



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA DEL TELAIO DI UN
DRONE E VALUTAZIONE DEI BENEFICI ECONOMICI E
AMBIENTALI NEL CICLO VITA

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF A DRONE FRAME AND
EVALUATION OF ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL
BENEFITS IN THE LIFE CYCLE

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

SIMONE PECORARI

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

'È nella crisi che sorge l'inventiva, le scoperte e le grandi strategie.

Chi supera la crisi supera se stesso senza essere superato'

Albert Einstein

Indice

I. Ringraziamenti	3
II. Elenco delle figure	4
III. Elenco delle tabelle	8
1. Introduzione	9
2. Ottimizzazione Topologica e Manifatture Additive	11
2.1 Ottimizzazione Topologica	11
2.1.1 Definizione	11
2.1.2 Processi di ottimizzazione	12
2.1.3 Metodo matematico	13
2.1.4 Massimizzazione della rigidità	15
2.1.5 Analisi della sensibilità	16
2.1.6 Software impiegati nell'Ottimizzazione Topologica	17
2.1.7 Progettazione generativa	18
2.1.8 La scelta del software	19
2.1.9 Ottimizzazione Topologica nel settore industriale	19
2.1.10 Ottimizzazione Topologica nel settore medico	20
2.2 Additive Manufacturing	21
2.2.1 Definizione	21
2.2.2 Benefici della stampa 3D	22
2.2.3 Identificazione del processo di produzione più idoneo	22
2.2.4 La stampa 3D e la manifattura tradizionale	22
2.2.5 Principi base dell'Additive Manufacturing	23
2.2.6 Tipologie di Additive Manufacturing	24
2.2.7 Cinematica della stampa 3D.....	27
2.2.8 Trattamenti estetici funzionali.....	28
2.3 Stampa ad iniezione.....	30
2.3.1 Storia dello stampaggio ad iniezione	30
2.3.2 L'ascesa industriale: la produzione di massa.....	30
2.3.3 Definizione dello stampaggio.....	31
2.3.3.I Stampaggio ad iniezione.....	31
2.3.3.II Stampaggio a soffiaggio	32
2.3.3.III Stampaggio a compressione	33
2.3.3.IV Stampaggio sottovuoto	34
2.3.4 Dispositivi per lo stampaggio ad iniezione	34

2.4	Differenze tra Additive Manufacturing e stampa ad iniezione	40
2.5	Materiali	43
2.5.1	Vari materiali impiegati	43
2.5.2	ABS	46
2.5.3	Tipologie differenti di ABS	47
3.	Drone e Meccanica del volo	50
3.1	Definizione di drone	50
3.2	Telaio del drone	50
3.3	Forme del frame	51
3.4	Meccanica di volo del drone	54
3.5	Movimenti del drone	55
4.	Software CAE	56
4.1	CAD/CAE	57
4.2	Siemens Solid-Edge.....	57
4.3	Siemens NX	58
4.3.1	Modulo FEM	58
4.3.2	Modulo di Ottimizzazione Topologica	66
5.	Case Study: Ottimizzazione Topologica del telaio di un Drone	71
5.1	Telaio Superiore	76
5.1.1	Analisi FEM	76
5.1.2	Ottimizzazione Topologica	79
5.2	Telaio Inferiore	81
5.2.1	Analisi FEM	81
5.2.2	Ottimizzazione Topologica	84
5.3	Tensioni massime	87
6.	Problemi e Risoluzioni	92
7.	Risultati e Discussione	95
7.1	Settore Progettuale	95
7.2	Ambito Economico	96
7.3	Impatto Ambientale	97
8	Conclusioni	100
9	Webgrafia	101

I. Ringraziamenti

Vorrei esprimere tutta la mia gratitudine verso tutti coloro che hanno supportato la realizzazione dell'intero lavoro di Tesi.

Un ringraziamento speciale va al relatore, il Professor Marco Mandolini, per avermi guidato nell'esperienza di tirocinio, permettendomi di approfondire tematiche ed aspetti progettuali appartenenti al mondo del *CAD* che, oltre a stimolare la mia passione per la Meccanica, mi permette di ampliare le mie conoscenze nel settore.

Sono grato profondamente alla mia famiglia per essermi sempre accanto in ogni momento; per non avermi mai ostacolato nelle scelte e per garantirmi tutto il supporto nella carriera universitaria che sto percorrendo.

Grazie per avermi reso la persona che sono! Mi auguro di rendervi sempre orgogliosi di me.

Simone Pecorari

II. Elenco delle figure

Figura 2.1 “Layout del materiale ottimizzato di una trave caricata”	12
Figura 2.2 “Relazione empirica tra ρ_e e $E(\rho_e)/E_0$ ”	13
Figura 2.3 “Esempio di sviluppo di Ottimizzazione Topologica”	16
Figura 2.4 “Processo di Ottimizzazione Topologica di un telaio”	17
Figura 2.5 “Ottimizzazione Topologica dell’antenna del satellite “Sentinel-1B””	19
Figura 2.6 “Ottimizzazione Topologica di un tutore per avambraccio”	19
Figura 2.7 “Stampante 3d Binder Jetting”	23
Figura 2.8 “Fusione a letto di polvere”	25
Figura 2.9 “Schema di una stampa 3D”	27
Figura 2.10 “Schema di stampaggio ad iniezione”	31
Figura 2.11 “Stampaggio per soffiaggio”	32
Figura 2.12 “Stampaggio per compressione”	32
Figura 2.13 “Stampaggio sottovuoto”	33
Figura 2.14 “Tecnologia di tipo sottrattivo”	40
Figura 2.15 “Tecnologia di tipo additivo”	40
Figura 2.16 “Filamento ASA con esempi di modelli 3D”	42
Figura 2.17 “Busto ortopedico in Polipropilene”	43
Figura 2.18 “Girante in Policarbonato”	44
Figura 2.19 “Telaio di un drone in materiale composito”	45
Figura 2.20 “Modello di turbina in scala in materiale ABS”	46
Figura 3.1 “Telaio con struttura “H””	50
Figura 3.2 “Telaio con struttura “X””	51
Figura 3.3 “Telaio con struttura “Hybrid-X””	51
Figura 3.4 “Telaio con struttura “Stretch-X””	52
Figura 3.5 “Telaio con struttura “Square””	52
Figura 3.6 “Throttle del drone”	53
Figura 3.7 “Schema di rotazione”	54

Figura 3.8 “Movimenti del drone”	55
Figura 4.1 “Logo Siemens Solid-Edge”	56
Figura 4.2 “Barra degli strumenti di Siemens Solid-Edge”	57
Figura 4.3 “Logo Siemens NX”	57
Figura 4.4 ““Pre/Post””	58
Figura 4.5 ““Nuovo FEM e nuova simulazione””	58
Figura 4.6 “Ambienti “FEM” e “Simulazione””	58
Figura 4.7 ““Tetraedro 3D””	59
Figura 4.8 “Pannello per la scelta dell’elemento e delle dimensioni”	59
Figura 4.9 “Proprietà “Altro””	59
Figura 4.10 “Menù: “Assegna materiali””	60
Figura 4.11 ““Qualità elemento””	60
Figura 4.12 ““Soluzione””	60
Figura 4.13 ““Tipo di vincolo””	61
Figura 4.14 “Scelta del vincolo”	61
Figura 4.15 ““Tipo di carico””	61
Figura 4.16 “Scelta del carico”	62
Figura 4.17 “Trave con carico e vincolo applicati”	63
Figura 4.18 “Spostamento – Nodale della trave (vista assonometrica)”	63
Figura 4.19 “Spostamento – Nodale della trave (vista laterale)”	64
Figura 4.20 “Tensione Elemento nodale (vista assonometrica)”	64
Figura 4.21 “Tensione Elemento nodale (vista laterale)”	65
Figura 4.22 “Modellazione “Altro””	66
Figura 4.23 “Menu a tendina con la voce “Ottimizzazione Topologia””	66
Figura 4.24 ““Spazio di progettazione””	67
Figura 4.25 “Finestra per assegnazione materiale”	67
Figura 4.26 “Icone per l’assegnazione dei parametri dinamici”	68
Figura 4.27 ““Carichi ambientali””	68
Figura 4.28 ““Vincolo di ottimizzazione””	68

Figura 4.29 “Ottimizza”	69
Figura 4.30 “Mostra risultato” e “Impostazioni risultato”	69
Figura 4.31 “Trave ottimizzata”	71
Figura 5.1: “Drone con la componentistica”	71
Figura 5.2 “Scheda elettronica”	72
Figura 5.3 “Batteria Li-Po”	72
Figura 5.4 “Motore brushless CAD”	72
Figura 5.5 “Telaio superiore (file Solid-Edge)”	73
Figura 5.6 “Telaio inferiore (file Solid-Edge)”	73
Figura 5.7 “Motore brushless”	75
Figura 5.8 “Telaio superiore con forze e vincoli applicati (vista frontale)”	76
Figura 5.9 “Spostamento – Nodale Telaio Superiore (vista assonometrica)”	77
Figura 5.10 “Spostamento – Nodale Telaio Superiore (vista frontale)”	77
Figura 5.11 “Tensione – Elemento - Nodale Telaio Superiore (vista assonometrica)”	78
Figura 5.12 “Tensione – Elemento - Nodale Telaio Superiore (vista frontale)”	78
Figura 5.13 “Vincoli e carichi imposti Telaio Superiore”	79
Figura 5.14 “Ottimizzazione Topologica Telaio Superiore (Spostamento)”	80
Figura 5.15 “Ottimizzazione Topologica Telaio Superiore (Tensione)”	81
Figura 5.16 “Telaio inferiore con forze e vincoli applicati (vista assonometrica)”	82
Figura 5.17 “Spostamento – Nodale Telaio Inferiore (vista assonometrica)”	82
Figura 5.18 “Spostamento – Nodale Telaio Inferiore (vista frontale)”	83
Figura 5.19 “Tensione – Elemento Nodale Telaio Inferiore (vista assonometrica)”	83
Figura 5.20 “Tensione – Elemento Nodale Telaio Inferiore (vista frontale)”	84
Figura 5.21 “Vincoli e carichi imposti Telaio Inferiore”	85
Figura 5.22 “Ottimizzazione Topologica Telaio Inferiore (Spostamento)”	86
Figura 5.23 “Ottimizzazione Topologica Telaio Inferiore (Tensione)”	86
Figura 5.24 “Spostamento - Nodale Telaio Superiore (condizioni di rottura)”	87
Figura 5.25 “Tensione Von Mises Telaio Superiore (condizioni di rottura)”	88
Figura 5.26 “Spostamento - Nodale Telaio Inferiore (condizioni di rottura)”	89

Figura 5.27 “Tensione Von Mises Telaio Inferiore (condizioni di rottura)”	89
Figura 5.28 “Telaio Superiore grezzo (a) ed ottimizzato (b)”	90
Figura 5.29 “Dettaglio foro Telaio Superiore grezzo (a) ed ottimizzato (b)”	90
Figura 5.30 “Dettaglio copertura Telaio Superiore grezzo (a) ed ottimizzato (b)”	91
Figura 5.31: “Telaio Inferiore grezzo (a) ed ottimizzato (b)”	91
Figura 6.1 “Voxel”	92
Figura 6.2 “Varie discretizzazioni di modello 3D”	93
Figura 6.3 “Elemento fluttuante nel Telaio Inferiore”	93
Figura 6.4 “Risoluzione con ridefinizione della parte”	94
Figura 7.1: “Preventivo costi di realizzazione telai grezzi”	96
Figura 7.2: “Preventivo costi di realizzazione telai ottimizzati”	97

III. Elenco delle Tabelle

Tabella 2.1 “Confronto Manifattura tradizionale e Stampa 3D”	22
Tabella 2.2 “Confronto Stampa 3D e Stampa ad iniezione”	41
Tabella 2.3 “ABS”	47
Tabella 2.4 “ABS-ESD7”	47
Tabella 2.5 “ABS-M30”	48
Tabella 2.6 “ABS-M30i”	48
Tabella 2.7 “ABSi”	49
Tabella 5.1 “Calcolo forze peso compressive”	72

1. Introduzione

Il lavoro di tesi che si andrà a discutere spiega come l'analisi FEM e l'Ottimizzazione Topologica possano definire la realizzazione del telaio di un drone in grado di mantenere i carichi della componentistica essenziale avendo però un peso minimo onde evitare il collasso della struttura.

Si considera, quindi, un telaio grezzo avente una massa iniziale di 3,2 kg e si tiene conto degli elementi meccanici ed elettronici che dovrà supportare: il gruppo di schede, i motori brushless, e la batteria Li-Po. L'obiettivo è ottenere una geometria che sorregga i carichi in maniera ottimale pur avendo ridotto notevolmente la massa. Inoltre, dopo aver acquisito il telaio ottimizzato, si esegue una valutazione dei costi e il relativo impatto ambientale che può gravare con la sua realizzazione.

Si procede quindi con l'implementazione del software CAE *Siemens NX*, nel quale si importa il prototipo del telaio che verrà ottimizzato tenendo conto di aree della geometria che non devono essere modificate, in particolare si impongono dei vincoli costruttivi ai quattro piedini della struttura e al labbro di accoppiamento fra il body inferiore e superiore, in questo modo si modifica la forma del drone e si migliorano le prestazioni, pur garantendo l'adesione tra i due corpi.

Una volta verificato l'aspetto progettuale del prodotto finito, si tiene conto dell'ambito economico. Partendo ora dal body ottimizzato, si valutano i costi di realizzazione e si confrontano con il telaio iniziale.

Il capitolo introduttivo è caratterizzato dallo stato dell'arte, ovvero si definisce il processo di Ottimizzazione Topologica, presente nel primo paragrafo, per poi passare alla definizione di Additive Manufacturing e Stampa ad Iniezione, descritti rispettivamente nel secondo e terzo.

Successivamente si proseguirà con la descrizione dei materiali che vengono impiegati nei processi di stampa, soprattutto di tipo additivo. In particolare, si pone l'attenzione sull'ABS, un polimero largamente utilizzato nella stampa 3D come filamento termoplastico.

Avendo sviluppato l'analisi del telaio di un quadricottero, il capitolo terzo si concentra sulla definizione di drone e sulla meccanica del volo. Inoltre, si considerano i vari frame che possono essere realizzati in modo da favorire determinate prestazioni meccaniche.

Il quarto capitolo si occupa della descrizione dei software impiegati nell'esperienza: *Solid-Edge* e *Siemens NX*. Vengono, quindi, analizzati i moduli utilizzati per le simulazioni e le ottimizzazioni, ovvero "Modulo FEM" e "Ottimizzazione della Topologia".

Successivamente, viene descritta l'esperienza sulla quale si basa l'intero studio di tesi, ovvero i processi di ottimizzazione del telaio di un drone che era stato precedentemente sviluppato con *Solid-Edge*.

Si elencano, quindi, i vari procedimenti che hanno permesso le simulazioni dinamiche delle parti analizzate, in particolare il corpo superiore e inferiore del drone.

Rispetto a tale esperienza, nel sesto capitolo è possibile osservare delle problematiche progettuali che potrebbero influenzare il processo di ottimizzazione topologica e successivamente si calcoleranno delle strategie risolutive.

Infine, viene spiegata la particolare attenzione verso tre aspetti fondamentali che coinvolgono la produzione del modello tridimensionale: l'ambito progettuale, l'aspetto economico e soprattutto l'impatto ambientale.

2. Ottimizzazione Topologica e Manifatture Additive

2.1 Ottimizzazione Topologica

2.1.1 Definizione

Con il termine "*Ottimizzazione Topologica*" si definisce lo studio effettuato con dei software CAE di nuova generazione, i quali sono in grado di ridefinire la forma di un componente meccanico, mediante degli alleggerimenti legati alla sottrazione di materiale utile ai fini del mantenimento delle proprietà meccaniche e strutturali del pezzo [1].

Mediante questo metodo è possibile ottenere componenti dalle forme organiche, rispettando i vincoli di producibilità, andando a ridurre i pesi in gioco e garantendo le prestazioni iniziali.

Il processo di Ottimizzazione Topologica, oltre ad essere impiegato nell'Additive Manufacturing, è utilizzato anche in altre tecnologie tradizionali di produzione.

La massima espressione del processo viene definita mediante il concetto di "Forma libera" che è permesso dalla tecnologia di stampa 3D.

L'Ottimizzazione Topologica risulta essere molto utile per le aziende, in quanto permette di definire un particolare presente nel modello CAD sfruttando la tecnologia 3D.

Grazie a tale caratteristica risulta possibile ridurre i costi ed i tempi di produzione, in quanto si va a posizionare il materiale selezionato solo nelle aree in cui occorre realmente per garantire la struttura della parte ottimizzata. Inoltre, è possibile sviluppare idee che un tempo risultavano essere inattuabili.

Si può anche progettare in modo completamente differente particolari che risiedono nella parte analizzata che, prima di tale avvento, erano disegnati rigidamente a causa dei vincoli e limiti dettati dalle tecnologie di produzione tradizionali.

2.1.2 Processi di ottimizzazione

I processi tradizionali di progettazione digitale implicano l'applicazione di carichi a un pezzo già prodotto per valutarne i punti deboli. I tecnici devono quindi modificare il design fino a quando il pezzo non soddisfa i vincoli meccanici dati.

Con l'ottimizzazione della topologia, la logica applicata è diversa: i carichi meccanici rappresentano i dati da inserire che consentiranno al software di proporre una nuova geometria per il pezzo. Si dovrebbero avere meno iterazioni applicate al design, riducendo notevolmente i tempi di progettazione e produzione.

In concreto, l'ottimizzazione della topologia inizia con un modello 3D grezzo di un componente nuovo o esistente, al quale vengono applicati diversi carichi. Il software, quindi, procede al calcolo di tutte le forze assegnate.

Durante questa fase di progettazione si rimuoverà materiale dove il pezzo non è soggetto a stress. Una bozza del futuro pezzo ottimizzato è quindi già visibile.

La geometria finale, che soddisfa requisiti meccanici e di design, può quindi essere ottenuta dopo aver rifinito il modello. L'ottimizzazione della topologia soddisfa l'esigenza di dover ridurre o aumentare la resistenza meccanica.

Il processo di Ottimizzazione Topologica si suddivide in diverse operazioni da compiere:

- INPUT: sul modello CAD 3D vengono imposte le forze ed i vincoli;
- si definiscono le zone del modello che non devono essere modificate e rielaborate;
- si effettuano analisi FEM (Finite Element Method) che permettono di calcolare il comportamento strutturale del sistema;
- sulla base delle Analisi FEM e sulla base della tecnologia di produzione per cui si sta effettuando l'ottimizzazione, il software elimina la percentuale di materiale non necessaria al mantenimento dei parametri di sicurezza definiti;
- OUTPUT: il modello ottimizzato, che si ottiene grazie ai diversi passaggi, avrà un peso inferiore rispetto a quello iniziale pur mantenendo inalterati i requisiti meccanici desiderati.

2.1.3 Metodo matematico

L'Ottimizzazione Topologica è il tipo più comune di ottimizzazione strutturale. Viene utilizzata nella fase iniziale del progetto per prevedere la distribuzione ottimale di materiale all'interno di un determinato spazio di una struttura e prende in considerazione le specifiche funzionali ed i vincoli di produzione.

Il metodo matematico più diffuso nell'Ottimizzazione Topologica è il metodo del "Materiale Solido Isotropico con Penalizzazione", ovvero *SIMP* (*Solid Isotropic Material with Penalization*).

Il metodo *SIMP* prevede una distribuzione ottimale del materiale all'interno di un determinato spazio di progettazione per casi di carico, condizioni al contorno, vincoli di produzione e requisiti di prestazione [6].

L'approccio tradizionale all'Ottimizzazione Topologica è la discretizzazione di un dominio in una griglia di elementi finiti chiamata microstrutture solide isotropiche.

Ogni elemento è riempito con del materiale nelle aree che lo richiedono o svuotato del medesimo nelle aree dove è possibile rimuoverlo.

Come si può osservare dalla *Figura 2.1*, la distribuzione della densità all'interno di un dominio di progettazione ρ è discreta e a ciascun elemento è assegnato un valore binario:

$\rho(e) = 1$ dove il materiale è richiesto

$\rho(e) = 0$ dove il materiale è rimosso

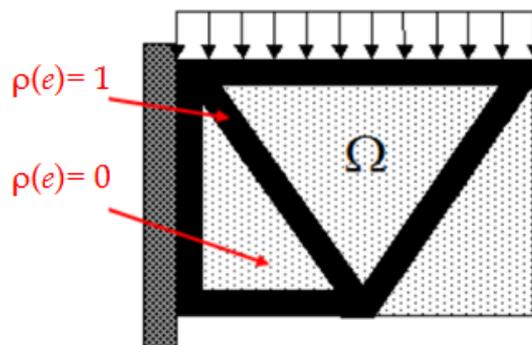


Figura 2.1: Layout del materiale ottimizzato di una trave caricata

L'introduzione di una funzione di distribuzione della densità continua relativa evita la natura binaria del problema. Per ogni elemento, la densità relativa assegnata può variare tra un valore minimo ρ_{\min} e 1, che consente l'assegnazione di densità intermedie per gli elementi (caratterizzati come elementi porosi).

ρ_{\min} è il valore minimo relativo di densità consentito per gli elementi vuoti superiori a 0. Questo valore garantisce la stabilità numerica dell'analisi di elementi finiti.

Poiché la densità relativa del materiale può variare in modo continuo, anche il modulo di Young di ogni elemento può variare di conseguenza.

Per ciascun elemento e la relazione tra il fattore di densità relativo del materiale ρ_e e il modulo di Young isotropico assegnato E_0 è calcolato dalla legge di potenza:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0$$

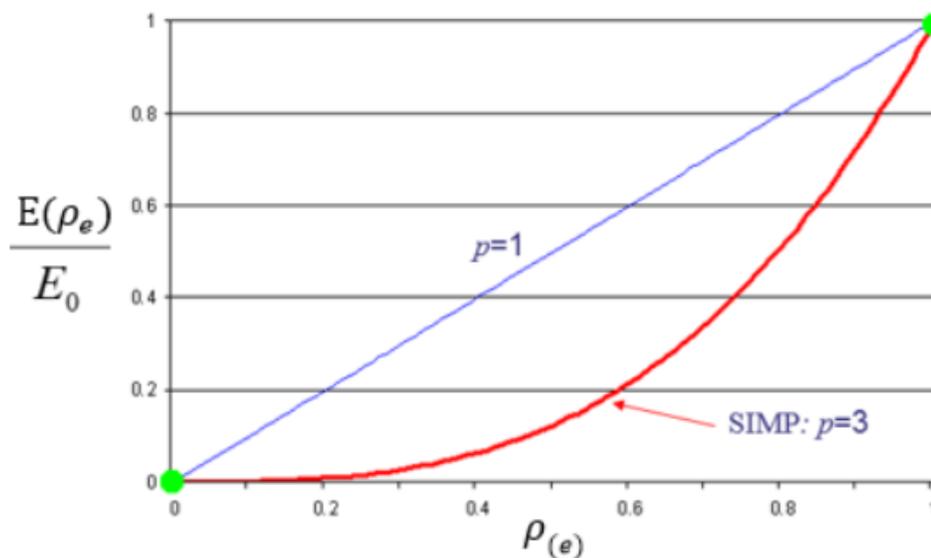


Figura 2.2: Relazione empirica tra ρ_e e $E(\rho_e)/E_0$

Nella Figura 2.2 viene mostrata graficamente la funzione sopra descritta. Il fattore di penalità p diminuisce l'apporto di elementi con densità intermedie alla rigidità totale. Tale parametro indirizza la soluzione di ottimizzazione agli elementi neri solidi ($\rho_e = 1$) o agli elementi bianchi vuoti ($\rho_e = \rho_{\min}$).

Gli esperimenti numerici indicano che è adatto un valore di penalità $p=3$.

Una riduzione di un modulo elastico del materiale dell'elemento comporta una riduzione della rigidità.

Secondo il metodo *SIMP*, la rigidità globale è modulata in base alla legge:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e$$

dove

K_e è la matrice di rigidità dell'elemento;

ρ_{min} è la densità minima relativa;

ρ_e è la densità relativa dell'elemento;

p è il fattore di penalità;

N è il numero di elementi nel dominio di progettazione.

2.1.4 Massimizzazione della rigidità

Un obiettivo di ottimizzazione diffuso è la massimizzazione della rigidità complessiva di una struttura o la riduzione della sua conformità in una determinata quantità di rimozione della massa. La conformità globale è uguale alla somma dell'elemento elastico o alle energie di deformazione. Ridurre al minimo la conformità globale (C) è equivalente a massimizzare la rigidità globale.

L'algoritmo di ottimizzazione, attraverso un processo iterativo, cerca di risolvere le densità degli elementi (ovvero variabili del progetto di ottimizzazione) che riducono al minimo la conformità globale della struttura.

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e] [u_e]$$

dove

u_e è il vettore di spostamento nodale dell'elemento e ;

K_e è la rigidità dell'elemento e ;

ρ contiene le densità relative degli elementi ρ_e .

Durante ogni iterazione di ottimizzazione, il vincolo di massa di destinazione, l'equilibrio forza-rigidità globale e i vincoli funzionali richiesti devono essere soddisfatti:

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{target}$$

dove

v_e è il volume dell'elemento e M_{target} è la massa di destinazione dell'ottimizzazione.

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\}$$

dove

$K_{(\rho)}$ è la matrice di rigidità globale modulata dal vettore di densità relative;

u è il vettore di spostamento

F è il vettore di forza esterna

$$\theta(\{\rho\}, \{u\})_1 \leq \theta_1^*, \theta(\{\rho\}, \{u\})_2 \leq \theta_2^*, \dots$$

La formula contiene i vincoli di risposta del progetto, come limiti su sollecitazioni, spostamenti, frequenze proprie.

2.1.5 Analisi della sensibilità

Ad ogni iterazione, l'algoritmo di ottimizzazione esegue un'analisi della sensibilità per valutare l'impatto della variazione di densità del materiale sulla funzione obiettivo per massimizzare la rigidità.

Matematicamente, l'analisi della sensibilità è espressa come derivata della funzione obiettivo rispetto alla densità del materiale:

$$\frac{dC}{d\rho_e} = -p(\rho_e)^{p-1} [u_e]^T [K_e] [u_e]$$

Durante la suddetta analisi, gli elementi ponderati con fattori di densità del materiale perdono la propria importanza strutturale e sono eliminati in iterazioni successive. Se si calcola la sensibilità in modo indipendente per ogni elemento e non si prende in considerazione la connettività tra gli elementi, si rischia di ottenere una discontinuità nel materiale, mentre i volumi diventano scollegati dalla geometria principale.

Questo fenomeno è noto come “*effetto scacchiera*”. Per ridurre tale effetto, si applica uno schema di filtraggio ad un raggio di influenza dell’elemento e si calcola la media della sensibilità di ciascun elemento all’interno della zona di influenza.

Le iterazioni di ottimizzazione continuano fino a quando le variazioni della funzione obiettivo raggiungono i criteri di convergenza.

2.1.6 Software impiegati nell’Ottimizzazione Topologica

I software di Ottimizzazione Topologica si basano principalmente sull’eliminazione del superfluo. La leggerezza di un modello determina un minor dispendio di energie e quindi costi minori, legati al trasporto o al movimento degli stessi.

Ad esempio, la *Figura 2.3* mostra un processo di ottimizzazione che da un prototipo iniziale genera un prodotto finito avente prestazioni meccaniche migliori pur avendo ridotto notevolmente il materiale di costruzione [7].



Figura 2.3: Esempio di sviluppo di Ottimizzazione Topologica

L'Ottimizzazione Topologica permette inoltre di realizzare particolari strutture di telai per UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Vengono progettate strutture con tecniche di design generativo che determinano una forma unica, robusta ed efficiente dal punto di vista strutturale ed aerodinamico. Vengono applicate in scenari come agricoltura di precisione e monitoraggio industriale. Ad esempio, la *Figura 2.4* mostra graficamente la riduzione percentuale di materiale metallico di un telaio che nell'avanzare delle fasi perde una massa pari al 20% della struttura precedente [4].

