

Politecnico di Torino

Politecnico di Torino

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Riprogettazione di un componente per L-PBF tramite ottimizzazione topologica e generative design

Candidato: Fabrizio Ricci

Relatore: Prof. Luca Iuliano

Anno Accademico 2025/2026

Omnium rerum principia parva sunt

Abstract

Il presente lavoro di tesi indaga la riprogettazione di un componente ad elevata complessità per la produzione mediante tecnologie di additive manufacturing, con particolare focus sul processo L-PBF. L'obiettivo è valutare le potenzialità del generative design (GD) come metodologia di sviluppo progettuale avanzata, confrontandone i risultati con quelli ottenuti tramite ottimizzazione topologica (TO), tecnica ormai consolidata in ambito ingegneristico.

Il componente oggetto di studio è il corpo di una valvola PTU, attualmente realizzato in lega AW6026-T6 e caratterizzato da una massa di circa 1,9 kg. Dopo una fase preliminare di semplificazione e definizione delle zone di non-design, sono stati condotti studi progettuali tramite software dedicati, esplorando differenti alternative geometriche e valutando i vincoli di producibilità associati al processo di fabbricazione additiva considerato.

Le soluzioni generate sono state analizzate in termini di comportamento strutturale, riduzione di massa, complessità geometrica, necessità di supporti, tempi e costi di produzione. È emerso come il generative design consenta di esplorare un ampio spazio delle soluzioni, generando geometrie innovative e altamente performanti, mentre l'ottimizzazione topologica, pur con un approccio più deterministico, risulta efficace nel fornire modelli ottimizzati.

Il confronto tra le due metodologie ha evidenziato vantaggi e limiti complementari: il GD si distingue per la capacità di integrare molteplici obiettivi e vincoli di progetto, mentre la TO garantisce maggiore controllo sul risultato finale e richiede un intervento più diretto del progettista. Entrambi gli approcci hanno mostrato significativi margini di alleggerimento del componente e potenziali riduzioni dei costi di produzione.

Il lavoro mette infine in luce come la sinergia tra design generativo, ottimizzazione topologica e additive manufacturing rappresenti una direzione promettente per la progettazione di componenti complessi, favorendo soluzioni innovative non ottenibili attraverso tecniche tradizionali.

Indice

Introduzione **1**

1 Generative design **3**
1.1 Storia del generative design . . . 3
1.2 Principi del generative design . . . 4
1.2.1 Preparazione del modello . . . 5
1.2.2 Applicazione di carichi e vincoli . . . 5
1.2.3 Generazione delle alternative . . . 6
1.2.4 Classificazione e selezione dei design proposti . . . 6
1.2.5 Analisi e ottimizzazione . . . 6
1.3 Ruolo dell'intelligenza artificiale e del machine learning . . . 6
1.3.1 Supervised machine learning . . . 7
1.3.2 Unsupervised learning . . . 8
1.3.3 Reinforcement learning . . . 8

2 Ottimizzazione topologica **9**
2.1 Storia dell'ottimizzazione topologica . . . 10
2.2 Principi dell'ottimizzizone topologica . . . 10
2.3 Confronto tra ottimizzazione topologica e generative design . . . 11

3 Additive Manufacturing **13**
3.1 Processo di Fabbricazione Additiva . . . 15
3.2 Tecniche di Fabbricazione Additiva . . . 16
3.2.1 Laser Powder Bed Fusion L-PBF . . . 22
3.3 Design for Additive Manufacturing . . . 25
3.3.1 DfAM per SLM . . . 27

4 CIM **33**
4.1 Linee pilota: digital factory e additive manufacturing . . . 34
4.2 Open innovation advisory . . . 34
4.3 Education & training . . . 35
4.4 Finanziamento di progetti . . . 35

5 Caso studio **36**
5.1 Software utilizzati . . . 39
5.1.1 Autodesk Fusion360 . . . 39
5.1.2 nTopology . . . 41
5.1.3 Siemens NX . . . 42
5.1.4 Materialise Magics . . . 43
5.2 Definizione del problema . . . 44
5.3 Fase preliminare . . . 44

5.4 Ottimizzazione topologica 45
5.4.1 Preparazione modello 45
5.4.2 Definizione della condizione di carico 46
5.4.3 Analisi statica 47
5.4.4 Ottimizzazione topologica 52
5.4.5 Valutazione design e refinement 55
5.5 Generative Design 66
5.5.1 Preparazione modello 66
5.5.2 Definizione della condizione di carico 67
5.5.3 Impostazione studio 67
5.5.4 Confronto soluzioni e scelta modello 73
5.5.5 Validazione design e refinement 76
5.6 Confronto risultati 80
5.7 Messa in macchina 83
5.7.1 nTopology 84
5.7.2 Materialise Magics 87

6 Conclusioni **93**

Elenco delle tabelle

5.1 Componenti costituenti l'assieme del gruppo di comando idraulico . . 37
5.2 Indicazione della condizione di carico 47
5.3 Proprietà meccaniche $AlSi10Mg$ as build [60] 50
5.4 Proprietà meccaniche $AlSi10Mg$ trattato termicamente T6 [60] . . . 50
5.5 Risultati analisi modale: frequenze naturali 56
5.6 Risultati simulazioni pretensionamento 61
5.7 Risultati analisi modale: frequenze naturali 64
5.8 Indicazione della condizione di carico 67
5.9 Proprietà meccaniche dei materiali considerati 73
5.10 Costi indicativi delle polveri metalliche delle leghe considerate 74
5.11 Confronto della massa tra i componenti finali 81
5.12 Specifiche della macchina utilizzata 81
5.13 Costo macchina relativo a ogni configurazione 91
5.14 Costo macchina relativo a ogni configurazione 92

Elenco delle figure

1 Riprogettazione di un componente mediante generative design [2] . . 1

2 GD workflow [5] 4

3 Riprogettazione di un componente mediante ottimizzazione topologica [13] 9

4 Fasi di produzione[24] 13
5 Processo FFF[29] 16
6 Processo SLA (a) e DLP (b)[30] 17
7 Processo Powder Bed Fusion (PBF)[24] 18
8 Processo L-PBF (a) e EBM (b)[31] 18
9 Applicazione agenti di fusione e di dettaglio nel processo MJF[32] . . 19
10 Processo Binder Jetting[33] 19
11 Processo Material Jetting (MJT)[34] 20
12 Processo Directed Energy Deposition (DED)[35] 20
13 Processo Sheet Lamination (SHL)[36] 21
14 Macchina Laser Powder Bed Fusion[31] 22
15 Processo Laser Powder Bed Fusion[37] 22
16 Componente alleggerito sfruttando DfAM e AM [41] 25
17 Componente dotato di canali di raffreddamento conformali [42] 26
18 Riduzione del numero di componenti grazie all'AM [43] 26
19 Realizzazione di componenti personalizzati tramite AM [44] 26
20 Componente con densità variabile realizzato in AM [45] 27
21 Componente ottimizzato seguendo i principi del DfAM[46] 27
22 Piattaforma di stampa SLM[47] 28
23 Rimozione componenti vincolati interamente tramite strutture di supporto[48] 29
24 Influenza dell'inclinazione delle superfici sulla rugosità superficiale [49] 30
25 Criticità per strutture a sbalzo concave e convesse [50] 30
26 Redesign sezione trasversale canali interni [51] 31
27 Impuntamento del recoater blade dovuto a un errato orientamento del pezzo (sinistra) e soluzione tramite riposizionamento corretto (destra).[50] 32
28 Disposizione ideale di componenti singoli e multipli [50] 32

29 Logo CIM [52] 33
30 Competence Center Nazionali [52] 33
31 CIM linee pilota [52] 34
32 CIM learning hub [52] 35
33 CIM risultati 2023 [52] 35

34 Logo Ferrari e LaFerrari [54] . . . 36
35 Dettaglio del blocco di comando e vista d'insieme del circuito idraulico 36
36 Dettaglio dei fori di fissaggio M6 e dei canali di ingresso e uscita . . . 37
37 Canali di servizio per le operazioni di fresatura . . . 38
38 Componente attualmente in uso presso Ferrari . . . 38
39 Blocco riprogettato per BJT [55] . . . 38
40 Blocco riprogettato dal CIM per LPBF . . . 39
41 Logo Autodesk Fusion360 [56] . . . 39
42 Logo nTopology [57] . . . 41
43 Logo Siemens NX [58] . . . 42
44 Logo Materialise Magics [59] . . . 43
45 Blocco riprogettato dal CIM per LPBF . . . 44
46 Zone di accoppiamento e canali interni . . . 45
47 Zone di *non design* . . . 45
48 Modello implicito iniziale su nTopology . . . 46
49 Modellazione corpi impliciti su nTopology . . . 46
50 Operazione di realizzazione della mesh . . . 48
51 Condizione di carico . . . 48
52 Modellazione pretensionamento . . . 49
53 Risultati test su provini in $AlSi10Mg$ [60] . . . 50
54 Risultati analisi statica preliminare . . . 51
55 Blocco di ottimizzazione topologica lungo $z-$ . . . 52
56 Risultati ottimizzazione topologica con direzione di crescita lungo $z-$ 53
57 Risultati ottimizzazione topologica con direzione di crescita lungo $x-$ 54
58 Confronto tra i primi 4 modi di vibrare . . . 56
59 Analisi strutturale di validazione del componente ottimizzato . . . 57
60 Modellazione del pretensionamento di viti all'interno di Ansys [61] . . 57
61 Simulazione del pretensionamento all'interno di Ansys . . . 58
62 Modellazione pretensionamento su nTopology: test 1 . . . 58
63 Modellazione pretensionamento su nTopology: test 2 . . . 59
64 Modellazione pretensionamento su nTopology: test 3 . . . 60
65 Modellazione pretensionamento su nTopology: test 4 . . . 61
66 Affinamento della mesh nella zona del collegamento filettato . . . 62
67 Zone critiche del componente ottimizzato . . . 63
68 Componente ottimizzato a valle delle operazioni di rimodellazione e refinement . . . 63
69 Primo modo di vibrare dell'analisi modale di validazione . . . 64
70 Risultati analisi statica di validazione . . . 65
71 Modello iniziale su Fusion360 . . . 66
72 Workflow di uno studio di generative design su Fusion360 . . . 67
73 Zone di non design per lo studio di GD . . . 68
74 Definizione *obstacle geometry* . . . 69
75 Definizione *starting shape* . . . 69
76 Definizione obiettivi delle studio di GD . . . 70
77 Definizione vincoli relativi alla manifattura . . . 71
78 Applicazione della condizione di carico al componente . . . 72
79 Grafico dell'intero spazio delle soluzioni . . . 73
80 Grafico dello spazio delle soluzioni relativo alla lega AlSi10Mg . . . 75
81 Design generativo finale . . . 75
82 Refinement modello su nTopology . . . 76

83 Rusultati analisi modale 77
84 Risultati analisi statica preliminare 77
85 Rimodellazione zone critiche 78
86 Prime sei frequenze naturali e relativi modi 78
87 Risultato analisi strutturale di validazione 79
88 Componenti finali ottenuti tramite TO e GD 80
89 Tempo impiegato per la risoluzione di uno studio di TO 82
90 Iterazioni di una soluzione di uno studio di GD 82
91 Volume e piano di costruzione di una macchina EOS 400-4 84
92 Saturazione del piano di stampa 85
93 Immagine ottenuta dallo slicing B&W 86
94 Risultato ottenuto dopo le operazioni di slicing 87
95 Modelli ottenuti tramite TO e GD con strutture di supporto 88
96 Tempi di stampa con altezza del layer pari a $40\,\mu m$ 89
97 Tempi di stampa con altezza del layer pari a $80\,\mu m$ 89
98 Tempi di stampa con altezza del layer pari a $40\,\mu m$ 90
99 Tempi di stampa con altezza del layer pari a $80\,\mu m$ 90
100 Tempi di stampa con l'utilizzo simultaneo di 4 laser 91

Nomenclatura

ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene

AI Intelligenza Artificiale

AM Additive Manufacturing

ANNs Artificial Neural Networks

AR Augmented Reality

BJT Binder Jetting

BNs Bayesian Networks

CAD Computer Aided Design

CAE Computer Aided Engineering

CFD Computational Fluid Dynamics

CNNs Convolutional Neural Networks

DED Directed Energy Deposition

DfAM Design for Additive Manufacturing

DLP Digital Light Processing

EBM Electron Beam Melting

ECAD Electronic Computer Aided Design

ECU Engine Control Unit

EDM Electrical Discharge Machining

FDM Fused Deposition Modeling

FEA Finite Element Analysis

FEM Finite Element Method

FFF Fused Filament Fabrication

GA Generative Algorithms

GD Generative Design

HIPS High Impact PolyStyrene

IoT Internet of Things

L-PBF Laser - Powder Bed Fusion

LLM Large Language Models

LOM Laminated Object Manufacturing

MEX Material Extrusion

MJF Multi Jet Fusion

MJT Material Jetting

ML Machine Learning

MMA Method of Moving Asymptotes

PBF Powder Bed Fusion

PETG Polyethylene Terephthalate Glycol

PLA Polylactic Acid

PVA Polyvinyl Alcohol

SHL Sheet Lamination

SIMP Solid Isotropic Material with Penalization

SLA Stereolithography

SLM Small Language Models

SLS Selective Laser Sintering

SOM Self-Organizing Maps

STL Standard Tesselation Language

SVM Support Vector Machines

TO Topology Optimization

UAM Ultrasonic Additive Manufacturing

VPP Vat Photopolymerization

VR Virtual Reality

Introduzione

Il rapido avanzamento della tecnologia sta cambiando in modo significativo il processo di design e di fabbricazione. In particolare nell'ultimo decennio, il notevole sviluppo in aree come l'additive manufacturing, gli algoritmi di intelligenza artificiale, la potenza sempre crescente del cloud computing e degli strumenti di generative design, permette ai progettisti di realizzare centinaia di design innovativi differenti, in tempi decisamente più ristretti rispetto a un ciclo di design tradizionale. I design così generati risultano inoltre avere caratteristiche e prestazioni superiori rispetto ai progetti ottenuti tramite tecnologie e workflow tradizionali. Si notano miglioramenti per quanto riguarda leggerezza, robustezza e efficienza. Inoltre la personalizzazione e la progettazione su misura per ogni specifica applicazione e bisogno dell'utilizzatore finale rendono le nuove tecnologie di design e manifattura altamente competitive. [1] Lo sviluppo congiunto di AM e GD permette quindi ai progettisti di affrontare problemi complessi e di trovare soluzioni progettuali innovative. Il generative design sfrutta algoritmi per generare, esplorare e valutare una vasta gamma di soluzioni differenti. Tali soluzioni sono spesso rappresentate da geometrie organiche, che si ispirano a forme naturali, impossibili da produrre attraverso tecnologie di fabbricazione tradizionali. L'additive manufacturing è quindi un alleato formidabile

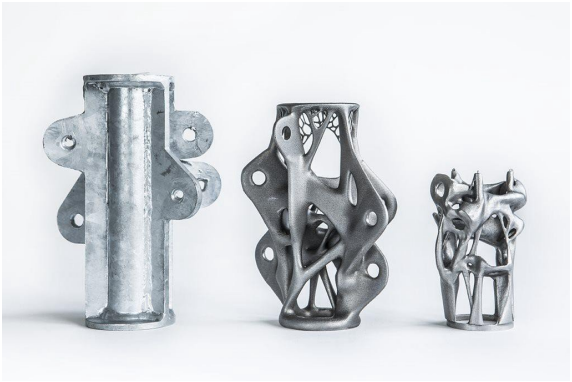


Figura 1: Riprogettazione di un componente mediante generative design [2]

del generative design in quanto rappresenta una tecnica di manifattura flessibile, veloce e precisa, in grado di realizzare le forme più complesse, garantendo al tempo stesso un costo contenuto. Quest'ultima peculiarità è particolarmente apprezzata tanto più aumenta la complessità della parte da realizzare. L'AM permette infatti di ottenere la cosiddetta *complexity for free*, in quanto anche le geometrie più intricate non influiscono sui costi finali del componente. Inoltre l'assenza di costi di setup, tipici della manifattura tradizionale, rende possibile la produzione di singole unità o piccoli lotti, permettendo così di trarre beneficio dalla flessibilità e dalla possibilità di customizzazione offerta dal generative design.

In questo progetto di tesi viene analizzato il workflow per la progettazione di un componente tramite generative design. Si confronta inoltre il flusso di lavoro con quello relativo al design tramite ottimizzazione topologica.

L'ottimizzazione topologica rappresenta infatti una metodologia ormai consolidata nel campo dell'ingegneria strutturale e costituisce un punto di riferimento per la progettazione basata sulla ridistribuzione del materiale all'interno di uno spazio di design definito. A differenza del generative design, che esplora in modo autonomo un ampio ventaglio di soluzioni alternative, la TO tende a convergere verso un'unica configurazione che soddisfa l'obiettivo prefissato, tipicamente la minimizzazione della massa o la massimizzazione della rigidezza. Questo rende le due tecniche profondamente diverse sia per obiettivi che per approccio progettuale, pur condividendo l'intento comune di migliorare le prestazioni del componente.

Il confronto tra queste metodologie è quindi di grande interesse, poiché consente di valutare in quali contesti ciascuna possa offrire un vantaggio significativo e come possano eventualmente integrarsi all'interno dello stesso flusso di progettazione. Il generative design, grazie alla capacità di generare molteplici alternative e di includere vincoli di produzione direttamente nella fase generativa, risulta particolarmente adatto a componenti complessi da realizzare tramite AM. L'ottimizzazione topologica, d'altro canto, offre un controllo più diretto sul processo di sintesi della forma ed è spesso preferita quando è necessario comprendere in maniera più esplicita la distribuzione degli sforzi o l'effetto dei vincoli strutturali.

Il caso studio oggetto di questo lavoro, la riprogettazione del corpo di una valvola PTU, rappresenta un'applicazione ideale per analizzare i vantaggi e i limiti delle due metodologie. Si tratta infatti di un componente caratterizzato da geometrie complesse, zone funzionali critiche e canali interni che rendono la produzione tradizionale onerosa e poco flessibile, mentre si prestano particolarmente bene alla fabbricazione additiva tramite tecnologia L-PBF. L'obiettivo è quindi valutare se e in quale misura l'integrazione tra generative design, ottimizzazione topologica e additive manufacturing possa condurre a una riduzione del peso del componente, a un miglioramento delle prestazioni strutturali e a una diminuzione dei costi di produzione, mantenendo inalterata la funzionalità del pezzo.

A tal fine, il lavoro di tesi comprende una fase preliminare di definizione del modello CAD semplificato, l'individuazione delle zone di non-design, l'impostazione degli studi nei software dedicati e la successiva validazione mediante analisi FEM. Sono inoltre condotte valutazioni di producibilità tramite slicing, analisi dei supporti, tempi di costruzione e costi, al fine di fornire una visione completa dell'impatto del redesign sull'intero ciclo di produzione.

1 Generative design

Il generative design è un processo basato su algoritmi, con lo scopo di esplorare le possibili varianti di un design, oltre a quelle tradizionali. Emulando l'approccio evolutivo della natura, il generative design utilizza parametri e obiettivi per esplorare rapidamente centinaia di design differenti per trovare un set di soluzioni migliori. [1] Il GD è una metodologia di progettazione innovativa che sfrutta l'intelligenza artificiale e il machine learning per trasformare il processo di progettazione tradizionale. Definendo specifici vincoli e parametri, il design generativo consente ai progettisti di esplorare un'ampia gamma di soluzioni, favorendo l'innovazione e l'ottimizzazione sia in termini di funzionalità che di sostenibilità. Alla base del design generativo vi è un processo iterativo in cui i progettisti definiscono obiettivi e affinano vincoli, sfruttando software che utilizzano algoritmi avanzati per valutare molteplici soluzioni progettuali. Lo scopo principale del GD è infatti offrire la possibilità agli ingegneri di esplorare un vasto numero di design iniziali, rispetto ai metodi tradizionali. [3] . Esistono diversi software in commercio per la progettazione tramite generative design, tuttavia, all'interno di questa trattazione, si farà riferimento principalmente al programma utilizzato, *Autodesk Fusion360*.

1.1 Storia del generative design

La nascita del generative design è strettamente legata al progresso dei calcolatori, allo sviluppo di sistemi CAD e algoritmi di AI. In particolar modo l'evoluzione dei modelli di intelligenza artificiale e la nascita degli algoritmi genetici ed evolutivi hanno rappresentato la base per la crescita del GD. Il termine *intelligenza artificiale* viene coniato nel 1956 da John McCarthy, nonostante già nel 1950 Alan Turing ne avesse descritto il concetto e Claude Shannon ne avesse applicato i concetti alla teoria dell'informazione al linguaggio umano. Nei primi anni '70 nascono i cosiddetti sistemi esperti, ovvero applicativi AI che replicano le abilità umane in un perimetro molto ristretto e definito del sapere. L'intelligenza artificiale si diffonde in modo più massiccio a partire dagli anni '90, grazie alla celebre sfida di scacchi tra Garri Kasparov e il computer Deep Blue, progettato da IBM, conclusa con la prima vittoria nella storia di un computer su un campione di scacchi. A partire dal 2010 circa, l'AI subisce un'ulteriore spinta grazie ai progressi compiuti nell'ambito del Deep Learning, grazie allo sviluppo di alcuni tipi di reti neurali, come ad esempio *autoencoder* e *Generative Adversarial Networks (GAN)*. I modelli basati su queste tecnologie sono in grado di restituire istanze non appartenenti al gruppo di training, rendendo l'intelligenza artificiale *generativa*. Nel 2017, con la pubblicazione del paper "Attention is all you need" (Vaswani, et al., 2017) da parte di un team di ricercatori di Google, viene introdotta l'architettura *transformer* per le reti neurali, basata sul meccanismo di attenzione. Questa architettura rappresenta un punto di svolta, sostituendo i modelli architetturali precedentemente usati, divenuti obsoleti,

e formando il pilastro cardine dei *Generative Pre-trained Transformers (GPT)*. Nel 2019, con la presentazione di GPT2 di OpenAI, viene esibita per la prima volta la capacità di generare contenuti, in maniera non supervisionata, su una serie variegata di temi ed applicazioni, gettando le basi per quelli che verranno chiamati *Foundation Models*. In particolare, i Foundation Models, addestrati sul linguaggio, prendono il nome di *Large Language Models (LLM)*. Un'ulteriore evoluzione degli LLM è rappresentata dai *Small Language Models (SLM)*. Questi modelli si differenziano per il numero relativamente limitato di parametri e per una maggiore capacità di affrontare sfide specifiche. Sono inoltre *multimodali*, ovvero in grado di ricevere dati in input di diversa natura come ad esempio testo, immagini o audio. [4] Grazie all'implementazione di queste tecnologie all'interno dei software CAD e CAE e all'utilizzo sempre maggiore del cloud computing, il generative design è in forte sviluppo. Inoltre l'evoluzione e lo sviluppo della fabbricazione additiva ha fornito ai progettisti uno strumento efficace per la realizzazione dei design estremamente complessi, dalle forme organiche generati dal GD.

1.2 Principi del generative design

Il generative design è un processo di esplorazione che sfrutta complessi algoritmi di calcolo, intelligenza artificiale e machine learning. Il progettista definisce i vari parametri del problema, come carichi, vincoli, limitazioni geometriche, materiale e obiettivi. Il software analizza quindi il problema e genera diversi design alternativi, che il progettista deve analizzare, valutare e ottimizzare.
In Fig. 2 viene dunque rappresentato il workflow tipico del GD.

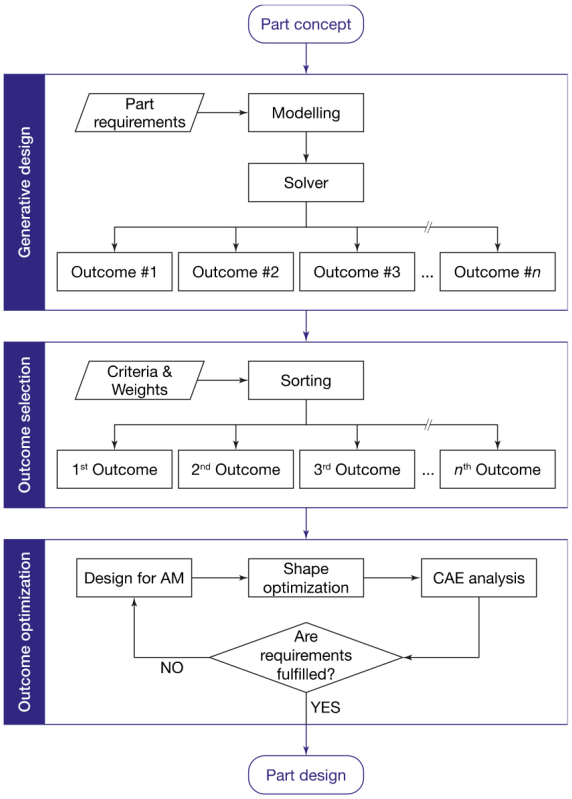


Figura 2: GD workflow [5]

La progettazione generativa di un componente si può quindi suddividere nei seguenti step:

- Preparazione del modello
- Applicazione di carichi e vincoli
- Generazione delle alternative
- Classificazione e selezione dei design proposti
- Analisi e ottimizzazione della parte

1.2.1 Preparazione del modello

La fase di preparazione del modello è quella preliminare a tutto lo studio di generative design. Il progettista procede alla creazione di un modello 3D CAD iniziale. Il modello deve prevedere unicamente le zone che dovranno essere preservate e le aree di ostacolo. Le zone di non design sono quelle aree la cui geometria non deve essere modificata. Tipicamente le zone di non design sono gli spazi dove vengono applicati carichi e vincoli. Nella definizione degli spazi di non design occorre tenere conto di eventuali zone di accoppiamento del componente, che non dovranno essere alterate per garantirne il funzionamento in condizioni operative. Si definiscono quindi le geometrie di ostacolo, ovvero aree in cui non deve essere presente materiale. La definizione di questi spazi è fondamentale per garantire il corretto funzionamento e montaggio del componente. Si deve infatti garantire la possibilità di fissaggio della parte, ad esempio tramite collegamenti filettati, prevedendo un opportuno spazio che tenga conto dell'ingombro del collegamento stesso e permetta all'operatore di agire sullo stesso. Inoltre è necessario tenere conto di eventulai parti che potrebbero interferire con il componente ed evitare che durante il processo generativo tali aree vengano utlizzate come spazion di progettazione. La progettazione generativa non richiede necessariamente una forma iniziale, tuttavia la definizione di un modello iniziale può portare il software a convergenza in tempi più ristretti. Si passa quindi all'assegnazione del materiale. In Fusion360 si possono selezionare fino a 7 materiali differenti per ogni studio generativo, permettendo così di valutare come diversi materiali influenzano il design finale. [6]

1.2.2 Applicazione di carichi e vincoli

Occorre quindi definire i carichi e i vincoli a cui è sottoposto il componente da progettare. Tali forze vanno necessariamente applicate a zone di non design, in quanto devono essere preservate. Si possono applicare diverse tipologie di carico, tra cui forze, momenti e carichi di pressione. Si passa ora a vincolare le superfici. Tra i vincoli comunemente disponibili all'interno dei vari software troviamo incastro, cerniera e carrello. È possibile inoltre scegliere altri vincoli, come quelli basati sul processo produttivo del componente. Il design finale sarà differente se la parte verrà prodotta tramite colata, fresatura o tramite fabbricazione additiva. Infine è fondamentale la definizione degli obiettivi e dei limiti della progettazione generativa. Gli obiettivi dello studio possono essere la minimizzazione della massa o la massimizzazione della rigidezza. I limiti applicabili riguardano solitamente il fattore di sicurezza minimo e lo spostamento massimo.

1.2.3 Generazione delle alternative

Terminata la fase di preparazione del modello e dell'applicazione dei carichi e vincoli il software avvia la generazione delle alternative. Il programma analizza i dati di input del problema e tramite algoritmi di intelligenza artificiale e machine learning inizia a popolare lo spazio delle soluzioni. Tali soluzioni vengono quindi analizzate, confrontate e migliorate utilizzando algoritmi che emulano i processi evolutivi naturali. Il software esplora numerose permutazioni possibili di forma e struttura, testando ciascuna configurazione attraverso simulazioni e apprendendo progressivamente quali varianti funzionano meglio. Questo processo iterativo consente di affinare le soluzioni a ogni ciclo, scartando le opzioni meno promettenti e concentrandosi su quelle che soddisfano meglio i criteri impostati.

