POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Riprogettazione per la produzione mediante fusione laser selettiva a letto di polvere metallica: Il caso studio di una guida di supporto per un motore lineare di una macchina di misura

Relatore:

Candidato: Marco Viccica

Prof. Luca Iuliano Ing. Flaviana Calignano Ing. Manuela Galati

Aprile 2019

Sommario

Indice o	Indice delle figureii			
Indice o	lelle tabelle	vi		
Abstrac	t	vii		
Ringraz	iamenti	viii		
Introdu	zione	ix		
1. Ott	imizzazione	1		
1.1	Tipi di ottimizzazione	1		
1.2	Definizione di un problema di ottimizzazione	2		
1.3	Sviluppo dei metodi di ottimizzazione	3		
1.4	Manufacturing Constraints	7		
2. Ott	imizzazione per AM			
2.1	Additive Manufacturing	10		
2.1.	1 Laser Powder Bed Fusion	14		
2.2	Manufacturing constraints nell'AM	19		
2.3	Diagramma di Voronoi	21		
3. Cas	so di studio	25		
3.1	Analisi FEM componente originale			
3.2	Ottimizzazione			
4. De	sign	35		
4.1	Design per AM			
4.1.	1 Riprogettazione carro asse Y			
4.1.	2 Riprogettazione carro asse X	44		
4.2	Design per l'assemblaggio			
4.3	Finitura			

4	.4	Supporti	58		
5.	5. Ciclo di lavoro				
5.	.1	Tavola di disegno per il ciclo di lavoro	63		
5.	.2	Elementi di staffaggio	64		
5.3 5.4		Cartellino di lavoro	67		
		Tempo ciclo	.68		
5.5 Analisi		Analisi dei costi	72		
6.	Сог	nvalida	.73		
7.	. Produzione prototipo				
8.	. Conclusioni e sviluppi futuri8				
Bibl	ibliografia8				

Indice delle figure

Figura 1. Principali tecniche di Fabbricazione Additiva per metalli e polimeri	11
Figura 2. Processo di slicing e successiva stampa per la tecnologia FDM [38]	11
Figura 3. Schema di una macchina L-PBF [8]	14
Figura 4. Messa a fuoco del fascio in caso di assenza (a) e presenza di lente f-the	ta (b) [1] 15
Figura 5. Inserimento di supporti su superfici aggettanti con diversi angoli	16
Figura 6. Distacco del pezzo dalla piattaforma [19]	17
Figura 7. Resistenza alla trazione ed allungamento % prima e dopo trattamento [11]	termico 17
Figura 8. Fuel nozzle by GE Aviation [17]	18
Figura 9. Esempio di staffaggio e appendici sacrificali (a sinistra). Componente destra).	finito (a 19
Figura 10. Diagramma di Voronoi bidimensionale	22
Figura 11. Cute Octopus. Realizzato mediante la stampante 3D MakerBot [26]	23
Figura 12. Voronoi chair by Ali Torabi [44]	23
Figura 13. 4080 Flying Probe Tester	25
Figura 14. Struttura base della macchina di misura a coordinate	
Figura 15. Vista esplosa della struttura	27
Figura 16. Dettaglio motore lineare e magneti	
Figura 17. Masse concentrate sul sistema di misura	
Figura 18. Carichi e vincoli sul motore ironcore	
Figura 19. Carici e vincoli sui magneti	
Figura 20. Vincoli sul carro asse X	31
Figura 21. Risultati di spostamento massimo e di massima tensione di von Mis analisi nº1 e nº2	es delle 32
Figura 22. Particolare della massima tensione di von Mises nell'analisi nº1	
Figura 23. Particolare della massima tensione di von Mises nell'analisi n°2	
Figura 24. Eliminazione alleggerimenti superfici laterali	
Figura 25. Eliminazione alleggerimenti superficie della base	
Figura 26: Base di riprogettazione	
Figura 27. Zone di design superfici laterali	
Figura 28. Zone di design superficie della base	
Figura 29. Inserimento pattern di Voronoi sulla base del carro	
Figura 30. Risultato taglio estruso della geometria con pattern Voronoi	

Figura 31. Geometria di taglio delle superfici laterali	37
Figura 32. Risultato taglio delle superfici laterali	38
Figura 33. Pattern honeycomb e relative dimensioni	38
Figura 34. Taglio estruso verso l'esterno	38
Figura 35. Taglio estruso in entrambe le direzioni	39
Figura 36. Risultato del taglio con geometria honeycomb	39
Figura 37. Risultato analisi FEM sulle prime modifiche del carro asse Y	40
Figura 38. Pattern Voronoi su superfici laterali	41
Figura 39. Risultato taglio superfici laterali con pattern Voronoi	41
Figura 40. Risultato taglio superfici laterali con pattern Voronoi (prospettiva)	41
Figura 41. Ulteriore alleggerimento del basamento del carro asse Y	42
Figura 42. Superfici aggettanti del carro asse Y	42
Figura 43. Sezione del carro con vista del motore	43
Figura 44. Geometria taglio delle superfici aggettanti	43
Figura 45. Risultato taglio delle superfici aggettanti	44
Figura 46. Geometria originale del "carro asse X"	44
Figura 47. Nuova geometria su superficie di accoppiamento con dissipatore (vista	a dal
basso)	45
Figura 48. Nuova geometria su superficie di accoppiamento con dissipatore (vista late	erale)
	45
Figura 49. Modifiche sui piedi del carro	46
Figura 50. Assemblaggio carro asse Y e carro asse X	47
Figura 51. Disposizione su piattaforma M400	47
Figura 52. Anteprima inserimento supporti	48
Figura 53. Dimensioni delle 3 parti	48
Figura 54. Numeri in basso rilievo	49
Figura 55. Geometria per accoppiamento per interferenza delle 3 parti	49
Figura 56. Inserimento di raccordi	50
Figura 57. Parte 1	50
Figura 58. Tagli triangolari sulla parte 2	50
Figura 59. Riduzione massa sulla base della parte 2	51
Figura 60. Inserimento piani inclinati	51
Figura 61. Sistema di fissaggio tra le 3 parti (vista dall'alto)	52
Figura 62. Fissaggio inferiore tra parte 1 e parte 2	52
Figura 62. Fissaggio inferiore tra parte 1 e parte 2 Figura 63. Inserimento supporti reggi-mensola (vista laterale)	52 53
Figura 62. Fissaggio inferiore tra parte 1 e parte 2 Figura 63. Inserimento supporti reggi-mensola (vista laterale) Figura 64. Inserimento supporti reggi-mensola	52 53 53
Figura 62. Fissaggio inferiore tra parte 1 e parte 2Figura 63. Inserimento supporti reggi-mensola (vista laterale)Figura 64. Inserimento supporti reggi-mensolaFigura 65. Eliminazione aree inaccessibili interne	52 53 53 54

Figura 67. Render finale del complessivo in vista esplosa	55
Figura 68. Render di tutto l'assieme	55
Figura 69. Eliminazione fori per il fissaggio delle guide	
Figura 70. Fori e superfici con sovrametallo (vista dal basso)	
Figura 71. Fori e superfici con sovrametallo (vista dall'alto)	
Figura 72. Supporti parte 1	
Figura 73. Supporti parte 2	
Figura 74. Supporti parte 3	
Figura 75.Disposizione su piattaforma EOS M400	60
Figura 76. Assegnazione delle superfici da lavorare su CNC	61
Figura 77. Sede cilindro di bloccaggio	62
Figura 78. Dettaglio del sistema di fissaggio su parte 1 (sx) e parte 3 (dx)	64
Figura 79. Staffaggio su parte 2	65
Figura 80. Staffaggio laterale	65
Figura 81. Sistema di staffaggio sull'intero complessivo assemblato	
Figura 82. Tipologia di contatti presenti tra i vari componenti della struttura	73
Figura 83. Risultati in false color delle 4 analisi dello spostamento massimo	74
Figura 84. Print Sharp 250	76
Figura 85. Vista in assonometria job1	77
Figura 86. Vista in assonometria job2	
Figura 87. Vista dall'alto job1	
Figura 88. Vista dall'alto job2	
Figura 89. Dettaglio Parte 3	
Figura 90. Dettaglio Parte 1	
Figura 91. Rugosità as-built	
Figura 92. Rimozione componenti dalla piastra con EDM	81
Figura 93. Piastra dopo la lavorazione di EDM	
Figura 94. Finitura dopo taglio con EDM	
Figura 95. Confronto prima e dopo riprogettazione	

Indice delle tabelle

Tabella 1. Caratteristiche delle principali tecnologie additive	12
Tabella 2. Masse dei componenti principali	26
Tabella 3. Proprietà dei materiali dei componenti	29
Tabella 4. Risultati analisi FEM componente originale	31
Tabella 5: Analisi spostamenti nei vari assi	31
Tabella 6. Proprietà meccaniche a confronto del modello originale e di quello AM	40
Tabella 7. Parametri di taglio per lavorazione di foratura	68
Tabella 8. Parametri di taglio per la lavorazione di fresatura di due differenti frese	68
Tabella 9. Tempo di asportazione di truciolo	69
Tabella 10. Tempi di movimentazione utensile a vuoto	70
Tabella 11. Tempi passivi accessori a macchine spenta	71
Tabella 12. Confronto analisi dei costi del grezzo di partenza	72
Tabella 13. Risultati delle 4 analisi FEM effettuate	75
Tabella 14: Analisi spostamenti nei vari assi	75
Tabella 15. Proprietà meccaniche AlSi10Mg [13]	76
Tabella 16. Dati di produzione dei 2 job	77
Tabella 17. Comparazione delle analisi FEM effettuate sul componente originale	e su
quello riprogettato	84
Tabella 18. Variazione percentuale degli spostamenti max sui vari assi	84

Abstract

Le tecniche di fabbricazione additiva oggi si collocano in un ampio spettro di applicazione poiché consentono una grande libertà di design. Infatti, il settore industriale sta esplorando i vantaggi che si possono ottenere nel campo della progettazione di componenti ad elevate performance se la produzione è basata sulle tecniche di fabbricazione. In particolare, le tecniche di metallo come quella del Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) consentono una grande flessibilità sia nel design che nei materiali.

Il lavoro svolto ha lo scopo di illustrare le potenzialità raggiungibili attraverso l'applicazione ad un caso industriale che prevede l'ottimizzazione strutturale di un carro guida di una macchina di misura a sensore multiplo. In particolare, l'intero sistema è formato da 4 componenti principali e 12 elementi di fissaggio. Le dimensioni complessive del sistema sono 220x690xx101 mm³. I componenti principali sono ad oggi prodotti mediante fresatura da pieno in Al7075-T6.

Il target di tale ottimizzazione è una riduzione della massa del sistema di almeno il 10% mantenendone inalterata la rigidezza complessiva per non diminuire la precisione di misura della macchina.

Partendo dalla modellizzazione del componente il sistema nel suo complesso è stato analizzato mediante metodo agli elementi finiti. Il comportamento del modello in ambiente virtuale è stato confrontato con i dati sperimentali per la verifica del modello di simulazione in termini di tensioni e spostamenti. La riprogettazione del componente ha quindi previsto un'analisi iniziale delle operazioni di assemblaggio al fine di minimizzare l'uso di elementi di fissaggio. Successivamente, il sistema è stato pensato come un unico componente da riprogettare nell'ottica della produzione mediante tecniche di L-PBF (minor quantità di supporti, ottimizzazione degli stress generati durante la produzione e delle operazioni di post-trattamento di finitura). Inoltre, dati i limiti attuali delle dimensioni massime dei volumi di produzione delle macchine commerciali di L-PBF, la riprogettazione ha previsto anche l'esecuzione di un sistema di accoppiamento rigido dei componenti. Il sistema finale prevede quindi un'unica operazione di assemblaggio. Il peso del sistema totale è di circa il 32% inferiore del sistema originale, con la riduzione del numero di componenti da 4 a 3 e di elementi di fissaggio da 12 a 4.

Il sistema riprogettato è stato convalidato in ambiente virtuale e successivamente mediante realizzazione di un prototipo tecnico e funzionale.

Ringraziamenti

Il raggiungimento di un obiettivo così importante e difficile, quale è la laurea magistrale, è sicuramente in primo luogo frutto di capacità, studio, dedizione e sacrifici da parte dello studente; tuttavia è necessario ricordare che tutti questi sforzi sarebbero vanificati se non fossero accompagnati dall'amore, i consigli ed il supporto di amici e parenti.

È doveroso quindi da parte mia fare un grosso ringraziamento a tutti coloro che hanno sempre creduto in me e mi hanno supportato durante questo lungo e difficile cammino.

Primi su tutti devo ringraziare i miei *genitori* che sin da piccolo mi hanno insegnato a non mollare mai di fronte alle difficoltà, a lavorare sodo per raggiungere gli obiettivi con grinta e testardaggine, ma soprattutto, con i loro sforzi e sacrifici, mi hanno dato la possibilità di studiare in una città che mi ha dato e continua a darmi molto. Ringrazio la mia *sorellona* sempre disponibile ad aiutarmi di fronte ad ogni difficoltà che uno studente fuori sede deve affrontare ogni giorno.

Un grazie speciale va ai miei amici del gruppo *Vegetariango* con i quali, sin dal primo giorno di università, ho condiviso momenti magnifici ma anche difficili, rafforzando sempre di più uno di quei legami di amicizia e fratellanza che non svanirà mai.

Grazie ai numerosi coinquilini coi quali ho avuto il piacere, e a volte anche il dispiacere, di condividere la casa, e che nel bene o nel male mi hanno dato innumerevoli lezioni di vita.

Infine ringrazio il *Prof. Luca Iuliano* che mi ha dato la possibilità di svolgere un lavoro di tesi avvincente e mai noioso. In particolare vorrei ringraziare *l'Ing. Flaviana Calignano* e *l'Ing. Manuela Galati* che mi hanno seguito costantemente durante tutto il lavoro di tesi e sono state sempre disponibili a fornire preziosissimi consigli e ad arricchire sempre di più le mie conoscenze.

Introduzione

Il progresso tecnologico, sempre più in rapida crescita, ha portato in questo ultimo decennio il mondo della manifattura meccanica, e non solo, a raggiungere una nuova fase fondamentale della rivoluzione industriale. Oggi ci troviamo nell'era dell'industria 4.0 che rappresenta un sistema estremamente più avanzato, efficiente e rapido di produrre prodotti in ogni settore. Punta di diamante dell'industria 4.0 è la *Fabbricazione Additiva* o *Additive Manufacturing*.

L'Additive Manufacturing (AM) rappresenta un nuovo modo di produrre ciò che con la tecnologia meccanica tradizionale era difficile o semplicemente impossibile da pensare e realizzare. Settori come quelli dell'ingegneria meccanica e aerospaziale sono fortemente interessati a conoscere le estreme potenzialità dell'AM sebbene il know-how rimane attualmente molto limitato. Il concetto che sta dietro la produzione mediante tecnologie additive stravolge completamente l'idea di produzione che abitualmente si ha con le tecnologie convenzionali.

Inoltre l'AM abbraccia fortemente l'uso dell'ottimizzazione topologica, il cui concetto è stato studiato e ben analizzato già da molto tempo dagli studiosi. È solo grazie allo sviluppo odierno di calcolatori con altissima capacità di calcolo e l'avvento di macchine tecnologiche innovative come quelle dell'AM che l'ottimizzazione topologica può essere adeguatamente sfruttata dando la possibilità di produrre componenti ad altissimo contenuto tecnologico e design estremamente complessi.

