

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea



PROGETTAZIONE PER ADDITIVE MANUFACTURING E PRODUZIONE DI UNA MASTRA PER IL TIMONE DI UNA BARCA A VELA

Relatore:

Prof. Luca Iuliano

Candidato:

Francesco De Nicolò

Luglio 2019

Indice

Abstract	6
Introduzione	8
La tecnologia Additive Manufacturing	13
Vantaggi della fabbricazione additiva.....	17
Le tecnologie di fabbricazione additiva.....	20
Tecnologia di fusione a letto di polvere di metallo con fonte termica laser (LPBF).....	22
Parametri di processo della tecnologia LPBF.....	24
La tecnologia LPBF di Renishaw e sistemi RenAM500	27
Chi è Renishaw?.....	27
Il processo di Laser Powder Bed Fusion di Renishaw.....	27
Sistema RenAM 500M per la produzione additiva.....	33
Il materiale: la superlega Inconel 625.....	40
Progettazione del design space iniziale	43
L'ottimizzazione topologica	49
Cos'è e come funziona.....	49
Il software utilizzato: solidThinking Inspire.....	51
Step preparativi al modello per le simulazioni di ottimizzazione topologica.....	54
Simulazioni di ottimizzazione topologica e risultati.....	66
Creazione delle Nurbs.....	71
Analisi delle sollecitazioni.....	76
Fase di Industrializzazione	79
Il software utilizzato: QuantAM Renishaw.....	79
Considerazioni preliminari su orientamento e stress residui.....	80
Realizzazione delle strutture supportanti.....	83
Fasi di gestione del layout e slicing.....	87
Fabbricazione della mastra	89
Conclusioni e sviluppi futuri	93
Bibliografia	95
Ringraziamenti	98

Indice delle figure

Figura 1: Numen, barca a vela del PoliTO Sailing Team [14]	9
Figura 2: Schema di una barca a vela con componenti.....	10
Figura 3: Evoluzione e sviluppo dell'AM [21]	14
Figura 4: Esempio di deformazione [21]	15
Figura 5: Come l'orientamento influenza lo slicing [21]	16
Figura 6: Workflow dal modello Cad alla macchina [9]	17
Figura 7: Confronto fra AM e le tecnologie convenzionali considerando la variazione dei costi in funzione della complessità del componente da realizzare [21]	18
Figura 8: Esempio di ottimizzazione topologica [9].....	19
Figura 9: Esempio di struttura lattice [4].....	19
Figura 10a: Scambiatore di calore ad alta efficienza; Figura 10b: Stampo con canali di raffreddamento conformali [5].....	20
Figura 11: Illustrazione del processo di fusione a letto di polvere a sorgente laser (LPBF) [3].....	23
Figura 12: Strategie generali di fusione impiegate nelle tecniche LPBF [3].....	25
Figura 13: Schema del processo Laser Powder Bed Fusion di Renishaw [9].....	28
Figura 14: La scansione laser continua (a sinistra) prevede una serie di linee di scansione sovrapposte, ciascuna formata con il laser in funzione continuamente. La scansione modulata (a destra) ottiene lo stesso effetto utilizzando una serie di esposizioni [9].....	29
Figura 15: Punto focale del raggio laser [10]	30
Figura 16: Punto focale a coordinata zero, positivo e negativo [10]	30
Figura 17: Point distance [10].....	31
Figura 18: Hatch distance [10]	31
Figura 19: La potenza del laser in funzione della velocità di scansione; come variano i risultati del processo in base ai parametri scelti [10].....	32
Figura 20: Macchina per la produzione additiva RenAM500M [11]	33
Figura 21: Camera di processo [9].....	34
Figura 22: Ciclo di inertizzazione della camera [9].....	35
Figura 23: Parte anteriore della RenAM500M con il portellone sinistro aperto [11].....	35
Figura 24: Setaccio ad ultrasuoni Renishaw [11]	37
Figura 25: Ciclo di trasferimento pneumatico della polvere [11].....	38
Figura 26: Filtri per l'argon [11]	39
Figura 27: Interfaccia grafica di RenAMP [11].....	40
Figura 28: Tavola Cad del timone della barca Numen del PoliTO Sailing Team	44
Figura 29: Tavola Cad del sistema timone con attacchi della barca Numen del PoliTO Sailing Team.....	44
Figura 30: Foto della parte posteriore della barca con gli agugliotti in evidenza	45
Figura 31: Rappresentazione Cad 3D e parte della messa in tavola in 2D del design space iniziale.....	46
Figura 32: Configurazione verticale (a sinistra) del timone e orizzontale (a destra).....	47
Figura 33: I 3 fori con quote da realizzare sul timone con le macchine utensili.....	47
Figura 34: Scheda tecnica del perno removibile con spina di estrazione [22].....	48
Figura 35: Flow chart tipico dell'ottimizzazione topologica [23].....	51
Figura 36: Logo del software di ottimizzazione solidThinking Inspire [16]	51
Figura 37: Esempio di PolyNurbs [16].....	53
Figura 38: Design space iniziale importato in solidThinking Inspire	54
Figura 39: Creazione del materiale personalizzato Inconel 625	55
Figura 40: Sedi per viti e perni che costituiscono la zona di non design space	56
Figura 41: In giallo la zona di design space; in grigio quella di non design space	56
Figura 42: Supporti per i fori di fissaggio della barra alla mastra	57
Figura 43: Supporti per i fori in cui passano gli agugliotti	57
Figura 44: Forze applicate sul timone di una barca a vela [24]	59

Figura 45: Quote del centro delle pressioni	59
Figura 46: Forza di lift e drag collegate ai fori di vite di fissaggio e perno rimovibile con dei connettori...	60
Figura 47: Load Case 1, aggiunta della forza peso del timone in giallo	61
Figura 48: Load Case 2 comprendente solamente la forza peso del timone in posizione orizzontale	62
Figura 49: Piano di simmetria scelto come vincolo di forma	63
Figura 50: Superfici a sbalzo e superfici autosupportanti [18]	64
Figura 51: I 2 piani di crescita utilizzati per le prove iterative di simulazione di ottimizzazione topologica	65
Figura 52: Risultati analisi delle sollecitazioni del design preliminare	65
Figura 53: Finestre di impostazione dell'ottimizzazione topologica con l'obiettivo di massimizzare la rigidezza (a sinistra) e minimizzare la massa (a destra).....	66
Figura 54: Simulazione di ottimizzazione topologica con obiettivo di minimizzare la massa	67
Figura 55: Simulazione di ottimizzazione topologica con obiettivo di massimizzare la rigidezza.....	68
Figura 56: Risultati analisi delle sollecitazioni per la soluzione di ottimizzazione minimizzante la massa; a sinistra la rappresentazione grafica dello spostamento massimo; a destra quella relativa al fattore di sicurezza	69
Figura 57: Risultati analisi delle sollecitazioni per la soluzione di ottimizzazione massimizzante la rigidezza;a sinistra la rappresentazione grafica dello spostamento massimo; a destra quella relativa al fattore di sicurezza.....	70
Figura 58: Realizzazione di una prima Nurbs con una patch in evidenza	72
Figura 59: Realizzazione delle Nurbs seguendo il profilo del risultato definito dall'ottimizzazione.....	72
Figura 60: Nurbs aggiunte per poter collegare il profilo ottimale alla boccola superiore.....	73
Figura 61: Creazione e modellazione di superfici in prossimità delle zone di non design space	74
Figura 62: Creazione e modellazione delle superfici in prossimità dei fori di fissaggio per la barra del timone	74
Figura 63: Geometria finale e definitiva della mastra	75
Figura 64: Confronto fra la geometria Nurbs e il profilo di ottimizzazione consigliato dal Inspire	75
Figura 65: Risultati dell'analisi delle sollecitazioni focalizzata sul fattore di sicurezza	76
Figura 66: Risultati dell'analisi delle sollecitazioni focalizzata sullo spostamento massimo	77
Figura 67: Assieme su Solidworks costituito da barra, mastra ottimizzata e timone; a sinistra il caso di timone in posizione verticale, mentre a destra il caso di timone in posizione orizzontale	78
Figura 68: Orientamento di crescita scelto del componente sulla piastra	81
Figura 69: A sinistra la fusione laser di un nuovo strato di polvere; il calore si diffonde nella struttura solida sottostante; a destra lo strato di metallo che una volta solidificato, si contrae e provoca delle forze di taglio con quello sottostante [18].....	82
Figura 70: Deformazioni dovute alle tensioni residue [18]	82
Figura 71: Screen dal software QuantAM; vista dal basso della mastra, evidenziante in rosso le zone che necessitano di supporti.....	83
Figura 72: Di colore grigio scuro i supporti secondari generati automaticamente in QuantAM Renishaw..	85
Figura 73: Le tre strutture supportanti primarie progettate su Solidworks	85
Figura 74: Supporti primari e secondari utilizzati per produrre la mastra	86
Figura 75: Fase di gestione del layout in QuantAM Renishaw	87
Figura 76: Fase di slicing e monitoraggio della fusione del laser layer per layer	88
Figura 77: Inserimento della lama in silicone all'interno del recoater [11].....	89
Figura 78: Risultato ottenuto dalla lavorazione; foto scattata con il build all'interno della camera di processo. Si nota sul soffitto della camera la finestra protettiva del sistema di ottiche	90
Figura 79: Interno della camera di processo aperta con il componente con supporti sulla piastra	91
Figura 80: Foto del componente dopo aver subito la post-lavorazione di sabbiatura.....	92

Indice delle tabelle

Tabella 1: Dati generali sulla lega Inconel 625	41
Tabella 2: Proprietà meccaniche della lega Inconel 625 riferite a componenti fabbricati in maniera additiva usando uno spessore dei layer di 30 μm	41
Tabella 3: Parametri e scelte progettuali di vincolo utilizzate per l'ottimizzazione minimizzante la massa. 68	
Tabella 4: Parametri e scelte progettuali di vincolo utilizzate per l'ottimizzazione massimizzante la rigidezza	69
Tabella 5: Valori di massa, spostamento massimo e fattore di sicurezza relativi alla soluzione minimizzante la massa	70
Tabella 6: Valori di massa, spostamento massimo e fattore di sicurezza relativi alla soluzione massimizzante la rigidezza	70
Tabella 7: Riassunto tabellare dei risultati significativi dell'analisi delle sollecitazioni condotta sul componente definitivo	77

Abstract

La grande e sempre più rapida diffusione delle tecnologie di fabbricazione additiva stanno modificando pian piano il modo di progettare. Grazie ad un semplice scambio di file è possibile infatti passare dal modello virtuale alla realizzazione fisica. La progettazione, in questo modo, si focalizza sul ciò che si vuole realizzare, indipendentemente da come verrà realizzato. Abbinando alla tecnologia additive l'ottimizzazione topologica, è possibile ottimizzare il design di un componente e adattarlo ad una determinata lega scelta, utilizzando solo il materiale di cui si ha bisogno ed eliminandolo dalle aree superflue, con lo scopo di renderlo leggero e resistente allo stesso tempo. Ciò è proprio ciò che è stato fatto in questo lavoro di tesi, il cui oggetto è una mastra per il timone di una barca a vela da competizione, che si è deciso di realizzare della lega Inconel 625. Si è iniziato, innanzitutto a progettare un design preliminare del componente su Solidworks, consultando le misure della barca da disegni tecnici e prendendole anche sul posto. In seguito si è passati alla vera e propria ottimizzazione topologica, utilizzando il software Inspire Solidthinking di Altair: si sono applicati i supporti, vincoli e carichi a cui è sottoposto realmente il componente e una volta eseguita l'ottimizzazione il software consiglia dove è necessario mettere la massa, mostrando una bozza di componente ottimizzato. Sono state effettuate parecchie simulazioni iterative, cambiando più parametri con l'obiettivo di massimizzare la rigidità e minimizzare la massa. Dopo aver confrontato varie soluzioni, si è scelta una configurazione che soddisfasse entrambi gli obiettivi. In seguito, si sono costruite le Polynurbs, una rappresentazione matematica di superfici, intorno alla configurazione consigliata da Inspire, ottenendo così una prima versione del prototipo. Quest'ultimo è stato sottoposto ad un'accurata analisi delle sollecitazioni, utilizzando sempre lo stesso software. Le parti della mastra, in cui il fattore di sicurezza risultava inferiore a 1,5, sono state ispessite. Così facendo si è terminata la progettazione e si è passati all'industrializzazione del componente, servendosi del software per la preparazione dei build QuantAM Renishaw. Si è stabilito l'orientamento con cui posizionare il componente sulla piastra di lavoro all'interno della macchina, si sono aggiunti i supporti, è stato effettuato lo slicing e una simulazione della fabbricazione che fornisce il tempo di costruzione virtuale. Alla fine, è stato creato il file macchina, caricato sulla stessa ed è stata avviata la lavorazione. Al termine di quest'ultima, il pezzo è stato rimosso dalla piastra e sottoposto ad una sabbiatura per ridurre i valori di rugosità e finitura superficiale. Alla fine

il risultato ottenuto è stato soddisfacente, in quanto è stato realizzato un componente dal peso di 1,2 kg, quindi, molto leggero, pure essendo l'Inconel 625 un materiale con alta densità, ma allo stesso tempo più performante, con ingombri minori, più ergonomico e con un design innovativo e accattivante.

Introduzione

I progettisti fino ad ora sono stati spesso costretti a scervellarsi davanti ad un pc per trovare il modo di realizzare modelli particolarmente complessi. Le loro scelte progettuali, inoltre, sono sempre state condizionate dalla tecnologia di produzione con la quale era prevista la fabbricazione di un determinato componente. Lo studio delle geometrie, in alcuni casi, ha avuto un ruolo addirittura marginale rispetto alla progettazione dei dispositivi utili alla realizzazione del componente. Le tecnologie additive manufacturing hanno cambiato le regole: oggi è possibile passare dal modello virtuale, il Cad, alla fabbricazione fisica dello stesso attraverso un semplice scambio di file. La “stampa 3d”, come viene definita in gergo, accorcia drasticamente i tempi di produzione, accelera così i tempi di sviluppo prodotto e messa sul mercato e contempla la quasi assenza di limiti di design per i progettisti. Questa nuova rivoluzionaria tecnologia è al servizio delle idee e di un nuovo metodo di progettazione focalizzato su ciò che si vuole realizzare, piuttosto che sul come realizzarlo.

La produzione additiva, dunque, apre a nuove possibilità, rendendo possibile la realizzazione di progetti di parti quasi ideali. Le forme possono essere organiche, le pareti possono essere più sottili e le strutture possono essere vuote o riempite con reticoli trabecolari. È possibile posizionare il materiale esattamente dove è necessario per soddisfare a pieno la funzione del componente, ed è possibile eliminarlo da aree in cui non lo è. Le parti possono essere multifunzionali in modo da eliminare i giunti e rendere i prodotti più compatti ed efficienti.

Un'altra grande qualità dell'additive manufacturing è quella di “riabilitare” materiali trascurati e considerati inadatti per determinate applicazioni, ad esempio per l'eccessivo peso, sfruttando a pieno la loro resistenza meccanica specifica. Adesso è possibile ottimizzare il design del pezzo per adattarlo ad una lega scelta, utilizzando solo la quantità di materiale di cui si ha bisogno. Scegliendo un materiale con un'alta resistenza meccanica specifica, qualunque sia la sua densità, è possibile realizzare una parte più leggera e piccola rispetto a farla con un materiale con densità, e dunque peso, inferiore [13].

Ciò che è stato realizzato con questo lavoro di tesi è esattamente questo, ed è stato l'obiettivo principale e al tempo stesso una grande sfida: creare un componente di una lega con un'elevata densità e peso come l'Inconel 625, ma al tempo stesso elevata resistenza meccanica specifica, e renderlo leggero come se fosse stato realizzato con una lega di

inferiore densità. In questo modo si sfruttano a pieno le caratteristiche di resistenza meccanica della lega, senza dover rinunciare alla leggerezza.

Il componente protagonista di questo lavoro di tesi è una mastra per il timone di Numen, una barca a vela da competizione del PoliTO Sailing Team (Figura 1).



Figura 1: Numen, barca a vela del PoliTO Sailing Team [14]

Si tratta di quel componente della barca in cui alloggia il timone: esso deve supportare, in primis, il timone, essendone solidale e permettendone i movimenti nel piano longitudinale alla barca, fondamentali per farla virare; inoltre, deve essere collegato alla barra del timone con cui il timoniere guida la barca. La Figura 2 illustra chiaramente la posizione del componente all'interno del complessivo: la lettera "d" indica la mastra.

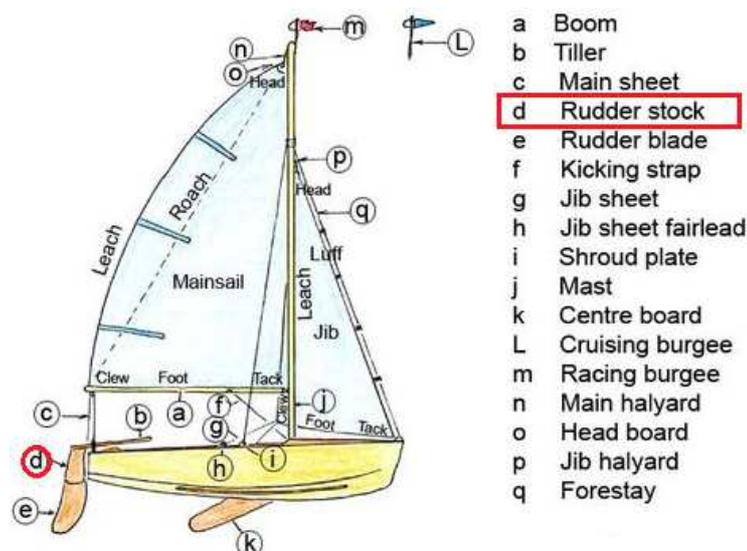


Figura 2: Schema di una barca a vela con componenti

Il Polito Sailing Team è il gruppo studentesco del Politecnico di Torino che svolge attività di progettazione, realizzazione e conduzione di prototipi di skiff, piccole imbarcazioni di classe R3 con scafo di lunghezza ridotta (4,60 m) ed ampia velatura. Nello svolgere il proprio lavoro, il Team si impegna nello sviluppo di soluzioni altamente innovative che garantiscano anche ottime prestazioni nelle competizioni veliche [14].

Questo lavoro di tesi nasce dal mio interesse personale per l'additive manufacturing, testimoniato dall'esperienza di tirocinio svolta nell'azienda Renishaw S.p.A. situata a Pianezza (TO), operante nel settore, e dall'esigenza del PoliTO Sailing Team di ottenere una mastra fabbricata con un materiale più resistente della precedente in lega di alluminio. Quest'ultima, infatti, si è rotta per fatica e perciò si è deciso di costruirne una nuova di un materiale molto più resistente come l'Inconel 625 e di ricorrere alle potenzialità della tecnologia additiva di Renishaw per renderla al tempo stesso leggera, caratteristica fondamentale per barche a vela da competizione.

Ciò è stato possibile grazie ad un approccio di progettazione diverso dal tradizionale basato sull'ottimizzazione topologica. Quest'ultima è una tecnica di simulazione al computer nella quale è possibile far convergere le caratteristiche essenziali del progetto in termini di volume di progetto, tecnologia produttiva, carichi, condizioni di funzionamento e obiettivi da raggiungere, che permette di sintetizzare una forma innovativa per il prodotto, identificando quelle zone del volume necessarie al raggiungimento del target, e

rimuovendo tutte le altre. Per far ciò è stato utilizzato il software Inspire Solidthinking di Altair Engineering.

Analizziamo, adesso, il workflow seguito, che verrà meglio approfondito nei prossimi capitoli. Innanzitutto, si è partiti prendendo sul posto le misure della parte posteriore della barca e grazie anche ai disegni tecnici forniti dal PoliTO Sailing Team, si sono definiti gli ingombri massimi occupabili dalla mastra. Successivamente è stato realizzato con il Cad Solidworks un volume di design space, ovvero quella parte che sarà poi modificata dal software di ottimizzazione topologica. In seguito con Inspire si sono applicati i carichi massimi, forniti dall'area fluidodinamica del PoliTO Sailing Team, i supporti e i vincoli ed è stata fatta un'analisi delle sollecitazioni sul design space preliminare. Lo step successivo è l'ottimizzazione topologica: è stato svolto un lavoro iterativo, facendo più simulazioni e variando più parametri, con l'obiettivo di massimizzare la rigidità e minimizzare la massa. Una volta scelta l'ottimizzazione che meglio soddisfa i requisiti di progetto, si è passati alla creazione delle Polynurbs, una rappresentazione matematica di superfici per definire accuratamente la forma del componente, seguendo l'ottimizzazione topologica consigliata dal software.

Il modello, così realizzato, è stato analizzato dal punto di vista delle sollecitazioni, applicando gli stessi supporti, vincoli e carichi dell'analisi fatta sul design space preliminare. Dei risultati ottenuti dall'analisi si ci è focalizzati soprattutto sul fattore di sicurezza e lo spostamento massimo: il primo indica le parti della struttura che più si avvicinano allo snervamento e il secondo lo scostamento massimo del componente in condizioni di carico massime. Le parti della mastra, il cui fattore di sicurezza risultasse inferiore a 1,5, sono state ispessite e si è ottenuta così il prototipo finale.

Conclusa la fase di progettazione, si è passati all'industrializzazione del componente. In questa fase è stato utilizzato il software QuantAM Renishaw, appositamente ideato da Renishaw per le sue macchine, e utile per la preparazione del build. Con esso, infatti, è possibile impostare orientamento del componente sulla piastra di lavoro, creare i supporti, effettuare lo slicing e simulare la fabbricazione della mastra, stimando il tempo di costruzione virtuale. Al termine della simulazione, si è creato il file macchina, successivamente caricato sulla stessa.

A questo punto è tutto pronto per la produzione del componente. La macchina utilizzata è RenAM500M, macchina a singolo laser, con ricircolo di polvere e sistema di setacciatura automatici, che sfrutta la tecnologia di fusione del laser su letto di polvere (LPBF).

Al termine della lavorazione, sono stati rimossi i supporti e il componente ha subito una sabbiatura per migliorare la finitura superficiale e ridurre ulteriormente i valori di rugosità.

Complessivamente, il risultato ottenuto è stato molto soddisfacente, in quanto la mastra pesa solamente poco meno di 1,2 kg, ma al tempo stesso ha caratteristiche meccaniche elevate, poiché è stata realizzata con una lega più performante e prestante. In aggiunta a ciò, è da evidenziare anche la componente estetica: la mastra ha forme e geometrie nuove e accattivanti, fattore non di poco conto in un mercato sempre alla ricerca del nuovo e del diverso.

Capitolo 1

La tecnologia Additive Manufacturing

L'additive manufacturing o fabbricazione additiva è una tecnologia innovativa che permette la produzione, in poche ore, e senza l'utilizzo di utensili, di oggetti di geometria anche molto complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD 3D.

Nata negli anni Ottanta da un brevetto dell'azienda statunitense 3D Systems, questa tecnologia è stata concepita per ridurre i tempi per la realizzazione dei prototipi e per molti anni ha assunto il nome di "Prototipazione Rapida". Inizialmente era riferita soprattutto ai materiali come resine termoidurenti e in seguito termoplastiche, ma col tempo si sono susseguite numerose tecniche di fabbricazione che hanno portato alla realizzazione di prodotti finiti, estendendosi anche al campo dei metalli. Negli ultimi anni questa tecnologia ha subito un'evoluzione (Fig. 3) ed una crescita esponenziale, grazie alle costanti innovazioni tecnologiche che hanno portato alla diffusione di macchine per la fabbricazione additiva sempre più all'avanguardia e sempre più focalizzate sull'aumento della produttività e della qualità del prodotto. Questi progressi e la grande potenzialità di questa tecnologia hanno esteso il campo di applicazione, che in passato era rilegato solamente alla prototipazione: si è passati rapidamente alle applicazioni per stampi e attrezzature di fusione, alla produzione preserie fino ad arrivare alla produzione di pezzi definitivi in campo aerospace, automotive, biomedicale e altri campi di minor rilievo che ultimamente si stanno avvicinando con questa nuova tecnologia.

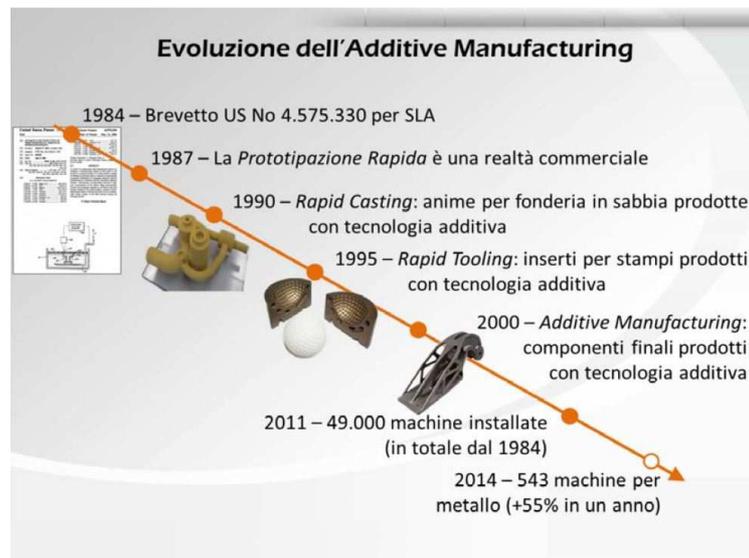


Figura 3: Evoluzione e sviluppo dell'AM [21]

ASTM ha definito AM come "un processo di unione di materiali per creare oggetti da un modello 3D di dati, di solito strato su strato, al contrario di metodologie di produzione sottrattiva " [2]. La fabbricazione additiva, infatti, si basa sulla realizzazione di un componente strato per strato e dunque "aggiungendo" del materiale. Tali strati rappresentano le sezioni trasversali del componente e teoricamente e a livello digitale hanno uno spessore infinitesimo ma nella realtà avranno uno spessore definito che influenzerà le caratteristiche superficiali del pezzo, come rugosità e tolleranze, e il tempo di costruzione dello stesso.

Come accennato in precedenza, condizione necessaria per la produzione di un componente mediante l'utilizzo dell'AM è quella di partire da un modello tridimensionale CAD. Passando, però, dal virtuale alla creazione del pezzo reale bisogna seguire alcuni step fondamentali:

1. Creazione o acquisizione di un modello CAD 3D;
2. Conversione del modello CAD di tipo solido (3D) in un modello tipo "Shell" in cui la superficie esterna è approssimata attraverso triangoli di diverse dimensioni in modo da seguire il profilo del modello. Si tratta dello Standard Triangulation Language (STL) ed è lo standard universale dell'AM. Questo formato pone molti problemi come intersezioni e gap fra triangoli, normali invertite etc... ma esistono degli opportuni software correttivi;

3. Manipolazione del file STL su dei software macchina specifici per l'AM come ad esempio Materialise Magics, che è universale per le macchine per AM, oppure QuantAM Renishaw, che verrà utilizzato per questo lavoro di tesi, specificatamente ideato da Renishaw per le proprie macchine per la fabbricazione additiva. In questa fase si stabilisce:
- l'orientamento del componente, e quindi determinare come dovrà crescere sulla piastra di lavoro fondamentale per la facilità e il tempo di costruzione;
 - i supporti, necessari per l'additive manufacturing in metallo, che hanno più funzioni: in primis supportare le parti sporgenti rispetto alla normale alla piastra di lavoro e permettere così la fabbricazione di sottosquadri. Per creare questo tipo di parti è necessario fondere dei layers leggermente più grandi rispetto ai precedenti, che crescerebbero così nel vuoto, senza alcun supporto sotto di loro. Quando i layers si raffreddano si restringono di una certa quantità, che porta, sommando più layers, a delle bruciature o, nel peggiore dei casi a deformazioni del componente rispetto alle dimensioni nominali (Fig. 4).



Figura 4: Esempio di deformazione [21]

I supporti, quindi, facilitano la crescita di parti sporgenti e sottosquadri, riducendo al minimo la possibilità di avere distorsioni. Inoltre, nella fabbricazione additiva riguardante i metalli hanno la fondamentale funzione di far dissipare il calore. La polvere metallica, infatti, a differenza del fuso, è isolante e ciò può provocare dei problemi di smaltimento del calore: un layer che sta fondendo raggiunge delle temperature molto più alte dei layers già creati e non riuscire a disperdere il calore, potrebbe portare alla

formazione di gradienti termici all'interno del componente e a conseguenti distorsioni. I supporti, in questo modo, sono quindi una via di fuga per il calore, indispensabili per evitare deformazioni;

- lo slicing, cioè l'affettamento virtuale del componente in layers. Il componente, in formato STL, viene intersecato da piani paralleli avente normale parallela all'asse z, e distanti di una quantità Δz . Le sezioni così create sono poi effettivamente quelle usate dalla macchina per la fabbricazione del componente. Molto importante è aver orientato il pezzo all'inizio in maniera corretta, in modo tale da ridurre il numero di sezioni da creare e di conseguenza il tempo di costruzione (Fig. 5).

L'altezza dei layers è uno dei parametri fondamentali del processo, di cui si parlerà in maniera più approfondita in seguito.