1.2.4 Classificazione e selezione dei design proposti

Alla fine del processo di generazione delle alternative il software propone al progettista diversi design. Il programma classifica i risultati ottenuti in base al peso dei criteri di progetto. Tipicamente i criteri risultano:

- Riduzione della massa
- Raggiungimento del coefficiente di sicurezza
- Valore di spostamento
- Complessità di produzione

Il progettista può intervenire già in questa fase, modificando il peso di ogni criterio usato nella valutazione dei diversi output. A questo punto si può procedere alla valutazione delle opzioni così ottenute, confrontando visivamente le soluzioni e analizzando i dati relativi a ciascuna.

1.2.5 Analisi e ottimizzazione

La fase finale della progettazione generativa consiste nell'analisi e nell'ottimizzazione dell'alternativa scelta dal progettista. Terminata la fase di selezione, si esporta il componente generato in modello solido. 'E quindi possibile intervenire sulla geometria della parte, andando a modificare le zone che lo richiedono. Infine il progettista esegue un'analisi FEM per validare il design finale.

1.3 Ruolo dell'intelligenza artificiale e del machine learning

L'intelligenza artificiale ricopre un ruolo fondamentale nel processo di generative design. Permette l'esplorazione di soluzioni innovative che garantiscono allo stesso tempo elevate proprietà, ottimizzazione di materiale e costi, il tutto in tempi ristretti. [7] L'uso dell'AI, e in particolare del machine learning, è sfruttato nella fase di generazione, analisi e ottimizzazione delle alternative. Grazie allo sviluppo e al training su vasti datasets, gli algoritmi di ML sono in grado di isolare e identificare patterns, incrementando in modo significativo il loro potere predittivo. [8] Durante questa fase del GD si utilizzano algoritmi genetici, che emulano l'andamento evolutivo

naturale. Un GA lavora su una popolazione di soluzioni candidate, che evolve attraverso iterazioni successive secondo regole ispirate alla biologia. L'algoritmo segue un ciclo iterativo[9]:

- Generazione della popolazione iniziale
  Si creano più soluzioni casuali o basate su un modello predefinito

- Codifica delle soluzioni
  Una soluzione progettuale viene rappresentata come un *genoma* o un insieme di parametri numerici. Nella rappresentazione tramite genotipi basati su parametri numerici ogni soluzione è un vettore di numeri che rappresentano variabili di design. Nella rappresentazione basata su geometrie procedurali si usano modelli parametrici definiti da funzioni matematiche, come ad esempio NURBS, mesh o voxel.

- Fitness function
  Determina la qualità del design basandosi su criteri definiti.

- Selezione naturale
  Le soluzioni migliori vengono selezionate per la fase successiva.

- Crossover e mutazione
  Gli algoritmi combinano caratteristiche di più soluzioni e introducono piccole variazioni per generare nuove alternative.

- Iterazioni successive
  Il processo si ripete fino a trovare una soluzione ottimale

All'interno di ogni step di un algoritmo genetico, durante la progettazione generativa, si ricorre all'uso dell'AI. Di seguito si riportano le tre categorie di algoritmi di intelligenza artificiale e machine learning più usati.[7]

1.3.1 Supervised machine learning

In questo tipo di apprendimento, l'algoritmo impara da un set di dati etichettati, ovvero dati di input già associati a un output. L'obiettivo è predire l'output corretto per nuovi dati in base a ciò che è stato appreso durante il training. Tra gli algoritmi di apprendimento supervisionato figurano:

- Support Vector Machines
  Si tratta di una tecnica di ML robusta e precisa, introdotta per risolvere problemi di classificazione a due gruppi. Questo algoritmo rappresenta il confine decisionale utilizzando un sottoinsieme degli esempi di addestramento, noti come vettori di supporto. È particolarmente adatta per l'analisi delle relazioni struttura-attività e funziona in modo ottimale quando la separazione tra le classi è chiara. Può tuttavia soffrire di overfitting se non gestita correttamente. La tecnica SVM è stata applicata in vari settori, tra cui il generative design e l'additive manufacturing. In quest'ultimo ambito è stata utilizzata per la previsione della porosità e la classificazione delle immagini del pool di fusione. [7]

- Reti Neurali Artificiali
  Le reti neurali artificiali si ispirano al funzionamento del cervello umano. Sono

composte da strati di neuroni artificiali che simulano la computazione decentralizzata del sistema nervoso centrale attraverso il processamento parallelo. Le ANNs possono svolgere compiti di apprendimento supervisionato, non supervisionato e di rinforzo, come il riconoscimento di pattern. Una rete neurale tipica è costituita da un livello di input, uno o più livelli nascosti e un livello di output. Ogni neurone in un livello applica una funzione di attivazione alla somma ponderata degli input provenienti dai neuroni del livello precedente. Durante la fase di addestramento, la tecnica di backpropagation viene utilizzata per ottimizzare i pesi relativi dei neuroni, minimizzando l'errore tra l'output previsto e quello reale. Le reti neurali trovano applicazione in vari settori, tra cui il controllo dei processi, la modellazione ecologica, la previsione delle proprietà meccaniche dei materiali, la progettazione generativa e la diagnosi di guasti. Tuttavia, possono soffrire di problemi di overfitting e richiedono tempi di calcolo elevati. Le reti neurali convoluzionali e le reti neurali ricorrenti sono varianti avanzate delle ANNs. In particolare le CNNs sono utilizzate in AM per trattare dati come immagini o informazioni tridimensionali, molto utili nella previsione e ottimizzazione dei parametri del processo di produzione. [7]

- Reti Bayesiane
  Le reti bayesiane sono modelli grafici che rappresentano le relazioni probabilistiche tra variabili. Sono composte da nodi che rappresentano le variabili e archi diretti che indicano le dipendenze causali tra queste variabili. Ogni nodo ha una distribuzione di probabilità condizionale che descrive la probabilità della variabile data le sue variabili parenti. Le BNs permettono di calcolare la probabilità di una variabile data le osservazioni delle altre variabili. Questo è utile per la diagnosi, la previsione e la decisione in vari contesti.Le reti bayesiane possono inoltre essere costruite e aggiornate utilizzando dati osservati, sfruttando sia l'apprendimento supervisionato che non supervisionato. La complessità computazionale di tali reti può aumentare rapidamente con il numero di variabili, rendendo difficile l'applicazione a problemi molto grandi. Le BNs trovano applicazioni in ambiti come la previsione e la decisione. Sono infatti utilizzate per prevedere eventi futuri basati su dati storici e per supportare decisione, come ad esempio la scelta dei design più promettenti durante il processo di progettazione generativa. [7]

1.3.2 Unsupervised learning

Questa categoria di algoritmi viene utilizzata per trovare modelli nascosti o raggruppamenti nei dati senza etichette predefinite, con l'obiettivo principale di raggruppare o ridurre la dimensionalità dei dati. Gli algoritmi di apprendimento non supervisionato includono tecniche come clustering k-means e le mappe autoorganizzanti. [7]

1.3.3 Reinforcement learning

L'apprendimento per rinforzo si concentra su un agente che impara a prendere decisioni ottimali interagendo con l'ambiente e ricevendo ricompense o penalizzazioni. L'algoritmo viene affinato per massimizzare una funzione di ricompensa nel lungo termine. Gli algoritmi di apprendimento per rinforzo includono tecniche come le deep neural networks e le reti neurali convoluzionali. [7]

2 Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica è un metodo di progettazione computazionale che individua la migliore distribuzione di materiale all'interno di un dominio di progetto per ottimizzare le prestazioni strutturali. [10] Viene solitamente utilizzato nelle fasi iniziali del processo di design, per esplorare diverse soluzioni, sulla base di diversi obiettivi, come ad esempio la minimizzazione della massa, la massimizzazione della rigidezza o un dato valore di spostamento massimo definito. [11] Il processo di TO parte da un volume di materiale definito e rimuove gradualmente il materiale non necessario, tramite iterazioni successive, conservando solo ciò che serve per soddisfare i requisiti imposti. Durante ogni iterazione viene eseguita un'analisi agli elementi finiti che permette al software di valutare quali porzioni di materiale da eliminare. Solitamente il design ottenuto è una forma dalle geometrie complesse, organiche, che richiamano strutture presenti in natura. Per la valutazione dei risultati delle analisi FEM e per la scelta del materiale da rimuovere, i software di ottimizzazione topologica utilizzano algoritmi matematici. Tra i solver più utilizzati vi è quello basato sul metodo a densità variabile, chiamato *SIMP*. Tale algoritmo assegna ad ogni elemento della mesh una densità fittizia che l'ottimizzatore spinge verso i valori 0 o 1, che indicano relativamente elemento vuoto e elemento con piena densità, penalizzando i valori intermedi. [12] In questo modo si ottiene una mappa di densità ottimale, che viene poi interpretata come forma geometrica solida. Altri approcci includono metodi evolutivi e metodi basati su funzioni di livello. Tuttavia, l'obiettivo comune è sempre massimizzare una prestazione definita rispettando i vincoli di progetto, attraverso una redistribuzione ottimale densità all'interno del design space.

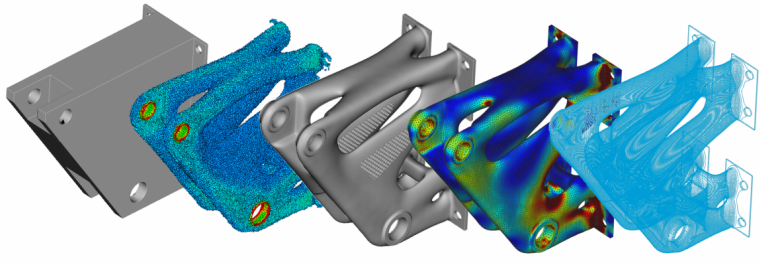


Figura 3: Riprogettazione di un componente mediante ottimizzazione topologica [13]

2.1 Storia dell'ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica ha iniziato a diffondersi solamente negli ultimi decenni, tuttavia, il concetto di ottimizzazione topologica affonda le radici agli inizi del '900. Già nel 1904 l'ingegnere australiano A.G. Michell pubblicò uno studio pionieristico sull'ottimizzazione di travi reticolari, stabilendo condizioni teoriche per strutture con la minima quantità di materiale necessaria a sopportare i carichi , le cosiddette strutture di Michell. [14] I progressi nel campo dell'ottimizzazione topologica furono limitati, fino agli anni '70 del Novecento, quando, grazie alla pubblicazione di Berke e Khot [15] si sono resi disponibili gli strumenti matematici per l'effettiva risoluzione dei problemi numerici di ottimizzazione topologica. In particolare gli studi riguardanti gli algoritmi per la ricerca dell'ottimo hanno avuto un ruolo fodamentale nell'evoluzione dell'ottimizzazione topologica. Lo scritto di Svanberg [16] ha introdotto il metodo degli *asintoti mobili (MMA)*, in grado di proporre una sequenza di possibili soluzioni ottimizzate al problema esaminato. Il MMA può anche gestire problemi di tipo non lineare e valutare simultaneamente vincoli, variabili di design e caratteristiche del problema di ottimizzazione strutturale. [17] Nel decennio sucessivo la TO subisce un notevole sviluppo grazie ai lavori di Bendsøe [10] e Rozvany [18, 19], basati sul modello MMA. Fu proprio Bendsøe a introdurre attraverso i suoi articoli un metodo basato sull'omogeneizzazione per ottimizzare la distribuzione di materiale in strutture continue, considerato uno dei lavori fondativi dell'ottimizzazione topologica computazionale.Poco dopo, propose anche una tecnica semplificata, ulteriormente sviluppata da Zhou e Rozvany [18, 19] negli anni seguenti. Tale tecnica ha preso il nome di *Solid Isotropic Material with Penalization, (SIMP)* ed è ancora oggi tra i solver più utlizzati. In parallelo è stato anche sviluppato da Xie e Steven [20] un modello evolutivo basato sulla rimozione iterativa degli elementi meno sollecitati, chiamato *Evolutionary Structural Optimization (ESO)*. Lo sviluppo di algoritmi di ottimizzazione topologica è continuato con l'introduzione di migliorie per evitare le instabilità numeriche, estensioni per considerare vincoli di tensione e fatica e metodi bidirezionali (BESO). Questi ultimi metodi si basano su algoritmi genetici e sono in grado di risolvere problemi complessi di ottimizzazione topologica tramite non solo la sottrazione ma anche l'aggiunta di materiale. [14] Un aspetto fondamentale nello sviluppo e nella diffusione recente della TO è stata l'evoluzione della componente hardware a sostegno della risulzione dei calcoli necessari, nonchè dell'integrazione di tools di ottimizzazione topologica all'interno di software CAD e CAE.

2.2 Principi dell'ottimizzizone topologica

L'ottimizzazione topologica è un processo iterativo il cui obiettivo principale è l'identificazione delle migliori performance strutturali attraverso la ricerca dell'ottimo della distribuzione di materiale all'interno di un volume dato, tenendo conto delle condizioni al contorno, dei vincoli e dei carichi applicati. [17] La soluzione generale a un problema di ottimizzazione topologica consiste nella ricerca del minimo o del massimo di una funzioe $f(x)$, valutata nei punti $x = (x_1, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}$. La funzione f prende il nome di funzione obiettivo, o costo, mentre le quantità $x_i, i = 1, ..., n$ rappresentano le variabili di progetto, il cui numero è espresso dall'indice n.
Il problema di ottimizzazione di può quindi esprimere come segue:[17]

$f(x)$	funzione obiettivo da minimizzare
$h_j(x) = 0$	$j = 1, \ldots, n_h$ vincoli di uguaglianza
$g_k(x) \leq 0$	$k = 1, \ldots, n_g$ vincoli di disuguaglianza
$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$	$i = 1, \ldots, n$ variabili di progetto

Dove:

n_h numero di vincoli di uguaglianza
n_g numero di vincoli di diseguaglianza
n numero di variabili di progetto
x_i^l estremo inferiore delle variabili di progetto x_i
x_i^u estremo superiore delle variabili di progetto x_i

2.3 Confronto tra ottimizzazione topologica e generative design

Con l'evoluzione dell'ottimizzazione topologica, un lavoro proposto da Hajela *et al.* [21] avanzò un nuovo modello computazionale per la risoluzione di problemi di TO. Alla base del modello vi era l'uso di algoritmi genetici, in grado di generare ottimizzazioni strutturali nell'intorno dell'ottimo, tramite la sottrazione e l'aggiunta di materiale. Basandosi sui principi formulati da Darwin riguardanti la sopravvivenza del più adatto, i GA offrono un vantaggio rispetto ai metodi matematici usati in precedenza, riuscendo ad integrare nel processo vincoli di progettazione generali e la possibilità di individuare l'ottimo globale. [14] Grazie allo sviluppo di questo nuovo modello si vennero a creare le basi per una nuova metodologia di progettazione, basata sull'aggiunta di materiale: il generative design.
Il GD e l'ottimizzazione topologica sono infatti due metodologie di progettazione simili, che presentano tuttavia importanti differenze a livello concettuale e metodologico. Entrambi si concentrano sull'ottimizzazione di un design, eppure sfruttano approcci e algoritmi profondamente differenti. Partendo dal metodo progettuale emerge la prima grande differenza tra GD e TO. L'ottimizzazione parte da un modello preesistente o da un design space definito dal progettista e rimuove materiale, migliorando la distribuzione di materiale all'interno dello stesso per raggiungere gli obiettivi definiti. Il generative design invece non necessita di una forma iniziale. Il progettista indica le zone di non design e i vincoli progettuali. A questo punto il software elabora diversi design, esplorando lo spazio delle soluzioni aggiungendo materiale e modificando i modelli in modo iterativo. Al termine del processo di GD si ottengono quindi molteplici soluzioni possibili, in opposizione all'ottimizzazione topologica, che permette di raggiungere un singolo risultato ottimizzato. Proprio grazie alla capacità di generare molteplici soluzioni, il generative design permette di risolvere complessi problemi multiobiettivo, variando diversi parametri e offrendo la possibilità di integrare una vasta gamma di vincoli nel processo. Tipicamente l'ottimizzazione topologica si concentra invece su problemi con un singolo obiettivo, come ad esempio la minimizzazione della massa o la massimizzazione della rigidezza, considerando una disponibilità di vincoli più limitata. Alla base delle differenze tra

le due metodologie vi è l'utilizzo di tecniche algoritmiche differenti. L'ottimizzazione topologica si basa su algoritmi di ottimizzazione con criteri di ottimalità, in cui la singola soluzione si evolve, rimuovendo materiale, fino a convergere. Il generative design invece utilizza algoritmi evolutivi, genetici o di AI che esplorano lo spazio delle soluzioni in modo stocastico o tramite machine learning. Ciò comporta un coinvolgimento del progettista differente tra le due metodologie. Nell'ottimizzazione topologica il progettista rimane più coinvolto e ha un ruolo più attivo. Oltre alla preparazione del modello e alla fase finale di verifica e refinement, l'ingegnere è attivo anche durante il processo. Occorre spesso regolare i parametri e iterare più volte l'analisi per ottenere il risultato desiderato. Nel GD, invece, il progettista non interviene durante il processo, bensì solamente nella fase preliminare di impostazione del problema e in quella finale di selezione e verifica del design. È tuttavia importante notare che entrambi i processi non possono fare a meno del lavoro del progettista, la cui figura rimane centrale.
In conclusione, l'ottimizzazione topologica e il design generativo condividono l'obiettivo di spingere i limiti della progettazione verso forme estremamente performanti. La TO si concentra su un risultato ottimo all'interno di vincoli definiti, mentre il GD allarga la prospettiva fornendo molteplici soluzioni e integrando più aspetti. Il generative design può quindi essere visto come un'evoluzione dell'ottimizzazione topologica, tuttavia, restano due strumenti differenti ed efficaci.[22] Spesso, infatti, i due metodi vengono utilizzati in modo combinato. Per lo sviluppo di un componente il progettista può iniziare generando diverse opzioni tramite GD, per poi raffinare e ottimizzare la soluzione scelta tramite TO.

3 Additive Manufacturing

L'additive manufacturing è un processo di fabbricazione, definito dall'Organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO/ASTM 52900), come "un processo di unione di materiali al fine di creare oggetti partendo da dati di modelli 3D, solitamente strato dopo strato, in opposizione ai metodi sottrattivi della fabbricazione tradizionale". [23] Il processo di fabbricazione additiva parte dalla creazione di un modello CAD tridimensionale. Il modello viene quindi esportato in formato STL, rappresentando lo stesso attraverso una triangolazione. Segue quindi la fase di *slicing*, ovvero la divisione attraverso software appositi del file ottenuto precedentemente in singoli strati. I dati vengono infine inviati alla macchina per additive manufacturing, la quale realizza il componente aggiungendo materiale strato dopo strato. Alla fase di fabbricazione vera e propria segue la fase di *post-processing*, in cui la parte viene sottoposta a diversi trattamenti e lavorazioni per migliorare le proprietà meccaniche ed estetiche. In Fig.4 sono raffigurate le fasi di produzione di un generico componente prodotto tramite AM.

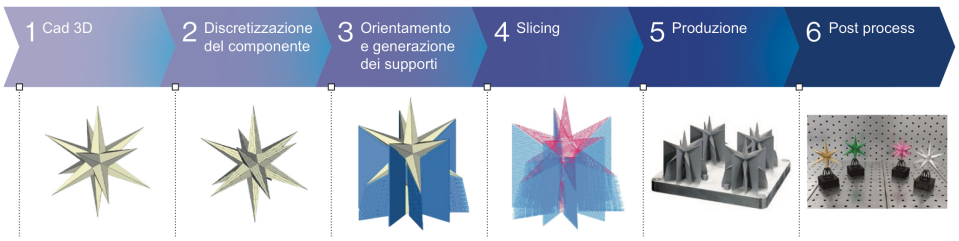


Figura 4: Fasi di produzione[24]

Tramite fabbricazione additiva è possibile realizzare particolari complessi utilizzando diverse tipologie di materiali, come plastiche, metalli, ceramiche e compositi, offrendo elevata flessibilità nella realizzazione di geometrie complesse e nella personalizzazione dei prodotti, riducendo al contempo gli scarti e ottimizzando i tempi di produzione. [24] Grazie ai vantaggi in termini di innovazione, competitività e sostenibilità l'additive manufacturing si è resa protagonista della quarta rivoluzione industriale, conosciuta anche come industria 4.0. Si tratta di un processo ancora in corso, caratterizzato dall'intergrazione di tecnologie avanzate e dall'interconnessione tra sistemi fisici e digitali. Insieme all'AM troviamo infatti lo sviluppo e l'implementazione di numerose tecnologie innovative: [25]

- Internet of Things
  L'IoT è un concetto che fa riferimento all'estensione della connettività al mondo degli oggetti e dei luoghi concreti che assumono quindi una propria identità digitale in modo da poter comunicare con altri oggetti nella rete e fornire servizi. A livello pratico, quindi, una rete è composta da oggetti fisici, dotati di sensori

che, tramite software e connettività, sono in grado di raccogliere e scambiare dati.

- Big Data e AI
  Tramite l'utilizzo di tecnologie avanzate e connesse viene raccolta una quantità notevole di dati. Diventa quindi fondamentale la gestione efficiente degli stessi. Implementando l'intelligenza artificiale nel management e nell'analisi di big data si possono estrarre informazioni preziose, utili ad esempio per effettuare manutenzione preventiva o per scoprire correlazioni nascoste tra i dati.

- Cloud computing
  Il cloud computing è la distribuzione di servizi di calcolo, come server, risorse di archiviazione, database, reti, software, analisi e intelligence, tramite internet. Permette una riduzione significativa dei costi, in quanto si eliminano le spese di hardware dirette ed indirette, garantendo al contempo la possibilità di ridimensionare le risorse in modo elastico in base alle esigenze. Inoltre i principali servizi di cloud computing vengono eseguiti su una rete mondiale di data center sicuri ed aggiornati, che garantisco elevata velocità e affidabilità grazie a backup regolari e ridondanti. [26]

- Realtà aumentata e virtuale
  AR e VR sono due tecnologie immersive in forte sviluppo. La realtà aumentata amplifica il mondo reale con la sovrapposizione di contenuti digitali. La realtà virtuale, invece, permette l'immersione totale in un ambiente digitale simulato, isolando l'utente dal mondo reale. L'utilizzo di AR e VR nell'ambito della trasformazione verso industria 4.0 permette, ad esempio, di migliorare il processo di formazione del personale o di trasformare l'esperienza di design, permettendo al progettista di visualizzare il progetto 3D nello spazio reale.

- Blockchain
  Si tratta di una tecnologia di registro distribuito che consente di realizzare transazioni digitali in modo sicuro, trasparente e immutabile. È composta da una catena di blocchi, ciascuno contenente un insieme di transazioni, e collegato al precedente tramite un codice crittografico. Le blockchain garantiscono quindi un passaggio di informazioni sicuro e inviolabile, requisito fondamentale per garantire la sicurezza dei dati nell'ambito della quarta rivoluzione industriale. [27]

L'implementazione di tali tecnologie all'interno delle aziende ha permesso alle stesse di essere più agili e reattive, adattandosi alle esigenze di mercato. Il ruolo dell'additive manufacturing è centrale. Questa tecnica permette infatti una produzione personalizzata su vasta scala, garantendo produttività ed efficienza elevate.

3.1 Processo di Fabbricazione Additiva

L'additive manufacturing (AM) è definita dalla norma ISO/ASTM 52900 come "un processo di unione di materiali per creare oggetti a partire da dati digitali tridimensionali, solitamente strato dopo strato, in contrasto con i metodi sottrattivi tradizionali" [28].

Il processo di fabbricazione additiva inizia con la modellazione CAD del componente desiderato. Il file viene successivamente esportato in formato STL, che approssima la geometria mediante una mesh triangolare, rendendola interpretabile dai software di *slicing*.

Lo *slicing* suddivide il modello in layer, una serie di strati bidimensionali, generando i percorsi utensile e i parametri macchina necessari per la stampa. I dati vengono quindi inviati alla stampante, che costruisce il pezzo aggiungendo materiale strato dopo strato secondo le informazioni ricevute. Alla fase di costruzione segue tipicamente la fase di *post-processing*, che può includere trattamenti termici, rimozione dei supporti e operazioni di finitura per migliorare le proprietà meccaniche, dimensionali ed estetiche del componente.

Questo approccio offre una grande libertà progettuale, consentendo la realizzazione di geometrie complesse e parti alleggerite difficilmente ottenibili con tecniche tradizionali, oltre alla possibilità di produrre direttamente parti personalizzate senza la necessità di attrezzaggi specifici. L'AM trova così applicazione in settori che spaziano dall'aerospaziale al biomedicale, rappresentando uno dei pilastri dell'Industria 4.0 grazie all'integrazione con altre tecnologie digitali come IoT, Big Data e Intelligenza Artificiale.

3.2 Tecniche di Fabbricazione Additiva

Con il termine *additive manufacturing* si fa riferimento a numerose tecnologie di fabbricazione additiva, che si differenziano per modalità di deposizione, fonte di calore o ancora materiale di partenza. La normativa ISO/ASTM 52900 [23] definisce sette categorie di processi di AM: fotopolimerizzazione VAT, estrusione di materiale, getto di collante, deposizione ad energia diretta, getto di materiale, fusione del letto di polvere, laminazione di fogli.

- Material extrusion
  Il MEX è un processo di manifattura additiva in cui il materiale viene selettivamente depositato da uno o più ugelli su una piattaforma di stampa. La tecnologia più diffusa è chiamata Fused Filament Fabrication, nota anche come Fused Deposition Modeling. Si tratta di una tecnica di AM in cui del filamento polimerico viene estruso tramite un ugello riscaldato, come raffigurato in Fig. 5.

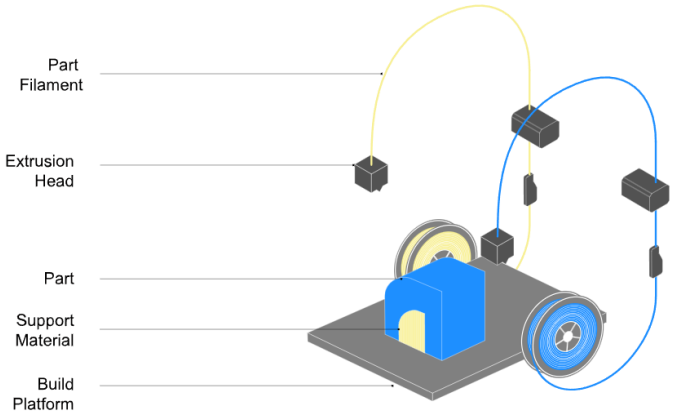


Figura 5: Processo FFF[29]

  I materiali più utilizzati sono polimeri termoplastici come PLA, PETG e ABS. Per la corretta fabbricazione della parte tramite FFF è necessario prevedere supporti per il sostegno delle zone sporgenti. Se la macchina è dotata di più ugelli possono essere prodotti in materiale differente rispetto al componente, in modo tale da facilitarne la rimozione. Materiali comuni per la realizzazione dei supporti sono PVA e HIPS, rispettivamente solubili in acqua e in solventi organici. È tuttavia preferibile evitare, per quanto possibile, l'utilizzo di strutture di supporto, cercando di ottimizzare il design in ottica DfAM. Le macchine per la fabbricazione additiva tramite FFF possono assumere diverse configurazioni in base allo schema costruttivo e alla movimentazione degli assi adottato dal produttore. Le strutture più comuni sono quella cartesiana, coreXY e delta. Nelle stampanti che adottano la prima soluzione ogni asse si muove lungo una direzione lineare, mentre nella configurazione coreXY la movimentazione XY è affidata a un sistema di cinghie, con il piano di stampa libero di muoversi lungo l'asse Z. I macchinari con configurazione delta presentano invece una piatto di stampa fisso. La movimentazione lungo tutti gli assi è affidata a tre bracci che muovono, tramite traiettorie complesse, un effector centrale, su cui è installato l'estrusore.

- Vat photopolymerization
  La fotopolimerizzazione in vasca è un processo di fabbricazione additiva che

si basa sulla polimerizzazione selettiva di resina liquida attraverso una fonte luminosa. Le resine utlizzate per la VPP appartengono alla categoria dei fotopolimeri termoindurenti. Questi materiali, infatti, sono composti da molecole in grado di legarsi rapidamente e passare dallo stato liquido a solido quando esposti a determinate lunghezze d'onda, attraverso un fenomeno noto come fotopolimerizzazione. I processi principali che sfruttano questa tecnologia sono la stereolitografia (SLA) e il Digital Light Processing (DLP). Le due tecniche si differenziano solamente per la sorgente luminosa usata, laser nel caso di SLA e proiettore digitale UV nel caso di DLP, come evidenziato in Fig.6.