Il presente lavoro di tesi si sviluppa proprio nell'ambito dell'ottimizzazione mediante riprogettazione secondo le regole del Design for Additive Manufacturing di un componente industriale.

L'elaborato si articola in 4 principali sezioni. Nel primo capitolo viene introdotto il concetto generale di ottimizzazione distinguendone le varie tipologie. Si prosegue definendo un generico problema di ottimizzazione e viene poi sviluppato un excursus storico sull'evoluzione dei metodi che si sono principalmente sviluppati fino ad oggi. Infine vengono illustrati quelli che sono i vincoli tecnologici dei vari processi produttivi che limitano l'uso dell'ottimizzazione.

Nel secondo capitolo si definisce il rapporto vincente tra l'ottimizzazione topologica e l'Additive Manufacturing. Si va poi a presentare lo stato dell'arte dell'AM andando ad analizzare nello specifico la tecnologia del *Laser Powder Bed Fusion* (L-PBF) usata successivamente nel caso studio. Si prosegue con i vincoli tecnologici presenti tutt'oggi nel mondo della fabbricazione additiva e si conclude accennando al diagramma di Voronoi che vede un'ottima applicazione nell'AM.

Nella terza sezione, sviluppata in 2 capitoli (3 e 4), si concentra il cuore della tesi in quanto viene presentato il caso studio di un carro guida di una macchina di misura a sensore multiplo. Viene quindi analizzato agli elementi finiti il modello originale per poi essere riprogettato in modo da poter essere realizzato con le tecnologie additive. Il target principale di tale ottimizzazione sarà la riduzione del peso dell'intero sistema di almeno il 10%, mantenendo il più possibile invariata la rigidezza globale. Si procede quindi nella descrizione dettagliata di tutta la fase di riprogettazione del componente che si conclude con la convalida del modello mediante il metodo FEM.

L'ultima sezione comprende il quinto, il sesto e il settimo capitolo. Si descrive inizialmente il ciclo di lavoro necessario per la produzione del componente riprogettato; vengono quindi presentate le tavole di disegno del componente, gli elementi di staffaggio progettati ad-hoc per questo caso studio, il cartellino di lavoro con i dettagli di tutte le fasi di lavorazione ed infine si fa una stima del tempo ciclo totale per la produzione del carro. Si passa poi alla convalida virtuale del componente riprogettato ed in conclusione, nel settimo capitolo, viene riportata la produzione del prototipo funzionale.

1. Ottimizzazione

Il processo di ottimizzazione nasce dell'esigenza sempre più preponderante di portare la progettazione di prodotto ad un livello via via più alto riuscendo a giungere ad un risultato ottimale mediante l'uso di un modello virtuale.

È logico pensare come il metodo di ottimizzazione possa essere di estremo interesse per i vari settori industriali: oggi giorno, in un mondo totalmente globalizzato, vi è l'esigenza di raggiungere livelli di competitività sempre più alti e per fare ciò è necessario estremizzare il concetto di progettazione grazie al continuo e rapido progredire della tecnologia.

1.1 Tipi di ottimizzazione

È possibile distinguere in modo macroscopico tre tipi di ottimizzazione: ottimizzazione topologica (OT), ottimizzazione di forma e ottimizzazione dimensionale.

• Ottimizzazione topologica (Topology Optimization)

Imponendo i carichi e i vincoli che una determinata struttura deve sopportare e definendo un dominio di esistenza entro il quale il calcolatore deve poter analizzare, mediante l'ottimizzazione topologica si è in grado di eliminare il materiale inutile mantenendo lo stretto necessario, modificandolo nella giusta forma in modo da raggiungere un obiettivo di minimizzazione della massa o di massimizzazione della rigidezza. Ciò porta quindi ad una modifica ottimale della topologia della struttura.

• Ottimizzazione di forma (Shape Optimization) Viene solitamente usata dopo l'ottimizzazione topologica per rifinire e migliorare la topologia modificando la forma geometrica ed in particolare andando a lavorare sui nodi della mesh della superficie esterna del componente discretizzato al fine di ridurre la concentrazione locale delle tensioni. L'uso di tale ottimizzazione non è strettamente legata



all'ottimizzazione topologica quindi può essere usata anche indipendentemente.

• Ottimizzazione dimensionale (Size Optimization) Consente di modificare la struttura di partenza in modo marginale andando a variare parametri dimensionali come spessori, sezioni e momenti d'inerzia.

Tra i tre, l'ottimizzazione topologia consente di raggiungere risultati migliori ottenendo però una struttura decisamente complessa e di difficile costruzione mediante le tecnologie tradizionali.

1.2 Definizione di un problema di ottimizzazione

Per definire un problema di ottimizzazione è necessario individuare innanzitutto una formulazione che è generalmente indicata come segue [12]:

Min:	$F(\boldsymbol{x})$		funzione obiettivo	(1.1)
s.t.:	$g_j(\mathbf{x}) \leq 0$	j = 1, m	vincoli di disuguaglianza	(1.2)
	$h_k(\boldsymbol{x}) = 0$	k = 1, l	vincoli di uguaglianza	(1.3)
	$x_i^L \le x_i \le x_i^U$	i = 1, n	vincoli sulle variabili	(1.4)

L'ottimizzazione procede mediante una ricerca iterativa di una soluzione ottimale sulla base del miglioramento di una determinata funzione obiettivo quale ad esempio il peso, il campo delle tensioni e degli spostamenti e le frequenze proprie. In genere si preferisce lavorare con una singola funzione obiettivo sebbene è possibile avere problemi di ottimizzazione *multi-obiettivo* i quali risultano di gran lunga più complessi da risolvere.

I vincoli permettono di individuare il campo di ammissibilità delle variabili di ottimizzazione entro il quale è possibile trovare la soluzione ottimale al problema.

Sia le funzioni obiettivo che i vincoli possono essere descritti mediante equazioni lineari o non lineari nelle variabili di ottimizzazione.



1.3 Sviluppo dei metodi di ottimizzazione

I primi veri studi sull'ottimizzazione risalgono al 1904 da un articolo dell'australiano Michell [30], tuttavia si è giunti a risultati applicativi solo di recente. Inizialmente i problemi di ottimizzazione erano imposti nella sola forma analitica e per raggiungere una soluzione era necessario svolgere sistemi di equazioni differenziali e nei casi più complessi era necessario l'utilizzo degli sviluppi in serie.

Grazie al successivo sviluppo dei calcolatori intorno agli inizi degli anni '60 è stato possibile semplificare il calcolo andando a sviluppare sistemi di equazioni algebriche mediante trasformazioni parametriche facilmente risolvibili dai calcolatori. Intorno agli anni '70 l'analisi strutturale effettuata mediante il metodo degli elementi finiti (FEM) abbinato all'uso del calcolatore ha concesso un sempre più rapido sviluppo dei metodi di ottimizzazione strutturale. Questo sviluppo è ovviamente imputabile all'aumento esponenziale delle prestazioni dei calcolatori a cui corrisponde una graduale diminuzione dei costi di calcolo.

In questa ottica i primi settori industriali che si sono approcciati al metodo dell'ottimizzazione sono stati quello aerospaziale e aeronautico, i quali hanno da sempre riscontrato l'esigenza di ridurre il più possibile il peso dei propri componenti a qualsiasi livello di costo.

Altri settori, dove il vincolo di costo è un evidente limite (civile, automotive...), hanno cominciato ad applicare l'ottimizzazione ai propri prodotti solo di recente grazie alla riduzione dei costi di calcolo.

Uno dei primi metodi basato sullo sviluppo del calcolo degli elementi finiti è l'**Homogenization Method** (metodo soft-kill¹) introdotto nel 1988 da Bendsøe e Kikuchi [6]: esso rappresenta un buon punto di partenza come metodo di ottimizzazione topologica per strutture di tipo continuo, sebbene fossero molti i problemi di instabilità numerica [37] legati a questa prima formulazione. Mediante una variazione di quest'ultimo metodo, lo stesso Bendsøe un anno dopo (1989) [7] getta le basi per il metodo **SIMP** (Solid Isotropic Microstructure with Penalization) successivamente sviluppato da molti altri autori a partire da Zhou e Rozvany (1991) [51] che ne hanno coniato il termine. Attualmente tale metodo viene implementato in quasi tutti i software commerciali di ottimizzazione e continua ad essere il più studiato grazie alle sue potenzialità.

¹ Tipologia di metodo che consente di avere risultati intermedi di densità denominati elementi gray.



Un metodo utilizzato in pochi isolati casi, ma che ha comunque dato spunto a molti studi, è il così detto metodo ESO (Evolutionary Structural Optimization) di tipo "hard-kill²" che fu proposto per la prima volta da Xie e Steven nel 1992 [48] e che fu poi implementato nella variante BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) nel 1998 [49].

Come successivamente esposto da Rozvany (2001) [35], è possibile usare più tipi di ottimizzazione per trattare materiali topologicamente differenti (isotropi, anisotropi, e/o porosi): ISE (Isotropic-Solid/Empty), ASE (Anisotropic-Solid/Empty), e ISEP (Isotropic-Solid/Empty/Porous).

Infine nel 2003, il già noto Level Set Method, proposto per la prima volta nel 1988 da Osher S. et al. [31], venne implementato per i problemi di ottimizzazione strutturale e discusso negli articoli di Allaire G. et al. [2] e Wang M. Y. et al [46].

Vengono di seguito illustrate le principali caratteristiche dei più rilevanti metodi di ottimizzazione sopra citati.

1. Homogenization Method

Si basa sulla ridistribuzione della densità del materiale del componente discretizzato mediante il metodo degli elementi finiti. La discretizzazione avviene andando a realizzare una struttura formata da celle in micro scala distribuite in modo ottimale a seconda dei valori di tensione a cui è soggetto il componente. Le celle avranno guindi dei valori di densità che variano da 1 (densità pari al materiale di partenza) a 0 (densità nulla): nella zona intermedia si possono avere o celle di materiale composito oppure celle aventi delle piccole cavità. Ciò permette di definire in modo molto accurato i valori di densità intermedia effettivi del materiale.

caratteristiche del materiale finale sono molto influenzate Le dall'orientamento, la dimensione e la forma dei fori.

² Tipologia di metodo che consente di avere esclusivamente risultati rigidi di densità: elementi white e black.



2. SIMP

Il metodo SIMP, detto anche "power law method" o "density method", basa il suo algoritmo su una semplice relazione tra la funzione obiettivo, come ad esempio la rigidezza *s*, e la densità ρ di ciascun elemento discretizzato [7]:

$$\rho = s^{1/p} \ (p > 1) \tag{1.5}$$

dove \boldsymbol{p} è il fattore di penalizzazione.

La (1.5) può dare come risultati valori di densità pari a $\rho=0$, $\rho=1 e 0 < \rho < 1$ a cui corrispondono rispettivamente i così detti elementi "white", "black", "gray". I valori di densità intermedia sono da evitare per non avere problemi di discontinuità della struttura; è per questo motivo che si introduce il fattore di penalizzazione necessario a diminuire gli elementi gray e favorire lo sviluppo degli elementi black e white. Fu inoltre implementato da Zhou M. e Rozvany GIN [51] un sistema che permette di diminuire ulteriormente la zona grigia della struttura mediante una schema di filtraggio dell'analisi di sensitività.

Sebbene il SIMP applicato a casi ingegneristici reali non riesca a convergere sempre ad una soluzione di ottimo, rimane comunque il metodo che attualmente garantisce i migliori risultati. Infatti è il metodo maggiormente implementato dai software di ottimizzazione in quanto grazie all'uso di una sola variabile (*p*) per elemento, garantisce un'elevata efficienza computazionale. Inoltre viene utilizzato per moltissime combinazioni di vincoli progettuali, condizioni di carico e problemi multifisici. Il fattore di penalizzazione può essere modificato a costo zero e, a differenza dell'homogenization method, non è necessaria l'omogeneizzazione della struttura.

3. ESO - BESO

Tale metodo si basa sull'eliminazione selettiva degli elementi del componente discretizzato che non soddisfano i requisiti di una determinata funzione obiettivo. L'eliminazione avviene in modo iterativo partendo dalla zona di design iniziale del componente ed andando a calcolare di volta in volta per ciascuno elemento il valore del parametro scelto. Tale algoritmo fu poi variato per migliorarne i risultati, per cui venne ideato il metodo BESO il quale, oltre ad eliminare gli elementi non



Candidato: Marco Viccica

efficienti, permette di aggiungerne di nuovi laddove è necessario. Inoltre, come nel metodo SIMP, anche in BESO fu proposta l'aggiunta di uno schema di filtraggio [47] al fine di raggiungere migliori risultati.

Il metodo ESO/BESO è del tutto euristico in quanto non esiste una prova rigorosa che l'eliminazione e/o aggiunta di elementi permette di ottenere una soluzione ottimale; rispetto al SIMP richiede l'esecuzione di un altissimo numero di iterazioni che potrebbero ugualmente non convergere ad una soluzione ottimale: per questo motivo riesce ad avere dei buoni risultati solo in problemi con singolo vincolo e singola condizione di carico. Inoltre l'aggiunta di elementi implica un eventuale aumento del volume della zona di progettazione scelta in partenza.

Tuttavia, pur avendo poca rilevanza in ambito commerciale, tale metodo continua ad essere molto studiato e discusso.

4. Level Set Method

L'idea di base che sta dietro al level set method è la rappresentazione della porzione di volume che si vuole ottimizzare mediante una funzione continua ausiliaria F il cui contorno viene rappresentato da Γ . In particolare l'ottimizzazione avviene parametrizzando e variando i parametri della funzione ausiliaria ed interpretando geometricamente i suoi valori. Ciò viene fatto considerando il contorno esterno Γ della struttura come un set continuo di punti per i quali la funzione è nulla. Quindi Γ delimita il volume per il quale F è positivo, corrispondente all'attuale volume della parte. Al di fuori di esso F è negativa, corrispondente alle zone interne ed esterne non aventi materiale. Opportunatamente discretizzato il componente, ciascun elemento è considerato solido se F è positiva nel suo centro di gravità.

Il level set method permette di raggiungere dettagli sul contorno del dominio molto più elevati del SIMP; tuttavia l'ottimizzazione ha difficoltà ad ottenere come risultati punti globali di ottimo. Tale metodo è molto promettente ma non è stato ancora sufficientemente studiato [9].



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

1.4 Manufacturing Constraints

Sebbene l'ottimizzazione topologica permetta di modificare topologicamente la struttura di un componente riducendone la massa in base ai vincoli strutturali e ai carichi imposti, bisogna necessariamente tenere conto della tecnologia scelta per la produzione del componente. Oltre ai vincoli già citati, è necessario imporre i vincoli legati alla tecnologia di produzione (manufacturing constraints): ciò determina una variazione e talvolta una complicazione dell'algoritmo adoperato dall'ottimizzatore topologico.

Tali vincoli, oltre a rendere più complessi i calcoli del risolutore, determinano una netta limitazione alle potenzialità del processo di ottimizzazione come descritto in precedenza. È ovvio che i manufacturing constraints varieranno in funzione del sistema tecnologico adoperato.

Vengono di seguito elencati i manufacturing constraints delle principali tecniche di manifattura.