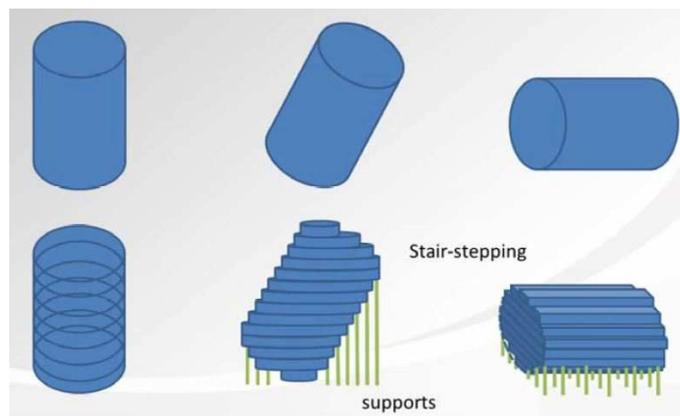


Figura 5: Come l'orientamento influenza lo slicing [21]

4. Creazione del build file MTT, cioè il file che viene effettivamente caricato in macchina. Le operazioni descritte nei punti 3 e 4 sono effettuate tutte grazie al software QuantAM Renishaw, che è stato utilizzato in questo lavoro di tesi per l'industrializzazione della mastra. In Fig. 6 è mostrato il workflow completo.

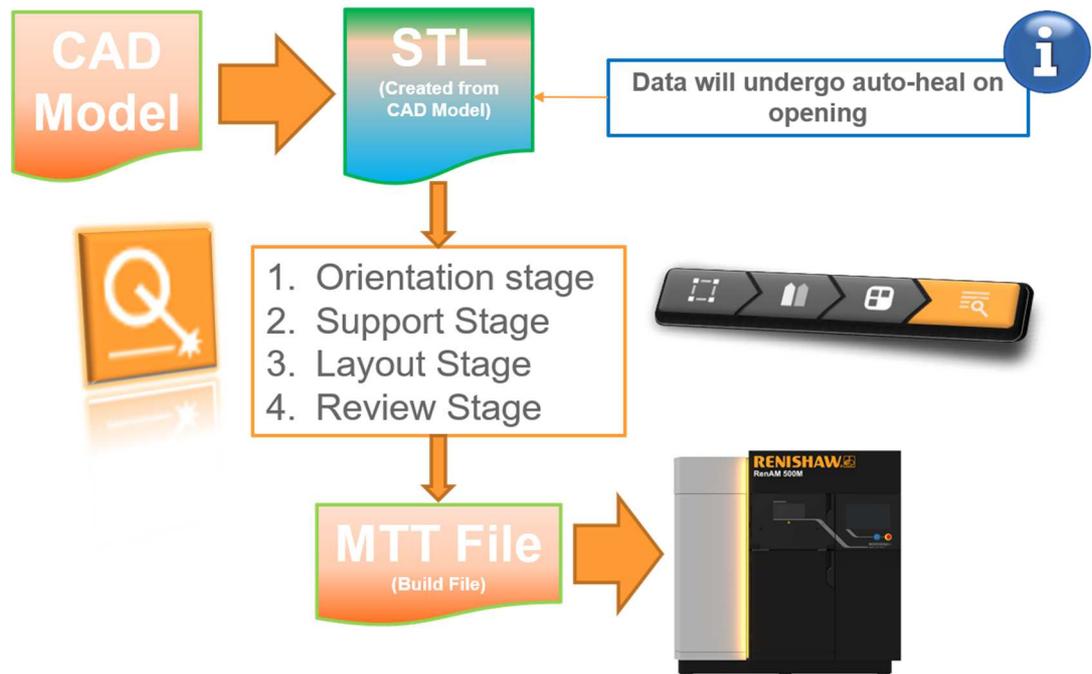


Figura 6: Workflow dal modello Cad alla macchina [9]

5. Costruzione fisica del componente stato per strato
6. Estrazione del build
7. Operazioni di post processo come la pulizia del componente dalla polvere in eccesso, la rimozione meccanica dei supporti ed eventuali lavorazioni superficiali e/o trattamenti termici di distensione

Vantaggi della fabbricazione additiva

Come accennato in precedenza, l'additive manufacturing ha avuto uno sviluppo esponenziale nell'ultimo ventennio e ciò è dovuto principalmente ai numerosi vantaggi che questa nuova tecnologia ha apportato, sia dal punto di vista del prodotto che del processo.

Per quanto riguarda il processo, esso si riduce ad un unico step produttivo che avviene tutto su una stessa macchina, senza spostarsi da una cella all'altra di lavorazione e dunque ottimizzando i tempi di realizzazione. Il processo, inoltre, non necessita ne di attrezzature, ne di sistemi di bloccaggio ed è previsto solamente un minimo intervento da parte dell'operatore nelle fasi di preparazione della macchina e di rimozione e pulitura del build una volta terminato. I tempi e costi del processo sono legati solamente alla dimensione del

componente da realizzare e dal numero di componenti presenti sulla piastra di lavoro: più la piastra è satura di pezzi maggiore sarà il tempo di costruzione. Quest'ultimo non dipende, quindi, dalla complessità del componente, le cui forme possono essere illimitate, ammettendo anche sottosquadri e dando così libero sfogo alla fantasia del progettista. Nel grafico di figura 7 è confrontata la tecnologia additive manufacturing con le tecniche di produzione convenzionali riguardo la variazione dei costi di produzione in funzione della complessità del componente.

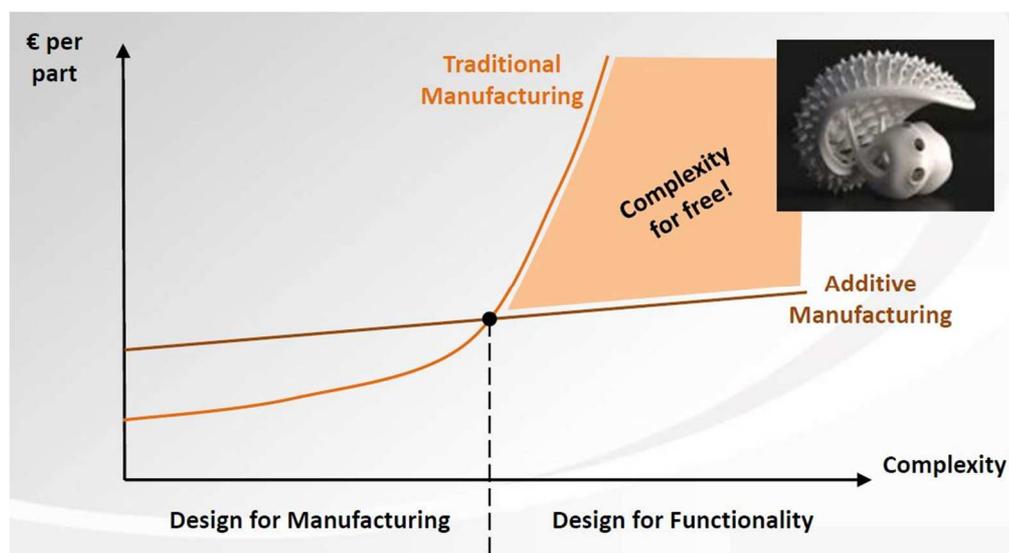


Figura 7: Confronto fra AM e le tecnologie convenzionali considerando la variazione dei costi in funzione della complessità del componente da realizzare [21]

Dal grafico si evince come la fabbricazione additiva sia una tecnologia particolarmente adatta per componenti molto complessi e per pezzi più semplici convenga utilizzare, da un punto di vista economico, le tecniche di produzione convenzionali. Ciò significa che in futuro l'additive manufacturing non sostituirà le tecnologie classiche, come molti erroneamente pensano, ma sarà complementare a quest'ultime.

Dal punto di vista del prodotto, la fabbricazione additiva permette una totale libertà di progettazione, dando così spazio a geometrie particolari, forme innovative e dettagli interni dei componenti complessi che sono molto difficili da realizzare con le tecnologie convenzionali. Inoltre, è possibile realizzare strutture alleggerite mediante l'ottimizzazione topologica, cioè l'eliminazione sulla base di un algoritmo di parte della massa di un componente, che risulta scarica di sollecitazioni, ottenendo così strutture decisamente più

leggere e performanti (Fig. 8). Oppure, sempre con l'obiettivo di ridurre la massa, è possibile creare delle strutture trabecolari, come ad esempio le strutture lattice, cioè strutture create a partire da una cella elementare fino a riempire completamente una parte di componente (Fig. 9 [4]).

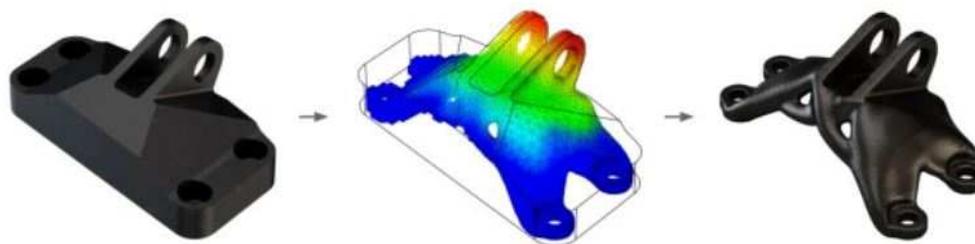


Figura 8: Esempio di ottimizzazione topologica [9]



Figura 9: Esempio di struttura lattice [4]

Inoltre, è possibile creare componenti ottimizzando lo scambio termico come ad esempio degli scambiatori di calore ad alta efficienza come quello mostrato in figura 10a [5], praticamente irrealizzabili con le tecnologie di produzione convenzionali. Un altro esempio di ottimizzazione dello scambio termico sono gli stampi a canali di raffreddamento conformi (Fig. 10b): grazie alla fabbricazione additiva, infatti, è possibile progettare dei layout di canali di raffreddamento geometricamente senza limiti e che riescano quindi a raggiungere il pezzo nelle parti più difficili da raffreddare, diminuendo in questo modo il tempo di raffreddamento, fase più lunga del processo di stampaggio ad iniezione.

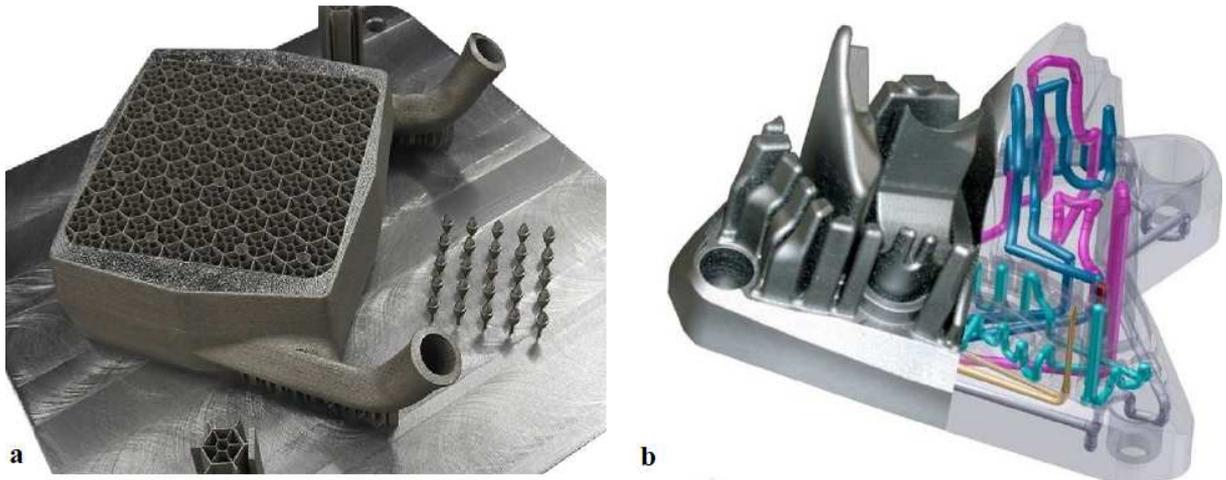


Figura 10a: Scambiatore di calore ad alta efficienza; Figura 10b: Stampo con canali di raffreddamento conformali [5]

Le tecnologie di fabbricazione additiva

Sebbene ai media piaccia utilizzare il termine “stampa 3D” come sinonimo di tutti i processi di produzione additiva, ci sono in realtà molti processi che variano fra loro nel modo di creare i layers. I singoli processi, infatti, varieranno sia nella tecnologia che nei materiali utilizzati. Per tale ragione, nel 2010, ASTM (American Society for Testing and Materials) ha classificato i processi di fabbricazione additiva in 7 categorie (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2012) [6]:

- *VAT Photopolymerization*: utilizza una vasca di resina fotopolimerica, dalla quale il modello viene costruito strato per strato. Una luce ultravioletta è utilizzata per indurire la resina dove richiesto, mentre una piattaforma muove il modello verso il basso gradualmente dopo che ogni strato è stato polimerizzato;
- *Material jetting*: crea oggetti in maniera simile ad una stampante a getto di inchiostro bidimensionale. Il materiale viene gettato su una piattaforma di costruzione, tramite un ugello che si muove orizzontalmente, in maniera continua o con un approccio Drop On Demand. Il materiale si solidifica sulla piattaforma, è indurito mediante una luce ultravioletta e il modello si crea strato per strato;

- *Binder jetting*: utilizza 2 materiali, di cui un legante e uno a base polvere. Il legante funge da adesivo tra gli strati di polvere. Una testina di stampa si muove orizzontalmente sul piano xy della macchina e deposita alternativamente strati di materiale e di legante. Layer dopo layer, la piattaforma di costruzione su cui giace il modello scende grazie ad un elevatore;
- *Material extrusion*: detto anche FDM (Fusion deposition model) è un processo di estrusione comune ed è un marchio commerciale della società Stratasys. Il materiale è depositato su una piattaforma mediante un ugello che si muove orizzontalmente sul piano xy. La piattaforma si muove lungo l'asse z, facendo scendere il modello, layer dopo layer. La particolarità è che l'ugello lavora a pressione costante e a flusso continuo: è fondamentale che i parametri di pressione e velocità siano mantenuti costanti durante il processo per poter ottenere risultati ottimali. Questa tecnologia è comunemente usata anche nelle stampanti 3D economiche e domestiche, utilizzate per hobby;
- *Powder bed fusion*: comprende le seguenti tecniche di stampa comunemente utilizzate come sinterizzazione laser diretta dei metalli (DMLS), fusione del fascio di elettroni (EBM), sinterizzazione selettiva del calore (SHS), fusione laser selettiva (SLM) e sinterizzazione laser selettiva (SLS). La tecnologia a letto di polvere usa un raggio laser (LPBF) oppure un fascio di elettroni (EBM) per fondere della polvere. Tutte le tecniche a letto di polvere (PBF) prevedono la stesura del materiale in polvere sullo strato precedente grazie ad un rullo o ad una lama. Un elevatore si sposta lungo l'asse z, facendo scendere layer dopo layer il modello giacente sulla piastra di lavoro. Una tramoggia o un serbatoio forniscono di volta in volta il materiale nuovo in polvere che successivamente la lama stende su tutta la piastra;
- *Sheet lamination*: comprende la fabbricazione additiva ultrasonica (UAM) e la produzione di oggetti laminati (LOM). Il processo di fabbricazione additiva ad ultrasuoni utilizza fogli o nastri di metallo, che vengono uniti insieme mediante saldatura ad ultrasuoni. LOM utilizza un approccio simile strato per strato, ma utilizza la carta come materiale e dell'adesivo per unire i fogli al posto della saldatura. Gli oggetti laminati prodotti sono utilizzati

spesso a scopo estetico e risultano poco adatti a quello strutturale. La tecnologia UAM prevede l'utilizzo di materiali metalli, tra i quali alluminio, rame, acciaio inox e titanio;

- *Direct Energy Deposition*: è un processo di stampa comunemente utilizzato per riparare o aggiungere materiale a componenti già esistenti. Una tipica macchina DED è costituita da un ugello montato su un braccio multiasse, che deposita il materiale fuso su una determinata superficie del componente e qui solidifica. Il processo è simile in linea di principio all'FDM, ma l'ugello può muoversi in qualsiasi direzione grazie alla macchina a 5 assi su cui è montato. Il materiale viene fuso durante la deposizione con un raggio laser o elettronico. Questo processo può essere utilizzato con materiali polimerici, ceramici, ma tipicamente è utilizzato con metalli. Applicazioni tipiche sono la riparazione di parti strutturali [3].

Tecnologia di fusione a letto di polvere di metallo con fonte termica laser (LPBF)

La tecnologia di AM con la quale è stata prodotta la mastra per il timone, oggetto di questo lavoro di tesi, è la fusione a letto di polvere di metallo e per tale ragione la si approfondisce in questo paragrafo.

La tecnologia di fusione a letto di polvere è stata tra le prime ad essere commercializzata. In figura 11 [3] è schematizzata la tecnica base, e tutti i processi di questo tipo si riferiscono a questo schema, modificando per aumentare la produttività, per adattarlo a diversi materiali, o per evitare specifiche caratteristiche brevettate. Tutti i processi di fusione a letto di polvere condividono delle caratteristiche di base comuni, tra cui una o più fonti termiche per permettere la fusione tra le particelle di polvere, un sistema per la gestione del laser

ed un sistema di alimentazione e stesura della polvere. Le fonti termiche più comuni per la tecnologia di fusione a letto di polvere sono i laser. I processi PBF che utilizzano il laser sono noti come sinterizzazione laser e sono applicabili sia alle polveri di materie plastiche che metalliche: la tecnologia è fondamentalmente simile ma le macchine sono decisamente

differenti e in questo lavoro di tesi verrà focalizzata l'attenzione sulla tecnica per metalli [3].

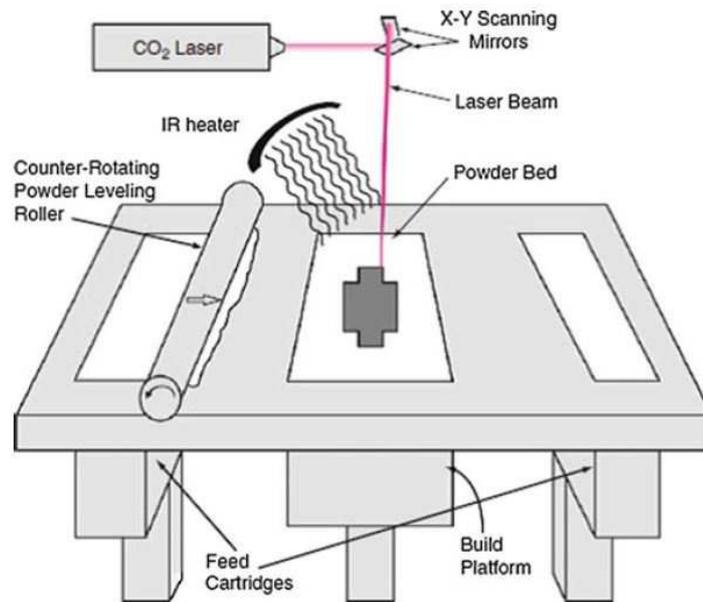


Figura 11: Illustrazione del processo di fusione a letto di polvere a sorgente laser (LPBF) [3]

Una macchina di fabbricazione additiva, che utilizza la tecnologia di fusione a letto di polvere metallica, è generalmente costituita da un laser con una potenza variabile dai 100 ai 500 W, un'unità ottica, gestita da un galvanometro, per deviare ed indirizzare il fascio laser in punti prescelti della piattaforma, uno scanner, una camera di lavoro in cui si realizza completamente il processo, un sistema di filtraggio a circolo inerte e, ovviamente, un computer per controllare e coordinare il tutto. La piastra di lavoro, su cui cresce il componente man mano che la lavorazione procede, è ancorata su un elevatore che trasla lungo l'asse z grazie ad un motore elettrico e permette al build di scendere gradualmente di uno spessore Δz pari a quello del layer, man mano che il laser termina di fondere una sezione. Un altro elemento fondamentale per il processo è il recoater, contenente una lama che può essere in acciaio o materiali ceramici ma anche di gomma o silicone. Il recoater, chiamato spesso anche wiper, si muove lungo tutta la piastra di lavoro nel piano xy e ha la funzione di stendere la polvere che arriva da un contenitore o silos di alimentazione. Oltre al silos, vi è un altro contenitore, solitamente anche 2, in cui viene raccolta la polvere in eccesso non fusa durante il processo e viene quasi tutta rimessa in circolo e riutilizzata.

Il silos fornisce la polvere metallica in piccole dosi; quest'ultima viene stesa in maniera uniforme su tutta la piastra di lavoro. Successivamente il raggio laser è indirizzato sul letto

di polvere ed è spostato e deviato dal sistema di ottiche, gestite dal galvanometro. La polvere colpita intanto fonde e si crea in questo modo la prima sezione dell'oggetto. Una volta terminato il layer, si attiva l'elevatore che fa abbassare la piattaforma di lavoro di una quantità pari allo spessore del layer e il ciclo di lavoro ricomincia fin quando la parte da realizzare non è completa.

L'intero processo deve avvenire in atmosfera di gas inerte, come azoto o argon, per ridurre al minimo l'ossidazione e la degradazione della polvere metallica; inoltre vi è un flusso di gas protettivi, durante la lavorazione che tiene lontani lapilli di polvere bruciata o altre particelle che potrebbero rovinare la zona di fusione inficiando la qualità del prodotto [3][7].

Parametri di processo della tecnologia LPBF

La tecnologia LPBF è considerata una delle più complesse da gestire per l'elevato numero di parametri di processo che possono influenzare il risultato finale del prodotto e possono causare l'insorgere di vari difetti che possono danneggiare sia le caratteristiche superficiali che meccaniche di un componente. I parametri di processo possono essere suddivisi in quattro principali categorie [3]:

- Parametri correlati al laser, come ad esempio potenza del laser, dimensione dello spot;
- Parametri relativi alla scansione, quali velocità di scansione, spaziatura di scansione e scan pattern;
- Parametri correlati alla polvere, come forma, dimensione e dimensione delle particelle, densità del letto di polvere, spessore dello strato, proprietà del materiale etc...;
- Parametri relativi alla temperatura, tra i quali temperatura del letto di polvere, del powder feeder.

Tutti questi parametri sono tra loro fortemente collegati e tra loro dipendenti e non è semplice gestirli tutti contemporaneamente e farli variare in maniera corretta. La potenza del laser richiesta, ad esempio, aumenta tipicamente quanto più è alto il punto di fusione del materiale e quanto più è bassa la temperatura del letto di polvere e varia, inoltre in base

alle caratteristiche di assorbimento del letto di polvere, che è influenzato a sua volta dal tipo di materiale, dalla sua densità e da forma e dimensione delle particelle di polvere.

Per quanto riguarda la scansione, questa è realizzata solitamente grazie alla presenza di 2 galvanometri, uno sull'asse x e uno su y, che permettono appunto al laser di "muoversi" su tutta la piastra di lavoro. La scansione si realizza spesso in 2 modalità: la modalità contorno e quella di riempimento come mostrato in figura 12 [3].

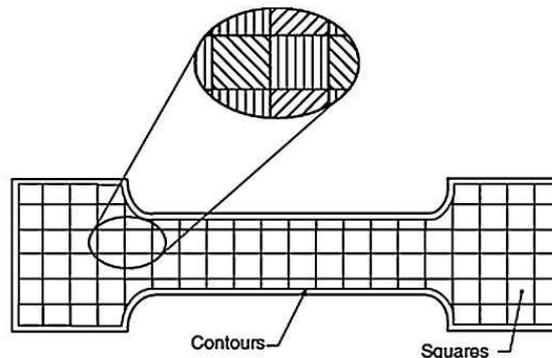


Figura 12: Strategie generali di fusione impiegate nelle tecniche LPBF [3]

In modalità contorno, è scansionato solamente il perimetro della sezione trasversale. Ciò viene fatto per motivi di accuratezza della finitura superficiale. Il resto della sezione è quindi scansionata utilizzando un motivo di riempimento [3]. Nel prossimo capitolo si parlerà in maniera più approfondita delle strategie di scansione di riempimento che utilizza Renishaw e con le quali è stato prodotto il componente protagonista di questo lavoro di tesi. È importante, però, aggiungere che anche le varie strategie di scansione possono influenzare gli stress residui all'interno di un componente: continui cambi del percorso del laser possono infatti causare distorsioni e magari pezzi prodotti con una determinata strategia in una stessa macchina possono avere risultati peggiori se si utilizza una strategia diversa.

La forma, la dimensione e la distribuzione della polvere influenzano fortemente le caratteristiche di assorbimento del laser, la densità del letto di polvere e la sua conduttività termica. Le particelle più fini forniscono una maggiore area superficiale e assorbono l'energia del laser in maniera più efficiente rispetto alle particelle più grossolane.

La temperatura del letto di polvere, la potenza del laser, la velocità di scansione, la spaziatura di scansione devono essere bilanciati per ottenere il compromesso migliore tra le dimensioni del pozzetto di fusione, precisione dimensionale, finitura superficiale e

proprietà meccaniche. La temperatura del letto di polvere deve essere mantenuta costante ed uniforme per poter ottenere dei risultati poi ripetibili.

Generalmente, la combinazione alta potenza del laser e temperatura del letto di fusione alta producono parti dense, mentre bassa potenza e basse temperature producono una migliore precisione dimensionale, ma spesso si incorre a pezzi con bassa densità e a delaminazione. Invece, laser ad alta potenza combinato con basse temperature del letto di fusione porta ad avere strutture che si restringono in maniera non uniforme, accumulo di tensioni residue all'interno e conseguente deformazione della parte.

La potenza del laser, le dimensioni dello spot, la velocità di scansione e la temperatura del letto di polvere insieme determinano l'energia necessaria per fondere la polvere. Maggiore è il tempo di esposizione del laser, maggiore sarà la profondità di fusione e più grande sarà il diametro del pozzetto di fusione. A tal proposito, esiste un'equazione riguardante la densità di energia volumetrica (VED) che la correla alla potenza del laser (P), alla velocità di scansione (v), alla spaziatura di scansione (H hatch distance) e spessore del layer (L layer thickness) [8]:

$$VED = \frac{P}{v \cdot H \cdot L}$$

Questa grandezza si misura solitamente in J/mm^3 ed è di fondamentale importanza in quanto influenza le proprietà meccaniche, la microstruttura e la precisione geometrica del componente. Si nota come l'energia applicata al letto di polvere aumenti con l'aumentare della potenza del laser e diminuisca all'aumentare della velocità di scansione e della spaziatura di scansione.

La densità del letto di polvere, in base alla forma, dimensione e distribuzione delle particelle, può influenzare fortemente la qualità del componente. I valori di densità delle polveri variano fra il 50% e 60% per la maggior parte di quelle commercializzate disponibili, ma può essere inferiore al 30% per ceramiche irregolari. Solitamente più alta è la percentuale di densità di impaccamento delle polveri, maggiore è la conduttività termica e migliori saranno le proprietà meccaniche.

Capitolo 2

La tecnologia LPBF di Renishaw e sistemi RenAM500

Chi è Renishaw?

Fondata sull'innovazione da Sir David McMurry e John Deer nel 1973, Renishaw è un'azienda multinazionale inglese leader delle tecnologie di misura, nei settori industriali e medicali, dall'aerospazio all'automobile, dalla neurochirurgia all'odontoiatria. McMurry dovette misurare dei tubi del carburante del motore aeronautico Olympus (Concorde): al tempo i sensori delle macchine di misura a coordinate avevano tastatori rigidi, che richiedevano posizionamento manuale sulle superfici da misurare con scarsa ripetibilità della misurazione. Per evitare tale difetto, McMurry inventò un dispositivo con tastatore touch-trigger, che brevettò. Il tastatore eseguiva posizionamenti cinematici con uno stilo a molla, con ottima ripetibilità di posizionamento.

La linea di prodotti di Renishaw si estende ai tastatori per macchine CNC e taratura, encoder lineari, trasduttori di posizione angolare, CAD/CAM per odontoiatria, calibri flessibili, spettroscopia Raman e dispositivi medici per neurochirurgia. Dal 2011 è anche produttore di macchine per la fabbricazione additiva di componenti in metallo, grazie all'acquisizione dell'azienda MTT.

Il processo di Laser Powder Bed Fusion di Renishaw

La tecnologia di fusione a letto di polvere Renishaw utilizzata per produrre la mastra per questo lavoro di tesi, è sostanzialmente simile a quella generale descritta nel capitolo precedente.

In figura 13 è schematizzato il processo: un silos contiene della polvere metallica; quest'ultima, grazie ad un sistema di distribuzione automatica, viene dosata di una determinata quantità scelta dall'operatore e viene distesa in maniera uniforme su tutta la superficie della piastra di lavoro tramite una racla flessibile; un'istante dopo il laser fonde

il primo layer di polvere; una volta terminato tutto il layer, la racla torna indietro, la piastra di lavoro si abbassa di una quantità pari allo spessore del layer imposto, grazie ad un elevatore che si muove lungo l'asse z ed è movimentato da un servomotore elettrico; a questo punto rientra in funzione il dosatore automatico e successivamente la racla flessibile che distende la polvere e il ciclo di lavoro ricomincia, fin quando il build non è totalmente completato. Tutto il processo avviene in atmosfera inerte, precisamente Renishaw utilizza argon, per evitare l'ossidazione della polvere. Oltre alla creazione dell'atmosfera inerte all'inizio del processo, vi è un flusso di argon che scorre da destra verso sinistra in direzione opposta a quella di fusione del laser in modo tale da tener lontani lapilli, bruciature e scorie varie dal pozzo di fusione, che possono danneggiare la stessa.