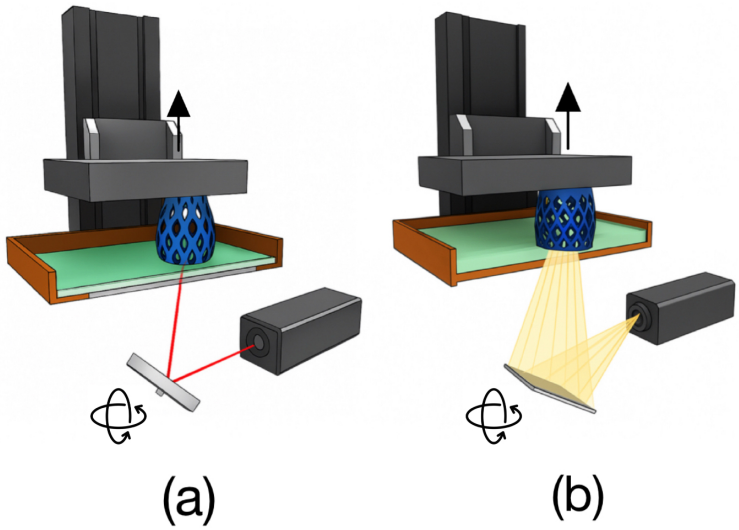


Figura 6: Processo SLA (a) e DLP (b)[30]

In un processo VPP la sorgente luminosa viene indirizzata attraverso il movimento di uno specchio verso la porzione di polimero da far reticolare, ripetendo lo schema strato dopo strato. La natura liquida del materiale di partenza, unita alla precisione della movimentazione del sistema di controllo del laser o della luce UV e della piattaforma di stampa, permette di ottenere ottime finiture superficiali.

- Powder bed fusion
  Le tecnologie appartenenti alla categoria PBF sono caratterizzate dal materiale di partenza sotto forma di polvere. La fonte di energia viene utilizzata per fondere selettivamente le particelle di polvere sul piano di stampa. In Fig.7 è rappresentato lo schema di un generico processo del tipo powder bed fusion.

  Il materiale in polvere è contenuto in un serbatoio all'interno del macchinario. Per la stesura dello strato di polvere sul piano di stampa interviene un sistema di reacoating, solitamente composto da un rullo o una lama. Depositato il layer, un sistema scanner guida la sorgente di calore alla fusione selettiva della polvere secondo lo schema desiderato. La piattaforma di stampa, quindi, si abbassa per permettere l'applicazione di un nuovo strato di materiale da fondere. All'interno del gruppo di tecniche additive a letto di polvere vi sono processi in grado di elaborare sia materiali metallici che polimerici. Le tecnologie principali riguardanti l'AM metallico in questa categoria sono Laser-Powder Bed Fusion (L-PBF) e Electron Beam Melting (EBM). Tra le tecniche più diffuse per la fabbricazione additiva a letto di polvere in materiale polimerico figurano

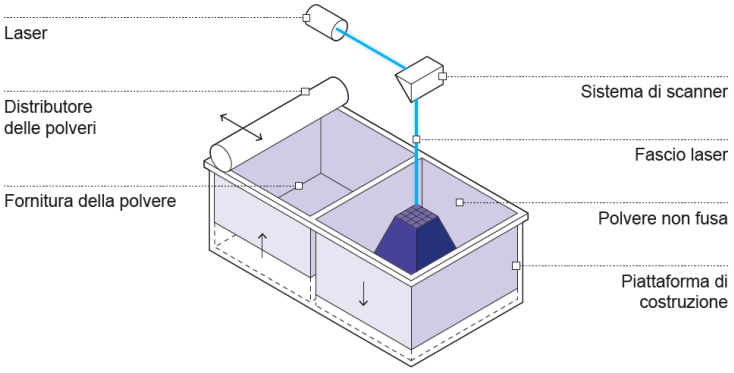


Figura 7: Processo Powder Bed Fusion (PBF)[24]

Selective Laser Sintering (SLS) e Multi Jet Fusion (MJF). Il Laser-Powder Bed Fusion e l'Electron Beam Melting, come evidenziarto in Fig.8 si differenziano per la sorgente di energia utililizzata: fascio laser nel caso del primo e fascio di elettroni nel caso del secondo.

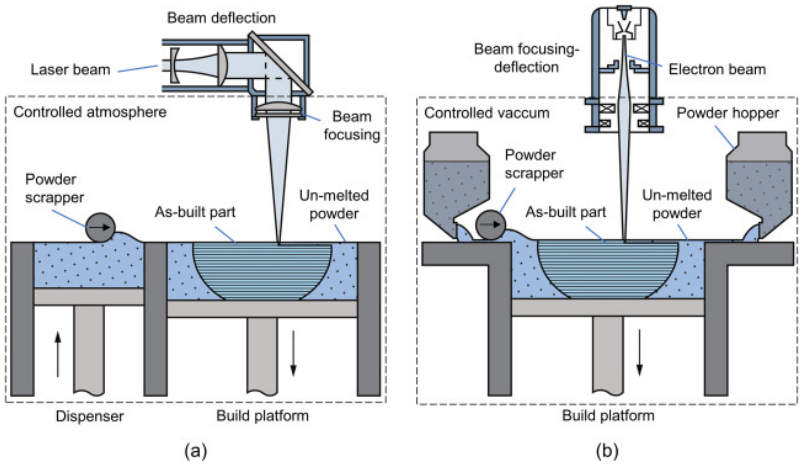


Figura 8: Processo L-PBF (a) e EBM (b)[31]

Nel caso dell'EBM, a causa dell'adozione di un fascio elettronico, è necessario operare in una camera di lavoro in cui viene mantenuto sotto vuoto spinto, per evitare collisioni tra le molecole d'aria e il fascio di elettroni ed evitare fenomeni di ossidazione. Le differenza tra le tecnologie la lavorazione dei polimeri sono invece più marcate. La tecnologia SLS è la controparte nell'ambito delle materie plastiche del selective laser melting. Il selective laser melting offre componeti dall'elevata resa estetica e sopratutto dalle elevate proprietà meccaniche. Inoltre, grazie alla caratteristica autosupportante della polvere riscaldata, non sono necessari supporti durante la fase di realizzazione del componente. Si può sfruttare tale proprietà per la realizzazione di geometrie estremamente complesse e per la saturazione dell'intero volume di lavoro, tramite operazioni di nesting 3D. Nel multi jet fusion, invece, non si utilizza una fonte di calore puntuale, ma l'energia viene applicata all'intero strato contemporaneamente. La polvere polimerica viene infatti stesa sulla piattaforma di stampa e sucessivamente una testa di stampa deposita due tipi di agente liquido, uno di fusione e uno di dettaglio. L'agente di fusione facilita la fusione del materiale, mentre quello di

dettaglio agisce in modo contrario, permettendo così la creazione di dettagli definiti, come mostrato in Fig.9.

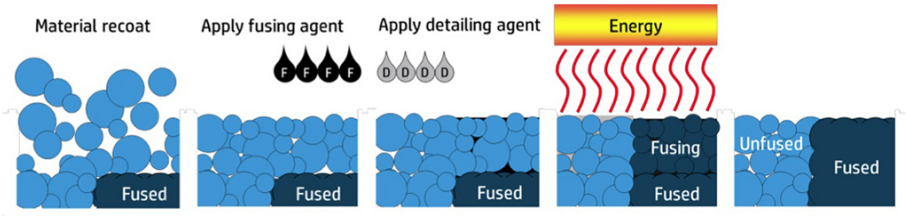


Figura 9: Applicazione agenti di fusione e di dettaglio nel processo MJF[32]

Terminata la deposizione, il passaggio sulla piattaforma di stampa di lampade UV provoca lo fusione del materiale nelle aree definite. Tramite MJF si possono ottnere precisioni e finiture ottimali.

- Binder jetting
  Il BJT è una metodo di additive manufacturing in cui viene spruzzato in mondo preciso e puntuale del legante liquido su un letto di polvere. In Fig.10 è raffigurato lo schema tipico del binder jetting.

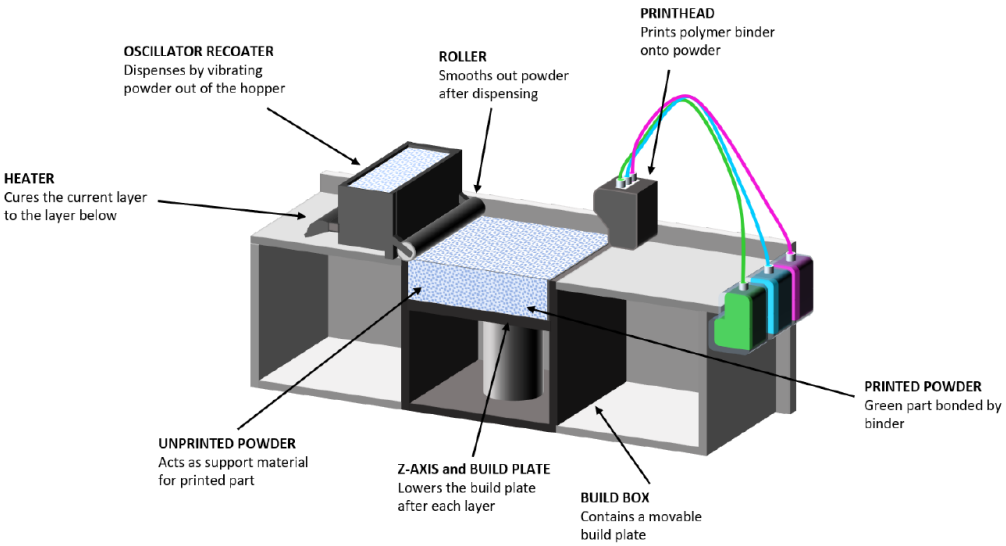


Figura 10: Processo Binder Jetting[33]

È un processo in grado di lavorare con diverse tipologie di materiali, come ad esempio metalli, sabbie, materiali ceramici e alcuni tipi di plastiche. Il binder jetting è in grado di produrre componenti precisi e dall'ottima resa estetica, anche grazie alla possibilità di realizzare stampe a colori, rapidamente e in modo efficiente. L'assenza di strutture di supporto e di una fonte di calore nel processo permette, infatti, di poter recuperare totalmente la polvere inutilizzata, rendendo la tecnologia particolarmente sostenibile. Tuttavia i pezzi prodotti tramite BJT risultano piuttosto fragili e, nel caso della presenza di fasi di densificazione, soggetti a deformazioni.

- Material jetting
  La tecnologia MJT sfrutta una testa di stampa dotata di una grande quantità di ugelli per depositare sulla piattaforma di stampa piccole gocce di materiale liquido. Il materiale utilizzato è un fotopolimero sensibile alla luce ultravioletta. A seguito della fase di deposizione, una lampada UV solidifica istantaneamente il materiale. Come si può notare in Fig.11, è possibile stampare più materiali contemporaneamente.

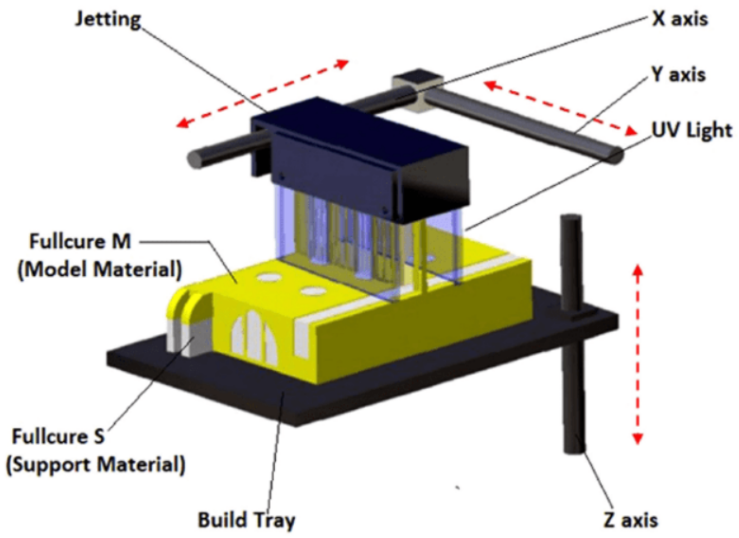


Figura 11: Processo Material Jetting (MJT)[34]

Il material jetting viene tipicamente utilizzato per la realizzazione di componenti in polimero e in cera, per la produzioni di manufatti tramite microfusione. I punti di forza del MJT sono l'elevata qualità estetica e risoluzione, insieme alla possibilità di stampare materiali termoplastici e termoindurenti, anche congiuntamente.

- Directed energy deposition
  Si tratta di una tecnica di AM metallico basata sulla fusione locale di materiale. Il processo utilizza una testa di deposizione, su cui è installata una fonte di calore, per la fusione del materiale su una piattaforma o direttamente su un componente preesistente. In Fig.12 è rappresentato lo schema di una testa di deposizione installata su una macchina DED che utilizza polvere metallica.

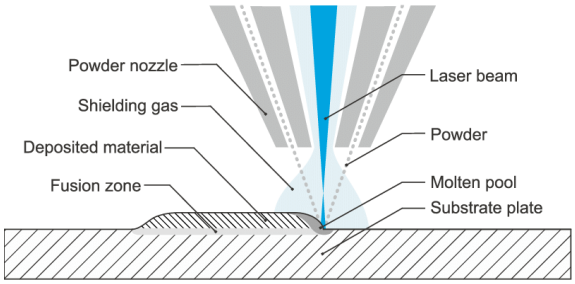


Figura 12: Processo Directed Energy Deposition (DED)[35]

Le macchine per la directed energy deposition possono utilizzare materiali metallici di diversa natura, come fili oppure polveri, e sorgenti energetiche differenti, come fasci laser, elettronici o archi elettrici. Processando materiali

reattivi come titanio e alluminio è fondamentale l'utilizzo di un sistema per la creazione di atmosfera inerte per prevenire fenomeni ossidativi. Per la movimentazione della testa di deposizione, la DED sfrutta sistemi che permettono diversi gradi di libertà, come sistemi robotici o strutture multiasse a controllo numerico.

- Sheet lamination
  La laminazione in fogli, o SHL, è una tecnologia di additive manufacturing ormai in disuso. Si basa sulla stratificazione successiva di fogli sottili, tagliati e incollati o fusi per ottenere un oggetto tridimensionale, come rappresentato in Fig.13. In questa categoria figurano tecnologie come la produzione additiva

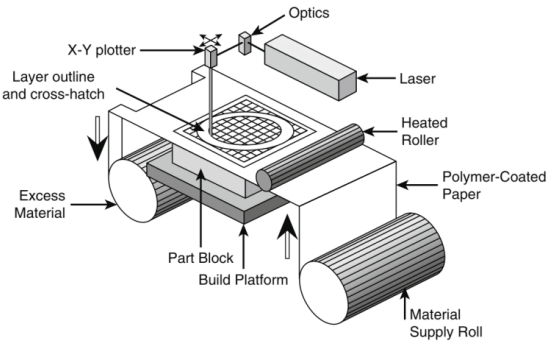


Figura 13: Processo Sheet Lamination (SHL)[36]

a ultrasuoni e la produzione di oggetti laminati. Il processo UAM parte da nastri metallici, tagliati da un plotter X-Y, ed infine uniti mediante saldatura ad ultrasuoni. Le due tecniche sono pressochè identiche. La produzione di oggetti laminati (LOM) si differenzia, tuttavia, per il materiale di partenza, in questo caso carta, che viene unita mediante l'uso di un adesivo.

3.2.1 Laser Powder Bed Fusion L-PBF

Particolare attenzione viene dedicata ora alla tecnica Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Si tratta della tecnologia scelta per l'eventuale realizzazione del componente oggetto dello studio presentato. La tecnologia L-PBF rappresenta una delle metodologie più avanzate e diffuse nell'ambito dell'additive manufacturing per materiali metallici. Si basa su un processo di fusione selettiva di polvere metallica mediante una sorgente laser, con cui è possibile ottenere componenti ad alta densità, complessità geometrica e proprietà meccaniche comparabili o superiori a quelle ottenute tramite lavorazioni tradizionali.

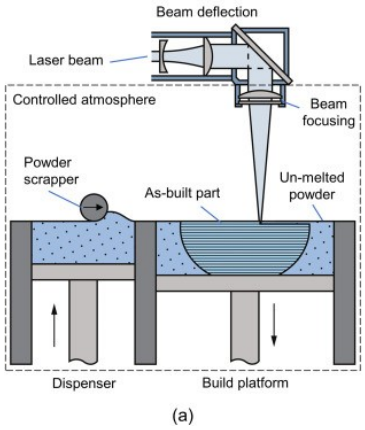


Figura 14: Macchina Laser Powder Bed Fusion[31]

In Fig.14 è rappresentato lo schema di una macchina L-PBF. Il processo segue lo schema descritto nella sezione 3.2. La polvere metallica è contenuta in una riserva, in grado di sollevarsi per permettere la stesura del nuovo layer sulla piattaforma di stampa, tramite un sistema di *recoating*. Il piano di lavoro è anch'esso in grado muoversi verticalmente, per permettere la stesura degli strati di polvere e la crescita del componente da realizzare. Il fascio laser è indirizzato e focalizzato grazie a un sistema di specchi. Il tutto avviene in atmosfera controllata e inerte, ottenuta tramite insufflaggio in camera di azoto o argon, per evitare fenomeni ossidativi, soprattutto con materiali particolarmente reattivi come leghe di titanio. Il processo utilizza unicamente polveri metalliche, senza l'utilizzo di leganti di qualsiasi natura. Le parti solide sono create direttamente in macchina, attraverso la fusione completa e la ri-solidificazione di polveri elementari o leghe.

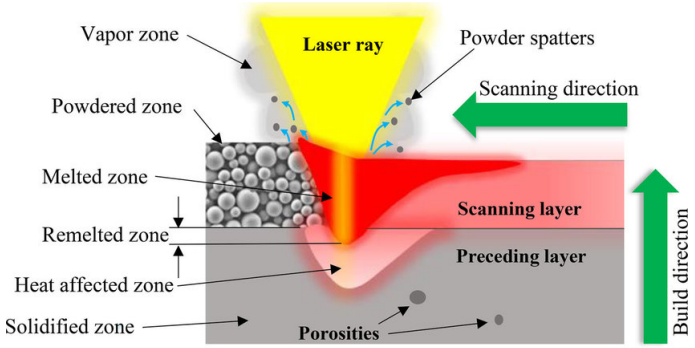


Figura 15: Processo Laser Powder Bed Fusion[37]

In Fig.15 è rappresentato in modo schematico il processo di fusione L-PBF. L'energia termica necessaria alla fusione è fornita da una sorgente laser, solitamente

a fibra, mentre in casi più rari si utilizzano laser a disco. Tali tipologie di laser solido utilizzano come mezzo attivo un cristallo di ittrio puro oppure di ittrio e alluminio drogato al neodimio (Nd-Yag). Le macchine per L-PBF possono essere progettate in configurazione mono oppure multi-laser, a seconda del numero di sorgenti installate. Le stampanti dotate di laser multipli garantiscono velocità e produttività più elevate, grazie al lavoro in contemporanea dei raggi laser, i quali lavorano simultaneamente su aree separate o sovrapposte. Tuttavia la calibrazione e la sincronizzazione di tali macchine risulta assai più complessa. Inoltre, l'interazione tra i diversi fasci laser può portare ad alcune problematiche, soprattutto nelle zone di sovrapposizione delle aree di lavoro, come ad esempio disomogeneità microstrutturali, porosità localizzate e tensioni residue. L'energia fornita durante il processo deve essere sufficiente a fondere lo strato di lavoro più una porzione della struttura sottostante, precedentemente solidificata, in modo da garantire l'aderenza tra gli strati. Grazie alla rapidissima fase di solidificazione a seguito della fusione, si ottengono proprietà meccaniche e metallurgiche superiori a quelle ottenute con metodi tradizionali, grazie a una microstruttura composta da grani fini, paragonabile a quella ottenuta per microfusione. Tuttavia i forti gradienti di temperatura e il ritiro del materiale in fase di solidificazione inducono dilatazioni e contrazioni termiche cicliche che possono superare la massima deformazione ammessa dal materiale in campo elastico, risultando in tensioni interne residue. Talvolta le tensioni possono essere così elevate da causare crepe durante il processo. Oltre alle tensioni residue, i tipici difetti associati a questo processo produttivo sono la porosità della parte, polveri residue, delaminazione dei layer e balling.

- Porosità
  Si tratta del difetto più comune in parti prodotte per L-PBF. Le porosità interne sono particolarmente critiche in quanto compromettono le proprietà meccaniche del componente. Le cause che portano alla generazione di tali difetti sono diverse. Le porosità possono nascere, ad esempio, da una mancata fusione. L'energia fornita non è sufficiente per la fusione completa. Si originano quindi spazi vuoti tra i cordoni di materiale fuso. Un'ulteriore causa di porosità è data dalla presenza di gas. Possono rimanere intrappolati durante il processo di solidificazione, oppure essere inglobati a seguito della fusione di polvere con porosità.

- Polveri residue
  Durante il processo produttivo, parte della polvere potrebbe rimanere non fusa e quindi intrappolata tra layer oppure in cavità interne. Oltre all'aumento della rugosità locale, si potrebbe avere rilascio di polveri metalliche in ambienti critici, come può avvenire, ad esempio, nel settore biomedico o aerospaziale. Infine, la mancata fusione completa, porta ad un'incertezza nella definizione delle proprietà meccaniche locali del componente.

- Delaminazione
  La delaminazione è un difetto che interessa l'adesione tra layer successivi, provocandone il distacco. Un raffreddamento troppo rapido o una deformazione dello strato precedente possono portare a mancata fusione tra gli strati, con conseguente formazione di separazione o microfessure tra i layer. Inoltre anche la stesura di uno strato da fondere troppo spesso può portare alla mancata fusione e saldatura tra i layer.

- Balling
  Un ulteriore difetto tipico della tecnologia L-PBF è il cosiddetto *balling*. Si tratta della formazione di gocce sferoidali dal diametro approssimativamente pari alla dimensione del fascio, che non si uniscono alla superficie del layer precedente. Tali sfere non aderiscono al substrato sottostante a causa dell'elevata tensione superficale e della scarsa bagnabilità tra la zona fusa e la parte solida. Si forma quindi una traccia fusa discontinua, con conseguente calo delle proprietà meccaniche e aumento della rugosità.

La tecnologia Laser Powder Bed Fusion, inoltre, necessita dell'uso di supporti per motivi meccanici, termici e geometrici. Le strutture di supporto consentono infatti di ancorare i componenti alla piattaforma di stampa, in modo da evitare il distacco degli stessi del piano di lavoro dovuto alle forti tensioni interne che si sviluppano durante il processo. Un'ulteriore funzione fondamentale dei supporti è la dissipazione del calore. Sono infatti posizionati sulla parte per asportare calore da aree ristrette, in cui il lavoro del laser è particolarmente concentrato. In aggiunta, le strutture di supporto sono fondamentali per la realizzazione di sottosquadri e superfici aventi un'inclinazione inferiore a 45° rispetto alla piattaforma di stampa, in quanto la fusione della polvere non avviene correttamente in assenza di un substrato solido. Conclusa la fase di costruzione del componente, le strutture di supporto dovranno poi essere rimosse meccanicamente. A monte dell'operazione di rimozione dei supporti è comunque necessario effettuare un trattamento termico di distensione per eliminare le tensioni interne indotte dal processo di costruzione.

3.3 Design for Additive Manufacturing

Tra le critiche che vengono mosse verso l'additive manufacturing vi è la mancanza di software specifici per la progettazione tramite AM.[38] Come conseguenza i progettisti imparano ancora a sviluppare le proprie idee di design seguendo metodi di manifattura tradizionale. Un report di McKinsey & Company [39] ha evidenziato questa problematica come uno dei principali ostacoli allo sviluppo dell'additive manufacturing. Per ovviare a tale problematica le software house hanno iniziato lo sviluppo di programmi e tool specifici per offrire al progettista strumenti che consentano di ottimizzare il processo di design per AM. Il progetto Dreamcatcher, portato avanti in maniera congiunta da General Motors e Autodesk ha segnato un primo passo nello sviluppo di soluzioni ad hoc per la fabbricazione additiva, implementando l'uso del generative design, supportato da algoritmi di AI e ML.[40] Grazie all'evoluzione costante e connessa tra software per DfAM e tecniche di fabbricazione additiva si è venuto a creare un legame inscindibile tra questi due elementi che ha permesso un significativo sviluppo del settore, aumentandone notevolmente le possibilità. Al tempo stesso si è evoluto e rafforzato il concetto di *Design for Additive Manufacturing*. La progettazione per la fabbricazione tramite AM è guidata da diversi principi:

- Massima leggerezza
  L'additive manufacturing offre la possibilità di realizzare oggetti con una distribuzione di materiale concentrata unicamente nelle zone dove è realmente necessario, permettendo la costruzione di oggetti cavi, leggeri e costituiti solo dal materiale essenziale alla sopportazione degli sforzi a cui il componente sarà sottoposto in condizioni di utilizzo.



Figura 16: Componente alleggerito sfruttando DfAM e AM [41]

- Canali conformali
  Tramite AM si possono realizzare canali di raffreddamento interni ai componenti in modo estremamente efficace. È infatti possibile progettare canali di raffreddamento molto complessi, dal percorso intricato e a sezione variabile, aderenti alle superfici da termoregolare, in modo da raggiungere la massima efficienza di scambio termico possibile, senza i vincoli di lavorazione dati dalle tecnologie di manifattura tradizionale.

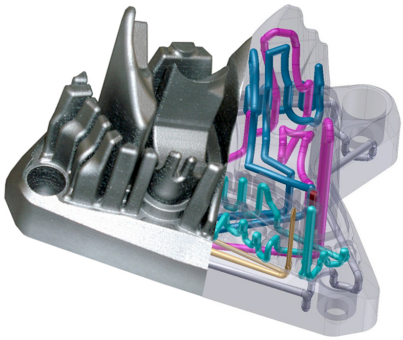


Figura 17: Componente dotato di canali di raffreddamento conformali [42]

- Riduzione del numero di componenti
  Tra i vantaggi che offre la fabbricazione additiva vi è la possibilità della riduzione del numero di componenti in sistemi complessi. La semplificazione di strutture multi-parti porta a numerosi vantaggi come la riduzione del tempo di assemblaggio e una distinta base più snella e leggera. Inoltre, grazie all'eliminazione di elementi di giunzione aumenta in modo significativo la sicurezza e l'affidabilità, riducendo al tempo stesso il peso.

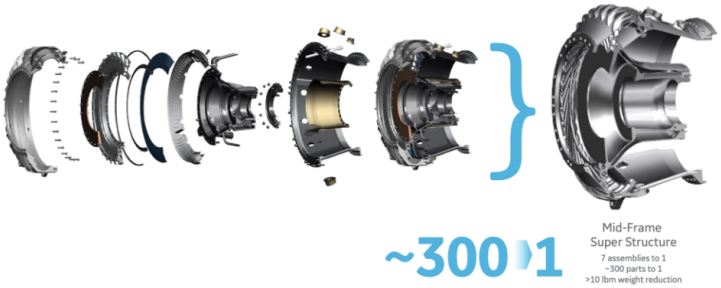


Figura 18: Riduzione del numero di componenti grazie all'AM [43]

- Personalizzazione
  La massima personalizzazione dell'oggetto è una delle caratteristiche più distintive dell'additive manufacturing. L'AM permette infatti di realizzare oggetti personalizzati senza la necessità di modificare stampi, attrezzature o processi produttivi, azzerando i costi di set-up necessari per le tecnologie di manifattura tradizionale.

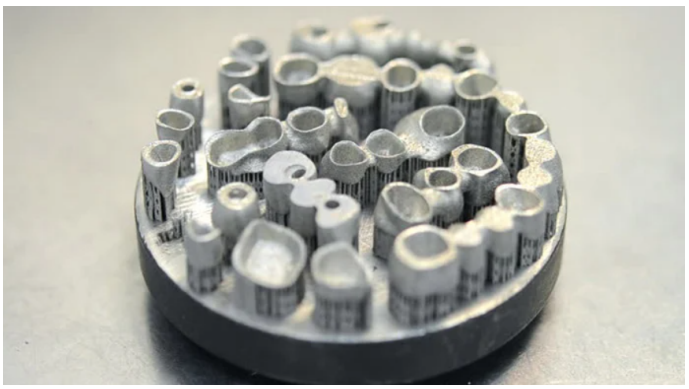


Figura 19: Realizzazione di componenti personalizzati tramite AM [44]

- Porosità controllata
  Tramite AM è possibile controllare la porosità e la densità dei componenti da realizzare. La regolazione della porosità superficiale è una caratteristica estremamente importante soprattutto in ambito biomedicale. Tale caratteristica ha un ruolo cruciale ad esempio nell'osteointegrazione di impianti ossei. La variazione della densità interna invece permette di regolare le proprietà meccaniche della parte. Sempre in nel settore biomedicale, ad esempio, si può variare la percentuale di riempimento di una protesi ossea per ottenere un comportamento bio-meccanico ottimizzato, cercando di replicare al meglio le proprietà meccaniche dell'ossatura umana.