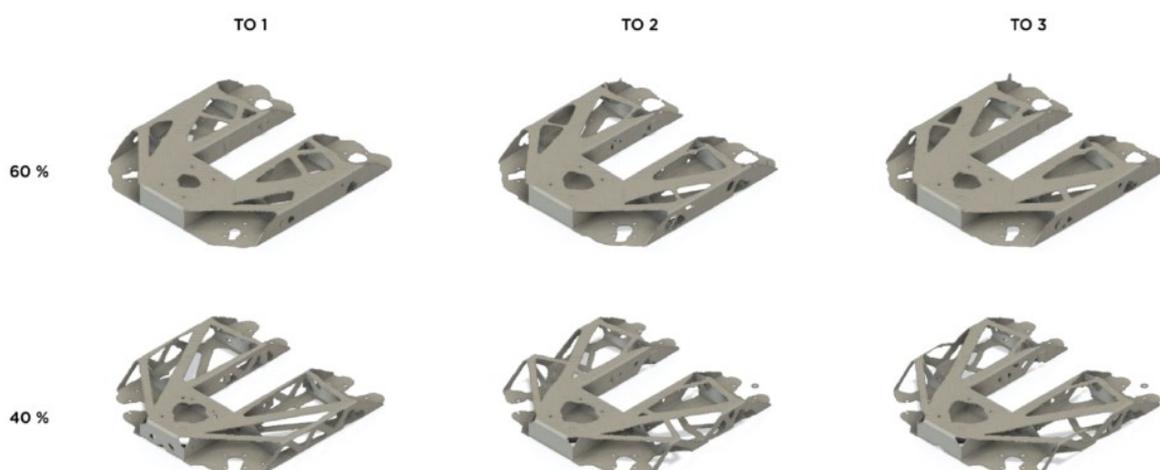


Figura 2.4: Processo di Ottimizzazione Topologica di un telaio

2.1.7 Progettazione generativa

La progettazione generativa si basa sull'approccio di progettazione tradizionale applicando potenza di calcolo e tecniche di ottimizzazione alla progettazione dei componenti. Tale processo consente ai progettisti di ridurre sia il peso che la quantità di materiale utilizzato per uno specifico componente, mantenendone l'integrità strutturale [5].

L'ottimizzazione topologica risulta efficiente per i componenti CAD, in quanto in base ai parametri definiti come materiale specifico per il componente, spazio di progettazione o involucro, vincoli e carichi, è possibile eseguire

contemporaneamente scenari diversi con obiettivi di peso, situazioni di carico e vincoli differenti [3].

2.1.8 La scelta del software

Scegliere il giusto software di ottimizzazione della topologia è un passaggio fondamentale perché lo strumento permetterà di definire dei limiti sul pezzo che si sta creando in base al materiale, alle proprietà geometriche e ai carichi meccanici.

Il software analizzerà i diversi carichi in casi diversi, sia che il pezzo venga utilizzato in condizioni normali o in condizioni estreme, sia che lo spazio disponibile per il design non debba essere modificato.

Tra i software CAE sono presenti: *“Ansys Discovery”*, *“Tosca”* di Dassault Systèmes, *“Within Labs”* di Autodesk, *“Inspire”* di SolidThinking, *“Netfabb”* e *“Simufact Additive”*.

2.1.9 Ottimizzazione Topologica nel settore industriale

Uno dei settori in cui si considera notevolmente il modulo di Ottimizzazione Topologica è quello automobilistico. Un risparmio di pochi grammi per veicolo, su una produzione di diversi milioni di unità, rappresenta tonnellate di materiale risparmiato.

Il settore aerospaziale è molto interessato all’ottimizzazione della topologia per ridurre i costi indiretti. Un velivolo più leggero consuma meno carburante e questo, a lungo termine, porta a un risparmio significativo.

Oltre all’aspetto legato al peso, l’ottimizzazione della topologia consente al settore aerospaziale di immaginare forme molto più complesse.

Ad esempio, l’antenna del satellite *“Sentinel-1B”* (Figura 2.5) dopo essere stata processata attraverso un software di Ottimizzazione Topologica, ha ridotto il suo peso del 40% (da 1,6 kg a 0,94 kg) [2].

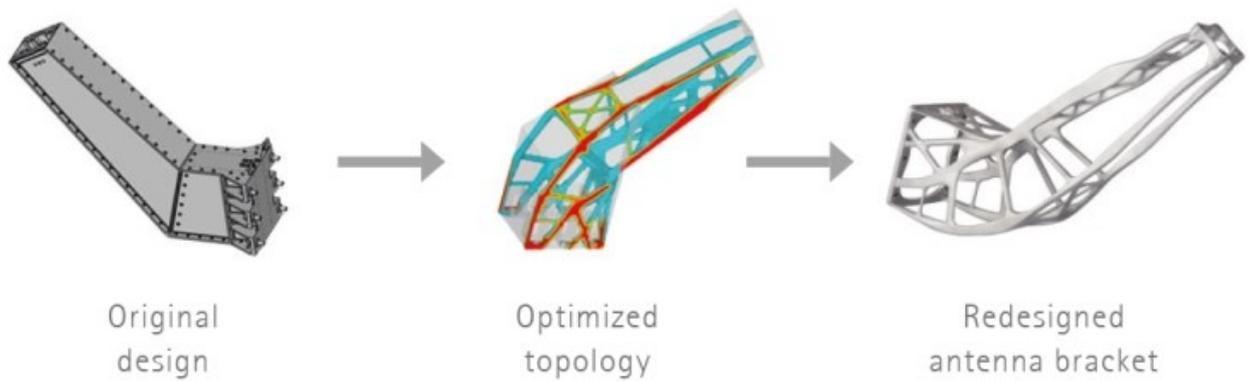


Figura 2.5: Ottimizzazione Topologica dell'antenna del satellite "Sentinel-1B"

2.1.10 Ottimizzazione Topologica nel settore medico

Il settore medico sta scoprendo questo metodo di progettazione, soprattutto per la produzione di impianti su misura: l'ottimizzazione topologica permette di imitare la densità ossea, riducendo il peso totale. Numerosi impianti hanno introdotto strutture in lattice, pur restando solidi quanto quelli progettati in maniera tradizionale o persino di più. Ad esempio, come si evince dalla *Figura 2.6*, vengono realizzati dei tutori mediante un processo di ottimizzazione della topologia che garantisce riduzione di peso per mantenendo le prestazioni di un dispositivo tradizionale.



Figura 2.6: Ottimizzazione Topologica di un tutore per avambraccio

2.2 Additive Manufacturing

2.2.1 Definizione

La produzione o manifattura additiva (Additive Manufacturing o AM) è un processo industriale impiegato per fabbricare oggetti partendo da modelli 3D computerizzati, aggiungendo uno strato sopra l'altro, in opposizione alle metodologie tradizionali di produzione sottrattiva (fresatrici o torni), che partono da un blocco di materiale dal quale vengono rimossi meccanicamente trucioli.

Esistono diverse tecnologie di Manifattura Additiva, tra cui FFF (*"Fused Filament Fabrication"*) che è la tecnologia di manifattura additiva più comune, anche conosciuta come FDM (*"Fused Deposition Modeling"*).

Tale tecnologia di stampa estrude filamenti di materiali termoplastici o compositi al fine di creare una parte, strato dopo strato; inoltre può essere utilizzata con un ampio range di termoplastici standard come ABS e PLA.

La tecnologia delle stampanti 3D è ormai anche in molte case di hobbisti, in quanto più semplice ed economica. Un filamento di polimero viene riscaldato e quindi estruso tramite un ugello, il quale ha la possibilità di muoversi nello spazio andando a generare la geometria del particolare che si vuole ottenere. Presenta, però, dei limiti nella precisione e finitura superficiale del manufatto, in quanto il diametro dell'ugello non può essere ridotto di molto.

La gamma di polimeri utilizzabili negli ultimi anni si è ampliata moltissimo e si iniziano a trovare sul mercato anche i primi polimeri tecnici oltre ai più conosciuti elastomeri. La possibilità di utilizzare materiali di colori differenti rende questa tecnica adatta anche alla creazione di prototipi più simili al prodotto finale. Semplicità ed economicità di questa tecnologia hanno permesso la diffusione al grande pubblico delle tecnologie di additive manufacturing.

I vantaggi della tecnologia FFF sono legati a tempi di consegna brevi e ridotto sfrido, ovvero il materiale che viene eliminato. Si ha la possibilità di ridurre il numero di parti che formano un assemblaggio, creando pezzi unici integrati grazie alla libertà

di progettazione. Si ha la possibilità di orientare le fibre secondo la direzione di estrusione, nel caso di compositi.

Gli svantaggi, invece, sono legati alla classe di tolleranza fine non raggiungibile senza iterazioni di compensazione. Non tutti i termoplastici sono stampabili.

Alcuni esempi di tecnologie additive sono la stereolitografia, la modellazione a deposizione fusa o la sinterizzazione laser.

2.2.2 Benefici della stampa 3D

L'innovazione è alla base di ogni nuova idea nel mercato. Nel processo di sviluppo del prodotto, ogni azienda ha bisogno di comprendere le necessità di ogni nuovo design ed i confini che dovrebbero essere fissati quando si procede con la valutazione delle opzioni di produzione, relative al concept pronto.

Prima di esaminare le diverse tecnologie di produzione tradizionale, vengono identificate le differenze tra la produzione tradizionale e la stampa 3D.

Quest'ultima è il metodo di manifattura ideale per la produzione rapida di parti quando si tiene conto di piccoli lotti, tempi di consegna brevi, geometrie complesse o design personalizzati. Aiuta a ridurre il time to market velocizzando il processo di prototipazione e quindi diminuisce i costi legati alla fase di sviluppo del prodotto.

2.2.3 Identificazione del processo di produzione più idoneo

L'identificazione della tecnologia di produzione idonea, da implementare per la progettazione di un prodotto, deve considerare il numero di parti da produrre, la velocità di produzione, i tempi di consegna, i requisiti meccanici e le prestazioni del materiale. Inoltre, si devono considerare le tolleranze richieste e la complessità delle geometrie. Per determinare il processo più adatto si può analizzare la *Tabella 2.1*.

2.2.4 La stampa 3D e la manifattura tradizionale

A seconda del tipo di materiali, le parti stampate in 3D possono essere combinate con tecnologie tradizionali per ottenere superfici molto lisce, per soddisfare

tolleranze molto basse e per assemblare più parti di grandi dimensioni. Finiture di alta qualità possono essere ottenute attraverso processi di lucidatura meccanica e chimica. La saldatura è un'ottima opzione per unire due o più parti.

PROCESSO	MANIFATTURA TRADIZIONALE	STAMPA 3D
Geometria	Limiti	Nessun limite, parti flessibili e complesse, opzioni di riempimento
N° di processi necessari per ottenere la forma finale	Uno o più di uno	Uno
Stocks necessari	SI	NO
Redditività	Basata su grandi lotti	Indipendente dalle unità
Obiettivo	Produzione di massa	Produzione customizzata

Tabella 2.1: Confronto Manifattura tradizionale e Stampa 3D

2.2.5 Principi base dell'Additive Manufacturing

Le richieste sempre più complesse da parte dei progettisti hanno spinto i tecnologi ad approcciarsi sempre più alla rivoluzione dell'additive manufacturing. Quest'ultima si distingue dalle tradizionali tecnologie di lavorazione perché non asporta materiale dal grezzo, ma ottiene particolari tridimensionali molto complessi attraverso il deposito progressivo di strati di materiale.

I processi di additive manufacturing mirano tutti a generare un solido, per questo motivo si parte sempre da un disegno CAD 3D che viene convertito nel formato necessario a renderlo fruibile per la lavorazione.

Una volta importato il modello nel software della macchina si procede generalmente con il dividerlo in una successione di strati di piccolo spessore. Vengono poi aggiunti eventuali supporti, da creare mediante la tecnologia stessa, oppure costruiti in precedenza, che permettono al particolare di sostenere il modello durante la produzione. Infine, i particolari ricavati possono essere, se necessario, sottoposti a trattamenti di post-produzione, tra i quali troviamo trattamenti chimici e termici ma anche lavorazioni di finitura alle macchine utensili.

2.2.6 Tipologie di Additive Manufacturing

La tecnologia “*Binder Jetting*” (Figura 2.7) lavora mediante l’utilizzo di speciali agenti solidificanti, per questo viene anche definita “*Inkjet Printing*” per la similitudine con l’inchiostro delle comuni stampanti [7]. Nel dettaglio, questa tecnologia prevede di solidificare selettivamente successivi strati di polvere mediante l’apporto di agenti solidificanti. Le polveri sono costituite da materiale strutturale e da un legante che può essere organico o inorganico. Questa tipologia di lavorazione può essere implementata senza l’utilizzo del calore, sebbene richieda un trattamento in forno. In fase di progettazione è necessario tener conto del ritiro dei particolari se sottoposti a tale trattamento. Si possono realizzare con un’alta produttività particolari in polimero, metallo ma anche in ceramica o vetro. Inoltre, le parti in polimero possono essere realizzate con un’ampia gamma di colori.

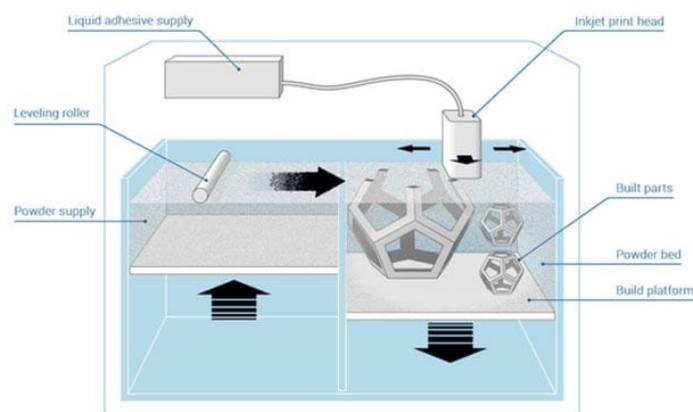


Figura 2.7: Stampante 3d Binder Jetting

Fotopolimero a getti (Jetted Photopolymer)

Questa tipologia di lavorazione si basa sulle proprietà fotosensibili di alcuni polimeri o cere speciali. Microsfere di polimero vengono depositate per strati sino a formare il modello da realizzare mentre una luce UV solidifica il deposito. Ciò permette di avere prototipi multicolore in diversi materiali e con una finitura superficiale di alto livello. Risultano però molto delicati, di conseguenza non adatti a diventare parti strutturali [16].

LOM (Laminated Object Manufacturing)

Diversi fogli di materiale vengono impilati e laminati assieme per formare l'oggetto desiderato. La laminazione dei fogli, tagliati con una lama o mediante laser, può avvenire chimicamente, tramite adesivi, per saldatura ad ultrasuoni o brasatura (solo per i metalli). Le parti che vengono tagliate strato per strato vengono rimosse alla fine del processo. Questa tecnologia permette alta produttività a costi relativamente contenuti, consentendo inoltre di poter creare oggetti con delle componenti annegate nei fogli. Si possono ottenere oggetti lavorando fogli di carta, plastica e metalli [16].

PBF (Powder Bed Fusion)

Attualmente è la tecnologia più promettente per quanto riguarda l'Additive Manufacturing dei metalli poiché permette di realizzare particolari strutturali dalle elevate prestazioni [7]. Il processo, rappresentato dalla *Figura 2.8*, è molto semplice in quanto strati di polveri metalliche vengono successivamente solidificati mediante un raggio laser orientato da specchi mobili. La microfusione innescata dal laser restituisce un materiale molto uniforme ed è per questo motivo che le proprietà delle leghe lavorate in questo modo sono persino superiori a quelle lavorate mediante tecnologie meccaniche. Si possono lavorare molte leghe metalliche, dall'alluminio al titanio, anche con geometrie complesse. Le macchine, però, lavorano su superfici molto ridotte e con costi molto elevati. Questo genere di lavorazione, inoltre, non necessita di supporti in quanto è la polvere stessa degli strati precedenti a svolgere tale funzione [16].

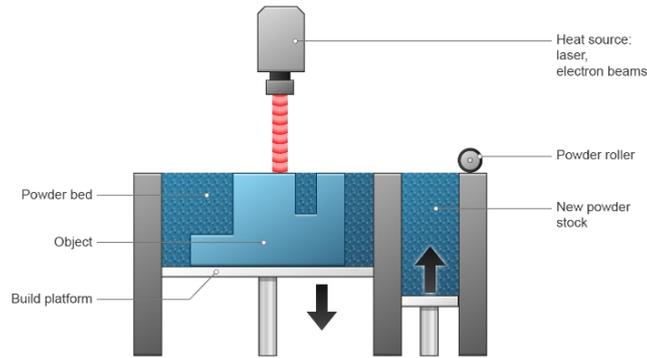


Figura 2.8: Fusione a letto di polvere

LMD (Laser Metal Deposition) /Laser Cladding

Questa tipologia di lavorazione va ad apportare del materiale a solidi già esistenti. Si possono quindi effettuare riparazioni o aggiunte di uno o più materiali differenti e si può affiancare a lavorazioni come il taglio laser o la fresatura. In questa tipologia di lavorazione un laser o una sorgente di elettroni aumenta la temperatura locale del punto sul quale bisogna lavorare generando un bagno fuso dove si fonderà la polvere apportata dall'ugello di lavorazione [16]. Si creano, di conseguenza, dei cordoni di saldatura che andranno a formare la geometria desiderata sovrapponendosi fra loro. Il punto di lavorazione viene spesso inondato di gas inerte per evitare ossidazione o altre reazioni del materiale fuso localmente. L'apporto di materiale dalle alte proprietà solo in punti strategici permette di risparmiare molto nella creazione di particolari molto prestanti per settori come quello navale e aeronautico.

DLP (Digital Light Processing) e Stereolitografia

Entrambe le tecnologie si basano sulla solidificazione di strati successivi di polimero fotosensibile liquido. La stereolitografia inizia la polimerizzazione del liquido mediante un laser, di conseguenza la sua definizione è data dalla dimensione del punto laser stesso. La tecnologia Digital Light Processing, invece, inizia la polimerizzazione mediante un proiettore capace di proiettare nello spazio, di conseguenza la definizione deriverà dalla dimensione dei pixel proiettati. L'accuratezza ottenibile mediante queste tecnologie è davvero elevata e permette di

ottenere superfici definite. Con entrambe è possibile realizzare anche particolari di grandi dimensioni con una relativa velocità [16].

LDM (Liquid Deposition Modeling)

Questa particolare tecnologia permette di ottenere manufatti additivi di ceramica, argilla e altri materiali fluido densi [16]. Un cilindro ad aria compressa, infatti, attraverso una vite senza fine, permette di estrarre la ceramica attraverso un ugello, andando a depositare i vari layer come nella tecnologia FFF.

Esistono, però, limitazioni sulle geometrie ottenibili date dai collassi che possono avvenire prima della completa essiccazione.

2.2.7 Cinematica della stampa 3D

Esistono varie tipologie di cinematismi che vanno a posizionare la testa di stampa nel punto prestabilito:

- **Gantry:** la testa di stampa si muove lungo X, il piano lungo Y, la testa di stampa si allontana dal piano al crescere della Z;
- **Core XY:** la testa si muove sul piano, il quale si allontana al crescere della Z (*Figura 2.9*) [34];
- **Polare:** la testa si muove linearmente ed il piano ruota, la testa si allontana dal piano al crescere della Z;
- **Rodstock o Delta:** vengono impiegati tre motori che si muovono coordinatamente. Tale sistema va a garantire un'alta velocità di movimento e dà la possibilità di incrementare notevolmente il volume di stampa;
- **Robot antropomorfi:** esistono macchine che sfruttano bracci robotici antropomorfi con un estrusore che viene montato sulla testa. Tale sistema viene largamente utilizzato in ambito industriale e permette di avere una maggiore flessibilità sfruttando una cinematica a 5 o 6 assi.

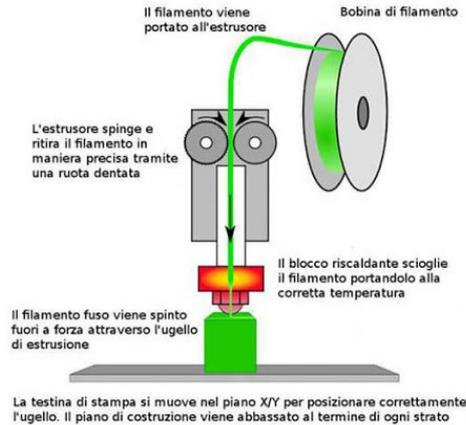


Figura 2.9: Schema di una stampante 3D

2.2.8 Trattamenti estetici funzionali

Rimozione dei supporti

Molte delle tecnologie additive presentano la necessità di supporti per prevenire il collasso della struttura durante la sua creazione. A valle della lavorazione, questi supporti vanno eliminati. Si possono eliminare meccanicamente, spesso a mano, semplicemente staccando il manufatto dai medesimi, oppure chimicamente, immergendo il tutto in un liquido dove solo i supporti risultano solubili.

Sabbiatura

Spesso la superficie dei particolari generati con queste tecnologie non è perfettamente uniforme, per questo motivo la sabbiatura è un trattamento al quale si ricorre spesso. Il manufatto viene colpito con delle sfere di vetro e sabbia scagliate mediante aria compressa, ottenendo quindi una superficie più uniforme eliminando eventuali residui di supporto e i caratteristici gradini derivanti da una lavorazione per strati.

Mass finishing

In questa tipologia di trattamento i pezzi vengono inseriti in un sistema vibrante insieme al materiale abrasivo come la sabbia e ad un materiale che attui l'azione di lucidatura. Gli impatti e l'attrito che si generano levigheranno la superficie,

ottenendo gli stessi risultati della sabbiatura. Questo genere di trattamento è utilizzato prettamente per grandi produzioni.

Vapor smoothing

Il Vapor smoothing è una tecnica usata raramente per rendere lucida e uniforme la superficie di manufatti in polimero, specialmente quelli in ABS.

Verniciatura

La verniciatura può essere applicata su ogni manufatto realizzato mediante produzione additiva.

Electopating (elettroplaccatura)

L'elettroplaccatura si esegue immergendo in un bagno di ioni di una lega, un modello avente carica contraria. Le particelle attratte dalla carica opposta si andranno a depositare sul particolare, costituendo uno strato superficiale uniforme e molto leggero. Questo genere di lavorazione rende il prodotto molto più apprezzabile dal punto di vista estetico, per questo viene spesso utilizzata anche sui particolari in polimero. Le leghe più comunemente utilizzate sono oro, argento, nichel e rame.

Bonding (assemblaggio)

I manufatti realizzati mediante produzione additiva sono molto limitati nelle dimensioni dalle macchine che non permettono di realizzare particolari di grosse dimensioni. Per ovviare a questo limite si può dividere l'oggetto finale in più parti e unirle dopo averle realizzate.

Infiltration

Migliora le proprietà meccaniche e la resistenza alla corrosione dei manufatti in polimero fragili, mediante il rivestimento della superficie con una resina epossidica che, aiutata con una pompa del vuoto, penetrerà nelle cavità riempiendole e creando

una superficie isolante. Come si può facilmente dedurre questo trattamento funziona molto bene per i materiali porosi.

2.3 Stampa ad iniezione

2.3.1 Storia dello stampaggio ad iniezione

Lo stampaggio è il processo di modellazione di una materia prima liquida o flessibile mediante un telaio rigido chiamato stampo. Questo processo, oggi molto diffuso in diversi settori industriali, ha preso piede all'apice della Seconda Guerra Mondiale, quando è aumentata la necessità di prodotti di massa.

2.3.2 L'ascesa industriale dello stampaggio: la produzione di massa

Nel 1872, l'inventore americano John Wesley Hyatt e suo fratello Isaiah crearono la prima macchina per lo stampaggio a iniezione che utilizzava un pistone per spingere la plastica in uno stampo attraverso un cilindro caldo. Fu impiegata principalmente per la produzione di massa di oggetti come bottoni e pettini.

Negli anni '70 Hendry sviluppò il primo sistema di stampaggio a iniezione assistito da gas. Questa tecnica ha reso possibile la produzione di pezzi complessi che potevano essere raffreddati rapidamente. Ciò ha migliorato notevolmente la flessibilità e la resistenza degli oggetti prodotti, riducendo i tempi e i costi di produzione.

Nel 1979 la produzione di plastica ha superato quella dell'acciaio e nel 1990 lo stampaggio a iniezione ha fatto largo uso di stampi in alluminio. Altri metodi di stampaggio ampiamente utilizzati sono il soffiaggio, lo stampaggio a compressione e lo stampaggio sottovuoto (termoformatura).

I settori che utilizzano lo stampaggio ad iniezione riguardano l'elettronica, l'automotive e il settore degli elettrodomestici. Lo stampaggio a iniezione di materie plastiche rimane un metodo economico ed efficiente per produrre pezzi e prodotti di alta qualità. Recentemente, la richiesta di materiali biodegradabili è aumentata per

motivi ambientali. La tecnologia utilizzata oggi è simile a quella del passato. Tuttavia, i computer hanno facilitato l'intero processo di progettazione e produzione. I risultati sono anche più accurati e le parti in plastica sono ora spesso la scelta preferita per le applicazioni tecnologiche e scientifiche avanzate.

2.3.3 Definizione dello stampaggio

Lo stampaggio dà forma a una materia prima, liquida o flessibile, utilizzando un telaio rigido chiamato stampo. Si tratta di un blocco cavo riempito con materiali come plastica, vetro, metallo o ceramica. Questo si indurisce all'interno dello stampo, assumendo l'aspetto finale. Tra i vari processi, i più comuni sono lo stampaggio a iniezione, a soffio, a compressione e sottovuoto. Mentre la progettazione degli stampi e dei loro prototipi può ostacolare la complessità e il finanziamento, la stampa 3D diventa una soluzione rilevante grazie alla sua velocità di esecuzione e alla sua precisione nella realizzazione.

2.3.3.I Stampaggio a iniezione

Nello stampaggio a iniezione (*Figura 2.10*), il materiale si scioglie e viene poi iniettato sotto pressione in uno stampo. La plastica liquida si raffredda e solidifica. L'operazione può essere eseguita con molti materiali come metalli, vetro, termoplastici.

I più comunemente utilizzati sono: Polipropilene (38% della produzione mondiale); ABS (27%); Polietilene (15%); Polistirene (8%).

Considerando tutte le altre possibili tecnologie di produzione, lo stampaggio a iniezione di questi quattro materiali rappresenta da solo oltre il 40% di tutte le parti in plastica prodotte annualmente nel mondo.

L'industria automobilistica è uno dei settori che partecipa alla sua crescita, poiché quasi tutti i componenti in plastica dell'abitacolo di un'auto sono stampati a iniezione. Si utilizza il Polipropilene per le aree non critiche, il PVC per la buona resistenza agli agenti atmosferici e l'ABS per la sua elevata resistenza agli urti.

In elettronica, gli involucri della maggior parte dei dispositivi di consumo sono stampati a iniezione [27]. L'ABS e il Polistirene (PS) sono i più diffusi grazie alla loro incredibile durata e al buon isolamento elettrico.

Questo processo sta diventando sempre più popolare grazie al suo costo unitario estremamente basso nella produzione di grandi volumi. Offre un'elevata ripetibilità e una buona flessibilità di progettazione.