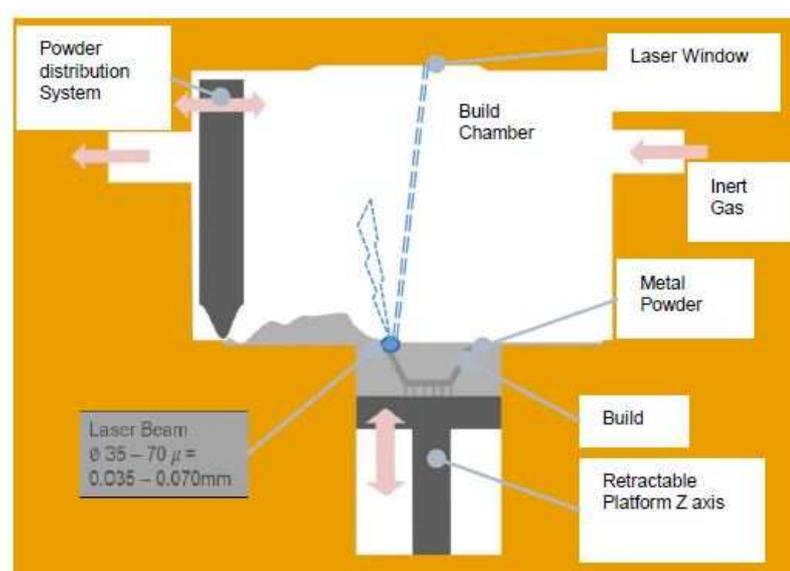


Figura 13: Schema del processo Laser Powder Bed Fusion di Renishaw [9]

La fusione a letto di polvere avviene grazie alla messa a fuoco di un potente raggio laser a fibra di itterbio concentrato in un piccolo spot che contiene intensità di energia sufficiente a fondere completamente un sottile strato di metallo in polvere. Una volta entrato nel gruppo ottico, il fascio laser a fibra di itterbio viene guidato da una coppia di specchi comandati da galvanometri di precisione, che lo orientano sulla piastra di lavoro. Il sistema ottico varia dinamicamente la lunghezza focale del laser al fine di mantenere costante la dimensione del fascio al variare dell'angolo di emissione [9].

Ogni traccia di saldatura è un po' più ampia dello spot del laser (circa 2-3 volte il diametro dello spot) perché il calore viene trasferito anche alle particelle di polvere circostanti e quindi faranno parte anch'esse del bagno di fusione. Le tracce vengono unite e sovrapposte fra loro a formare un solido strato denso corrispondente ad una sezione trasversale del componente.

Due tecniche sono utilizzate per fondere la polvere: fusione a scansione continua e modulata. Nella fusione a modalità continua, come suggerito dal nome, l'energia del laser è erogata in maniera continua, guidando il raggio laser sul letto di polvere per solidificare la parte. Le linee di scansione si sovrappongono, in modo che ogni passata nuova del laser rimuova parzialmente la linea precedente di scansione creando una massa solida di metallo saldato. In modalità modulata, invece, il laser opera in maniera diversa: esso viene acceso e spento, creando una serie di esposizioni separate da una pausa breve di 10-20 microsecondi. Ogni esposizione si sovrappone parzialmente alla precedente [9]. Le 2 differenti tipologie di tecniche di scansione sono illustrate in figura 14.

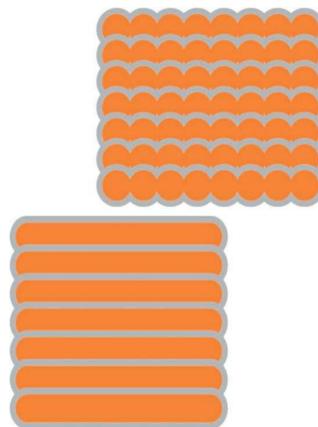


Figura 14: La scansione laser continua (a sinistra) prevede una serie di linee di scansione sovrapposte, ciascuna formata con il laser in funzione continuamente. La scansione modulata (a destra) ottiene lo stesso effetto utilizzando una serie di esposizioni [9]

Per il componente mastra, oggetto di studio di questa tesi, è stata utilizzata per la sua produzione la tecnica di fusione modulata.

Il modo in cui l'energia è trasferita al letto di polvere dipende dai parametri di processo. Questi ultimi definiscono quanta energia è applicata e quanto velocemente. I parametri critici sono:

- **Potenza del laser:** determina l'intensità del raggio laser ed è impostata in Watt;

- Dimensione dello spot del laser: diametro del raggio laser, dipende strettamente dal fuoco e da come è calibrato sulla macchina. Il punto focale del raggio laser è dove convergono i raggi di luce paralleli. Nella maggior parte dei casi il diametro del punto focale è di $75\ \mu\text{m}$, ma in realtà può variare da $66\text{-}75\ \mu\text{m}$ a seconda della macchina. Il punto focale è lungo circa $2\ \text{mm}$ con una tolleranza di più o meno $1\ \text{mm}$ (Fig. 15) [10].

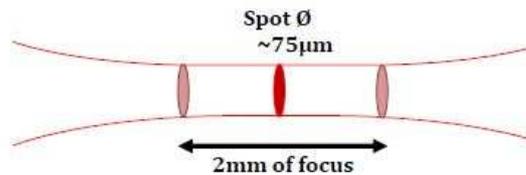


Figura 15: Punto focale del raggio laser [10]

Impostando questo parametro su $z=0$, si posizionerà il punto focale sulla linea di riferimento, coincidente con la parte superiore del letto di polvere. Il diametro del punto può essere regolato spostando il fascio laser lungo la direzione z . Se lo si sposta di un valore positivo, allora il punto focale si troverà al di sotto della linea di riferimento, altrimenti un valore negativo porterà il punto focale sopra la linea di riferimento, come illustrato in Fig. 16. In questo modo la sezione trasversale che interseca la linea di riferimento è il nuovo diametro dello spot del laser che sarà maggiore rispetto a quello con punto focale in $z=0$ [10].

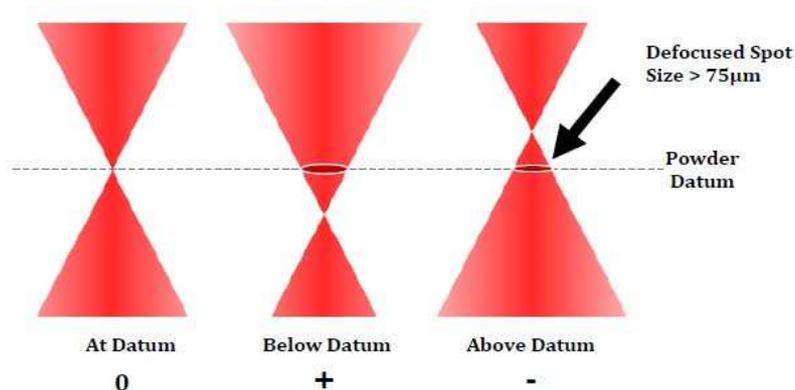


Figura 16: Punto focale a coordinata zero, positivo e negativo [10]

- Velocità di scansione: è la velocità alla quale si muove il punto di fusione sul letto di polvere lungo un vettore di scansione. Per la scansione laser ad onda modulata, questa velocità è definita dalla point distance e dall'exposure time. La point distance è la distanza fra i centri di 2 pozzi di fusione consecutivi (Fig. 17). Come regola generale, questi pozzi di fusione devono sovrapporsi di 1/3 per evitare porosità [10]. L'exposure time, invece, è il periodo di tempo in cui il laser resta acceso in un punto di fusione ed è impostato in μs .

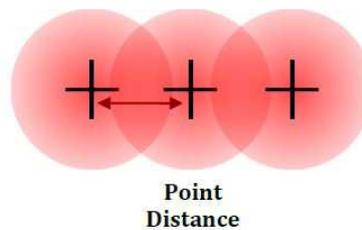


Figura 17: Point distance [10]

- Hatch distance: si tratta della distanza tra 2 vettori di punti di esposizione (Fig. 18).

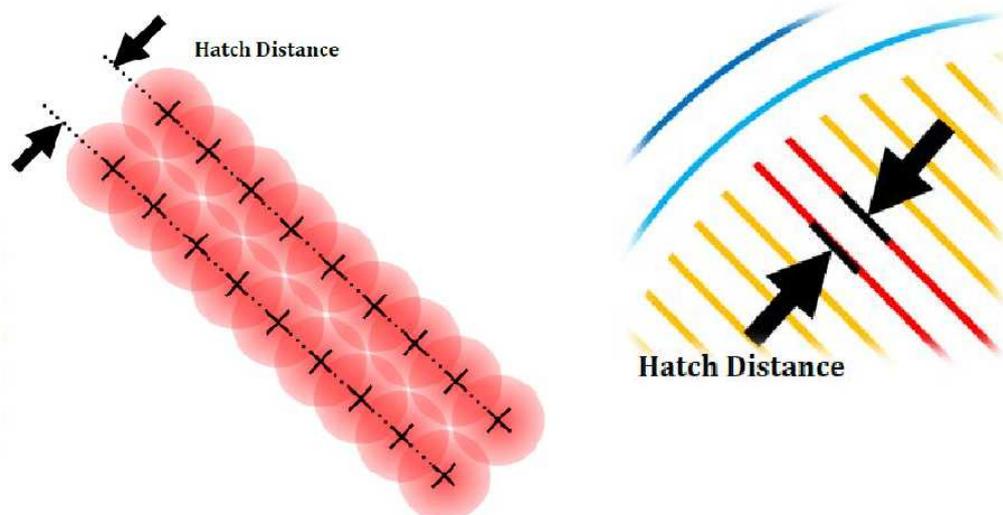


Figura 18: Hatch distance [10]

L'hatch distance è impostata affinché si ottenga una sovrapposizione delle tracce di fusione successive. Esso però non deve essere troppo grande, altrimenti possono verificarsi delle porosità: normalmente si utilizza la stessa regola descritta per il point distance di sovrapposizione di 1/3.

- Spessore dello strato: la profondità di ogni nuovo strato di polvere che deve essere fuso.

Ognuno di questi parametri può essere regolato indipendentemente, rendendo la selezione dei parametri un problema multivariabile. La scelta dei parametri è fondamentale perché influenza l'esito del processo e trovare il giusto compromesso e l'equilibrio fra tutti non è semplice e necessita di un duro e costante lavoro sperimentale. Bisogna premettere, che fra tutti alcuni parametri sono fissi, come ad esempio, lo spessore del layer, che si imposta prima della lavorazione in base al livello di finitura superficiale che si intende ottenere sul componente finale; oppure la dimensione dello spot del laser che non può essere variata durante la lavorazione, ma è impostata prima con la calibrazione del laser sulla macchina. La potenza del laser, la velocità di scansione e l'hatch distance restano invece parametri liberi e variabili e bisogna cercare la giusta combinazione fra loro per ottenere dei buoni risultati. Questa combinazione varia poi in base al materiale.

Un modo utile per comprendere in che modo questi parametri variabili vanno ad influenzare il risultato finale, è diagrammare 2 parametri come, ad esempio, potenza del laser e velocità come mostrato in Figura 19.

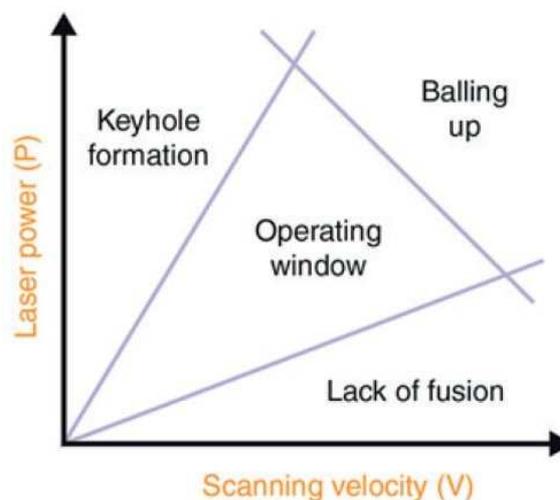


Figura 19: La potenza del laser in funzione della velocità di scansione; come variano i risultati del processo in base ai parametri scelti [10]

Se fondiamo troppo velocemente con poca energia ci saranno delle parti che non fonderanno completamente, causando così delle porosità nella microstruttura finale. Al contrario, se applicassimo troppa energia rispetto alla velocità scelta, si andrebbe incontro ad un effetto noto come formazione di keyhole, con conseguenti ed evidenti bruciature

sulla struttura finale. Fra questi due estremi esiste una finestra operativa, come mostrato in Fig. 19, per i quali valori di potenza e velocità si ottiene una buona densità del materiale come risultato finale. Dal grafico di Fig. 19 si nota come sia possibile aumentare potenza del laser e velocità di scansione insieme per diminuire il tempo di costruzione del build. Ma ciò vale sino ad un certo punto, dopo il quale il comportamento del pozzo di fusione diviene instabile e si ha la formazione in superficie di perline di diametro paragonabile alla misura dello spot del laser: si tratta del fenomeno di balling. Inoltre, più si aumenta l'energia del laser, più aumentano gli schizzi durante la fusione.

Sistema RenAM 500M per la produzione additiva

In questo sottocapitolo si descriverà in dettaglio la macchina per la produzione additiva utilizzata per la produzione della mastra per il timone, oggetto di studio del lavoro di tesi. Si tratta della RenAM500M (Figura 20), macchina a singolo laser per la produzione di componenti in metallo, specificatamente in questo caso nella superlega a base nichel Inconel 625, materiale con cui è stata realizzata la mastra.



Figura 20: Macchina per la produzione additiva RenAM500M [11]

Analizzando innanzitutto il nome RenAM500M, si nota la sigla “AM” che indica le lettere iniziali di additive manufacturing; il numero 500, invece, indica la potenza massima raggiungibile dal laser ed infine, la lettera “M” richiama semplicemente la parola Manufacturing, per sottolineare come questa macchina sia stata progettata e realizzata per la produzione additiva a tutti gli effetti e non solo per la creazione di prototipi.

La camera di lavoro include un volume massimo di lavoro di 250x250x350 mm, in cui vi sono gli elementi principali, protagonisti durante il processo di fusione a letto di polvere: una piastra rettangolare di dimensioni 250x250 mm e spessa 15 mm, sulla quale crescerà il componente; il sistema di dosaggio automatico delle polveri, con il recoater con lama in silicone per distribuire uniformemente la polvere metallica su tutta la piastra; delle aperture laterali di ingresso per il gas inerte (argon); altre 2 aperture giacenti sul piano della piastra, utilizzate per il recupero della polvere che non prende parte al processo di fusione e che viene quindi rimessa in circolo e riutilizzata; una finestra protettiva per il laser e tutto il sistema di ottiche per la movimentazione del fascio laser (Figura 21).

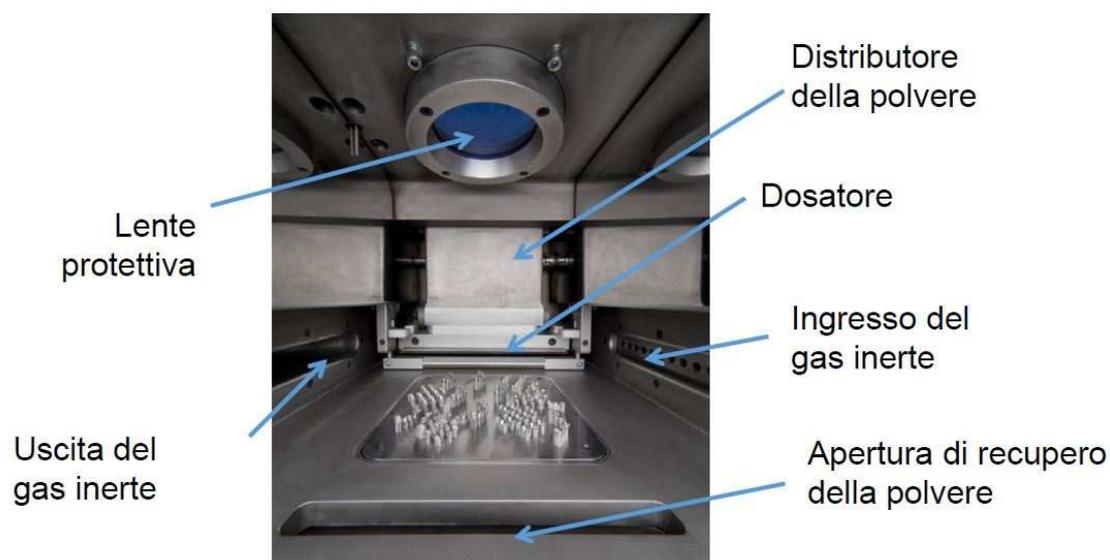


Figura 21: Camera di processo [9]

Come accennato già in precedenza, la camera, prima dell'inizio della lavorazione, è inertizzata, per proteggere la polvere da ossidazioni, e per ridurre le porosità. All'inizio del processo si crea il vuoto nella camera: vengono rimosse in questo modo aria e umidità. Successivamente la camera è riempita di circa 400 litri di argon ad alta purezza (Fig. 22). Durante il funzionamento l'atmosfera è sempre mantenuta al di sotto di un valore impostato

di ossigeno: 1000 ppm (0,1%) per metalli non reattivi e 100 o 50 ppm per titanio e alluminio. Il consumo totale di gas è tra i 5 e 50 litri/ora [9].



Figura 22: Ciclo di inertizzazione della camera [9]

Analizziamo in dettaglio le varie parti che costituiscono la macchina RenAM500M, iniziando dal complessivo in Fig. 23



Figura 23: Parte anteriore della RenAM500M con il portellone sinistro aperto [11]

Gli elementi illustrati in Figura 23 sono i seguenti, in ordine di numerazione:

1. Portellone sinistro aperto;
2. Sistema di setacciatura ad ultrasuoni;
3. Valvola di isolamento dalla polvere;
4. Coclea trasportatrice di polvere;
5. Celle di carico per la tramoggia di carico;
6. Tramoggia di carico;
7. Tubo di ritorno della polvere;
8. Punto di riempimento della tramoggia di carico;
9. Filtro di sinistra;
10. Filtro di destra;
11. Indicatore di stato del filtro;
12. Punto di uscita delle polveri oversize non setacciate.

Iniziamo nel descrivere una delle particolarità che contraddistingue questa macchina: il sistema di setacciatura e il ricircolo delle polveri automatici. Fanno parte di questo sistema la tramoggia di carico, il silo di dosaggio, il sistema di rilevamento del livello di polvere e lo scompartimento per le polveri oversize non setacciate da rimuovere.

Nel silo di dosaggio ci sono dei sensori che rilevano con precisione il livello di polvere per garantire un dosaggio ottimale. Quando il livello della polvere scende a metà, il sensore del livello medio reagisce richiedendo più polvere dalla tramoggia di carico. Questo innesca la setacciatura delle polveri e tutto il sistema di trasferimento pneumatico delle polveri al silo. In caso, il livello della polvere scenda al di sotto di metà e raggiunga il sensore di basso livello, quest'ultimo interviene mettendo in pausa la lavorazione, proprio perché la polvere non risulta sufficiente.

Il protagonista principale del sistema di setacciatura integrata è il setaccio ad ultrasuoni (Fig.24). Una vite madrevite collega la tramoggia di carico e il setaccio ad ultrasuoni e gestisce la velocità e la quantità di polvere da setacciare, fornita al setaccio. Tutta la polvere caricata in tramoggia passa necessariamente dal setaccio ed è setacciata prima di raggiungere il silo di dosaggio. Essenzialmente, il setaccio è costituito da un dispositivo vibrante e da una maglia che permette il passaggio solo di particelle di polvere di una predefinita dimensione [11].



Figura 24: Setaccio ad ultrasuoni Renishaw [11]

Dopo la setacciatura, la polvere utilizzabile e quella oversize vengono trasportate separatamente in correnti di argon ad elevata purezza. La polvere utilizzabile viene trasferita in un recipiente posto sopra il silo di dosaggio, in modo che la polvere possa essere trasferita a quest'ultimo in maniera controllata. La polvere del silo di dosaggio è poi alimentata con precisione durante la lavorazione grazie al sistema PDS, cioè il sistema di dosaggio della polvere ideato e collaudato da Renishaw. La polvere oversize, con particelle più grandi che non sono riuscite ad oltrepassare lo step di setacciatura, sono invece trasportate verso un altro recipiente separato, situato sopra il portellone sinistro della macchina, pronta ad essere rimossa quando richiesto. In Fig. 25 è illustrato tutto il ciclo completo di trasferimento pneumatico della polvere, di cui seguono le fasi [11]:

1. La polvere metallica è caricata nella tramoggia di carico;
2. La polvere metallica è setacciata ad ultrasuoni e le particelle più grandi sono separate dalla polvere utilizzabile;
3. Le particelle oversize vengono trasferite pneumaticamente in un recipiente di stoccaggio e sono rimosse e poste all'interno di una bottiglia in acciaio;
4. La polvere setacciata è trasferita pneumaticamente ad un recipiente di raccolta, pronta per essere inviata al silo di dosaggio;
5. La polvere viene dosata con precisione sulla piastra di lavoro;
6. La polvere non fusa viene trasferita nella tramoggia di carico per continuare il ciclo.



Figura 25: Ciclo di trasferimento pneumatico della polvere [11]

L'argon non viene utilizzato come mezzo di spostamento per la polvere metallica, ma come già accennato in precedenza, serve ad inertizzare la camera di processo prima e durante una lavorazione. Il gas accede alla camera di processo tramite 3 aperture: una posta in alto a sinistra, una in alto a destra e una laterale da destra. In questo modo si creano 3 flussi all'interno della camera: uno verticale dall'alto verso il basso della camera, uno orizzontale da destra verso sinistra e un altro che taglia in diagonale la camera, il tutto per ottimizzare il flusso di argon all'interno della camera e massimizzarne l'efficienza. La velocità del flusso può essere modificata dal pannello di controllo touch screen. La polvere di metallo più fine e le nanoparticelle che si creano durante la fusione sono trasportate dal flusso di gas e catturate in uno dei due filtri situati sul lato sinistro della macchina e contenuti in 2 cilindri di alluminio (Fig. 26) [11]. Il doppio filtro funziona in maniera pendolare: durante la lavorazione, un sensore monitora il differenziale di pressione nel filtro e dirotta automaticamente il flusso di argon nel filtro pulito, se necessario, senza che la lavorazione venga stoppata. Il filtro usato può essere quindi, in questo modo, sostituito e preparato dall'operatore senza interrompere il processo.



Figura 26: Filtri per l'argon [11]

Una delle parti fondamentali e delicate della macchina è sicuramente il laser, che fornisce l'energia per il processo di produzione additiva. Il sistema laser comprende un laser a fibra di itterbio da 500 Watt, con messa a fuoco dinamica, appositamente progettato e prodotto da Renishaw. Oltre al laser, è presente un gruppo ottico formato da una coppia di specchi comandati da galvanometri di precisione, che orientano il fascio laser sulla piastra di lavoro. Il sistema ottico varia dinamicamente la lunghezza focale del laser al fine di mantenere costante la dimensione del fascio al variare dell'angolo di emissione. La temperatura del sistema laser e delle ottiche è tenuta costante grazie ad un refrigeratore, elemento ausiliare della macchina indispensabile [9].

Per concludere questo paragrafo sulla macchina di produzione additiva RenAM500M, è necessario spendere due parole sul software operativo che gestisce l'intera macchina. Il software, progettato e realizzato da Renishaw, si chiama RenAMP e controlla tutti gli aspetti funzionali del sistema additivo, dalla sequenza di attivazione del laser, fino ai livelli di ossigeno della camera di costruzione. L'interfaccia utente grafica di RenAMP è dettagliatissima e molto semplice ed intuitiva da utilizzare grazie ad un touch screen professionale da 19 pollici (Fig. 27) [9].

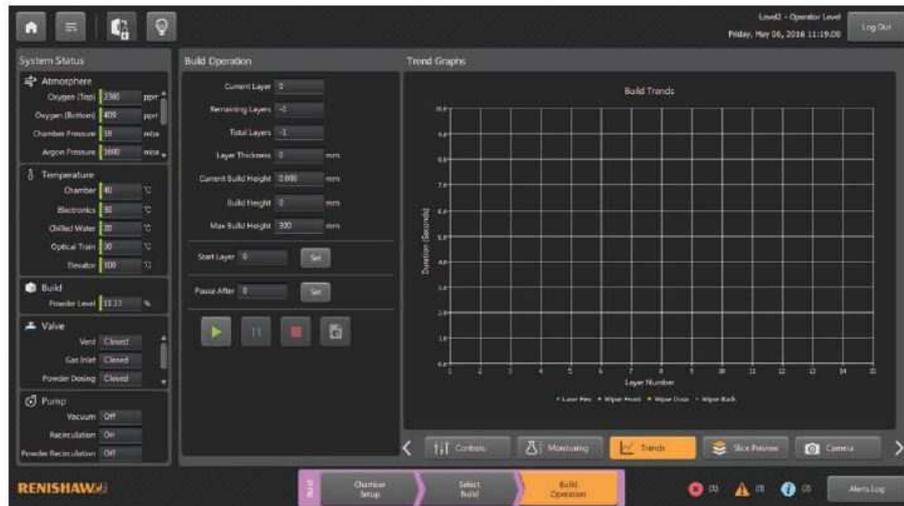


Figura 27: Interfaccia grafica di RenAMP [11]

Il materiale: la superlega Inconel 625

All'inizio del precedente paragrafo, si è detto che la macchina di produzione additiva RenAM500M stampa nella superlega a base nichel Inconel 625. Il nome Inconel è un marchio registrato dall'azienda statunitense Special Metal Corporation e fa riferimento alla famiglia delle superleghe a struttura austenitica a base nichel-cromo. Essa comprende, appunto, nichel legato a cromo in una frazione di massa pari al 23% e molibdeno fino al 10% e altri elementi minori. L'aggiunta di niobio, agendo con molibdeno, conferisce alla lega un'elevata resistenza e tenacità dopo la ricottura [12].

L'inconel 625 ha una vasta gamma di applicazioni nel settore industriale ed è particolarmente adatto per applicazioni con acqua di mare, motivo principale per cui è stato scelto per la realizzazione della mastra questo materiale, e applicazioni in cui è richiesta la resistenza alla corrosione e all'ossidazione anche ad alte temperature. Simile all'Inconel 718, è inoltre adatto ad applicazioni in cui è richiesta una buona resistenza a trazione, creep e rottura [12].

Le principali proprietà di questo materiale sono le seguenti [12]:

- Alta resistenza al creep;
- Elevata resistenza ad ossidazione e corrosione anche ad alte temperature;
- Elevata resistenza a fatica nell'acqua di mare;

- Eccellenti caratteristiche di saldatura;
- Amagnetico.

Le applicazioni della lega Inconel 625 sono molteplici [12]:

- Automotive;
- Difesa e aerospace;
- Industria chimica;
- Ingegneria marina;
- Industria oil and gas;
- Nucleare;
- Scambiatori di calore in acqua di mare.

Nelle seguenti tabelle 1 e 2 sono riportate alcuni dati riguardanti le caratteristiche generali del materiale e le proprietà meccaniche.

Densità	8.44 g/cm ³
Conducibilità termica	9.2 W/mK a 10.7 W/mK
Range di fusione	1290°C a 1350°C
Coefficiente di dilatazione termica	1.8 10 ⁻⁶ K ⁻¹

Tabella 1: Dati generali sulla lega Inconel 625

Carico di rottura	
direzione orizzontale (xy)	1055 Mpa
direzione verticale (z)	964 Mpa
Resistenza a snervamento	
direzione orizzontale (xy)	767 Mpa
direzione verticale (z)	676 Mpa
Allungamento a rottura	
direzione orizzontale (xy)	34%
direzione verticale (z)	42%
Modulo di elasticità	
direzione orizzontale (xy)	205 GPa
direzione verticale (z)	186 Gpa
Durezza (Vickers)	
direzione orizzontale (xy)	331 HV0.5
direzione verticale (z)	332 HV0.5
Rugosità Superficiale	
direzione orizzontale (xy)	2 μm a 3μm
direzione verticale (z)	6 μm a 7μm

Tabella 2: Proprietà meccaniche della lega Inconel 625 riferite a componenti fabbricati in maniera additiva usando uno spessore dei layer di 30 μm

Come si evince dalle caratteristiche sopra, la lega Inconel 625 ha una densità piuttosto alta che la rende di conseguenza relativamente pesante e questo fattore per un'applicazione marina e specificatamente per una barca a vela da competizione risulta un problema.

Grazie all'additive manufacturing è possibile riabilitare e riconsiderare materiali trascurati, perché molto densi e considerati inadatti per determinate applicazioni, sfruttando a pieno la loro resistenza meccanica specifica. È possibile, infatti, ottimizzare il design di un pezzo, per adattarlo ad una determinata lega scelta, utilizzando solamente la quantità di materiale di cui abbiamo bisogno. Si può scegliere quindi una lega con una resistenza meccanica specifica molto elevata a prescindere dalla densità e realizzare comunque un componente leggero [13].

È questa la sfida dell'additive manufacturing ma anche di questo lavoro di tesi, ed è il motivo principale per cui si è scelto di realizzare la mastra in Inconel 625. Ci sono poi altre motivazioni secondarie legate a due aspetti: il primo riguarda il regolamento della competizione a cui partecipa il PoliTO Sailing Team che vieta l'utilizzo di titanio e delle sue leghe nei componenti della barca; il secondo riguarda il fatto che Renishaw in Italia, nella sede a Pianezza (TO) dispone solamente di una macchina di produzione additiva in lega Inconel 625: altri materiali sono disponibili solamente nelle altre filiali estere e volendomi occupare personalmente anche della fase produttiva della mastra, si è scelto di utilizzare questa lega.

Capitolo 3

Progettazione del design space iniziale

Come accennato nel precedente capitolo, progettare in ottica additive manufacturing è molto diverso rispetto alla maniera tradizionale, poiché ci si focalizza soprattutto sulla funzionalità del componente, rispettando carichi e vincoli, senza avere alcun limite dettato da come esso verrà prodotto. In linea con questa filosofia, non si è partiti, dunque, dalla geometria della mastra usata negli anni passati dal PoliTO Sailing Team, ma si è definito un volume massimo per il componente, chiamato design space iniziale.