1. Processo di colata

Tale tecnologia si basa sull'utilizzo di uno stampo, rappresentante il negativo del pezzo, all'interno del quale viene colato il metallo fuso. Quest'ultimo solidificherà acquisendo la forma imposta dallo stampo. Al fine di estrarre il pezzo solidificato si procede all'apertura dello stampo che in fase di progetto è realizzato in 2 parti separate da un piano divisorio appositamente pensato per avere un'opportuna direzione di estrazione che non danneggi il pezzo. In tal caso il vincolo tecnologico è rappresentato dalla presenza sul componente di sottosquadri che ne impedirebbero la corretta estrazione. Per problemi di ritiro e di deflusso del fuso all'interno dello stampo, è necessario limitare la presenza di eventuali pareti e canali interni sottili.

Malgrado questi vincoli, il processo di colata permette di ottenere pezzi di una certa complessità non ottenibili con altre tecnologie.

2. Asportazione di truciolo

Le lavorazioni per asportazione di truciolo si basano su un processo di tipo sottrattivo: partendo dal pieno di un grezzo si ottiene la forma del componente desiderato mediante l'uso del tagliente dell'utensile che asporta progressivamente materiale. Tale utensile è collegato ad una



macchina a controllo numerico che può avere al massimo 6 assi lungo i quali è concesso il movimento. I principali vincoli da imporre al componente che si vuole ottimizzare sono legati alle dimensioni e le forme che si possono ottenere: non è possibile realizzare fori di dimensioni troppo ridotte, spigoli vivi e cavità non regolari. Inoltre vi è il limite di lavorare punti sul pezzo fisicamente non raggiungibile dall'utensile.

Sebbene è possibile avere tolleranze dimensionali e di forma altamente precise, questa tecnologia non permette di ottenere dei buoni risultati da un'ottimizzazione topologica.

3. Processo di trafilatura

Il processo di trafilatura, così come quello di estrusione, permette di ottenere la forma finale del pezzo che si vuole ottenere mediante una deformazione plastica generata da forze impresse da apposite attrezzature. Dal momento che il grezzo ottiene la forma passando attraverso una matrice, la sezione risultante, perpendicolare alla direzione di trafilatura o estrusione, sarà costante: da ciò si evince che il vincolo tecnologico da imporre durante un processo di ottimizzazione topologica riguarda l'uniformità delle pareti che dovranno avere spessori costanti garantendo una sezione costante lungo la direzione di trafilatura.

4. Stampaggio

Mediante l'uso di stampi e di apposite macchine di pressatura, è possibile generare oggetti di forma più o meno complessa (in funzione della complessità dello stampo usato) partendo da un foglio di lamiera.

Il vincolo da imporre per questo tipo di lavorazione è lo spessore della lamiera che dovrà essere costante lungo la direzione di azione del punzone della pressa.

L'implementazione di questo tipo di vincolo impone l'uso di un numero molto elevato di variabili, rendendo così più difficile la convergenza ad una soluzione ottimale.

Le tecniche di produzione sopra citate fanno parte di un mondo della manifattura che si è ormai altamente consolidato nel tempo. Tuttavia negli ultimi anni (primo brevetto del Dr. Hull [20]) ha cominciato a diffondersi una nuova tecnologia che ha



rivoluzionato il modo di fare manifattura: la **Fabbricazione Additiva**, definita nel mondo anglo-sassone come *Additive Manufacturing* (AM).

La fabbricazione additiva ha come principio innovativo la produzione di un componente mediante la sovrapposizione di strati successivi di materiale. L'approccio additivo permette di eliminare alcuni vincoli tecnologici presenti nelle tecniche tradizionali consentendo così di realizzare componenti con un alto livello di complessità.

È evidente come le caratteristiche di tale tecnologia consentono di sfruttare al meglio i risultati ottenuti da un'ottimizzazione topologica, realizzando componenti impensabili da produrre con le tecnologie convenzionali.



2. Ottimizzazione per AM

Inizialmente i metodi di ottimizzazione erano stati studiati e sviluppati per essere applicati a componenti da realizzare mediante tecnologie tradizionali quali ad esempio il casting o le lavorazioni ad asportazione di truciolo. Come già detto nel precedente capitolo, questi tipi di lavorazioni non concedono di sfruttare i migliori risultati di ottimizzazione a causa dei vari vincoli tecnologici. Oggi però è possibile svincolarsi da tali vincoli grazie all'uso di un nuovo sistema di produzione che permette di realizzare forme complesse derivanti da un'ottimizzazione topologica e non solo: tale tecnologia è l'**Additive Manufacturing** (AM).

L'AM si è effettivamente evoluta nella produzione di componenti in metallo da pochi anni e, nell'ottica di un continuo miglioramento delle macchine additive, si è rafforzato sempre più lo stretto legame tra l'ottimizzazione topologica e la tecnologia additiva. Sebbene le tecnologie additive non risentano dei vincoli delle tecnologie convenzionali nella realizzazione di forme geometriche complesse, anche per l'AM vi sono dei manufacturing constraints da tenere in conto in fase di progettazione mediante OT.

Per capire meglio quali sono tali vincoli tecnologici e come eventualmente evitarli, è necessario illustrare, in un primo momento, le caratteristiche dell'AM.

2.1 Additive Manufacturing

L'additive manufacturing nasce alla fine degli anni '80 da un'idea dello statunitense Hull che brevettò la prima macchina di *Stereolitografia* [20]. Tale macchina era stata pensata per la realizzazione di prototipi concettuali in materiale polimerico per l'industria dell'automotive. Di fatto il processo di stereolitografia permetteva di ridurre i tempi di produzione dei prototipi accelerando i tempi di progettazione. Per cui questa tecnologia venne inizialmente definita come *Rapid Prototyping* (RP). Man mano che la tecnologia additiva si sviluppava, nascevano altri settori di utilizzo come il *Rapid Casting* (realizzazione di anime per fonderia) e *Rapid Tooling* (produzione di inserti per stampi). Intorno agli anni 2000 si sviluppano sempre di più le macchine additive per metallo cominciando a realizzare veri e propri componenti definitivi: da quel momento in poi si comincia a parlare di *Additive Manufacturing*.



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica Oggi l'AM consente di produrre componenti con una grande varietà di materiali (polimerici, metallici, ceramici e compositi) mediante diversi tipi di tecnologie additive come si può vedere nella Figura 1.



Figura 1. Principali tecniche di Fabbricazione Additiva per metalli e polimeri

Ciascuna delle tecnologie indicate nello schema in alto presenta caratteristiche differenti per quanto riguarda i materiali utilizzati, il tipo di solidificazione della parte, necessità o meno di trattamenti di post processo ecc.

Nella Tabella 1 vengono riassunte alcune delle fondamentali caratteristiche che contraddistinguono le principali tecnologie additive.

In generale una lavorazione di tipo additivo prevede la costruzione del pezzo mediante sovrapposizione di materiale layer-by-layer secondo il processo di slicing ovvero suddivisione del componente in sezioni parallele (perpendicolari alla direzione di costruzione del pezzo) di uguale spessore.



Figura 2. Processo di slicing e successiva stampa per la tecnologia FDM [38]



Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

	TECNOLOGIA	MATERIALE PARTE	SUPPORTI	MULTI- MATERIALE	RUGOSITA' SUPERFICIALE R₄ (μm)	PROCESSO DI SOLIDIFICAZIONE	NECESSITA' DI ATMOSFERA CONTROLLATA
METALLI	LASER POWDER BED FUSION	Polvere	Si	No	5 ÷ 40 [43]	Termico: laser	Gas inerte
	ELECTRON BEAM POWDER BED FUSION	Polvere	Si	No	25 ÷ 130 [43]	Termico: fascio di elettroni	Vuoto
	DIRECT ENERGY DEPOSITION	Polvere	No	Potenzialmente si		Termico: laser	Gas di copertura sull'ugello
	3D PRINTING	Polvere	No	No		Chimico: collante + trattamento termico	No
	EBAM	Filamento	No	Si		Termico: fascio di elettroni	Vuoto
POLIMERI	FUSED DEPOSITION MODELING	Filamento	Si		15 ÷ 60 [32]	Deposito diretto di solido pre-fuso	No
	DROP ON DEMAND	Polimero termoplastico	Si	No	risoluzione	Deposito diretto di solido pre-fuso	No
	DIRECT LIGHT PROJECTION	Fotopolimero	Si	No	risoluzione	Fascio UV	No
	POLYJET/PROJET	Fotopolimero	Si	Si	10 ÷ 30 [8]	Lampade UV	No
	STEREOLITOGRAFIA	Fotopolimero	Si	No	<10 [8]	Termico: laser + forno UV	No
	3D PRINTING	Polvere	No	No	25	Chimico: collante + infiltrazione	No
	SELECTIVE LASER SINTERING	Polvere	No	No	10 ÷ 25 [5]	Termico: Laser	Gas inerte

Tabella 1. Caratteristiche delle principali tecnologie additive

Il ciclo di lavorazione per ottenere un pezzo finito prevede le seguenti fasi:

- Preparazione del modello matematico realizzato tramite software CAD
- Conversione nel formato STL (Standard Triangulation Language)
- Scelta dell'orientamento del pezzo in macchina ed eventuale inserimento dei supporti (se il tipo di tecnologia additiva lo richiede)
- Esecuzione dello slicing e successivo trasferimento del file stl nella macchina che lo convertirà nel file proprietario della macchina stessa
- Avvio costruzione del pezzo (i tempi di costruzione variano in funzione della dimensione del job)
- Ultimata la costruzione vi è l'estrazione dalla macchina, e in base alla tecnologia additiva, lavorazioni termiche per la distensione delle tensioni residue, rimozione dei supporti, pulizia e finitura superficiale.

Il processo di costruzione del pezzo avviene utilizzando una sola macchina ed uno o più materiali (es. Polyjet) col minimo intervento dell'operatore; non sono necessarie attrezzature e dispositivi di bloccaggio ed i tempi e i costi sono legati alle dimensioni e non alla complessità geometrica del pezzo. A livello progettuale il progettista, seguendo le regole del Design for Additive Manufacturing (DfAM) [42]-[21], può realizzare strutture leggere con forme cave complesse, può assemblare più componenti in unico pezzo (Design for Assembly) ed infine ha piena libertà di personalizzazione.

Tuttavia non mancano gli svantaggi in quanto si è limitati nei volumi di lavoro per la maggior parte delle tecnologie additive, e quindi si possono realizzare solo componenti di piccole dimensioni. Inoltre gli impianti non sono ancora pronti per una produzione di massa. Vi è un numero limitato di materiali in commercio ed inoltre i prezzi sono molto elevati. Infine il pezzo in macchina in alcuni casi può necessitare di strutture di supporto, ed in funzione della tecnologia additiva usata, la finitura superficiale potrebbe risultare non adeguata (ad es. superfici di accoppiamento) quindi sono necessarie delle lavorazioni successive.

Ad oggi l'AM ha svariate applicazioni quali ad esempio la produzione di prototipi (concettuali, funzionali), componenti per l'industria biomedicale, dentale, tooling automotive ed aerospace. È inoltre molto utilizzata per la realizzazione di prodotti di stile (gioielleria), di design e per l'architettura (plastici).

Ai fini applicativi del caso studio presentato nel capitolo successivo (Capitolo 3), da qui in avanti verranno fatte considerazioni solo sulla tecnologia a letto di polvere con fusione mediante fascio laser: Laser Powder Bed Fusion (L-PBF).



Candidato: Marco Viccica

2.1.1 Laser Powder Bed Fusion

Le macchine di tipo L-PBF lavorano mediante l'uso di un fascio laser che fonde in modo selettivo le particelle di polvere metallica all'interno di un'apposita camera di lavoro.



Figura 3. Schema di una macchina L-PBF [8]

Come si può vedere dallo schema illustrato in Figura 3, la macchina è costituita da 3 pistoni collegati rispettivamente alla *piattaforma di costruzione* (Building platform), al *dispenser* (Dispenser platform) ed al *collector* (Collector platform). Vi è poi un *recoater* (ovvero una lama) che muovendosi da destra verso sinistra raccoglie una certa quantità di polvere e la distribuisce sulla piattaforma di costruzione stendendola uniformemente. L'eccesso di polvere viene raccolto nel collector. Successivamente il laser fonde la polvere realizzando il primo layer, seguendo il disegno della corrispondente sezione estratta dal file stl.

Il fascio laser viene movimentato tramite specchi galvanometrici e viene indirizzato sulla piattaforma mediante una lente *f-theta*. Le lenti f-theta hanno l'obiettivo di eliminare gli errori che potrebbero sorgere utilizzando lenti sferiche e/o piane permettendo una relazione lineare fra lo spostamento angolare del fascio e la posizione dello spot sul piano focale.





Figura 4. Messa a fuoco del fascio in caso di assenza (a) e presenza di lente f-theta (b) [1]

Dopo aver realizzato il primo layer, il cilindro centrale movimenta la piattaforma di costruzione abbassandola di un valore Δ s pari allo spessore dello strato di polvere da depositare. Il recoater ritorna nella posizione iniziale a destra e la piattaforma del dispenser si solleva così che il recoater possa stendere un nuovo strato di polvere e così via fino alla fusione dell'ultimo layer del job.

All'interno del volume di lavoro è necessario avere un'atmosfera inerte al fine di evitare l'innesco di incendi per reazione tra combustibile e comburente (metallo e ossigeno). I gas più comunemente utilizzati per il controllo dell'atmosfera sono Argon e Azoto.

Grazie alla fusione e successiva rapida solidificazione del materiale, la microstruttura finale presenta dei grani molto fini per cui le caratteristiche meccaniche e metallurgiche si dimostrano essere migliori di quelle ottenute con metodi tradizionali. Tuttavia i forti gradienti termici e il ritiro durante il raffreddamento inducono nello strato solidificato delle dilatazioni termiche cicliche e contrazioni di stress che possono superare la massima deformazione elastica del materiale. L'inserimento di supporti (dello stesso materiale del job) tra la piattaforma e il componente evita i problemi causati dalle tensioni residue. Le superfici di supporto infatti si comportano da dissipatori di calore. Inoltre, i supporti hanno anche il compito di sorreggere le superfici aggettanti del pezzo, ovvero quelle superfici che hanno un'inclinazione eccessiva rispetto alla piattaforma in modo da evitare deformazioni indesiderate e/o cedimenti della struttura.





Figura 5. Inserimento di supporti su superfici aggettanti con diversi angoli

Come si può vedere dalla Figura 5, l'inserimento dei supporti per sorreggere le superfici aggettanti è funzione dell'angolo $\beta_{critico}$; tale angolo di riferimento rappresenta il minimo angolo possibile, rispetto alla normale alla piattaforma, che una superficie inclinata può assumere senza l'ausilio di supporti:

- a) $\beta < \beta_{critico}$: la superficie inclinata viene definita autosupportante;
- b) $\beta \ge \beta_{critico}$: la superficie necessita di supporti.

Quindi se non mettessi i supporti, quando necessari, oltre ad avere dei difetti di forma, si potrebbe incorrere ad un aumento della rugosità sempre più elevata man mano che ci si allontana dall'angolo di riferimento. Il $\beta_{critico}$ è funzione del tipo di materiale usato e dei parametri di processo utilizzati.

Il processo L-PBF è definito un processo freddo poiché la polvere prima della fase di fusione si trova pressoché a temperatura ambiente. Per ridurre il gradiente termico soprattutto nella parte iniziale di costruzione è possibile riscaldare la piattaforma raggiungendo temperature fino ai 250°C.