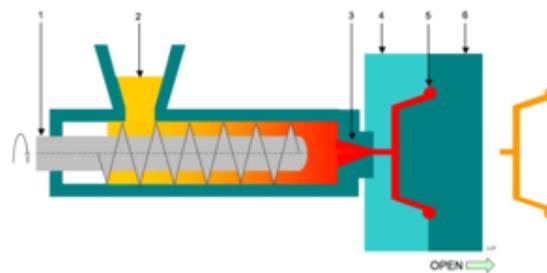


Figura 2.10: Schema di stampaggio ad iniezione

2.3.3.II Stampaggio a soffiaggio

Lo stampaggio a soffiaggio (Figura 2.11) è un processo che consente di formare e assemblare parti cave in plastica, vetro o altri materiali.

Esistono tre tipi principali di soffiaggio: estrusione, iniezione e stiramento a iniezione.

Si inizia fondendo la plastica e modellandola in un "parison".

In tecnologia dei materiali, il "parison" è un tubo cavo di materiale plastico, con un foro a un'estremità attraverso il quale può passare l'aria compressa.

Il "parison" viene quindi bloccato in uno stampo prima di soffiare aria al suo interno. La pressione spinge il materiale verso l'esterno per adattarlo allo stampo, il quale si apre una volta che la plastica si è raffreddata e indurita. Infine, il pezzo viene espulso.

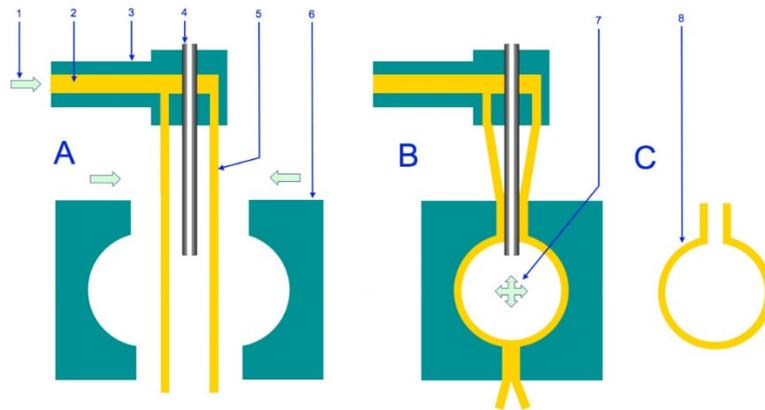


Figura 2.11: Stampaggio per soffiaggio

2.3.3.III Stampaggio a compressione

Lo stampaggio a compressione (Figura 2.12) è una tecnica in cui il materiale, solitamente preriscaldato, viene inserito in una cavità aperta e riscaldata dello stampo, il quale è chiuso da una forza superiore o da un tappo [14]. La pressione viene applicata per costringere il materiale ad entrare in contatto con tutte le aree dello stampo fino all'indurimento.

Questo processo ha il vantaggio di poter stampare pezzi grandi e abbastanza complessi. Inoltre, questo metodo di stampaggio rimane uno dei meno costosi e lo sfrido è minimo.

Lo stampaggio a compressione è stato sviluppato principalmente per produrre parti composite, in sostituzione del metallo. Questa tecnica è ampiamente utilizzata nel settore automobilistico per realizzare parti come cofani, parafranghi, ali e oggetti più piccoli e complessi.

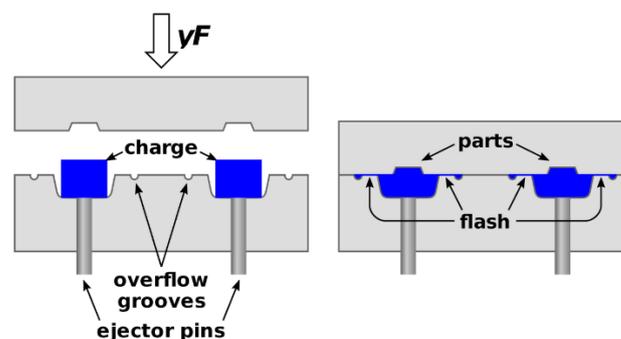


Figura 2.12: Stampaggio per compressione

2.3.3.IV Stampaggio sottovuoto

Lo stampaggio sottovuoto (*Figura 2.13*) è una versione semplificata della termoformatura, in cui un foglio di plastica viene riscaldato, steso su uno stampo a superficie singola e spinto contro di esso dal vuoto [13]. Questo processo trasforma la plastica in oggetti permanenti come segnali stradali e coperture protettive.

Prima di applicare il vuoto, è possibile formare parti relativamente profonde se il foglio viene teso meccanicamente o pneumaticamente prima di essere portato a contatto con la superficie dello stampo.

I materiali adatti allo stampaggio sottovuoto sono generalmente termoplastici. La lastra di Polistirene è la più comune e la più facile da usare, inoltre ha un'elevata resistenza agli urti. Questa tecnica è adatta anche a materiali trasparenti come l'acrilico, ampiamente utilizzato nell'industria aerospaziale, ad esempio per i finestrini delle cabine passeggeri degli aerei militari ad ala fissa e dei compartimenti degli aerei ad ala rotante.

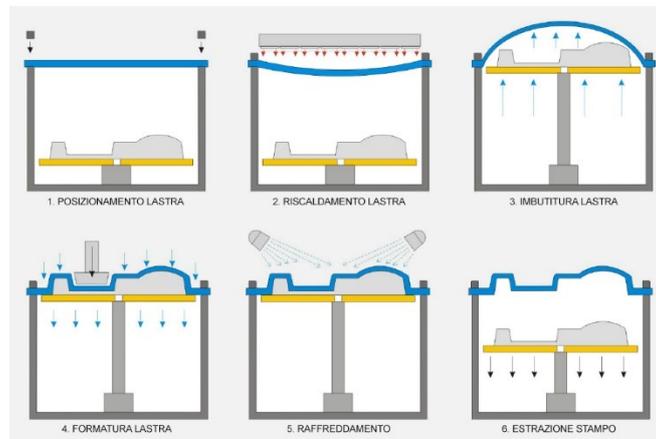


Figura 2.13: Stampaggio sottovuoto

2.3.4 Dispositivi per lo stampaggio ad iniezione

Macchina per stampaggio a iniezione

Le macchine per lo stampaggio a iniezione, anche note come presse, sono costituite da una tramoggia, da un pistone di iniezione o stantuffo a vite e da un'unità di riscaldamento. Lo stampo è fissato al piano della macchina per lo stampaggio e la plastica è iniettata nello stampo attraverso il foro di colata. Le presse vengono

classificate in base al tonnellaggio, ovvero il calcolo della forza di serraggio che la macchina è in grado di esercitare. Questa forza mantiene lo stampo chiuso durante il processo di iniezione. Il tonnellaggio può variare da meno di 5 a 6000 tonnellate, anche se le presse di tonnellaggio più alto vengono utilizzate raramente.

Stampo

Lo stampo o matrice è un termine che si riferisce agli utensili utilizzati per produrre parti in plastica per stampaggio. Tradizionalmente, gli stampi per iniezione sono sempre stati molto costosi ed erano usati solo per le applicazioni produttive di volumi molto elevati dove si prevedeva la produzione di migliaia di parti. Generalmente gli stampi vengono realizzati in acciaio temprato, acciaio pretemprato, alluminio e/o in una lega di berillio-rame. La scelta del materiale per realizzare uno stampo è principalmente di natura economica.

Stampi in acciaio

Gli stampi in acciaio generalmente costano di più ma offrono una vita utile più lunga che consente di spalmare l'elevato costo iniziale su un maggior numero di parti prodotte prima che si usurino. Gli stampi in acciaio pretemprato sono meno resistenti all'usura e vengono utilizzati principalmente per bassi volumi di produzione o componenti più grandi. Solitamente la durezza del pretemprato corrisponde a 38 e 45 sulla scala Rockwell C. Gli stampi in acciaio temprato vengono sottoposti a un trattamento termico che ne migliora la resistenza all'usura e la durata utile. La durezza tipica varia da 50 a 60 sulla scala Rockwell C (HRC).

Stampi in alluminio

Gli stampi in alluminio costano sostanzialmente meno di quelli in acciaio e, quando viene utilizzato alluminio di qualità superiore come quello di tipo aeronautico QC-7 e QC-10 insieme a moderne apparecchiature computerizzate, possono essere convenienti dal punto di vista economico per la realizzazione di centinaia di migliaia di parti. Gli stampi in alluminio offrono inoltre tempistiche molto ridotte e cicli più

veloci grazie alla migliore dissipazione del calore. Inoltre, possono essere rivestiti per aumentare la resistenza ai materiali rinforzati con fibra di vetro. Il berillio-rame viene utilizzato nelle zone dello stampo che richiedono una rapida rimozione del calore o nelle aree che prevedono una generazione maggiore di calore di taglio.

Processo di stampaggio ad iniezione

Con lo stampaggio ad iniezione, la plastica granulare viene erogata per gravità da una tramoggia in un cilindro riscaldato. Man mano che i granuli vengono lentamente convogliati in avanti da uno stantuffo a vite, la plastica viene spinta in una camera riscaldata denominata comunemente cilindro o fusto, dove viene fusa. Mentre lo stantuffo avanza, la plastica fusa viene spinta attraverso un ugello fissato alla boccola della materozza dello stampo, consentendo in questo modo alla plastica fusa di entrare nella cavità attraverso un gate e un sistema di colata. Lo stampo resta a una temperatura prefissata in modo che la plastica possa solidificarsi non appena la matrice viene riempita.

Ciclo di stampaggio ad iniezione

La sequenza di eventi durante lo stampaggio a iniezione di una parte in plastica viene denominata ciclo dello stampaggio ad iniezione. Il ciclo inizia quando lo stampo si chiude, quindi si procede con l'iniezione del polimero nella cavità della matrice. Una volta riempita la cavità, viene mantenuto un certo valore di pressione per compensare le variazioni volumetriche del materiale. Nella fase successiva, la vite ruota per far avanzare il nuovo stampo verso la vite anteriore in modo tale che la vite si ritragga. Una volta che la parte è sufficientemente fredda, lo stampo si apre e quindi viene espulsa.

Sollecitazioni

Quando una resina plastica, che contiene lunghe catene di molecole, viene fusa nella fase di preparazione per lo stampaggio, il calore e la forza di taglio dell'estrusore spezzano temporaneamente i legami molecolari, consentendo così alle particelle di

penetrare nello stampo. Utilizzando la pressione, la resina viene spinta in esso, andandone a riempire ogni dettaglio, crepa e fessura. Percorrere angoli molto acuti comporta maggiori sollecitazioni sulle molecole rispetto ai percorsi lineari o con raggi di curvatura ampi.

Mentre il materiale si raffredda e i legami molecolari riportano la resina allo stato solido, le sollecitazioni, che possono causare deformazioni, segni di risucchio, fessurazioni o rotture premature, vengono bloccate nella parte.

Alcuni metodi per prevenire fenomeni di stress termomeccanici prevedono l'aggiunta di transizioni dolci e regolari, nonché l'utilizzo di parti arrotondate e raccordi nelle aree potenzialmente soggette a tali sollecitazioni.

Punti di iniezione

Ogni progetto di stampo per iniezione deve prevedere aperture che consentano alla plastica fusa di essere iniettata nella cavità dello stampo. Si suddividono in due tipologie: rimozione manuale ed automatica.

La rimozione manuale delle materozze richiede la presenza di un operatore. Il distacco manuale viene scelto per vari motivi:

- il gate è troppo ingombrante per essere gestito automaticamente dalla macchina;
- materiali sensibili al taglio come il PVC non possono essere esposti a elevati valori della velocità di taglio;
- la distribuzione del flusso per determinate forme deve risultare simultanea sulla parte anteriore.

La rimozione automatica delle materozze include nell'attrezzatura funzionalità di rottura o taglio del punto di iniezione nella fase di espulsione della parte. Viene utilizzata per vari motivi:

- evitare la rimozione del gate come operazione secondaria, riducendo così i costi;
- mantenere tempi di ciclo uniformi per tutte le parti;
- riduzione al minimo dei segni dei punti di iniezione sui pezzi stampati.

Esistono vari punti di iniezione:

- laterale: è il design più comune, si trova sul bordo della parte ed è ideale per parti piatte;
- inferiore: è l'unico punto di iniezione a rimozione automatica determinata da perni di espulsione;
- a caldo: si trovano in genere nella parte superiore del modello e sono ideali per forme arrotondate e coniche;
- diretto: è a rimozione manuale e viene utilizzato per gli stampi di singole cavità di parti cilindriche di grandi dimensioni che richiedono un riempimento simmetrico.

Spessore della parete

Prima dell'espulsione, le parti stampate per iniezione vengono adeguatamente raffreddate in modo che mantengano la forma una volta scaricate. Durante la fase di raffreddamento, le variazioni di pressione, velocità e viscosità plastica devono essere ridotte al minimo per evitare difetti. Questa funzionalità può influire pesantemente sui costi, sulla velocità di produzione e sulla qualità delle parti finali.

Lo spessore minimo della parete, compreso tra 2 mm e 4 mm, dipende dalle dimensioni e dalla geometria della parte, dai requisiti strutturali e dal comportamento del flusso del materiale.

Spessore della parete uniforme

Durante il processo di raffreddamento è possibile ottenere pareti irregolari, di conseguenza la solidificazione non sarà uniforme. Ciò causa la deformazione, la distorsione e la fessurazione in corrispondenza dei punti di incontro delle due sezioni. Per evitare questo problema, è necessario provare a progettare parti con pareti completamente uniformi.

Segni di risucchio

Quando la sostanza fusa fluisce nello stampo per iniezione, le sezioni spesse non si raffreddano con la stessa velocità del resto della parte, poiché il materiale più spesso viene isolato dalla superficie esterna della plastica a raffreddamento più veloce. Quando si raffredda, la superficie interna si restringe con una velocità diversa rispetto a quella esterna già raffreddata. Questa differenza nella velocità di raffreddamento causa una ritrazione verso l'interno, determinando un segno di risucchio sulla superficie esterna della parete. Per evitare tale difetto è necessario eliminare il materiale interno. Come regola generale, si verifica che le nervature di supporto e le parti in rilievo non superino il 60% dello spessore della parete nominale.

Texture

La testurizzazione è un processo utilizzato per applicare motivi alla superficie dello stampo, consentendo flessibilità nella creazione dell'aspetto finale. Costituisce parte integrante dello sviluppo complessivo del prodotto e deve essere tenuta in considerazione durante il processo di progettazione.

Linee di separazione

Una linea di separazione è una linea di divisione sulla parte in corrispondenza del punto di incontro delle due metà dello stampo.

Difetti comuni di stampaggio

Lo stampaggio a iniezione è una tecnologia complessa con potenziali problemi di produzione che possono essere causati da difetti dello stampo o dall'elaborazione della parte.

2.4 Differenze tra Additive Manufacturing e Stampa ad Iniezione

La produzione additiva o manifattura additiva (“*Additive Manufacturing*”), come mostrato nella *Figura 2.15*, è un processo industriale che permette di realizzare fisicamente modelli 3D computerizzati, mediante un’aggiunta di strati, uno sopra l’altro, in opposizione alle metodologie tradizionali di produzione sottrattiva (*Figura 2.14*), le quali partendo da un blocco pieno vanno ad asportare materiale meccanicamente fino ad ottenere il prodotto finito [12] [25].

Le tecnologie di produzione sottrattiva sono, ad esempio, la fresatura, la molatura e la tornitura.

Il termine “*Additive Manufacturing*” ha anche un’estensione legata a tutti gli aspetti aziendali, economici, finanziari, logistici e strategici. Vi sono, inoltre, vantaggi legati alla tipologia di produzione [15] [24].

I vantaggi dell’Additive Manufacturing sono:

- risparmio di materiale ed energia;
- costo di ingresso ridotto;
- prototipazione rapida più facile e vantaggiosa;
- piccoli cicli di produzione più veloci e meno costosi;
- non occorrono scorte a disposizione;
- facilità nel ricreare ed ottimizzare i pezzi;
- migliore affidabilità del modello;
- possibilità di consolidare un gruppo di parti in un singolo pezzo;
- miglior supporto delle strutture reticolari.

Gli svantaggi sono:

- la necessità di supporti;
- la carente solidità.

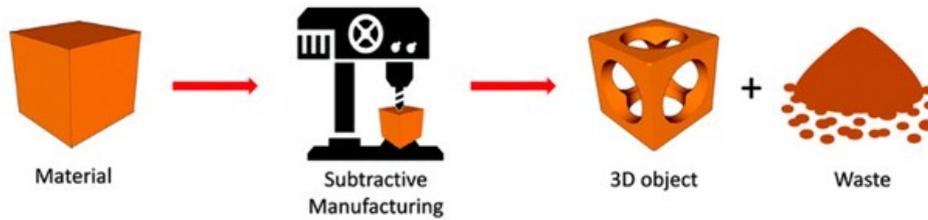


Figura 2.14: Tecnologia di tipo sottrattivo

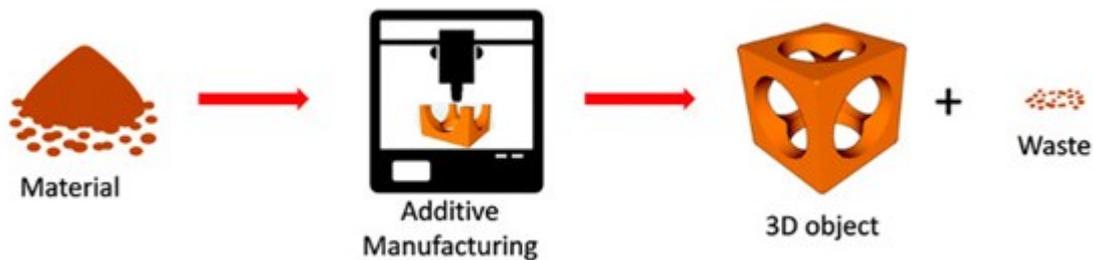


Figura 2.15: Tecnologia di tipo additivo

I vantaggi dello stampaggio ad iniezione sono:

- produzione su larga scala ad alta efficienza: i cicli di produzione variano dai 10.000 agli oltre 100.000 prodotti;
- basso costo per pezzo: per volumi medi nell'intervallo da 10.000 a 25.000 prodotti;
- ripetibilità: ideale per pezzi con alte tolleranze ed affidabilità su volumi elevati;
- riduzione degli scarti;
- alta precisione;
- post-lavorazione ridotta o assente.

Gli svantaggi sono:

- costo iniziale significativo;
- limiti di progettazione: utilizzare un angolo di spoglia e raggi per facilitare l'estrazione dei pezzi, evitare sottosquadri e spigoli vivi, controllare gli spessori delle pareti e considerare punti di iniezione, espulsori e linee di raffreddamento.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva (*Tabella 2.2*) che analizza la differenza tra i due tipi di stampa [17].

STAMPA 3D	STAMPA AD INIEZIONE
Piccoli lotti da stampare	Elevata produzione in lotti
Disegno di progetto complesso	Priorità alla resistenza del materiale
Le parti vengono stampate immediatamente	Buona finitura superficiale
Prototipazione e personalizzazione	Nessuno spreco di materiale

Tabella 2.2: Confronto Stampa 3D e Stampa ad iniezione

Il primo fattore da tenere in considerazione è sicuramente il numero di parti da realizzare. Lo stampaggio ad iniezione, infatti, è una valida opzione per la produzione di massa mentre per i piccoli lotti di unità è preferibile considerare una stampa 3D.

Altro fattore riguarda la complessità del disegno, pertanto se il progetto mostra zone critiche per la stampa ad iniezione, come ad esempio zone con angoli retti, è preferibile l'impiego di una stampa 3D.

Infine, la stampa ad iniezione è preferibile per la realizzazione della finitura superficiale [26].

2.5 Materiali

Nella stampa additiva vengono utilizzate varie tipologie di materiali, in base alle prerogative meccaniche che devono essere imposte al modello, in relazione agli impieghi [8].

I parametri che si considerano nella fase di scelta del materiale sono “qualità” e “difetti”. I vari materiali sono impiegati in settori come l’automotive, l’idraulica, il settore del packaging ed in generale nella produzione industriale.

2.5.1 Vari materiali impiegati

ASA

Strutturalmente molto simile all’ABS, il filamento in ASA (Acrilonitrile Stirene Acrilato), rappresentato nella *Figura 2.16*, resiste però ai raggi UV e all’acqua così, usurandosi, non assume una colorazione giallastra.



Figura 2.16: Filamento ASA con esempi di modelli 3D

PLA

Il PLA (Acido Polilattico) è costituito da un polimero derivato dalla lavorazione di alcuni prodotti vegetali, tra i quali il mais. Naturalmente trasparente, può essere colorato, reso opaco o lucido. Il suo solvente è la soda caustica.

Risulta ecologico, in quanto vegetale, estrudibile a basse temperature perché non necessita di un piano riscaldato ed infine ha una minore tendenza alla deformazione. D’altro canto, ha minore resistenza, maggiore rigidità e si deteriora a 60 gradi.

PET-G

Il PET-G (Polietilene Tereftalato con Glicole) fa parte della famiglia del PET, una plastica di uso comune nel settore packaging

Nella stampa 3D è molto diffuso per essere facile da stampare ma con caratteristiche meccaniche sensibilmente superiori al PLA.

Può essere utilizzato per creare parti abbastanza resistenti con discrete prestazioni anche a caldo ed ha un costo contenuto.

Tuttavia, può dare luogo a dei collassi e altre problematiche durante la stampa.

Polipropilene

Il Polipropilene è una delle plastiche più utilizzate nella produzione industriale. Si contraddistingue per la resistenza a sforzi senza rompersi e per la resistenza agli agenti chimici.

Trova applicazione in svariati settori: contenitori, etichette, nastri, sedie ed anche in ambito biomedicale (*Figura 2.17*).

Ha una finitura superficiale liscia ed è adatto al contatto con i liquidi, il cibo e la pelle. Può, però, dare luogo ad un estremo ritiro durante la stampa e crea difficoltà nella realizzazione di forme complesse.



Figura 2.17: Busto ortopedico in Polipropilene

Nylon

Il principale vantaggio del Nylon è la sua resistenza, decisamente maggiore rispetto ai precedenti polimeri. È anche flessibile e duraturo. Fonde a temperature elevate, spesso superiori ai 250 gradi. È un filamento che fa parte della famiglia delle poliammidi sintetiche, utilizzato in origine per produrre tessuti. Il suo principale difetto è la tendenza a deformarsi quanto l'ABS. Inoltre, necessita di un'asciugatura accurata prima della stampa, poiché assorbe molto facilmente l'acqua, di conseguenza è meglio farlo essiccare in forno per qualche ora.

TPU e TPE

Gli elastomeri termoplastici sono polimeri che coniugano le caratteristiche delle gomme con la processabilità dei polimeri termoplastici. Si trovano spesso in commercio con le sigle TPE e TPU in base alla loro natura chimica.

Sono materiali facilmente colorabili ed hanno un'ottima durabilità nel tempo grazie alle loro proprietà elastiche.

Possono presentare alcune complessità durante la stampa, di conseguenza è necessario un processo relativamente lento.

Policarbonato

Il filamento di Policarbonato ha un'alta resistenza al calore. Viene spesso utilizzato come isolante elettrico, in applicazioni mediche e in alcune parti meccaniche, come ad esempio in giranti (*Figura 2.18*) [11]. Si deforma molto facilmente, perciò è sempre necessario un piano riscaldato. È uno dei materiali più duri e resistenti, dunque fonde sopra i 260-270 °C, inoltre è sensibile all'umidità ed è relativamente costoso.



Figura 2.18: Girante in Policarbonato

Materiali compositi

I materiali compositi per la stampa 3D sono tutti quei prodotti formati dall'unione di due o più elementi di natura diversa, di cui almeno uno costituito da fibre. La loro unione permette di migliorare le performance termiche e meccaniche e la rigidità. Uno dei compositi più utilizzati è la Poliammide con fibra di vetro, che necessita però di una percentuale di fibra pari almeno al 50%. Un altro materiale che garantisce alte performance con percentuali inferiori è la fibra di carbonio.

Vengono utilizzati per parti molto tenaci, hanno un'ottima finitura opaca, buone prestazioni anche a caldo e sono facili da stampare. Vengono, ad esempio, impiegati per la realizzazione di telai di droni, come rappresentato nella *Figura 2.19*.

Risultano, però, estremamente sensibili all'umidità e le fibre all'interno li rendono abrasivi.



Figura 2.19: Telaio di un drone in materiale composito

2.5.2 ABS

ABS e PLA sono i materiali per stampa 3D più diffusi. Sono due polimeri termoplastici, quindi diventano morbidi e malleabili ad alte temperature per poi tornare solidi al raffreddamento.

L'ABS è un derivato del petrolio. È solubile in acetone, si può quindi levigare con una spazzola e con poche gocce saldarne pezzi diversi [12].

Le qualità principali sono: leggerezza, robustezza, durabilità, resistenza a temperature abbastanza elevate (fino ai 100 °C circa), facilità di utilizzo e di riciclo e buona flessibilità. Tuttavia, emette cattivo odore e fumi tossici, necessita di un piatto

riscaldato per deformarsi. La *Figura 2.20* mostra un prototipo in scala di una turbina [10].



Figura 2.20: Modello di turbina in scala in materiale ABS

2.5.3 Tipologie differenti di ABS

L'ABS (Acrilonitrile Butadiene Stirene) è un materiale polimerico termoplastico che ha come qualità primarie la leggerezza e la rigidità.

Altra caratteristica fondamentale è la possibilità di essere riscaldato ripetutamente; quindi, si ha la possibilità di riciclarlo, riducendone gli impatti ambientali, se non contaminato da altre tipologie di plastiche non compatibili. Molte grandi società produttrici di ABS e di apparecchiature elettriche ed elettroniche sono coinvolte in programmi di riciclo di questo polimero. Di seguito vengono riportate delle tabelle che analizzano le proprietà meccaniche, termiche ed elettriche di varie tipologie di ABS: ABS (*Tabella 2.3*); ABS-ESD7 (*Tabella 2.4*); ABS-M30 (*Tabella 2.5*); ABS-M30i (*Tabella 2.6*); ABSi (*Tabella 2.7*).

MEASUREMENT	VALUE	STANDARD
Tensile Strength	36 MPa	ASTM D638
Tensile Modulus	2400 MPa	ASTM D638
Flexural Strength	61 MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	2400 MPa	ASTM D790
Notched Izod Impact	28 J/m	ASTM D256
Unnotched Izod Impact	55 J/m	ASTM D256
Heat Deflection Temperature	96 °C 82 °C	ASTM D648 @ 0.45 MPa @ 1.81 MPa
Volume Resistivity	$3.0 \cdot 10^9 - 4.0 \cdot 10^{10}$ ohm-cm	ASTM D257
Surface Resistance	$10^9 - 10^6$ ohms	ASTM D257

Actual values may vary with build condition

Tabella 2.3: ABS

MEASUREMENT	VALUE	STANDARD
Tensile Strength	36 MPa	ASTM D638
Tensile Modulus	2400 MPa	ASTM D638
Flexural Strength	61 MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	2400 MPa	ASTM D790
Notched Izod Impact	28 J/m	ASTM D256
Unnotched Izod Impact	55 J/m	ASTM D256
Heat Deflection Temperature	96 °C 82 °C	ASTM D648 @ 0.45 MPa @ 1.81 MPa
Volume Resistivity	$3.0 \cdot 10^9 - 4.0 \cdot 10^{10}$ ohm-cm	ASTM D257
Surface Resistance	$10^9 - 10^6$ ohms	ASTM D257

Actual values may vary with build condition

Tabella 2.4: ABS-ESD7

MEASUREMENT	VALUE	STANDARD
Density	1.04 g/cm ³	
Tensile Strength	36 MPa	ASTM D638
Tensile Modulus	2413 MPa	ASTM D638
Flexural Strength	61 MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	2317 MPa	ASTM D790
Notched Izod Impact	139 J/m	ASTM D256
Unnotched Izod Impact	283 J/m	ASTM D256
Heat Deflection Temperature	86 °C 82 °C	ASTM D648 @ 0.45 MPa @ 1.81 MPa
Elongation at Break	4%	

Actual values may vary with build condition

Tabella 2.5: ABS-M30

MEASUREMENT	VALUE	STANDARD
Density	1.04 g/cm ³	
Tensile Strength	36 MPa	ASTM D638
Tensile Modulus	2413 MPa	ASTM D638
Flexural Strength	61 MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	2317 MPa	ASTM D790
Notched Izod Impact	139 J/m	ASTM D256
Unnotched Izod Impact	238 J/m	ASTM D256
Heat Deflection Temperature	96 °C	ASTM D648 @ 0.45 MPa
Elongation at Break	4%	
Flame Retardancy	HB 2.5 mm	UL94

Actual values may vary with build condition

Tabella 2.6: ABS-M30i

MEASUREMENT	VALUE	STANDARD
Density	1.08 g/cm ³	
Tensile Strength	37 MPa	ASTM D638
Tensile Modulus	1915 MPa	ASTM D638
Flexural Strength	62 MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	1917 MPa	ASTM D790
Notched Izod Impact	96.4 J/m	ASTM D256
Unnotched Izod Impact	191.1 J/m	ASTM D256
Heat Deflection Temperature	86 °C 73 °C	ASTM D648 @ 0.45 MPa @ 1.81 MPa
Elongation at Break	4,4%	

Actual values may vary with build condition

Tabella 2.7: ABSi

3. Drone e meccanica del volo

3.1 Definizione di drone

Un aeromobile a pilotaggio remoto (APR), noto comunemente come drone, è un dispositivo volante caratterizzato dall'assenza di un pilota umano a bordo. Il suo volo è controllato da un computer presente nel mezzo aereo oppure tramite il controllo remoto di un navigatore o pilota.