Per far ciò, si è tenuto conto delle funzionalità, in primis, della mastra, delle richieste del PoliTO Sailing Team e degli spazi a disposizione.

Innanzitutto, si sono analizzate tutte le funzioni della mastra, che sono fondamentalmente tre:

1. Essere alloggio e supporto per il timone, collegandolo alla parte posteriore della barca;
2. Deve permettere al timone di ruotare nel piano verticale longitudinale della barca;
3. Deve essere solidale alla barra del timone, strumento utilizzato dal timoniere per far virare la barca, in modo tale che barra, mastra e timone siano un pezzo unico e ruotino insieme.

Oltre alla funzione, molto importante in questa fase della progettazione è il calcolo degli spazi e degli ingombri massimi che avrà il componente. Per questa valutazione si sono consultate le tavole Cad del timone e del sistema timone e attacchi, fornite gentilmente dal PoliTO Sailing Team (Fig. 28 e 29), e si sono fatti dei sopralluoghi nei laboratori del Team studentesco per prendere delle misure con un calibro direttamente sulla barca. Nelle foto in Figura 30, scattate sul posto, si nota il retro della barca, in cui verranno posizionati mastra e timone. La mastra deve collegare il timone alla barca grazie ai due agugliotti, visibili in Figura 30, cioè dei perni intorno ai quali tutto il sistema barra, mastra e timone dovrà ruotare in maniera solidale.

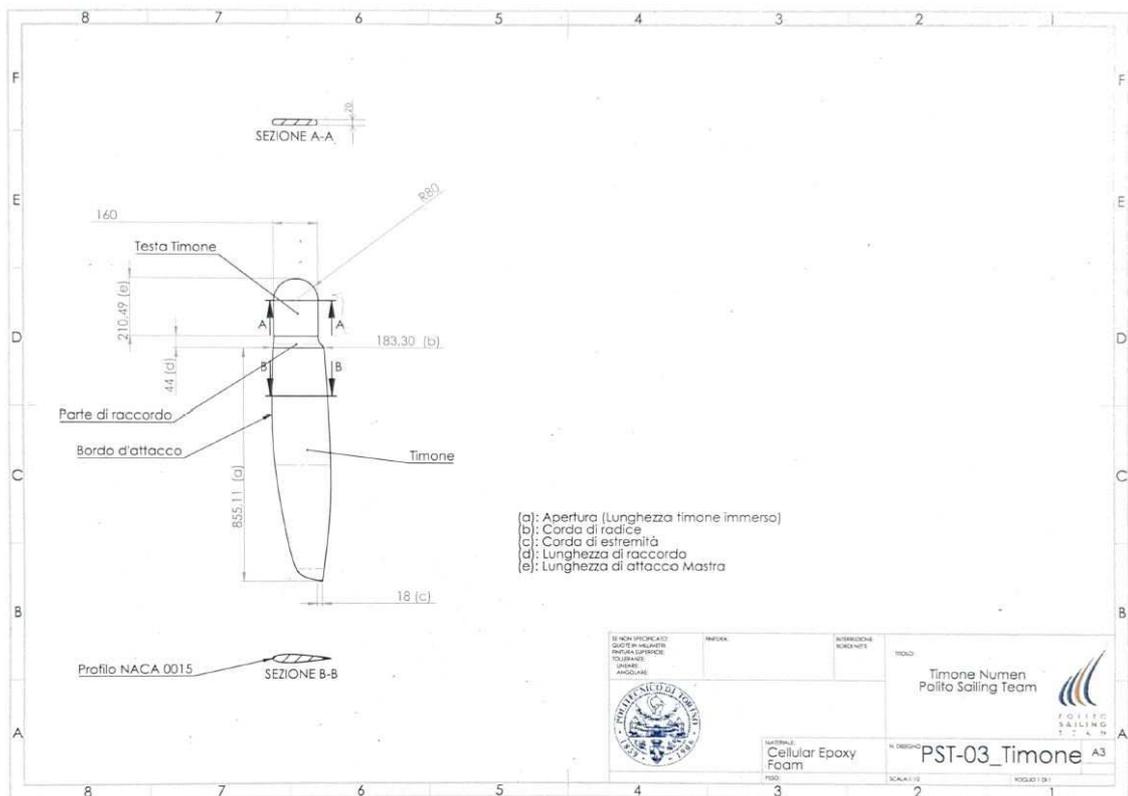


Figura 28: Tavola Cad del timone della barca Numen del PoliTO Sailing Team

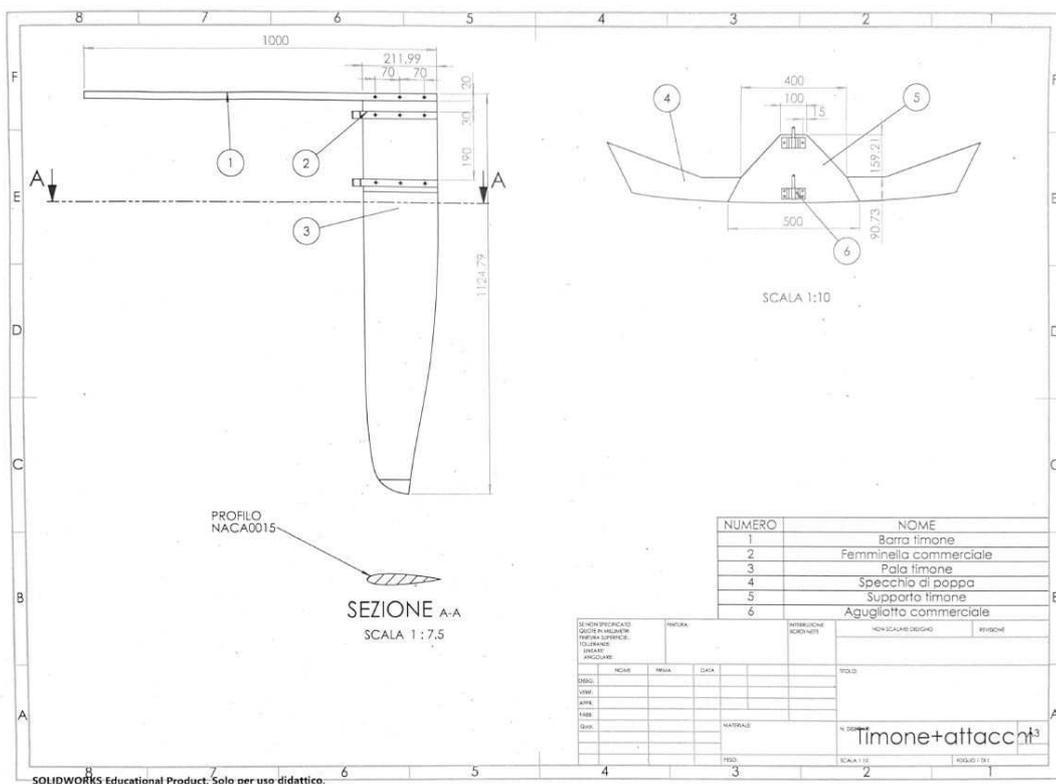


Figura 29: Tavola Cad del sistema timone con attacchi della barca Numen del PoliTO Sailing Team



Figura 30: Foto della parte posteriore della barca con gli agugliotti in evidenza

Inoltre, per la progettazione del design space iniziale, si è dovuto tener conto del sistema di fissaggio della mastra al timone e della richiesta da parte del PoliTO Sailing Team che il timone fosse basculante. Questo per far sì che durante la navigazione il timone assuma una posizione verticale immerso in acqua, mentre in prossimità di fondali bassi e riva, esso possa sollevarsi, ruotando intorno alla normale del piano verticale longitudinale della barca.

Il design space progettato con il Cad Solidworks è quello rappresentato in Figura 31, in cui si vede anche una parte della messa in tavola in 2D che chiarifica tutte le caratteristiche tecniche.

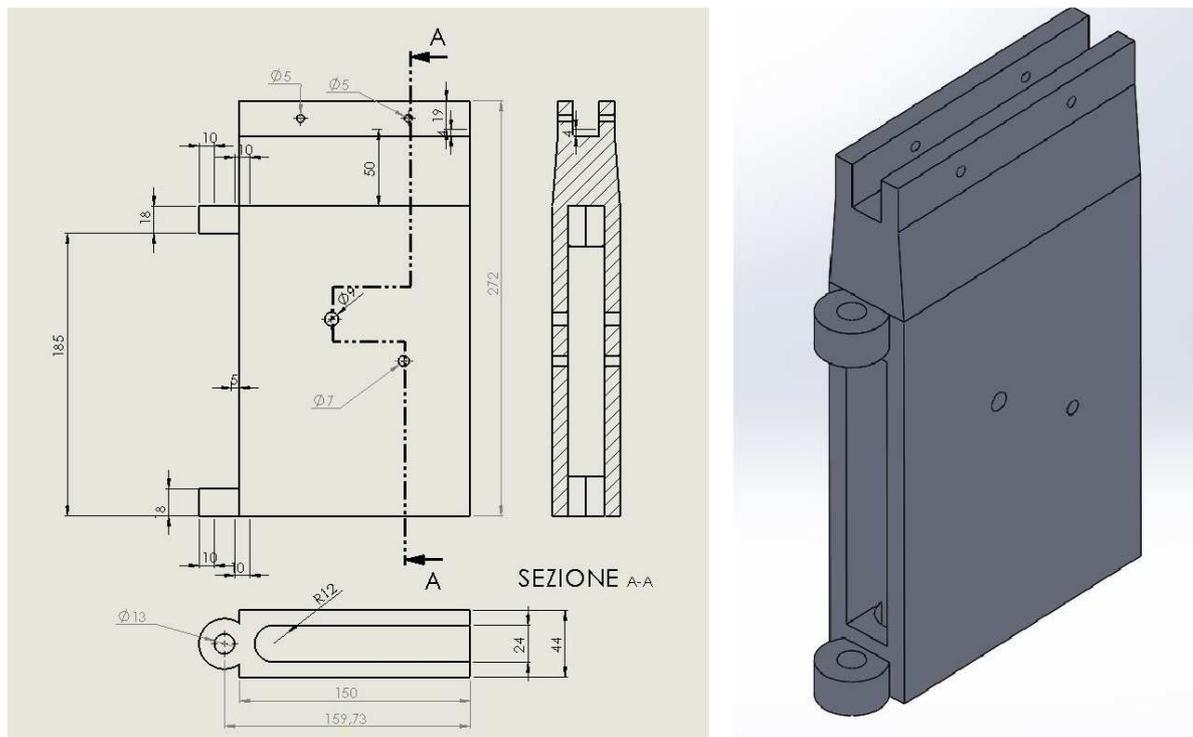


Figura 31: Rappresentazione Cad 3D e parte della messa in tavola in 2D del design space iniziale

In Figura 31, si nota che al centro del componente, nel piano verticale longitudinale, ci sono 2 fori, uno diametro 7 mm e l'altro 9 mm. Il primo è stato creato per essere sede di una vite M8, che ha la funzione di fissare la mastra al timone (si è tenuto conto di 1 mm di sovrametallo sul diametro del foro); il secondo foro, più grande, è sede invece di un perno rimovibile che ha una duplice funzione: rende più stabile il timone durante il moto, ma soprattutto quando viene estratto permette al timone di ruotare intorno alla normale al piano verticale longitudinale e di raggiungere la posizione orizzontale. Per tenere fisso il timone in questa posizione è necessario realizzare un terzo foro sul timone (2 sono realizzati in corrispondenza di quelli fatti sulla mastra) che, in posizione orizzontale, deve coincidere con il foro di 9 mm della mastra. Il centro di rotazione del timone è la vite M8 di fissaggio. In Figura 32 sono illustrate le 2 configurazioni del sistema barra, mastra e timone con quest'ultimo verticale e orizzontale. In Figura 33, invece, si notano le quote precise di dove realizzare i 3 fori sul timone, 2 di diametro 9 mm e uno 7 mm, quest'ultimo centro di rotazione del sistema. I fori vanno realizzati mediante macchine utensili.

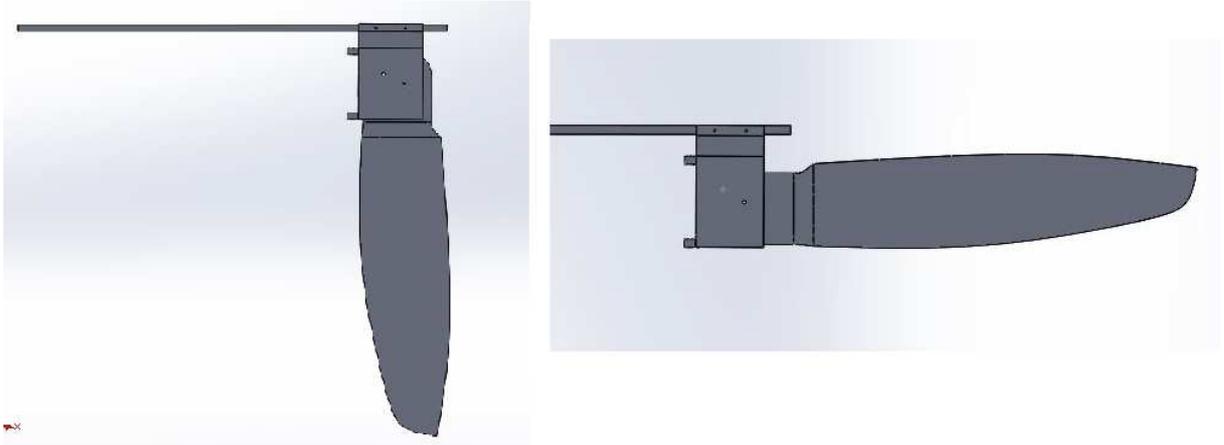


Figura 32: Configurazione verticale (a sinistra) del timone e orizzontale (a destra)

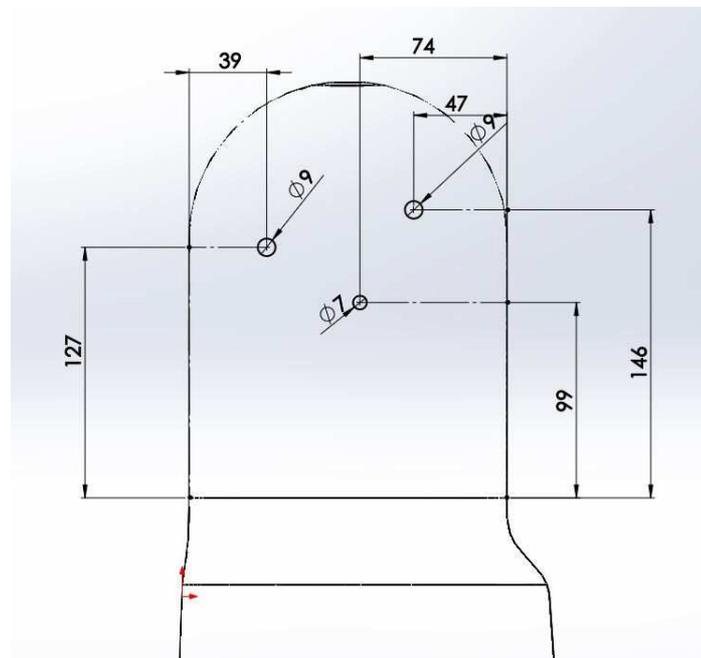
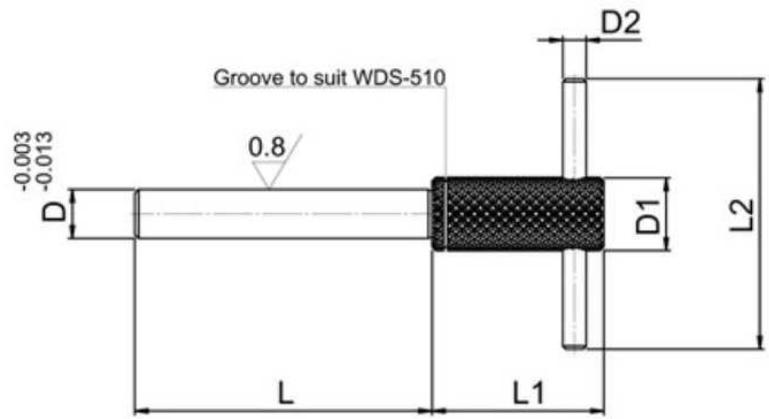


Figura 33: I 3 fori con quote da realizzare sul timone con le macchine utensili

Oltre ai 2 fori centrali, sono presenti altri 2 fori più piccoli, di 5 mm di diametro, per poter rendere solidale la mastra anche alla barra del timone. I fori sono sedi di 2 viti M6.

Per quanto riguarda il perno removibile, fulcro del sistema a timone basculante, è stato scelto il perno di riferimento removibile con spina di estrazione della WDS Component Parts numero 509-20450, presente in Figura 34 completo di scheda tecnica.



Numero	D [mm]	L [mm]	D1 [mm]	D2 [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]
509-20450	10	50	16	6	40	70

Figura 34: Scheda tecnica del perno removibile con spina di estrazione [22]

Capitolo 4

L'ottimizzazione topologica

Cos'è e come funziona

L'ottimizzazione topologica è una tecnica di simulazione al calcolatore nella quale è possibile far convergere le caratteristiche essenziali del progetto in termini di volume di progetto, tecnologia produttiva, carichi, condizioni di funzionamento e obiettivi da raggiungere, che permette di sintetizzare una forma innovativa per il prodotto, identificando quelle zone del volume necessarie al raggiungimento del target, e rimuovendo tutte le altre.

L'ottimizzazione topologica si dimostra uno strumento ideale nella fase concettuale del processo di progettazione che permette di arrivare rapidamente a proposte di forma concettuali abbastanza grossolane, pertanto che richiedono un raffinamento dei dettagli costruttivi, ma che in ogni caso permette di ridurre drasticamente i tempi di molte iterazioni progettuali e, allo stesso tempo, fornisce indicazioni preziose al progettista su come fare a migliorare il disegno del prodotto.

Il bello dell'ottimizzazione topologica è che può essere applicata praticamente in qualsiasi contesto strutturale per determinare, ad esempio, la migliore distribuzione di materiale per il basamento di una macchina utensile realizzata per fusione, oppure la traversa di una pressa che deve essere molto rigida, oppure per migliorare la forma delle parti in movimento che devono essere rigide e leggere allo stesso tempo.

L'obiettivo dell'ottimizzazione topologia è quello di trovare il layout ottimale di una struttura all'interno dello spazio disegno specificato, senza richiedere un layout iniziale del progetto, tenendo conto degli obiettivi di progettazione, che possono essere la minimizzazione di energia di deformazione e quindi, la massimizzazione della rigidità, o la minimizzazione della massa o del volume. Pertanto questa classe di algoritmi è in grado di determinare da sola caratteristiche come il numero ottimale di membri strutturali, le posizioni ottimali di fori di alleggerimento, ecc. In letteratura sono stati proposti molti approcci per questo tipo di ottimizzazione e quello più popolare, che risulta implementato nella maggior parte dei software commerciali è il metodo SIMP [15].

In termini matematici, quest'approccio si traduce nel trovare un dominio Ω con un volume limitato V , compreso in un dominio di progettazione, che ottimizza una funzione obiettivo f . Introducendo la funzione densità ρ , per il metodo SIMP, detto anche modello di rigidità proporzionale, si ha:

$$E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E_{ijkl}^0$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V; \quad 0 \leq \rho(x) \leq 1, \quad x \in \Omega$$

La densità ρ è la funzione di progettazione ed E è la matrice di rigidità di un dato materiale isotropico.

L'approccio SIMP collega una funzione di densità relativa di elemento ad ogni elemento attivo dello spazio di progetto. La densità relativa degli elementi è una funzione reale che può variare qualsiasi valore compreso tra 0 e 1. Moltiplicando la matrice di rigidità e di massa degli elementi attivi con il valore di densità relativa, si riesce a variare la distribuzione di rigidità e di massa con continuità.

Utilizzando le densità di elementi come parametro di ottimizzazione, si trasforma l'ottimizzazione topologica in un'ottimizzazione continua. Lo svantaggio principale di utilizzare la funzione di densità elemento relativa è che il layout finale che ottiene non è necessariamente un disegno 0-1, ma si potrebbero ricavare delle aree elementi che hanno una densità relativa con un valore intermedio. Tali distribuzioni sono difficili da interpretare fisicamente, e di solito si vuole evitare densità intermedie nel layout finale.

Per guidare il layout verso un disegno di tipo 0-1, l'algoritmo SIMP utilizza un fattore di penalità esponenziale $p > 1$ per fare in modo che valori di densità intermedi risultano meno favorevoli in quanto la rigidità che producono è piccola in confronto al costo (volume di materiale) [15]. Questo approccio usualmente prende il nome di penalizzazione implicita. Per ottenere un disegno 0-1 usualmente si prende $p > 3$. [15]

L'ottimizzazione topologia parte da un modello continuo dello spazio di progettazione. In modo iterativo, il processo di ottimizzazione rimuove, o ri-distribuisce il materiale dallo spazio di progettazione che non viene utilizzato in modo efficiente. Il processo di ottimizzazione continua rimuovendo il materiale fino alla frazione volumetrica predefinita dello spazio di progettazione è si ferma. La Figura 35 illustra il diagramma di flusso dell'Ottimizzazione Topologica, con una rappresentazione schematica di come viene

interpretato il modello FEM nelle varie fasi. Il risultato di questa analisi fornisce la distribuzione ottimale del materiale per l'applicazione considerata. A differenza delle iterazioni di progetto manuali ispirate dall'esperienza e l'intuizione del progettista, l'Ottimizzazione Topologica a volte può portare a disegni molto sorprendenti.

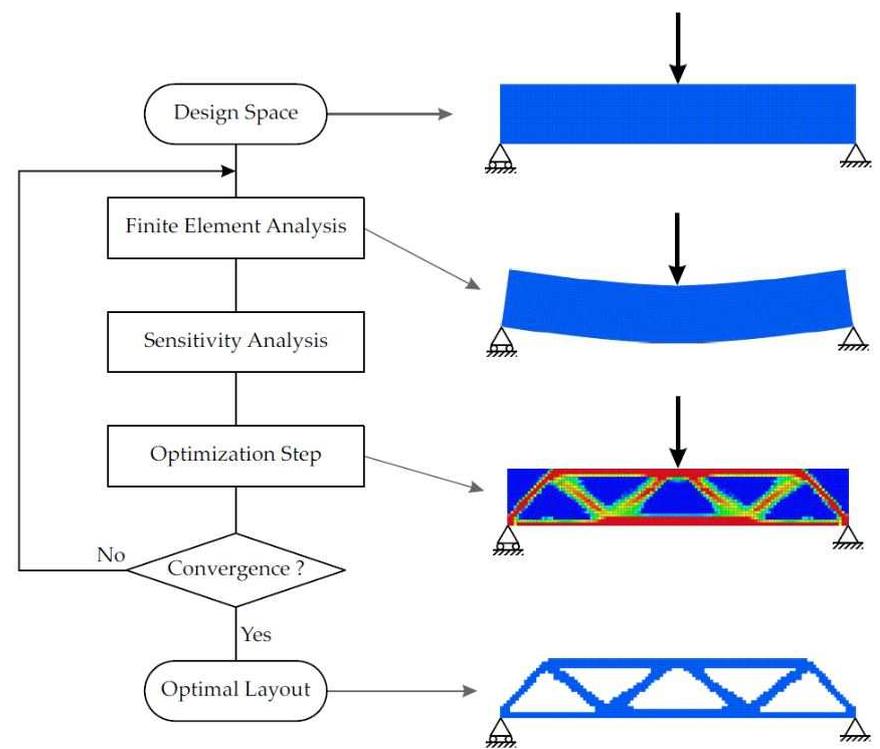


Figura 35: Flow chart tipico dell'ottimizzazione topologica [23]

Il software utilizzato: solidThinking Inspire

Per la fase di ottimizzazione topologica del caso studio protagonista di questo lavoro di tesi, è stato utilizzato il software di ottimizzazione solidThinking Inspire 2018.3 di Altair Engineering (Figura 36).



Figura 36: Logo del software di ottimizzazione solidThinking Inspire [16]

Inspire è una versione compatta e semplificata della più nota suite HyperWorks, prodotto di Altair Engineering rivolto al settore professionale. HyperWorks è un pacchetto CAE (ComputerAided Engineering) che include software avanzati per la modellazione, l'analisi, la visualizzazione e la gestione di dati, per ottimizzazioni di strutture, con soluzioni lineari e non, interazione di una struttura con un fluido e dinamica di sistemi multibody.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione delle strutture, HyperWorks si basa su tre moduli differenti, che lavorano in sequenza:

- Il preprocessor Hypermesh: modulo pensato per la discretizzazione della geometria da studiare. Si definisce il problema e i vincoli per l'ottimizzazione;
- Il processore Optistruct: è il solutore adatto a vari tipi di ottimizzazione;
- Il postprocessore Hyperview: è il visualizzatore dei risultati.

Anche Inspire utilizza questi 3 moduli, ma in maniera più semplificata ed immediata per l'utente. Importare geometrie 3D, definire spazi di progettazione, impostare carichi e vincoli è molto intuitivo e alla portata di tutti, grazie anche all'interfaccia user-friendly.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione, con Inspire, è possibile conseguire 2 obiettivi:

- Massimizzazione della rigidità, impostando una certa percentuale di materiale sul design space totale da eliminare;
- Minimizzare la massa, imponendo un coefficiente di sicurezza.

Nella fase preliminare di preparazione del modello è possibile:

- Importare Cad già realizzati con altri software;
- Applicare il materiale. Il software considera materiali omogenei e il loro comportamento elastico. È possibile, inoltre, creare nuovi materiali inserendo tutte le proprietà richieste;
- Definire il design space e il non design space;
- Applicare diversi tipi di vincoli;
- Applicare diversi tipi di carichi;
- Applicare vincoli di forma come piani di simmetria e vincoli di processo come il piano di apertura di uno stampo o il piano su cui cresce la struttura realizzata mediante additive manufacturing.
- Realizzare delle analisi delle sollecitazioni agli elementi finiti, dopo aver applicato i carichi.

La nuova versione 2018, utilizzata per questo lavoro di tesi, introduce nuove funzionalità innovative fra cui la possibilità di:

- Generare facilmente il movimento dinamico di meccanismi complessi, identificando automaticamente contatti, giunti, molle e ammortizzatori;
- Realizzare strutture trabecolari miste a strutture piene in ottica additive manufacturing;
- Creare più casi di carico con la nuova tabella di casi di carico;
- Progettare per la fabbricazione additiva definendo il piano coincidente con la piastra di lavoro con sistemi di controllo per evitare le strutture a sbalzo da supportare;
- Creare automaticamente le PolyNurbs, la rappresentazione matematica di superfici che seguono i risultati dell'ottimizzazione topologica (Fig. 37) [16].

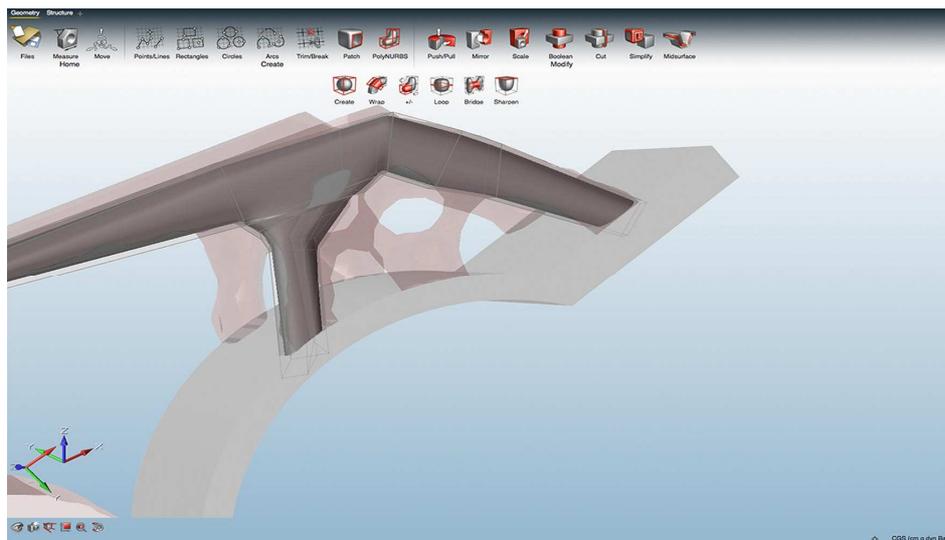


Figura 37: Esempio di PolyNurbs [16]

Nel prossimo paragrafo, queste fasi e funzioni del software saranno meglio approfondite e applicate al caso studio della mastra per il timone.

Step preparativi al modello per le simulazioni di ottimizzazione topologica

In questo paragrafo si descrivono dettagliatamente le fasi che hanno portato all'ottimizzazione topologica della mastra.

Innanzitutto, si è importato il design space iniziale realizzato su Cad all'interno del software solidThinking Inspire (Fig. 38).