Successivamente alla fase di pulizia della polvere non fusa, per ridurre le tensioni residue si procede ad un trattamento termico di distensione (stress relieving). I trattamenti termici devono essere fatti subito dopo aver estratto il pezzo dalla macchina: la parte viene inserita in forno quando è ancora ancorata alla piattaforma mediante i supporti. Successivamente si procederà al distacco dalla piattaforma mediante utensili meccanici (come ad esempio pinze, tenaglie, martello e scappello); per pezzi cresciuti direttamente sulla piattaforma è necessario usare l'elettroerosione a filo (EDM).



Candidato: Marco Viccica



Figura 6. Distacco del pezzo dalla piattaforma [19]

I trattamenti termici, oltre a ridurre le tensioni residue, sono necessari ai fini di rendere più omogenee le proprietà meccaniche tra il piano x-y e l'asse di costruzione z (proprietà meccaniche più basse).

Nella Figura 7 possiamo vedere come cambiano le proprietà meccaniche sull'orizzontale e la verticale prima e dopo un trattamento termico su un componente analizzato nello studio di Chen H. et al [11]. Nel suddetto studio è stato analizzato un provino in acciaio 5CrNi4Mo prodotto mediante tecnologia L-PBF: il componente è stato quindi sottoposto ad una prova di trazione sia in *as built* (subito dopo la realizzazione del pezzo) sia dopo esser stato sottoposto ad un trattamento termico a 640°C per 3h.



Figura 7. Resistenza alla trazione ed allungamento % prima e dopo trattamento termico [11]

Oltre ai trattamenti termici, le proprietà meccaniche del componente possono variare pensando a monte ad uno studio del corretto orientamento del pezzo in macchina, dei tipi di supporti da inserire, della strategia di scansione laser, del valore dell'hatch distance, della potenza del laser e di vari altri parametri macchina. Il



DI TORINO Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

corretto set up dei parametri macchina permette di realizzare mediante L-PBF dei pezzi con il 99,9% di densità.

L'uso della tecnologia L-PBF permette di realizzare prodotti finiti o di prototipazione per svariati settori industriali quali ad esempio l'*aerospace*, l'*automotive*, il *medicale* e *dentale*, il *life-style* ed il *tooling*.

Per quanto riguarda il tooling ad esempio [3] si possono realizzare degli stampi per injection molding di alta efficienza: nell'injection molding il tempo ciclo di produzione ha come massimo percentuale di lavoro (circa il 70%) la parte di raffreddamento del pezzo; l'AM permette di realizzare dei canali conformali appositamente studiati per velocizzare il sistema di raffreddamento del pezzo, quindi avendo un ritiro molto più uniforme si migliorano le qualità del prodotto stampato. Quindi sebbene con l'AM i costi di produzione dello stampo possano aumentare del 10% in più rispetto ad altre tecnologie, si riesce poi a risparmiare il 40% di tempo ciclo grazie ad un sistema di raffreddamento più efficiente.

Nell'ambito aerospace si riporta un esempio di produzione di massa sviluppato dalla compagnia *GE Aviation*: fuel nozzle tip (ugello del carburante) [17] del motore a reazione aeronautico *LEAP* (Figura 8).

Il motore turbofan LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion) viene prodotto da *CFM International* [24], compagnia nata come joint venture al 50% tra GE Aviation e Safran Aircraft Engines. Il motore contiene 19 di questi ugelli prodotti mediante tecnologia L-PBF: l'ugello è stato riprogettato mediante le regole del *Design for Assembly* riducendo il numero di parti da 20 ad 1, ottenendo inoltre una riduzione di peso del 25%.

La compagnia GE ha dichiarato nell'ottobre 2018 di aver raggiunto quota 30.000 ugelli prodotti mediante tecnologie additive, il che rende questo prodotto uno dei primi esempi di produzione di massa per il processo di L-PBF.



Figura 8. Fuel nozzle by GE Aviation [17]



Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

POLITECNICO DI TORINO

2.2 Manufacturing constraints nell'AM

Sebbene i vincoli tecnologici dell'AM abbiano un peso molto inferiore rispetto a quelli delle lavorazioni tradizionali, è necessario comunque fare delle considerazioni su di essi.

Come già detto nel paragrafo precedente, la produzione di un componente mediante tecnologie di L-PBF comporta la necessità di inserire supporti in specifiche zone del pezzo. La produzione dei supporti in macchina determina la successiva rimozione durante le fasi di post-processo. Inoltre la parte necessita di lavorazioni di finitura nelle superfici di accoppiamento. Nei processi di finitura è necessario predisporre un apposito sistema di fissaggio del pezzo tenendo in considerazione vari fattori quali:

- La forma complessa del componente
- Probabili errori dimensionali dovuti a ritiri durante la lavorazione in macchina o deformazioni dovute alla rimozione dei supporti

Talvolta sarà necessario inserire delle appendici sacrificali direttamente sul pezzo per ausiliare lo staffaggio in macchina. Ovviamente tali appendici faranno parte dello stesso job quindi alla fine delle lavorazioni sarà necessario rimuovere anch'essi ed eventualmente rifinire le zone rimosse dal pezzo.



Figura 9. Esempio di staffaggio e appendici sacrificali (a sinistra). Componente finito (a destra).

Ovviamente la realizzazione di pezzi con appendici sacrificali ed una grande quantità di supporti comportano un consumo più elevato delle polveri ed un aumento dello sfrido. Quindi risulta evidente che maggiori saranno i supporti e più i costi di produzione aumenteranno.

Al fine di diminuire la presenza dei supporti è necessario ripensare alla forma del componente prevedendo meno superfici aggettanti in funzione dell'orientamento



del pezzo in macchina. Negli ultimi anni sono state proposte varie modifiche ai classici sistemi di ottimizzazione per l'AM al fine di considerare i relativi vincoli di produzione.

Nel 2016 Langelaar [23] ha proposto una piccola modifica all'algoritmo di un OT mediante l'inserimento di un filtro che tenesse in considerazione i vincoli dell'AM: considerando una sola orientazione del pezzo sulla piattaforma e una discretizzazione della mesh di tipo rettangolare, tale filtro permette di realizzare un componente con superfici auto-supportanti per eliminare i problemi e i costi dovuti all'uso dei supporti durante la costruzione del pezzo in macchina.

Nel 2017 Mass e Amir [28] hanno realizzato un metodo a due step per diminuire le superfici aggettanti: il primo step riguarda l'uso di un modello basato sullo schematizzare mediante travi il componente e successivamente si procede nel secondo step ad una OT realizzata sulla base dello scheletro già identificato nello step precedente.

Nel 2018 Zhang e Zhou [50] hanno ideato un nuovo metodo per eliminare/ridurre le superfici aggettanti andando a sostituire eventuali fori e cavita di forma circolare con appositi elementi poligonali.

Lo stesso anno, Mhapsekar [29], sulla base di precedenti studi, ha proposto due approcci per integrare i vincoli tecnologici dell'AM nell'OT.

Infine Langelaar [22] ha fatto un passo avanti rispetto alla sua ricerca del 2016 e ha implementato il suo codice realizzando un'ottimizzazione che coinvolge contemporaneamente la topologia della parte, l'orientazione di costruzione e la minimizzazione delle superfici che richiedono supporti. Tale studio è stato applicato ad un caso 2D con massimizzazione della rigidezza ma può essere esteso ad altri tipi di problemi anche in 3D (introducendo il secondo angolo di orientamento).



Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

2.3 Diagramma di Voronoi

Il diagramma di Voronoi (anche detto tassellatura di Voronoi, decomposizione di Voronoi, o tassellatura di Dirichlet) prende il nome dal matematico russo Georgii Voronoi [45]. Egli definì il caso generale *n*-dimensionale che consiste in un partizionamento del piano in *n* poligoni derivati da *n* punti principali, dove ciascun poligono contenga uno solo degli *n* punti principali e dove ogni altro punto del poligono sia più vicino al punto principale del poligono che a tutti gli altri punti principali. Il perimetro di ciascun poligono è a metà strada tra due punti principali.

Viene sotto descritto il concetto base del diagramma di Voronoi [14] partendo dalla definizione di "distanza euclidea".

Dati due punti nel piano

$$p = (p_x, p_y)^T \quad q = (q_x, q_y)^T$$

Si definisce distanza euclidea:

$$d(p,q) = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2}$$

Dato un insieme finito di punti nel piano

$$P = \{p_1, p_2, \dots p_n\}$$

Il diagramma di Voronoi (Vor(P)) è l'insieme di n celle V(p_i), i=1...n tc:

$$q \in V(p_i) \leftrightarrow d(q, p_i) < d(q, p_j) \quad \forall p_j \in P \ j \neq i$$

In cui $V(p_i)$ denota la cella associata al punto p_i .

Dati due punti p e q nel piano, definiamo il bisettore di p e q come la retta passante per il punto medio tra p e q e perpendicolare al segmento \overline{pq} .

Indichiamo il semipiano contenente p con h(p,q).

Indichiamo il semipiano contenente q con h(q,p). \rightarrow dato un punto r nel piano,

$$r \in h(p,q) \leftrightarrow d(r,p) < d(r,q)$$

Osserviamo che:

$$V(p_i) = \bigcap_{1 \le j \le n, j \ne i} h(p_i, p_j)$$



Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

POLITECNICO DI TORINO La cella di Voronoi relativa al punto p_i si ottiene come l'intersezione di tutti i semipiani $h(p_i,p_j)$.

- (n-1) intersezioni di semi–piani;
- regione poligonale convessa limitata (o illimitata) da al più:
 - ➤ (n-1) lati;
 - ➤ (n-1) vertici.
- il diagramma di Voronoi risultante avrà come lati segmenti di retta o semirette; eccetto il caso in cui i punti siano tutti collineari nessun lato sarà una retta completa (ma al più una semiretta).



Figura 10. Diagramma di Voronoi bidimensionale

Le applicazioni del diagramma di Voronoi sono molteplici e riguardano varie discipline scientifiche: ad esempio in "robotica" il diagramma di Voronoi viene usato per realizzare il path planning in presenza di ostacoli; in "cartografia" permette di incollare insieme fotografie satellitari in grandi mappe costruite come mosaici di immagini; in "fisiologia" consente di fare un'accurata analisi della distribuzione capillare in sezioni di tessuto muscolare per calcolare il trasporto di ossigeno.

Inoltre i diagrammi di Voronoi sono anche utili nella fisica dei "polimeri", dove possono essere utilizzati per rappresentare il volume libero del polimero. In un recente studio [26] è stata analizzata la possibilità di realizzare mediante la stampa 3D delle strutture schiumose capaci di resistere a carichi di compressione non indifferenti, implementando l'algoritmo della tassellatura di Voronoi nello spazio. Viene mostrato nella Figura 11 un esempio di modello stampato in 3D (mediante una stampante FDM della MakerBot) realizzato nello studio, sopra citato, di Martinez e colleghi.

Quindi anche in questo caso l'AM permettere di realizzare, partendo da una tassellatura di Voronoi (nello spazio), strutture abbastanza complesse che possono



presentare un comportamento elastico isotropico con un andamento quasi-lineare tra densità e modulo di Young [25].



Figura 11. Cute Octopus. Realizzato mediante la stampante 3D MakerBot [26]

Inoltre realizzare un componente utilizzando il diagramma di Voronoi, oltre a dare una maggiore valenza estetica, permette di ridurre notevolmente il peso della parte e, se i parametri della formulazione del diagramma vengono opportunatamente studiati, è possibile ottenere strutture con buone caratteristiche meccaniche [27].



Figura 12. Voronoi chair by Ali Torabi [44]



POLITECNICO DI TORINO Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica Tuttavia, utilizzare il diagramma di Voronoi in fase di realizzazione del modello CAD di un componente richiede un eccessivo tempo di calcolo a causa delle forme complesse talvolta ripetute più volte nello schema del disegno: ciò rende in particolar modo parecchio lenta un'analisi FEM dove il calcolatore dovrà discretizzare una mesh molto fine per poter avere dei risultati abbastanza sensati.



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica
3. Caso di studio

Viene di seguito presentato il caso studio su cui viene incentrato il lavoro di questa elaborato di tesi.

La Figura 14 mostra l'oggetto di tale caso studio ovvero il *carro guida di una macchina di misura a coordinate a sensore multiplo*. La macchina in questione viene prodotta dall'azienda torinese *SPEA S.p.A.* [39]. In particolare II carro guida è inserito nelle macchine della serie *Flying Probe* [16] utilizzate per effettuare un'ampia gamma di test sulle schede elettroniche.

La Figura 13 mostra la *4080 Flying Probe Tester*, macchina di misura multi funzione che presenta in totale 8 sonde, ciascuna movimentata su un carro guida, capaci di effettuare con estrema accuratezza ed in contemporanea 8 test diversi su altrettante schede elettroniche.



Figura 13. 4080 Flying Probe Tester

L'obbiettivo preposto nello svolgimento di questo elaborato è quello di riprogettare il carro al fine di alleggerire nel complesso la struttura cercando di mantenere quasi inalterata la rigidità complessiva.



POLITECNICO DI TORINO

Il componente originale è stato realizzato mediante tecnologie tradizionali per cui il lavoro di alleggerimento è stato piuttosto limitato. La struttura necessita di una riduzione almeno del 10% per raggiungere i target necessari per un ottimale funzionalità della macchina di misura.

La riprogettazione del componente è stata effettuata in funzione della sua fabbricazione mediante tecnologie additive ed in particolare si è optato per l'uso della tecnologia di Laser Powder Bed Fusion.



Figura 14. Struttura base della macchina di misura a coordinate

Nella Figura 15 viene mostrata la vista esplosa del complessivo in esame: i soli componenti che hanno fatto parte dello studio della riprogettazione sono il "carro asse Y", il "carro asse X" e i due "coperchi laterali".

L'ingombro massimo della struttura è di 220x690x101 mm³ (X-Y-Z).

La massa di ciascuno di quest'ultimi componenti è riportata nella Tabella 2.







Figura 15. Vista esplosa della struttura

Come si può vedere dalla figura in alto (Figura 15) la struttura è composta da due parti fisse collegate fra di loro, il *carro asse Y* ed il *carro asse X* che in questa configurazione funge da basamento. La parte mobile, sulla quale è posto il sistema di misura (*supporto elettronico asse Z, staffa asse Z, sonda*) è alimentato da un motore lineare, che interagisce con i magneti permanenti alloggiati nella parte interna del *carro asse Y*, generando un campo magnetico.

In particolare è possibile notare dalla Figura 16 come sono posizionati il motore (in blu) ed i relativi magneti (in azzurro) all'interno del carro.

Il motore è collegato al sistema mobile mediante il *cursore asse Y* che scorre per mezzo di quattro pattini a ricircolo di sfere su due guide d'acciaio, poste sulle ali del carro asse Y. Tali guide garantiscono un'ottima rigidità alla struttura e sono fissate ad essa mediante una serie di viti equispaziate di 25 mm.



Candidato: Marco Viccica



Figura 16. Dettaglio motore lineare e magneti



3.1 Analisi FEM componente originale

Prima di passare alla fase di riprogettazione dei componenti è necessario effettuare un'analisi agli elementi finiti per valutare quelli che sono le deformazioni e gli stati di tensioni presenti.

Tale analisi è stata effettuata mediante il software *Inspire™ 2018 SolidThinking*[®] *version 2018 build 9508* del pacchetto *Altair*. Il PC utilizzato per la realizzazione di queste analisi presenta le seguenti caratteristiche di sistema:

- Processore: Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU @2.40GHz 64-bit
- Memoria installata (RAM): 8,00 GB

Per preparare il modello CAD all'analisi è necessario innanzitutto associare ad ogni componente il materiale utilizzato con le proprie caratteristiche meccaniche. Nella Tabella 3 sono elencati i materiali di ciascuna parte con le relative proprietà.