Sono noti anche con altri acronimi, molti dei quali di derivazione anglosassone: *RPA* (*Remotely Piloted Aircraft*) possono essere indicati come *UAV* (*Unmanned Aerial Vehicle*), *RPV* (*Remotely Piloted Vehicle*), *ROA* (*Remotely Operated Aircraft*) o *UVS* (*Unmanned Vehicle System*) [12].

3.2 Telaio del drone

Il telaio, definito anche con il termine di frame, è la struttura del drone sul quale vanno fissati tutti gli elementi che definiscono la componentistica del velivolo.

Il telaio deve essere resistente e robusto pur rimanendo adeguato alle esigenze del pilota, senza ostacolare l'esperienza di volo e la manutenzione [22].

3.3 Forme del frame

La forma del telaio influisce sulle prestazioni di volo [18] [21]. Esistono varie tipologie di frame tra cui:

H frame

Le cornici con lo stile "H" (Figura 3.1) hanno uno spazio illimitato per i componenti, rendendo così i telai facili da costruire.

Le braccia si collegano alla parte anteriore e posteriore del corpo su una cornice avente proprio la forma di "H". La fotocamera e la batteria Li-Po possono essere posizionate sulla piastra superiore, quindi il peso risulta più esteso.

Di conseguenza, il telaio sarà meno agile rispetto ai telai di tipo "X" a causa del più alto momento d'inerzia sull'asse.

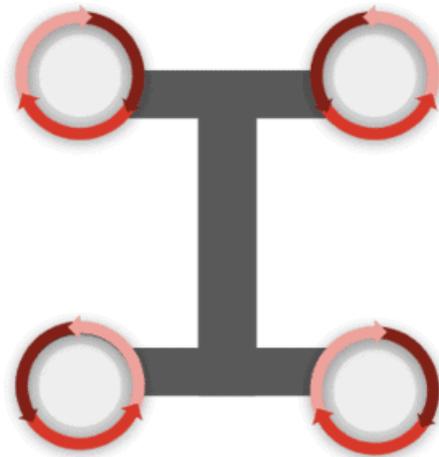


Figura 3.1: Telaio con struttura "H"

X frame

Su una cornice a "X" (Figura 3.2) le braccia, aventi punto d'incontro al centro, hanno larghezza e lunghezza uguali. I componenti vengono impilati nel mezzo per ottenere una massa più centralizzata. Tale configurazione determina un minor momento d'inerzia. I telai stile "X" sono più leggeri grazie alla riduzione del materiale.

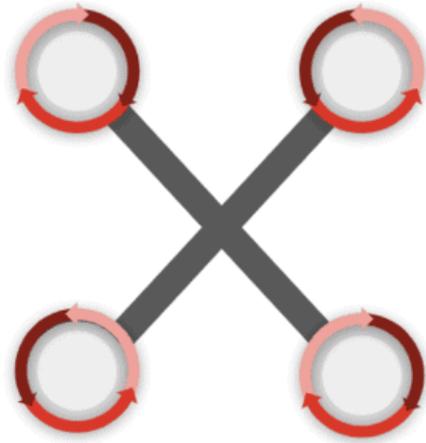


Figura 3.2: Telaio con struttura "X"

Hybrid X

L'Hybrid X (Figura 3.3) ha i bracci del telaio "X" ed il corpo lungo come il telaio "H".

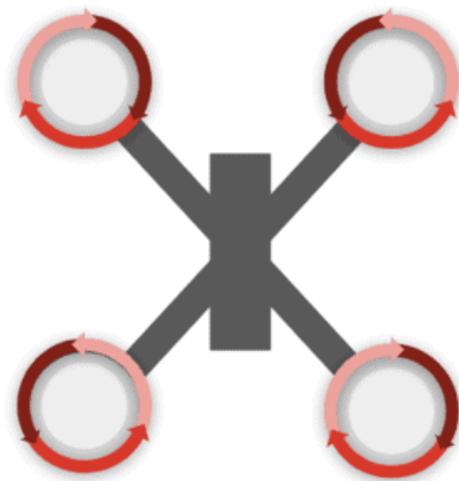


Figura 3.3: Telaio con struttura "Hybrid-X"

Stretch X

La struttura caratterizzata dalla "X" allungata (Figura 3.4) determina una configurazione in cui i bracci del drone sono più vicini tra loro nella parte anteriore e posteriore. Tendono a pesare di più rispetto ad un frame "X" standard.

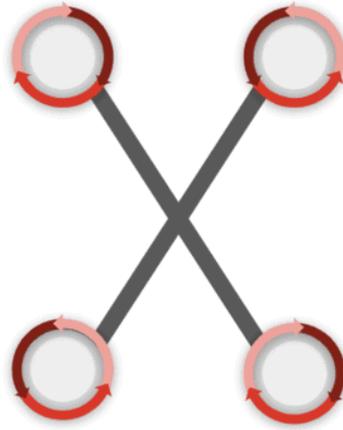


Figura 3.4: Telaio con struttura "Stretch-X"

Cornici quadrate

Una cornice quadrata può derivare da una struttura a "H" o "X" con materiale aggiunto all'esterno che collega i supporti del motore. Come mostrato nella *Figura 3.5*, si crea una struttura più dura che ha meno probabilità di avere rotture ai bracci. L'aumento dei blocchi determina un'estensione del peso e della resistenza all'aria.

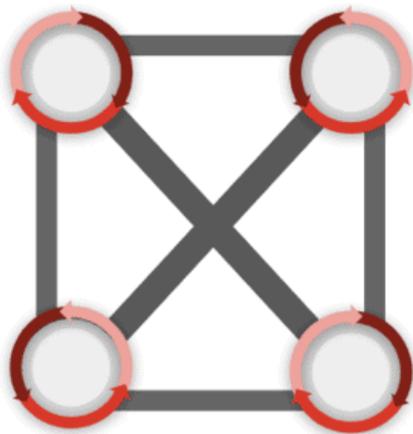


Figura 3.5: Telaio con struttura "Square"

3.4 Meccanica di volo del drone

Il drone è generalmente costituito da quattro eliche bipala che permettono al medesimo di librarsi in aria. Ogni elica viene azionata mediante un motore (motore brushless) che a sua volta viene controllato da un microprocessore che ne determina la velocità di rotazione.

Il tutto avviene in combinazione con i segnali inviati da dei sensori chiamati “MEMS” come ad esempio il giroscopio, l’accelerometro, il barometro. Tali informazioni vengono raccolte dalla centralina che effettua delle misurazioni continue e provvede quindi alla regolazione di ogni singolo motore, al fine di garantire la stabilità del velivolo.

Quando le quattro eliche (“*propeller*”) di un drone ruotano alla stessa velocità, il velivolo rimane in “*Hovering*” ovvero mantiene in aria un assetto stabile ed immobile. Mediante il “*Throttle*” o acceleratore (*Figura 3.6*) i quattro motori incrementano il numero di giri facendo sollevare il drone e viceversa [19].

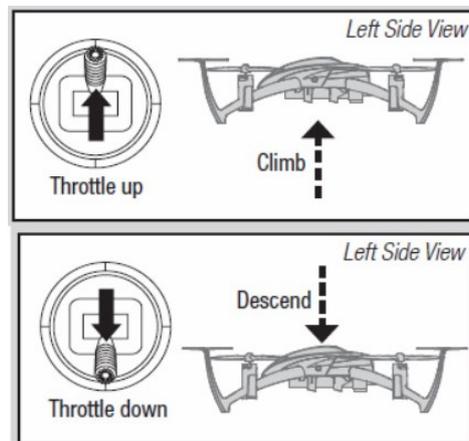


Figura 3.6: Throttle del drone

Come mostrato nella *Figura 3.7*, le eliche poste su una diagonale (configurazione a “X”) ruotano in senso orario mentre le altre due ruotano in senso antiorario. Tale

contrapposizione permette al drone di mantenere una certa stabilità e quindi non ruota su se stesso, grazie alla forza inerziale provocata dalla rotazione dei propeller.

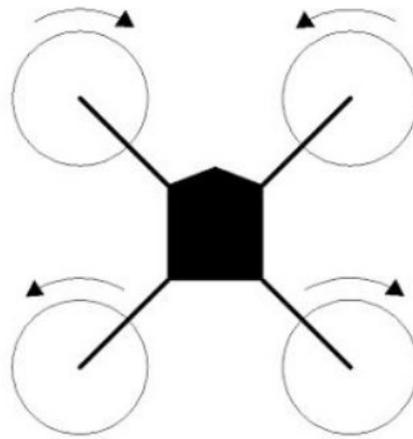


Figura 3.7: Schema di rotazione

3.5 Movimenti del drone

Movimento avanti e dietro ("PITCH")

Spostando in avanti la leva del radiocomando, la centralina riceve il segnale ed incrementa la velocità dei due motori posteriori, diminuendo contemporaneamente la rotazione di quelli anteriori. Il drone si inclina in avanti ed inizia a muoversi.

Movimento a destra e sinistra ("ROLL")

Spostando lateralmente la leva di direzione sul radiocomando, la centralina riceve il segnale ed incrementa la velocità dei due motori laterali (sinistra o destra), diminuendo contemporaneamente la velocità di quelli presenti sull'altro lato.

Rotazione attorno al proprio asse ("YAW")

Aumentando i giri dei due motori che ruotano in senso orario e diminuendo quelli degli altri due, il drone effettuerà l'imbardata a sinistra, ovvero inizierà a ruotare attorno al proprio asse in senso antiorario e viceversa.

La *Figura 3.8* mostra i tre movimenti, precedentemente descritti, applicati al body del drone [20].

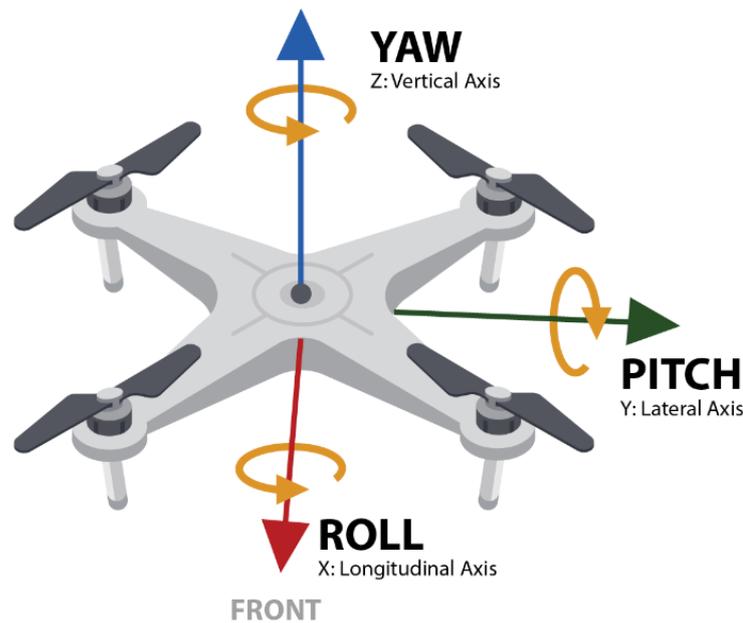


Figura 3.8: Movimenti del drone

4. Software CAE

I software CAE (“Computer Aided Engineering”) sono delle applicazioni informatiche che vanno ad agevolare la risoluzione di problemi tecnologici mediante il calcolo numerico.

I problemi che vengono maggiormente analizzati mediante tali software sono:

- simulazioni analogiche e simulazioni di tipo digitale;
- calcolo di campi elettromagnetici;
- calcolo statico e dinamico di strutture.

Il procedimento di analisi mediante un software CAE è caratterizzato da vari passaggi:

- “*Data entry*”: si inserisce nel computer un modello matematico del sistema fisico da studiare;
- “*Solving*”: si esegue il calcolo numerico sul modello;
- “*Visualization*”: visualizzazione ed analisi dei risultati.

4.1 CAD/CAE

La fase di inserimento di un modello tridimensionale, avente una geometria complessa, viene effettuata con tecniche simili a quelle dei sistemi CAD.

Alcuni programmi forniscono sia complete funzionalità di CAD che funzioni di calcolo numerico.

Un singolo programma CAD/CAE può:

- disegnare un modello tridimensionale;
- presentare un'immagine realistica in modo da valutarne l'impatto visivo;
- specificare i parametri fisici sui materiali che si intende usare per la costruzione;
- eseguire un calcolo di stabilità strutturale;
- stampare i disegni esecutivi.

4.2 Siemens Solid-Edge



Figura 4.1: Logo Siemens Solid-Edge

Solid-Edge (Figura 4.1) è un software di progettazione di tipo 2D/3D sviluppato da Siemens PLM Software che offre funzionalità di modellazione e progettazione dei componenti e degli assiemi, gestione dei dati ed un ambiente di analisi agli elementi finiti.

Il software è stato utilizzato per la gestione del file parte del telaio del drone (suddiviso in corpo superiore e corpo inferiore) avente come estensione “.par”.

Nell'ambiente di Solid-Edge è stata eseguita l'ottimizzazione del telaio e l'esportazione dello stesso in formato Parasolid (“.x_t”). Nella Figura 4.2 viene

riportata la barra degli strumenti che è presente nell'interfaccia "Parte ordinata" del software [28] [29].

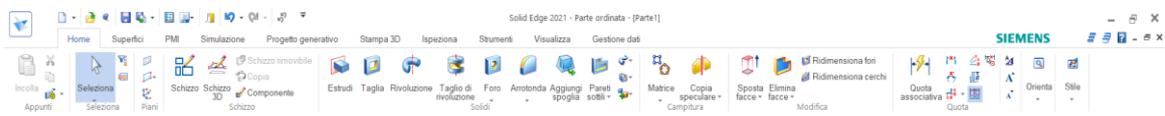


Figura 4.2: Barra degli strumenti di Siemens Solid-Edge

4.3 Siemens NX

NX (Figura 4.3) è un'applicazione informatica di disegno assistito dal calcolatore, che inizialmente era chiamato "Unigraphics". Utilizza *Parasolid* per il suo kernel di modellazione geometrica e *D-Cubed* come motore associativo per i vincoli legati agli sketch ed assiemi [12].



Figura 4.3: Logo Siemens NX

4.3.1 Modulo FEM

"*Simcenter Nastran*" è il solutore agli elementi finiti (FEM) per le prestazioni riguardanti l'elaborazione, l'accuratezza e l'affidabilità. Include avanzate soluzioni per l'analisi strutturale lineare e non lineare. Considera, ad esempio, la risposta dinamica, l'acustica, l'aeroelasticità, l'analisi termica e l'ottimizzazione.

La disponibilità di tali soluzioni in un singolo solutore garantisce l'utilizzo di formati di file (Input/Output) per tutti i tipi di soluzioni, andando così a semplificare notevolmente i processi di modellazione.

Il modulo FEM viene impiegato in aziende manifatturiere; inoltre, fornisce supporto ai fornitori di servizi di progettazione che operano nel settore aerospaziale, automobilistico, elettronico, dei macchinari pesanti, elettromedicale.

L'obiettivo di tale impiego è quello di realizzare progetti che risultano essere sicuri, affidabili ed ottimizzati nell'ambito di cicli di progettazione.

Per accedere al modulo FEM in NX, si seleziona l'icona "Pre/Post" (Figura 4.4).



Figura 4.4: "Pre/Post"

Successivamente si apre l'ambiente relativo all'analisi da effettuare, quindi, cliccando su "Nuovo FEM e nuova simulazione" (Figura 4.5) si apriranno due ulteriori interfacce che consentiranno: l'assegnazione di mesh, i carichi e i vincoli.

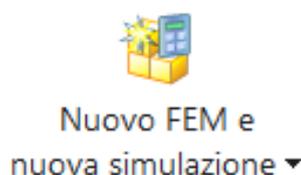


Figura 4.5: "Nuovo FEM e nuova simulazione"

A questo punto si generano due ambienti ulteriori, rappresentati nella Figura 4.6:

- FEM;
- Simulazione.



Figura 4.6: Ambienti "FEM" e "Simulazione"

Nell'ambiente FEM è possibile assegnare una mesh al modello preso in esame, mediante la voce "Tetraedro 3D" (Figura 4.7) e successivamente stabilire, con degli appositi slider, le dimensioni del tetraedro e le relative curvature (Figura 4.8).

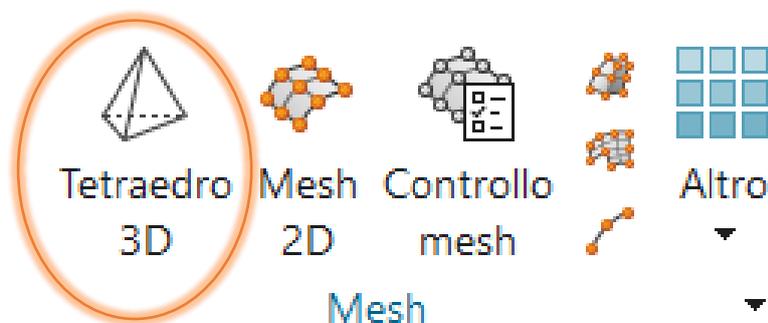


Figura 4.7: "Tetraedro 3D"

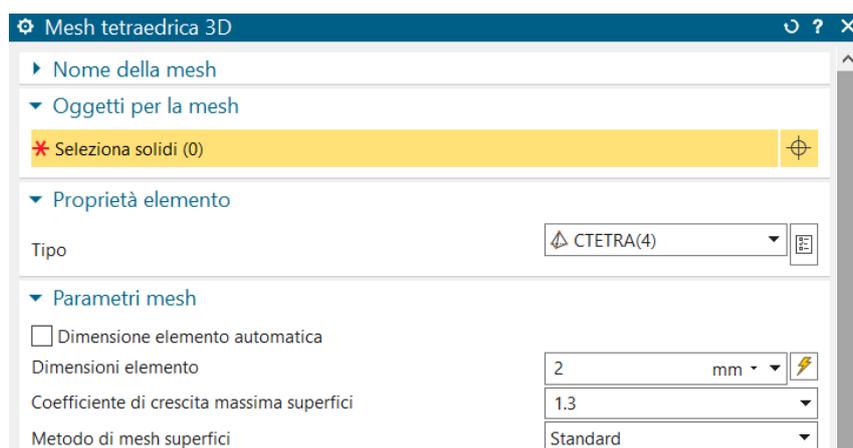


Figura 4.8: Pannello per la scelta dell'elemento e delle dimensioni

Una volta caricata la mesh, si prosegue andando ad assegnare un materiale alla parte. Dalla voce "Altro" (Figura 4.9) si aprirà un menù a tendina che permetterà all'utente di scegliere varie operazioni da eseguire tra cui "Assegna materiali" (Figura 4.10).



Figura 4.9: Proprietà "Altro"

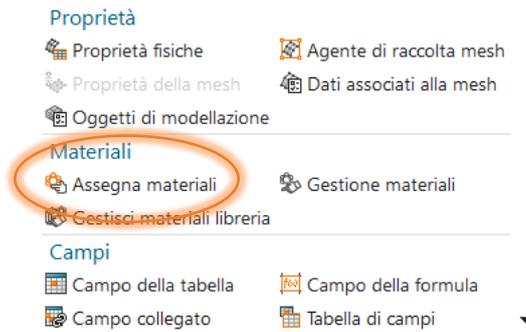


Figura 4.10: Menù: "Assegna materiali"

Infine, si esegue una verifica per controllare se la mesh con le relative unità elementari risulta corretta. Scegliendo l'opzione "Qualità elemento" (Figura 4.11), è possibile analizzare la superficie alla ricerca di eventuali incongruenze o mesh non riuscite. Se il programma mostra come risultato "0 elementi con errori", possiamo procedere all'assegnazione dei carichi e dei vincoli.



Figura 4.11: "Qualità elemento"

Una volta eseguito ciò si passa al secondo modulo, ovvero "Simulazione", nel quale l'utente inserisce i carichi ed i vincoli sul modello preso in esame.

La prima operazione da compiere è la creazione di una "Soluzione" (Figura 4.12) che permette poi di registrare i carichi applicati ed i vincoli per poi ottenere dei risultati.

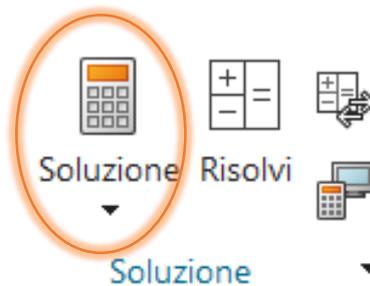


Figura 4.12: "Soluzione"

Si inserisce il tipo di vincolo (Figure 4.13 e 4.14) da considerare per la parte analizzata.

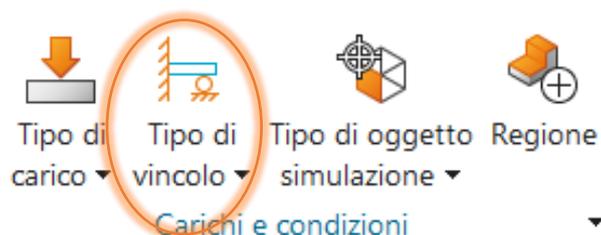


Figura 4.13: "Tipo di vincolo"

-  Vincolo definito dall'utente
-  Vincolo di spostamento obbligato
-  Vincolo fisso
-  Vincolo di traslazione fissa
-  Vincolo di rotazione fissa
-  Vincolo supportato semplicemente
-  Vincolo imperniato
-  Vincolo cilindrico
-  Vincolo slider
-  Vincolo rullo
-  Vincolo Simmetrico
-  Vincolo antisimmetrico
-  Accoppiamento automatico
-  Accoppiamento manuale

Figura 4.14: Scelta del vincolo

Una volta terminata tale procedura, si assegnano i carichi che vanno a sollecitare le aree della parte presa in esame, cliccando sull'icona della Figura 4.15, quindi si sceglie il carico da applicare mediante un menu mostrato nella Figura 4.16.

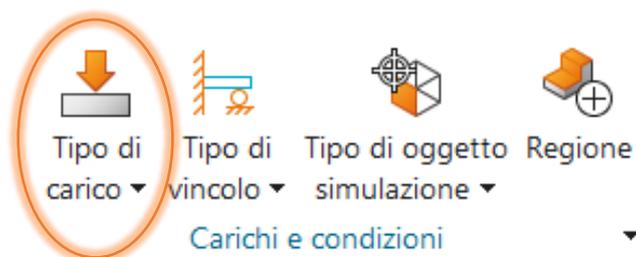


Figura 4.15: "Tipo di carico"

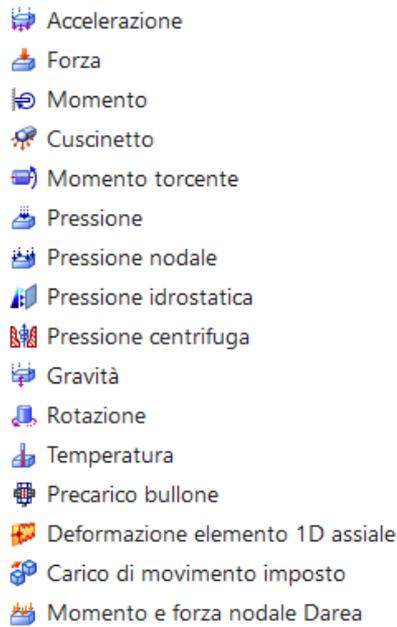


Figura 4.16: Scelta del carico

Infine, si esegue la risoluzione e si possono quindi visionare i risultati della simulazione come:

- Spostamento - Nodale;
- Rotazione - Nodale;
- Tensione - Elementare;
- Tensione - Elemento nodale;
- Forza di reazione - Nodale;
- Momento di reazione.

Esempio Analisi FEM: Trave con vincolo fisso ad un estremo

Si considera una trave in Alluminio 5086 che risulta vincolata ad un estremo e sollecitata da un carico al lato opposto di 100 N, come mostrato nella Figura 4.17.

Dal processo di analisi FEM si hanno dei risultati legati a:

- “Spostamento Nodale” (Figure 4.18 e 4.19);
- “Tensione Elemento Nodale” (Figure 4.20 e 4.21).