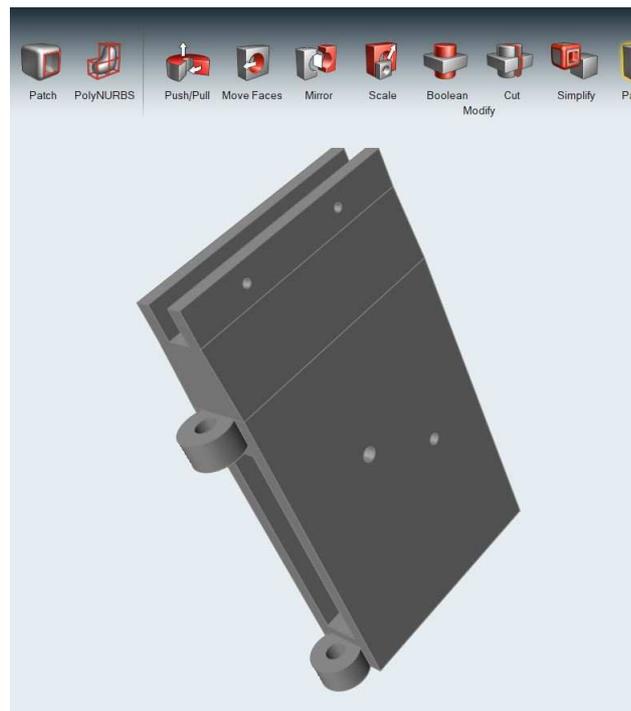


Figura 38: Design space iniziale importato in solidThinking Inspire

Lo step successivo è quello di selezionare un materiale ed applicarlo a tutta la struttura. Nel nostro caso il materiale utilizzato è la lega Inconel 625, non presente fra i materiali disponibili predefiniti del software. Si è dovuto, quindi, creare un materiale personalizzato, inserendo tutte le caratteristiche fisiche e meccaniche richieste (Fig. 39). Il peso del design preliminare in Inconel 625 risulta essere 8.371 kg.

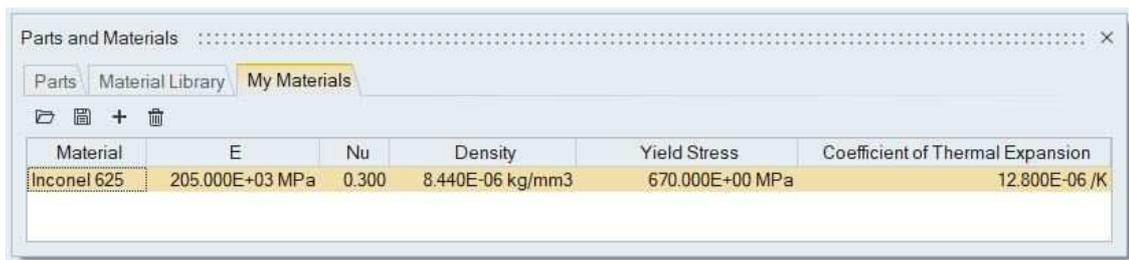


Figura 39: Creazione del materiale personalizzato Inconel 625

Una volta creato, il nuovo materiale Inconel 625 è stato assegnato a tutta la struttura.

In seguito, si sono definite le zone di design space e quelle di non design space del componente. La zona di design space è quello spazio di progettazione in cui può agire il software con l'ottimizzazione topologica; le zone di non design space sono quelle che non devono essere modificate dall'ottimizzazione e sono per esempio le superfici di interfaccia con componenti esterni, le sedi per viti e perni, o zone di supporto del componente. Il progettista, conoscendo la funzione del componente e il complessivo in cui verrà inserito, stabilisce quali sono le zone di non design space. Nel caso della mastra per il timone di barca a vela, le zone di non design space sono le 2 sedi per le viti di fissaggio della barra, le 2 sedi per vite centrale e perno rimovibile e, infine, i fori da cui passeranno gli agugliotti ed intorno ai quali ruoterà tutto il sistema. Per realizzare queste zone di non design space si è utilizzato il comando "Partition" di Inspire, che ha permesso di disegnare delle circonferenze concentriche a tutti i fori già esistenti, con offset 2 mm, creando così delle boccole separate dal resto del componente. Queste boccole sono le zone di non design space, che resteranno invariate anche dopo l'ottimizzazione (Fig. 40). La restante parte del componente forma la zona di design space (Fig. 41).

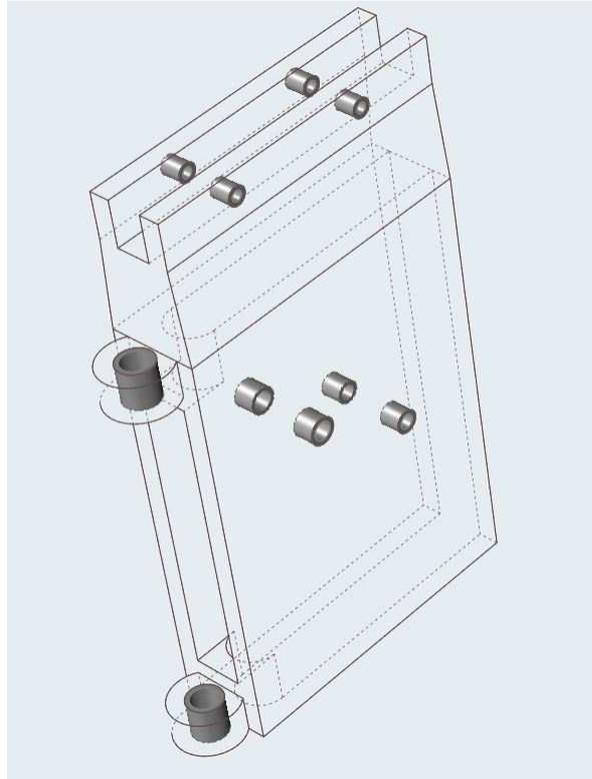


Figura 40: Sedi per viti e perni che costituiscono la zona di non design space

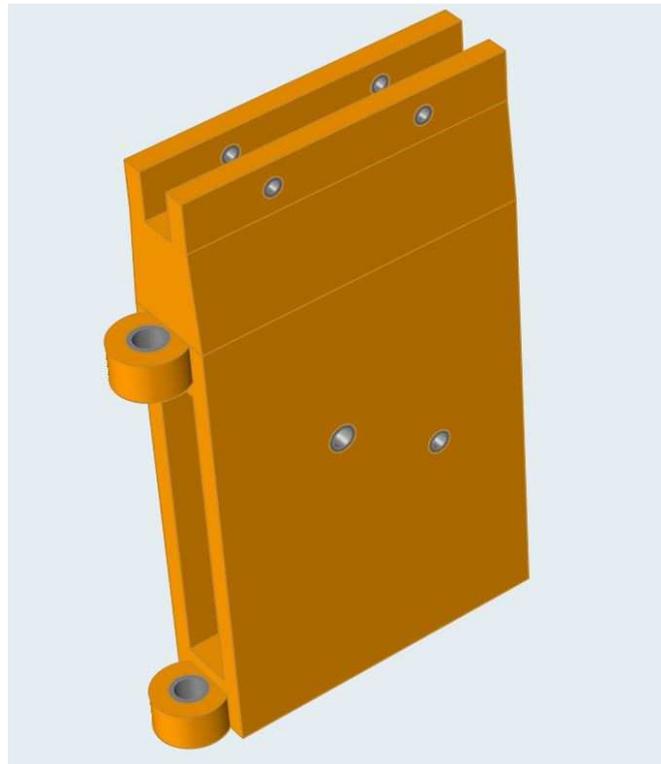


Figura 41: In giallo la zona di design space; in grigio quella di non design space

Una volta stabilita l'area di design space, è necessario supportare il componente. Si applicano quindi i vincoli di supporto alla struttura, schematizzabile come degli appoggi. Precisamente si impone un supporto fisso per i 4 fori che sorreggono la barra del timone (Fig.42), mentre per i 2 fori sedi degli agugliotti sono stati scelti dei supporti con il grado di libertà di rotazione intorno all'asse y libero, per permettere alla mastra di ruotare solidariamente alla barra e al timone (Fig. 43).

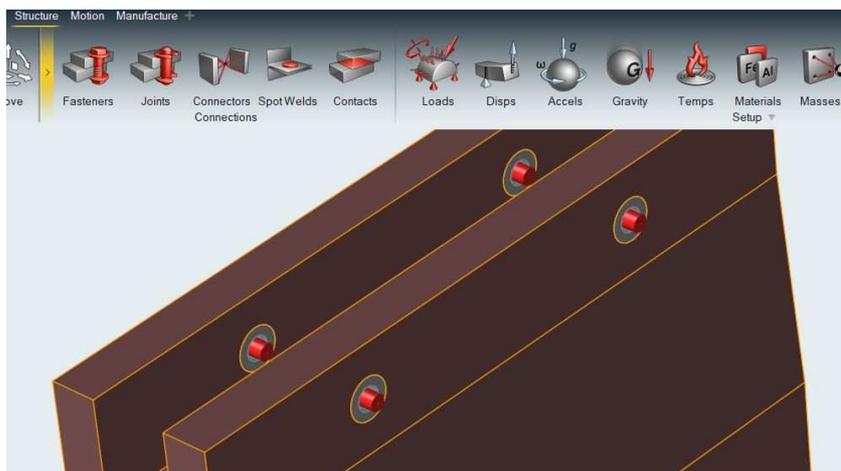


Figura 42: Supporti per i fori di fissaggio della barra alla mastra

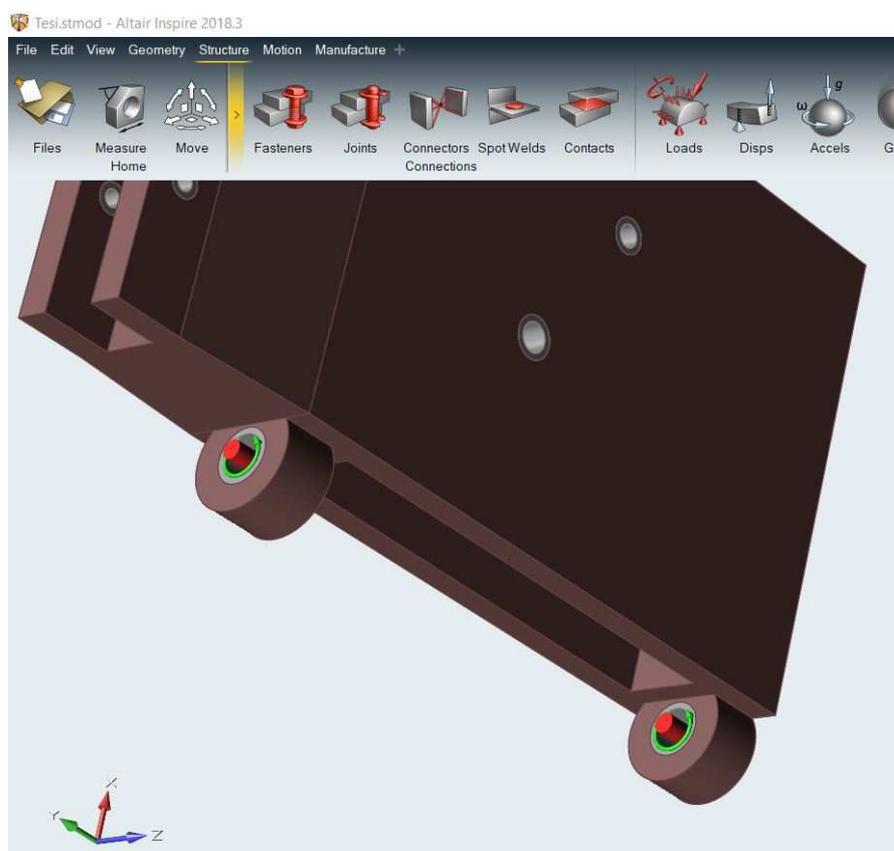


Figura 43: Supporti per i fori in cui passano gli agugliotti

Tutti i supporti utilizzati sono di tipo “User Defined”, cioè cedevoli e non di tipo “Default” come invece suggeriva il software, perché la seconda tipologia di supporti corrisponde a vincoli rigidi e il caso di vincoli cedevoli è più vicino al caso reale.

Uno step fondamentale per la progettazione con ottimizzazione topologica è l’applicazione dei carichi.

Per determinare le sollecitazioni a cui è sottoposta la mastra, bisogna considerare che essa è solidale al timone e dunque le forze applicate al timone avranno effetto anche sulla mastra. I valori delle sollecitazioni sono stati forniti dall’area fluidodinamica del PoliTO Sailing Team, tramite un report in pdf contenente i dati fluidodinamici per il dimensionamento della mastra. Il team di fluidodinamica ha utilizzato le analisi CFD, eseguite con Star-CMM+ per ricavare:

- Massima portanza e massima resistenza agente sul timone;
- Le condizioni in cui queste forze sono massime;
- La posizione del centro di pressione.

Dall’analisi svolta si evidenzia come le condizioni di massima portanza sono identificate a:

- Una velocità della barca pari a $v \cong 8$ m/s;
- Un angolo di attacco o incidenza pari a $\alpha \cong 14^\circ$.

In queste condizioni, si è stimata:

- Una massima portanza circa pari a $L \cong 1500$ N (forza di lift rappresentata in Figura 44);
- Una massima resistenza circa pari a $D \cong 300$ N (forza di drag presente in Figura 44);
- La posizione del centro delle pressioni a $6 \div 7$ cm dal bordo di attacco.

In Figura 44 è illustrato lo schema delle forze applicate sul timone di una barca a vela.

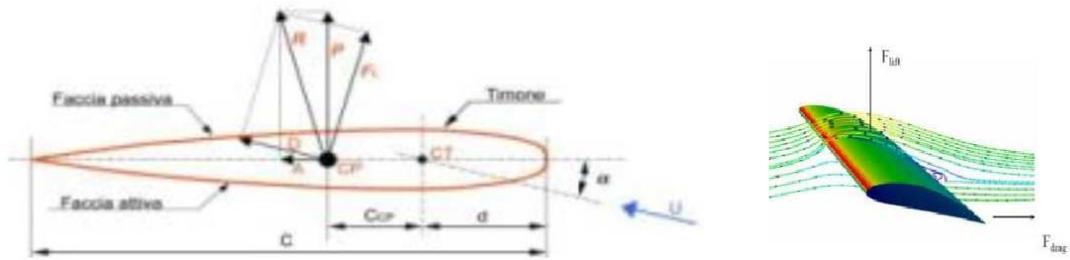


Figura 44: Forze applicate sul timone di una barca a vela [24]

La quota in verticale, lungo l'asse y, del centro delle pressioni è stata calcolata considerando il centro delle forze della parte di timone sommersa in acqua più o meno a metà; mentre la quota lungo x su, indicazione dell'area fluidodinamica, si è considerato un valore alla mezzeria dell'intervallo fornito, cioè 65 mm. In Figura 45 sono illustrate le quote del centro delle pressioni. Il punto C in rosso indica il centro delle pressioni.

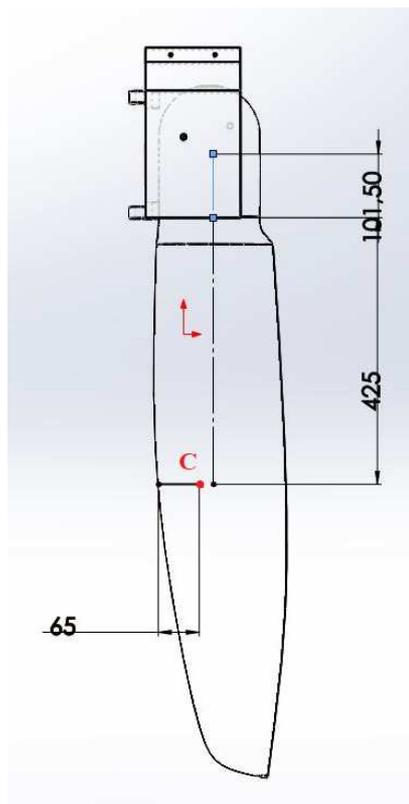


Figura 45: Quote del centro delle pressioni

Si sono applicate allora queste forze alla mastra sul software Inspire, utilizzando delle forze a distanza collegate alla struttura da connettori flessibili. Anziché calcolare la distribuzione

di coppie che la massima portanza e resistenza provocano sul componente, Inspire si serve di questi connettori: è sufficiente posizionare le forze alla coordinata del centro delle pressioni e collegarli alla mastra con dei connettori. Precisamente, le forze sono state collegate alla superficie interna dei 2 fori centrali, sede della vite di fissaggio e del perno rimovibile (Fig. 46).

In aggiunta alla portanza massima (lift) e resistenza massima (drag), si è considerato anche il peso del timone di circa 5 kg. Quindi, si è aggiunta una forza di circa 50 N, avente punto di applicazione sempre nel punto C (Fig. 47).

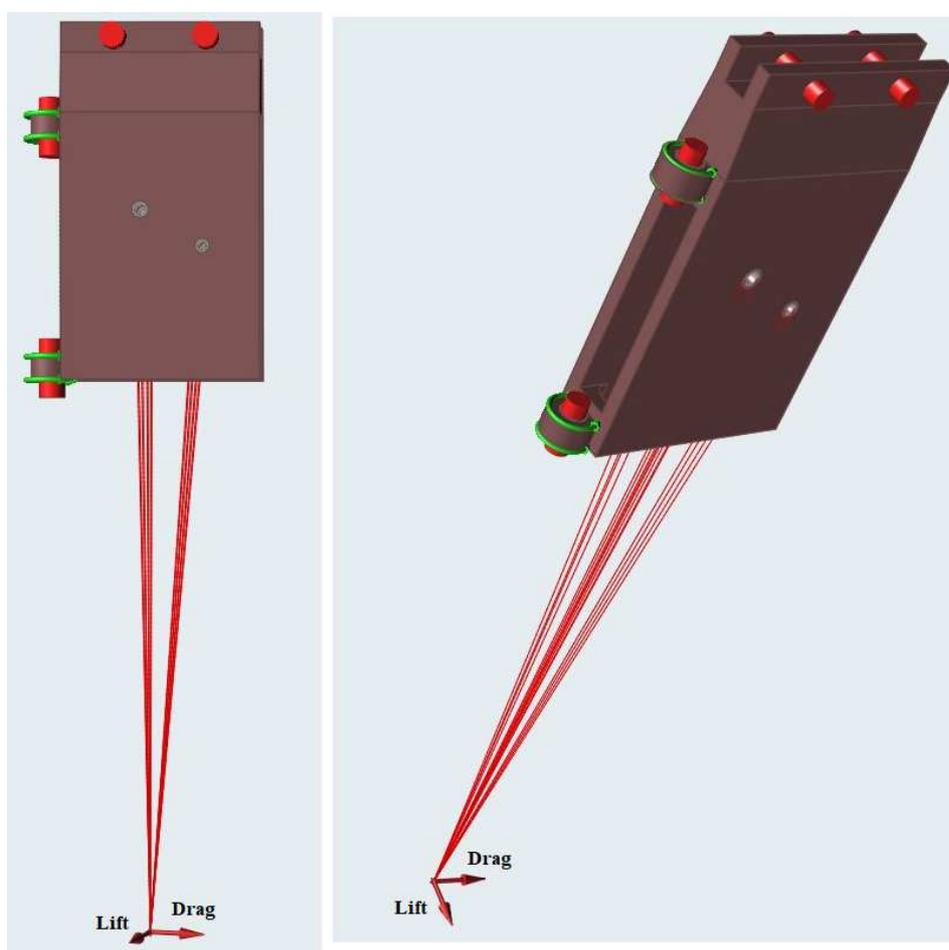


Figura 46: Forza di lift e drag collegate ai fori di vite di fissaggio e perno rimovibile con dei connettori



Figura 47: Load Case 1, aggiunta della forza peso del timone in giallo

La Figura 47 rappresenta il primo Load Case, cioè la prima configurazione di carico considerata sul timone, e di conseguenza sulla mastra, comprendente la forza di lift, quella di drag e la forza peso del timone stesso. Nel capitolo precedente, però, si è specificato che il timone sia basculante e ruoti nel piano verticale longitudinale attorno alla vite di fissaggio centrale. Ergo, è necessario considerare una seconda configurazione di carico, quando il timone assume la posizione orizzontale ed è sollevato. In questo caso, che costituisce il secondo Load Case, agisce solamente la forza peso del timone, in quanto quest'ultimo viene sollevato quando la barca è ferma, solitamente emerge dall'acqua e non agiscono altre forze. L'intensità della forza peso del timone è la stessa del Load Case precedente, ovvero 50 N. In Figura 48 è mostrato il secondo Load Case, in cui agisce solamente la forza peso del timone orizzontale. Il software, durante le operazioni di ottimizzazione topologica, tiene conto chiaramente di entrambe le configurazioni di carico.

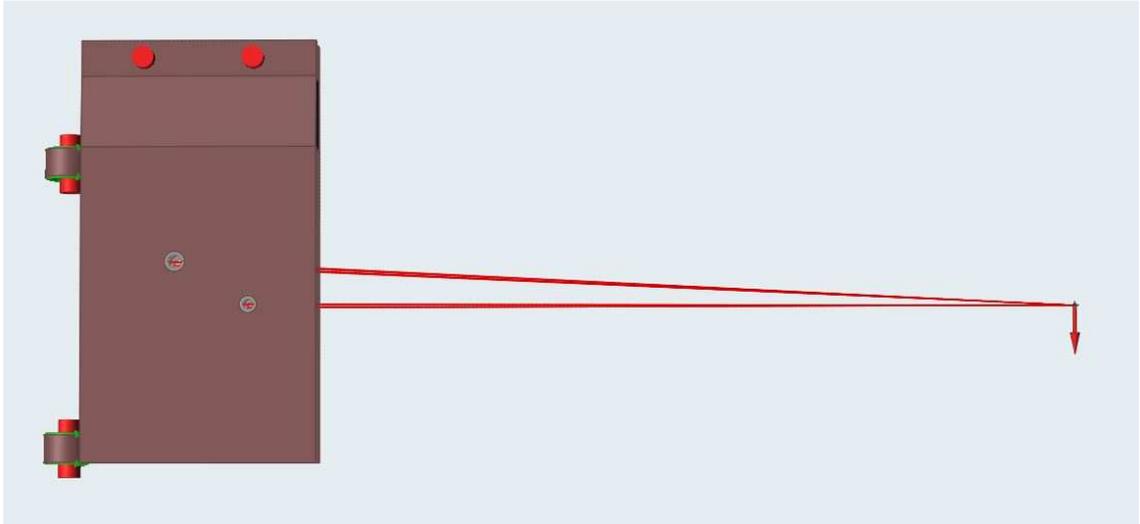


Figura 48: Load Case 2 comprendente solamente la forza peso del timone in posizione orizzontale

Il prossimo step, per completare tutti i settaggi della preparazione del modello all'ottimizzazione topologica, è quello di imporre i vincoli di forma.

I vincoli di forma sono quei vincoli geometrici quali piani di simmetria oppure piani necessari per facilitare la fase produttiva, come ad esempio un piano di apertura di uno stampo, se il componente è fabbricato per stampaggio ad iniezione, o il piano di lavoro su cui cresce il componente se prodotto in additive. Per la realizzazione della mastra, si è scelto il piano di simmetria coincidente con il piano verticale longitudinale, passante per la mezzeria del componente (Fig. 49). Questo per far sì che l'ottimizzazione topologica, e quindi il componente finale, risulti simmetrico al piano verticale.

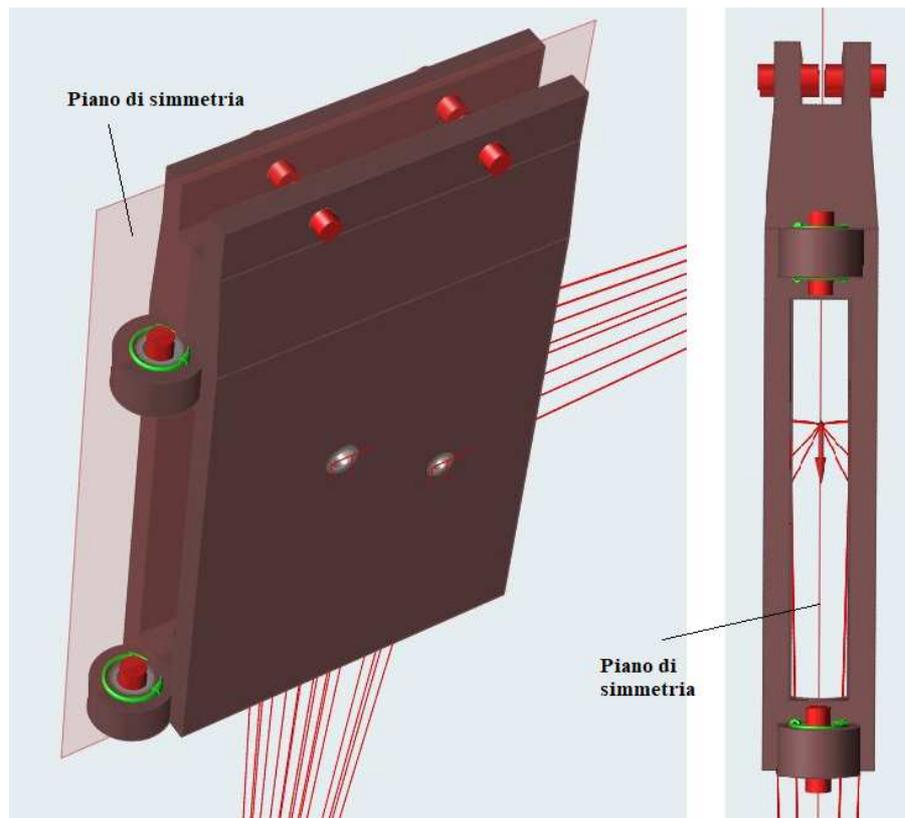


Figura 49: Piano di simmetria scelto come vincolo di forma

Poiché la mastra sarà prodotta in additive manufacturing, è fondamentale la scelta del piano di lavoro su cui crescerà layer dopo layer durante la lavorazione.

La scelta di questo piano di lavoro è importante per vari motivi:

- Innanzitutto, selezionando un determinato piano, si stabilisce già preventivamente l'orientamento del componente che verrà prodotto per additive manufacturing. L'ottimizzazione, quindi, avverrà tenendo conto di come la mastra sarà orientata in macchina e questo facilita notevolmente il lavoro nelle fasi successive di industrializzazione del componente, che si vedranno nei prossimi capitoli;
- Riduce al massimo la presenza di superfici a sbalzo e sporgenze, che dovranno essere supportate in fase di industrializzazione del componente. In generale, sporgenze che formano un angolo con il piano di lavoro inferiore a 45° vanno supportate. Se l'angolo invece risulta maggiore di 45° la struttura sarà autosupportante e non necessiterà di supporti (Fig. 50), con vantaggi dal punto di vista della finitura superficiale, costi e operazioni di post processo.

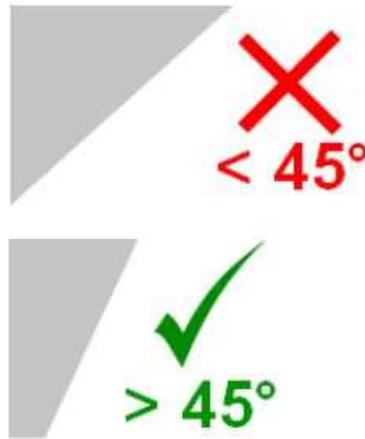


Figura 50: Superfici a sbalzo e superfici autosupportanti [18]

Il software Inspire, durante l'ottimizzazione, terrà quindi conto delle superfici del componente rispetto al piano di crescita scelto e farà in modo che siano maggiori di 45° . Questa regola può variare a seconda del materiale [18] [25].

Selezionare il piano di crescita già in fase di ottimizzazione topologica, permette una notevole riduzione di tempi, costi e operazioni di post processo nella fase di industrializzazione e produzione di un componente.

Per la mastra sono state fatte più simulazioni iterative di ottimizzazione topologica, e tra i parametri variati rientra anche la scelta del piano: i 2 piani scelti per le prove di ottimizzazione sono stati i 2 perpendicolari al piano verticale longitudinale, situati uno sopra il componente ed uno al di sotto, considerando quest'ultimo in posizione verticale (Fig.51). Si vedrà, poi, nel prossimo paragrafo quale dei 2 versi di crescita è stato scelto per la fabbricazione della mastra, come risultato ottimale.

Prima di passare alla vera e propria ottimizzazione topologica, è necessario effettuare prima un'analisi delle sollecitazioni del design preliminare per assicurarsi che resista alle forze imposte. Dai risultati dell'analisi si nota che non ci sono problemi in questo senso: il componente resiste senza problemi in quanto il fattore di sicurezza è abbondantemente maggiore di 3 in tutta la struttura e lo spostamento massimo è inferiore al millimetro (Fig.52).