Componente	Materiale	E [GPa]	ν	ρ [kg/m³]	Rp ₀₂ [MPa]
Carro Y	Al7075-T6	72,5	0,33	2700	495
Carro X	Al7075-T6	72,5	0,33	2700	495
Coperchi laterali	Al7075-T6	72,5	0,33	2700	495
Motore Ironcore int	motore ironcore	2	0,394	4140	285
Motore Ironcore ext	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)	104	0,33	4820	103,4
Dissipatore	Anticorodal 6082 T6	69	0,33	2700	240
Magneti	AC41A (Zama 15)	85	0,3	6700	285
Guide	C40	210	0,28	7800	785
Pattini	C40	210	0,28	7800	785
Cursore asse Y	Al7075-T6	72,5	0,33	2700	495
Supporto elettronica asse Z	AI7075-T6	72,5	0,33	2700	495
Staffa asse Z	AI7075-T6	72,5	0,33	2700	495
Sonda	M. indeformabile				

Tabella 3. Proprietà dei materiali dei componenti

Sono stati in seguito applicati i vincoli e i carichi presenti sull'assieme.

Per non complicare il modello del sistema di misura sono state applicate delle masse concentrate pari a 600 g e 870 g rispettivamente sulla "staffa asse Z" e sulla "sonda". Entrambe le masse sono state collegate ai componenti mediante dei connettori rigidi e poste in prossimità del baricentro (Figura 17).





Figura 17. Masse concentrate sul sistema di misura

Per simulare la forza di attrazione magnetica generata tra il "motore ironcore" e i "magneti", sono stati applicati dei carichi verticali pari a 500 N (come indicato dal costruttore del motore) ed un vincolo di posizione che impedisce lo slittamento in direzione longitudinale come è possibile vedere dalla Figura 18 e Figura 19.



Figura 18. Carichi e vincoli sul motore ironcore



Figura 19. Carici e vincoli sui magneti



POLITECNICO DI TORINO Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica Infine è stato applicato un vincolo di incastro a ciascun piede del "carro asse X" (Figura 20).



Figura 20. Vincoli sul carro asse X

Dopo aver impostato la condizione di carico è stata avviata l'analisi FEM per valutare lo stato delle deformazioni e delle tensioni del componente.

Nella Figura 21 possiamo vedere i risultati dell'analisi FEM rispettivamente delle deformazioni e delle tensioni di von Mises: in particolare sono state effettuate due diverse analisi i cui parametri sono presentati nella Tabella 4.

	Analisi n°1	Analisi n°2	
Tempo di esecuzione	7' 25''	1h 42' 37"	
Dimensione elemento [mm]	3,59	2,18	
Numero tot elementi	384192	1299903	
Spostamento max Mag [µm]	26	30,4	
FS min	43	12,8	
Von Mises max [MPa]	18	22	

Tabella 4. Risultati analisi FEM componente originale

	Analisi n°1	Analisi n°2
Spostamento max globale [µm]	26	30,4
Spostamento max asse X [µm]	20	24
Spostamento max asse Y [µm]	6,7	7,6
Spostamento max asse Z [µm]	7	8,5

Tabella 5: Analisi spostamenti nei vari assi



POLITECNICO DI TORINO



Figura 21. Risultati di spostamento massimo e di massima tensione di von Mises delle analisi n°1 e n°2



POLITECNICO DI TORINO

Dalla Figura 21 è facile notare come, essendo tale struttura complessivamente soggetta a carichi molto bassi, si generi uno spostamento massimo solo sull'estremità della sonda ed un fattore di sicurezza minimo molto elevato su un punto di contatto tra pattino e guida di acciaio per l'analisi 1 (Figura 22) e nell'intorno di una vita di serraggio del magnete al carro per l'analisi 2 (Figura 23).



Figura 22. Particolare della massima tensione di von Mises nell'analisi n°1



Figura 23. Particolare della massima tensione di von Mises nell'analisi n°2



POLITECNICO DI TORINO

3.2 Ottimizzazione

Essendo una macchina di misura a coordinate, il criterio di progettazione adottato è la massimizzazione della rigidezza e la riduzione degli spostamenti e per tale ragione la distribuzione delle tensioni nel componente è molto bassa. Il sistema analizzato quindi risulta soggetto a tensioni ampliamente inferiori al limite di snervamento del materiale, con deformazioni massime dell'ordine del micron. Inspire, essendo un software che si basa sul metodo SIMP per la parte di ottimizzazione topologica, tende ad eliminare una quantità eccessiva di materiale. Infatti il metodo SIMP, come già detto nel paragrafo 1.3, basa il suo algoritmo sulla relazione tra la densità del materiale in un determinato punto e la rigidezza in tal punto, ed essendo in questo caso la struttura soggetta a carichi molto bassi, non è possibile raggiungere un risultato di ottimizzazione topologica sensato.

Non potendo utilizzare l'ottimizzazione topologica, si è proseguito con una riprogettazione del componente seguendo le regole del DfAM, partendo ovviamente dalle zone di non design, andando ad eliminare materiale dove possibile per non intaccare la rigidità della struttura ed andando quindi a valutare di volta in volta, mediante analisi FEM, come varia il comportamento in funzione del nuovo design realizzato.



Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

4. Design

In questo capitolo vengono evidenziati i vari passaggi eseguiti per la riprogettazione di 3 componenti della struttura: carro asse Y, carro asse X, coperchi laterali.

La modellazione CAD 3D è stata effettuata mediante l'uso del software di *Dassault Systemes: SolidWorks*[®] 2017.

4.1 Design per AM

Dal momento che si è scelto di realizzare il componente riprogettato mediante la tecnologia additiva del L-PBF con una lega di alluminio, l'intera riprogettazione dei vari componenti è stata soggetta alle regole del Design for Additive Manufacturing (DfAM).

4.1.1 Riprogettazione carro asse Y

Al fine di minimizzare la massa del carro è stato necessario andare ad individuare quelle che sono le zone di non design che devono rimanere inalterate rispetto al progetto iniziale, e le zone di design su cui si deve agire modificando la geometria seguendo le regole del DfAM.

Il componente originale (carro asse Y) realizzato in Al7075-T6 ha una massa pari a 3,113 kg ed ingombro totale pari a 88x690x55 mm³.

Come primo passo di riprogettazione si è pensato di eliminare le zone di alleggerimento per poter andare a lavorare su un piano omogeneo. Nelle immagini seguenti si vede come risulta il componente privo degli alleggerimenti sulle superfici laterali e sulla superficie della base del carro.







POLITECNICO DI TORINO



È stato poi necessario andare ad individuare le zone di design, come si può vedere nella Figura 27 e Figura 28.



Figura 27. Zone di design superfici laterali





Per la riprogettazione della base si è pensato di utilizzare il diagramma di Voronoi. Per cui è stato generato un pattern [18] delle dimensioni di massima pari a quelle della zona di design descritta nella Figura 28; è stato poi applicato il pattern sulla



base e si è eseguito uno schizzo che meglio possa rappresentare il pattern, avendo cura di lasciare le zone di non design inalterate.



Figura 30. Risultato taglio estruso della geometria con pattern Voronoi

Per le zone di design laterali si è realizzata una geometria, come si vede in Figura 31, che permette di realizzare due pareti di spessore di circa 2 mm interposte da un foro fusiforme. Per queste geometrie sono state inserite, in funzione della direzione di stampa, delle curvature che permettano di evitare l'inserimento di supporti (impossibili da eliminare in zone non accessibili).



Figura 31. Geometria di taglio delle superfici laterali



POLITECNICO DI TORINO



Figura 32. Risultato taglio delle superfici laterali

Oltre al taglio applicato lungo all'asse Y, è stato inserito un pattern "honeycomb" (a nido d'api), come si può vedere nella Figura 33, i cui lati inclinati formano un angolo di 45° rispetto alla verticale così da permettere al foro esagonale di auto-sorreggersi durante la stampa del pezzo in macchina.



Figura 33. Pattern honeycomb e relative dimensioni

È stato guindi applicato un taglio l'ungo l'asse X della geometria sopra descritta solo sulle pareti esterne, come si può vedere nella Figura 34.



Figura 34. Taglio estruso verso l'esterno

Mentre sulle pareti interne è stata utilizzata sempre la stessa geometria ma sfalsata di 1,9 mm al fine di aumentare la rigidezza dell'assieme.



POLITECNICO **DI TORINO** Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale



Figura 35. Taglio estruso in entrambe le direzioni

Nella Figura 36 si può meglio notare in sezione il risultato finale della geometria honeycomb applicata. La massa finale così ottenuta è pari a 2,63 kg (riduzione del 15,5% del solo "carro asse Y").



Figura 36. Risultato del taglio con geometria honeycomb

Una volta modificata la geometria si è passati ad un'analisi FEM per valutare il fattore di sicurezza minimo ed il massimo spostamento. L'analisi è stata effettuata andando a sostituire il componente sopra modificato all'interno del modello realizzato su *Inspire*³.

Le analisi sono state effettuate utilizzando come materiale una particolare lega di alluminio realizzata appositamente per il suo impiego in tecnologie L-PBF. Tale lega denominata *AlSi10Mg* presenta proprietà simili a quella dell'Al7075-T6 come descritto nella tabella seguente (Tabella 6), sebbene la tensione di snervamento R_{p02} risulta molto inferiore dopo il trattamento termico di distensione.

³ Inspire[™] 2018 SolidThinking[®] version 2018 build 9508, Altair Engineering



POLITECNICO DI TORINO

Componente	Materiale	E [GPa]	ν	ρ [kg/m³]	Rp ₀₂ [MPa]
Modello originale	Al7075-T6	72,5	0,33	2700	495
Modello AM	AlSi10Mg [13]	65	0,33	2670	230 ⁴

Tabella 6. Proprietà meccaniche a confronto del modello originale e di quello AM



Figura 37. Risultato analisi FEM sulle prime modifiche del carro asse Y

Da tale analisi si è ottenuto un fattore di sicurezza minimo pari a 14 ed uno spostamento massimo pari a 55 μ m.

Per le superfici laterali è stata proposta un'ulteriore geometria con pattern Voronoi appositamente modellata per ridurre al massimo la necessità di applicazione dei supporti.

⁴ Valore di tensione di snervamento dopo trattamento termico di distensione per 2h a 300°C



POLITECNICO



Figura 38. Pattern Voronoi su superfici laterali

Questo tipo di geometria dona al componente una vera valenza estetica di AM in quanto, oltre alle forme che meglio riescono a simulare il concetto di "natura", la sua realizzazione è limitata esclusivamente alle tecnologie additive.



Figura 39. Risultato taglio superfici laterali con pattern Voronoi

Come si può vedere nella figura in alto, è stato anche questo caso applicata la stessa geometria sulle pareti interne ed esterne.



Figura 40. Risultato taglio superfici laterali con pattern Voronoi (prospettiva)



POLITECNICO DI TORINO

La massa finale così ottenuta è pari a 2,64 kg (riduzione del 15,2%).

Per questa geometria non è stato possibile realizzare l'analisi FEM a causa della complessità e conseguente difficoltà da parte del calcolatore a discretizzare l'intero componente. Per riuscire ad effettuare l'analisi è necessaria una maggiore potenza di calcolo.

Si è scelto quindi di continuare con la geometria honeycomb che a differenza di quella Voronoi garantisce una maggiore riduzione di peso, sebbene la differenza sia molto minima.

Il basamento del carro è stato ulteriormente alleggerito effettuando un taglio estruso di 7 mm verso il basso utilizzando una geometria che delimiti le zone di fissaggio dei magneti. Inoltre è stata variata la geometria Voronoi per aumentare l'alleggerimento. Il componente ha raggiunto una massa pari a 2,44 kg.



Figura 41. Ulteriore alleggerimento del basamento del carro asse Y

Rispetto al complessivo di partenza è possibile eliminare i tappi laterali del carro asse Y e di conseguenza i fori necessari al sistema di fissaggio su quest'ultimo.

Come è mostrato nella Figura 42 in basso, è necessario ridurre le due superfici aggettanti, ma per far ciò bisogna tenere conto di tutto il sistema complessivo.



Figura 42. Superfici aggettanti del carro asse Y



POLITECNICO DI TORINO

Nella figura in basso (Figura 43) è facile notare come la geometria del carro è limitata dalla posizione del motore e della riga per il sistema di misura lineare della posizione.



Figura 43. Sezione del carro con vista del motore

Di conseguenza è stato realizzato un taglio estruso secondo la geometria rappresentata nella Figura 44.



Figura 44. Geometria taglio delle superfici aggettanti

La geometria così disegnata tiene conto anche dei fori di fissaggio e della lunghezza del gambo delle viti annesse. In basso viene rappresentato il componente con i tagli effettuati. Il peso si è così ridotto a **2,24 kg**.



POLITECNICO



Figura 45. Risultato taglio delle superfici aggettanti

4.1.2 Riprogettazione carro asse X

Si è proseguito con la riprogettazione del "Carro asse X" che originariamente è stato realizzato in Al7075-T6 con massa pari a 1,06 kg ed ingombro totale pari a 250x220x46 mm³.



Figura 46. Geometria originale del "carro asse X"



POLITECNICO DI TORINO Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale

Candidato: Marco Viccica

È stata ridotta la massa sulla superficie di accoppiamento col dissipatore e le superfici laterali come indicato in Figura 47.



Figura 47. Nuova geometria su superficie di accoppiamento con dissipatore (vista dal basso)



Figura 48. Nuova geometria su superficie di accoppiamento con dissipatore (vista laterale)

Un ulteriore modifica è stata effettuata sui piedi del carro.





Figura 49. Modifiche sui piedi del carro

La massa così ottenuta si è ridotta a **680 g**.



4.2 Design per l'assemblaggio

Per meglio sfruttare le potenzialità dell'AM, si è scelto di riprogettare l'assieme unendo più componenti in uno: ciò ha permesso di eliminare gli elementi di fissaggio ed aumentare la rigidezza complessiva del sistema. Per il caso studio in esame si è scelto di assemblare in unico componente il carro Y, il carro X e uno dei due coperchi laterali. Nella Figura 50 vediamo l'assemblaggio dei due carri.



Figura 50. Assemblaggio carro asse Y e carro asse X

Dovendo realizzare il componente con una macchina EOS M400, il cui volume di lavoro è pari a 400x400x400 mm³ [15] non è stato possibile posizionarlo sulla piattaforma per intero in quanto la dimensione massima è pari a 690 mm (l'ingombro totale della struttura è pari a 690x196x101 mm³).



Figura 51. Disposizione su piattaforma M400



Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

POLITECNICO DI TORINO In un primo momento era stato pensato di dividere il componente in due parti con piano di divisione compreso tra i due piedi; tramite un'anteprima effettuata sul software *Materialise Magics 22.0* si è potuto constatare che la quantità di supporti da inserire per sorreggere le parti a sbalzo è molto elevata, come è possibile vedere nella Figura 52.



Figura 52. Anteprima inserimento supporti

Dunque, per far fronte ai vincoli dimensionali della piattaforma di costruzione e per ridurre ulteriormente la quantità di supporti rispetto al caso analizzato sopra, si è optato per una suddivisione del componente in 3 parti.