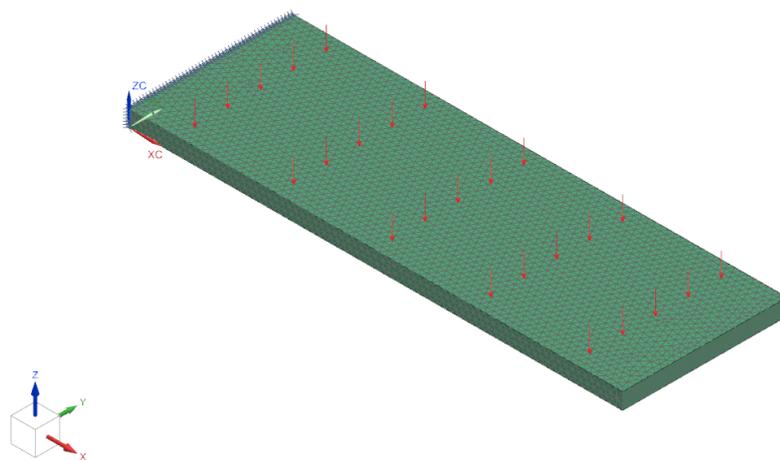


Figura 4.17: Trave con carico e vincolo applicati

model1_sim1 : Solution 1 risultato
 Subcase - Statics 1, Step statico 1
 Spostamento - Nodale, Grandezza
 Min : 0.000, Max : 1.081, Unità di misura = mm
 Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

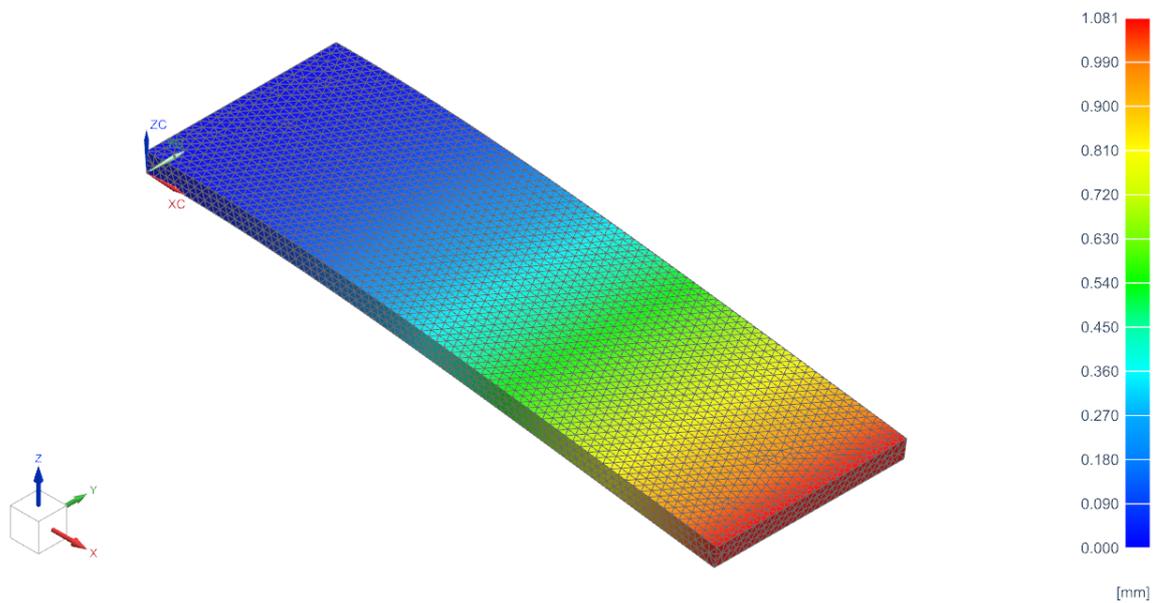


Figura 4.18: Spostamento – Nodale della trave (vista assonometrica)

model1_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Spostamento - Nodale, Grandezza
Min : 0.000, Max : 1.081, Unità di misura = mm
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

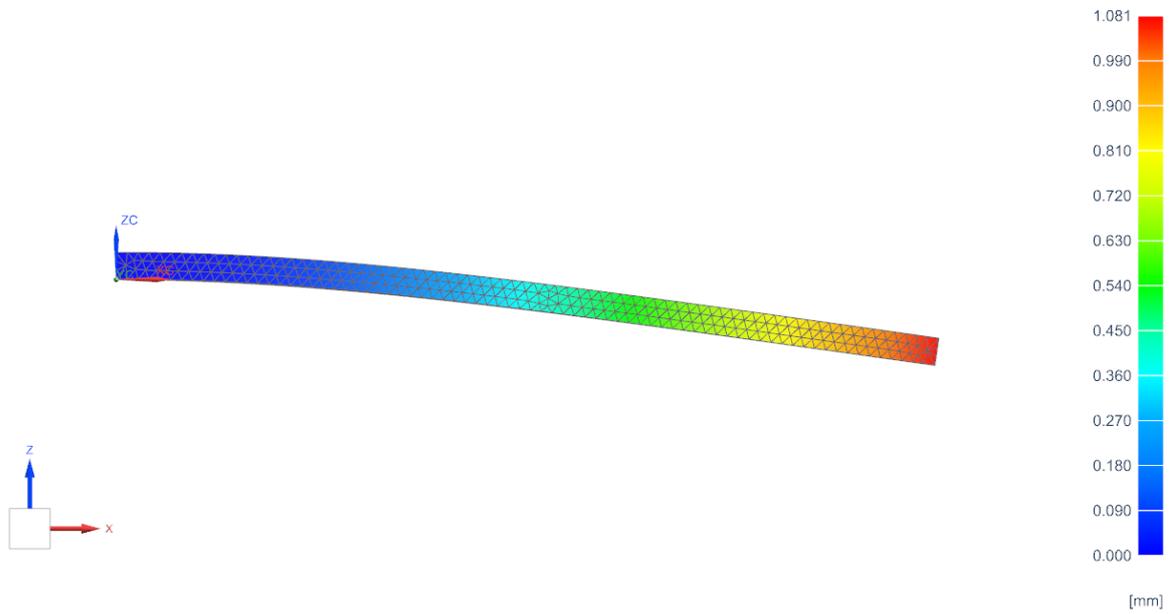


Figura 4.19: Spostamento – Nodale della trave (vista laterale)

model1_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Tensione - Elemento-nodale, Non medio, Von Mises
Min : 0.00, Max : 42.00, Unità di misura = MPa
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

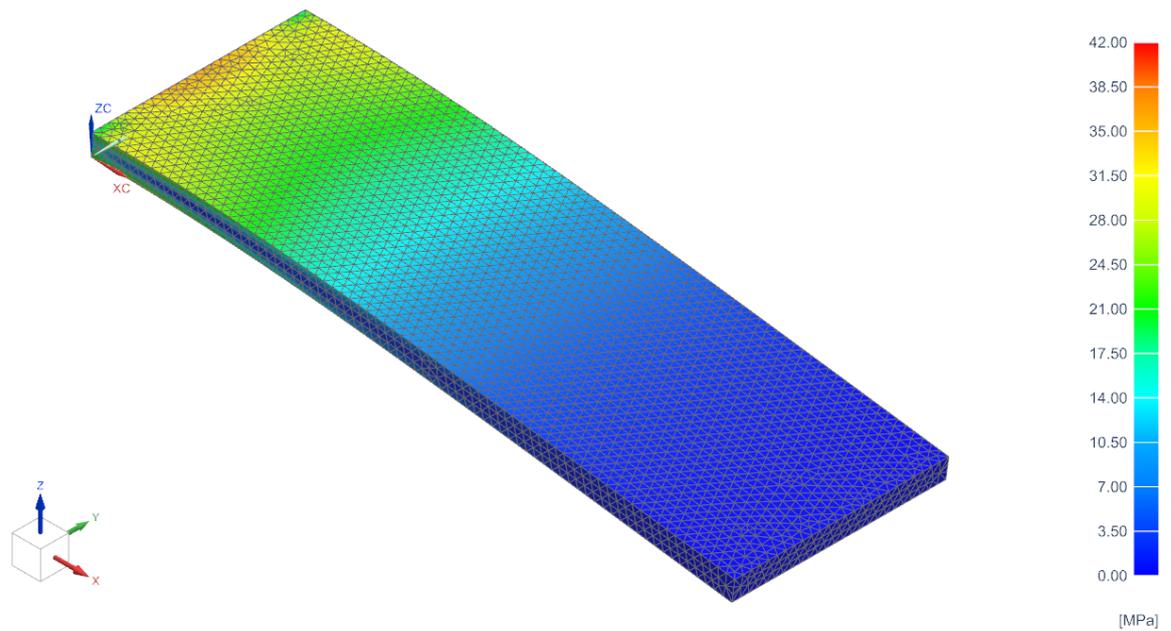


Figura 4.20: Tensione – Elemento - Nodale (vista assonometrica)

model1_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Tensione - Elemento-nodale, Non medio, Von Mises
Min : 0.00, Max : 42.00, Unità di misura = MPa
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

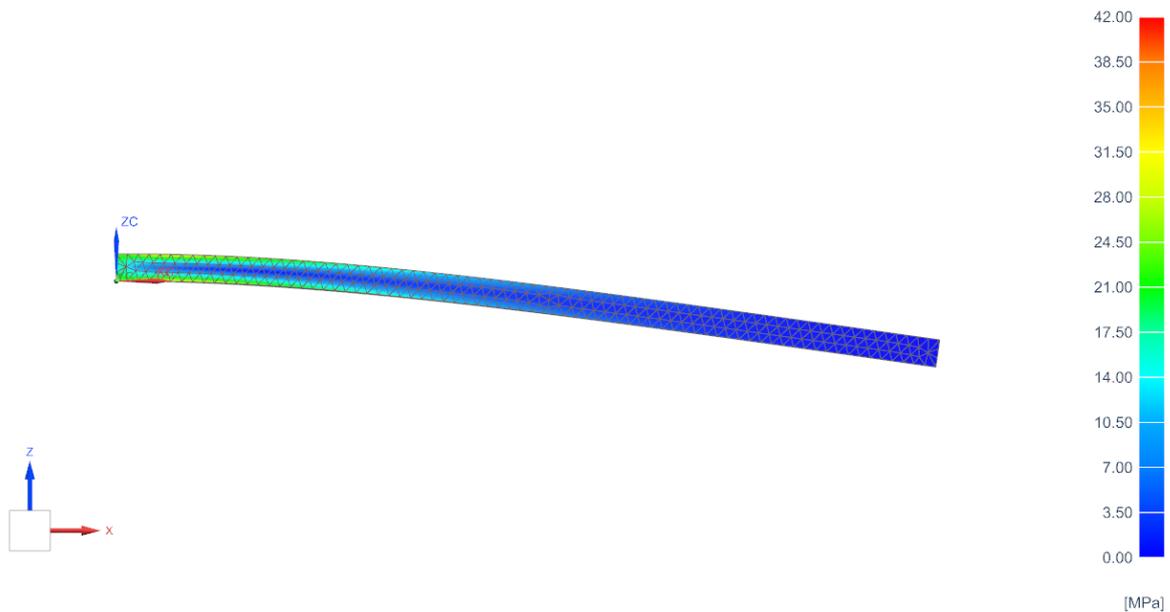


Figura 4.21: Tensione – Elemento - Nodale (vista laterale)

4.3.2 Modulo di Ottimizzazione Topologica

L'utilizzo del modulo di Ottimizzazione Topologica è strettamente legato ai risultati strutturali che vengono richiesti al modello in esame. Si considera, ad esempio, la robustezza strutturale del modello minimizzando la massa e risparmiando così materiale. Si impostano, quindi, carichi, vincoli ed obiettivi finali. L'ottimizzazione topologica è avviata ed il progettista finalizza il modello del pezzo con modifiche dimensionali della geometria, dove è necessario.

All'inizio dell'analisi si delimita lo spazio di progetto del componente o dell'assieme. Si specifica il volume all'interno della geometria ottimizzata.

Si possono assegnare delle strutture elementari (*celle di reticolo*) che vanno a comporre il modello. Si possono definire i bordi, i diametri delle celle, il posizionamento del reticolo. Infine, dopo aver valutato tutte le caratteristiche dinamiche della parte, si procede all'analisi finale per valutare i risultati relativi alle esigenze progettuali.

Per poter eseguire l'Ottimizzazione Topologica in NX è necessario aprire il file modello e selezionare dalla barra degli strumenti "Altro" (Figura 4.22) ed aprire quindi il modulo.

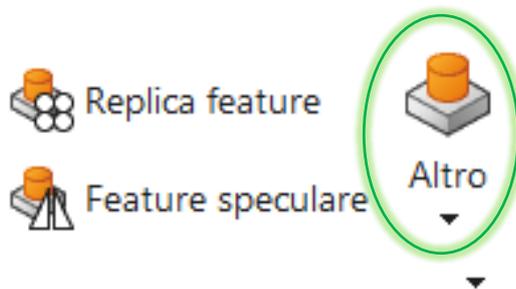


Figura 4.22: Modellazione "Altro"

Si apre un menù a tendina (Figura 4.23) dal quale si va a selezionare: "Ottimizzazione Topologia".

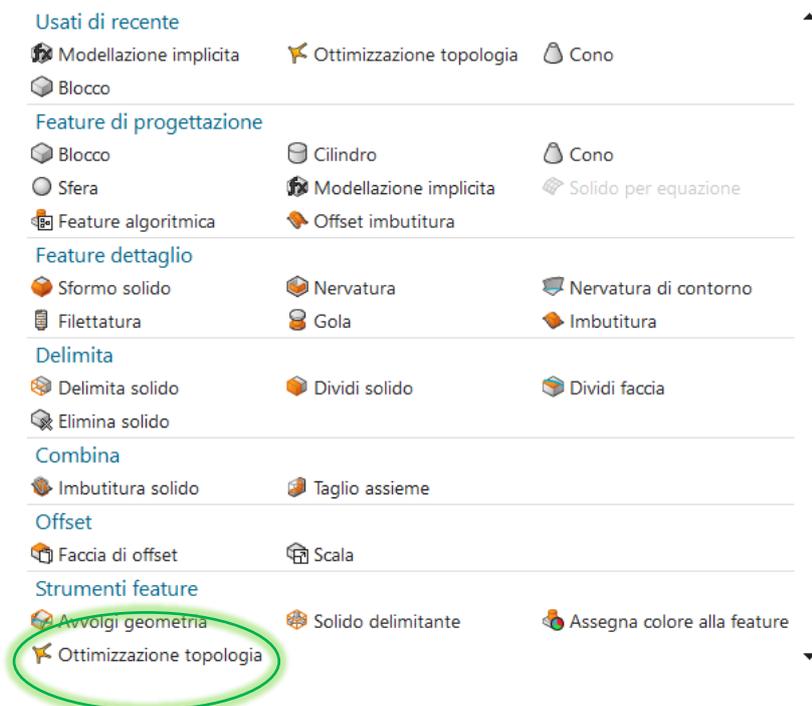


Figura 4.23: Menu a tendina con la voce "Ottimizzazione Topologia"

Una volta aperto il modulo di Ottimizzazione Topologica, si procede andando a selezionare il solido da ottimizzare, mediante il comando “Spazio di progettazione”, rappresentato graficamente nella *Figura 4.24*.

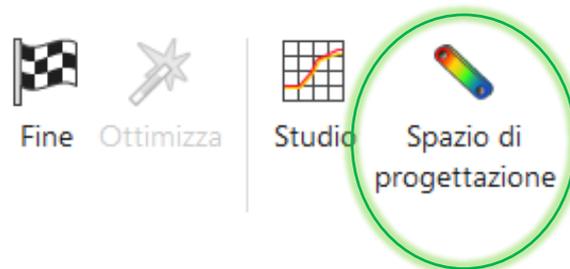


Figura 4.24: “Spazio di progettazione”

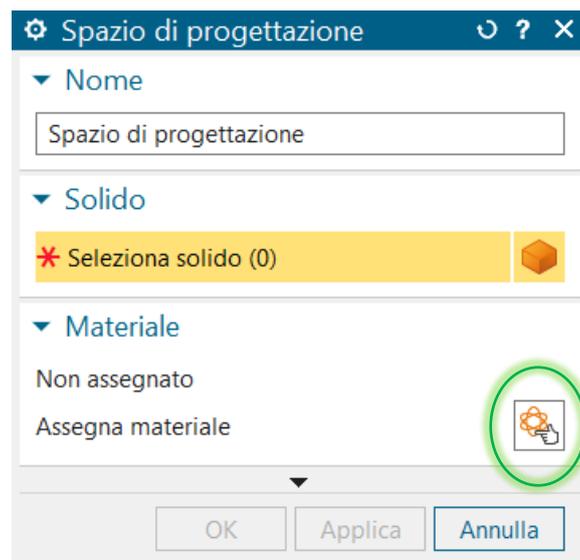


Figura 4.25: Finestra per assegnazione materiale

Dopo aver assegnato il materiale alla parte mediante una finestra di dialogo (*Figura 4.25*), si procede andando a valutare i carichi ed i vincoli (*Figura 4.26*) che erano stati precedentemente imposti nel modulo FEM.

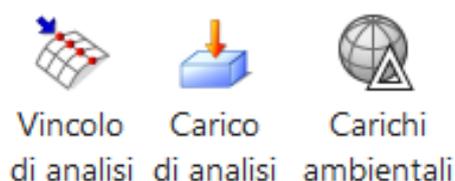


Figura 4.26: Icone per l'assegnazione dei parametri dinamici

I carichi ambientali, rappresentati in *Figura 4.27*, permettono di inserire, ad esempio, l'accelerazione di gravità al modello considerato.

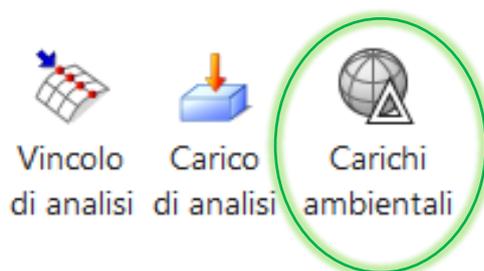


Figura 4.27: "Carichi ambientali"

Infine, si considera il "Vincolo di ottimizzazione" (*Figura 4.28*) mediante il quale è possibile definire:

- "Destinazione massa";
- "Limite di massa massimo";
- "Limite di tensione massimo";
- "Limite di spostamento massimo".



Figura 4.28: "Vincolo di ottimizzazione"

Concluso tale procedimento, si esegue l'ottimizzazione mediante il tasto "Ottimizza", mostrato in *Figura 4.29*.



Figura 4.29: "Ottimizza"

Per la visione dei risultati si procede cliccando sulle icone "Mostra risultato" e "Impostazioni risultato" (Figura 4.30). Attraverso le impostazioni è possibile visualizzare due ottimizzazioni da porre a confronto, in modo da valutare eventuali differenze strutturali che una stessa parte possiede in base ai parametri modificati.



Figura 4.30: Icone "Mostra risultato" e "Impostazioni risultato"

Esempio Ottimizzazione Topologica: Trave con vincolo fisso ad un estremo

Si considera una trave in Alluminio 5086 che risulta vincolata ad un estremo e caricata con un carico di 100 N sul lato opposto (Figura 4.31).

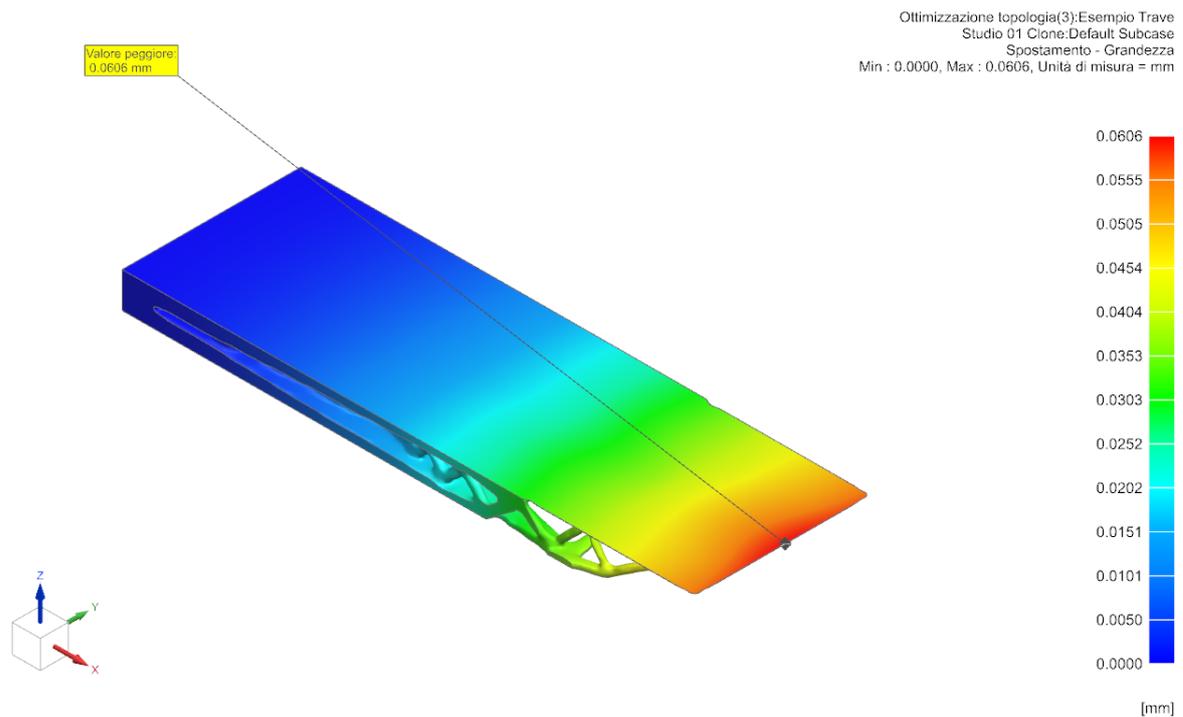


Figura 4.31: Trave ottimizzata

5. Case study

Il caso studio verte sull'analisi *FEM* e sull'Ottimizzazione Topologica di un drone, il cui telaio è stato precedentemente ingegnerizzato mediante il software *Solid-Edge* (Figura 5.1).

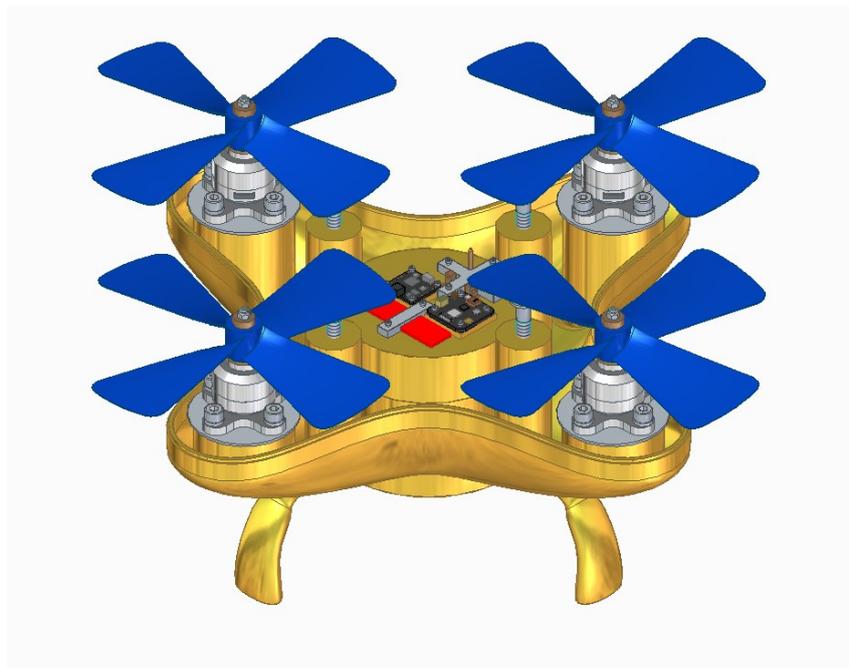


Figura 5.1: Drone con la componentistica

Partendo dall'assieme sopra rappresentato, è stata analizzata la componentistica essenziale, tenendo conto dei materiali e delle forze peso.

In particolare, sono stati calcolati i carichi di:

- Schede elettroniche (*Figura 5.2*) in vetronite ramata con fibra di vetro [12]: 0,265N;
- Batteria Litio Polimero, rappresentata in *Figura 5.3* (sale di Litio presente in un composito di Polimero solido [12]): 2,187 N;
- 4 Motori brushless (*Figura 5.4*): 11,772 N complessivi (compresi di eliche);
- Telaio superiore realizzato in ABS (*Figura 5.5*): 6,73 N;
- Telaio inferiore in ABS (*Figura 5.6*): 31,47 N.

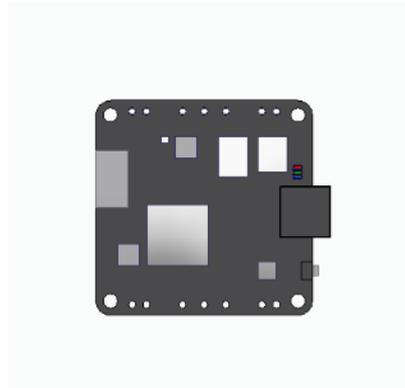


Figura 5.2: Scheda elettronica

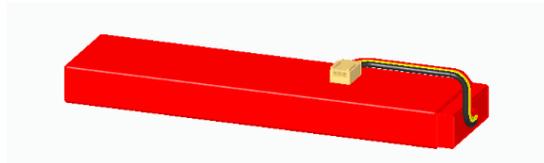


Figura 5.3: Batteria Li-Po



Figura 5.4: Motore brushless CAD



Figura 5.5: Telaio Superiore (file Solid-Edge)

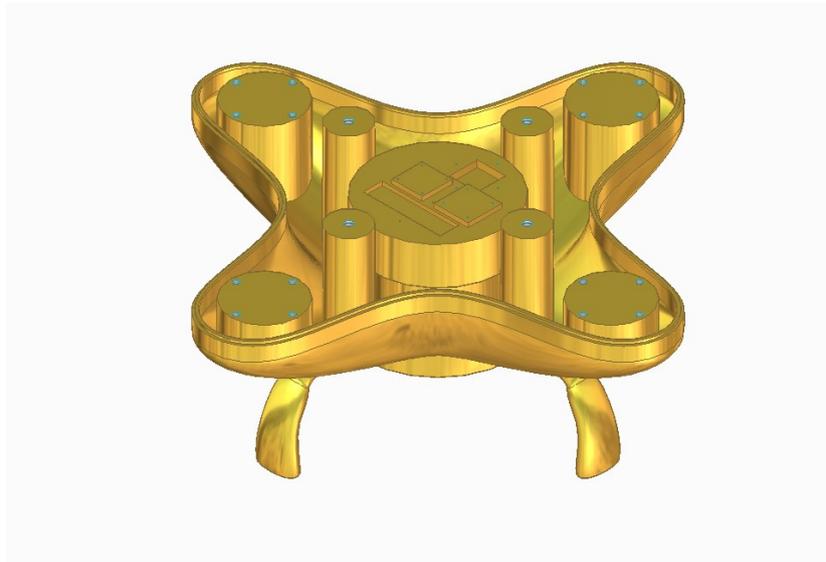


Figura 5.6: Telaio Inferiore (file Solid-Edge)

Il procedimento che è stato eseguito ha visto una suddivisione delle analisi in due macrogruppi:

- analisi del telaio superiore (*Figura 5.5*);
- analisi del telaio inferiore (*Figura 5.6*).

Individuazione di massa, volume ed area

Nell'ambiente di *Solid-Edge* è stato assegnato come materiale per il frame l'ABS, in quanto garantisce leggerezza e rigidità. Successivamente, sono stati analizzati i seguenti parametri:

- Volume;
- Area;
- Massa della parte.

Il telaio superiore (*Figura 5.5*) ha un volume di 670127 mm³, una superficie pari a 283001 mm² e una massa di 0,686 kg. Quello inferiore (*Figura 5.6*), di 3,208 kg, occupa un volume di 3132902 mm³ e un'area di 59590 mm².

Dopo aver valutato la forza peso complessiva e tenuto conto del peso del telaio completo, sono stati ottenuti i risultati presenti nella *Tabella 5.1*.

FORZE PESO COMPLESSIVE	
Telaio completo	38,200 N
Componentistica	14,224 N
TOTALE	52,424 N

Tabella 5.1: Calcolo forze peso complessive

Grazie al calcolo eseguito precedentemente, è stato possibile ricercare un motore brushless che garantisse il sollevamento dell'assieme e quindi favorirne il volo.

La caratteristica fondamentale che deve possedere è quella di garantire una relazione tra spinta motore e forza peso complessiva di almeno 2:1.

Il motore, che è in grado di sollevare l'intera struttura e che ha una forza peso minima rispetto al totale, è un prodotto della T-MOTOR, in particolare è il motore brushless denominato "T-MOTOR F 1000 KV 635" (Figura 5.7) avente un'elica (*propeller*) del tipo "T-MOTOR P14 4,8 CF".

Al massimo delle prestazioni, infatti, il suddetto motore sviluppa una spinta ("*Thrust*") pari a circa 39,22 N. Essendo presenti quattro motori, il valore complessivo è di circa 156,88 N. Si è quindi valutata la relazione spinta motori e forza peso.

Dati ottenuti:

- spinta motori: 39,22 N ciascuno
- forza peso complessiva: 52,424 N

Relazione empirica

$$\frac{(39,22 \times 4)}{52,424} = 3$$

Ciò implica un rapporto di 3:1 superiore a ciò che era stato prefissato. Risulta, quindi, un valore ottimale per le condizioni precedentemente definite.



Figura 5.7: Motore brushless

Il file parte ("*.par*") di *Solid-Edge* è stato esportato dall'ambiente per essere successivamente importato nel software *Siemens NX* come file *Parasolid* (*.x_t*).