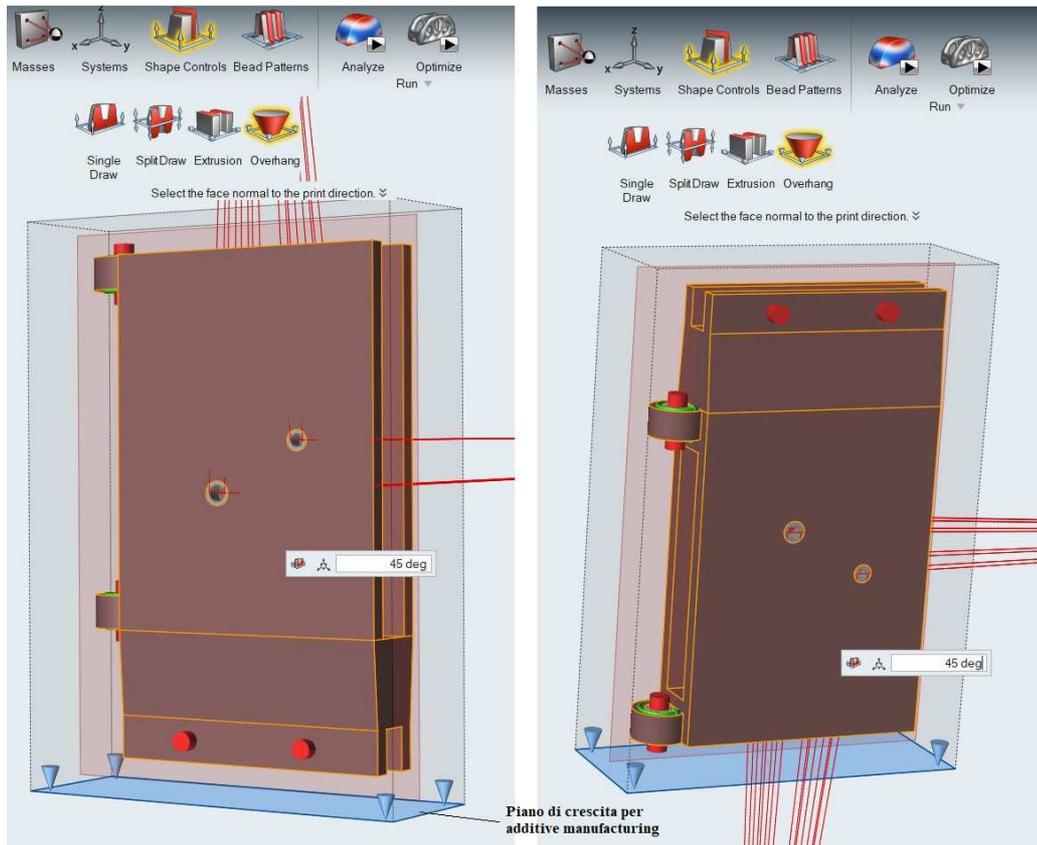


Figura 51: I 2 piani di crescita utilizzati per le prove iterative di simulazione di ottimizzazione topologica

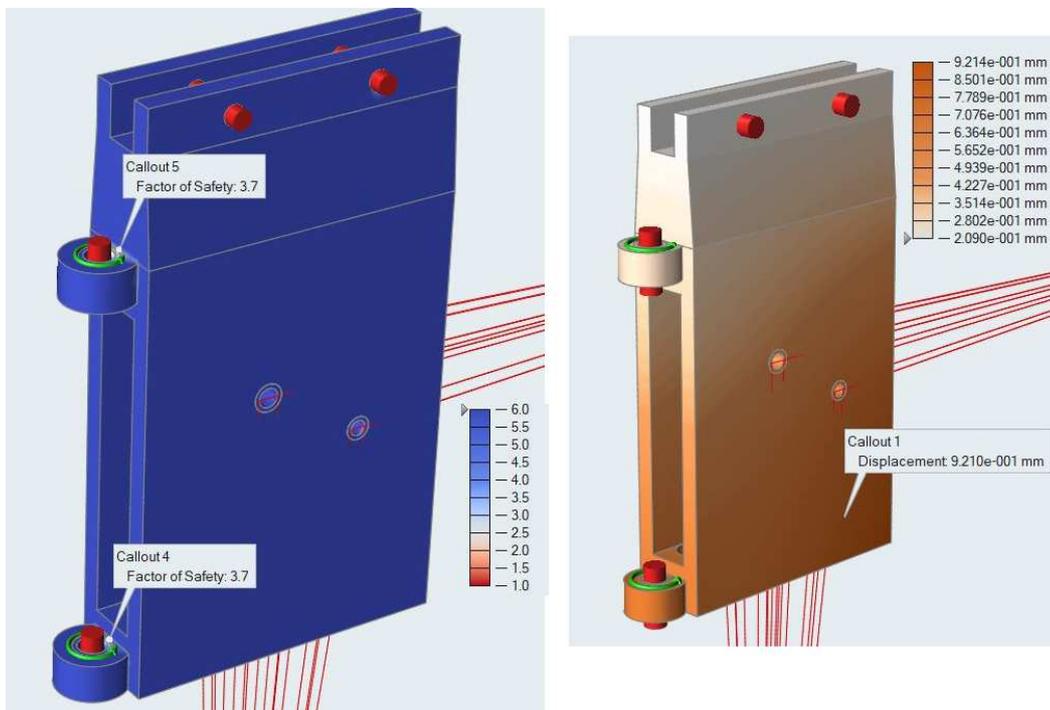


Figura 52: Risultati analisi delle sollecitazioni del design preliminare: a sinistra l'andamento del fattore di sicurezza, a destra lo spostamento massimo

Simulazioni di ottimizzazione topologica e risultati

Si procede con l'ottimizzazione topologica della mastra per il timone. Gli obiettivi che è possibile raggiungere con l'ottimizzazione topologica sono:

- Massimizzare la rigidezza;
- Minimizzare la massa;
- Massimizzazione della frequenza.

Si sono fatte varie simulazioni iterative conseguendo gli obiettivi di massimizzare la rigidezza e minimizzare la massa. Nel primo caso, è necessario impostare una percentuale di massa, che indica la percentuale della massa totale del design space iniziale: questa percentuale costituirà la massa approssimativamente del risultato ottimizzato; nel secondo caso, bisogna imporre un fattore di sicurezza. In Figura 53 sono presenti le tabelle di impostazione dell'ottimizzazione per entrambi gli obiettivi.

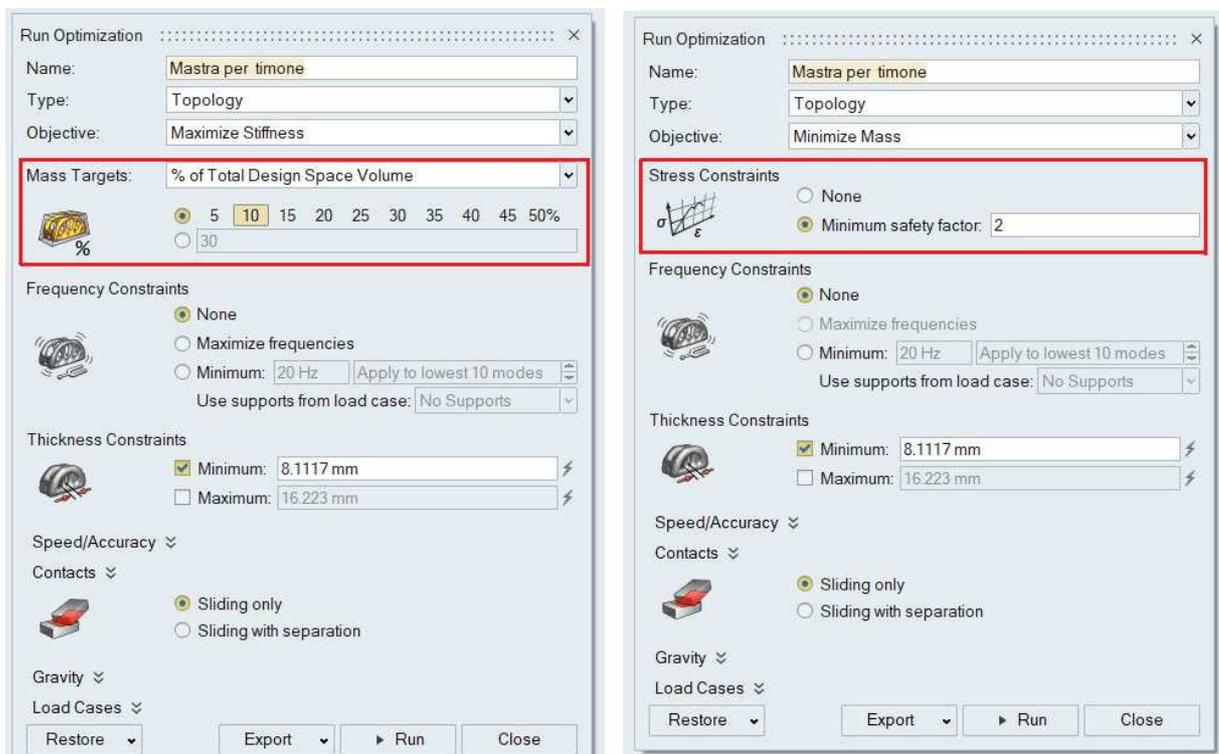


Figura 53: Finestre di impostazione dell'ottimizzazione topologica con l'obiettivo di massimizzare la rigidezza (a sinistra) e minimizzare la massa (a destra)

Tutte le prove di simulazione sono state effettuate tenendo costanti la percentuale di massa per quelle il cui obiettivo è la massimizzazione della rigidità, il fattore di sicurezza per le prove di minimizzazione della massa e il vincolo di spessore minimo di default per entrambe. Non si sono imposti invece vincoli di frequenza.

Sono state fatte numerose prove di simulazione combinando vari parametri e vincoli, ma le 2 più significative sono quelle rappresentate in Figura 54 e Figura 55.

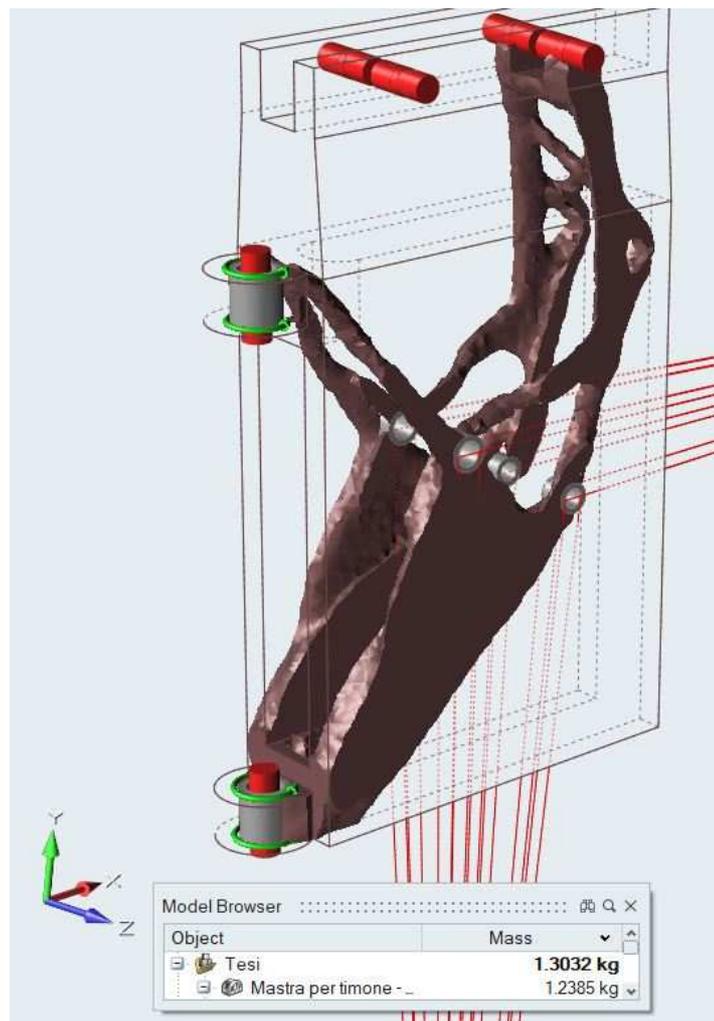


Figura 54: Simulazione di ottimizzazione topologica con obiettivo di minimizzare la massa

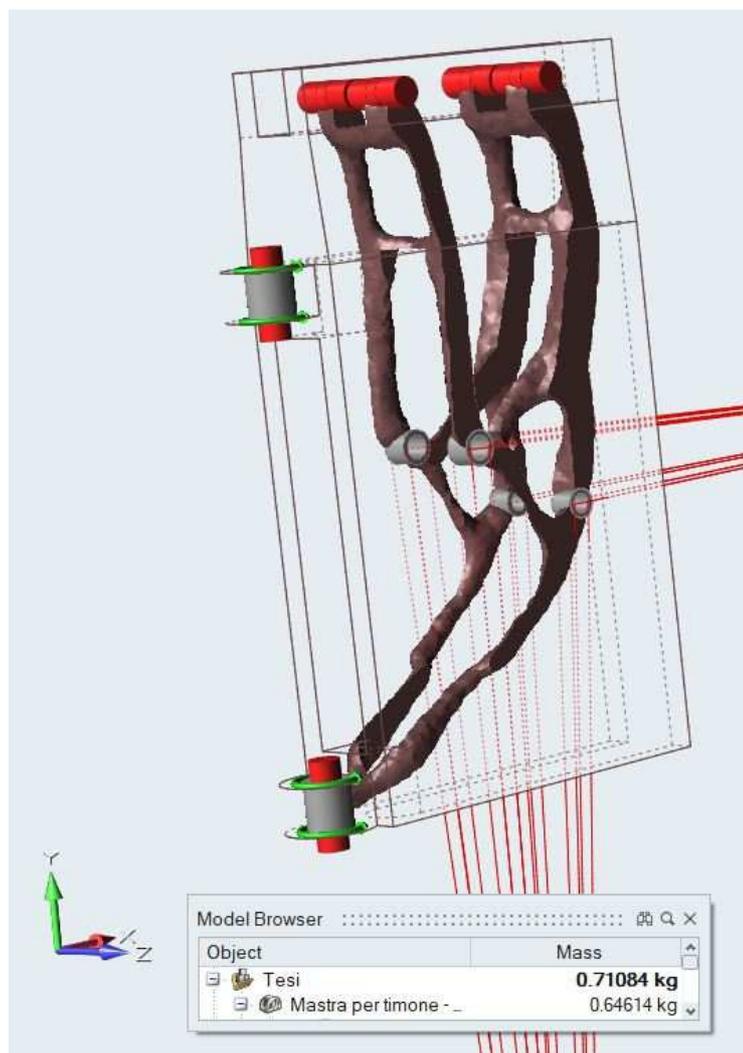


Figura 55: Simulazione di ottimizzazione topologica con obiettivo di massimizzare la rigidezza

In tabella 3 sono riportati i parametri e le scelte di vincolo che hanno portato al risultato in Figura 54. In tabella 4, invece, ci sono quelli che hanno portato al risultato in Figura 55.

Obiettivo simulazione	Min Mass
Piano di crescita	(0, 1, 0)
Piano di simmetria	(0, 0, 1) [<i>piano verticale longitudinale</i>]
Fattore di sicurezza	2
Vincolo di spessore minimo	Default (8.11 mm)

Tabella 3: Parametri e scelte progettuali di vincolo utilizzate per l'ottimizzazione minimizzante la massa

Obiettivo simulazione	Max Rig
Piano di crescita	(0, -1, 0)
Piano di simmetria	(0, 0, 1) [<i>piano verticale longitudinale</i>]
% massa sulla totale	10%
Vincolo di spessore minimo	Default (8.11 mm)

Tabella 4: Parametri e scelte progettuali di vincolo utilizzate per l'ottimizzazione massimizzante la rigidezza

Per completezza, sono state effettuate anche le analisi delle sollecitazioni di entrambe le soluzioni per poter confrontare oltre al peso, fattore fondamentale per l'applicazione del componente, anche lo spostamento massimo e il fattore di sicurezza, indicante le parti della struttura che si avvicinano allo snervamento. L'analisi è stata sviluppata sempre con il software solidThinking Inspire ed è stata imposta come dimensione minima dell'elemento della mesh 3 mm. In Figura 56 sono rappresentati i risultati dell'analisi relativi alla soluzione ottimale minimizzante la massa; in Figura 57, invece, vi sono quelli relativi a quella massimizzante la rigidezza.

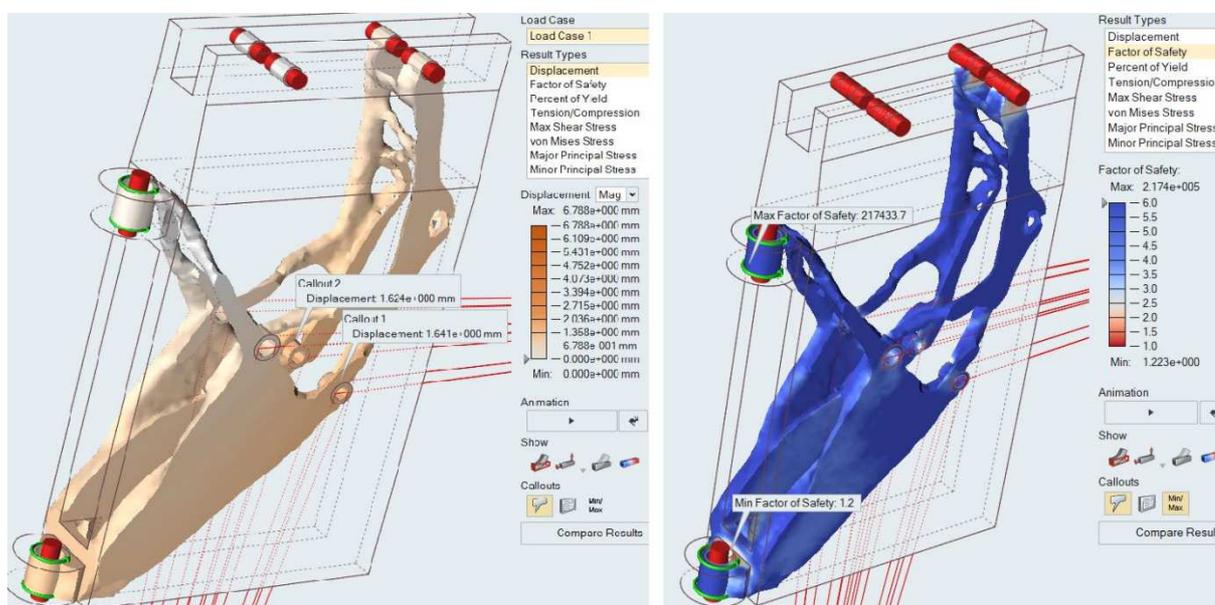


Figura 56: Risultati analisi delle sollecitazioni per la soluzione di ottimizzazione minimizzante la massa; a sinistra la rappresentazione grafica dello spostamento massimo; a destra quella relativa al fattore di sicurezza

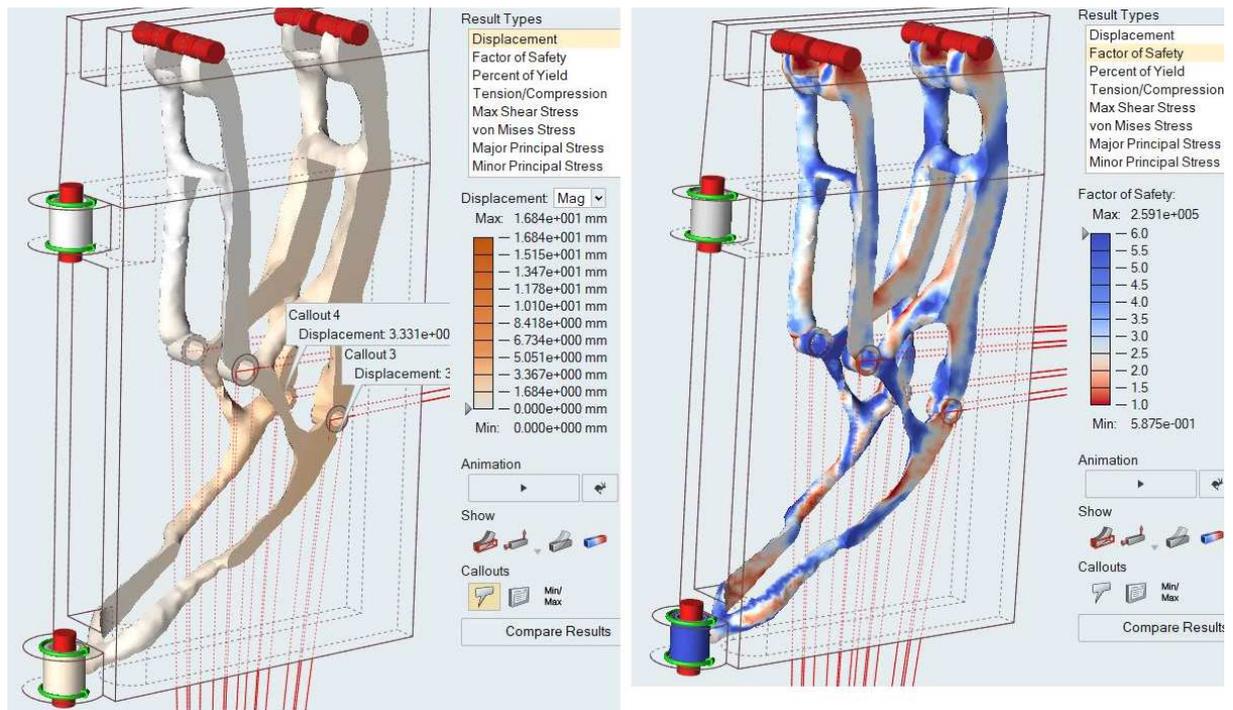


Figura 57: Risultati analisi delle sollecitazioni per la soluzione di ottimizzazione massimizzante la rigidezza; a sinistra la rappresentazione grafica dello spostamento massimo; a destra quella relativa al fattore di sicurezza

In tabella 5 ci sono i dati di massa, spostamento massimo e fattore di sicurezza relativi alla soluzione di ottimizzazione che minimizza la massa; in tabella 6 quelli della configurazione che massimizza la rigidezza.

Massa (kg)	1.303
Spostamento massimo (mm)	1.64
Fattore di sicurezza minimo	1.2

Tabella 5: Valori di massa, spostamento massimo e fattore di sicurezza relativi alla soluzione minimizzante la massa

Massa (kg)	0.711
Spostamento massimo (mm)	3.38
Fattore di sicurezza minimo	0.7

Tabella 6: Valori di massa, spostamento massimo e fattore di sicurezza relativi alla soluzione massimizzante la rigidezza

Dal confronto delle due analisi, si nota come la soluzione di ottimizzazione topologica massimizzante la rigidezza risulti più leggera della sua concorrente (0.711 kg), ma al tempo

stesso ha un fattore di sicurezza critico e uno spostamento massimo più del doppio di quello minimizzante la massa (3.38 mm vs 1.64 mm). Nonostante ciò, si è deciso di prendere come fattore discriminante principale la massa e poi andare a lavorare accuratamente su fattore di sicurezza e spostamento massimo nella fase successiva di progettazione riguardante la creazione delle Polynurbs. Si è presa, dunque, come riferimento la soluzione di ottimizzazione massimizzante la rigidità, che, però, contemporaneamente minimizza anche la massa.

Creazione delle Nurbs

Una volta stabilita la configurazione ottimale consigliata dal software, è necessario costruire la struttura della mastra vera e propria, in quanto le ottimizzazioni viste nel paragrafo precedente, indicano solamente le zone del componente in cui è necessario collocare massa, ma non fornisce la quantità di massa necessaria. Fare ciò è compito del progettista, nella fase di creazione delle Polynurbs.

SolidThinking Inspire, nella sezione “Geometry” della barra degli strumenti, ha le funzioni Polynurbs che consentono agli utenti di trasferire più rapidamente e più facilmente rispetto alla modellazione CAD tradizionale, progetti ottimizzati in prodotti fabbricabili inserendo i risultati della topologia con la geometria Nurbs. Queste ultime sono una rappresentazione matematica della geometria 3D, le quali definiscono accuratamente qualunque forma. Le superfici che si creano sono suddivise in patches di 4 lati ciascuna, come mostrato in Figura 58. Grazie all’interfaccia user-friendly del software, è possibile modificare, muovere, ruotare, ingrossare, e tagliare come si vuole, inserendo massa dove il progettista ritiene necessario. In questo modo, pian piano, si sono costruite le prime Nurbs (Fig.59) seguendo il risultato dell’ottimizzazione consigliato da Inspire e nello stesso tempo ispessendo la struttura dove necessario.

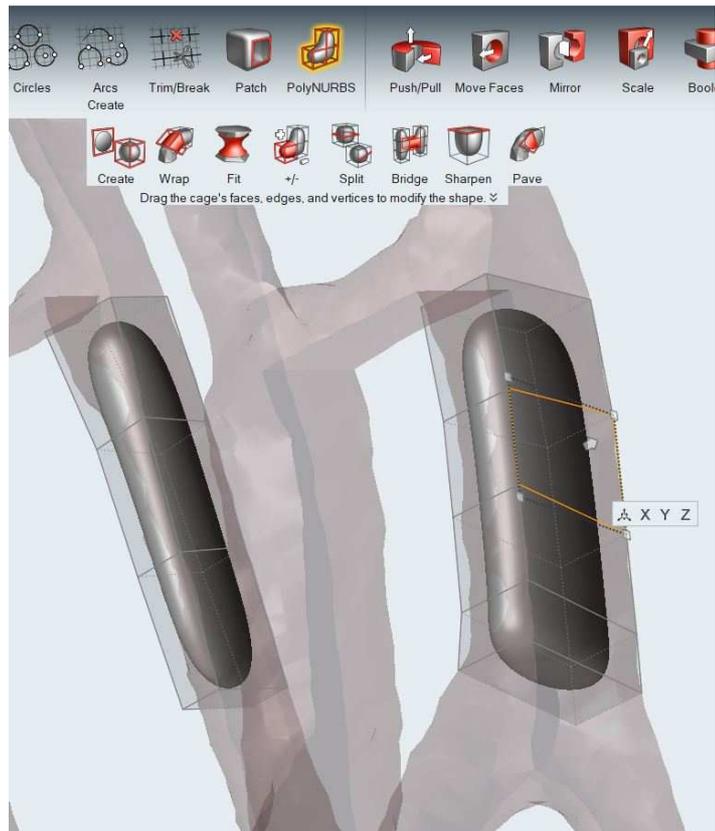


Figura 58: Realizzazione di una prima Nurbs con una patch in evidenza



Figura 59: Realizzazione delle Nurbs seguendo il profilo del risultato definito dall'ottimizzazione

Da notare che il profilo del risultato dell'ottimizzazione ottenuto non è collegato alla boccia per l'agugliotto superiore (vedi Fig. 59). Questo perché il software, dati i carichi imposti, non ha ritenuto necessario mettere massa in quel punto del componente in quanto scarico da sollecitazioni. Però la mastra deve per forza essere connessa alla barca tramite i 2 agugliotti, perciò è necessario aggiungere due bracci simmetrici al profilo ottimale per poter collegare anche la boccia superiore. In Fig. 60 sono mostrate le Nurbs che sono state aggiunte per collegare la struttura alla boccia superiore.

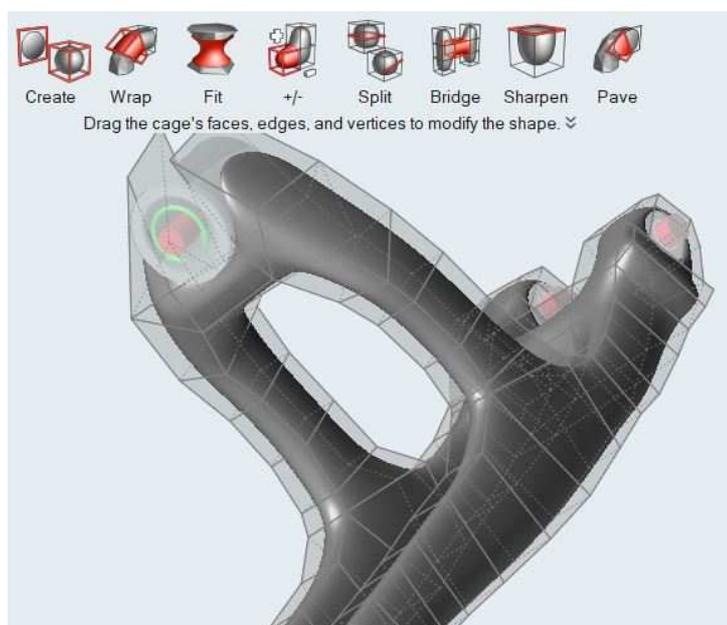


Figura 60: Nurbs aggiunte per poter collegare il profilo ottimale alla boccia superiore

Una parte molto delicata è stata la gestione delle superfici di interfaccia fra la zona di design space e quelle di non design space. Si è cercato di annullare quanto più possibile il distacco fra queste due zone, cercando di evitare spigoli vivi e rendendo la struttura il più tondeggiante possibile. In Figura 61 è illustrato come sono state modellate le superfici in prossimità delle boccole centrali di vite e perno e della boccia inferiore per gli agugliotti. Stessa procedura è stata utilizzata per la boccia superiore e per i fori di fissaggio della barra (Fig. 61).

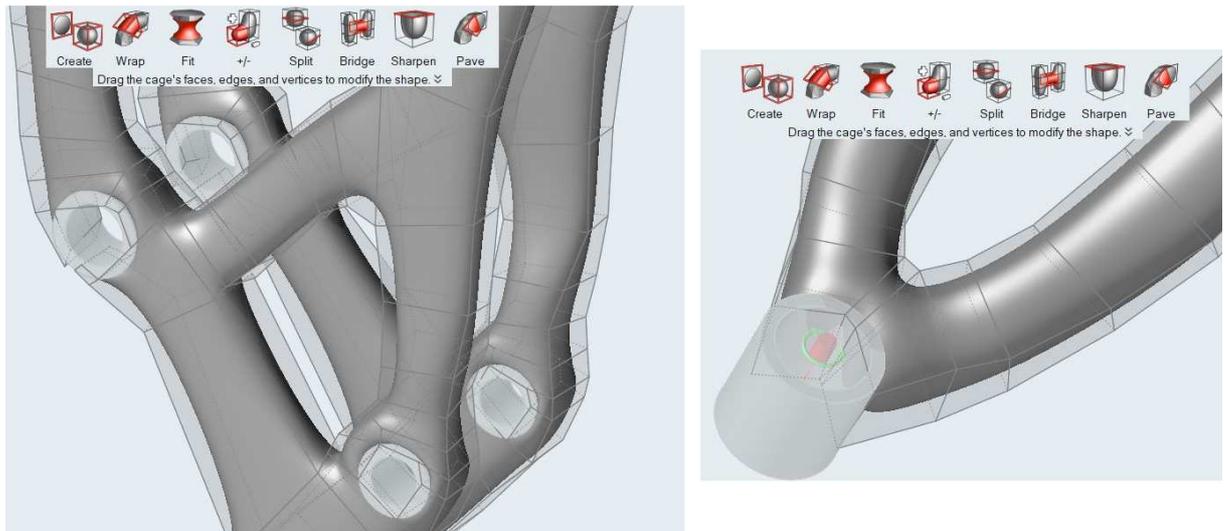


Figura 61: Creazione e modellazione di superfici in prossimità delle zone di non design space



Figura 62: Creazione e modellazione delle superfici in prossimità dei fori di fissaggio per la barra del timone

In seguito, una volta completato il componente con tutte le superfici necessarie, lo si è sottoposto ad un'analisi delle sollecitazioni per scoprire in quali punti il fattore di sicurezza fosse critico e irrobustendo di conseguenza la struttura. Si è monitorato, contemporaneamente, anche lo spostamento massimo, mantenendolo in un range di valori accettabile. Dopo una serie di iterazioni e modifiche in più punti del componente, si è giunti alla forma finale, mostrata in Figura 63.