Ciò ha permesso di poter posizionare all'interno della macchina sia le parti a sbalzo (parte 1 e parte 3) che la parte centrale (parte 2) direttamente sulla piattaforma includendo solo il sovrametallo per il taglio mediante EDM. Questa strategia ha consentito di diminuire il numero di supporti, saturare la superficie della piattaforma e limitare l'altezza del job.

Sulla superficie laterale del carro sono stati inseriti in basso rilievo una numerazione progressiva (vedi Figura 54) per meglio distinguere i 3 componente e per facilitare le fasi di montaggio e fissaggio. La realizzazione di tali elementi mostra ancora una volta la facilità con cui l'AM può produrre geometrie e vari dettagli difficilmente realizzabili con le tecnologie tradizionali.



POLITECNICO



Figura 54. Numeri in basso rilievo

Si è previsto di connettere le 3 parti tra di loro mediante il fissaggio delle guide d'acciaio lungo la superficie superiore del carro asse Y ed infine tramite un accoppiamento con interferenza realizzato mediante una geometria rappresentata in Figura 55.



Figura 55. Geometria per accoppiamento per interferenza delle 3 parti

Inoltre, per ridurre le tensioni di intaglio sono stati inseriti dei raccordi sulla geometria forata.





Figura 56. Inserimento di raccordi



Figura 57. Parte 1

Per ridurre ulteriormente il volume di supporto necessario per la costruzione della parte 2 si è scelto di apportare leggere variazioni sul design. Nella Figura 58 si vede come nella zona centrale sono stati introdotti dei tagli a forma triangolare tali da ridurre le zone a sbalzo.



Figura 58. Tagli triangolari sulla parte 2



Dovendo utilizzare il carro in unica configurazione, essendo stato inizialmente progettato in modo simmetrico per varie configurazioni, si è pensato di effettuare un foro per ridurre la massa sul piede destro, come si vede dalla Figura 59.



Figura 59. Riduzione massa sulla base della parte 2

Si è scelto poi di svuotare delle parti molto massive interne. Nello specifico, come si vede dalla sezione in Figura 60, oltre ad apportare un notevole alleggerimento interno, sono stati introdotti sulle pareti laterali interne delle superfici inclinate a 45° così da limitare i supporti interni.



Figura 60. Inserimento piani inclinati

Sebbene le guide in acciaio garantiscano un ottimo fissaggio ed una buona rigidezza tra i tre elementi del carro, è stato necessario inserire un sistema ulteriore



di fissaggio (viti M4-5) sulla parte inferiore così da evitare deformazioni indesiderate dovute alla flessione quando il carico si trova sugli estremi delle parti a sbalzo. Il sistema sopra descritto è visibile nella Figura 61 e Figura 62.



Figura 61. Sistema di fissaggio tra le 3 parti (vista dall'alto)



Figura 62. Fissaggio inferiore tra parte 1 e parte 2

Per eliminare del tutto la presenza di supporti sulla parte più aggettante del componente centrale e per migliorare la rigidezza del sistema si è pensato di inserire degli elementi reggi-mensola con una trama interna a forma di honeycomb per ridurne il peso.





Figura 63. Inserimento supporti reggi-mensola (vista laterale)



Figura 64. Inserimento supporti reggi-mensola

Nel componente centrale erano presenti ancora aree inaccessibili per un eventuale eliminazione dei supporti generati per sorreggere superfici all'interno presenti, quindi si è modificata la geometria di tali superfici, di modo da evitare qualunque post lavorazione (Figura 65).





Figura 65. Eliminazione aree inaccessibili interne

Infine si è scelto di assemblare un solo coperchio laterale sul carro Y al fine di lasciare una via di inserimento per il motore. Il coperchio è stato saldato sulla parte 3 come si vede dalla Figura 66.



Figura 66. Riprogettazione coperchio laterale su parte 3

In Figura 67 e Figura 68 viene mostrato rispettivamente il rendering dell'assemblato finale in vista esplosa ed il rendering dell'intero sistema di misura.



POLITECNICO DI TORINO Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica



Figura 67. Render finale del complessivo in vista esplosa



Figura 68. Render di tutto l'assieme



POLITECNICO DI TORINO

4.3 Finitura

Il carro presenta vari tipi di fori per il fissaggio delle guide del motore lineare e dei magneti che fanno parte del sistema di movimentazione della sonda nel piano. Prima di convertire il file CAD in STL per essere poi inviato alla macchina, è stato necessario apportare delle modifiche sui vari fori presenti.

I fori che da progetto erano passanti sono stati mantenuti nella loro dimensione nominale, mentre i fori da filettare sono stati opportunamente modificati a seconda del proprio orientamento e della dimensione.

Per il fissaggio delle guide di acciaio su cui scorreranno i pattini sono previsti dei fori ciechi da 2,5 mm di diametro (fori filettati M3), equispaziati di 25 mm. Questi fori vengono realizzati direttamente alle macchine utensili durante le fasi di postprocesso e quindi per la preparazione in macchina additive sono stati tutti chiusi ad eccezione del primo della serie (sovrametallo di 0,25 mm sul raggio), così da avere un punto di riferimento per far partire la foratura in macchina CNC.



Figura 69. Eliminazione fori per il fissaggio delle guide

La maggior parte dei restanti fori che hanno un diametro di 3,3 mm (foro filettato M4) sono stati realizzati con un sovrametallo di 0,25 mm.

Mentre per i restanti fori filettati con diametro 4,2 mm (M5) si è aggiunto un sovrametallo con restringimento del foro pari a 3,7 mm.



La superficie di accoppiamento con il modulo dissipatore ha richiesto l'inserimento di 0,5 mm di sovrametallo. Tale aggiunta è fondamentale in quanto si è dovuto tenere conto della qualità della superficie dopo la rimozione dei supporti.

Nelle Figure Figura 70 e Figura 71 sono evidenziati in colore rosso le zone in cui è stato aggiunto il sovrametallo per le successive lavorazioni.



Figura 70. Fori e superfici con sovrametallo (vista dal basso)



Figura 71. Fori e superfici con sovrametallo (vista dall'alto)



4.4 Supporti

Dopo aver opportunatamente inserito i sovrametalli e preparato il componente per la fase di finitura post-processo, si è passati alla preparazione del file STL andando ad inserire i supporti.

Con l'ausilio del software per la preparazione dei dati *Materialise Magics*, disponendo le 3 parti con una distanza di 4mm dalla piattaforma lungo l'asse Z, si è proceduto alla generazione automatica dei supporti. Sono stati inoltre inseriti manualmente ulteriori supporti laddove il software non li ha generati automaticamente sebbene fossero necessari.

I supporti utilizzati per ancorare i pezzi alla piattaforma devono essere eliminati mediante elettroerosione a filo così da poter garantire in unico taglio una buona finitura superficiale sulla base delle 3 parti necessaria per orientare adeguatamente il pezzo sulla macchina CNC. Inoltre si può notare dalle immagini seguenti come la geometria a nido d'ape riprodotta sulle pareti laterali e sugli elementi reggimensola non necessiti di alcun supporto.



Figura 72. Supporti parte 1



POLITECNICO DI TORINO



Figura 74. Supporti parte 3

Sulla base dei dati di volume di supporti stimati da Magics e tenendo presente della densità della lega di alluminio usata per la produzione del componente, si ricava per la parte 1, 2 e 3 che la quantità di polvere per i soli supporti è pari rispettivamente a 24 g, 81 g e 18 g per un totale di **123 g**.



5. Ciclo di lavoro

Il componente è stato pensato per la sua produzione mediante la macchina a letto di polvere EOS M400 [15] avente un volume di lavoro pari a 400x400x400 mm³ e un fascio laser di potenza massima pari a 1 kW. Le dimensioni della piattaforma consentono di includere in unico job tutti e 3 le parti, la cui disposizione sul piano è schematizzata nella Figura 75. L'angolazione dell'asse maggiore di ciascun componente rispetto alla parete della piattaforma perpendicolare al movimento del recoater è necessaria al fine di rendere graduale il contatto tra la lama e il layer solidificato: superfici parallele alla lama possono causare forti impatti e quindi deformazioni dello strato appena solidificato, inceppamenti della lama durante il suo movimento (con conseguente sospensione del job) ed usure premature di quest'ultima.



Figura 75. Disposizione su piattaforma EOS M400

Per la fase di post processo alle macchine utensili è stato analizzato il componente al fine di assegnare le superfici che saranno soggette a lavorazione: tali superfici sono state indicate mediante un numero, come è possibile notare dalla figura seguente (Figura 76).




Figura 76. Assegnazione delle superfici da lavorare su CNC

Per quanto riguarda il materiale di produzione del carro si è optato per la lega di alluminio per l'AM denominata AlSi10Mg (Tabella 6). Come già discusso nei capitoli precedenti, tale materiale presenta caratteristiche simili a quello del pezzo originale. Inoltre l'AlSi10Mg è generalmente usato per produrre parti molto sottili e con geometrie complesse ideale in questo caso per la trama honeycomb di spessore molto limitato presente sulle pareti laterali del componente.

Si riporta a pagina 63 la tavola da disegno del componente ultimato rappresentato nelle varie viste. Tale tavola presenta le quote principali necessarie alla realizzazione dei fori in macchina CNC.

Dopo aver convertito il file CAD nel formato STL ed aver appositamente disposto i componenti sulla piattaforma ed inserito gli opportuni supporti, si passa alla produzione fisica del carro la quale prevede l'esecuzione dei seguenti passaggi:

- Produzione delle 3 parti mediante macchina AM EOS M400 e successiva rimozione della polvere non fusa, direttamente in macchina.
- Trattamento termico.
- Rimozione dei supporti accessibili.
- Rimozione delle 3 parti dalla piattaforma mediante elettroerosione a filo (EDM) e conseguente spianatura della superficie (6) delle parti 1 e 3 e dei piedi della parte 2.
- Rimozione dei supporti residui.
- Pallinatura per uniformare la rugosità sulle superfici.



- Assemblaggio dei 3 componenti mediante apposito accoppiamento per interferenza.
- Montaggio del complessivo sulla tavola del centro di lavoro CNC.
- Spianatura superficie di accoppiamento guide (1).
- Lavorazione di foratura sulla superficie (1).
- Spianatura superficie dissipatore (4) della parte 2 e superficie alloggiamento cilindro di bloccaggio (5) (Figura 77).
- Lavorazione di foratura su tutte le superfici restanti come indicato nel "Cartellino di lavoro".



Figura 77. Sede cilindro di bloccaggio



5.1 Tavola di disegno per il ciclo di lavoro

Inserire tavola ciclo di lavoro in A3



5.2 Elementi di staffaggio

Per il corretto posizionamento e fissaggio del componente sulla tavola di lavoro della macchina a controllo numerico è stato necessario ideare un apposito sistema di staffaggio, come illustrato nelle immagini seguenti.

In particolare sono stati pensati dei blocchetti verticali da inserire sulle parti a sbalzo del carro, ovvero l'estremità della parte 1 e della parte 3. Per ciascuna parte sono stati realizzati 3 blocchetti adeguatamente accoppiati mediante sistema di fissaggio con viti M4. Il blocchetto superiore presenta la base di accoppiamento appositamente conformata per essere inserita nei fori Voronoi della base del carro, come è possibile notare dalla seguente immagine (Figura 78).



Figura 78. Dettaglio del sistema di fissaggio su parte 1 (sx) e parte 3 (dx)

Per quanto riguarda lo staffaggio della parte 2, sono stati realizzati dei semplici blocchetti a forma cubica con 4 fori ciechi filettati per consentire l'adeguato accoppiamento con viti per ciascun piede del componente. Nella figura seguente viene riportato il cubo sezionato alla mezzeria di due fori paralleli.





Figura 79. Staffaggio su parte 2

Per la lavorazione delle superfici (3) e (7) è stato realizzato un elemento che permetta il bloccaggio laterale del carro sulla tavola della macchina CNC. Tale elemento di staffaggio (in giallo in Figura 80) è stato disegnato per accoppiarsi direttamente ai blocchetti verticali descritti sopra. Lo staffaggio laterale può essere usato per entrambi i lati in quanto progettato in modo simmetrico con il medesimo sistema di fissaggio al blocchetto azzurro ed arancione presenti in figura.



Figura 80. Staffaggio laterale



Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

POLITECNICO DI TORINO Nella figura in basso si vede come risulta nel complesso l'intero sistema di staffaggio sul componente assemblato. Tale attrezzatura, ad ogni orientamento e fase, viene appositamente bloccata sulla tavola porta pezzo con un adeguato sistema di morse.



Figura 81. Sistema di staffaggio sull'intero complessivo assemblato



5.3 Cartellino di lavoro

Inserire cartellino di lavoro stampato in A3.



5.4 Tempo ciclo

Il tempo ciclo totale per la produzione del componente così riprogettato è dato dalla sommatoria dei tempi delle varie fasi:

•	Preparazione macchina	1h 30'
•	Produzione su M400	60h
•	Pulizia job estratto dalla macchina	30′
•	Trattamento termico	2h
•	Rimozione supporti	30'
•	Lavorazione su EDM	1h
•	Pallinatura	30′

Per quanto riguarda il tempo necessario all'esecuzione delle fasi del ciclo di lavoro inerenti la sola macchina a controllo numerico, è necessario innanzitutto conoscere i parametri di taglio degli utensili utilizzati. Vengono sotto presentati dei parametri di taglio per lavorazioni di foratura e fresatura consigliati in letteratura.