Qui mediante il modulo *FEM* è stato possibile simulare tutte le forze che andavano a sollecitare le due parti del telaio e, mediante il solutore "*Nastran*", ottenere i relativi risultati come: "*Spostamento Nodale*" e "*Tensione Elementare*".

5.1 Telaio superiore

5.1.1 Analisi FEM

Come primo modello per l'analisi è stato considerato il telaio superiore. Seguendo i passaggi precedentemente visti nella descrizione del modulo FEM, è stata inserita una mesh tetraedrica con parametro "Tetra 4", rappresentata nella *Figura 5.8*.

Successivamente sono state inserite le forze elencate in precedenza in modo da simulare la sollecitazione della componentistica e le spinte dei motori brushless. I vincoli sono stati inseriti sugli alloggi per viti.

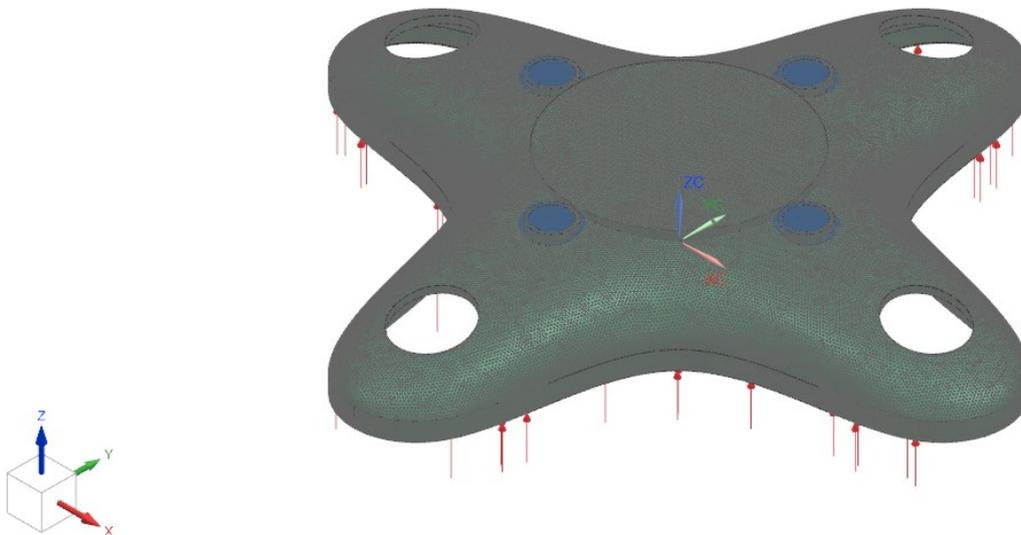


Figura 5.8: Telaio Superiore con forze e vincoli applicati (vista frontale)

Dall'analisi effettuata sono stati ottenuti i risultati di:

- Spostamento Nodale (*Figura 5.9 e Figura 5.10*);
- Tensione - Elemento - Nodale (*Figura 5.11 e Figura 5.12*)

Corpo superiore completo_x_t_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Spostamento - Nodale, Grandezza
Min : 0.000, Max : 0.450, Unità di misura = mm
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

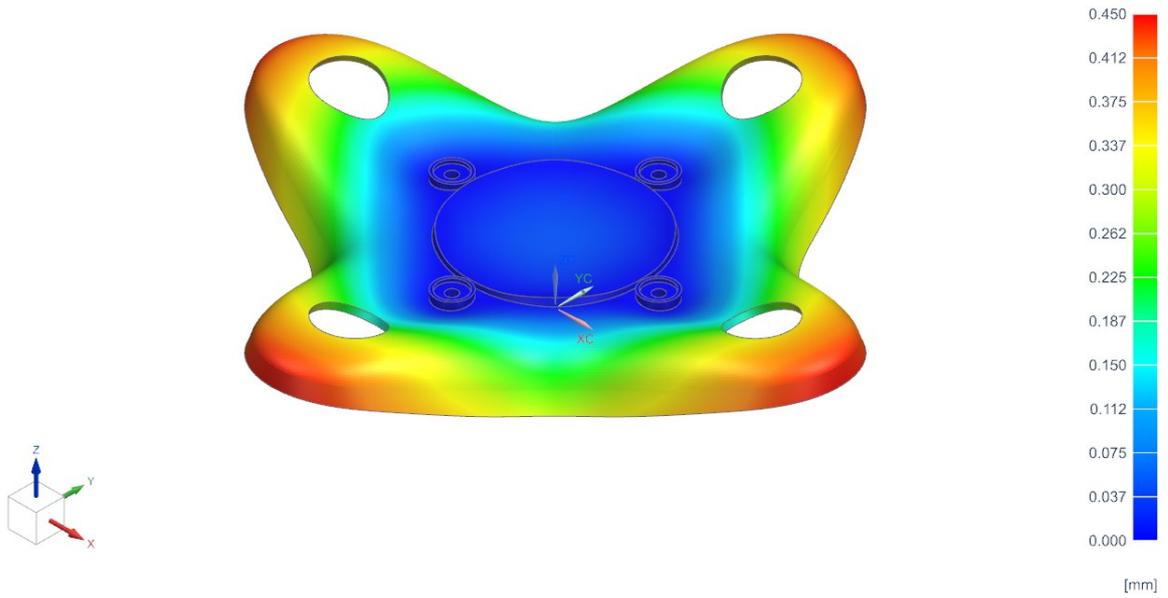


Figura 5.9: Spostamento – Nodale Telaio Superiore (vista assonometrica)

Corpo superiore completo_x_t_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Spostamento - Nodale, Grandezza
Min : 0.000, Max : 0.450, Unità di misura = mm
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

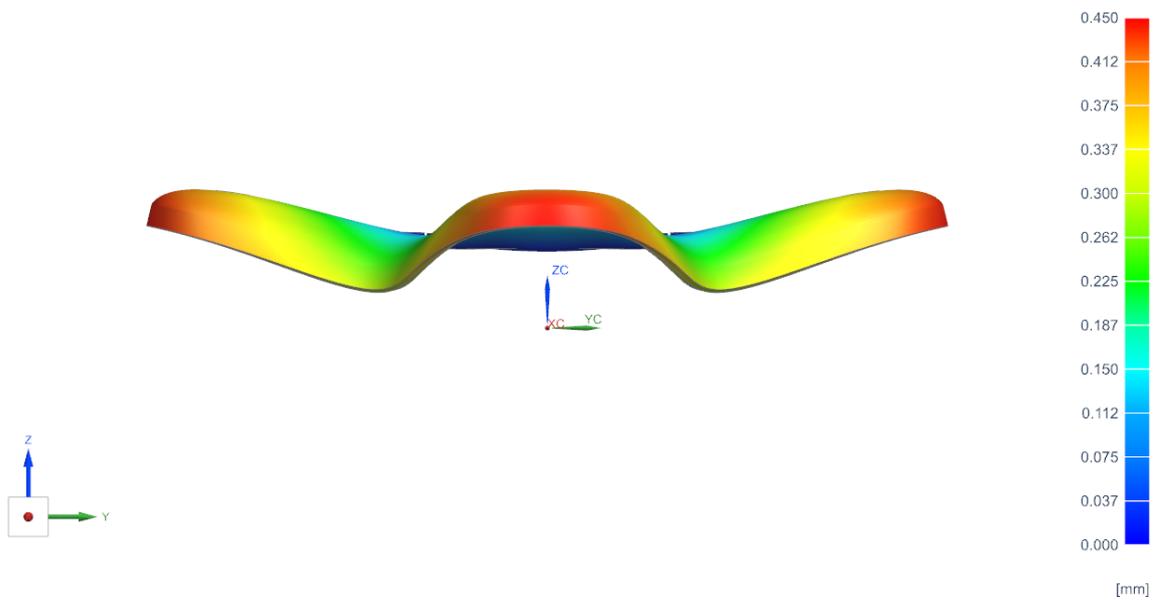


Figura 5.10: Spostamento – Nodale Telaio Superiore (vista frontale)

Corpo superiore completo_x_t_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Tensione - Elemento-nodale, Non medio, Von Mises
Min : 0.006, Max : 2.296, Unità di misura = MPa
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

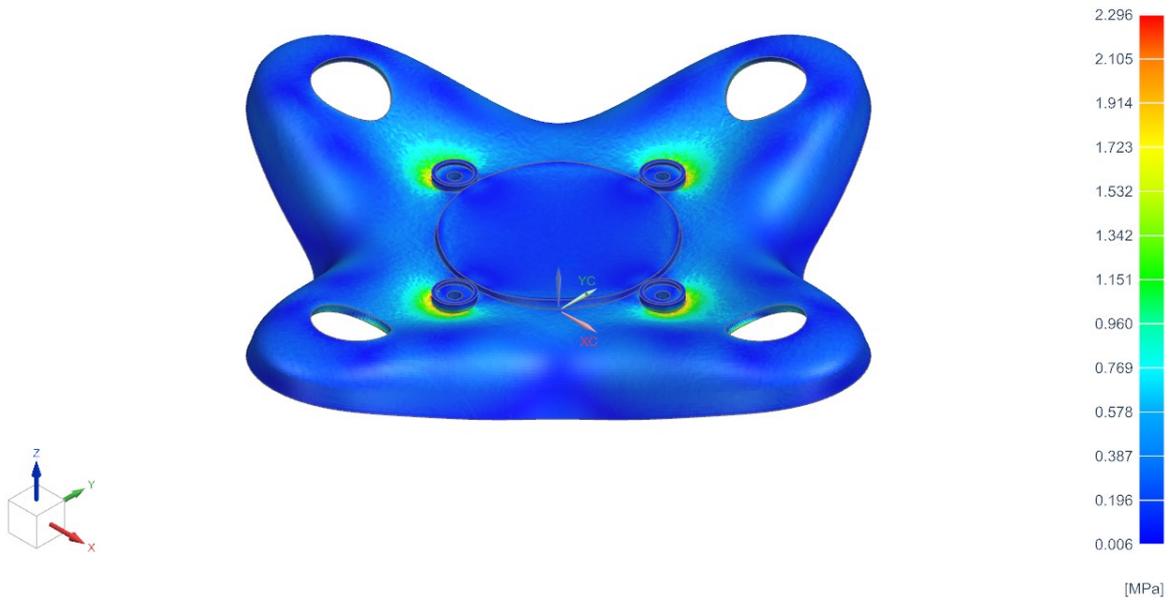


Figura 5.11: Tensione - Elemento - Nodale Telaio Superiore (vista assonometrica)

Corpo superiore completo_x_t_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Tensione - Elemento-nodale, Non medio, Von Mises
Min : 0.006, Max : 2.296, Unità di misura = MPa
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

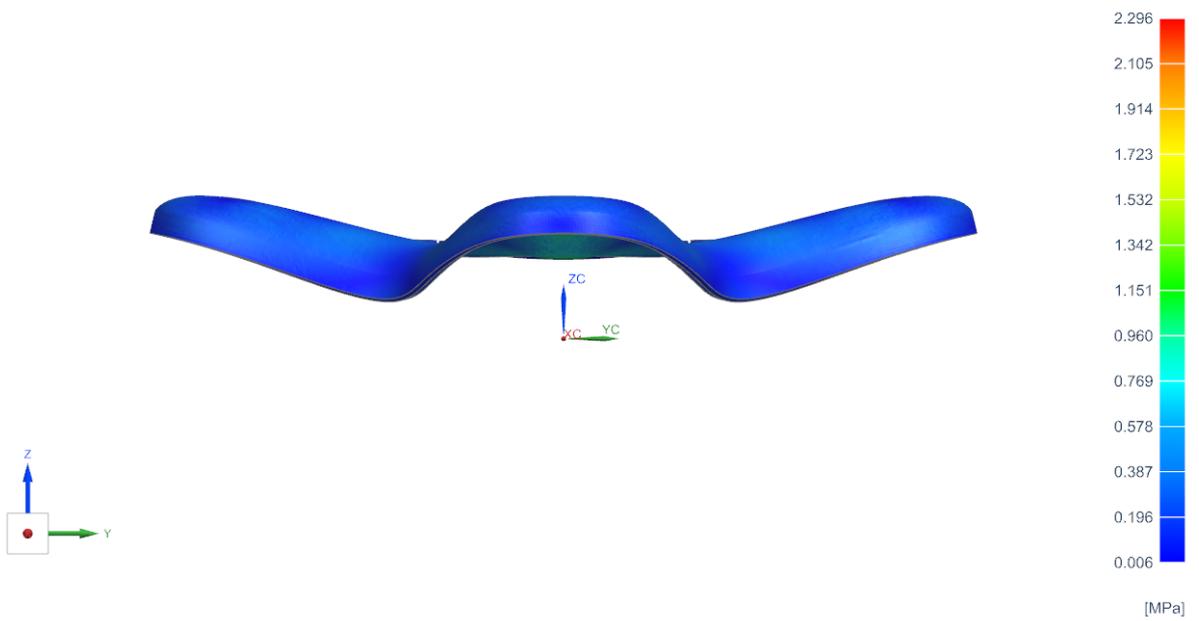


Figura 5.12: Tensione - Elemento - Nodale Telaio Superiore (vista frontale)

5.1.2 Ottimizzazione Topologica

L'ottimizzazione eseguita ha come obiettivo la rigidità della parte.

Il processo di Ottimizzazione Topologica per il telaio superiore è caratterizzato da considerazioni di tipo dinamico eseguite tenendo conto delle eventuali reazioni vincolari esercitate dalle viti di serraggio che collegano il corpo superiore con quello inferiore.

Nella *Figura 5.13*, infatti, si può notare come i vettori di color arancione vanno a descrivere le reazioni vincolari, mentre gli elementi viola definiscono i vincoli.

Ciò implica che la zona che va in battuta con il telaio inferiore deve rimanere invariata così da garantire l'accoppiamento.

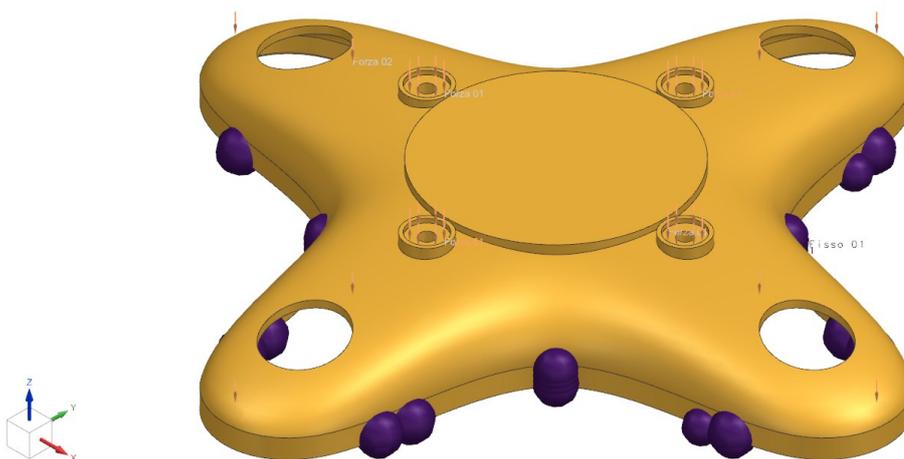


Figura 5.13: Vincoli e carichi imposti Telaio Superiore

In seguito, si è deciso di ridurre il *voxel* a 1,25 mm che corrisponde a circa il 50% dello spessore minimo che il telaio presenta. L'obiettivo è migliorare la definizione del modello ottimizzato.

Il *voxel* è l'unità tridimensionale che permette di discretizzare il modello determinando così una maggior definizione della parte ottimizzata [12].

Una volta concluso il procedimento di assegnazione dei parametri, è stato avviato il calcolatore. Il risultato ottenuto corrisponde alla *Figura 5.14* per lo spostamento nodale, mentre la tensione è rappresentata nella *Figura 5.15*.

L'obiettivo principale è quello di mantenere una certa rigidità strutturale in modo da evitare snervamenti e successivamente rotture del modello a causa degli stati tensionali si sollecitazione.

Il valore più critico ottenuto è pari a circa 0,02 mm, risultato accettabile in quanto rispetto allo spessore del telaio finale è circa 50 volte minore.

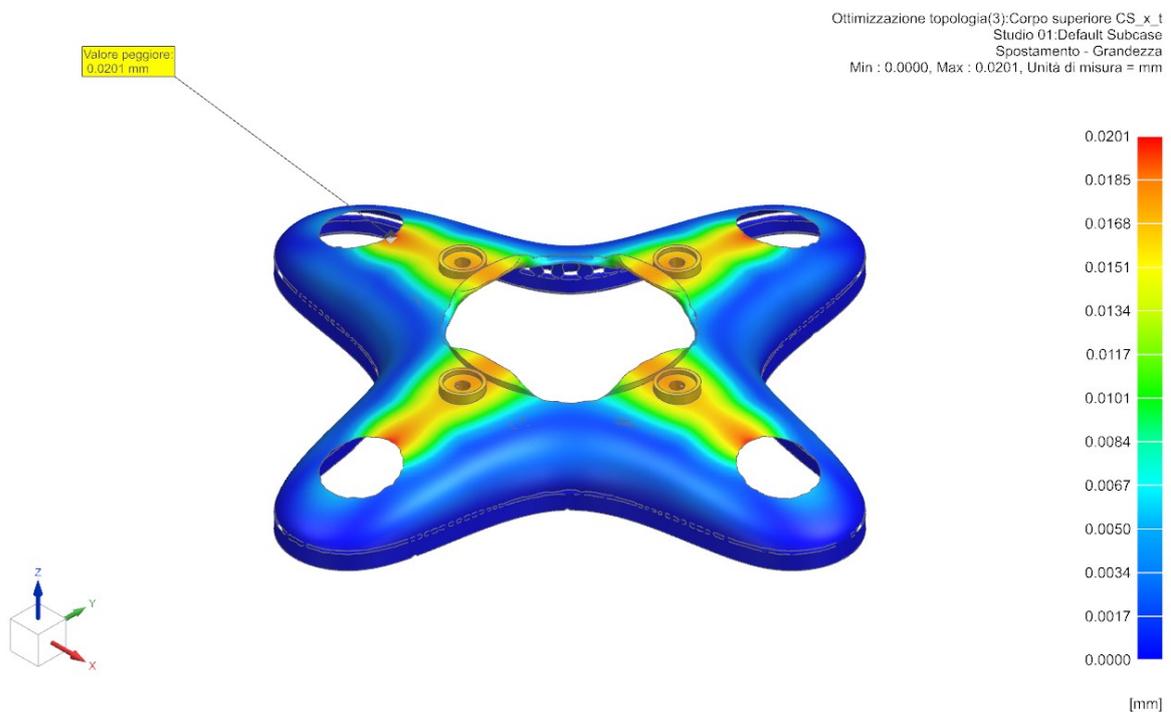


Figura 5.14: Ottimizzazione Topologica Telaio Superiore (Spostamento)

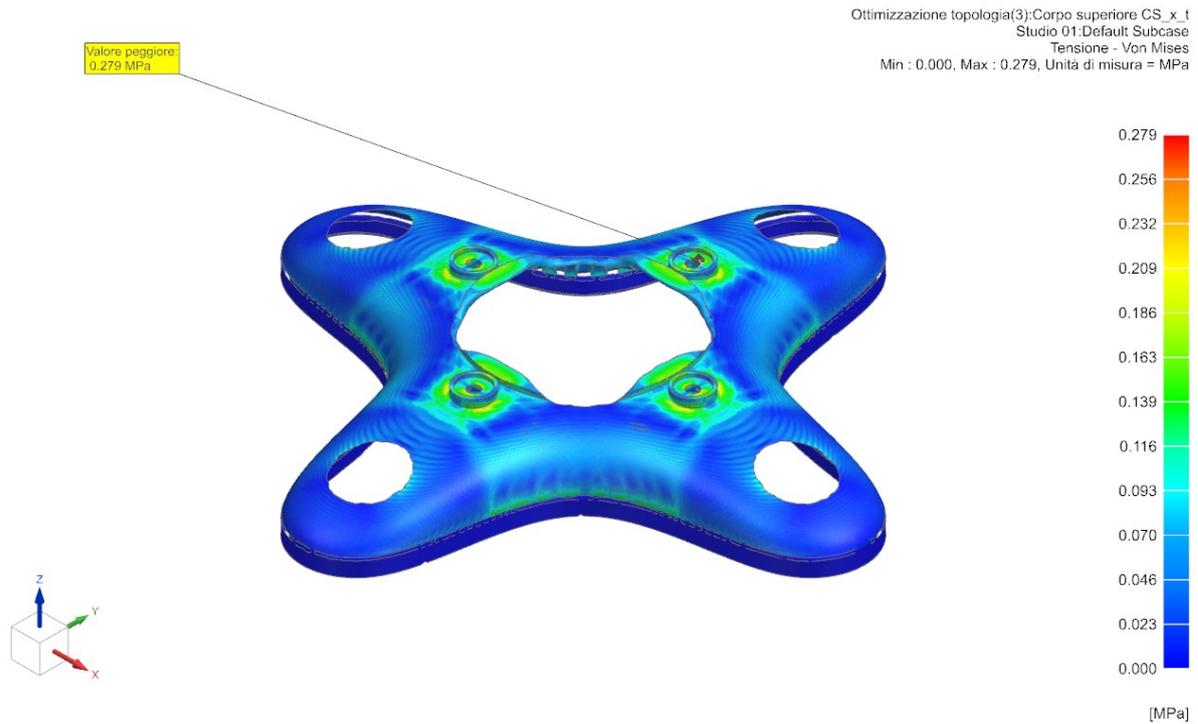


Figura 5.15: Ottimizzazione Topologica Telaio Superiore (Tensione)

5.2 Telaio inferiore

5.2.1 Analisi FEM

Il medesimo procedimento visto per il telaio superiore è stato eseguito per il corpo inferiore. Nella *Figura 5.16* viene inserito il modello 3D con la mesh tetraedrica e le forze che vanno a sollecitare la parte. I vincoli sono stati inseriti ai piedini del telaio e alla base inferiore della struttura. I risultati di “Spostamento Nodale” e “Tensione Elemento Nodale” sono rappresentati nelle figure: 5.17, 5.18, 5.19, 5.20.

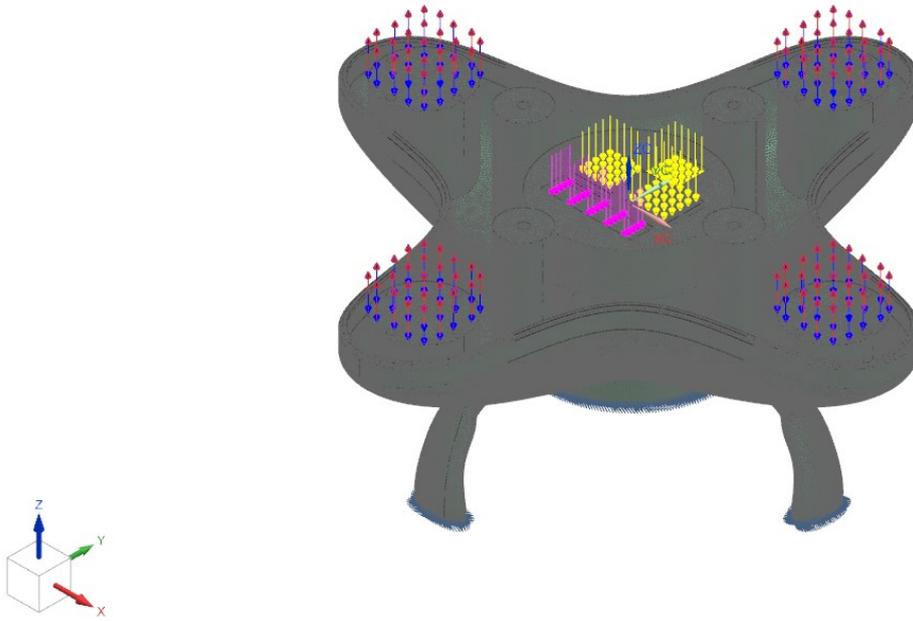


Figura 5.16: Telaio Inferiore con forze e vincoli applicati (vista assonometrica)

Corpo inferiore completo_x_t_sim1 : Solution 1 risultato
 Subcase - Statics 1, Step statico 1
 Spostamento - Nodale, Grandezza
 Min : 0.0000, Max : 0.0538, Unità di misura = mm
 Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

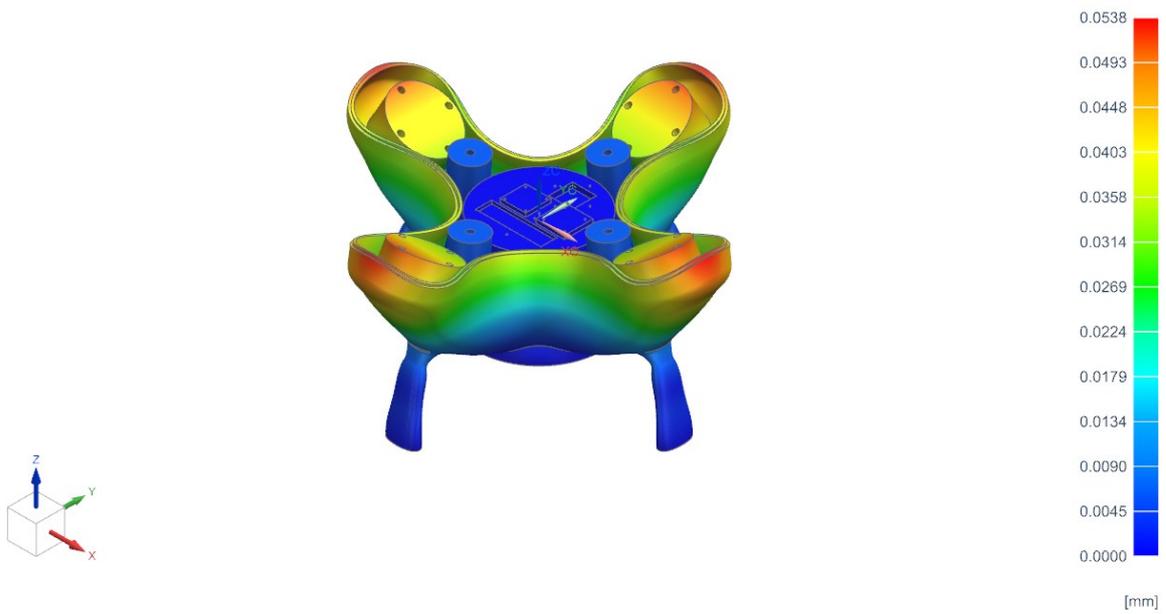


Figura 5.17: Spostamento - Nodale Telaio Inferiore (vista assonometrica)

Corpo inferiore completo_x_t_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Spostamento - Nodale, Grandezza
Min : 0.0000, Max : 0.0538, Unità di misura = mm
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