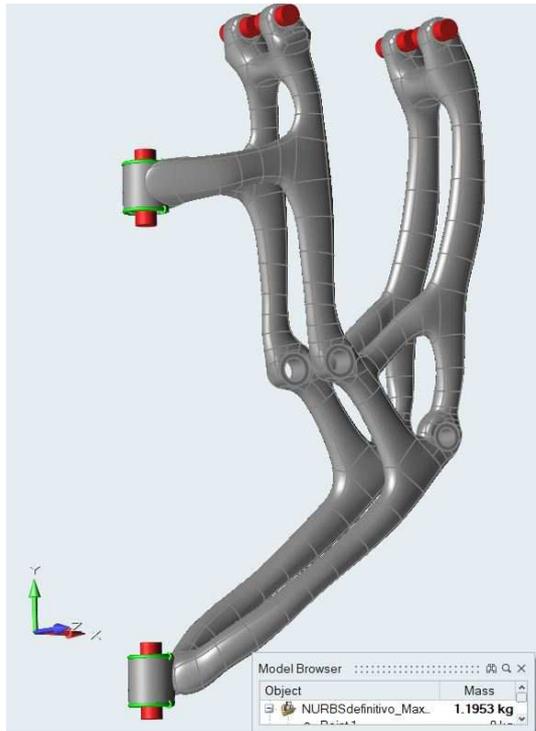


Figura 63: Geometria finale e definitiva della mastra

Come si nota in Figura 63, la massa del componente è notevolmente aumentata da 0,711 kg a 1,195 kg. In Figura 64, si vede meglio il confronto diretto con la soluzione ottimale consigliata da Inspire.

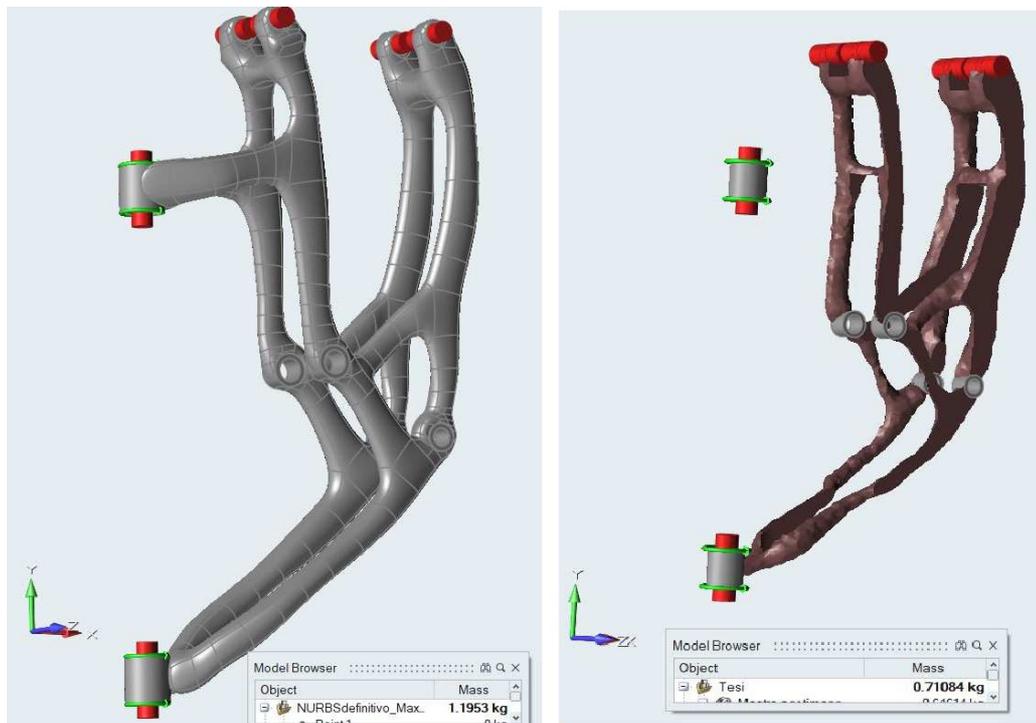


Figura 64: Confronto fra la geometria Nurbs e il profilo di ottimizzazione consigliato dal Inspire

Analisi delle sollecitazioni

Dopo una serie di passaggi iterativi di modifiche e analisi delle sollecitazioni come check, si è definita la geometria finale e subito dopo è stata effettuata la corrispondente analisi delle sollecitazioni. In Figura 65 sono rappresentati i risultati riguardanti il fattore di sicurezza; in Figura 66, invece, quelli focalizzati sullo spostamento massimo. Dai 2 grafici si nota che il fattore di sicurezza è superiore a 1.4 in tutta la struttura e lo spostamento massimo del componente in direzione parallela alla normale del piano verticale longitudinale è di 1,55 mm. Entrambi i risultati sono stati visionati dai membri dell'area fluidodinamica del PoliTO Sailing Team e risultano compresi in un range ritenuto ammissibile. In tabella 7 sono riassunti i risultati significativi del componente definitivo.

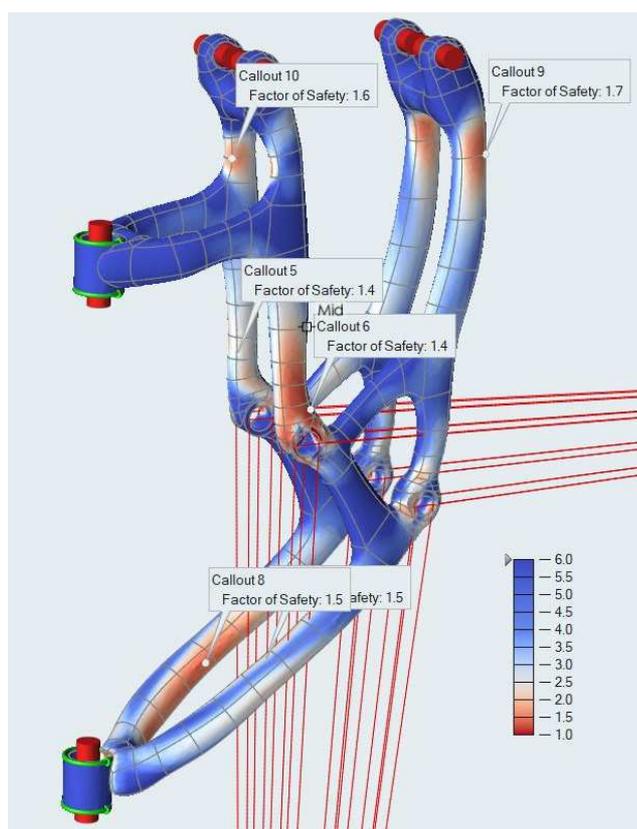


Figura 65: Risultati dell'analisi delle sollecitazioni focalizzata sul fattore di sicurezza

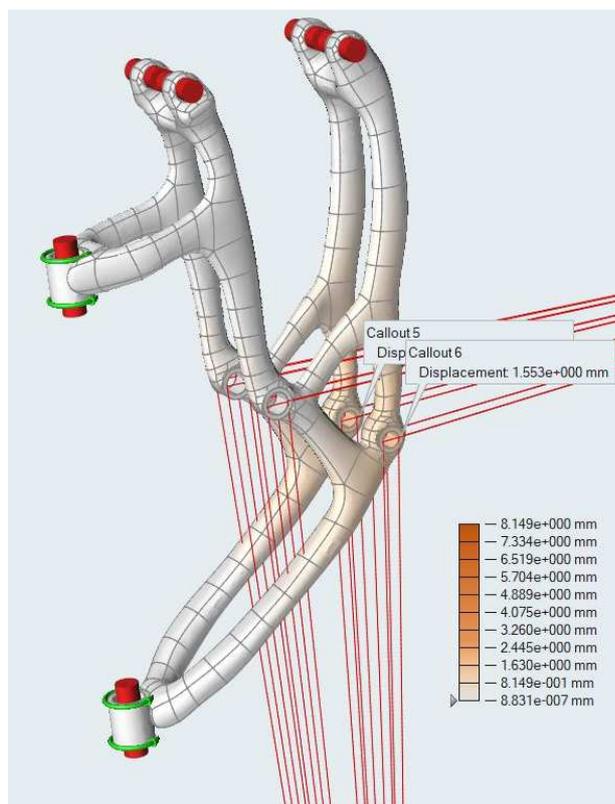


Figura 66: Risultati dell'analisi delle sollecitazioni focalizzata sullo spostamento massimo

Massa (kg)	1.195
Spostamento massimo (mm)	1.55
Fattore di sicurezza minimo	1.4

Tabella 7: Riassunto tabellare dei risultati significativi dell'analisi delle sollecitazioni condotta sul componente definitivo

Una volta completata l'analisi, si è creato il file STL della mastra.

In Figura 67 è presente una foto dell'assieme barra, mastra ottimizzata e timone, sia nel caso di posizione verticale che orizzontale.

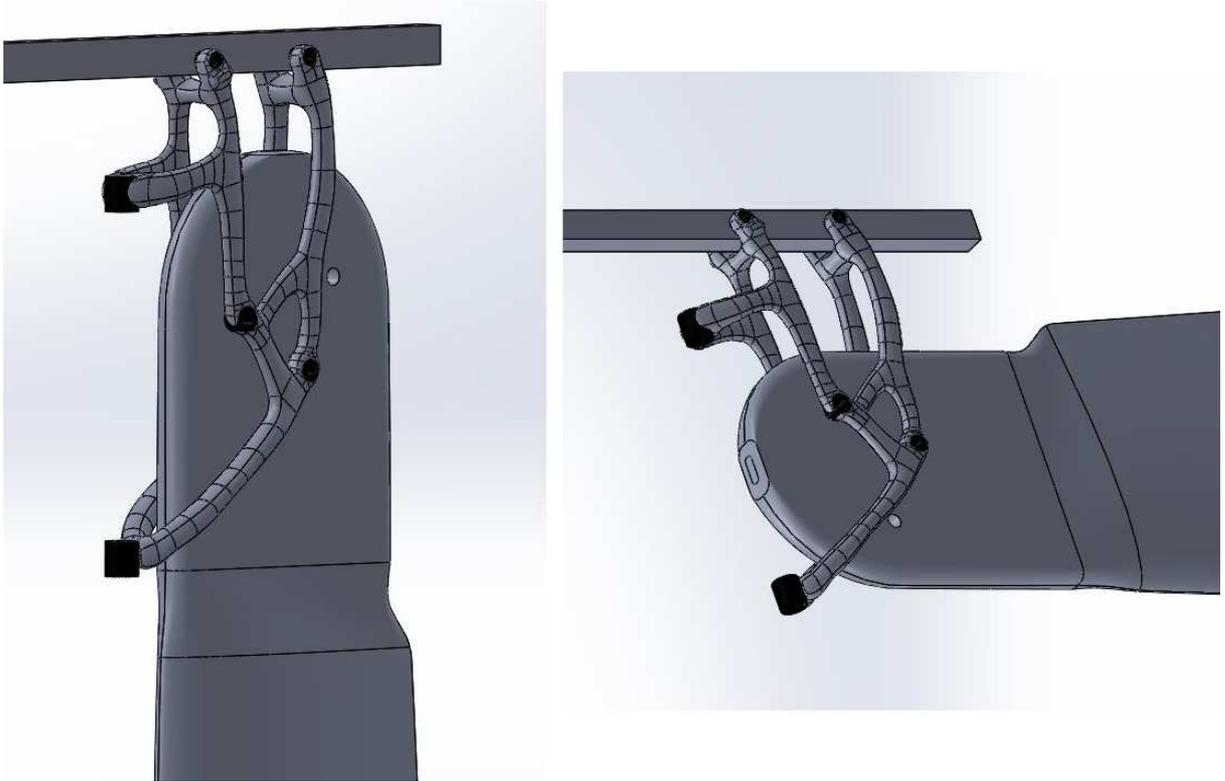


Figura 67: Assieme su Solidworks costituito da barra, mastra ottimizzata e timone; a sinistra il caso di timone in posizione verticale, mentre a destra il caso di timone in posizione orizzontale

Capitolo 5

Fase di Industrializzazione

Il software utilizzato: QuantAM Renishaw

In questo capitolo è descritta la fase di industrializzazione e produzione della mastra. Il software protagonista della fase di industrializzazione è QuantAM Renishaw, un software di preparazione file dedicato ai sistemi di produzione additiva Renishaw [17]. Esso è simile al software Materialise Magics, ma molto più semplice e intuitivo da utilizzare.

QuantAM accetta dati in formato STL e consente di preparare il modello per il processo di produzione additiva. È stato progettato specificatamente per le piattaforme di produzione additiva Renishaw e offre un'integrazione sinergica nel software di controllo macchina, nonché la possibilità di rivedere velocemente e con precisione tutti i build file per i sistemi di produzione additiva Renishaw, inclusi quelli provenienti da pacchetti di terze parti [17].

Le caratteristiche principali del software sono:

- Importazione di un file STL o STEP;
- Orientamento dei componenti;
- Aggiunta di strutture di supporto;
- Modulo di sviluppo materiali, con importazione di dati CSV per preparare matrici di provini con parametri di fusione differenziati;
- Copia e modifica di file materiali;
- Duplicazione, orientamento e posizionamento di più componenti sulla piastra di lavoro;
- • Revisione rapida delle geometrie e del percorso del laser, sezione per sezione;
- Revisione delle singole esposizioni laser entro ogni sezione [17].

QuantAM è, dunque, quel software che fa da intermediario tra il file CAD del componente e il file macchina MTT, grazie al quale è possibile caricare il build in macchina. Fra il CAD e l'MTT ci sono vari step, che sono stati già accennati nel Capitolo 1, e che costituiscono il flusso di processo:

1. Orientamento: posizionamento ottimale del componente;

2. Supporti: applicazione dei supporti necessari;
3. Layout: posizionamento efficiente di più componenti;
4. Revisione: controllo della struttura simulata per successiva esportazione [17].

Al termine di queste operazioni si crea il file macchina MTT e lo si carica direttamente in macchina.

Considerazioni preliminari su orientamento e stress residui

Il workflow per l'industrializzazione del componente inizia dal suo orientamento. Questa fase è fondamentale per tutto il processo produttivo, per vari motivi. Innanzitutto, l'orientamento di un componente influenza tempi di costruzione e costi del build: mettendo un componente in verticale o orizzontale fa variare il numero di layer in cui viene affettato in fase slicing e ciò incide sul tempo di costruzione e sulla quantità di polvere necessaria a realizzarlo. Inoltre, l'orientamento definisce anche le superfici a sbalzo, che non rispettano la regola dei 45° vista nel capitolo precedente. Tali superfici necessitano di supporti e conviene sempre scegliere un orientamento che riduca l'utilizzo di supporti perché lasciano inevitabilmente dei testimoni andando ad inficiare la finitura superficiale del componente [18][19].

Nella fase di progettazione mediante ottimizzazione topologica, si è visto che un orientamento del componente ottimale è stato già scelto, nel momento in cui è stato definito il piano di crescita (Fig. 51). La soluzione ottimale selezionata, su cui in seguito sono state create le superfici Nurbs, è stata concepita impostando un piano di crescita avente normale di coordinate (0, -1, 0), il che implica che la mastra verrà prodotta in posizione verticale a testa in giù (Fig. 68). Tale posizione minimizza la creazione di supporti, anche se ci sono alcuni punti in cui sono inevitabili, come le 2 boccole sede degli agugliotti.

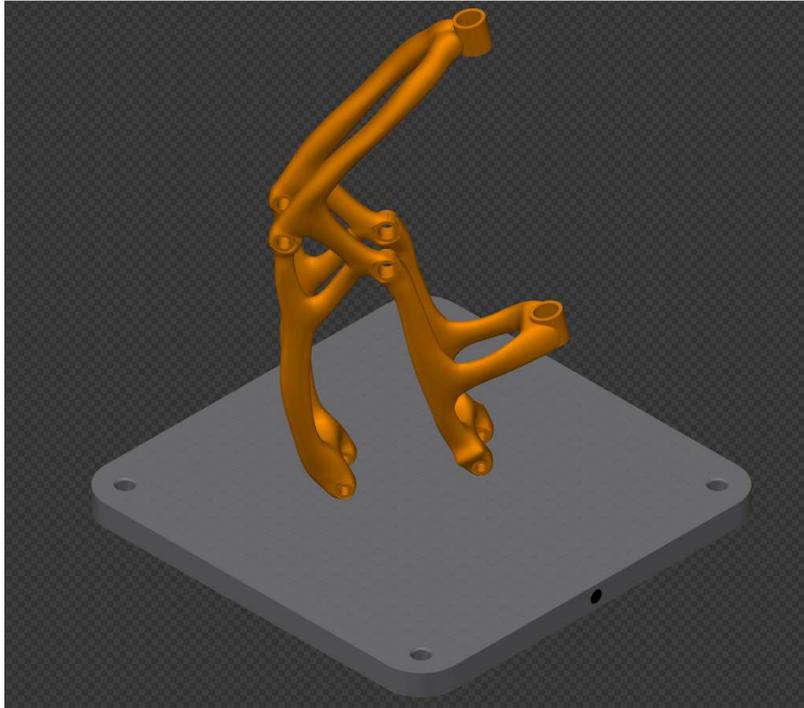


Figura 68: Orientamento di crescita scelto del componente sulla piastra

Aver impostato il piano di crescita già in progettazione, semplifica e velocizza le operazioni di industrializzazione su QuantAM, che si vedranno in seguito.

Un altro aspetto da considerare nell'industrializzazione per fabbricazione additiva di un componente metallico sono le tensioni residue. Queste ultime sono il risultato naturale riscaldamento rapido e raffreddamento inerente al processo di fusione a letto di polvere (LPBF). Ogni nuovo layer viene creato muovendo lo spot del laser sul letto di polvere fondendo lo strato di polvere superiore ed unendolo a quello sottostante. Il calore si diffonde dal pozzo di fusione caldo verso il metallo solido sottostante, e così il metallo fuso si raffredda e solidifica. Tutto ciò avviene molto rapidamente, è una questione di microsecondi. Non appena un nuovo strato di metallo si solidifica e si raffredda sopra lo strato sottostante, si contrae. Il nuovo metallo è vincolato dalla struttura solida sottostante creando delle forze di taglio fra i layer (Fig. 69) [18][19].

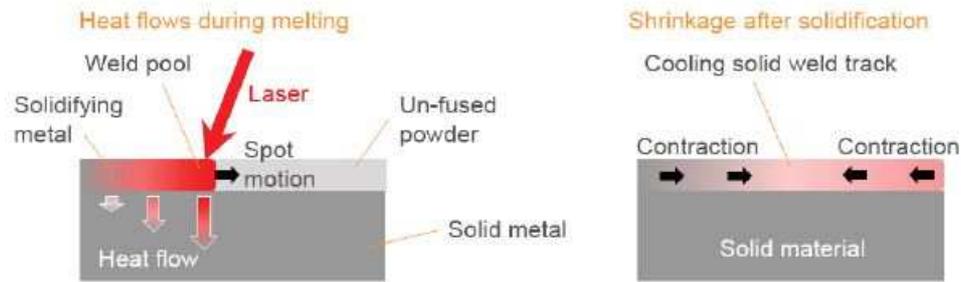


Figura 69: A sinistra la fusione laser di un nuovo strato di polvere; il calore si diffonde nella struttura solida sottostante; a destra lo strato di metallo che una volta solidificato, si contrae e provoca delle forze di taglio con quello sottostante [18]

Le tensioni residue possono essere distruttive: aggiungendosi layer uno sopra l'altro, le tensioni residue si accumulano e possono portare a distorsioni della parte, che si rannicchia letteralmente ai bordi, sollevandosi e distaccandosi dai supporti (Fig. 70).

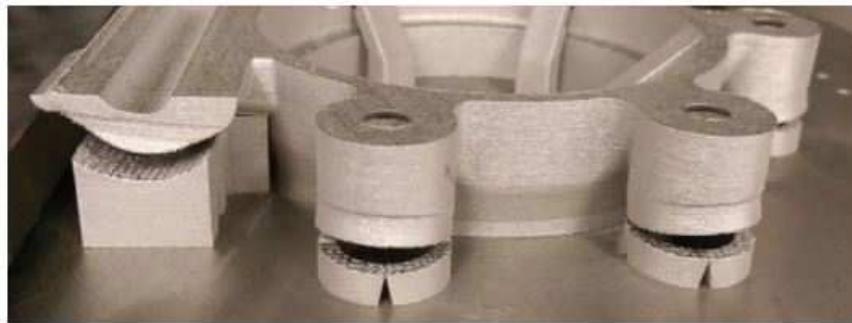


Figura 70: Deformazioni dovute alle tensioni residue [18]

Questi effetti sono più evidenti in componenti con grandi sezioni trasversali, perché le forze di taglio hanno a disposizione una maggiore distanza per agire.

Per minimizzare l'effetto delle tensioni residue interne ci sono vari metodi. Un modo è far variare la strategia di scansione, scegliendo quella più adatta alla geometria del componente. Quando si fonde una sezione, quest'ultima viene riempita da dei tratteggi, cioè dei vettori di scansione del laser. La dimensione di questi vettori influisce sulle tensioni interne: vettori di scansione più brevi generano meno stress residui. Inoltre, è possibile ruotare l'orientamento dei vettori di scansione tra un layer e il successivo in modo che le forze di taglio non siano allineate. In genere, viene utilizzata una rotazione di 67° tra un layer e l'altro. Un'altra tecnica è il riscaldamento della piastra. È possibile, infatti, preriscaldare la piastra di lavoro prima che inizi la lavorazione, effettuando un soak cycle

che porta la piastra alla temperatura di 170°C. [18] In questo caso si cerca di ridurre il gradiente di temperatura fra il pozzo di fusione e il resto della struttura solida sottostante, e di conseguenza lo scambio termico che provoca le tensioni residue interne.

Realizzazione delle strutture supportanti

Si è detto nel precedente paragrafo che la fase di scelta dell'orientamento del componente è fondamentale per tutto il susseguirsi della produzione additiva. L'orientamento migliore dovrebbe minimizzare l'uso di supporti, ma non è possibile, soprattutto per componenti complessi, eliminarli del tutto.

In base all'orientamento scelto per la mastra, visto in Figura 67, le zone da supportare sono quelle evidenziate con una gradazione di colori che va dal giallo al rosso in Figura 71, una vista dal basso, catturata grazie al software QuantAM. Le zone in rosso sono quelle dove è indispensabile la presenza di un supporto.

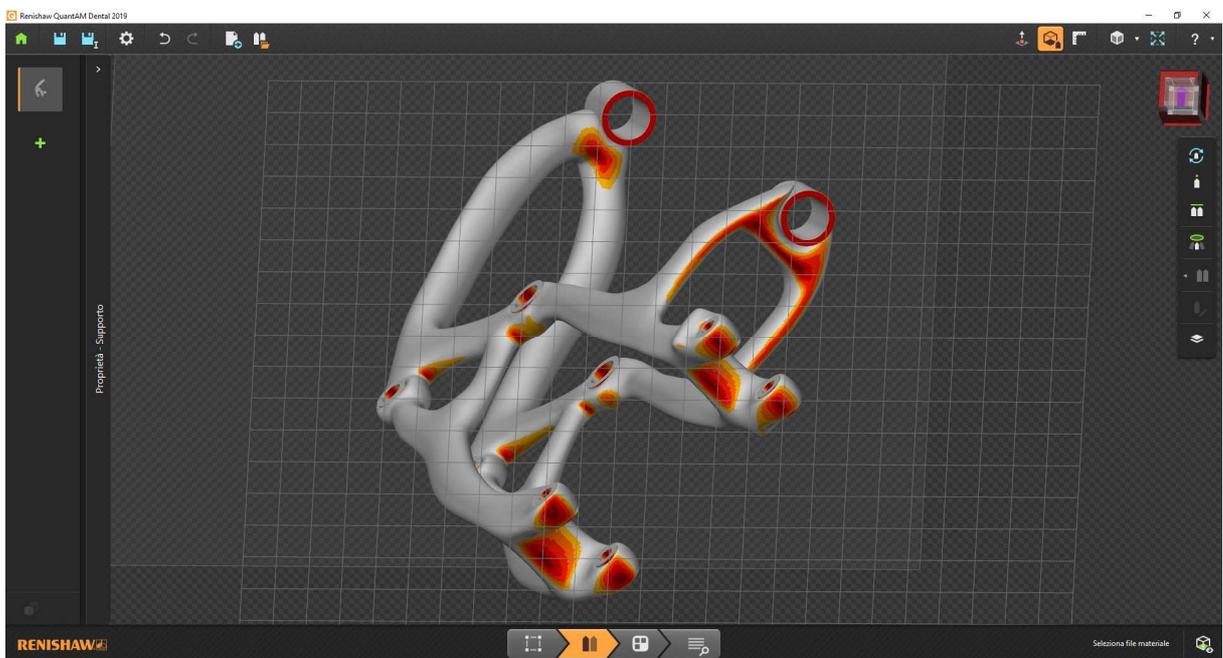


Figura 71: Screen dal software QuantAM; vista dal basso della mastra, evidenziante in rosso le zone che necessitano di supporti

I supporti hanno 3 funzioni principali [18][19]:

- In primis, hanno la funzione di ancorare il modello alla piastra, ma soprattutto quelle parti del componente che crescono a sbalzo e non rispettano la regola dei 45°. Queste parti, infatti, sono fuse senza essere connesse ad una struttura solida sottostante e perciò vengono utilizzati i supporti;
- Inoltre, hanno la funzione di ridurre gli stress residui: durante la progettazione è consigliato evitare spigoli vivi e strutture massive direttamente ancorate sulla piastra di lavoro. È decisamente meglio interporre dei supporti e tra parte massiva e piastra in modo tale da ridurre gli stress;
- Infine, in ultimo, ma assolutamente non per importanza, i supporti fungono da dissipatori di calore. La polvere metallica non fusa è isolante. I supporti sono una via di fuga per il calore che se si accumula può provocare bruciature, che vanno ad inficiare la finitura superficiale, ma soprattutto le caratteristiche meccaniche del componente. Inoltre, tra la zona che sta fondendo e quella già fusa si crea un gradiente di temperatura, che se troppo elevato può portare a stress residui, ma anche distorsioni e deformazioni del pezzo. Far evacuare il calore in maniera efficiente contribuisce a ridurre il manifestarsi di tali difetti.

Ci sono 2 tipologie di supporti: i supporti primari e quelli secondari.

I supporti primari sono quelli sviluppati in ambiente CAD, e sono progettate come strutture sacrificali che verranno rimosse una volta terminata la lavorazione. I supporti secondari, invece, sono quelli generati automaticamente dal software di preparazione build QuantAM Renishaw. I primari garantiscono maggiore solidità, controllo e rigidità rispetto ai secondari. Questi ultimi, infatti, se troppo lunghi, possono deformarsi e non dissipare in maniera efficiente il calore. I primari, invece, sono strutture piene, progettate appositamente su CAD per garantire maggiore stabilità e uno scambio termico più controllato. Le strutture supportanti primarie sono importate nel software di preparazione build in formato STL [18]. In Figura 72 è mostrato uno screen preso da QuantAM, in cui si vedono i supporti secondari generati automaticamente e applicati alle zone rosse, necessitanti di supporti, della struttura. Si nota, come siano molto lunghi, poco rigidi, facilmente deformabili, e non garantiscono un risultato ottimale del componente alla fine della lavorazione.

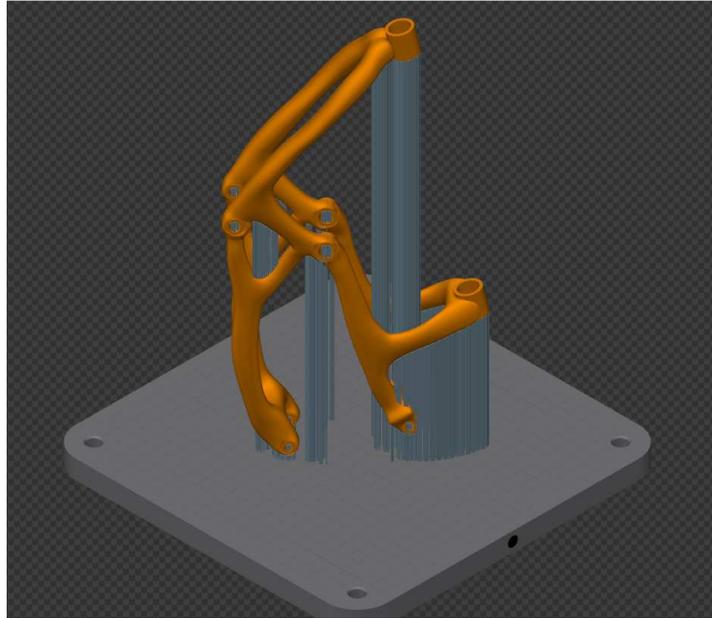


Figura 72: Di colore grigio scuro i supporti secondari generati automaticamente in QuantAM Renishaw

Per questo motivo, sono state realizzate su Solidworks delle strutture supportanti primarie, per supportare in maniera più stabile e controllata le zone critiche del componente e per permettere una dissipazione del calore più efficiente. In Figura 73 è presente l'assieme delle 3 strutture primarie realizzate in ambiente Solidworks, insieme al componente.