Parametri di taglio	Centratura	Foratura	Allargatura	Maschiatura
Velocità di taglio - v_t [m/min]	40	40	35	50
Avanzamento - a [mm/giro]	0,08	0,08	0,3	=passo
Point angle - β [°]	130	130	130	/
Velocità angolare	264	264	219 5	455
n [giri/min]	304	504	516,5	455
Velocità di avanzamento	20	20	96	<i>m</i> . <i>a</i>
v _a [mm/min]	29	25	90	n•a
Profondità di passata - L [mm]	1,2	/	/	/
Diametro punta di centratura d	05	,	/	1
[mm]	0,0			/

Tabella 7. Parametri di taglio per lavorazione di foratura

Parametri di taglio per fresatura	Ø12mm	Ø35mm
Velocità di taglio - v_t [m/min]	241	650
Avanzamento - a_z [mm/giro]	0,09	0,15
N° denti - Z	2	3
Velocità angolare - n [giri/min]	6400	5914,5
Velocità di avanzamento - v_a [mm/min]	1200	2661,5

Tabella 8. Parametri di taglio per la lavorazione di fresatura di due differenti frese



POLITECNICO DI TORINO Una volta individuati tutti i parametri di taglio è possibile ricavare i tempi attivi di asportazione di truciolo applicando le seguenti formule:

$$\boldsymbol{n} = \frac{1000 \cdot \boldsymbol{v}_t}{\pi \cdot \boldsymbol{D}}$$

Foratura: $v_a = n \cdot a$ $t_{f_{passante}} = \frac{L+2e}{v_a}$ $t_{f_{cieco}} = \frac{L+e}{v_a}$ $e = \frac{D}{2tg(\beta/2)}$ Fresa: $v_a = a_z \cdot Z \cdot n$ $t_{fresa} = \frac{L+e}{v_a}$ $e = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2}$

N°	Operazione	L [mm]	e [mm]	n [giri/min]	$oldsymbol{v}_a$ [mm/min]	t [min]	t [s]
	Spianatura (1)	1380	6	5914	2662	0,52	31
80	Centratura n.46 Ø2,5 (1)	55,2		364	29	1,90	114
	Foratura n.48 Ø2,5 (1)	477	56	364	29	18,31	1098
	Maschiatura n.48 M3x0,5 (1)	322		455	227	1,41	85
	Allargatura n.26 Ø3,3 (1)(2)	255	20	318	96	2,88	173
	Maschiatura n.26 M4x0,7 (1)(2)	174		455	318	0,55	33
	Allargatura n.9 Ø3,3mm (3)	78	7	318	96	0,89	53
	Allargatura n.6 Ø3,3mmx10mm (3)	60	8	318	96	0,71	43
90	Maschiatura n.15 M4x0,7 (3)	100,5		455	318	0,32	19
	Allargatura n.2 Ø4,2mm (3)	25,64	2	318	96	0,29	17
	Maschiatura n.2 M5x0,8 (3)	16		455	364	0,04	3
100	Allargatura n.4 Ø4,2mm (4)	18	4	318	96	0,23	14
	Maschiatura n.4 M5x0,8 (3)	18		455	364	0,05	3
	Allargatura Ø3,3mm n.2(6) e n.4(5)	39,6	5	318	96	0,46	28
	Maschiatura M4x0,7 n.2(6) e n.4(5)	33,4		455	318	0,10	6
	Spianatura (4)	278	16	5914	2662	0,11	7
	Spianatura (5)	234	5	6400	1200	0,20	12
	Allargatura n.9 Ø3,3mm (7)	78	7	318	96	0,82	49
110	Allargatura n.6 Ø3,3mmx10mm (7)	60	8	318	96	0,63	38
	Maschiatura n.15 M4x0,7 (7)	100,5		455	318	0,32	19
	Allargatura n.2 Ø4,2mm (7)	25,64	2	318	96	0,27	16
	Maschiatura n.2 M5x0,8 (7)	16		455	364	0,04	3
	Το	tale				31,04	1862

TEMPO DI ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO

Tabella 9. Tempo di asportazione di truciolo



POLITECNICO DI TORINO

Bisogna considerare nel calcolo dei tempi macchina anche la quota parte dei movimenti dell'utensile a vuoto, ovvero senza alcuna lavorazione di taglio, partendo dalla posizione di azzeramento (posizione di cambio utensile) e passando da un punto ad un altro della superficie da lavorare ed infine i movimenti di ritorno. Tali movimenti sono realizzati dalla macchina in rapido. Per il calcolo seguente è stato consultato un catalogo di macchine CNC (centro di lavoro a 3 assi Kinetic 1120 - Fagor and Heidenhain [40]) dal quale è stato possibile reperire i dati delle velocità in rapido, lungo i vari assi, dell'utensile:

- Rapido assi XY: 30000 mm/min
- Rapido asse Z: 30000 mm/min
- Distanza naso mandrino da tavola: 100÷900 mm

Vengono di seguito riportati i tempi per la movimentazione dell'utensile a vuoto.

N°	Operazione	Mov. X+Y [mm]	Mov. Z [mm]	t [min]	t [s]
-	Spianatura (1)	165	1324	0,050	3,0
	Centratura n.46 Ø2,5 (1)	1301	1609,2	0,097	5,8
00	Foratura n.48 Ø2,5 (1)	1301	2041,12	0,111	6,7
80	Maschiatura n.48 M3x0,5 (1)	zione Mov. X+Y [mm] Mov. [mm] 165 1324 5 (1) 1301 1609, (1) 1301 2041,2 13x0,5 (1) 1301 1885, ,3 (1)(2) 1466 1786,2 14x0,7 (1)(2) 1466 1705 3mm (3) 1129 1290 3mmx10mm (3) 1010 60 14x0,7 (3) 2139 1312, 2mm (3) 844 1237,6 5x0,8 (3) 719 1325 5x0,8 (3) 719 1321, 3mm (7) 1129 1290 3mmx10mm (7) 1010 60	1885,6	0,106	6,4
	Allargatura n.26 Ø3,3 (1)(2)	1466	1786,16	0,108	6,5
N° 80 90 100 110	Maschiatura n.26 M4x0,7 (1)(2)	1466	1705	0,106	6,3
90	Allargatura n.9 Ø3,3mm (3)	1129	1290	0,081	4,8
	Allargatura n.6 Ø3,3mmx10mm (3)	1010	60	0,036	2,1
	Maschiatura n.15 M4x0,7 (3)	2139	1312,5	0,115	6,9
	Allargatura n.2 Ø4,2mm (3)	844	1237,64	0,069	4,2
	Maschiatura n.2 M5x0,8 (3)	844	1228	0,069	4,1
N° 80 90 100 110	Allargatura n.4 Ø4,2mm (4)	719	1325	0,068	4,1
	Maschiatura n.4 M5x0,8 (3)	719	1325	0,068	4,1
	Allargatura Ø3,3mm n.2(6) e n.4(5)	986	1327,6	0,077	4,6
100	Maschiatura M4x0,7 n.2(6) e n.4(5)	986	1321,4	0,077	4,6
	Spianatura (4)	550	1308	0,062	3,7
	Spianatura (5)	507	1288	0,060	3,6
	Allargatura n.9 Ø3,3mm (7)	1129	1290	0,081	4,8
	Allargatura n.6 Ø3,3mmx10mm (7)	1010	60	0,036	2,1
80 90 100 110	Maschiatura n.15 M4x0,7 (7)	2139	1312,5	0,115	6,9
	Allargatura n.2 Ø4,2mm (7)	844	1237,64	0,069	4,2
	Maschiatura n.2 M5x0,8 (7)	844	1228	0,069	4,1
	Totale			1,730	103,8

TEMPI DI MOVIMENTAZIONE UTENSILE

Tabella 10. Tempi di movimentazione utensile a vuoto



POLITECNICO DI TORINO

Sommando il tempo totale di asportazione di truciolo al tempo totale per la movimentazione dell'utensile a vuoto è possibile ricavare il tempo macchina totale:

$$\boldsymbol{t_m} = t_{at} + t_{mu} = 32'46''$$

Si sono infine ricavati i tempi passivi ovvero quei tempi necessari all'operatore per preparare il componente da lavorare in macchina e quindi quei tempi in cui non si ha l'avanzamento della produzione.

Viene di seguito presentata una tabella con le principali operazioni necessarie per questo caso studio. I tempi di ciascuna operazione sono presi da tabelle standard presenti in letteratura.

ΤΕΙΝΙΡΙ ΡΑΣΣΙνί				
Operazione	Tempo [min]			
Posizionamento pezzo	10			
Montare/smontare il pezzo sulla morsa	1			
Montare/smontare morsa	3			
Posizionare il pezzo rispetto all'utensile con uno sfioramento	1			
Avviare/spegnere macchina	0,05			
Cambio utensile	0,05			

TEMPI PASSIVI

Tabella 11. Tempi passivi accessori a macchine spenta

Sommando le singole operazioni, tenendo conto delle varie fasi che compongono il ciclo, si è ricavato un tempo totale accessorio e manuale pari a:

$$t_a = 1h \ 17' \ 25''$$

In fine si ricava il tempo totale di lavorazione su CNC come segue:

 $T_{tot_{CNC}} = t_m + t_a = 1h 50' 13''$

Sommando il risultato sopra ottenuto ai contributi di tempo delle altre fasi del ciclo si ottiene un tempo di produzione del componente pari a circa **2 giorni e 20 ore**.



Candidato: Marco Viccica

5.5 Analisi dei costi

L'analisi dei costi effettuata si è limitata alla sola valutazione del costo del materiale di partenza.

In particolare è stato effettuato un confronto tra la produzione del carro mediante asportazione di truciolo e la produzione additiva.

	Fresatura dal pieno	L-PBF
Materiale	AI7075	AlSi10Mg
Grezzo di partenza [kg]	17	3,15
Scarto [kg]	12	0.2
Prezzo materiale [€/kg]	11,5	65
Costo totale materiale [€]	195,5	205

Tabella 12. Confronto analisi dei costi del grezzo di partenza

Come si può notare dalla tabella, il costo del materiale usato per produrre il pezzo oscilla in entrambi i casi sui 200 €.

Inoltre si può evincere come il valore dello scarto nella produzione additiva (sovrametalli e supporti) è pari solo al 6% rispetto al totale della polvere fusa; mentre nella produzione sottrattiva si ha un valore di scarto nettamente superiore in quanto il 71% dei 17 kg di blocco di alluminio è esclusivamente truciolo.

Sebbene il costo della polvere prodotta per l'AM abbia un valore decisamente superiore rispetto ai lingotti usati per l'asportazione di truciolo, la riduzione di peso ottenuta dalla riprogettazione ha permesso di ottenere un costo finale del materiale paragonabile a quello del Al7075.



Candidato: Marco Viccica

6. Convalida

Completata l'intera riprogettazione della struttura si è passati all'analisi FEM per la convalida del progetto. In particolare, si è pensato di effettuare 4 tipi di analisi differenti in base alla dimensione della mesh e al tipo di contatto presente tra le 3 parti del pezzo realizzato in AM. Inspire ci permette di impostare il tipo di contatto presente tra superfici di parti differenti: saldato o accoppiato. Come è possibile vedere dalla Figura 82, sono presenti dei contatti di tipo accoppiato (in verde) tra le superfici del "supporto sonda" e della "sonda" che in questo caso sono collegate fra di loro mediante un sistema di fissaggio a vite; mentre le superfici delle parti 1, 2 e 3 sono a contatto in modo saldato (in blu) per simulare l'accoppiamento di interferenza tra le parti. Per valutare un caso peggiorativo si è scelto di effettuare un'analisi modificando le impostazioni di contatto tra le 3 parti da saldato ad accoppiato.

Le analisi sono state effettuate prima con una mesh grossolana e successivamente con una mesh più fine, per entrambi i casi di contatto. Il materiale usato è l'AlSi10Mg le cui proprietà meccaniche sono descritte nel capitolo precedente (Tabella 6).



Figura 82. Tipologia di contatti presenti tra i vari componenti della struttura

Nella Figura 83 sono presenti le immagini in false color delle analisi degli spostamenti per le 4 differenti casistiche.



Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

DI TORINO

Convalida



Figura 83. Risultati in false color delle 4 analisi dello spostamento massimo



POLITECNICO DI TORINO

Dalla Tabella 13 è possibile notare come le analisi FEM effettuate con un numero di elementi maggiore (più del doppio del totale degli elementi con dimensione di 3,59mm) diano un risultato più preciso sul valore dello spostamento massimo che, aumentando seppur in modo poco significativo (ordine del micron), diminuiscono il valore minimo del fattore di sicurezza (FS min).

	Analisi n°1	Analisi n°2	Analisi n°3	Analisi n°4
Contatto tra le superfici	accoppiato	accoppiato	saldato	saldato
Tempo di esecuzione	13′ 10′′	46' 23''	14' 40''	48' 26''
Dimensione elemento [mm]	3,59	2,52	3,59	2,52
Numero tot elementi	406245	901534	406245	901534
Spostamento max Mag [µm]	30	37	29,2	36,4
FS min	28,4	15	28,5	15
Von Mises max [MPa]	31	24	21	23

Tabella 13. Risultati delle 4 analisi FEM effettuate

È possibile notare nella Tabella 14 in basso come variano gli spostamenti massimi lungo i 3 assi rispetto allo spostamento globale. Essendo la deformazione maggiore presente sull'asse X, risulta evidente come i valori per le analisi a "contatto accoppiato" e a "contatto saldato" convergano: il contatto accoppiato dovrebbe permettere uno slittamento delle superfici parallele all'asse Y ma in questo caso l'assemblaggio del complessivo garantisce un'ottima rigidità lungo quest'asse.

Analisi n°1	Analisi n°2	Analisi n°3	Analisi n°4
		Allalisi II S	Analisi II 4

Spostamento max globale [µm]	30	37	29,2	36,4
Spostamento max asse X [µm]	22	27	22	27
Spostamento max asse Y [µm]	8,6	12	8,5	12,2
Spostamento max asse Z [µm]	9	11,7	8,9	11,5

Tabella 14: Analisi spostamenti nei vari assi



7. Produzione prototipo

La produzione del prototipo tecnico e funzionale è stata affidata all'azienda torinese Ellena Spa [4], la quale ha di recente acquisito nel proprio reparto macchine la Print Sharp 250 che è la prima macchina L-PBF commercializzata da Prima Additive [33].

Il prototipo è stato quindi realizzato con la Print Sharp 250; vengono di seguito riportate le principali caratteristiche della macchina:

- Volume di lavoro: 250x250x300 mm •
- Velocità di scansione: 12-30 cm³/h
- Spessore layer: 0.02 ÷ 0.1 mm •
- Larghezza fascio laser: 0.1 mm (singolo spessore) •
- Potenza laser: 200 W / 500 W (opzionale)



Figura 84. Print Sharp 250

La polvere usata per la produzione del componente è la lega di alluminio AlSi10Mg. Vengono di seguito riportate le proprietà meccaniche messe a confronto con quelle del materiale del componente originale.

Materiale	E [GPa]	ν	ρ [kg/m³]	Rp ₀₂ [MPa]		
Al7075 T6	72,5	0,33	2700	495		
AlSi10Mg	65	0,33	2670	23 0 ⁵		

Tabella 15. Proprietà meccaniche AlSi10Mg [13]

⁵ Valore di tensione di snervamento dopo trattamento termico di distensione per 2h a 300°C



Il carro è stato scalato del 95% in modo tale da poter inserire sia la parte 1 che la parte 3 nella stessa piattaforma (job1), mentre la parte 2 è stato realizzato in un job diverso (job2). Vengono di seguito riportati i dati di produzione dei due job forniti dal produttore.

	Job1	Job2
Tempo preparazione file con inserimento dei supporti [h]	4	4
Tempo preparazione macchina [h]	4	4
Tempo di produzione [h]	45	55
Tempo post produzione (pulizia) [h]	3	3
Peso del materiale usato (supporti e pezzo) [kg]	1,5	1,5
Costo della polvere al chilo [€/kg]	7	0
Tabella 16. Dati di produzione dei 2 job		

Nelle seguenti immagini sono rappresentate, nelle varie viste, le piattaforme, con ancora i pezzi ancorati, dopo la rimozione della polvere non fusa rispettivamente del job1 e job2.



Figura 85. Vista in assonometria job1



POLITECNICO DI TORINO



Figura 86. Vista in assonometria job2



Figura 87. Vista dall'alto job1



POLITECNICO DI TORINO



Figura 88. Vista dall'alto job2

In Figura 89 e Figura 90 è possibile notare come siano stati inseriti i supporti per sorreggere le superfici aggettanti.



Figura 89. Dettaglio Parte 3



POLITECNICO Di torino



Figura 90. Dettaglio Parte 1

Dalla vista dettagliata della Figura 91 si può evincere come, subito dopo la produzione in macchina additiva, sia abbastanza alto il livello di rugosità superficiale su superfici inclinate prossime all'angolo critico. Tuttavia la finitura superficiale risulta migliorata dopo la fase di pallinatura del componente.



Figura 91. Rugosità as-built



POLITECNICO DI TORINO Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale

Candidato: Marco Viccica

Dopo aver rimosso i supporti accessibili, si è passato alla separazione dei pezzi dalla piattaforma. Come già descritto nel capito riguardante il ciclo di lavoro, il componente viene sottoposto ad elettroerosione a filo (EDM) rimuovendo in una sola passata tutti i pezzi ancorati alla piattaforma.