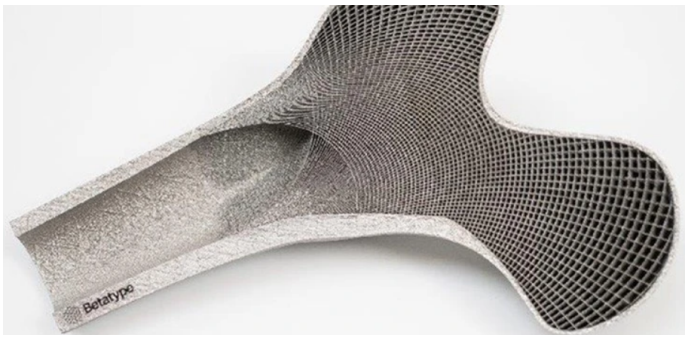


Figura 20: Componente con densità variabile realizzato in AM [45]

3.3.1 DfAM per SLM

Le tecniche di design e progettazione per la fabbricazione additiva variano molto in relazione al processo di realizzazione considerato. Non solo vi sono importanti differenze in base al materiale considerato, polimerico o metallico, ma le diverse tecnologie di stampa 3D richiedono accorgimenti specifici per ottimizzare il design in relazione al processo produttivo. Il caso studio presentato in questo elaborato di tesi si concentra sulla realizzazione del componente in esame tramite additive manufacturing metallico, in particolare SLM. Si approfondiscono quindi in modo più dettagliato le linee guida per ottimizzare il DfAM per la tecnologia Selective Laser Melting.

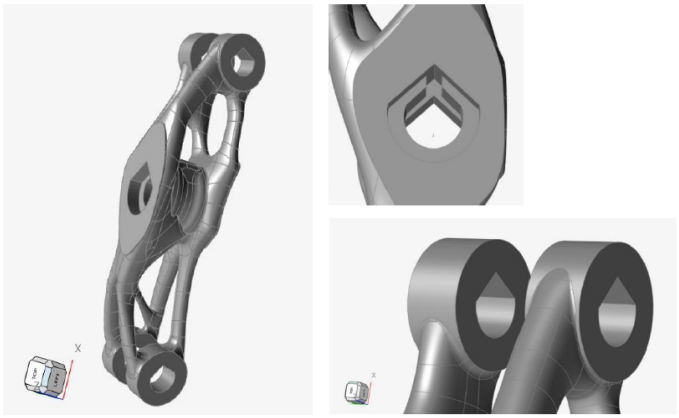


Figura 21: Componente ottimizzato seguendo i principi del DfAM[46]

Per garantire il miglior risultato possibile è necessario conoscere in modo approfondito il processo produttivo, unitamente alle caratteristiche della macchina

specifica che verrà utilizzata per la produzione del componente. Per prima cosa è necessario verificare che il modello da realizzare sia contenuto interamente all'interno del volume di costruzione della macchina. Occorre prestare attenzione al fatto che l'area e il volume totale dichiarato dai costruttori non tengono conto della presenza della piattaforma di stampa e dei fori presenti su quest'ultima per l'ancoraggio al sistema di movimentazione dell'asse verticale z. L'area di stampa effettiva risulta quindi essere pari a quella dichiarata, a cui è necessario sottrarre la porzione di area occupata dai fori predisposti per l'ancoraggio e il centraggio. Il volume di stampa deve invece essere calcolato prima di ogni job. Il volume totale dichiarato, infatti, non tiene conto della presenza del piano di stampa. È quindi necessario sottrarre al volume totale il volume occupato dalla piattaforma. Tuttavia, il volume di quest'ultima non è costante, infatti, alla fine di ogni ciclo produttivo, a seguito della rimozione dei componenti, il piano di stampa viene rettificato. Conseguentemente, l'altezza della piattaforma diminuisce e il volume totale disponibile per la produzione aumenta.

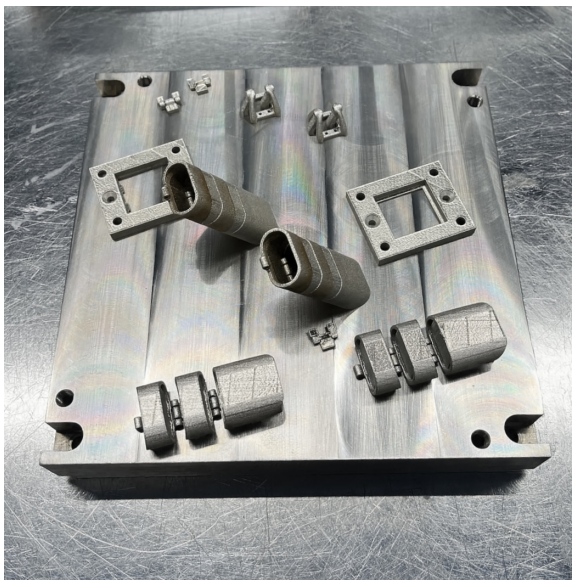


Figura 22: Piattaforma di stampa SLM[47]

Durante la fase di design occorre prestare attenzione all'ancoraggio del componente al piano di stampa e alla successiva rimozione. Le parti da realizzare possono essere costruite direttamente a partire dal piano di stampa. In questo caso è necessario prevedere un valore di offset tra il componente e la piattaforma, che tenga conto dei parametri relativi alla macchina EDM che sarà utilizzata per il taglio dei particolari dal piano. In alternativa, i componenti possono essere ancorati al piano di stampa tramite supporti. In tale contesto le parti possono essere vincolate totalmente mediante l'uso di strutture di supporto, oppure parzialmente. Per quanto riguarda la prima eventualità, la rimozione dei componenti è piuttosto semplice. Una volta rimosse le strutture di supporto, la parte risulta libera e la piattaforma di stampa è pronta per la rettifica. Nel caso di parti estruse dal piano di stampa con la presenza congiunta di strutture di supporto, la rimozione risulta più complessa. Solitamente si procede con l'asportazione dei supporti, per poi proseguire con il taglio tramite elettroerosione. In casi particolari può essere necessario effettuare queste ultime operazioni in modo invertito. Questa pratica, tuttavia, comporta alcune criticità, come il fissaggio del componente dopo la lavorazione EDM. Per la rimozione delle strutture di supporto sarà infatti necessario bloccare la parte. Questa operazione può

risultare molto complessa, considerando le strutture organiche e sottili tipiche della fabbricazione additiva. Un ulteriore problema deriva dall'operazione di taglio tramite elettroerosione. Durante il taglio, il fluido dielettrico utilizzato durante il processo interagisce con la polvere residua presente, creando un composto estremamente difficile da rimuovere. Inoltre, le strutture di supporto scaricano le tensioni residue all'interno dei componenti sulla piattaforma di costruzione. Al fine di evitare un improvviso rilascio delle tensioni, con conseguenze sull'integrità e sulla qualità del componente, è necessario procedere molto lentamente alla rimozione delle strutture di supporto, permettendo alle tensioni di ridistribuirsi. In alternativa si procede all'asportazione dei supporti a seguito di un trattamento termico di distensione.

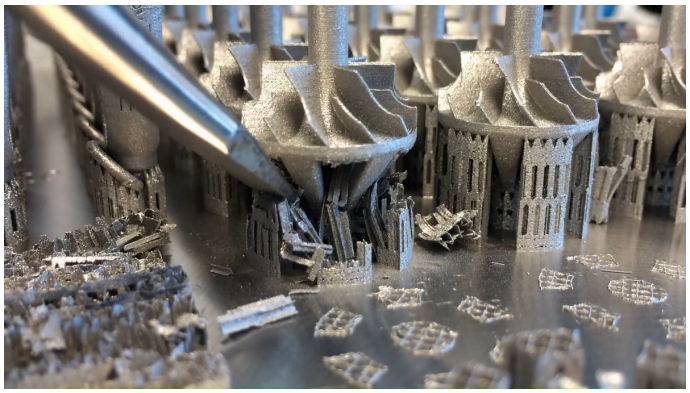


Figura 23: Rimozione componenti vincolati interamente tramite strutture di supporto[48]

Durante la fase di progettazione deve essere considerata l'aggiunta di una tolleranza e di sovrametallo adeguati. Tale operazione si rende necessaria per garantire la lavorabilità alle macchine utensili, in particolare per le caratteristiche che richiedono tolleranze e rugosità superficiali inferiori a quelle garantite dal processo SLM. Se sono previsti trattamenti termici a valle del processo produttivo, è opportuno considerare eventuali deformazioni che possono verificarsi a seguito del post-processing e che possono inficiare le tolleranze previste per il componente. Occorre quindi, nel corso della fase di design, orientare la parte per ridurre al minimo le operazioni di finitura e le strutture di supporto, progettare le superfici piane come superfici di riferimento, soprattutto nel caso di componenti dalla geometria complessa, in modo da facilitare le operazioni di post-processing e modificare, quando possibile, le caratteristiche geometriche della parte, in modo da supportare il pezzo durante il processo di fabbricazione. Durante la fase di progettazione delle strutture a sbalzo, è necessario considerare la variazione di rugosità superficiale dovuta all'inclinazione delle superfici. In generale, per un processo SLM, le superfici risultano non autosupportanti per un angolo α fino a 30. Se $30 \leq \alpha \leq 45$, la superficie è autosupportante, con rugosità superficiale $R_a > 12\mu m$, mentre, nel caso di $\alpha \geq 45$ la rugosità superficiale diminuisce, fino a valori nell'intorno di $R_a < 12\mu m$.

L'aumento della rugosità superficiale, per pareti inclinate con $\alpha \leq 30$, è dovuto, oltre che alla mancanza di supporto al di sotto della pozza di fusione, alla dissipazione dell'energia termica fornita dal fascio laser. Considerando le pareti di downskin, ovvero le superfici di un componente rivolte verso il basso, a contatto con la polvere non fusa, si nota che l'energia fornita dal fascio laser diretto verso la parete viene assorbita parzialmente anche dalle particelle di polvere non fusa nell'intorno del pozzo di fusione. Tale fenomeno porta alla fusione parziale della polvere adiacente al meltpool, provocando un aumento significativo della rugosità superficiale. Se si

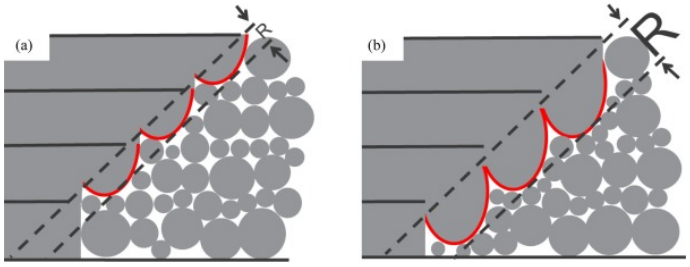


Figura 24: Influenza dell'inclinazione delle superfici sulla rugosità superficiale [49]

analizza, invece, il medesimo fenomeno per le pareti di upskin, ovvero le superfici di un componente rivolte verso l'alto, si nota che il calore fornito dal fascio laser viene dissipato all'interno del componente, evitando così l'aggregazione di particelle parzialmente fuse di polvere metallica e garantendo una rugosità superficiale contenuta. Durante la fase di messa in macchina è possibile intervenire distintamente sui parametri relativi alle superfici di upskin e downskin per ottimizzare la finitura superficiale. Nel caso di strutture a sbalzo, si possono considerare realizzabili, con una distanza non supportata fino a $6mm$, a fronte di un marcato peggioramento della finitura superficiale. Durante la fase di design è quindi di primaria importanza evitare la modellazione di zone a sbalzo. Spesso il problema è facilmente risolvibile tramite l'utilizzo di smussi e raccordi. Tuttavia, anche la presenza di superfici concave, come quelle generate da raccordi, presentano alcune problematiche. A causa del ritiro durante la solidificazione, la superficie concava effettivamente prodotta non segue la geometria di riferimento del file CAD. La curvatura della superficie risulta dunque alterata. Per ovviare a tale criticità è necessario prevedere l'uso di supporti per vincolare la parete del componente alla piattaforma di stampa ed evitare distorsioni. La causa dello scostamento rispetto alla geometria di riferimento è da ricercarsi nel ritiro da solidificazione del materiale. L'entità di tali deformazioni è dovuta, oltre che ai parametri geometrici e di processo, al materiale utilizzato. Si è notato sperimentalmente, infatti, che la lega di titanio $Ti6Al4V$ subisce una contrazione maggiore rispetto alla lega di alluminio $AlSi10Mg$, in relazione alla geometria nominale, per quanto riguarda le superfici concave. Relativamente alle superfici convesse, invece, la lega di titanio riesce a mantenere la geometria nominale con uno scarto minore rispetto alla lega di alluminio considerata nello studio. [50].

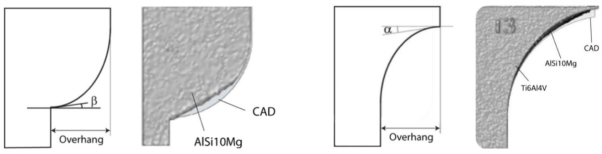


Figura 25: Criticità per strutture a sbalzo concave e convesse [50]

Un particolare tipo di struttura a sbalzo è rappresentato dai canali interni. Si tratta di una geometria ricorrente per la fabbricazione additiva, in quanto l'AM permette la realizzazione di canali particolarmente complessi. Tuttavia è necessario prestare attenzione, in prima battuta, alla progettazione, e successivamente, all'orientazione in macchina dei canali, al fine di renderli completamente autosupportanti. La presenza di supporti all'interno dei canali stessi, ne renderebbe impossibile la rimozione. Durante la fase di design, definita la direzione e l'angolo di crescita del componente, si identificano i canali che necessitano di strutture di supporto e si

interviene modificando la sezione degli stessi, introducendo, ad esempio una cross-section a goccia, anziché circolare, per garantire la perfetta stampabilità. Va inoltre considerato che canali circolari di sezione relativamente piccola possono comunque essere realizzati. Il diametro discriminante è variabile e dipende dai parametri di macchina e dal materiale lavorato.

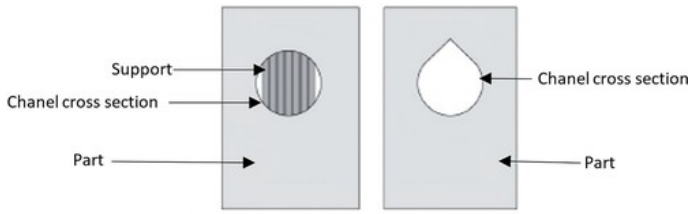


Figura 26: Redesign sezione trasversale canali interni [51]

Per la realizzazione di fori si segue la stessa strategia. Se il foro dovrà essere lavorato alle macchine utensili durante la fase di post-produzione, si prevede un opportuno sovrametallo, unitamente alla modifica della sezione circolare del foro con una forma a goccia, orientata secondo la direzione di stampa, con le pareti superiori inclinate di 45 per rendere il foro autoportante. Va prestata particolare attenzione anche alla progettazione di strutture con un rapporto altezza-sezione molto elevato, dette pin, e a pareti sottili. Nel primo caso si considera come rapporto altezza - sezione limite 8:1. La problematica principale riguardante i pin è la possibile interferenza con la lama per la stesura della polvere, che può portare alla rottura delle strutture stesse. Per quanto riguarda le pareti sottili, nella pratica non si scende mai al di sotto dello spessore minimo di $1mm$. Teoricamente la realizzazione di pareti sottili con spessore $\leq 1mm$ è possibile, tuttavia le strutture potrebbero risultare eccessivamente fragili. Inoltre, se si considerano pareti sottili in sequenza, a distanza ravvicinata, si può verificare la presenza di particelle di polvere parzialmente fusa tra le strutture. Un ulteriore aspetto da considerare durante la fase di design per un componente per Selective Laser Melting è la rimozione della polvere non fusa. È quindi necessario evitare la modellazione di cavità chiuse, evitando così l'imprigionamento della polvere non fusa all'interno del componente. Si possono prevedere opportuni fori di scarico, di diametro adeguato, per permettere un adeguato deflusso della polvere residua. Per facilitare le operazioni di depowdering, durante la fase di progettazione, è provvidenziale evitare la realizzazione di strutture che ostacolino lo svuotamento della polvere. Ad esempio, è fondamentale evitare la modellazione di cavità molto profonde, canali di diametro eccessivamente piccolo o ciechi ed estremamente intricati.

Infine, la fase di messa in macchina è uno degli stati più importanti del *Design for Additive Manufacturing*. Dopo aver scelto la direzione di costruzione nelle prime fasi di progettazione, ultimati tutti gli stadi di design, si passa al posizionamento del componente sul piano di stampa della macchina. Durante queste operazioni è fondamentale una conoscenza profonda della macchina su cui verrà realizzata la parte. Uno dei fattori principali per la scelta del posizionamento del pezzo sul piano di stampa è la direzione di ricoprimento della lama atta alla stesura del letto di polvere. Nel caso di un singolo componente sulla piattaforma, occorre esporre la superficie minore al possibile contatto con la lama, evitando allo stesso tempo il posizionamento di superfici parallele alla lama stessa. Occorre inoltre valutare lo sviluppo del componente lungo l'asse z, al fine di evitare l'esposizione di superfici che potrebbero risultare in un impuntamento del recoater blade sul pezzo stesso, con gravi conseguenze.

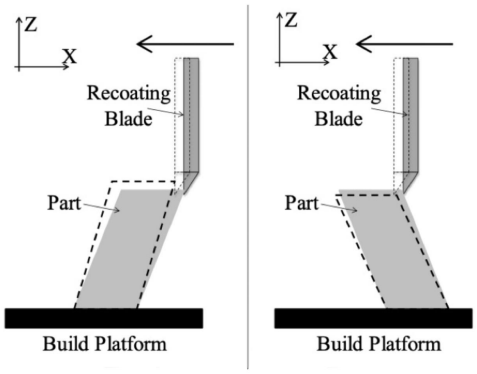


Figura 27: Impuntamento del recoater blade dovuto a un errato orientamento del pezzo (sinistra) e soluzione tramite riposizionamento corretto (destra).[50]

In modo similare, con la presenza di corpi multipli sul piano di stampa, è necessario posizionarli in modo sfalsato, in modo da minimizzare la superficie contemporaneamente esposta al possibile contatto con la lama e conseguentemente garantire un ricoprimento di polvere ideale.

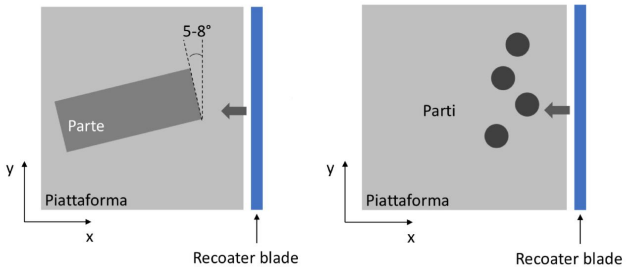


Figura 28: Disposizione ideale di componenti singoli e multipli [50]

4 CIM

Figura 29: Logo CIM [52]

Il CIM - Competenze per l'Industria e la Manifattura, nasce nel 2018 come uno degli 8 Centri di Competenza nazionali che offre supporto strategico e operativo in ottica di sviluppo industriale 4.0 con la diffusione di servizi e corsi di alta formazione.



Figura 30: Competence Center Nazionali [52]

Il CIM è uno degli otto centri di competenza nazionali ad elevata specializzazione promossi dal MISE, oggi *Ministero delle Imprese e del Made in Italy*, riconosciuto come polo d'eccellenza nell'ambito della trasformazione tecnologica delle imprese con la diffusione di tecnologie e competenze dell'Industry 4.0. Si tratta di un'organizzazione pubblico-privata (SCARL), composta da enti pubblici come Politecnico e Università di Torino, e da 22 importanti imprese private italiane e internazionali in qualità di soci fondatori. Qualificato inoltre da importanti player industriali in qualità di activity partner, CIM accompagna le aziende nel loro percorso di maturazione tecnologica, di processo e di prodotto, aumentandone la competitività digitale e sostenibile. Il CIM

fornisce servizi specializzati nella fabbricazione additiva di metalli e nelle tecnologie digitali abilitanti per la manifattura avanzata. CIM mira a contribuire in modo decisivo, a livello locale e nazionale, all'accelerazione del processo di trasformazione tecnologica. La mission aziendale è essere al fianco delle aziende per supportarle nel processo di transizione digitale e creare un ecosistema di Smart Factory. Le attività del consorzio si articolano su 4 aree di business: Linea Pilota Digital Factory, Linea Pilota Additive Manufacturing, Learning Hub, Innovation & Venture Lab.

4.1 Linee pilota: digital factory e additive manufacturing

Le due Linee Pilota, ovvero linee dimostrative di manifattura in cui è possibile testare processi e prodotti prima di portare le innovazioni sul mercato, rappresentano una struttura in grado di semplificare e rendere più competitivo l'approccio ai nuovi mercati da parte delle imprese.

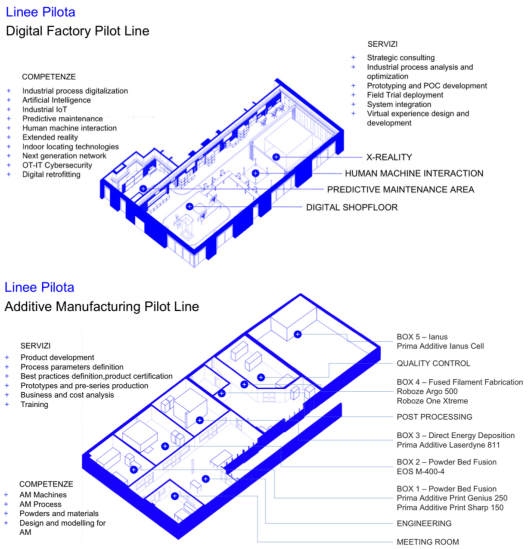


Figura 31: CIM linee pilota [52]

4.2 Open innovation advisory

Un ulteriore ruolo dell'azienda è quello di orientare le imprese verso un processo di innovazione sostenibile e coerente con le richieste dei nuovi mercati, mettendo a disposizione un ecosistema aperto e iperconnesso, partnership qualificate e cruscotti di servizi customizzati, eventualmente finanziati attraverso bandi nazionali ed europei. [53]

4.3 Education & training

Attraverso corsi personalizzabili su richiesta, il CIM offre servizi di Upskilling e reskilling del capitale umano. Tramite il percorso completo di alta formazione *CIM Academy*, rivolto ad imprenditori, manager, responsabili di area tecnica e liberi professionisti, l'azienda mira a trasferire competenze trasversali e multidisciplinari sui temi dell'Industry 4.0 e 5.0, per guidare e gestire la digital transformation dell'impresa.

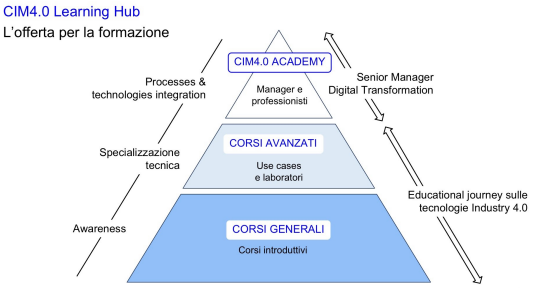


Figura 32: CIM learning hub [52]

4.4 Finanziamento di progetti

Il CIM supporta le imprese per lo sviluppo di progetti in ottica innovativa attraverso la pubblicazione di bandi pubblici, finanziamenti e progetti di ricerca a cui possono partecipare Grandi, Piccole e Medie imprese, e start-up che operano sul territorio nazionale. Ad oggi sono stati finanziati oltre 33 progetti grazie ad un supporto non solo economico ma soprattutto di expertise messa a disposizione dai team del Competence Center.



Figura 33: CIM risultati 2023 [52]

5 Caso studio

Il caso studio presentato in questo elaborato di tesi è nato dal desiderio di approfondire ed esplorare una nuova metodologia di design e progettazione, confrontandola con le tecniche più tradizionali, il tutto applicato in ottica di additive manufacturing. Grazie alla collaborazione tra CIM e Ferrari, è stato possibile individuare un componente adatto all'analisi sopracitata. Si tratta di un "blocco di comando idraulico", parte di un sottogruppo adibito al comando idraulico della trasmissione all'interno del powertrain di alcune supercar del Cavallino Rampante, tra cui Ferrari Prosangue e Ferrari LaFerrari.



Figura 34: Logo Ferrari e LaFerrari [54]

Il componente analizzato è collegato a un gruppo di potenza, composto da una pompa idraulica e un serbatoio di accumulo, tramite raccordi e tubazioni ad alta pressione per la mandata e a bassa pressione per il ritorno. Il fluido di lavoro è un olio lubrificante DCTF3 per trasmissioni a doppia frizione, sviluppato da Shell e specificatamente formulato per veicoli ad alte prestazioni. Come evidenziato in Fig.35 il gruppo di comando idraulico è composto dai seguenti componenti, analizzati in Tab.5.1:

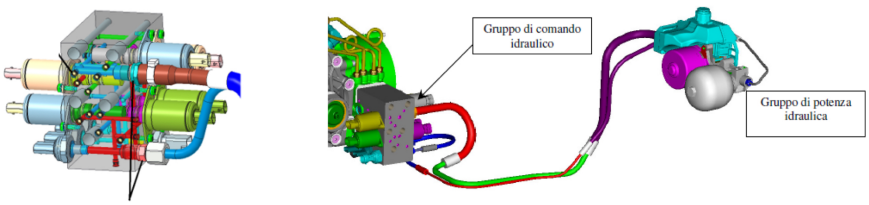


Figura 35: Dettaglio del blocco di comando e vista d'insieme del circuito idraulico

Quantità	Descrizione	Immagine
2	Elettrovalvola proporzionale in pressione per controllo frizione	
3	Elettrovalvola proporzionale in pressione per controllo sincronizzatori	
2	Elettrovalvola proporzionale in flusso	
3	Sensore di pressione	
1	Sensore di temperatura	
1	Raccordo di interfaccia ingresso	
1	Raccordo di interfaccia uscita	

Tabella 5.1: Componenti costituenti l'assieme del gruppo di comando idraulico

Le elettrovalvole operano in un range di tensione tra 0 e 5 V e, in base ai segnali provenienti dall'ECU, permettono la variazione proporzionale di flusso del fluido di lavoro tale da azionare i gruppi frizione-sincronizzatori per la selezione dei rapporti. I sensori di pressione e temperatura permettono il monitoraggio e la verifica costante del corretto funzionamento dell'intero sistema. Tutte le sedi dei componenti citati in Tab.5.1 sono filettate per permetterne il serraggio, eccezione fatta per le elettrovalvole, le quali vengono vincolate tramite una coppia di viti M4. Per consentire l'ancoraggio del blocchetto al carter della trasmissione sono presenti 5 fori passanti per viti M6 con lunghezza di stelo superiore a 75 mm. Sulla superficie di accoppiamento sono lavorate le sedi per permettere l'inserimento di o-ring in corrispondenza dei canali di ingresso e uscita.

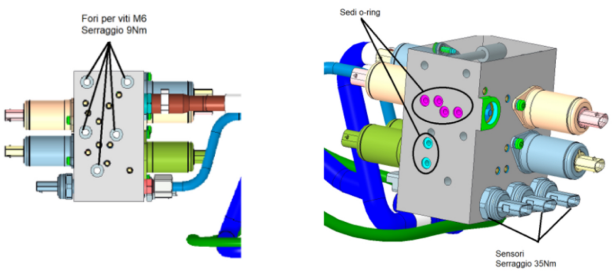


Figura 36: Dettaglio dei fori di fissaggio M6 e dei canali di ingresso e uscita

Il componente in oggetto è, allo stato attuale, prodotto da un fornitore esterno, realizzato in alluminio AW6026-T6 tramite lavorazioni tradizionali per asportazione di truciolo. L'intricata geometria dei canali interni rende particolarmente complessa la fabbricazione del componente tramite fresatura tradizionale. Per la lavorazione dei canali interni è infatti necessaria la fresatura di aperture e fori all'interno del blocchetto per permettere la realizzazione dei canali interni progettati. Ultimata la lavorazione alle macchine utensili, le aperture non necessarie al funzionamento del gruppo di controllo vengono sigillate tramite tappi a pressione sferici.

