ha fornito dei valori a livelli di analisi strutturale molto buoni, con anche una migliore distribuzione della massa, cosa che difatti l'OT ha tra i suoi tanti obiettivi.

Innanzitutto si può vedere come le grazie a questa nuova struttura il modello subisca una deformazione massima di circa un terzo rispetto all'originale e anche a livello di tensioni massime siamo in un range minore rispetto a quello di partenza.

Nello specifico analizzando la Figura 6.1: Confronto forma e deformazioni vediamo come la deformazione negli estremi della pedalina, nella zona dove si sviluppano carichi e momenti, la deformazione risulti notevolmente ridotta nel componente ottimizzato. Ciò è dovuto dalla diversa distribuzione della massa; infatti le linee in giallo ci indicano come è strutturata la staffa in partenza, mentre con la linea nera andiamo a evidenziare il cambio più importante di struttura che ha portato ad un miglioramento netto di deformazione e ma anche di tensione, visto che nella staffa di partenza si avevano alti valori (visibili nelle precedenti analisi) che si concentravano nel raccordo indicato con la freccia nera, mentre nel nuovo modello esse si distribuisce in maniera più uniforme grazie alla presenza di più materiale in tale zona.

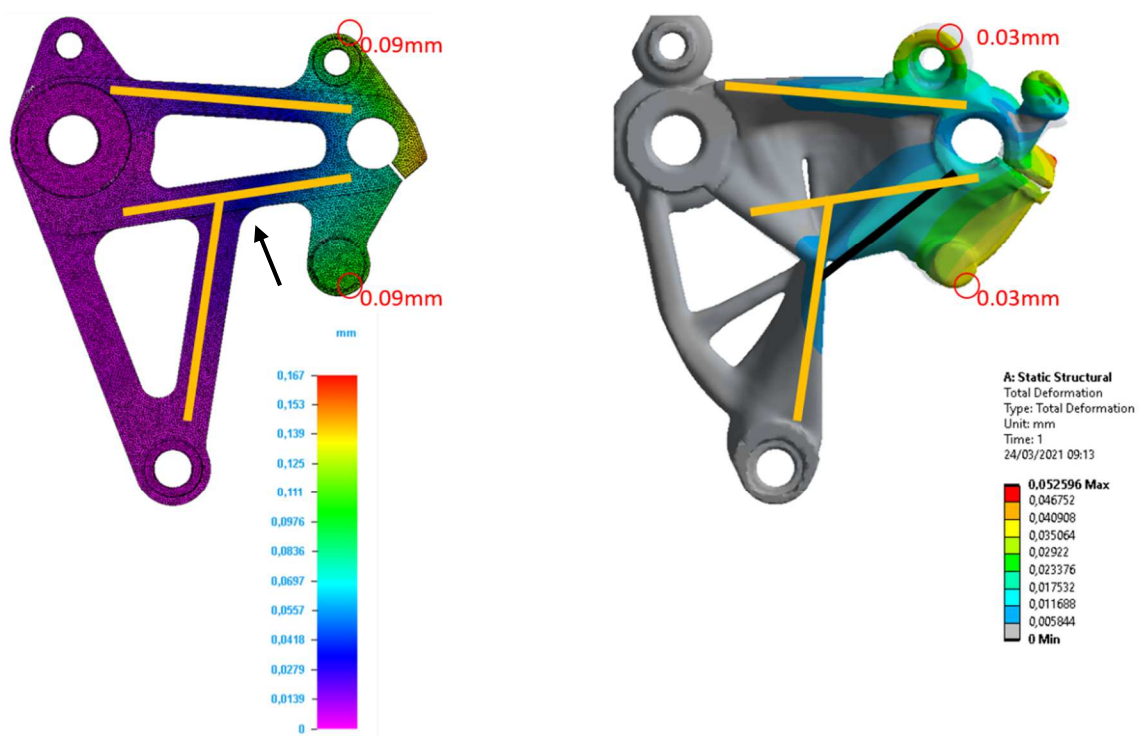


Figura 6.1: Confronto forma e deformazioni

In conclusione quindi, tale studio ci ha permesso di affermare e rafforzare l'idea che è possibile, grazie alle nuove tecnologie di produzione come quella additiva, di ottenere componenti pensati in maniera completamente differente rispetto a come si è fatto sin ora al fine di migliorare le proprie caratteristiche meccaniche o anche semplicemente il solo design dell'oggetto.