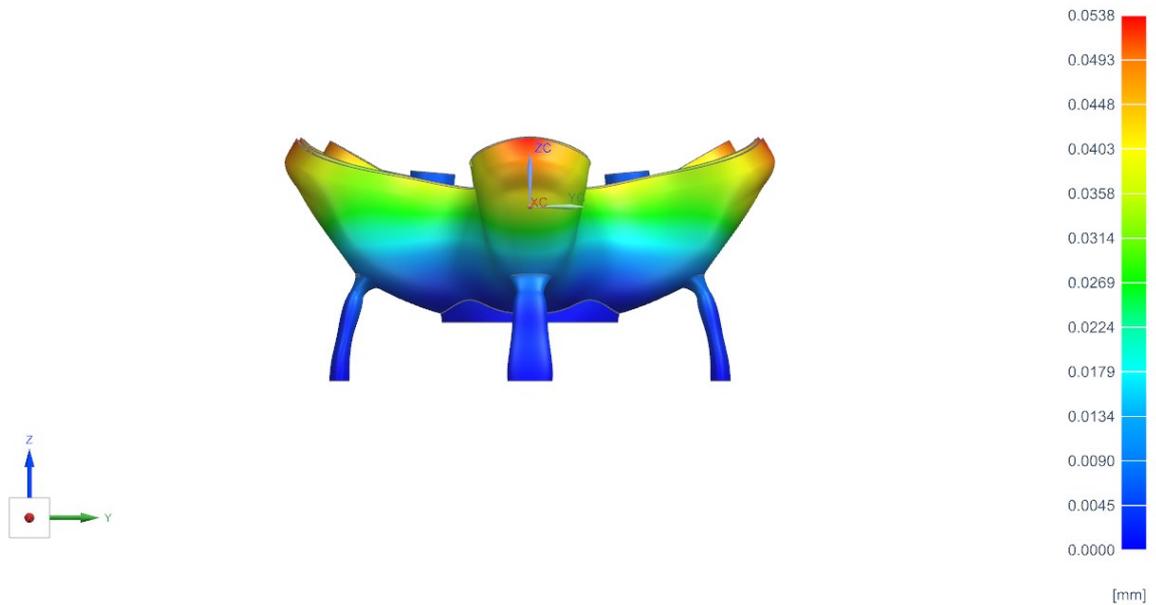


Figura 5.18: Spostamento - Nodale Telaio Inferiore (vista frontale)

Corpo inferiore completo_x_t_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Tensione - Elemento-nodale, Non medio, Von Mises
Min : 0.000, Max : 0.940, Unità di misura = MPa
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

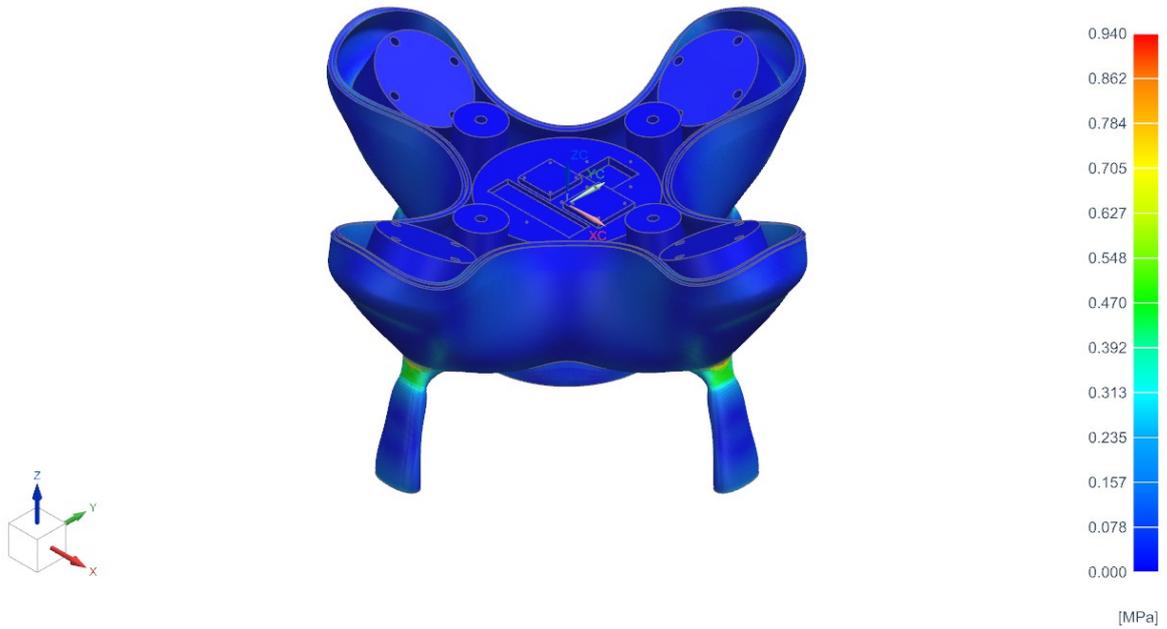


Figura 5.19: Tensione - Elemento - Nodale Telaio Inferiore (vista assonometrica)

Corpo inferiore completo_x_t_sim1 : Solution 1 risultato
Subcase - Statics 1, Step statico 1
Tensione - Elemento-nodale, Non medio, Von Mises
Min : 0.000, Max : 0.940, Unità di misura = MPa
Deformazione : Spostamento - Nodale Grandezza

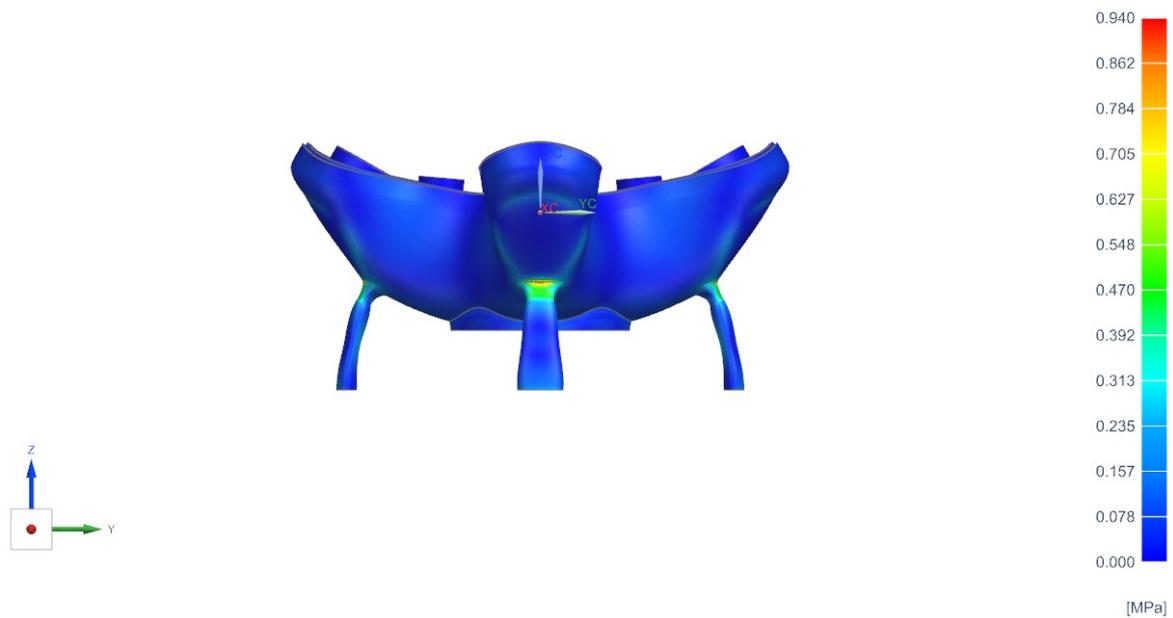


Figura 5.20: Tensione – Elemento – Nodale Telaio Inferiore (vista frontale)

5.2.2 Ottimizzazione Topologica

Lo stesso processo di analisi visto per il telaio superiore riguardo all'ottimizzazione è stato eseguito per quello inferiore (Figura 5.21). Sono stati imposti i vincoli alla zona di accoppiamento col telaio superiore, così da mantenere invariate le superfici. Si è considerato zona di vincolo anche l'area corrispondente ai piedini del telaio.

Successivamente, tenendo conto delle forze applicate nel modulo *FEM*, è stata valutata la zona di sollecitazione corrispondente alla parte interna del telaio inferiore.

Sono state imposte le forze di reazione dovute alle viti di serraggio e si è tenuto conto dell'azione dei motori brushless nelle relative basi di appoggio.

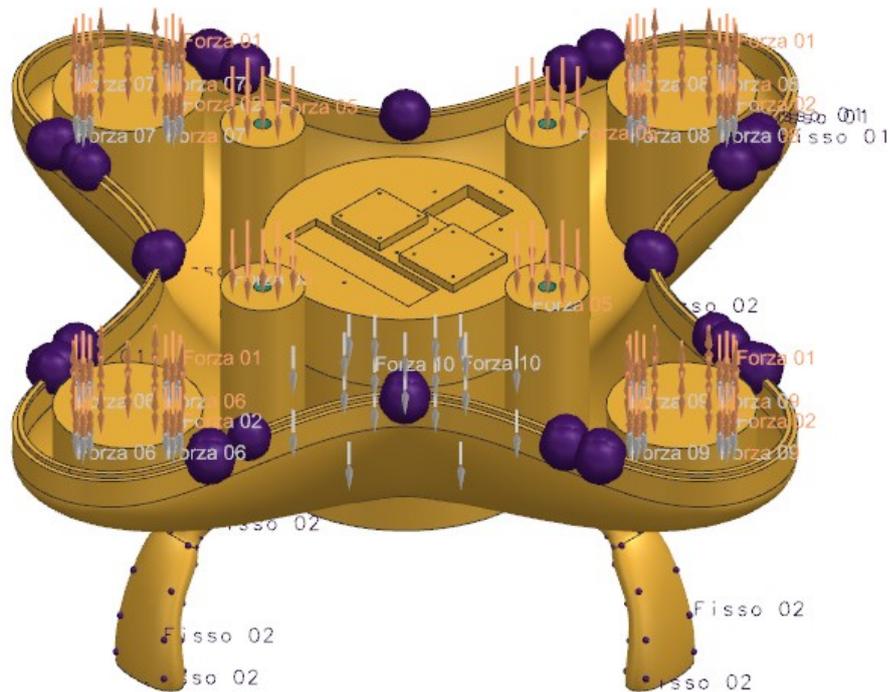


Figura 5.21: Vincoli e carichi imposti Telaio Inferiore

A differenza del telaio superiore, nel quale si è considerato un *voxel* di 1,25 mm, il corpo inferiore è stato ottimizzato con una risoluzione maggiore, ovvero con un parametro pari a 1,20 mm. Per quanto riguarda la massa, la riduzione è di circa il 50%. Il valore più critico nella zona di sollecitazione corrisponde a circa 0,006 mm, che risulta essere accettabile, in quanto molto minore rispetto alle dimensioni dello spessore del telaio di circa 1,50 mm. I risultati ottenuti sono rappresentati nelle figure: 5.22 e 5.23.

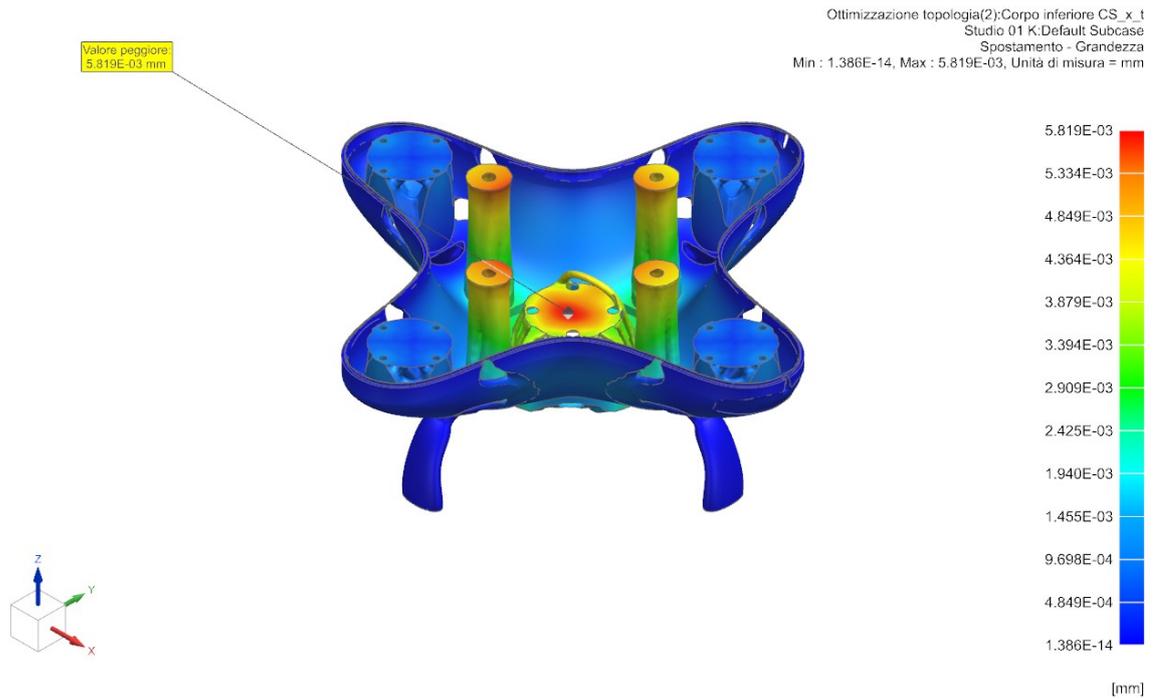


Figura 5.22: Ottimizzazione Topologica Telaio Inferiore (Spostamento)

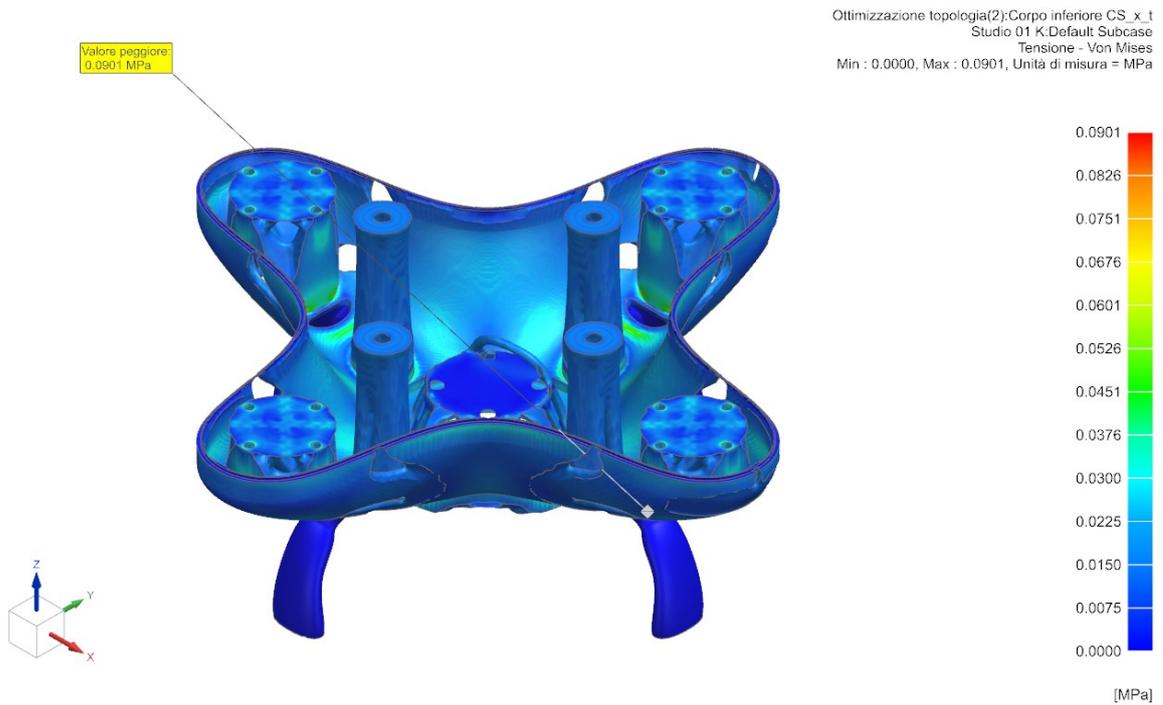


Figura 5.23: Ottimizzazione Topologica Telaio Inferiore (Tensione)

Terminata la procedura di Ottimizzazione Topologica, il software ha prodotto come risultato le nuove geometrie dei telai, definiti nelle figure 5.24 e 5.25.

5.3 Tensioni massime

Dovendo valutare l'eventuale tensione massima di sollecitazione del telaio completo, è stata eseguita un'ulteriore analisi che permettesse di ottenere una parte ottimizzata tenendo in considerazione le massime condizioni di resistenza.

Avendo definito l'ABS come materiale principale nella realizzazione del telaio, si è tenuto conto dello spostamento ϵ_s pari al 20% [35]. Essendo lo spessore del guscio pari a 5 mm, lo spostamento massimo consentito è di 1 mm, come si evince dalla *Figura 5.24*. Mediante l'analisi dinamica eseguita considerando le spinte dei motori pari a 39,22 N che determinano uno spostamento pari a 0,02 mm, il telaio è stato sottoposto ad una forza massima di 1960 N.

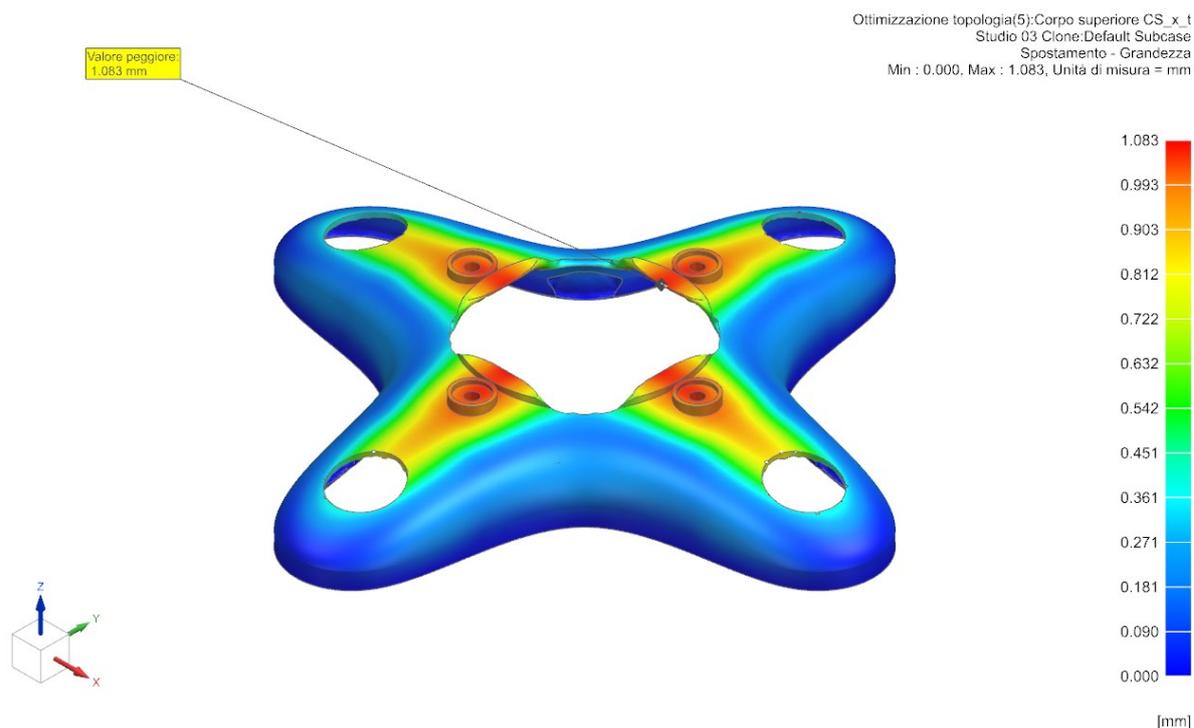


Figura 5.24: Spostamento Nodale Telaio Superiore (condizioni di rottura)

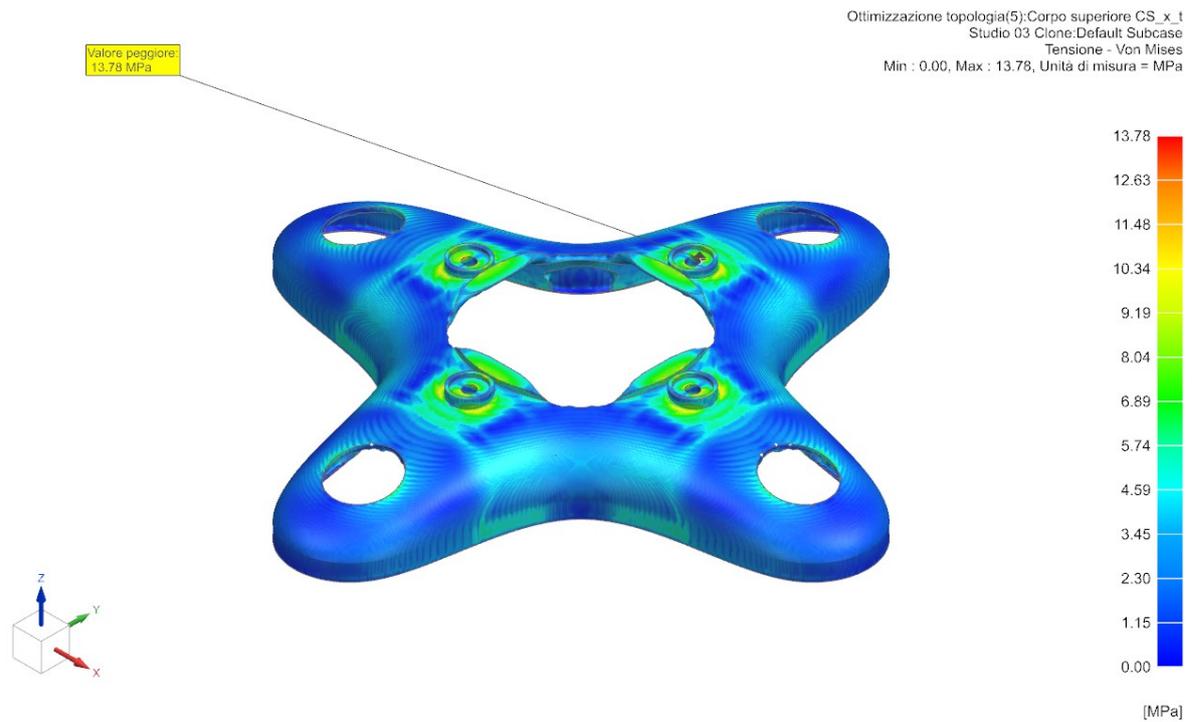


Figura 5.25: Tensione Von Mises Telaio Superiore (condizioni di rottura)

Il medesimo ragionamento è stato applicato al telaio inferiore. I vincoli sono rimasti gli stessi della precedente Ottimizzazione Topologica.

L'analisi è stata effettuata sottoponendo il telaio ad una spinta massima dalla base dei motori brushless, mentre agli alloggi delle viti è stata considerata una forza di reazione. Lo spostamento nodale ottenuto viene rappresentato dalla *Figura 5.27*, mentre la tensione di Von Mises viene valutata mediante la simulazione di *Figura 5.28*.

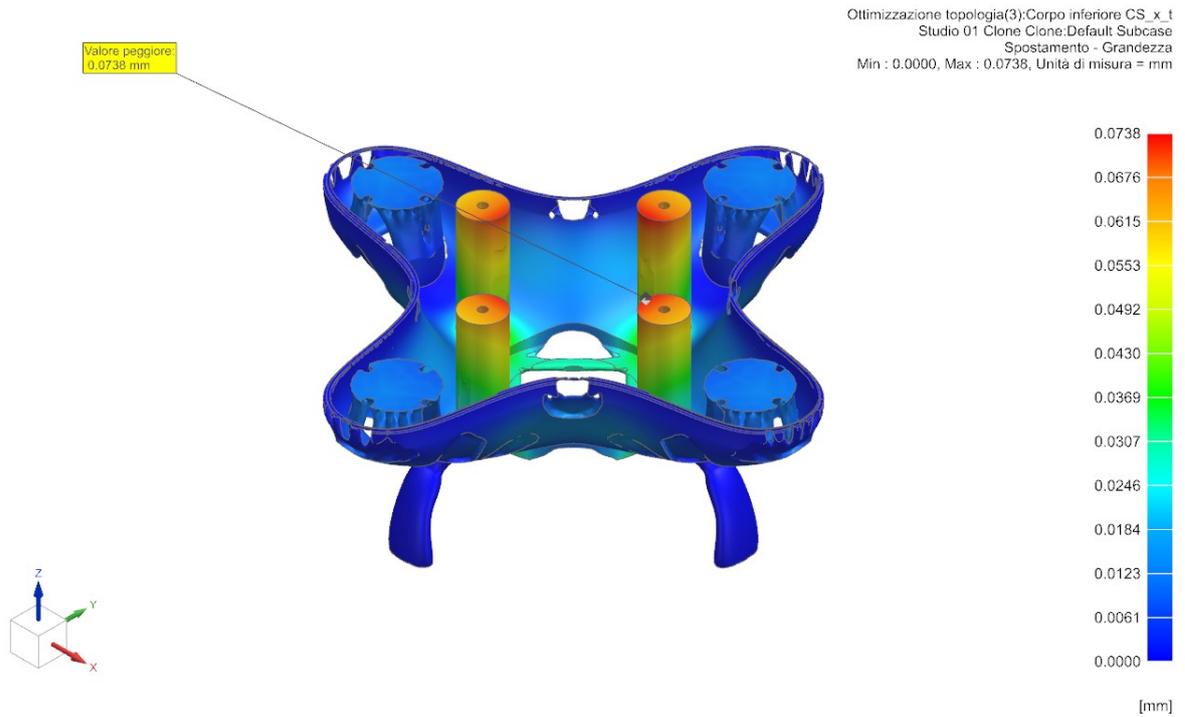


Figura 5.26: Spostamento Nodale Telaio Inferiore (condizioni di rottura)

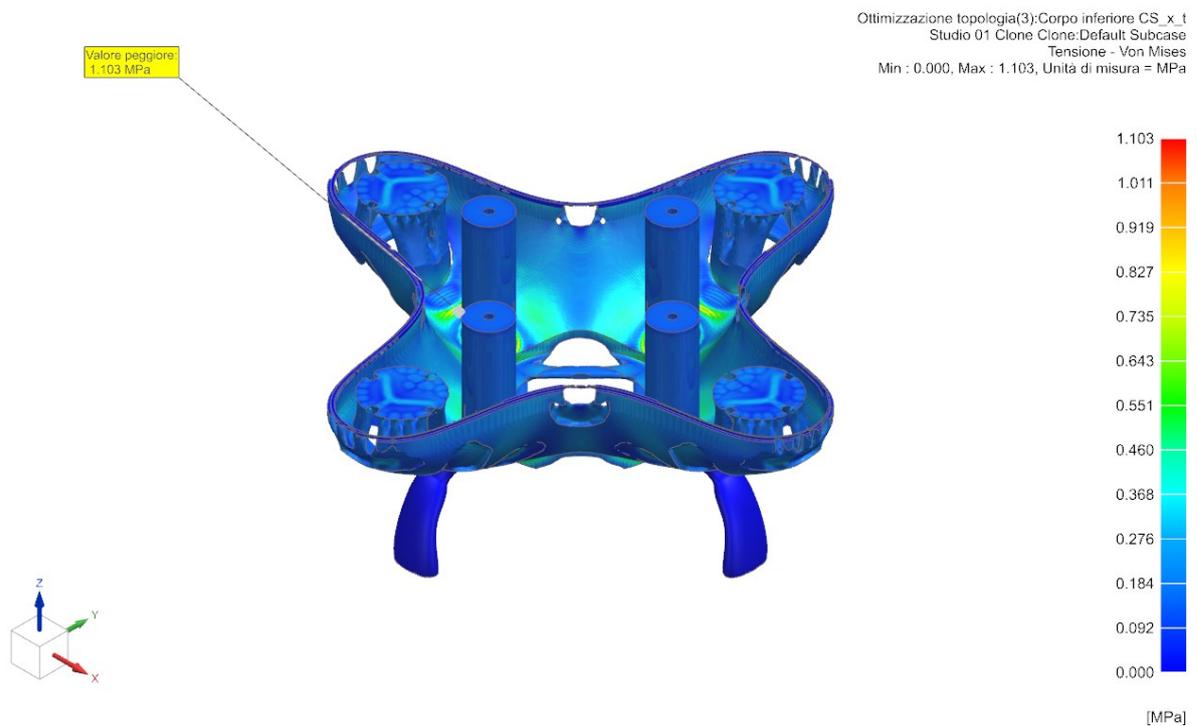


Figura 5.27: Tensione di Von Mises Telaio Inferiore (condizioni di rottura)

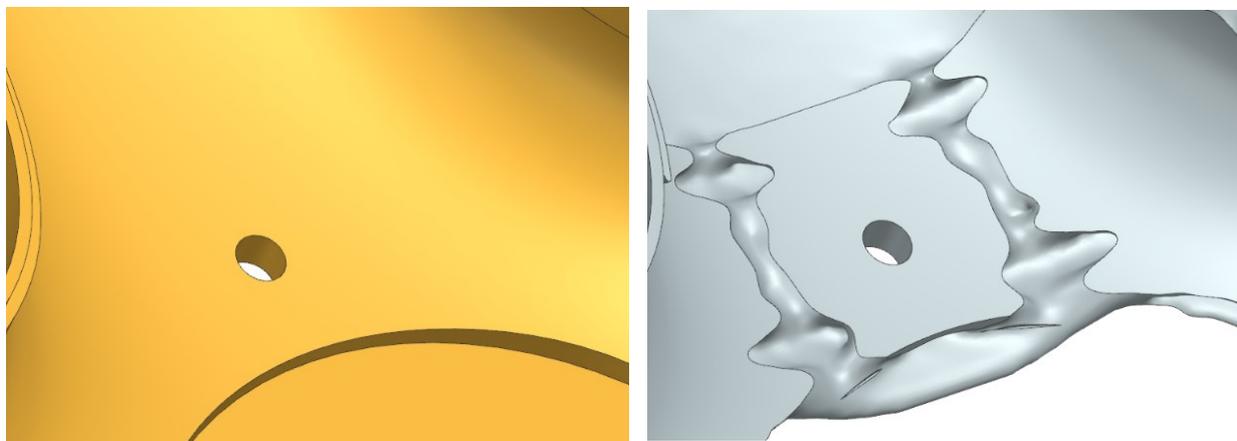
Infine, acquisiti i risultati precedentemente rappresentati, si definiscono i modelli CAD effettivamente realizzabili come rappresentato nelle figure: 5.28 (b) e 5.31.