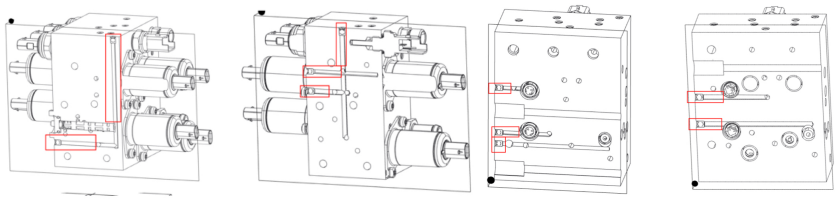


Figura 37: Canali di servizio per le operazioni di fresatura

In Fig.38 è raffigurato il blocco di comando idraulico reale attualmente in uso presso Ferrari, completo di tutti i componenti.

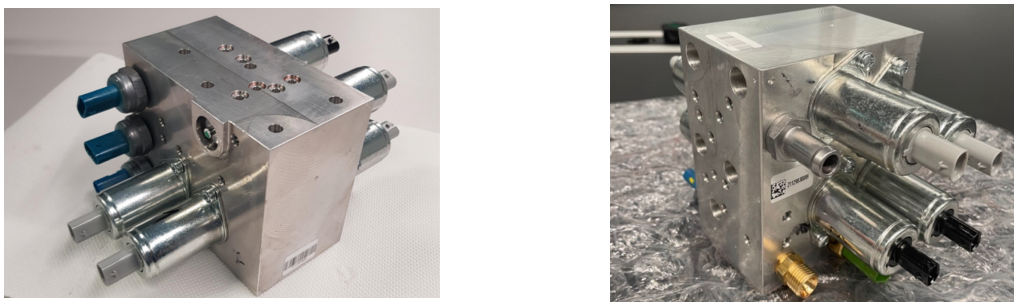


Figura 38: Componente attualmente in uso presso Ferrari

Il blocco di comando idraulico è stato riprogettato in un precedente lavoro di tesi di laurea [55] , nell'ambito di una collaborazione tra CIM e Ferrari.

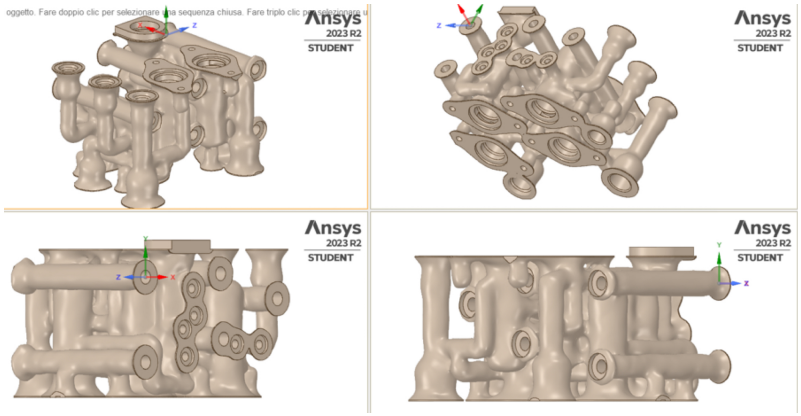


Figura 39: Blocco riprogettato per BJT [55]

La riprogettazione si è focalizzata sul redesign del componente sfruttando i principi della progettazione per la fabbricazione additiva. In particolar modo, lo studio era focalizzato sul DfAM per la produzione del blocco tramite binder jetting, con il fine ultimo di raggiungere una significativa riduzione di peso e di costo. La

tecnologia BJT permette la realizzazione di componenti senza la necessità di strutture di supporto, consentendo anche di saturare l'intero volume di lavoro della macchina tramite nesting. Il risultato raggiunto è mostrato in Fig.39. In seguito, il competence centre ha proseguito lo studio del componente, adattandolo e riprogettandolo per la fabbricazione tramite LPBF, utilizzando le macchine presenti in azienda. Il lavoro si è concentrato sul redesign dei canali, in modo da renderli autosupportanti, modificandone il percorso e la sezione. In Fig.40 è riportato il risultato finale della riprogettazione.

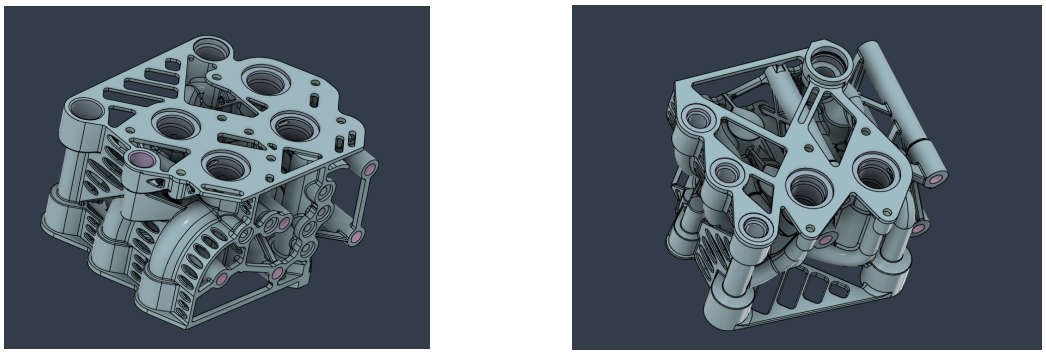


Figura 40: Blocco riprogettato dal CIM per LPBF

Si nota il lavoro svolto per rendere l'intera struttura stampabile senza l'utilizzo di supporti. Il materiale all'esterno dei canali interni è stato modellato per contenere l'inclinazione delle superfici lungo la direzione di costruzione entro 45°.

5.1 Software utilizzati

Per lo sviluppo di questo elaborato di tesi si è fatto uso principalmente di tre software per la parte di modellazione, simulazione e ottimizzazione: Autodesk Fusion360, nTopology e Siemens NX. NX è stato utilizzato unicamente per la fase preliminare di modifica e modellazione del file CAD di partenza, in quanto il team della linea pilota additive del CIM lo utilizza come principale software CAD. Le successive fasi di modellazione sono state portate avanti su Fusion360. Tramite la suite di Autodesk sono state condotte simulazioni FEM e ottimizzazioni topologiche sul componente in esame. Inoltre, la fase di generative design è stata sviluppata unicamente all'interno di Fusion360. nTopology è stato utilizzato come supporto per la modellazione iniziale e soprattutto per la parte di FEA e ottimizzazione topologica.

5.1.1 Autodesk Fusion360

Figura 41: Logo Autodesk Fusion360 [56]

Autodesk Fusion360 è una piattaforma integrata basata su cloud sviluppata per rispondere alle esigenze moderne di progettazione, simulazione e produzione

in ambito ingegneristico e manifatturiero. Unifica in un unico ambiente strumenti avanzati di modellazione CAD, lavorazione CAM, simulazione CAE e progettazione elettronica (ECAD), offrendo una soluzione completa per la gestione dell'intero ciclo di vita del prodotto. La sua architettura cloud consente la collaborazione in tempo reale tra team distribuiti, la gestione delle versioni dei file, il tracciamento delle modifiche e l'accesso remoto ai progetti, facilitando processi di sviluppo snelli, iterativi e altamente integrati. La modellazione CAD in Fusion 360 supporta approcci parametrici, diretti, a superfici e a mesh, permettendo di creare geometrie complesse, sia per componenti meccanici che per prodotti consumer. La piattaforma include un ampio set di strumenti per lo schizzo 2D, la modellazione 3D, la creazione di assiemi e la gestione dei vincoli geometrici, oltre a funzionalità per il rendering fotorealistico e l'animazione di movimenti e meccanismi. Uno degli aspetti tecnologicamente più avanzati di Fusion 360 è rappresentato dagli strumenti per l'ottimizzazione topologica e il Generative Design, che permettono di progettare componenti ottimizzati per specifici vincoli strutturali, riducendo significativamente massa e materiali utilizzati senza compromettere le prestazioni meccaniche. Il Generative Design è una feature particolarmente matura in Fusion360. Grazie all'utilizzo di algoritmi evolutivi e tecniche di intelligenza artificiale sviluppati da Autodesk, il software riesce ad esplorare automaticamente un ampio spazio di soluzioni progettuali. Il sistema genera numerose alternative, ciascuna accompagnata da una simulazione strutturale che valuta parametri come stress, deformazioni, rigidezza, frequenze naturali e fattore di sicurezza. Il risultato è una serie di soluzioni innovative, spesso non intuitive, che coniugano prestazioni elevate, leggerezza strutturale e possibilità di fabbricazione. Sul fronte CAE, Fusion 360 integra un modulo completo di simulazione multi-fisica che permette di validare e ottimizzare i progetti prima della messa in produzione. Le analisi disponibili includono simulazioni statiche lineari e non lineari, analisi modali per lo studio delle vibrazioni, analisi termiche conduttive e convettive, simulazioni di instabilità, analisi di contatto tra corpi e simulazioni dinamiche per eventi transitori. Tutte queste analisi possono essere eseguite sia in locale, sfruttando la potenza computazionale del dispositivo dell'utente, sia in remoto tramite i server cloud Autodesk, riducendo i tempi di calcolo e liberando risorse locali. I risultati delle simulazioni vengono restituiti sotto forma di mappe colorimetriche di tensioni, deformazioni, fattore di sicurezza e spostamenti, fornendo indicazioni cruciali per la revisione del progetto e l'eliminazione di criticità strutturali. La componente CAM di Fusion 360 consente la generazione di percorsi utensile per macchine CNC a 2,5, 3, 4 e 5 assi, oltre alla gestione di operazioni di tornitura, taglio laser, waterjet e additive manufacturing. I percorsi utensile possono essere generati automaticamente o personalizzati in base alle esigenze, con simulazioni cinematiche che permettono di prevenire collisioni e ottimizzare i tempi ciclo. L'integrazione stretta tra il modello CAD e i percorsi CAM assicura l'aggiornamento automatico delle lavorazioni in seguito a modifiche progettuali, riducendo il rischio di errori e migliorando l'efficienza del flusso produttivo. La sua natura cloud-native, unita a strumenti di AI e simulazione integrata, lo rende uno strumento strategico per l'industria 4.0 e per l'adozione di approcci progettuali orientati all'ottimizzazione, alla sostenibilità e alla digitalizzazione del ciclo produttivo.

5.1.2 nTopology



Figura 42: Logo nTopology [57]

nTopology è una piattaforma di progettazione ingegneristica avanzata che consente di generare, modificare, ottimizzare e analizzare geometrie complesse attraverso un approccio field-driven e modulare, basato su funzioni implicite e workflow algoritmici. La sua architettura lo rende uno strumento estremamente potente per la progettazione funzionale avanzata, in particolare in ambiti dove i limiti dei CAD tradizionali risultano penalizzanti, come l'ottimizzazione topologica e DfAM. Il nucleo matematico di nTopology si basa sulla rappresentazione di geometrie mediante funzioni scalari implicite del tipo $f(x, y, z) \leq 0$. Queste funzioni definiscono il dominio solido come l'insieme dei punti che soddisfano una condizione di livello (livello zero o isosuperficie). L'approccio implicito permette di superare molti dei problemi legati ai solidi tradizionali come ad esempio assenza di discontinuità topologiche e operazioni booleane robuste e continue. A livello computazionale, questo approccio consente di gestire in modo efficiente geometrie particolarmente complesse, come strutture reticolari, gradienti di densità e strutture multiscala. Il software è costruito attorno a un sistema di blocchi funzionali, ciascuno dei quali rappresenta un'operazione geometrica, un campo, una trasformazione o un processo di analisi. Ogni dato è completamente parametrizzabile, esportabile e documentabile, rendendo possibile la ripetibilità e l'automazione del processo di progettazione. I workflow sono salvabili e riutilizzabili in contesti simili, riducendo tempi e rischi nel caso di cicli di progettazione iterativa. nTopology è stato concepito sin dall'inizio come uno strumento orientato al design per la manifattura additiva, con l'obiettivo di sfruttare appieno le potenzialità delle tecnologie additive superando le limitazioni dei metodi di progettazione tradizionali come, ad esempio, la generazione e il controllo di strutture lattice e ribs. In particolare nTop permette di generare reticoli regolari, stocastici, conformali o a gradiente, basati su celle primitive predefinite o custom. É inoltre possibile modificare e mappare le strutture lattice tramite funzioni di campo in input, come campi di tensione o di distanza. Alla base di queste funzionalità vi è il cosiddetto Field-Driven Design, attraverso il quale è possibile generare strutture con variazione locale di proprietà geometriche e topologiche. nTopology integra al suo interno anche un robusto sistema per la gestione di mesh, simulazioni FEM e CFD. Tramite nTop si possono effettuare anche ottimizzazioni topologiche particolarmente complesse e multiobiettivo, con la possibilità di eseguire tutte le operazioni post-ottimizzazione all'interno del software, sfruttando i benefici della modellazione implicita. Grazie all'integrazione del programma con i principali software di slicing, come ad esempio EOSPRINT, è possibile esportare il componente dall'ambiente di lavoro direttamente in macchina.

5.1.3 Siemens NX



Figura 43: Logo Siemens NX [58]

Siemens NX è una piattaforma software per la progettazione e l'ingegneria assistita al calcolatore, sviluppata da Siemens Digital Industries Software. Si tratta di una soluzione integrata che unisce funzionalità CAD, CAM e CAE in un unico ambiente, con l'obiettivo di supportare l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla fase concettuale fino alla produzione e alla validazione. Nel modulo CAD, Siemens NX consente la modellazione solida e di superfici , con strumenti di modellazione parametrica, diretta e convergente. Quest'ultima rappresenta una tecnologia innovativa che permette di operare contemporaneamente su geometrie tradizionali e faccettate, come STL o mesh generate da scansioni 3D, facilitando l'integrazione tra progettazione e reverse engineering. In ambito CAM, NX offre strumenti potenti per la generazione automatica dei percorsi utensile, la simulazione delle operazioni di lavorazione, il controllo collisioni e l'ottimizzazione dei tempi di ciclo. Supporta lavorazioni a 2.5, 3, 4 e 5 assi continui, nonché processi non convenzionali come l'elettroerosione, la stampa 3D e la robotica industriale. È possibile personalizzare le strategie di lavorazione e integrare macchine utensili reali attraverso post-processor specifici. Il modulo CAE integra strumenti per l'analisi agli elementi finiti in ambito strutturale, termico, modale e fluidodinamico. NX è strettamente integrato con Simcenter, la suite di Siemens per la simulazione multifisica avanzata, che consente anche l'esecuzione di ottimizzazioni topologiche, analisi transitorie complesse e simulazioni di comportamento dinamico. Un altro elemento distintivo di Siemens NX è l'integrazione nativa con sistemi di Product Lifecycle Management, che consente di gestire in modo strutturato le versioni, le revisioni e le autorizzazioni dei progetti, migliorando l'efficienza nella collaborazione tra reparti tecnici e nella tracciabilità delle modifiche. Il software supporta inoltre tecnologie emergenti come il design generativo, l'intelligenza artificiale applicata al design e alla produzione, e l'integrazione con sensori e dati di campo nel contesto del Digital Twin.

5.1.4 Materialise Magics



Figura 44: Logo Materialise Magics [59]

Materialise Magics è un software sviluppato da Materialise e progettato specificamente per la preparazione, il controllo e l'ottimizzazione dei modelli 3D destinati alla stampa additiva. Riconosciuto come standard de facto nel preprocessing di file STL, è ampiamente utilizzato in ambito industriale e accademico grazie alla sua capacità di supportare un'ampia gamma di tecnologie additive, tra cui SLM, EBM, Binder Jetting e stereolitografia. Il software offre strumenti versatili per garantire la qualità geometrica dei file e ottimizzarne la preparazione alla produzione. Uno dei principali punti di forza di Magics è la capacità di gestire mesh complesse e di effettuare operazioni di riparazione automatica su errori geometrici come triangoli invertiti, buchi, bordi aperti e intersezioni. Il modulo *Fix Wizard* consente una riparazione dettagliata dei modelli, assicurando la chiusura dei volumi e la loro piena manifatturabilità. Il software permette inoltre la conversione da file CAD a STL, la scalatura e il posizionamento dei modelli nel volume di costruzione, la duplicazione ottimizzata dei componenti e la generazione di strutture di supporto personalizzabili. Magics include potenti funzionalità di nesting 2D e 3D, finalizzate all'ottimizzazione della disposizione dei pezzi nella camera di stampa, con l'obiettivo di ridurre sprechi di materiale e tempi di produzione. Per le applicazioni metalliche, consente l'orientamento strategico dei componenti, al fine di minimizzare le deformazioni termiche, ridurre le superfici che richiedono supporto e migliorare la qualità finale del pezzo. Le strutture di supporto possono essere generate in modalità automatica o manuale, con controllo parametrico su geometrie quali alberi, pareti o reticoli, in funzione della tecnologia di stampa impiegata. Il software integra inoltre strumenti per l'analisi termica e meccanica semplificata, utili per identificare possibili criticità legate alla generazione di stress residui o a deformazioni post-processo, offrendo un supporto decisionale nella fase di orientamento e supportatura del pezzo.

5.2 Definizione del problema

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è indagare l'uso del generative design applicato a componenti ad elevata complessità, da produrre tramite L-PBF. Inoltre, si porta avanti un confronto con una tecnica di progettazione già affermata, come l'ottimizzazione topologica. Il fine ultimo di questa ricerca è raggiungere il minor peso possibile del componente, unitamente a una riduzione significativa dei costi di produzione, comparati con quelli della parte attualmente in produzione. Il corpo della valvola PTU attualmente in uso, realizzato in alluminio AW6026-T6, pesa indicativamente $1,9\,kg$.

5.3 Fase preliminare

Il lavoro presentato all'interno di questo elaborato è iniziato con una fase di modellazione tramite CAD. In particolare, il software utilizzato è stato NX. All'interno di questa piattaforma è iniziata la semplificazione del file di partenza, realizzato dal team del CIM.

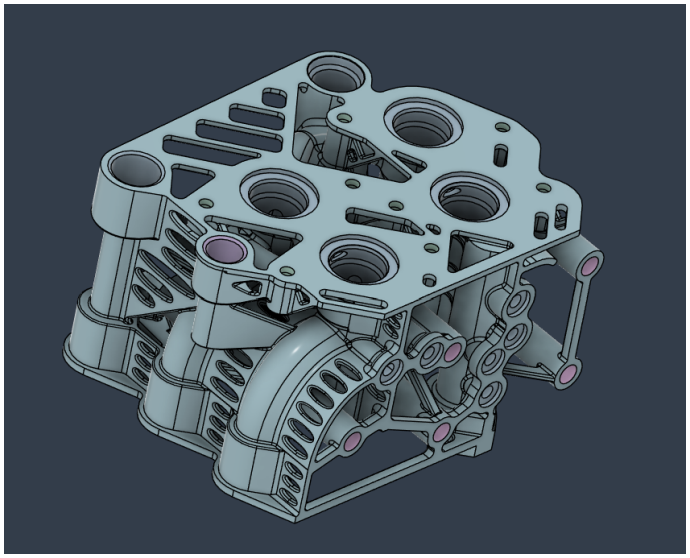


Figura 45: Blocco riprogettato dal CIM per LPBF

Durante questa fase di preparazione si sono identificate per prima cosa le zone di *non design*. In seguito si sono semplificate le geometrie del componente, eliminando le strutture di supporto del componente, tramite un importante lavoro di modellazione. Al termine di questa fase si sono ottenute le geometrie rispettivamente delle zone di non design e dei canali interni al corpo della valvola. In particolare, le zone di non design sono rappresentate da zone di accoppiamento e fissaggio. Infatti, per il montaggio di connettori e sensori sul componente, sono necessarie aree ben definite, predisposte durante la progettazione iniziale del componente. Per la parte in esame, sono previste delle flange per l'accoppiamento delle elettrovalvole e delle superfici di riscontro piane per l'inserimento di sensori e raccordi. In Fig.46 sono raffigurate le geometrie dei canali interni e delle zone di non design del componente.

In Fig.47 si nota che, in aggiunta alle zone di non design raffigurate in Fig.46, si sono aggiunte alcune aree di colore di più scuro. Tali zone rappresentano il volume interno ai canali della valvola, all'interno del quale non deve essere aggiunto materiale, il volume all'interno dei fori filettati utilizzati per il fissaggio dei componenti accessori

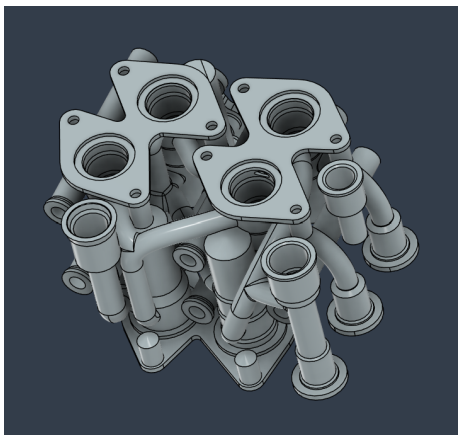


Figura 46: Zone di accoppiamento e canali interni

e il volume occupato dalle viti utilizzate per il fissaggio del componente stesso. Per le viti di fissaggio è stato necessario prevedere un'adeguata zona di non design, al fine di permettere il corretto inserimento della vite all'interno dell'alloggiamento predisposto nella valvola, e del relativo montaggio e serraggio.

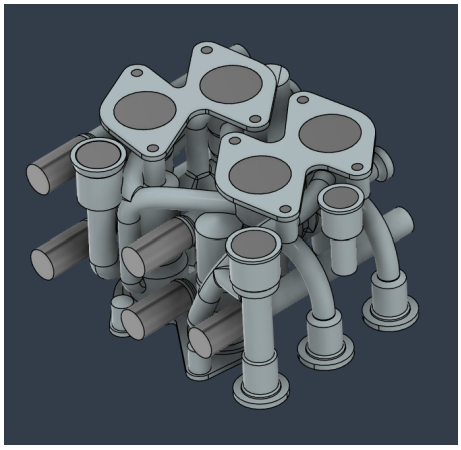


Figura 47: Zone di *non design*

5.4 Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica rappresenta una delle metodologie più efficaci per sfruttare al meglio le potenzialità della manifattura additiva. Essa consente di individuare una distribuzione ottimale del materiale all'interno di un dominio di progetto, rispettando i vincoli geometrici e funzionali, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni meccaniche e ridurre il peso complessivo del componente. Lo studio sull'ottimizzazione della valvola in esame è stato portato avanti unicamente utilizzando nTopology.

5.4.1 Preparazione modello

La preparazione del modello all'interno di nTopology inizia con l'importazione della geometria in formato *parasolid* nel programma. Il modello viene quindi convertito nel formato implicito, nativo di nTopology. Durante questa prima fase vengono

modellate e definite tutte le regioni utili per il successivo studio di ottimizzazione topologica.

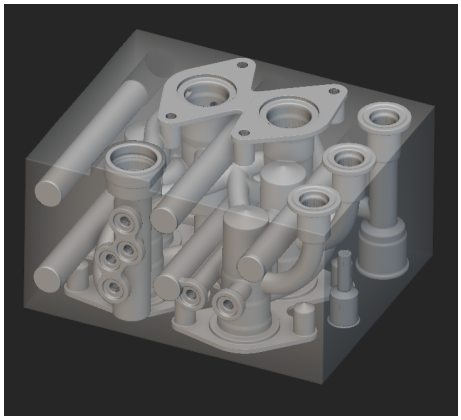


Figura 48: Modello implicito iniziale su nTopology

Durante questa fase, tramite gli strumenti di modellazione implicita all'interno del software nTopology, si sono creati una serie di corpi necessari per le successive fasi di applicazione dei carichi e analisi FEM. Particolare attenzione è stata posta nelle zone interessate dai vari collegamenti filettati del componente. In Fig.49 è rappresentato il risultato finale di questa fase.

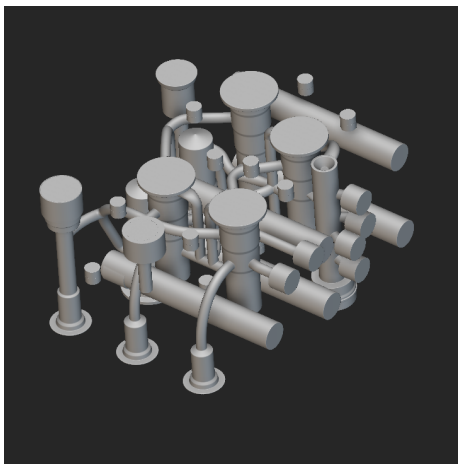


Figura 49: Modellazione corpi impliciti su nTopology

5.4.2 Definizione della condizione di carico

Le condizioni operative e di carico del componente, fondamentali per la corretta progettazione della parte, sono state fornite direttamente da Ferrari. In Tab.5.2 sono riportati i valori di pretensionamento di ogni collegamento filettato, come anche la pressione massima di esercizio a cui è sottoposta la valvola. I dati forniti, tuttavia, devono essere riconvertiti per poter essere utilizzati all'interno delle analisi strutturali portate avanti in questo elaborato. I valori delle coppie di serraggio devono essere convertiti in forze lineari per una corretta modellazione dei collegamenti filettati durante le analisi agli elementi finiti. Per il calcolo sopracitato si utilizza la seguente equazione, ricavata dalla teoria dei collegamenti filettati:

$$M = \frac{d * P * K}{1000}$$

Quantità	Descrizione	Valore
5	Viti M6 classe 8.8	9 Nm
12	Viti M4 classe 8.8	3,5 Nm
3	Sensori di pressione	35 Nm
1	Sensore di temperatura	22 Nm
1	Raccordo di interfaccia ingresso	22 Nm
1	Raccordo di interfaccia uscita	22 Nm
	Pressione massima di esercizio	75 bar

Tabella 5.2: Indicazione della condizione di carico

Dove:

- M coppia di serraggio $[Nm]$
- d diametro nominale della filettatura $[mm]$
- P precarico assiale applicato alla vite $[N]$
- K coefficente correttivo

Durante i calcoli portati avanti in questo elaborato, si è scelto un valore del coefficiente K pari a $0,2$. Tale coefficiente tiene in considerazione i fenomeni di attrito agenti sulla filettatura e sui piani di contatto tra la vite e il componente principale. Sono inclusi inoltre gli effetti dei coefficienti di forma della vite stessa. Si è scelto, inoltre, di applicare un coefficiente di sicurezza CS pari a $1,3$, corrispondente ad un aumento del valore di ogni forza di precarico del 30%.

5.4.3 Analisi statica

Definiti con chiarezza i valori delle forze agenti sul componente, si passa all'applicazione delle stesse al modello creato su nTopology. La prima operazione da effettuare in questa fase è la discretizzazione del componente. Occorre infatti creare una mesh di volume della parte, al fine di effettuare una corretta analisi. Le operazioni di realizzazione della mesh ricoprono un'importanza primaria all'interno dell'intero processo di progettazione, in quanto i parametri utilizzati influenzano direttamente i risultati finali. É quindi importante seguire un percorso ben definito e lineare. All'interno di nTopology, si definisce una variabile per il controllo della qualità della mesh. Tale variabile è la lunghezza dei lati degli elementi della mesh che compongono il modello. Si è scelto un valore di edge length pari a $1mm$, in modo da avere una mesh abbastanza fitta per la valutazione corretta delle tensioni all'interno della valvola, senza tuttavia ottenere una mesh troppo fitta e quindi estremamente pesante dal punto di vista computazionale. Si passa quindi alla creazione di una

mesh 2D, di superficie, che viene rifinita tramite il controllo di alcuni parametri, come il valore di *span angle* per il controllo della precisione della mesh lungo superfici curve e di *growth rate* che regola il rapporto di crescita tra elementi adiacenti. Si è scelta una mesh di tipo triangolare, rispetto ad una di tipo quadrangolare, per la maggiore adattabilità della mesh triangolare a geometrie complesse e per la maggiore robustezza computazionale. Una volta realizzata la mesh 2D voluta, si passa alla realizzazione della mesh 3D, di tipo volumetrico, necessaria per l'analisi agli elementi finiti. In Fig.50 è riportato il flusso di lavoro per l'operazione di creazione della mesh con, a fianco, il relativo risultato.