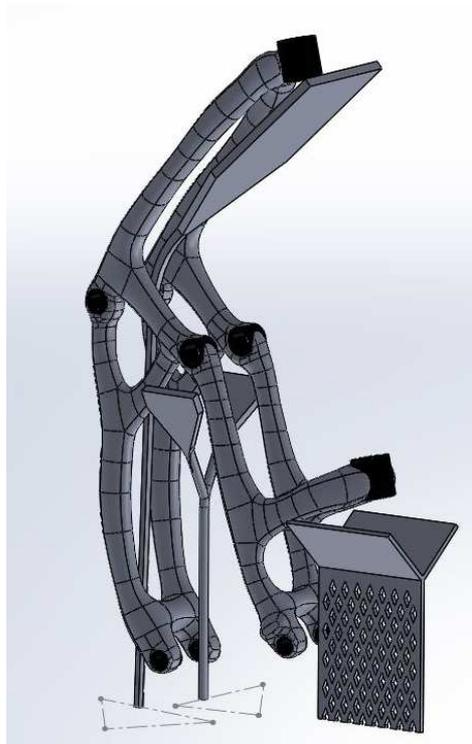


Figura 73: Le tre strutture supportanti primarie progettate su Solidworks

Una volta progettate, è stato creato il file STL e importato sul software QuantAM Renishaw. In seguito, sono stati generati i supporti secondari automatici, che questa volta sono più corti perché ricadono sulle strutture supportanti. In questo modo sono stati creati dei supporti ibridi fra primari e secondari (Fig. 74) che assicurano una struttura stabile, uno scambio termico efficace ed un risultato della lavorazione ottimale. Si nota che le strutture primarie sono dello stesso colore del componente, perché sono strutture solide piene, fuse con gli stessi parametri di fusione della mastra, ma utilizzati solamente come elementi sacrificali.

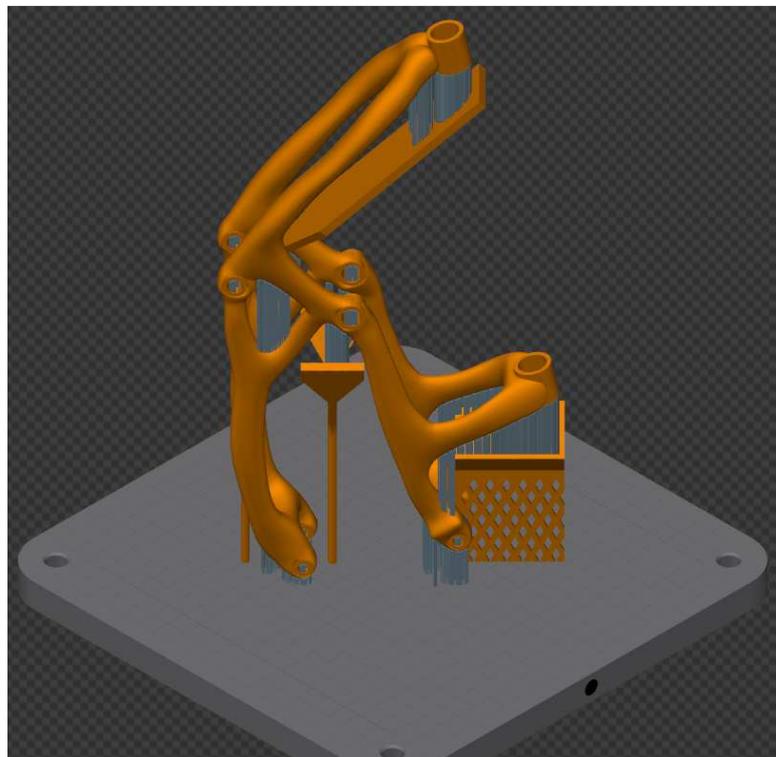


Figura 74: Supporti primari e secondari utilizzati per produrre la mastra

Fasi di gestione del layout e slicing

Una volta creati i supporti, lo step successivo è quello di gestire il layout in QuantAM, cioè stabilire il posizionamento del componente sulla piastra di lavoro. In questo caso, il layout è molto semplice (Fig. 75) in quanto il componente da produrre è uno solo, ma se fossero stati una serie era necessario gestire in maniera efficace lo spazio di lavoro.

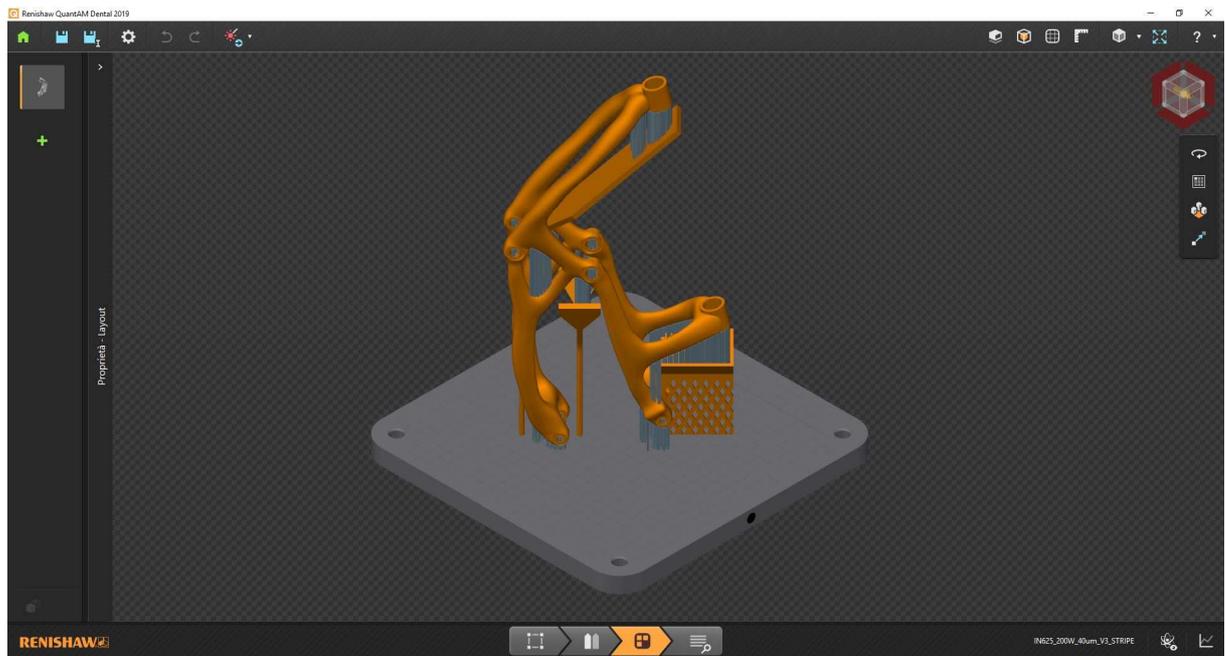


Figura 75: Fase di gestione del layout in QuantAM Renishaw

In seguito, l'industrializzazione procede con l'affettamento del componente, tecnicamente conosciuto come slicing. La mastra è stata suddivisa in 7150 sezioni tagliate con dei piani paralleli alla piastra di lavoro. Inoltre, il software non si limita solamente ad affettare il pezzo, ma simula la fusione del laser sezione per sezione. È in questa fase, infatti, che si impostano i parametri di fusione del laser, ed è possibile, mediante una barra di scorrimento, monitorare come avviene la fusione layer dopo layer (Fig. 76).

Inoltre, è possibile anche simulare la fabbricazione dell'intero componente e stimare un tempo di costruzione virtuale. Per la mastra con le strutture supportanti e i supporti secondari si è stimato un tempo di costruzione di 40 ore e 6 minuti.

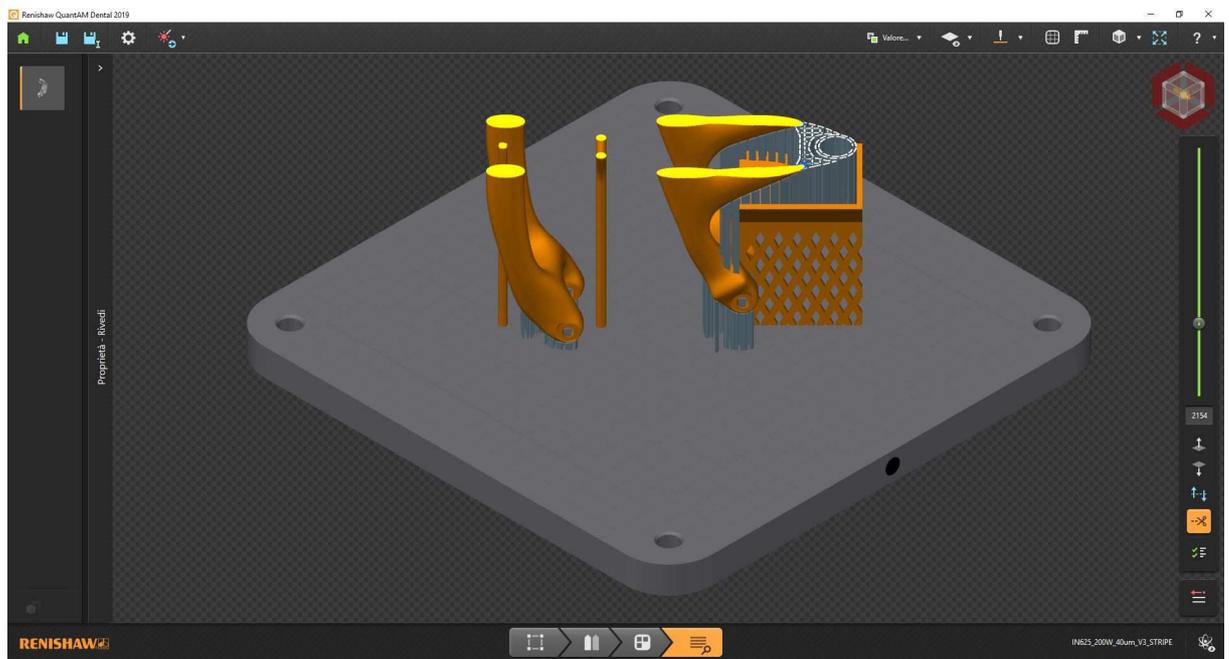
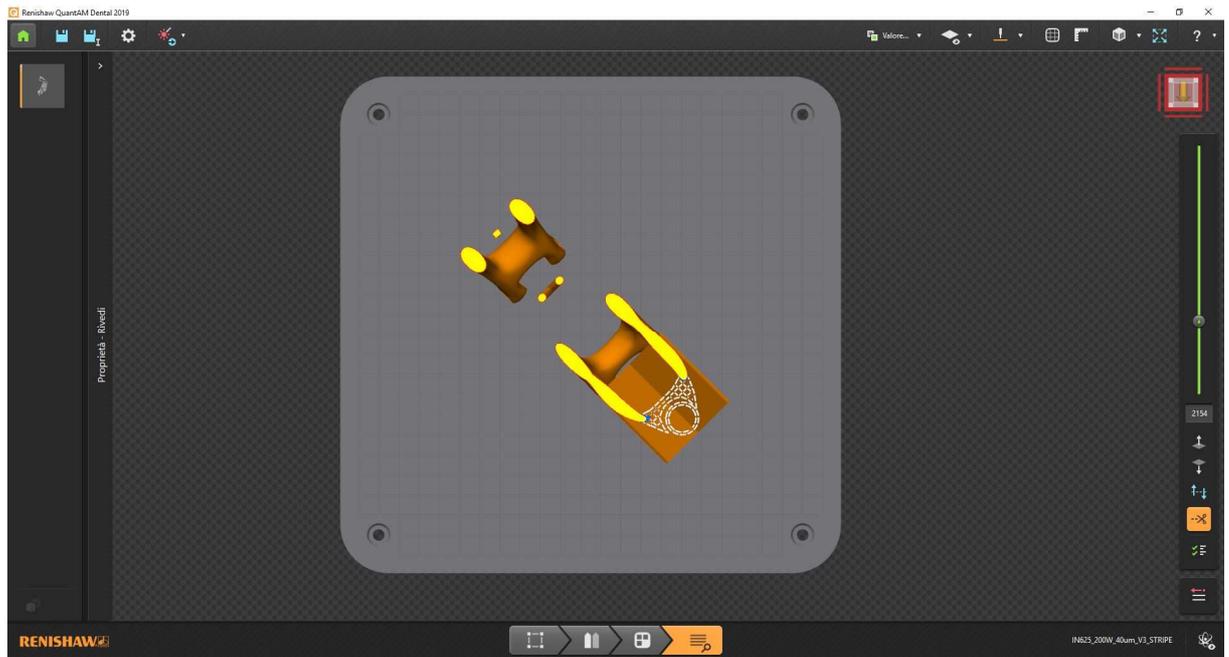


Figura 76: Fase di slicing e monitoraggio della fusione del laser layer per layer

A questo punto, è tutto pronto, si è creato il file macchina MTT e lo si è caricato direttamente sulla stessa. Si può procedere, quindi, con la realizzazione del build.

Capitolo 6

Fabbricazione della mastra

Prima di avviare la lavorazione, è necessario preparare la macchina. La preparazione consiste nello svolgimento delle seguenti operazioni:

- Montaggio di una piastra di lavoro di spessore 15 mm all'interno della camera di processo con 4 viti di fissaggio;
- Impostazione dello zero dell'asse z, coincidente con la faccia superiore della piastra di lavoro;
- Inserimento e fissaggio della lama in silicone nel recoater (Fig. 77);
- Montaggio del recoater all'interno della camera di processo;
- Allineamento e calibrazione del recoater mediante uno spessimetro, per garantire lo spazio sufficiente tra piastra e lama, affinché passino i granelli di polvere metallica;
- Chiusura della porta della camera di processo;
- Creazione del vuoto all'interno della camera e successiva immissione del gas inerte argon (il tempo richiesto per effettuare queste 2 operazioni è circa 15 minuti);
- Preriscaldamento della piastra, impostando un soak cycle alla temperatura di 170°C (il tempo necessario è di circa un'ora);
- Controllo del dosing della polvere e della stesura del recoater.

Una volta terminate tutte le operazioni, è possibile avviare la lavorazione.



Figura 77: Inserimento della lama in silicone all'interno del recoater [11]

Il tempo di costruzione reale effettivo della mastra è stato 40 ore e 14 minuti.

Al termine della lavorazione, si è lasciato raffreddare il build all'interno della camera, fino a quando l'elevatore non ha raggiunto una temperatura inferiore ai 60°C.

In seguito, si è aperta la camera e si sono iniziate le operazioni di pulizia del componente dalla polvere in eccesso, che è stata rimessa in circolo. Per effettuare tali operazioni è obbligatorio che l'operatore utilizzi delle dovute protezioni, in particolare una tuta ignifuga, guanti, scarpe infortunistica ed una maschera integrale dotata di respiratore.

A questo punto, si è estratto il build dalla camera e lo si è pulito dalla polvere ancora residua, utilizzando un aspiratore in umido. In Figura 78 è presente una foto del risultato ottenuto. In questa foto il build è all'interno della camera di processo.



Figura 78: Risultato ottenuto dalla lavorazione; foto scattata con il build all'interno della camera di processo. Si nota sul soffitto della camera la finestra protettiva del sistema di ottiche

In Figura 79, invece, vi è una foto in cui si nota tutta la camera di lavoro aperta con all'interno il componente con i supporti sulla piastra.

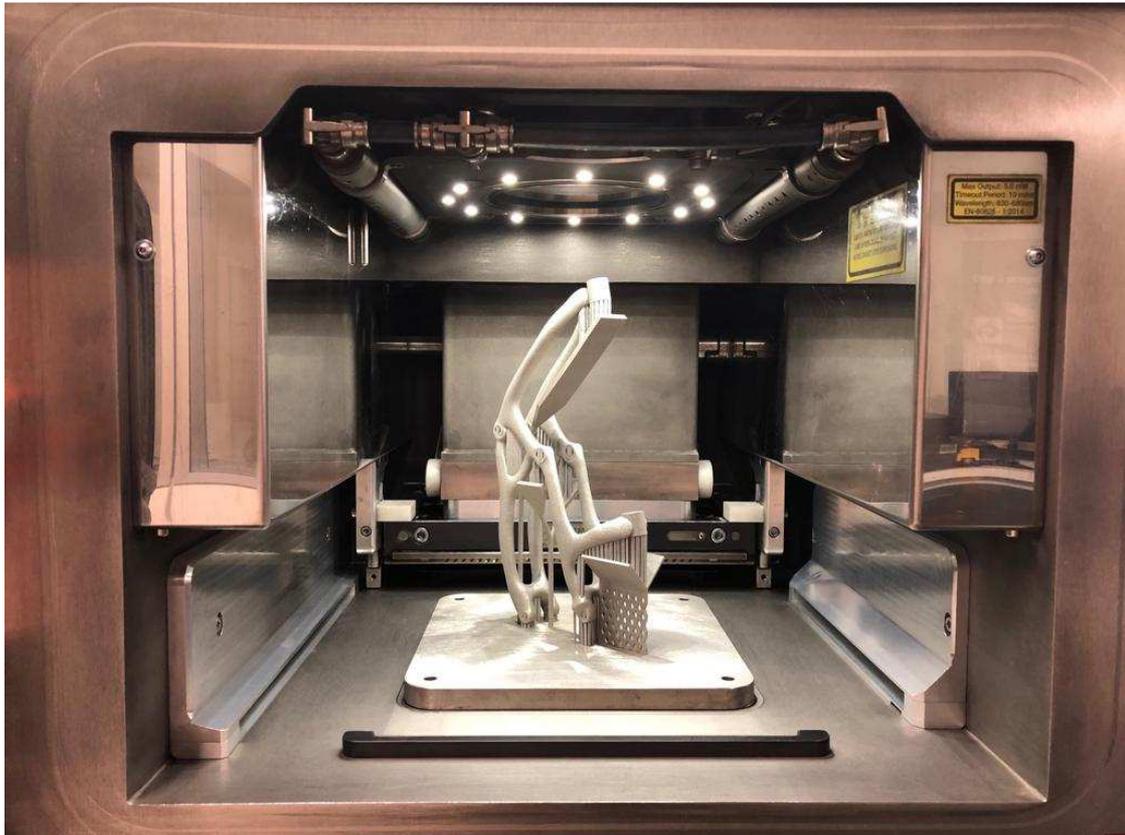


Figura 79: Interno della camera di processo aperta con il componente con supporti sulla piastra

Lo step successivo è stato la rimozione meccanica dei supporti, effettuata delicatamente con uno scalpello e una pinza. Il componente, così libero da supporti, ha subito una post-lavorazione di sabbiatura per ridurre ulteriormente la rugosità superficiale del pezzo, arrivando a valori dai 3÷5 μm [20] e migliorare così la qualità della finitura superficiale.

In Figura 80 sono mostrate due foto della mastra dopo la lavorazione di sabbiatura. Le foto sono state scattate all'interno del laboratorio di additive manufacturing di Renishaw.



Figura 80: Foto del componente dopo aver subito la post-lavorazione di sabbiatura

Conclusioni e sviluppi futuri

Al termine del lavoro e della fabbricazione della mastra, si è ottenuto un prodotto che soddisfa a pieno le richieste iniziali del PoliTO Sailing Team e l'obiettivo principale della tesi è stato raggiunto. Si è creato, infatti, un componente costituito da una lega a base nichel, Inconel 625, con una densità molto alta, pari a $8,44 \text{ g/cm}^3$, ma più performante e con caratteristiche meccaniche decisamente superiori all'alluminio, materiale della vecchia mastra, senza rinunciare alla leggerezza. Quest'ultima è una caratteristica fondamentale perché la mastra è destinata ad essere montata su una barca a vela da competizione, ma non si può prescindere dalla resistenza meccanica. Inoltre, l'Inconel 625 ha una resistenza a fatica molto più elevata dell'alluminio, considerando che la vecchia mastra è andata distrutta proprio a causa della fatica. Come si è visto, il peso del componente ottenuto è di 1.195 kg, assolutamente comparabile a quello della mastra precedente che pesava intorno al chilo. La nuova mastra fabbricata in additive, oltre ad essere leggera e prestante, ha ingombri ridotti, ma al tempo stesso garantisce un'elevata rigidità e uno spostamento massimo di 1,55 mm, molto piccolo, come emerso dall'analisi delle sollecitazioni.

Non da sottovalutare è anche la componente estetica. La nuova mastra, infatti, ha un design innovativo, ricercato, che minimizza gli spigoli vivi, ma al tempo stesso accattivante, per un mercato come quello odierno sempre alla ricerca della novità.

Poi, ci sono vantaggi anche dal punto di vista del processo. Queste geometrie nuove e complesse sono realizzabili solo mediante la tecnologia additive. Il processo è veloce, in 40 ore il componente è costruito, con una produzione di scarti pari a zero. Inoltre, progettare per l'additive e utilizzare l'ottimizzazione topologica, permette di ridurre il time-to-market e quindi di velocizzare lo sviluppo prodotto e l'immissione dello stesso sul mercato. Poter ottimizzare già in fase di progettazione permette di ridurre i tempi di industrializzazione e produzione del componente, ma soprattutto minimizza le modifiche in fase produttiva.

La mastra, però, così com'è non è ancora pronta per essere testata in mare dal PoliTO Sailing Team. Dapprima è previsto, innanzitutto, la rilavorazione sia dei fori centrali per la vite di fissaggio e per il perno removibile, sia di quelli relativi alla barra del timone alle macchine utensili. In fase di progetto, infatti, è stato considerato del sovrametallo. Inoltre, si consiglia fortemente un trattamento termico distensivo adeguato per aumentare il grano e rendere il componente più duttile e lavorabile, ma meno duro. Si potrebbe, anche,

condurre uno studio su più trattamenti termici e valutare quello più adatto cercando di ottenere un preciso valore di carico di rottura e snervamento.

Un altro studio che si potrebbe affrontare su questo componente, è un'accurata analisi a fatica, magari utilizzando un altro software di Altair Engineering, come Free Shape Optimization ideato appositamente per lo studio a fatica e servendosi degli strumenti e dei laboratori di ricerca del Politecnico di Torino.

Bibliografia

- [1]. Disponibile su <https://it.wikipedia.org>
- [2]. Fraizer W. E., *"Metal additive manufacturing: a review"*, Journal of Materials Engineering and Performance, 2014
- [3]. Gibson I., Rosen D., Stucker B., *"Additive Manufacturing Technologies"*, Second Edition, Springer, 2015
- [4]. Disponibile su: <https://www.autodesk.com/products/netfabb/overview>
- [5]. Disponibile su: <http://design-engineering.polimi.it/portfolio/additive-manufacturing-and-heat-exchangers/>
- [6]. Disponibile su: <https://www.lboro.ac.uk>
- [7]. A. Bandyopadhyay, S. Bose, *"Additive Manufacturing"*, CRC Press, 2016
Effect of Scanning and Support Strategies on Relative Density of SLM-ed H13 Steel in Relation to Specimen Size
- [8]. Tomasz Kurzynowski ,Wojciech Stopyra *,Konrad Gruber ,Grzegorz Ziółkowski ,Bogumiła Kuźnicka andEdward Chlebus, *"Effect of Scanning and Support Strategies on Relative Density of SLM-ed H13 Steel in Relation to Specimen Size"*
- [9]. Materiale tecnico Renishaw
- [10]. Material Profile Editing Renishaw
- [11]. H-5800-3103-01-A_EN - User Guide - RenAM 500M (Renishaw)
- [12]. H-5800-1105-02-A_In625-0402_material_data_sheet (Renishaw)

- [13]. Disponibile su: <https://www.linkedin.com/pulse/how-steel-can-light-titanium-why-matters-marc-saunders/>
- [14]. Disponibile su: <https://areeweb.polito.it/politosailingteam/index.php>
- [15]. Bendsøe M. P., Sigmund O. *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*, second edition, Springer Verlag, Berlin, 2004
- [16]. Disponibile su: <https://solidthinking.com/product/inspire/>
- [17]. H-5800-3382-01-A_IT_-_Quantam_brochure_-_Italian_screen.pdf (Renishaw)
- [18]. Design for metal AM – a beginner’s guide.pdf (Renishaw)
- [19]. Alessandro Salmi, Gabriele Piscopo, Eleonora Atzeni, Paolo Minetola, Luca Iuliano “*On the effect of part orientation on stress distribution in AlSi10Mg specimens fabricated by laser powder bed fusion (LPBF)*”, Politecnico di Torino, Department of Management and Production Engineering (DIGEP)
- [20]. F. Calignano “*Investigation of the accuracy and roughness in the laser powder bed fusion process*”, Politecnico di Torino, Department of Management and Production Engineering (DIGEP)
- [21]. Disponibile nel materiale didattico del corso di “*Progettazione assistita dal calcolatore*”, tenuto dal Prof: Luca Iuliano Full Professor of Manufacturing Technology, Politecnico di Torino
- [22]. Disponibile su: <https://www.wdsltd.co.uk/>
- [23]. Disponibile su: <https://blog.smartcae.com/ottimizzazione-topologica-per-generare-forme-innovative-del-prodotto/>
- [24]. Disponibile su: <http://www.multibody.net/MSMS/studenti/2006/Cerardi>

- [25]. Eleonora Atzeni, Alessandro Salmi “*Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*”, Politecnico di Torino, Department of Management and Production Engineering (DIGEP)

Ringraziamenti

Sono giunto al termine di questo lavoro di tesi, che chiude anche quest'avventura magistrale targata PoliTO, ricca di tante soddisfazioni, ma anche di momenti difficili, che mi ha sicuramente maturato ed arricchito sotto tutti i punti di vista.

Sono tante le persone da ringraziare, ad una ad una, per il loro supporto, che hanno creduto in me ed hanno condiviso con me quest'esperienza.

Innanzitutto, comincio dal ringraziare il Prof. Luca Iuliano, relatore di questa tesi, per la sua completa disponibilità e per avermi introdotto nel mondo del lavoro e avermi fatto appassionare all'additive manufacturing.

Un grande ringraziamento va ad Andrea Penna, tutor aziendale nel periodo di stage in Renishaw, per me riferimento ed esempio professionale da cui ho appreso molto dal punto di vista tecnico, e mi ha seguito passo passo anche nel lavoro di tesi. Oltre a lui, ringrazio anche tutto il resto del team additive di Renishaw, Enrico Orsi, Andrea Cafasso e Massimo Trione, di cui ho avuto il piacere di far parte, in un'ambiente lavorativo amichevole e piacevole dove ho appreso cosa significano organizzazione e lavoro di squadra. Insieme a loro, ringrazio tutti coloro che lavorano in Renishaw, che mi hanno accolto e hanno reso divertenti le pause caffè. Sappiate che per altre partite di calcio sono sempre disponibile.

Un doveroso ringraziamento va anche ad Alessandro Amorese, ingegnere dell'azienda Altair Engineering, che, oltre a fornirmi la licenza temporanea per il software solidThinking Inspire, mi ha seguito durante la delicata fase di progettazione con ottimizzazione topologica della mastra. Altair ha anche deciso di utilizzare il mio lavoro di tesi come caso studio, e io sono onorato e li ringrazio per questo.

Un altro doveroso ringraziamento va a tutto il PoliTO Sailing Team, committente di questo lavoro di tesi, in particolare a Domenico e Natalia, che hanno avuto fiducia in me e hanno seguito più da vicino la realizzazione del componente.

Terminati i ringraziamenti legati al lavoro di tesi e allo stage, passiamo a quelli più calorosi.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, a cui dedico anche questo lavoro di tesi: grazie per aver creduto in me e avermi dato le ali per volare, grazie per essermi stati sempre

vicini nei momenti di gioia e soddisfazione, ma soprattutto nei momenti difficili in cui ho pensato di non farcela.

Ringrazio affettuosamente il mio fratellino Eustachio, che porto sempre nel cuore, anche se lontani; molto presto, però, saremo più vicini, perché ora tocca a te spiccare il volo, ingegnere!

Grazie, poi, a tutti i miei parenti, i nonni, gli zii, i cugini, che seppur lontani, non hanno mai smesso di credere in me e fammi sentire il loro affetto.

Un caloroso ringraziamento va a tutti i miei amici, che hanno condiviso con me qui a Torino, questi anni universitari, esami superati insieme, serate pazze indimenticabili, esperienze vissute insieme, senza di voi sarebbe stato tutto più difficile, grazie di cuore. Siete stati fondamentali per me, perché quando si è lontani da casa, sono gli amici che diventano quotidianamente la tua famiglia.

Grazie di cuore agli amici di sempre, i “padovani” Vito e Vincenzo, in realtà miei compaesani, se pur dall’altro del nord Italia, siamo sempre in continuo contatto, ci confrontiamo, ci sfottiamo, cerchiamo sempre di vederci; la vostra calorosa e divertente compagnia anche a distanza è importante soprattutto nei momenti difficili.

Ringrazio, poi, tutti gli altri amici che sono lontani, in Puglia, e che porto sempre con me, grazie per il sostegno e l’affetto che mi mostrate, anche se purtroppo non scendo spesso, ci rivedremo sempre, vi voglio bene!