6.1 Sviluppi futuri

Sicuramente lo studio trattato permette di aprire nuovi possibili scenari di approfondimento.

In primis si può procedere andando ad effettuare un'analisi dei costi per valutare un'ipotetica produzione in additive e capire se risulta essere conveniente oltre che a livello strutturale anche economicamente.

Altro aspetto che può essere studiato riguarda la vera e propria messa in stampa di tale componente per individuare la fattibilità di tale processo e se sì, i vari parametri da utilizzare per una corretta realizzazione.

Ed infine uno dei più interessanti seguiti che può avere tale tesi sarebbe quello di andare a ottenere gli stessi risultati con altri Software, visto che da una parte Solid Edge risulta essere un programma molto intuitivo e user-friendly ma, d'altro canto, specialmente nei moduli di ottimizzazione topologica e anche simulazione, non è molto completo e accurato al pari di altri che sono molto più sviluppati sotto quell'aspetto.

Ringraziamenti

Non sono uno di tante parole ma in questo spazio voglio cercare di ringraziare davvero col cuore tutte quelle persone che mi hanno supportato, aiutato e accompagnato in questi anni universitari.

Innanzitutto voglio ringraziare infinitamente i miei genitori, fonte di ispirazione e motivazione, che sono stati sempre di incoraggiamento lungo tutto questo percorso e mi hanno permesso di arrivare fin in fondo nonostante tutte le fatiche e difficoltà.

Queste semplici e concise parole non possono esprimere tutto quello che provo per loro ma spero di averlo dimostrato in tutti questi anni.

Un grazie enorme anche a mia sorella Martina, con quella sua costante grinta, determinazione e al contempo leggerezza che tanto ammiro e cerco di raggiungere.

Nonostante il nostro rapporto non sia tra i più amorevoli ed espliciti, so l'affetto che ci lega e so che possiamo contare sempre l'uno sull'altro.

Ringrazio tutti i miei amici e compagni di corso per i bei momenti condivisi, il divertimento, le gioie, le sfide affrontate ed anche la crescita fatta assieme.

Ringrazio il mio relatore Marco Mandolini per l'aiuto, la professionalità ma soprattutto la sua disponibilità data durante questo periodo di tirocinio.

Un ringraziamento doveroso va anche a tutti i miei nonni, per l'orgoglio mostrato nei miei confronti fin da piccolo e i per bei momenti trascorsi, gelosamente conservati in me. Sono e continueranno ad essere un'ulteriore carica nella vita.

Infine, vorrei dedicare questo piccolo traguardo a me stesso, per aver creduto sempre e per non aver mai mollato; che possa essere da reminder per tutti i momenti futuri e trampolino di lancio per ciò che verrà.

Grazie

Jacopo Tinari

Bibliografia

- [1] L. Yang, K. Hsu, F. Medina, D. Godfrey and B. Baughman, *Additive Manufacturing of Metals: The technology, Materials, Design and Production*, USA: Springer, 2017.
- [2] A. Forcellese, *Slide Additive, Tecnologia Meccanica*, Università Politecnica delle Marche, 2020.
- [3] D. Bourell, J. P. Kruth, D. Rosen , G. Levy e M. Leu, «Materials for Additive Manufacturing,» Austin University, 2017.
- [4] M. Mora, *Tesi di Laurea " Progettazione di componenti in metallo da realizzare per Additive Manufacturing"* , Università Politecnica delle Marche, 2018.
- [5] E. Santecchia, *Slide AM, Corso Metodologie Metallografiche*, Università Politecnica delle Marche, 2019.
- [6] A. Vranić, D. Croccolo e G. Olmi , *Advantages and Drawbacks of Additive Manufacturing*, University of Kragujevac and Univesity of Bologna, 2017.
- [7] . Kumbhar e A. V. Mulay, *Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review*, 2018.
- [8] S. Forlano, *Tesi di Laurea "Riprogettazione di un componente attraverso l'uso di software per l'ottimizzazione topologica e la progettazione generativa"* , Università Politecnica delle Marche, 2020.
- [9] Siemens, «Computer-Aided Engineering (CAE),» [Online].
- [10] Spinips_Industrial_Design, «Ansys,» [Online].