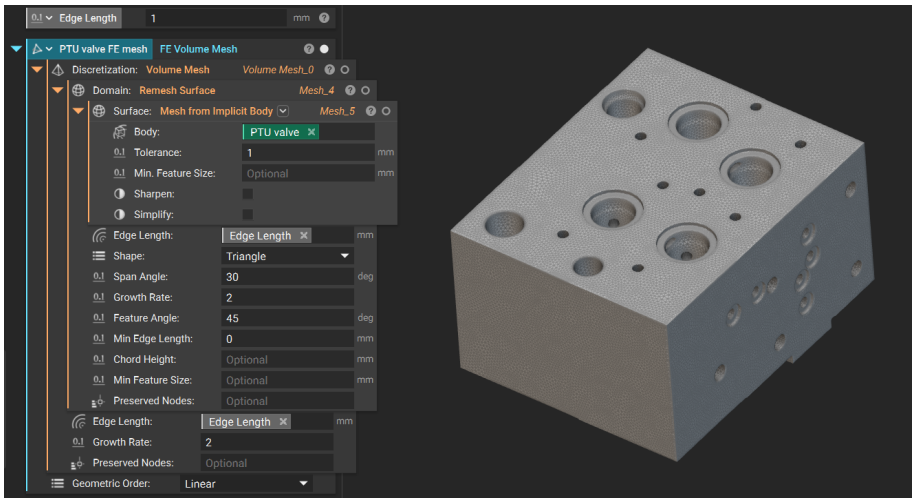


Figura 50: Operazione di realizzazione della mesh

Ottenuta la mesh voluta, si passa alla definizione delle aree di applicazione dei carichi e dei vincoli. In particolare, durante questa fase, è necessario indicare con precisione i nodi o le facce a cui applicare le forze definite in precedenza. Tramite gli strumenti all'interno di nTopology, si possono facilmente identificare le zone di applicazione dei carichi, come ad esempio tramite le operazioni *flood fill* e *boundary by body*. Definiti i nodi e le facce corrispondenti, si passa quindi all'applicazione delle forze ai rispettivi boundary. In Fig.51 si possono notare i vettori corrispondenti alle forze applicate al componente.

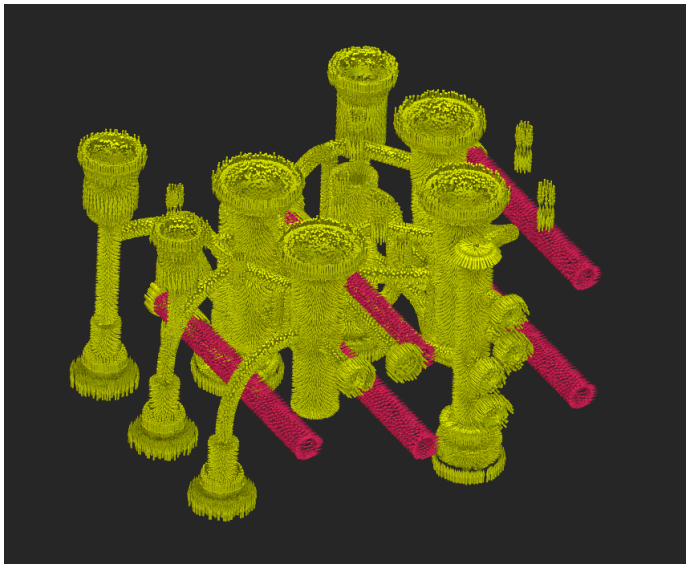


Figura 51: Condizione di carico

I vettori in giallo rappresentano i carichi applicati, mentre quelli raffigurati in rosso indicano i nodi relativi ai vincoli. In particolare, si sono modellati i carichi relativi alla forza peso delle elettrovalvole, come carichi remoti.Si è optato per una modellazione di questo tipo a causa dello sviluppo del corpo delle elettrovalvole stesse al di fuori del blocchetto principale della valvola. Si è quindi creato un punto, allineato con l'asse di assialsimmetria delle valvole, ad una distanza pari a $100mm$ dalla superficie del corpo della valvola PTU. Tale punto è stato poi collegato ai nodi di riferimento sulla superficie della parte tramite connettori rigidi, del tipo RBE2. Infine, si è applicata la forza considerata al nodo creato. Dai dati forniti da Ferrari e dai precedenti lavori eseguiti dal CIM, la forza relativa al peso delle elettrovalvole è stata valutata pari a $150N$, allineata con la direzione $z-$ del sistema di riferimento usato. Inoltre, durante questa prima fase, per la simulazione dei collegamenti filettati si è modellata una porzione dell'intero collegamento filettato. La forza relativa al pretensionamento è stata simulata tramite l'applicazione di due forze uguali in modulo e direzione, ma opposte in verso, applicate ai nodi di due zone adiacenti del collegamento filettato. In questo modo si è potuto valutare lo stress risultante sul corpo della valvola. La Fig.52 rappresenta un ingrandimento di un collegamento filettato modellato con il metodo descritto sopra.

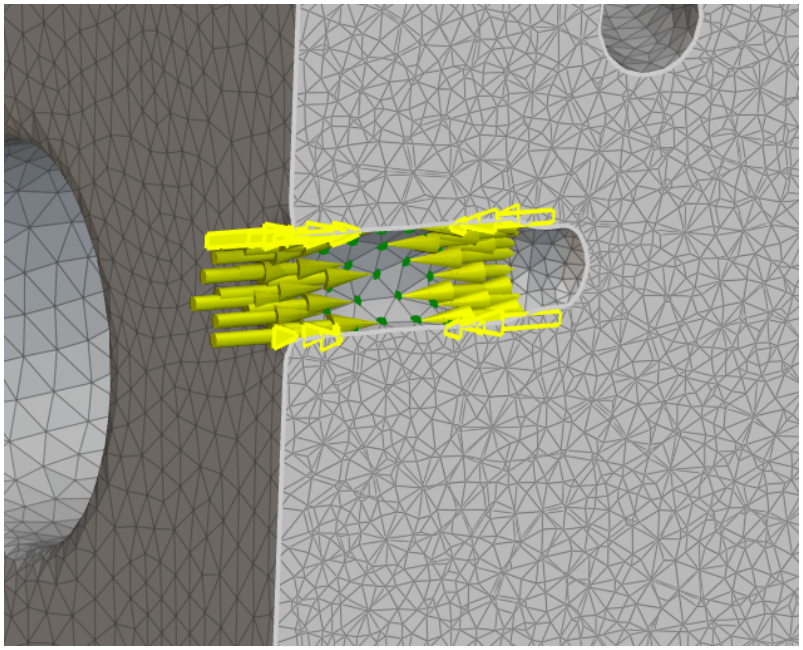


Figura 52: Modellazione pretensionamento

Si possono notare in giallo i vettori relativi alle forze di pretensionamento e in verde i nodi a cui esse sono applicate. Terminata la fase di definizione dei carichi e dei vincoli, si effettua un'analisi statica preliminare, a valle dell'ottimizzazione topologica. Attraverso l'analisi strutturale si possono verificare le tensioni all'interno del componente originale e, quindi, determinare la correttezza dell'applicazione delle forze. La valutazione dei risultati permette inoltre di verificare la qualità della mesh creata in precedenza, osservando eventuali criticità nell'andamento delle tensioni o delle deformazioni. Per effettuare l'analisi statica preliminare, si è assegnato il materiale scelto per la fase produttiva tramite L-PBF. Tra i materiali processabili tramite questa tecnologia, la lega di alluminio *AlSi10Mg* risulta essere la scelta migliore. Tale materiale unisce infatti buona resistenza meccanica a bassa densità, ideale per la realizzazione di componenti strutturali leggeri. Inoltre, la lega *AlSi10Mg*

risulta relativamente economica, nell'ambito delle polveri metalliche per additive manufacturing, e facilmente processabile tramite Laser Powder Bed Fusion. Presso la linea pilota di additive manufacturing del CIM, per la realizzazione di componenti in *AlSi10Mg* viene utilizzata principalmente la macchina EOS M 400-4, che utilizza polvere metallica fornita dal produttore stesso della stampante. Si è quindi fatto riferimento al datasheet fornito da EOS per le proprietà meccaniche del materiale [60]. In Tab.5.3 e in Fig.53 sono riportate le proprietà meccaniche di interesse, relative ad uno spessore di layer pari a $30\mu m$.

Orientazione	**Tensione di snervamento Rp0.2 [MPa]**	**Resistenza a rottura Rm [MPa]**
Verticale	230	460
Orizzontale	270	450

Tabella 5.3: Proprietà meccaniche $AlSi10Mg$ as build [60]

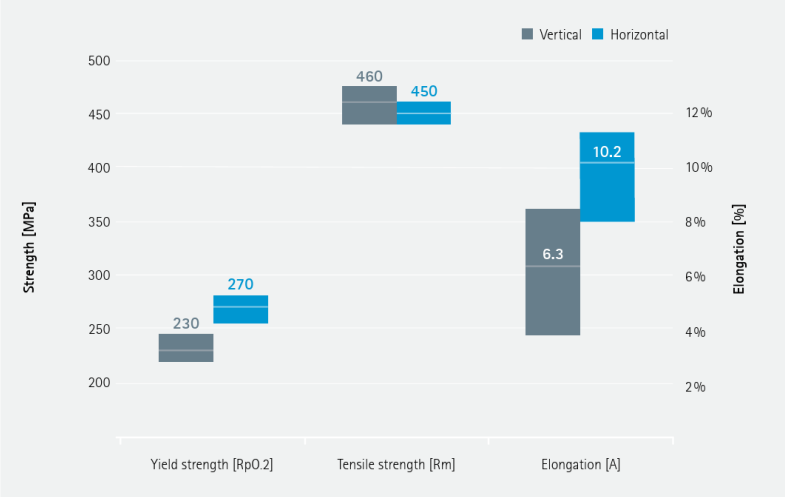


Figura 53: Risultati test su provini in $AlSi10Mg$ [60]

Si riportano in Tab.5.4 inoltre i valori della tensione di snervamento e di resistenza a rottura anche nel caso di trattamento termico, sempre riferiti ad un'altezza del layer pari a $30\mu m$. In particolare, EOS prevede un trattamento termico di tipo T6, ovvero un trattamento di solubilizzazione seguito da un invecchiamento artificiale. A seguito del trattamento termico si ottiene una riduzione delle tensioni residue all'interno del componente, insieme a un'omogeneizzazione delle proprietà meccaniche.

Orientazione	**Tensione di snervamento Rp0.2[MPa]**	**Resistenza a trazione Rm [MPa]**
Verticale	250	310
Orizzontale	260	320

Tabella 5.4: Proprietà meccaniche $AlSi10Mg$ trattato termicamente T6 [60]

Si riporta infine, in Fig.54, il risultato dell'analisi statica preliminare sul corpo della valvola.

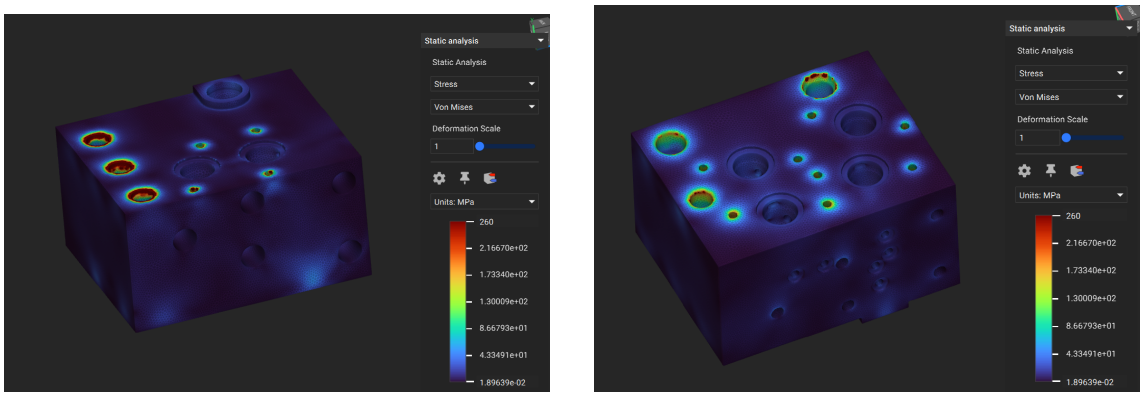


Figura 54: Risultati analisi statica preliminare

Osservando i risultati riportati, si nota come le aree interessate dai collegamenti filettati siano critiche per il componente, mentre le altre forze agenti sul componente non presentano particolari criticità. Si può inoltre verificare la corretta applicazione dei carichi e dei vincoli, unitamente alla bontà della mesh creata. Analizzando i risultati ottenuti, infatti, non si notano discontinuità o disomogeneità all'interno della parte.

5.4.4 Ottimizzazione topologica

Terminato lo studio dei risultati dell'analisi strutturale preliminare, si passa alla preparazione dell'ottimizzazione topologica del componente. Tramite il tool interno a nTopology, si impostano i vincoli e gli obiettivi dell'ottimizzazione topologica. Per questa fase, si sono effettuati due studi separati, con direzioni di crescita durante il processo di produzione tramite L-PBF differenti. Il primo è stato effettuato con la direzione di crescita del pezzo concorde con la direzione $z-$ del sistema di riferimento del componente, mentre il secondo è stato condotto con riferimento alla direzione $x-$. In Fig.55 è riportato il blocco utilizzato per lo studio di ottimizzazione lungo la direzione $z-$.

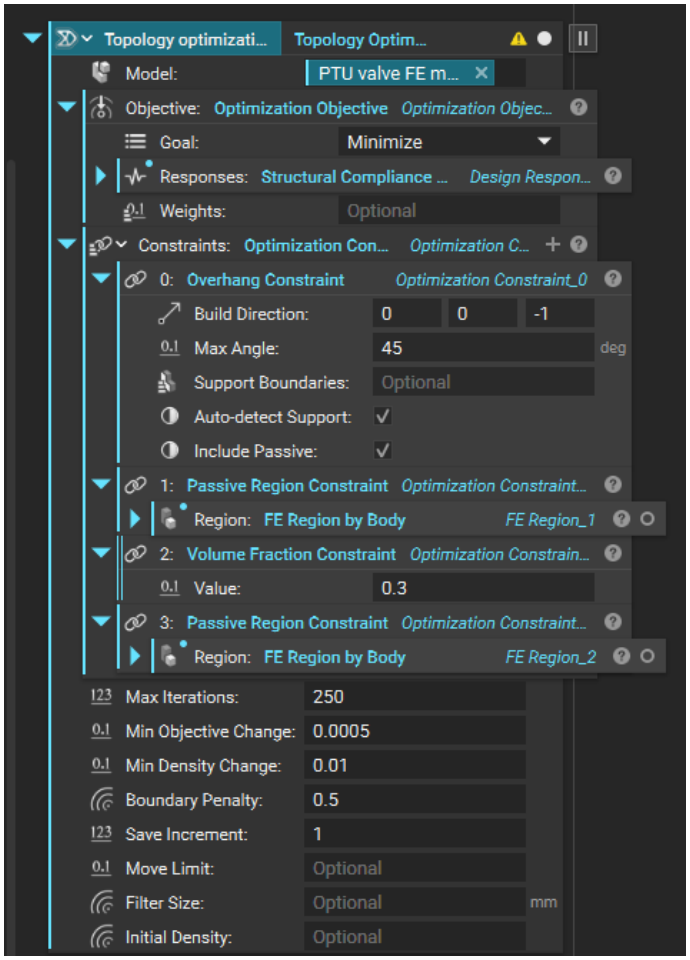


Figura 55: Blocco di ottimizzazione topologica lungo $z-$

Per la corretta compilazione del blocco è necessario inserire, per prima cosa, il modello agli elementi finiti riferito al componente iniziale, definito in precedenza. Si definisce quindi l'obiettivo, in questo caso la minimizzazione della compliance strutturale, in quanto permette di ottenere risultati migliori rispetto all'imposizione di altri obiettivi, come ad esempio la minimizzazione della massa. Si inserisce quindi l'intero load case definito in precedenza per l'analisi statica e si passa alla definizione dei vincoli da applicare allo studio. Nel caso in esame si sono inseriti 4 vincoli differenti:

- Direzione di costruzione
- Angolo di overhang

- Regioni di non design
- Frazione volumetrica target

La direzione di costruzione indica la direzione lungo la quale il pezzo viene realizzato in macchina. In questo primo caso si è scelto la direzione $z-$, in quanto, ad un'analisi preliminare sembrava presentare alcuni vantaggi, tra i quali la minimizzazione dell'impronta del componente sulla piattaforma di stampa, con un conseguente aumento delle parti prodotte per singolo ciclo di lavoro. L'angolo di overhang rappresenta l'angolo minimo che una superficie può formare con il piano orizzontale senza richiedere strutture di supporto. Si è impostato tale valore di soglia a 45. Tuttavia, grazie ai parametri sviluppati internamente al CIM specificatamente per la lega $AlSi10Mg$, tale valore può essere portato fino a 30. La diminuzione dell'angolo limite di autosupporto può portare ad un peggioramento significativo della qualità superficiale e dell'accuratezza dimensionale locale, motivo per cui si è comunque scelto di mantenere l'angolo di overhang a 45. All'interno dei vincoli, si sono definite anche delle aree di non design, ovvero zone del componente da escludere dalla rimozione di materiale durante il processo di ottimizzazione topologica. Tali aree sono definite dalle zone di accoppiamento ai vari sensori, elettrovalvole e viti di fissaggio. Infine, è stato inserito un vincolo sulla frazione volumetrica del componente. Questo valore permette di controllare la riduzione volumetrica della parte durante il processo di ottimizzazione topologica, e, conseguentemente, la riduzione della massa del corpo stesso. Si sono effettuate numerose simulazioni variando tale valore, arrivando ad ottenere i risultati migliori con un valore target di frazione volumetrica pari a 0.3. Ultimata la fase di inserimento dei vincoli, si procede all'inserimento di alcuni valori necessari per il controllo computazionale del processo iterativo, come il numero massimo di iterazioni, fissato a 250 per evitare simulazioni eccessivamente costose in termini temporali e il valore minimo di scostamento della funzione obiettivo, necessario per determinare la corretta convergenza del processo. Il risultato finale così ottenuto, è riportato in Fig.56. Dall'analisi dei risultati ottenuti si può notare che tutti i vincoli sono stati

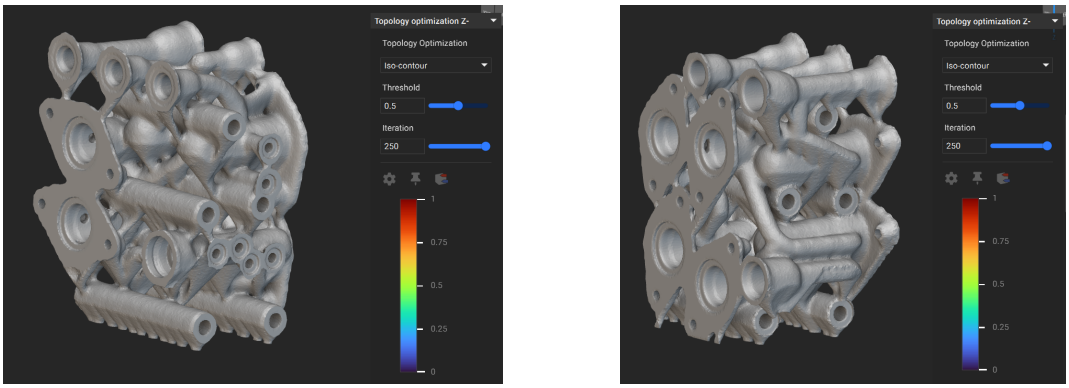


Figura 56: Risultati ottimizzazione topologica con direzione di crescita lungo $z-$

rispettati, in particolare quelli riguardanti il processo produttivo, come la direzione di crescita e l'angolo limite di autosupporto. Il componente così generato presenta una struttura fortemente alleggerita e in buona parte autosupportante, adatta alla produzione tramite L-PBF.

Si è quindi portato avanti un ulteriore studio di ottimizzazione topologica, variando la direzione di crescita del componente, facendola coincidere con la direzione $x-$ del sistema di riferimento usato nella parte. L'impostazione dell'ottimizzazione topologica è invariata rispetto allo studio precedente. Anche in questo caso si sono effettuate

numerose simulazioni al fine di ottenere i risultati migliori possibili. In Fig.57 è raffigurato il risultato del secondo studio di ottimizzazione topologica. Analizzando

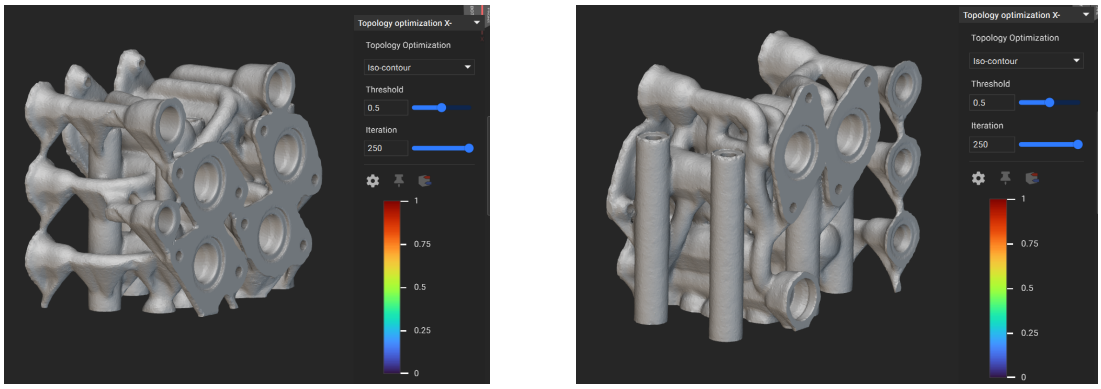


Figura 57: Risultati ottimizzazione topologica con direzione di crescita lungo $x-$

il risultato ottenuto, si nota come la scelta della direzione di crescita della parte influenzi la distribuzione di materiale all'interno del dominio solido da ottimizzare. In particolare, l'ottimizzazione topologica eseguita con direzione di crescita lungo $x-$, ha prodotto una morfologia meno compatta, caratterizzata da un numero minore di elementi strutturali di supporto alla struttura principale, composta dai canali interni e dagli alloggiamenti per la sensoristica e le elettrovalvole. Il modello così ottenuto risulta quindi più adatto a soddisfare le richieste di leggerezza ricevute da Ferrari, oltre ad essere, al contempo, più adatto alla produzione tramite L-PBF. Studiando quindi i risultati ottenuti tramite le due ottimizzazioni topologiche effettuate, si è deciso di portare avanti la validazione e il refinement del modello più promettente, ovvero quello con direzione di crescita lungo $x-$.

5.4.5 Valutazione design e refinement

Una volta scelto il risultato migliore delle ottimizzazioni topologiche effettuate, si passa alla validazione del modello così ottenuto. All'interno di nTopology, si può lavorare direttamente sul risultato di un'ottimizzazione topologica. Infatti, il risultato può essere convertito in un corpo implicito, su cui è possibile svolgere ogni tipo di operazione. Il primo step nel processo di validazione è la verifica della frequenza naturale del componente. Tra le richieste di Ferrari, vi è infatti un vincolo su tale valore. Al fine di evitare pericolosi fenomeni di risonanza e vibrazioni dannose per il sistema, la valvola PTU deve avere una frequenza naturale superiore a $1400Hz$. L'analisi modale permette di determinare le frequenze naturali e le forme modali di una struttura, ovvero i modi propri di vibrazione associati a ciascuna frequenza naturale, indicando i vincoli a cui è sottoposta la stessa struttura e il materiale di cui è composta. Si basa sulla soluzione dell'equazione del moto in assenza di forzanti e smorzamento:

$$[m]\{\ddot{q}\} + [k]\{q\} = 0$$

Cercando soluzioni del tipo $\{q\} = \{\phi\}e^{jwt}$, si ottiene l'equazione:

$$([k] - w^2[m])\{\phi\} = 0$$

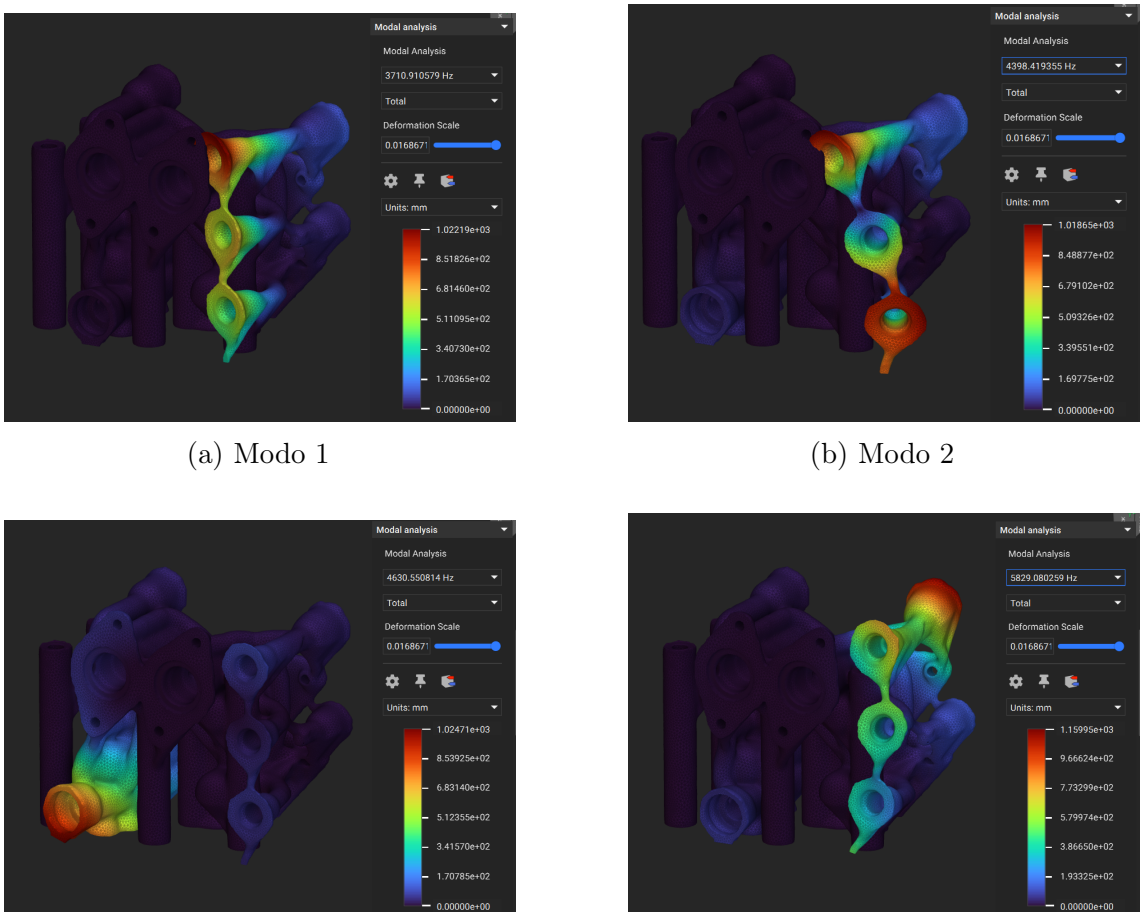
Dove:

- $[m]$: matrice di massa
- $[k]$: matrice di rigidezza
- q: sistema di coordinate fisiche
- w : pulsazione naturale $[rad/s]$
- $\{\phi\}$: vettore modale

Una volta verificata la corretta applicazione dei vincoli e i parametri corretti della lega $AlSi10Mg$, si è effettuata l'analisi modale ricercando i primi 6 modi propri di vibrazione del componente. Non si sono indagati ulteriori modi e, di conseguenza, frequenze naturali, in quanto già il primo modo di vibrare è associato ad una frequenza propria decisamente superiore a quella di soglia. Le frequenze naturali successive alla prima sono per definizione crescenti, quindi il calcolo di ulteriori frequenze e modi di vibrare non è stato ritenuto necessario. In Tab.5.5 si riportano i valori delle frequenze naturali ottenuti dall'analisi condotta, mentre in Fig.58 sono raffigurati i primi modi di vibrare.