(a)

(b)

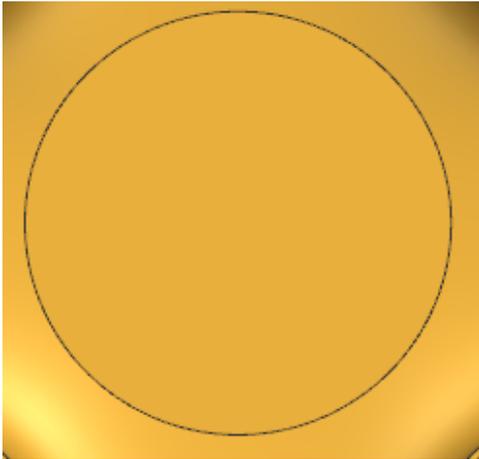
Figura 5.28: Telaio Superiore grezzo (a) ed ottimizzato (b)



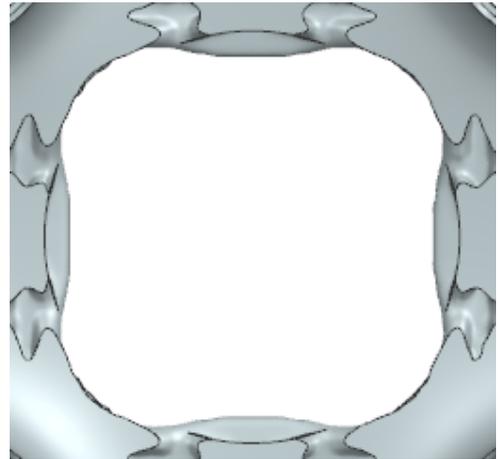
(a)

(b)

Figura 5.29: Dettaglio foro Telaio Superiore grezzo (a) ed ottimizzato (b)

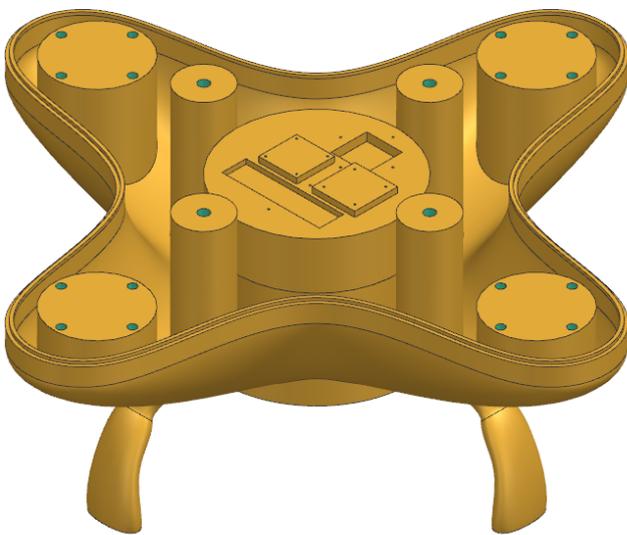


(a)

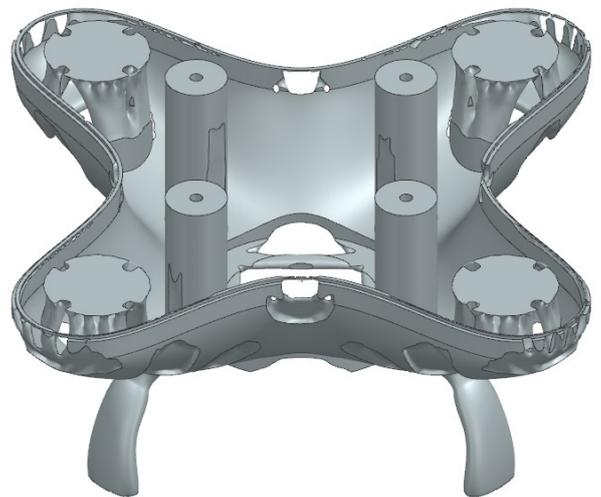


(b)

Figura 5.30: Dettaglio copertura Telaio Superiore grezzo (a) ed ottimizzato (b)



(a)



(b)

Figura 5.31: Telaio Inferiore grezzo (a) ed ottimizzato (b)

6. Problemi e risoluzioni

Durante il processo di Ottimizzazione Topologica è stato riscontrato un problema legato alla corretta realizzazione del modello come prodotto finito.

Tale fenomeno è determinato dalla risoluzione della parte analizzata, quindi il parametro che è stato variato è il *voxel* (Figura 6.1).

Il voxel (“*Volumetric Picture Element*”) è un’unità di misura del volume e rappresenta la controparte del pixel (elemento bidimensionale dell’unità dell’area). Ogni voxel è caratterizzato da valori numerici che descrivono le proprietà misurabili o variabili indipendenti.

L’aggregato dei voxel è una griglia tridimensionale regolare e discreta, che rappresenta il dato volumetrico.

La modellazione volumetrica rappresenta l’analisi e la manipolazione di oggetti campionati e calcolati in un dataset volumetrico.

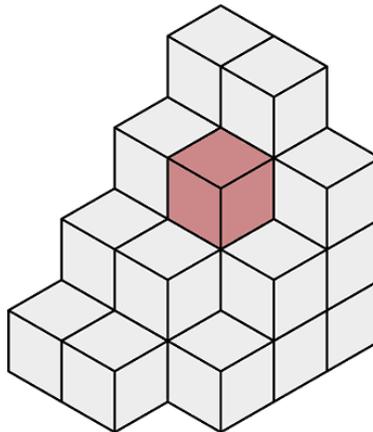


Figura 6.1: Voxel

La relazione che sussiste tra il voxel e la definizione della parte ottimizzata è inversamente proporzionale, di conseguenza riducendolo si ottiene un’ottimizzazione più accurata. Rispetto al tempo di elaborazione del modello in esame, si ha una proporzionalità diretta, di conseguenza maggiore è la definizione della parte, maggiore sarà il tempo complessivo per elaborarla. Il voxel può assumere una forma differente in base alle esigenze di rappresentazione e definizione, proprio come si evince dalla Figura 6.2 [30].

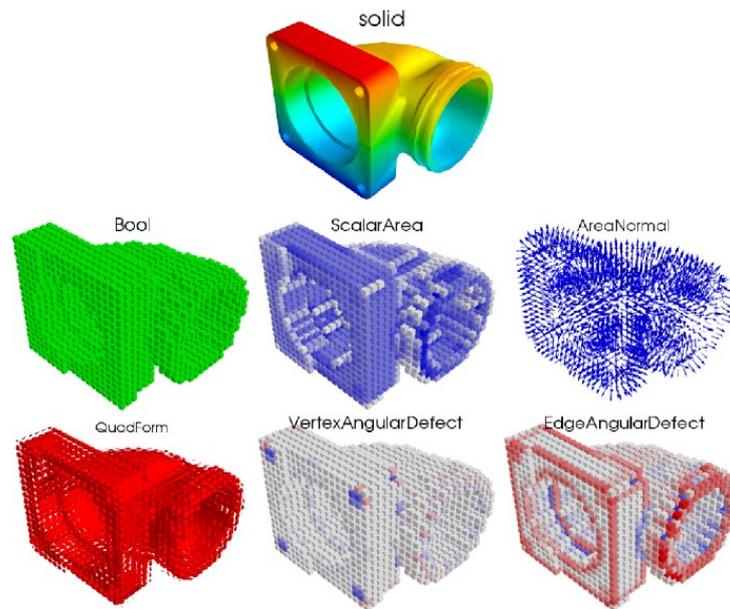


Figura 6.2: Varie discretizzazioni di modello 3D

In un caso studio di ottimizzazione del telaio, il programma ha evidenziato la presenza di “solidi disgiunti” (Figura 6.3). Ripetendo l’analisi con un aumento di risoluzione l’elemento si è unito al body principale (Figura 6.4).

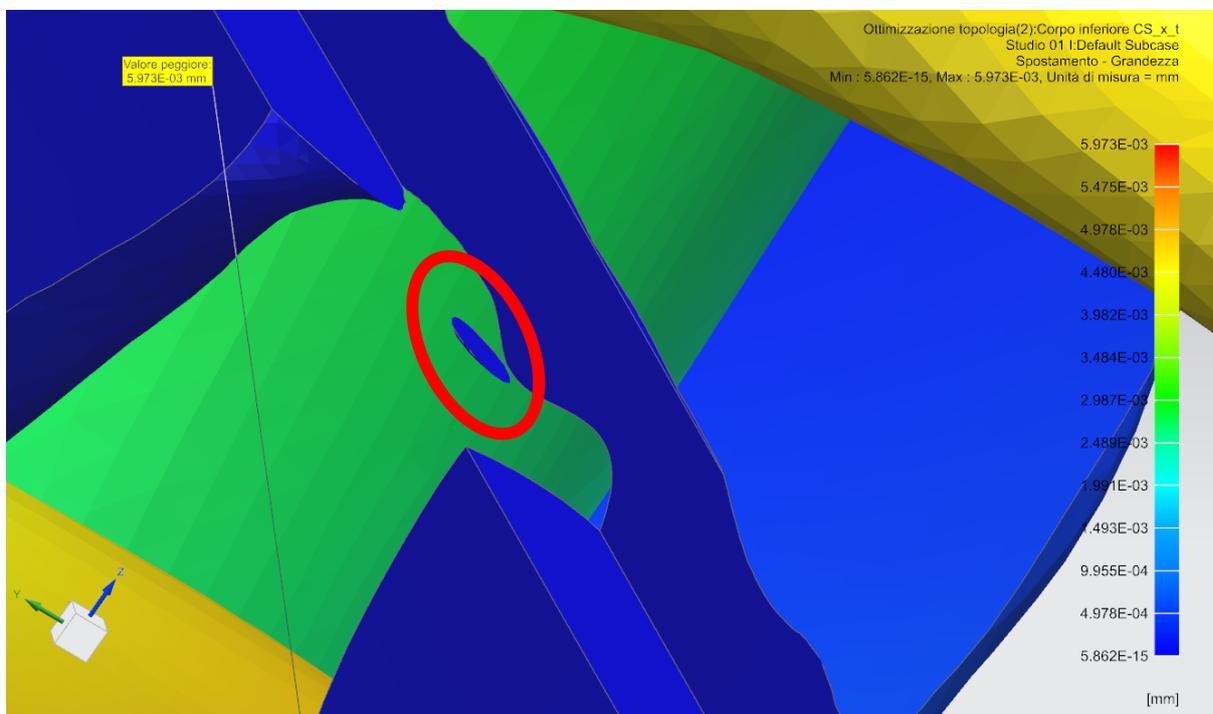


Figura 6.3: Elemento fluttuante nel Telaio Inferiore

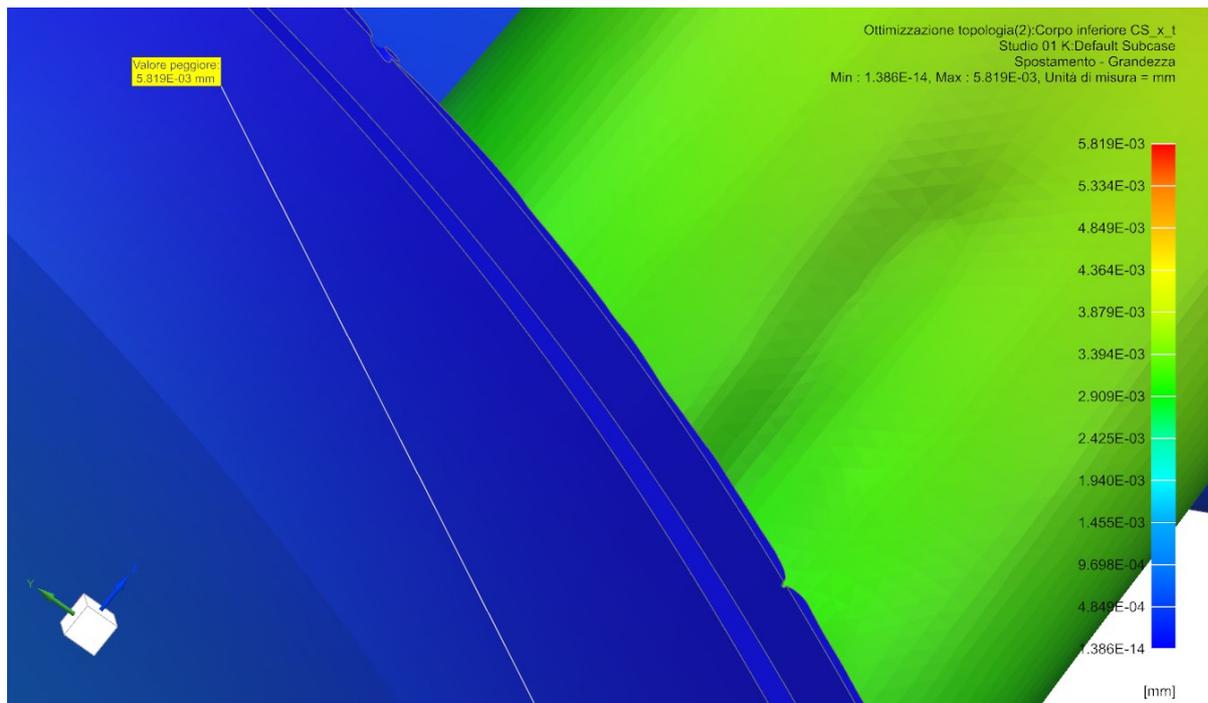


Figura 6.4: Risoluzione con ridefinizione della parte

Nell'analisi *FEM*, dopo aver assegnato la mesh tetraedrica al telaio, si sono verificati degli errori di rappresentazione di texture. In particolare, le zone maggiormente soggette ad errori erano situate sulle curvature del telaio e sul collegamento tra i piedini di sostegno del drone ed il corpo inferiore.

Per poter risolvere la presenza di errori, è stata modificata l'unità elementare del tetraedro: da "Tetra 10" con dimensione dell'elemento pari a 4 mm a "Tetra 4" con valore pari a 2 mm.

Diminuendo quindi la discretizzazione della mesh, le zone che presentavano una curvatura più accentuata sono state ridefinite senza errori.

7. Risultati e discussione

7.1 Settore progettuale

Attraverso i risultati ottenuti dal processo di Ottimizzazione Topologica, si può procedere alla realizzazione del modello mediante una stampa di tipo additivo.

Se da un lato questo tipo di approccio determina un elevato investimento per la produzione, dall'altro si va ad ammortizzare il costo di realizzazione con la forte riduzione di massa del telaio, soprattutto del corpo inferiore, determinando così vantaggi sotto vari aspetti, sia prestazionali che produttivi.

Il telaio, in particolare, ha una massa complessiva iniziale di 3,90 kg costituita da 3,2 kg per il telaio inferiore e circa 0,7 kg per quello superiore. Al termine dell'analisi di Ottimizzazione Topologica si può affermare che i prototipi iniziali dei telai, sottoposti ai carichi precedentemente definiti, hanno acquisito una struttura ottimale pur avendo imposto dei vincoli di massa necessari a ridurre l'utilizzo di ABS. La quantità è stata ridotta di circa il 50% e ciò non ha influito sulle caratteristiche strutturali del frame.

Il telaio superiore, in particolare, ha ridotto il suo spostamento massimo da 0,45 mm nella zona estrema (*Figure 5.9 e 5.10*) ad un valore di 0,02 mm che si evidenzia in prossimità degli alloggi per viti (*Figura 5.14*). La tensione massima del modello iniziale è pari a 2,29 MPa (*Figura 5.11*), mentre con nella parte ottimizzata ha un valore di 0,28 MPa (*Figura 5.15*). Le condizioni a rottura, invece, implicano uno spostamento massimo di 1,1 mm (*Figura 5.24*) e una tensione massima di 13,78 MPa (*Figura 5.25*).

Il telaio inferiore ha uno spostamento massimo iniziale pari a 0,05 mm (*Figura 5.17*), mentre nel processo di ottimizzazione ha raggiunto il valore alla base di $5,8 \times 10^{-3}$ mm (*Figura 5.22*), che risulta essere un valore plausibile avendo imposto nell'analisi FEM il vincolo proprio nell'area sottostante (*Figura 5.16*). La tensione massima che lo sollecita nel caso iniziale corrisponde a 0,94 MPa (*Figura 5.19*) mentre nel modello ottimizzato ha un valore di 0,09 MPa (*Figura 5.23*).

Le condizioni a rottura implicano uno spostamento pari a circa 0,07 mm (*Figura 5.26*) e una tensione massima pari a 1,1 MPa (*Figura 5.27*).

7.2 Ambito economico

A livello economico è possibile definire un'approssimazione del costo di realizzazione delle parti che definiscono il telaio completo. Attraverso il software "Protolabs" è possibile conoscere il costo relativo alla realizzazione della parte da stampare in 3D attraverso il caricamento del file CAD in vari formati come ad esempio *Parasolid, Step, IGES*. Attraverso il simulatore di preventivi dell'azienda "Hubs" [36] è stato possibile individuare la tecnologia migliore per la realizzazione del telaio del drone. Mediante un'analisi del frame del drone, il software ha consigliato come tecnologia di lavorazione *CNC*, ovvero una macchina a controllo numerico che elaborava la parte fino ad ottenere la geometria del modello *CAD*. Nella *Figura 7.1* viene mostrato il costo di realizzazione delle due parti che compongono il telaio.

 <p>View DFM analysis</p> <p>Corpo superiore.stp 486.7 × 486.7 × 62.5 mm 741,843.519 mm³</p>	<p>CNC machining ABS As machined (Ra 3.2µm / Ra 126µin) Color: Black No part markings General tolerance: ISO 2768 Medium No tighter tolerances Sharp internal corners rounded to 2 mm No fits No threads</p>	<p>1</p> <p>€1,842.81 €1,842.81 p/part</p>
 <p>View DFM analysis</p> <p>Corpo inferiore.stp 486.7 × 486.7 × 187.0 mm 3,279,419.691 mm³</p>	<p>CNC machining ABS As machined (Ra 3.2µm / Ra 126µin) Color: Black No part markings General tolerance: ISO 2768 Medium No tighter tolerances Sharp internal corners rounded to 2 mm No fits No threads</p>	<p>1</p> <p>€4,207.30 €4,207.30 p/part</p>

Figura 7.1: Preventivo costi di realizzazione telai grezzi

Successivamente, sono stati valutati i costi relativi ai telai ottimizzati mantenendo gli stessi parametri di stampaggio e considerando ABS bianco come nella simulazione precedente. Sono stati ottenuti i valori definiti nella *Figura 7.2*.

	Corpo superiore CS_x_t_OTT.igs 1573-9333-001	1.848,36 € Quantità 1
Resina simil ABS Bianco Risoluzione standard Standard Stereolitografia X: 486.72mm Y: 486.72mm Z: 62.47mm		Per Pezzo 1.848,36 €
<input type="button" value="Opzioni"/>		
	Corpo inferiore CS_x_t_OTT.igs 1802-1370-001	4.365,74 € Quantità 1
Resina simil ABS Bianco Risoluzione standard Standard Stereolitografia X: 486.72mm Y: 486.72mm Z: 187.03mm		Per Pezzo 4.365,74 €
<input type="button" value="Opzioni"/>		

Figura 7.2: Preventivo costi di realizzazione telai ottimizzati

Come si può osservare dalla simulazione di stampa dei modelli CAD, i processi di Ottimizzazione Topologica determinano una struttura differente del telaio iniziale caratterizzata da forte incremento di investimento. La stampa 3D può risultare economicamente sostenibile per la realizzazione di un numero limitato di esemplari.

7.3 Impatto ambientale

L'ABS è un materiale termoplastico ed un polimero amorfo, ovvero risulta fragile al di sotto della "temperatura di transizione vetrosa", mentre è viscoso al di sopra del "punto di scorrimento" [12]. Si distingue dai materiali plastici in quanto può essere fuso nella forma liquida, raffreddato e nuovamente riscaldato senza causare danni alla composizione chimica. Risulta essere il miglior materiale plastico termoindurente in quanto i materiali plastici solitamente possono essere riscaldati una sola volta: durante i processi di stampa.

Quando le materie plastiche termoindurenti vengono riscaldate subiscono un cambiamento chimico che non può essere invertito. Inoltre, si rischia di bruciarle facilmente. I materiali termoplastici, invece, possono diventare nuovamente liquidi e quindi essere rigenerati. La proprietà di poter riscaldare ripetutamente l'ABS, lo rende ottimo per il riciclaggio [31] [32].

Il processo principale per la fase di riciclo è l'emulsione. Tale metodo viene definito come la miscelazione di più materiali che non si mescolano in maniera particolare, ma si uniscono come un unico prodotto. Il processo è brevettato e prende il nome di *"Polimerizzazione di massa continua"*.

Inoltre, non è un materiale tossico, infatti, viene spesso utilizzato per realizzare prodotti per l'infanzia. Tuttavia, non viene impiegato per la realizzazione di impianti medici [36].

Generalmente le temperature di esercizio oscillano da -20 °C a 80 °C. L'ABS risulta infiammabile se esposto a temperature elevate, infatti, il polimero si scioglie ed entra in ebollizione rilasciando gas tossici.

Quando raggiunge una temperatura di oltre 400 °C, può decomporsi nei monomeri che lo costituiscono: butadiene (cancerogeno per l'uomo), acrilonitrile (rischio elevato per l'uomo) e stirene [33]. Di norma non viene definito né tossico e né cancerogeno. La sua pericolosità è strettamente legata ai fumi che sprigiona durante il processo di alta combustione [37].

Inoltre, è necessario tenere in considerazione la batteria Li-Po che viene impiegata nel funzionamento del drone. L'attenzione particolare verte sulla relazione che intercorre tra la quantità di materiale impiegato nel telaio e la durata della batteria nel funzionamento.

Il telaio non ottimizzato ha una massa complessiva di 3,9 kg mentre il risultato ottenuto dall'Ottimizzazione Topologica risulta essere pari a 2,15 kg. Sapendo che le batterie Li-Po hanno in media un ciclo di vita pari a 300 ricariche circa e considerando che in media l'autonomia di volo di una batteria per una ricarica è di circa 15 minuti, si avrà una durata complessiva di circa 4500 minuti. Avendo un carico dimezzato,

ricavato dall'ottimizzazione, la durata raddoppia a circa 9000 minuti. Si va a limitare, quindi, il consumo di batterie Li-Po determinando anche un risparmio economico, oltre che ambientale [23].

8. Conclusioni

La finalità del caso studio sviluppato è quella di individuare la tecnologia migliore per la realizzazione e produzione del telaio del drone preso in analisi. Per poter eseguire tali considerazioni è stato utilizzato il software Siemens NX, in particolare le analisi FEM e l'Ottimizzazione Topologica sono state eseguite mediante l'utilizzo del solutore "Simcenter Nastran".

Sottoponendo il modello a delle forze che simulavano lo stress dinamico della componentistica principale che un drone deve possedere è stato possibile analizzare gli spostamenti e le relative deformazioni della parte in esame.

Inoltre, eseguendo le medesime analisi, stressando la parte con dei carichi di sollecitazione massimi a rottura, si è garantito il rispetto delle prerogative meccaniche, pur avendo ridotto notevolmente il materiale.

Quindi se da un lato si ha un notevole investimento economico per la realizzazione della struttura del frame e per l'acquisto dei componenti, dall'altro, però, si ha un ammortamento sulla durabilità complessiva dei singoli accessori. Ad esempio, una batteria per droni ha un'autonomia di volo che varia in base allo stress aerodinamico al quale si sottopone il quadricottero. In media il tempo di volo è di circa 15 minuti. Partendo da un telaio grezzo avente una massa di 3,9 kg ed ottenendo un modello ottimizzato con un valore pari a 2,15 kg è possibile concludere che una batteria Li-Po con 4500 minuti complessivi (300 cicli di ricarica) riesce a raddoppiare il suo ciclo vita arrivando ad un valore di circa 9000 minuti.

In conclusione, mediante l'analisi di Ottimizzazione Topologica si giunge ad un dimezzamento di quantità di ABS e allo stesso tempo si garantisce una maggiore resa sia economica, sia ambientale, in quanto, per le prerogative definite precedentemente, si consumerà un numero dimezzato di batterie Li-Po. Si garantirà, di conseguenza, un risparmio da un punto di vista economico ed una maggiore sostenibilità ambientale.

Il lavoro di tesi potrebbe essere ulteriormente implementato, ad esempio con uno sviluppo legato non solo alla quantità di materiale necessario al telaio, ma anche in merito a forme differenti mantenendo lo stesso quantitativo di ABS.

9. Webgrafia

- [1] www.elmec.com
- [2] www.3d4growth.com
- [3] www.CIMdata.com
- [4] www.sigmaingegneria.com
- [5] www.solidedge.siemens.com
- [6] www.solidworks.com
- [7] www.3dnatives.com
- [8] www.3dwasp.com
- [9] www.materialise.com
- [10] www.shapingbits.com
- [11] www.protoreal.it
- [12] www.wikipedia.org
- [13] www.3ds.com
- [14] www.formlabs.com
- [15] www.ptc.com
- [16] www.meccanicaneews.com
- [17] www.roboze.com
- [18] www.drone24hours.com
- [19] www.droni.it
- [20] www.immervision.com
- [21] www.getfpv.com

- [22] www.myracingdrone.com
- [23] www.drones-camera.com
- [24] <https://techso.ca/en/additive-subtractive-manufacturing/>
- [25] www.gemmeplast.com
- [26] www.protolabs.com
- [27] www.xometry.eu/it/
- [28] www.plm.automation.siemens.com/global/it/products/simcenter/
- [29] www.cadexchanger.com
- [30] www.semanticscholar.org
- [31] www.plasticcollectors.com
- [32] www.plastmagazine.it/abs-acrilonitrile-butadiene-stirene/
- [33] www.ciceridemonde.it
- [34] www.ingegneria360gradi.it
- [35] www.tecno-plastic.it
- [36] www.hubs.com