Nella Figura 92 è possibile vedere la piattaforma subito dopo la fase di taglio, ancorata alla macchina EDM presente nel centro interdipartimentale del Politecnico di Torino IAM (Integrated Additive Manufacturing [10]).



Figura 92. Rimozione componenti dalla piastra con EDM

In Figura 93 e Figura 94 si nota come sia elevata la finitura superficiale sulle superfici soggette al taglio del filo metallico. Grazie a questa lavorazione non è necessario eseguire la rettificatura su quelle superfici che fungono inoltre da piani di riferimento per la macchina CNC.





Figura 93. Piastra dopo la lavorazione di EDM



Figura 94. Finitura dopo taglio con EDM



POLITECNICO DI TORINO

8. Conclusioni e sviluppi futuri

Nel presente elaborato sono state analizzate le potenzialità di una riprogettazione di un componente industriale per la sua produzione mediante l'Additive Manufacturing. L'intero lavoro di tesi ha coperto un arco temporale di circa 7 mesi.

Dopo aver presentato lo stato dell'arte prima dell'ottimizzazione e poi dell'AM, con particolare attenzione alla tecnologia di fusione laser selettiva a letto di polvere metallica (L-PBF), si è passati all'analisi del caso studio. L'oggetto di tale lavoro è un carro guida per una macchina di misura a sensore multiplo che richiedeva, come funzione obiettivo di ottimizzazione strutturale, la riduzione della massa di almeno il 10%, variando il meno possibile il valore di rigidezza globale.

Per fare ciò è stata inizialmente impostata un'analisi agli elementi finiti per valutare gli stati di deformazione e tensione nella configurazione maggiormente critica del sistema. Da tali analisi si è potuto constatare che la struttura, essendo una macchina di misura a coordinate e quindi dimensionata a rigidezza, è soggetta complessivamente a tensioni molto inferiori rispetto a quella di snervamento del materiale, con deformazioni massime dell'ordine del micron. A causa di ciò non è stato possibile utilizzare il metodo dell'ottimizzazione topologica che avrebbe reso il componente una struttura del tutto discontinua. Si è proceduto quindi con una riprogettazione basata direttamente sulle regole del "Design for AM" in particolare per la tecnologia L-PBF.

La riprogettazione del carro ad asse Y è stata effettuata andando a sostituire nelle zone di non design strutture geometriche basate sul diagramma di Voronoi e sulla geometria a nido d'ape. Dopo aver alleggerito anche il carro ad asse X e i coperchi laterali, si è pensato in prima battuta di assemblare i componenti in uno solo così da avere minor quantità di supporti, ottimizzazione degli stress generati durante la produzione e delle operazioni di post-trattamento di finitura.

Tuttavia, dati i limiti attuali delle dimensioni massime dei volumi di produzione delle macchine commerciali di L-PBF, la riprogettazione ha previsto la suddivisione del componente in 3 parti e la progettazione di un sistema di accoppiamento rigido.

Completata la fase di riprogettazione si è passati alla convalida del modello mediante il metodo degli elementi finiti. Prendendo in considerazione l'analisi n°2 (A2) e l'analisi n°4 (A4) rispettivamente del modello originale e del modello realizzato per l'AM è possibile effettuare un confronto e valutare la variazione percentuale delle proprietà meccaniche del componente.



Candidato: Marco Viccica

	Spostamento max Mag [µm]	FS min	Von Mises max [MPa]	Massa [g]
Modello originale (A2)	30,4	12,8	22	4321,4
Modello AM (A4)	36,4	15	23	2947,5
Variazione percentuale	+20%	+17%	+5%	-32%

Tabella 17. Comparazione delle analisi FEM effettuate sul componente originale e su quello riprogettato

	Modello originale	Modello AM	Variazione %
Spostamento max globale [µm]	30,4	36,4	+20%
Spostamento max asse X [µm]	24	27	+12%
Spostamento max asse Y [µm]	7,6	12,2	+60%
Spostamento max asse Z [µm]	8,5	11,5	+35%

Tabella 18. Variazione percentuale degli spostamenti max sui vari assi

In conclusione si ha che il peso del sistema totale è risultato di circa il **32%** inferiore del sistema originale, con la riduzione del numero di componenti da 4 a **3** e di elementi di fissaggio da 12 a **4**.

Dopo la convalida è stato analizzato un possibile ciclo di lavoro per la produzione del componente con stima del relativo tempo ciclo e progettazione del sistema di staffaggio per la lavorazione alle macchine utensili. Si è inoltre stimato un costo del materiale per la produzione additiva (205€) pressoché pari al costo del grezzo per la produzione mediante fresatura dal pieno (195,5 €) con un aumento del solo **5%**.

Si riporta di seguito il confronto del carro guida prima e dopo la riprogettazione.



Figura 95. Confronto prima e dopo riprogettazione



Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

POLITECNICO DI TORINO Come sviluppi futuri inerenti a questo caso studio è possibile pensare ad una successiva ottimizzazione topologica del sistema di staffaggio basandosi su accurate analisi in ambiante CAE del sistema di lavoro alle macchine utensili. Quindi migliorare il ciclo di lavoro e valutare più nel dettaglio il tempo totale di produzione e i relativi costi facendo un confronto con la produzione del componente originale.

È possibile valutare una riprogettazione del carro guida come componente unico eliminando del tutto il sistema di assemblaggio, per una produzione su macchine L-PBF aventi un volume di lavoro superiore a quello pensato per questo caso studio.

Infine una riprogettazione del componente per la produzione mediante Electron Beam Powder Bed Fusion (E-PBF) permetterebbe un ottimo confronto tra le due tecnologie a letto di polvere.



Bibliografia

- [1] Ahuja B., Schaub A., Junker D., Karg M., Tenner F., Plettke R., Merklein M., Schmidt M., A round Robin study for laser beam melting in a metal powder bed. *South African Journal of Industrial Engineering*. 27(2): 30-42 (2016).
- [2] Allaire, G., Jouve, F., and Toader, A. M., Structural Optimization Using Sensitivity Analysis and A Level-Set Method. *Journal of Computational Physics*, 194: 363-393 (2004).
- [3] Armillotta A., Baraggi R., Fasoli S., SLM tooling for die casting with conformal cooling channels. *Int J Adv Manuf Technol*, 71: 573–583 (2014).
- [4] Azienda produttrice prototipo: <u>http://www.ellenaspa.com/</u>
- [5] Bacchewar P.B., Singhal S.K., and Pandey P.M., Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process. *Proc. IMechE* Vol. 221 Part B: J. Engineering Manufacture: 35-52 (2007).
- [6] Bendsøe MP. and Kikuchi N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71: 197-224 (1988).
- [7] Bendsøe MP., Optimal shape design as a material distribution problem. *Struct Optim*, 1: 193–202 (1989).
- [8] Calignano F., Manfredi D., Ambrosio E.P., Biamino S., Lombardi M., Atzeni E., Salmi A., Minetola P., Iuliano L., and Fino P., Overview on Additive Manufacturing Technologies. *Proc. IEEE*, 105 (4): 593-612 (2017).
- [9] Cazacu R. and Grama L., Overview of structural topology optimization methods for plane and solid structures. *Annals of the university of Oradea*. *Fascicle of Management and Technological Engineering*, 3: 17-22 (2014).
- [10] Centro interdipartimentale AM http://iam.polito.it/
- [11] Chen H., Gu D., Dai D., Ma C., Xia M., Microstructure and composition homogeneity, tensile property, and underlying thermal physical mechanism of selective laser melting tool steel parts. *Materials Science & Engineering A* 682: 279–289 (2017).



DI TORINO Dipartimento di Ingegneria Meccanica Tesi di Laurea Magistrale Candidato: Marco Viccica

POLITECNICO

- [12] Chiandussi G., Metodi di ottimizzazione applicati a problemi ingegneristici, *Politecnico di Torino*, Torino (2017).
- [13] Data sheet AlSi10Mg EOS: https://cdn0.scrvt.com/eos/public/8837de942d78d3b3/4e099c3a857fdddc a4be9d59fbb1cd74/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf
- [14] DeBerg M., Cheong O., Van Kreveld M., Overmars M., Computational Geometry, *Springer, Third Edition (2008)*.
- [15] EOS M-400: <u>https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eos_m_400</u>
- [16] Flying Probe Series: <u>https://www.spea.com/it/product-category/flying-probe-testers-it/</u>
- [17] Fuel nozzle tip <u>https://www.ge.com/additive/blog/new-manufacturing-</u> milestone-30000-additive-fuel-nozzles
- [18] Generazione pattern Voronoi http://alexbeutel.com/webgl/voronoi.html.
- [19] Hamilton K., Planning, Preparing and producing: Walking the tightrope between additive and subtractive manufacturing. *Metal AM*, vol.2 (1): 39-56 (2016).
- [20] Hull C.W., Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, US Patent 4,575,330 (1986).
- [21] Kranz J., Herzog D., and Emmelmann C., Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Application*, 27(S1) (2015).
- [22] Langelaar M., Combined optimization of part topology, support structure layout and build orientation for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, pp 1-20 (2018).
- [23] Langelaar M., Topology Optimization of 3D Self-Supporting Structures for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 12 (Pt. A): 60–70 (2016).
- [24] LEAP engine https://www.cfmaeroengines.com/engines/leap/
- [25] Luxner M., Stampfl J. and Pettermann H. Numerical simulations of 3D open cell structures – influence of structural irregularities on elastoplasticity and deformation localization. *International Journal of Solids and Structures*. 44, 9: 2990 – 3003 (2007).
- [26] Martínez J., Dumas J. And Lefebvre S. Procedural Voronoi Foams for Additive Manufacturing. *ACM Trans. Graph.* 35, 4, 44:1–44:12 (2016).
- [27] Martínez J., Hornus S., Song H., Lefebvre S. Polyhedral Voronoi diagrams for Additive Manufacturing. *ACM Transactions on Graphics*, 37 (4), pp.15 (2018).



POLITECNICO DI TORINO

- [28] Mass Y. And Amir O., Topology optimization for additive manufacturing: Accounting foroverhang limitations using a virtual skeleton. *Additive Manufacturing*, 18: 58–73 (2017).
- [29] Mhapsekar K., McConaha M., Anand S., Additive Manufacturing Constraints in Topology Optimization for Improved Manufacturability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Transactions of the ASME, Vol.140: 051017-1 - 051017-16 (2018).
- [30] Michell AGM, 1904; The limits of economy of material in frame structures. *Phil Mag*, 8: 589–597 (2009).
- [31] Osher, S. and Sethian, J. A., Front Propagating with Curvature-dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations. *Journal of Computational Physics*, 79: 12-49 (1988).
- [32] Pérez C. J. L., Analysis of the surface roughness and dimensional accuracy capability of fused deposition modelling processes. *Int. J. Prod. Res.*, 40 (12): 2865–2881 (2002).
- [33] Print Sharp 250 Prima Additive: <u>https://www.primaadditive.com/print-sharp-250/#1448982543588-2618eeae-d0a3fc72-a00fae4f-fbacb154-8605</u>
- [34] Rozvany GIN, A critical Review of established methods of structural topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 37: 217-237 (2008).
- [35] Rozvany GIN, Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. *Struct Multidisc Optim*, 21: 90–108 (2001).
- [36] Rozvany GIN, Querin OM, Theoretical foundations of sequential element rejections and admissions (SERA) methods and their computational implementations in topology optimization. *Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisc*. Anal and Optim. (held in Atlanta, Georgia), AIAA, Reston, VA (2002).
- [37] Sigmund O. and Petersson J., Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. *Struct. Optim.*, 16: 68–75 (1998).
- [38] Slicing <u>https://medium.com/3d-printing-in-o-p/iv-slicing-72a9515f44bc</u>
- [39] SPEA S.p.A.: https://www.spea.com/it/
- [40] Specifiche centro di lavoro a 3 assi: http://www.seebeck.it/kinetic/
- [41] Suzuki K. and Kikuchi N., A homogenization method for shape and topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 93: 291-318 (1991).



POLITECNICO DI TORINO

- [42] Thompson M.K. er al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations and constraints. *CIRP Annals Manufacturing Technologies*. 65: 737-760 (2016).
- [43] Vayssettea B., Saintiera N., Bruggera C., Elmaya M., Pessardb E., Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life. *Procedia Engineering*, 213: 89-27 (2018).
- [44] Voronoi chair di Tobari A. <u>http://www.torabiarchitect.com/blog/?tag=mesh-</u> <u>smooth</u>
- [45] Voronoi G., Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les parallélloèdres primitifs. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*. 134: 198-287 (1908).
- [46] Wang, M. Y., Wang, X. M., and Guo. D. M., A Level Set Method for Structural Topology Optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192: 227-246 (2003).
- [47] X. Huang, Y.M. Xie, "Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method", *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 43, no. 14, pp. 1039-1049, (2007).
- [48] Xie YM and Steven GP, Shape and layout optimization via an evolutionary procedure. Proceedings of the International Conference Comput. Eng. (Hong Kong), Hong Kong University, p 421 (1992).
- [49] Yang XY, Xie YM, Steven GP, Querin OM, Bi-directional evolutionary structural optimization. *Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium Multidisc Anal. Optim (St. Louis)*, pp 1449–1457 (1998).
- [50] Zhang W., Zhou L., Topology optimization of self-supporting structures with polygon features for additive manufacturing. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 334: 56–78 (2018).
- [51] Zhou M. and Rozvany GIN, The COC algorithm, Part II: topological, geometrical and generalized shape optimization. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 89: 309–336 (1991).





SCHIZZO DI LAVORAZIONE	N°	Descrizione operazione
	10	Produzione delle 3 parti mediante macchina AM EOS M400 e successiva rimozione della polvere non fusa, direttamente in macchina.
	20	Trattamento termico di distensione per 2h a 300°C.
	30	Rimozione dei supporti accessibili.
	40	Rimozione delle 3 parti dalla piattaforma mediante elettroerosione a filo (EDM) e conseguente spianatura della superficie (6) delle parti 1 e 3 e dei piedi della parte 2.
	50	Rimozione dei supporti residui.
	60	Pallinatura per uniformare la rugosità sulle superfici.
The second secon	70	Assemblaggio dei 3 componenti mediante apposito accoppiamento per interferenza.
	80	80.1 - (1) Spianatura. 80.2 - (1) Centratura n.46 fori Ø2,5mm. 80.3 - (1) Foratura n.48 fori passanti Ø2,5mm. 80.4 - (1) Maschiatura n.48 fori passanti M3. 80.5 - Allargatura Ø3,3mm di 4 fori passanti su (1) e 22 fori passanti su (2). 80.6 - Maschiatura M4 di 4 fori passanti su (1) e 22 fori passanti su (2).
	90	90.1 - (3) Allargatura Ø3,3mm di 9 fori passanti e 6 ciechi di lunghezza 10mm. 90.2 - (3) Maschiatura M4 di 9 fori passanti e 6 ciechi di lunghezza 10mm. 90.3 - (3) Allargatura n.2 fori passanti Ø4,2mm. 90.4 - (3) Maschiatura n.2 fori passanti M5.
	100	100.1 - (4) Allargatura n.4 fori passanti Ø4,2mm. 100.2 - (4) Maschiatura n.4 fori passanti M5. 100.3 - Allargatura Ø3,3mm di 2 su (6) e 4 su (5) fori passanti e 8 fori ciechi di lunghezza 11,5mm su (6).