Modo	Frequenza naturale [Hz]
1	3710,91
2	4398,42
3	4630,55
4	5829,08
5	6503,77
6	6861,23

Tabella 5.5: Risultati analisi modale: frequenze naturali



(a) Modo 1

(b) Modo 2

(c) Modo 3

(d) Modo 4

Figura 58: Confronto tra i primi 4 modi di vibrare

Dopo aver valutato positivamente i risultati dell'analisi modale, si passa alla verifica strutturale del componente ottimizzato topologicamente. Si procede quindi con un'analisi statica, applicando gli stessi carichi e vincoli utilizzati nei passaggi precedenti. Tuttavia, essendo cambiata radicalmente la geometria, occorre rimodellare le zone di applicazione delle forze. Si procede nuovamente alla creazione di una mesh volumetrica seguendo il flusso di lavoro usato per l'analisi preliminare. Terminate queste fasi, si verifica la corretta applicazione delle forze ai relativi nodi, per procedere

infine con il lancio dell'analisi statica. In Fig.59 sono riportati i risultati dell'analisi strutturale di validazione del componente ottimizzato. Analizzando i risultati dell'a-

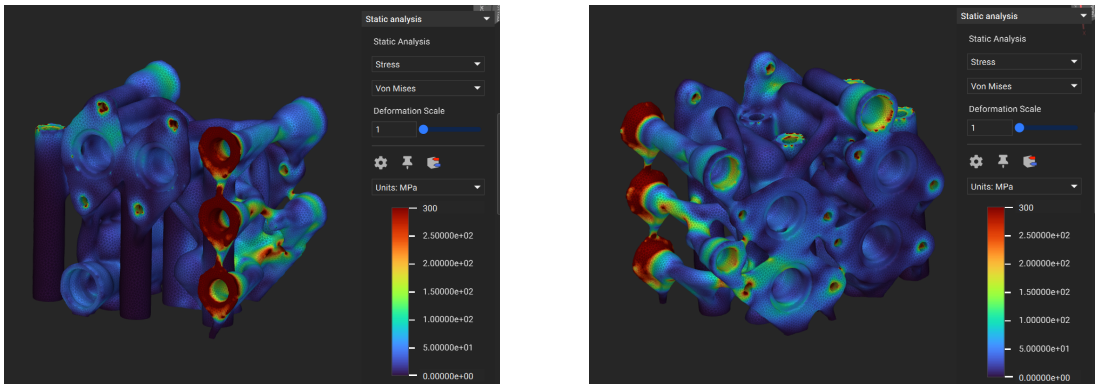


Figura 59: Analisi strutturale di validazione del componente ottimizzato

nalisi strutturale, si nota la presenza di diverse zone critiche. In particolare, tutti i collegamenti filettati presentano valori di stress che superano localmente la tensione di snervamento della lega $AlSi10Mg$. Le superfici di collegamento con i sensori di pressione risultano essere le zone più problematiche del componente ottimizzato. Si può inoltre notare una zona di accumulo delle tensioni in prossimità di un raccordo tra i canali interni della valvola. Per la risoluzione del problema, si analizza in prima battuta la problematica dei collegamenti filettati. Occorre verificare la validità del modello utilizzato per simulare tali collegamenti. Tramite gli ingegneri del CIM si è portato avanti uno studio per raggiungere la formulazione di un modello per consentire la corretta simulazione dei carichi associati al pretensionamento delle viti all'interno di nTopology. Il punto di partenza dello studio è stata la simulazione di un collegamento filettato tramite il software Ansys. All'interno di questo programma, infatti, vi è uno strumento che permette la corretta simulazione del precarico nei collegamenti filettati. Il pretensionamento viene modellato separando la vite in due sezioni, come raffigurato in Fig.60.

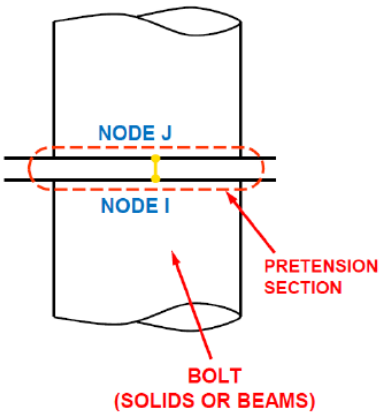


Figura 60: Modellazione del pretensionamento di viti all'interno di Ansys [61]

Le due sezioni della vite vengono collegate da un connettore in modo matematico, tramite equazioni che ne definiscono lo stato di tensione. Specificando il valore di pretensionamento, il risolutore del software calcola la deformazione associata alla forza così assegnata, partendo dai dati geometrici e del materiale della vite, attraverso un processo iterativo, fino a convergenza del valore di forza calcolato con quello

immesso dall'utente come input. Calcolata quindi la deformazione associata al valore di precarico, Ansys genera un campo di tensioni assiali all'interno della vite, che permette di calcolare le tensioni generate dal pretensionamento della vite sugli altri componenti del collegamento filettato [61]. Si è quindi preparato un blocchetto di prova per la simulazione degli effetti del precarico. Il componente di prova è semplicemente composto da un blocco avente misure $200mm$x$50mm$x$50mm$, con un foro filettato per una vite $M14$, a cui è applicata una forza di pretensionamento pari a $23500N$. La prima simulazione è stata effettuata su Ansys, al fine di ottenere dei valori target di stress per le successive simulazioni, portate avanti tramite nTopology. In Fig.61 si riportano i dati dello studio effettuato tramite il tool *bolt pretension* di Ansys.

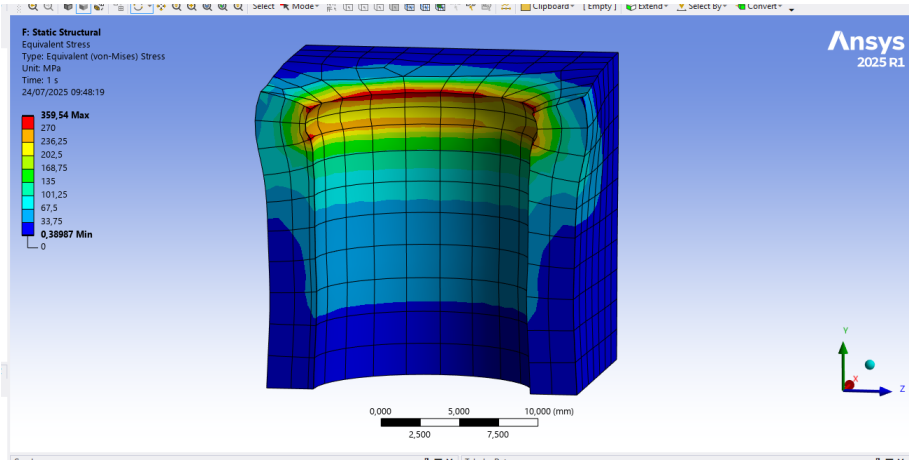


Figura 61: Simulazione del pretensionamento all'interno di Ansys

Passando quindi a nTopology, si sono effettuati diversi test con il fine di individuare un modello affidabile per la simulazione degli effetti del pretensionamento dei collegamenti filettati. Il primo modello realizzato per la simulazione del precarico è basato sull'applicazione di due forze uguali in modulo e direzione, ma opposte in verso. Tali forze vengono applicate direttamente ai nodi del blocchetto, considerando due sezioni adiacenti. La distribuzione delle forze non avviene lungo l'intera lunghezza del collegamento filettato, bensì lungo una porzione ristretta dello stesso. Dalla teoria dei collegamenti filettati, infatti, i primi filetti di un collegamento sono quelli su cui viene distribuita la maggior parte del carico applicato. Nel modello formulato, si è scelta un'altezza della sezione per l'applicazione del carico pari a $4mm$ per parte. Analizzando il risultato ottenuto, si nota come la distribuzione delle

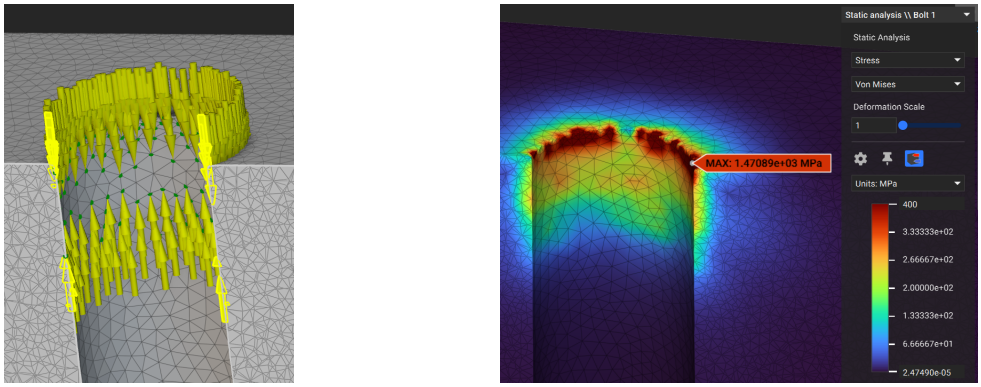


Figura 62: Modellazione pretensionamento su nTopology: test 1

tensioni all'interno del blocchetto sia coerente e comparabile con i risultati ottenuti tramite Ansys. Tuttavia, i valori di stress all'interno del componente risultano essere decisamente più elevati rispetto ai valori di target individuati. La tensione massima raggiunta arriva a $1471MPa$, inoltre la tensione supera abbondantemente la soglia di $400MPa$ in svariate zone del componente. Si passa quindi, allo sviluppo di un nuovo modello. Per il secondo test, si prende in considerazione anche la presenza della vite. Si è modellato, quindi, anche il bullone $M14$ coinvolto nel collegamento filettato, assegnando le corrette caratteristiche geometriche e del materiale. La vite considerata è un bullone in acciaio di classe 8.8, corrispondente, quindi, a un valore di tensione di rottura Rm pari a $800MPa$ e una tensione di snervamento $Rp0.2$ pari a $640MPa$. La forza assiale risultante dal precarico previsto è stata applicata sulla testa della vite. Si è poi definito un vincolo di contatto strutturale di tipo *bonded* tra la vite e il componente. Tale collegamento elimina la possibilità di spostamento relativo tra le parti indicate sia lungo la direzione normale che tangenziale. In questo modo, la forza applicata sulla vite viene direttamente trasmessa e scaricata sul foro filettato. In Fig.63 si riporta la schematizzazione del modello e i risultati ottenuti.

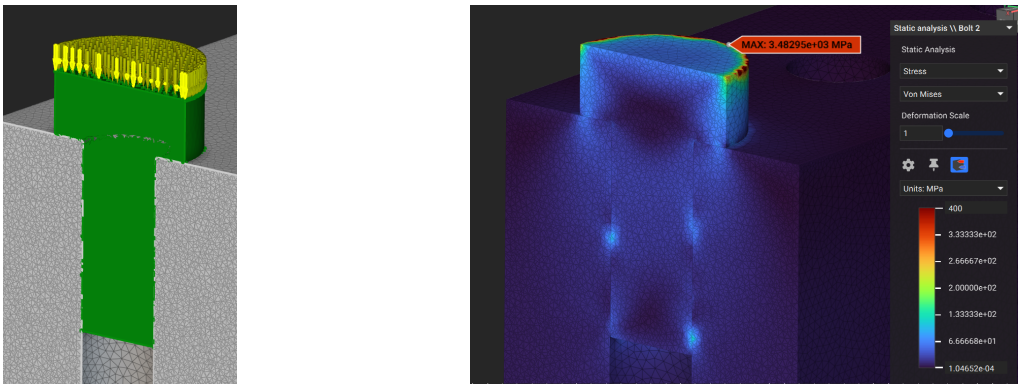


Figura 63: Modellazione pretensionamento su nTopology: test 2

Osservando i risultati ottenuti si nota che la simulazione condotta utilizzando questo modello è lontana dall'obiettivo. L'andamento delle tensioni all'interno sia della vite che del blocchetto, non segue quello della simulazione effettuata tramite Ansys. Anche i valori stessi della tensione sono lontani dai valori di target, in questo caso risultando inferiori. Le criticità di questo modello sono l'errata applicazione della forza normale, che, in questo caso, viene scaricata non solo su una parte del collegamento filettato, ma anche all'interfaccia tra la testa della vite e la superficie di appoggio del blocchetto. Inoltre, l'applicazione di una tipologia di contatto strutturale di tipo *bonded* lungo l'intera lunghezza della filettatura della vite, porta ad una distribuzione delle forze di carico attraverso un'area di contatto maggiore rispetto a quella che si ha nel caso reale. I valori di tensione ottenuti risultano quindi sottostimati e non idonei ad un calcolo strutturale di questo tipo. Si sviluppa quindi un ulteriore modello. Per la simulazione del terzo test, si prendono in considerazione due sezioni separate della vite, facendo sempre riferimento alla geometria e alle caratteristiche meccaniche di un bullone in acciaio $M14$ di classe 8.8. Come nel primo test, si considera un'altezza della singola sezione pari a $4mm$. Tra le sezioni della vite e le pareti del foro filettato del blocchetto, viene applicato un contatto strutturale di tipo *bonded*. Si collegano quindi i nodi delle facce interne delle sezioni della vite a un punto posto al centro delle stesse tramite connettori rigidi del tipo RBE2. Una volta individuati tali punti, viene applicato un connettore di tipo *spring*. Questo particolare tipo di connettore simula il comportamento elastico di una molla,

calcolandone la forza attraverso la formula:

$$F = k * (u_1 - u_2)$$

Dove:

- F: forza relativa alla molla
- k: rigidezza della molla equivalente
- u_1: spostamento del nodo 1 all'estremo 1 della molla
- u_2: spostamento del nodo 2 all'estremo 2 della molla

Facendo riferimento alla vite presa in esame, si è calcolato un valore di rigidezza equivalente k pari a $1 * 10^6\ N/mm$. In Fig.64 è rappresentato il setup del modello e i risultati così ottenuti. Analizzando i risultati della simulazione, si nota come

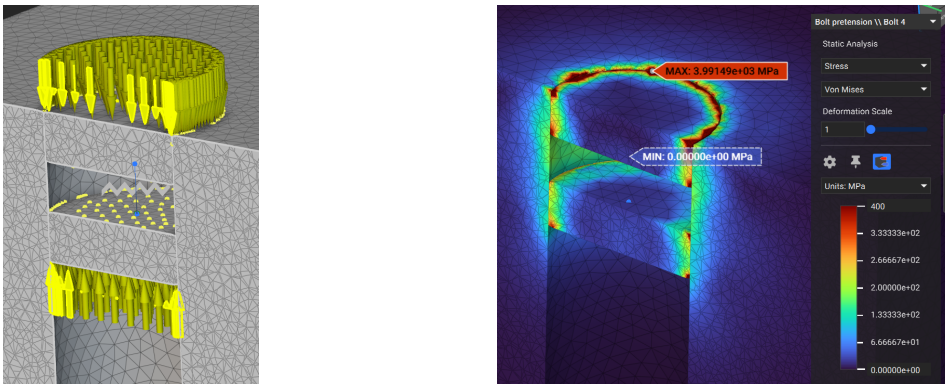


Figura 64: Modellazione pretensionamento su nTopology: test 3

le zone critiche, con stress elevati siano appartenenti alle sezioni della vite. Sulla sezione superiore la tensione raggiunge localmente valori importanti. Sulle pareti del foro filettato, tuttavia, le tensioni sono più contenute, e la media dei valori della tensione non supera $400 MPa$. Anche l'andamento delle tensioni e delle deformazioni all'interno della vite e del blochetto risultano coerenti con la tipologia di carichi e vincoli applicati, e in linea con i valori ottenuti tramite le simulazioni effettuate utilizzando Ansys. Infine, si è condotta un'ulteriore analisi basandosi sul modello testato precedentemente e aggiungendo l'influenza dell'appoggio della testa della vite sul componente. Si sono quindi modellate due sezioni trasversali della vite, una in corrispondenza della testa e una nel gambo. In corrispondenza dell'area di contatto tra la testa della vite e la parte, è stata definita una relazione di contatto del tipo *no separation*. Tale relazione impedisce il moto relativo tra le parti lungo la direzione normale, mentre lo permette nella direzione tangenziale. Tra la sezione del gambo e le pareti del foro filettato del componente si è utilizzata una relazione di tipo *bonded*, come nel test precedente. In analogia con la simulazione riportata in precedenza, si sono uniti i nodi delle facce interne delle sezioni della vite tramite connettori rigidi del tipo RBE2, identificando così due punti posti sulle facce stesse, lungo l'asse di assialsimmetria della vite. Tali punti sono stati identificati da un connettore di tipo *spring*, utilizzando i medesimi parametri del terzo test. La forza agente sulla sezione superiore è stata applicata sulla faccia più interna, agente su un'area pari a quella della sezione trasversale del gambo della vite. Il modello utilizzato o i risultati ottenuti sono riportati in Fig.65.

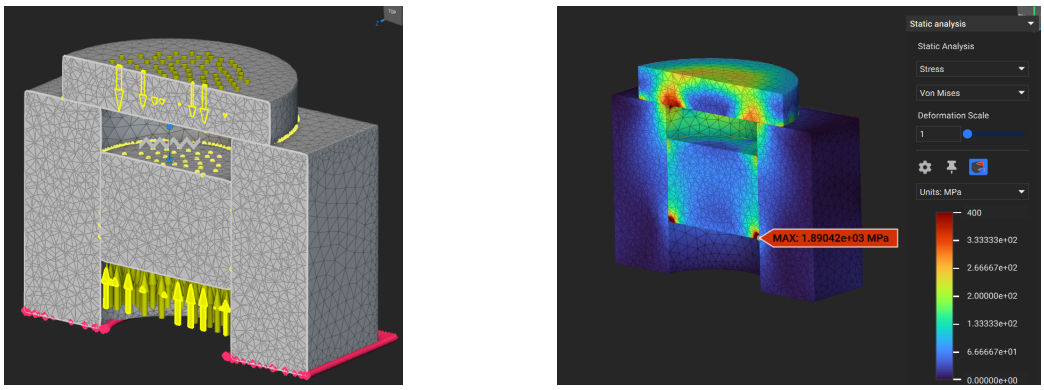


Figura 65: Modellazione pretensionamento su nTopology: test 4

Come nel caso precedente, la tensione massima si raggiunge all'interno delle sezioni della vite, con alcuni picchi di stress piuttosto elevati. Tuttavia, l'andamento delle tensioni sia all'interno della vite che del componente è corretto e rispecchia il lead case applicato. Valutando la media dei valori delle tensioni registrate sul componente, si ottengono valori simili a quelli ottenuti con il modello adottato per il test precedente e con la simulazione tramite lo strumento *bolt pretension* in Ansys. Modellando gli effetti dovuti alla testa della vite, si ottengono valori di tensione leggermente inferiori rispetto a quelli ottenuti con il test 3. Tale conclusione risulta logicamente e matematicamente corretta, considerando la maggiore superficie di contatto tra la vite stessa e il componente.

Di seguito, in Tab.5.6 si riportano i risultati ottenuti dai modelli individuati per la simulazione del pretensionamento nei collegamenti filettati.

Software	**Modello**	**Tensione massima [MPa]**
Ansys	*bolt pretension*	359,54
nTopology	Test 1	1471
nTopology	Test 2	128
nTopology	Test 3	377,4
nTopology	Test 3	362,8

Tabella 5.6: Risultati simulazioni pretensionamento

Analizzando quindi i risultati ottenuti dalle numerose simulazioni effettuate tramite i diversi modelli di calcolo per i collegamenti filettati, si è identificato nel modello usato per il test 4, la soluzione migliore per una corretta analisi strutturale. Si è quindi applicato il modello 4 sviluppato precedentemente ai collegamenti filettati più critici del componente ottimizzato, evidenziati dalla prima analisi strutturale di verifica della valvola. In particolare, si è svolto un importante lavoro di modellazione per la preparazione della simulazione corretta dei collegamenti filettati relativi ai tre sensori di pressione. I collegamenti filettati relativi al collegamento delle elettrovalvole presentano alcune singole zone critiche, tuttavia non si sono effettuate modifiche alla modellazione dei collegamenti stessi, in quanto non rappresentano un problema all'integrità strutturale del componente. Si registrano, infatti, tensioni elevate in un numero limitato di triangoli della mesh in corrispondenza della radice del filetto e del

bordo di contatto. Tali fenomeni sono quindi riconducibili a singolarità numeriche dovute alla semplificazione del collegamento filettato. La tensione mediata lungo le pareti del componente interessate dal collegamento rimane inferiore al limite di snervamento del materiale, considerando anche il relativo coefficiente di sicurezza. Per ogni sensore si sono quindi modellate due differenti sezioni solide. Una in corrispondenza dell'appoggio della base del sensore stesso sul componente e l'altra in corrispondenza della sezione filettata di quest'ultimo. Procedendo con la preparazione del modello, dopo aver creato la mesh corrispondente agli elementi realizzati, si sono creati i punti per la connessione del connettore di tipo *spring* tra le sezioni. Tali punti sono collegati alle superfici interne delle sezioni modellate tramite connettori rigidi di tipo RBE2. I parametri caratterizzanti il connettore *spring* sono gli stessi utilizzati nei test precedenti, ovvero una rigidezza equivalente pari a $1 * 10^6\, N/mm$. Tale valore di rigidezza è stato calcolato utilizzando la formula:

$$k = \frac{A * E}{l_{eff}}$$

Dove:

- A_s: area della sezione resistente del filetto mm^2
- E: modulo elastico $[N/mm^2]$
- l_{eff}: lunghezza efficace del gambo della vite mm

Utilizzando i dati da normativa UNI EN ISO 898-1, per una vite in acciaio di classe 8.8 si considerano i seguenti dati [62]:

- $A_s = 115\, mm^2$
- $E = 210\, GPa\ = 210000\, N/mm^2$

Al fine di ottimizzare i risultati della simulazione, si è affinato il processo di creazione della mesh. In particolare, si è scelto di utilizzare una mesh più fitta per gli elementi del modello del collegamento filettato. come raffigurato in Fig.66.

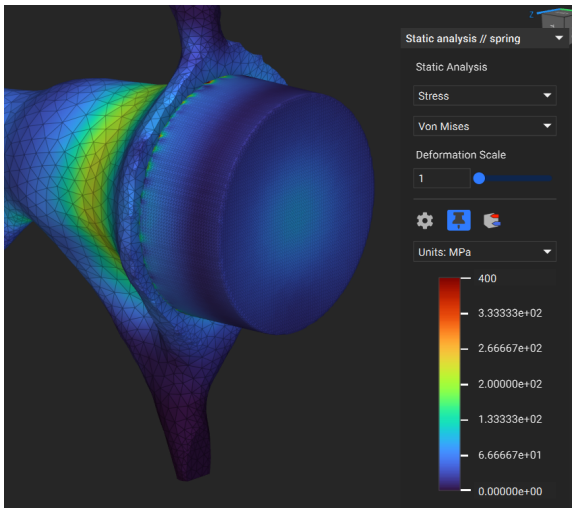


Figura 66: Affinamento della mesh nella zona del collegamento filettato

Dopo aver risolto le criticità relative ai collegamenti filettati, si passa alla rimodellazione delle aree in cui si è registrato un valore di tensione eccessivo. In Fig.67 sono evidenziate le zone critiche su cui occorre intervenire. Tramite gli strumenti di

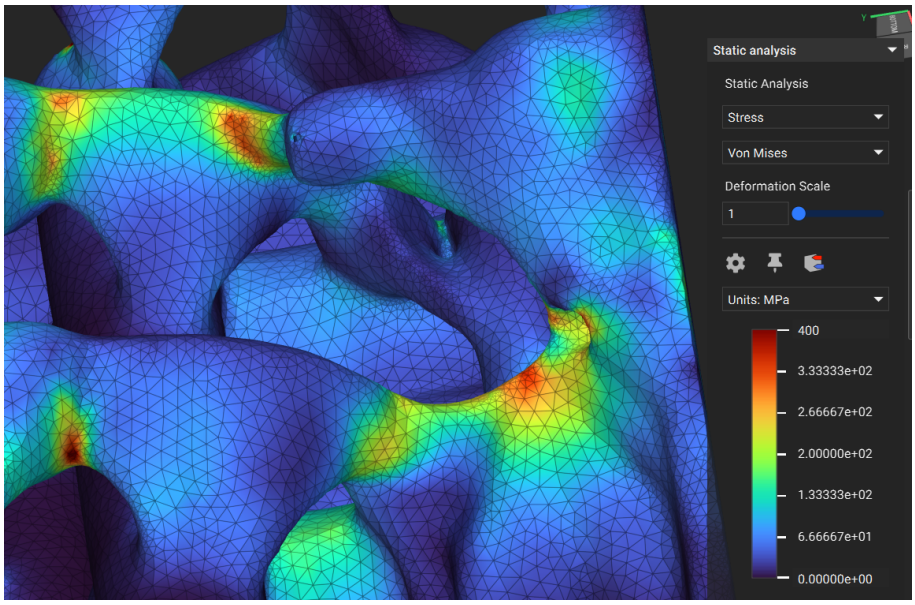


Figura 67: Zone critiche del componente ottimizzato

modellazione implicita all'interno di nTopology, le zone critiche sono state modificate mediante la creazione di corpi dalle geometrie elementari, uniti al componente ottimizzato tramite operazioni booleane. Grazie al controllo dei parametri dei blocchi di unione booleana e dei corpi impliciti, si è ottenuta una struttura rinforzata nei punti critici, perfettamente armonizzata con il corpo di partenza. All'interno di questa fase del processo di design si sono svolte alcune operazioni di rifinitura del modello. In particolare, tramite, nuovamente, delle operazioni booleane, si sono eliminate alcune sporgenze e imperfezioni derivanti dal processo di ottimizzazione topologica. Così facendo, ad esempio, si sono ricreate le superfici planari di accoppiamento delle eletrovalvole e delle viti di fissaggio del corpo valvola al sistema. In Fig.68 si riporta il risultato finale dell'insieme di tutte le operazioni di rimodellazione e refinement del componente.

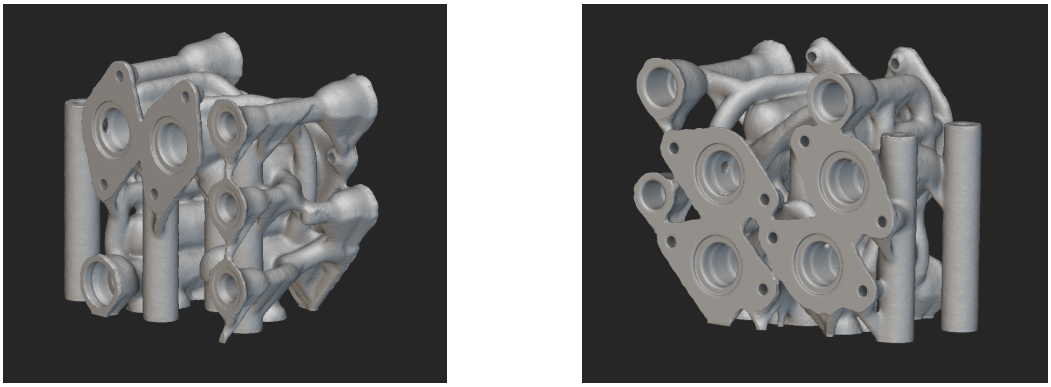


Figura 68: Componente ottimizzato a valle delle operazioni di rimodellazione e refinement

Una volta ottenuto il corpo implicito del componente rimodellato, si passa nuovamente alla fase di verifica del design. In modo analogo alle valutazioni svolte

in precedenza, viene creata la mesh del componente, a cui vengono applicati i carichi e i vincoli definiti nelle sezioni precedenti di questo elaborato. Si procede quindi con la valutazione dell'analisi modale. Poichè i cambiamenti relativi alla massa del componente sono stati minimi, e i vincoli sono rimasti invariati, le frequenze naturali della parte e i relativi modi di vibrare sono pressochè identici all'analisi modale effettuata in precedenza. In Fig.69 è raffigurato il modo di vibrare associato alla prima frequenza naturale.

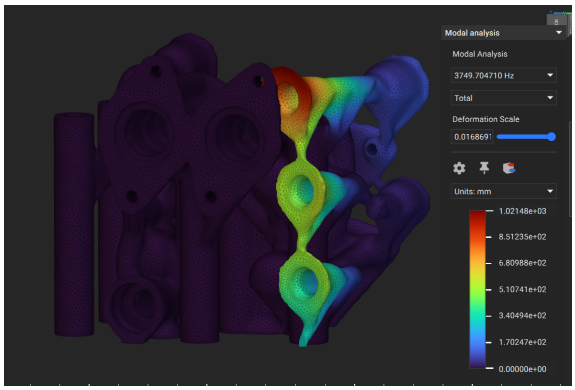


Figura 69: Primo modo di vibrare dell'analisi modale di validazione

In Tab. 5.7 si riportano tutte le frequenze naturali calcolate.

Modo	**Frequenza naturale [Hz]**
1	3749,70
2	4437,88
3	4636,53
4	5825,57
5	6568,67
6	6890,79

Tabella 5.7: Risultati analisi modale: frequenze naturali

Dall'analisi dei risultati dell'analisi modale si evidenzia come la prima frequenza naturale, calcolata pari a $3749,70\,Hz$ sia sufficientemente lontana dalla frequenza naturale del sistema cui il componente finale sarà accoppiato.

Confermato quindi l'esito positivo dell'analisi modale di validazione, si passa all'analisi statica della parte. In Fig.70 si riportano i risultati ottenuti.

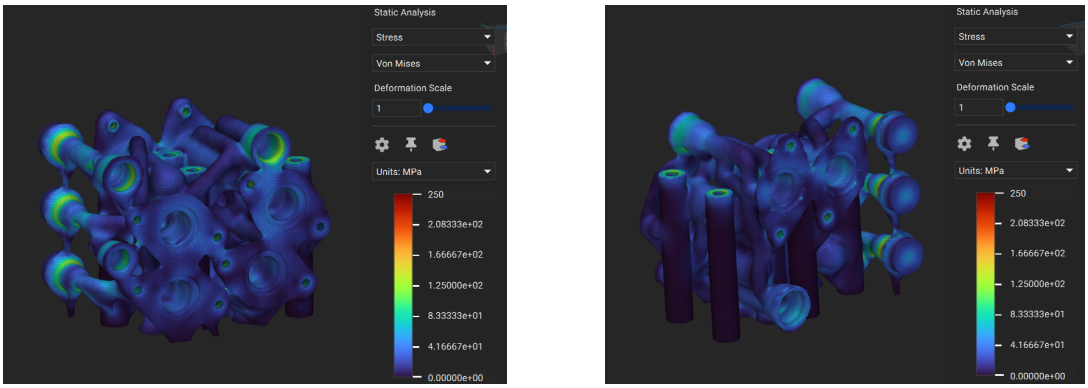


Figura 70: Risultati analisi statica di validazione

Dai risultati ottenuti dall'analisi strutturale così condotta, si osserva che la maggior parte della struttura è sollecitata entro valori di tensione moderati, con valori inferiori a $150\,MPa$, con un andamento omogeneo e privo di variazioni brusche. Le aree maggiormente sollecitate si trovano in corrispondenza dei collegamenti filettati, dove si trovano picchi di tensione. Tuttavia, tali picchi risultano confinati ad un numero limitato di triangoli adiacenti e a regioni puntuali, riconducibili a singolarità numeriche o a effetti dovuti all'applicazione puntuale di forze e vincoli. Complessivamente, quindi, la struttura ottimizzata presenta una riduzione significativa della massa totale, attraverso una distribuzione del volume solido ottimizzata per la resistenza meccanica e per il processo produttivo, mantenendo al contempo le tensioni all'interno della parte stessa nel campo elastico. Infine, dopo aver valutato positivamente i risultati ottenuti dalle analisi modale e strutturale, si valuta la massa del componente ottimizzato. Tramite ottimizzazione topologica, si è raggiunto un peso del corpo valvola realizzato in $AlSi10Mg$ pari a $459,51\,g$. Considerando il peso del componente originale, realizzato in lega di alluminio $AW6026-T6$, pari a circa $1900\,g$, si è calcolata la percentuale di risparmio di peso come segue:

$$\Delta m\% = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 = 75,82\%$$

Dove:

- m_i: massa del componente originale
- m_f: massa del componente ottimizzato

5.5 Generative Design

Il Generative Design è un approccio di progettazione assistito da computer che utilizza algoritmi di ottimizzazione e intelligenza artificiale per generare automaticamente molteplici soluzioni geometriche sulla base di vincoli, carichi, materiali e obiettivi di progetto definiti dal progettista. A differenza della progettazione tradizionale, in cui la geometria è modellata manualmente, il generative design esplora uno spazio di soluzioni molto ampio, consentendo di individuare configurazioni ottimizzate in termini di prestazioni strutturali, massa e producibilità. Grazie all'ottimizzazione degli spazi di progettazione, tale metodologia di progettazione risulta in forme molto complesse e organiche, che risultano particolarmente adatte all'applicazione nell'ambito della manifattura additiva, grazie alla libertà del processo produttivo.

5.5.1 Preparazione modello

Il software utilizzato per la parte di generative design è Fusion360. La fase di preparazione del modello avviene direttamente con l'importazione della geometria iniziale in formato *parasolid* all'interno del programma. Si importano quindi anche le geometrie modellate precedentemente tramite il software Siemens NX. Si hanno,

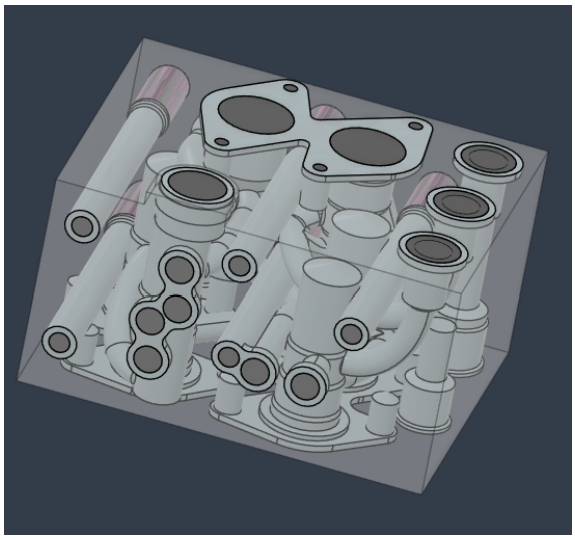


Figura 71: Modello iniziale su Fusion360

quindi, a disposizione, le seguenti parti:

- Corpo della valvola originale
- Geometria dei canali interni
- Geometria delle superfici di accoppiamento e fissaggio
- *Shell* della geometria dei canali

In particolare, le zone di accoppiamento e fissaggio, che includono le superfici planari su cui vanno in battuta le elettrovalvole e le zone adibite ai collegamenti filettati, unitamente alla shell dei canali, costituiscono lo spazio delle zone di non design.

5.5.2 Definizione della condizione di carico

La condizione di carico del componente è la medesima di quella riportata nella sottosezione 5.4.2. Si ripetono, quindi, in Tab.5.8 le forze a cui è sottoposta la parte. Le forze applicate sul componente rimangono, quindi, la pressione a cui sono

Quantità	Descrizione	Valore
5	Viti M6 classe 8.8	9 Nm
12	Viti M4 classe 8.8	3,5 Nm
3	Sensori di pressione	35 Nm
1	Sensore di temperatura	22 Nm
1	Raccordo di interfaccia ingresso	22 Nm
1	Raccordo di interfaccia uscita	22 Nm
	Pressione massima di esercizio	75 bar

Tabella 5.8: Indicazione della condizione di carico

sottoposti i canali interni e le forze agenti relative ai fissaggi e ai collegamenti filettati.

5.5.3 Impostazione studio

Una volta definita la condizione di carico e la geometria del componente si procede all'impostazione dello studio di generative design. Tale fase segue un flusso di lavoro schematico e ben definito, come indicato in Fig. 72. Il primo step consiste nella



Figura 72: Workflow di uno studio di generative design su Fusion360

definizione delle zone di *non design*. All'interno di Fusion360, una volta definite,

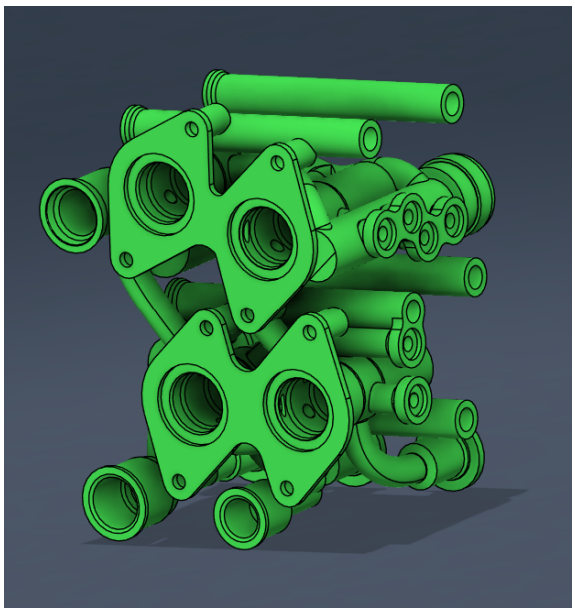


Figura 73: Zone di non design per lo studio di GD

vengono indicate con il colore verde. In Fig.73 è rappresentata la geometria di non design definita. Si nota che tale spazio è composto da:

- superfici di accoppiamento tra il blocco valvola e le relative elettrovalvole
- zone di accoppiamento tra il blocco valvola e i reltivi connettori idraulici e sensori
- alloggiamento per le vite necessarie al fissaggio del blocco al sistema principale
- *shell* dei canali interni

Successivamente, si passa alla definizione della geometria degli ostacoli, ovvero quello spazio che il software deve evitare durante la fase di progettazione generativa. Per il caso in esame è fondamentale che non venga aggiunto materiale all'interno dei canali, per consentire un corretto flusso di olio idraulico all'interno della valvola. Inoltre, occorre definire come *obstacle geometry* tutte le aree necessarie per l'alloggiamento dei componenti aggiuntivi sul blocco valvola e dei relativi fissaggi. In Fig.74 si possono osservare in colore rosso i corpi relativi alle zone di ostacolo. Si nota come tali zone siano complementari alle zone di non design definite precedentemente e raffigurate in colore verde. La definizione di queste regioni è fondamentale per la corretta impostazione dello studio di generative design. Fusion360 permette, una volta compilata la sezione di *obstacle goemetry*, di applicare un modificatore relativo all'offset di tali geometrie. Tale funzione risulta particolarmente utile nel caso si debbano prevedere tolleranze e giochi ben definiti rispetto alle zone di non design. In seguito, il workflow prevede la definizione opzionale di una geometria di partenza. Tramite questa funzione si può definire un corpo iniziale da cui l'algoritmo inizia il processo di generazione. Ciò permette al software di ricercare soluzioni più vicine al design iniziale e, quindi, di arrivare a convergenza più velocemente, riducendo in modo significativo i tempi di calcolo. Tuttavia, al tempo stesso, la definizione di una *starting shape* troppo vincolante può portare alla limitazione della libertà di esplorazione dell'algoritmo, riducendo la possibilità di ottenere soluzioni particolari e innovative. Nel caso studio in esame, poichè la natura del problema risulta piuttosto

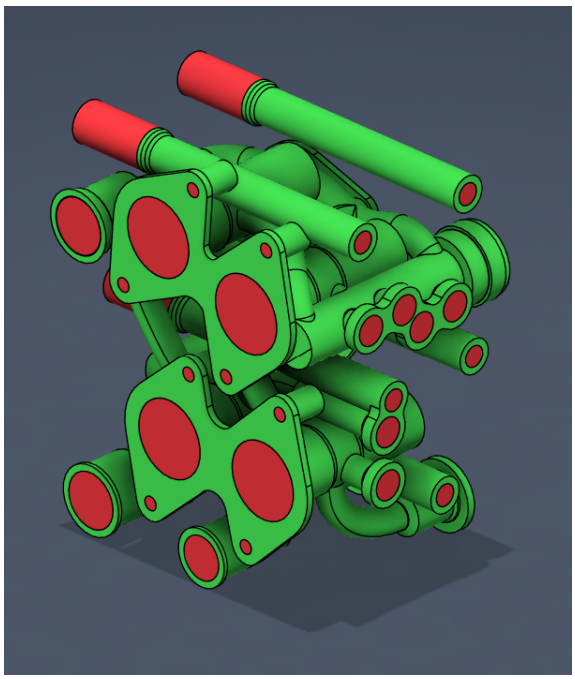


Figura 74: Definizione *obstacle geometry*

vincolante, a causa di condizioni e voincoli stringenti, si è definita la geometria iniziale, prediligendo tempi di calcolo più rapidi a soluzioni complesse che sarebbe risultate non accettabili. Come riportato in Fig.75, la *starting shape* definita coincide con il corpo valvola già in uso presso Ferrari.

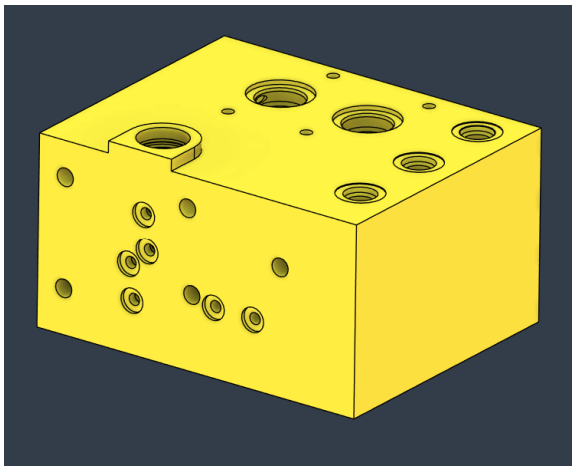


Figura 75: Definizione *starting shape*

Una volta definite le geometrie di non design, ostacolo e di partenza, la sezione *unassigned geometry* permette di effettuare un rapido controllo preliminare sulla qualità dell'impostazione del lavoro fino a questo punto. Tramite questa funzione, infatti, vengono evidenziate le porzioni del modello che non sono associate a nessuna condizione definita in precedenza. La presenza di corpi all'interno di questa cartella può portare alla generazione di avvisi o errori durante il processo di generazione delle soluzioni. Verificata la corretta assegnazione delle geometrie dello studio, è possibile definire uno o più piani di simmetria. Tale funzione permette di ridurre notevolmente il costo computazionale e i tempi associati alla risoluzione del problema, nel caso il componente, i carichi e i vincoli presentino una condizione di simmetria. Il componente in esame è particolarmente complesso. Il corpo valvola non presenta

piani di simmetria e la condizione di carico, allo stesso modo, non è distribuita secondo pattern simmetrici. Si passa quindi alla definizione degli obiettivi dello studio. In Fig.76 è riportato il menù di tale blocco all'interno di Fusion360. Il

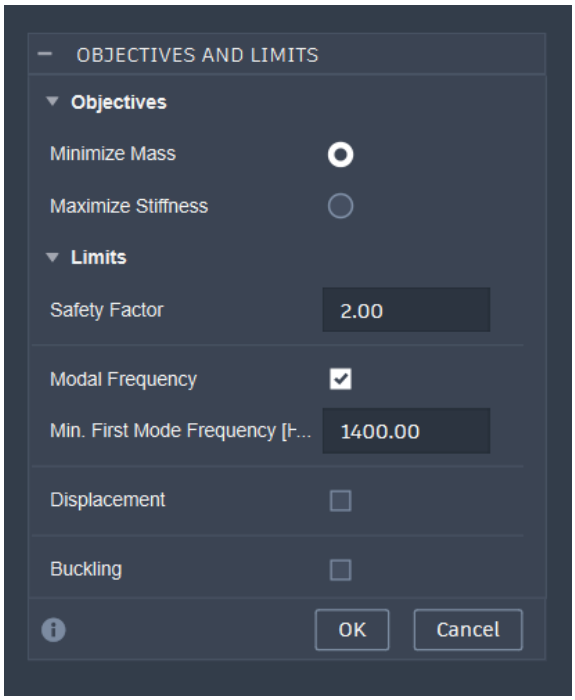


Figura 76: Definizione obiettivi delle studio di GD

software permette di scegliere tra due obiettivi principali:

- minimizzazione della massa
- massimizzazione della rigidezza

Al tempo stesso, all'interno dello stesso blocco, è possibile definire alcuni vincoli. Per il caso studio si è definito il coefficiente di sicurezza e la prima frequenza naturale minima che il componente finale deve avere. È possibile, tuttavia, definire anche ulteriori vincoli sullo spostamento e sul buckling. In particolare, si possono indicare valori di spostamento massimo della parte lungo le tre direzioni principali. Tale vincolo può essere ancora suddiviso su scala globale e locale, per un controllo più accurato. La condizione sul buckling, ovvero instabilità dovuta al carico di punta, permette di definire un coefficiente di sicurezza relativo alla stessa condizione di carico. Questa condizione risulta particolarmente utile nel caso di progettazione generativa di componenti lunghi e snelli sottoposti a carico di compressione. Tramite il blocco successivo, si possono aggiungere ulteriori condizioni riguardo alla manifattura della parte. In Fig.77 si riportano le opzioni di manifattura disponibili. Il blocco permette di scegliere uno o più metodi per la realizzazione della parte. Selezionando *unrestricted* il software non applica vincoli basati sulla tecnologia produttiva. Le geometrie saranno quindi estremamente organiche e complesse. Tramite la sezione *additive*, il progetto di generazione delle alternative tiene conto del processo di produzione tramite manifattura additiva. In particolare, si possono definire una o più direzioni di crescita del componente, indicare l'angolo di crescita minimo, come anche lo spessore minimo. Nel caso in esame, tali vincoli si sono rivelati particolarmente utili, consentendo di esplorare un ampio spazio di soluzioni, comunque realizzabili tramite L-PBF. Si possono, inoltre, aggiungere vincoli relativi alla manifattura

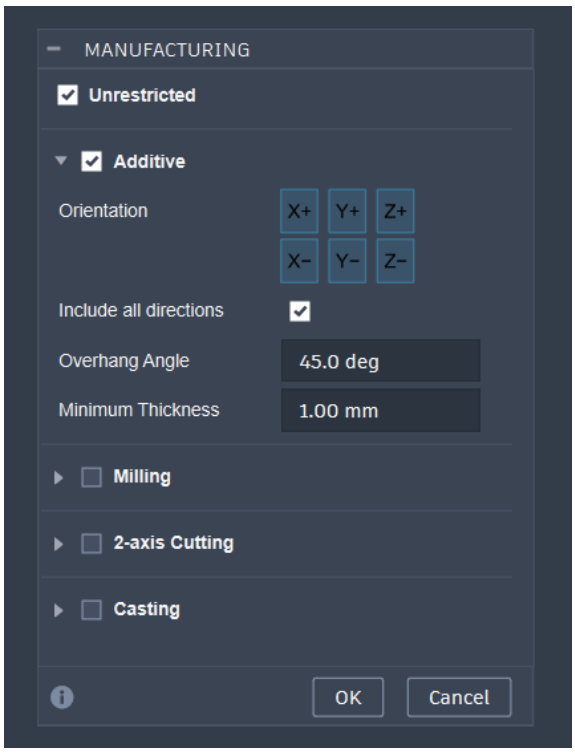


Figura 77: Definizione vincoli relativi alla manifattura

tramite asportazione di truciolo. Grazie alle funzionalità CAM integrate all'interno di Fusion360, si possono associare i setup delle macchine, con relativi magazzini utensili e parametri, precedentemente creati nel software, e associarli direttamente ai vincoli di processo per lo studio generativo. Infine, è possibile creare dei vincoli relativi al processo produttivo riguardanti la produzione per colata. Si possono quindi definire la direzione di estrazione, l'angolo di sformo e lo spessore minimo delle pareti del manufatto. È possibile, inoltre, aggiungere uno o più materiali allo studio generativo. Così facendo, il software analizza lo spazio delle soluzioni applicando direttamente i materiali scelti e analizzando le soluzioni applicando i materiali definiti per la verifica delle condizioni imposte. Per il caso studio si è scelto uno spazio dei materiali composto da 4 materiali adatti ad essere processati tramite L-PBF:

- lega di alluminio AlSi10Mg
- acciaio inossidabile 17-4 PH
- acciaio inossidabile AISI 304
- lega di titanio Ti-6Al-4V

Per concludere l'impostazione dello studio di generative design, occorre definire l'intera condizione di carico. Dai dati forniti e dai calcoli svolti in precedenza si possono ottenere i valori delle forze da applicare al componente. In Fig.78 si riporta il componente di studio, una volta definite le geometrie e la condizione di carico.

In particolare, il corpo della valvola risulta sottoposto a un carico di pressione sulle superfici dei canali interni e a forze di compressione in corrispondenza dei collegamenti filettati. Inoltre, vengono simulati i carichi relativi alle elettrovalvole come forze remote, trasferite alla valvola tramite connettori rigidi di tipo RBE2. Una volta definito completamente lo studio si passa alla generazione delle varie soluzioni. Il software, seguendo le condizioni definite precedentemente, attraverso un processo

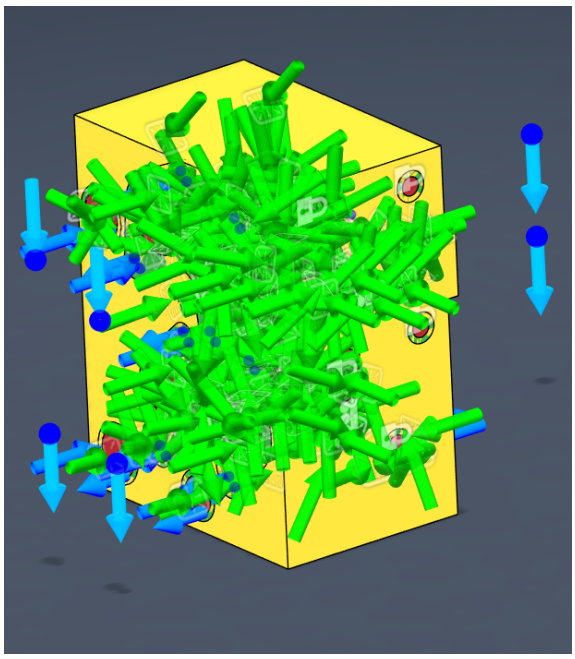


Figura 78: Applicazione della condizione di carico al componente

iterativo, genera una serie di alternative differenti, da cui il progettista può scegliere le più promettenti. Durante lo studio del componente in esame, si sono portati avanti numerosi studi di generative design, modificando alcune condizioni e obiettivi, al fine di confrontare tutte le soluzioni ottenute e l'influenza delle condizioni stesse sulle geometrie finali. In particolare,ad esempio, si sono modificate le condizioni sul processo produttivo. Alcuni studi sono stati portati avanti senza limitazioni, mentre altri sono stati vincolati strettamente a processi di tipo additivo, variando anche la direzione di crescita del componente, al fine di esplorare il più ampio spazio delle soluzioni possibili. Inoltre, si è partiti da uno studio con condizioni non eccessivamente stringenti, fino ad arrivare a vincoli molto specifici e rigorosi, sulla base dei risultati ottenuti dalle iterazioni degli studi effettuati in precedenza. Si è inoltre verificata l'influenza dell'obiettivo principale sui risultati, confrontando studi aventi come obiettivo principale quello della minimizzazione della massa con studi aventi come obiettivo la massimizzazione della rigidezza unitamente a un vincolo sulla massa del componente.

5.5.4 Confronto soluzioni e scelta modello

All'interno del software Fusion360 è possibile visionare e confrontare in modo chiaro e intuitivo tutti i risultati ottenuti con gli studi di generative design. Tramite la sezione *explore* si possono organizzare i risultati su grafici personalizzabili per una prima fase di selezione. In Fig.79 è rappresentato il grafico ottenuto confrontando tutto lo spazio delle soluzioni ottenute. Dall'analisi preliminare del grafico così

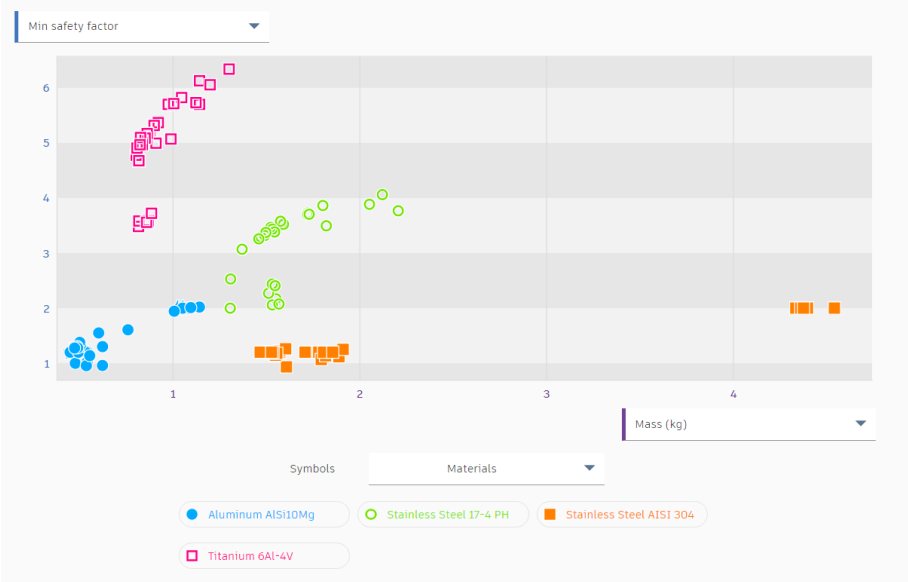


Figura 79: Grafico dell'intero spazio delle soluzioni

generato, si nota come la maggior parte delle soluzioni abbia raggiunto un peso inferiore ai $2\,kg$. Si osserva come le soluzioni relative ai due tipi di acciaio inossidabile considerati abbiano un peso superiore rispetto alle controparti in lega di alluminio e lega di titanio. In Tab.5.9 si riportano i valori relativi alle proprietà meccaniche dei materiali considerati.

Materiale	**Densità** $[kg/m^3]$	**Tensione di snervamento Rp0.2**$[MPa]$	**Resistenza a trazione Rm** $[MPa]$
AlSi10Mg	2650	250	460
Ti-6Al-4V	4430	880	1030
17-4 PH	7750	850	1000
AISI 304	7900	215	500

Tabella 5.9: Proprietà meccaniche dei materiali considerati

I risultati ottenuti considerando l'acciaio inossidabile AISI 304 hanno raggiunto una massa minima pari a $1,5\,kg$, soddisfando il coefficiente di sicurezza imposto. Si tratta di un risparmio di peso notevole rispetto al componente originale, tuttavia non sufficiente per incontrare i requisiti richiesti da Ferrari. Considerando i risultati dell'altro acciaio inossidabile considerato, l'acciaio 17-4 PH, si nota come siano allineati con quelli analizzati precedentemente per quanto riguarda il valore di massa, mentre presentano un valore di coefficiente di sicurezza minimo più elevato. Tali

risultati derivano da valori di densità simili e di tensione di snervamento e rottura differenti. Inoltre, la natura del problema considerato impone un'aggiunta minima di materiale rispetto alle zone di non design, per questo motivo, considerando variazioni contenute nella geometria, la massa totale dipende in larga misura dalle zone di non design. Come conseguenza, i risultati ottenuti considerando gli acciai inossidabili riportati in Tab.5.9 sono allineati sui valori di massa, ma traslati relativamente ai valori di coefficiente di sicurezza, considerando la notevole differenza tra le proprietà meccaniche. Le soluzioni ottenute considerando la lega di titanio Ti-6Al-4V presentano un valore di coefficiente di sicurezza molto elevato, unitamente a un valore medio di massa pari a $0,8\,kg$. Tali valori sono in linea con le proprietà meccaniche della lega, la quale presenta un valore di densità decisamente inferiore rispetto agli acciai inossidabili presi in considerazione, pur mantenendo valori di tensione di snervamento e rottura comparabili con la lega 17-4 PH. Gli studi generativi che hanno mostrato la maggior riduzione di massa rispetto al componente originale, sono quelli relativi alla lega di alluminio AlSi10Mg. Si tratta di una lega estremamente leggera, soprattutto se comparata con le altre leghe metalliche considerate. Inoltre, presenta proprietà meccaniche notevoli, specialmente se rapportate alla densità. Quindi, a seguito di un'accurata analisi dei grafici ottenuti riguardo l'intero spazio delle soluzioni, si è scelta la lega di alluminio come materiale più adatto per la realizzazione del componente in esame. Tale lega permette, infatti, il maggior risparmio di peso tra quelle considerate, e, poichè la riduzione della massa del componente originale è uno degli obiettivi primari dello studio, si è privilegiato questo aspetto. Inoltre, un aspetto importante considerato durante la scelta è stata la processabilità di tale lega tramite L-PBF. Infatti, la lega AlSi10Mg risulta facilmente processabile tramite manifattura additiva, grazie all'elevata saldabilità e alla bassa tendenza a formare cricche durante il processo produttivo. Inoltre, presso il CIM, poichè tale lega risulta una delle più utilizzate, il team ha sviluppato notevoli competenze nello sviluppo di parametri di processo legati all'AlSi10Mg, rendendo la lega la scelta più adeguata. In aggiunta, considerando i vincoli sul costo imposti da Ferrari, la scelta della lega sopracitata risulta l'alternativa migliore, come mostrato dalla Tab.5.10.

Materiale	**Costo [€/kg]**
AlSi10Mg	50
Ti-6Al-4V	260
17-4 PH	50
AISI 304	75

Tabella 5.10: Costi indicativi delle polveri metalliche delle leghe considerate

Si passa quindi ad analizzare i risultati ottenuti con tutti gli studi generativi effettuati relativi alla sola lega di alluminio. In Fig.80 si riporta il grafico con i modelli esaminati. Il processo di analisi delle soluzioni inizia eliminando i design che non raggiungono l'obiettivo definito di coefficiente di sicurezza minimo. Successivamente, si iniziano ad eliminare i modelli che presentano un peso troppo elevato rispetto al target impostato. Grazie agli strumenti di visualizzazione di Fusion360, si possono impostare filtri e range di valori per ogni caratteristica e proprietà delle soluzioni trovate, in modo da isolare quelle migliori in modo rapido. Imponendo vincoli più

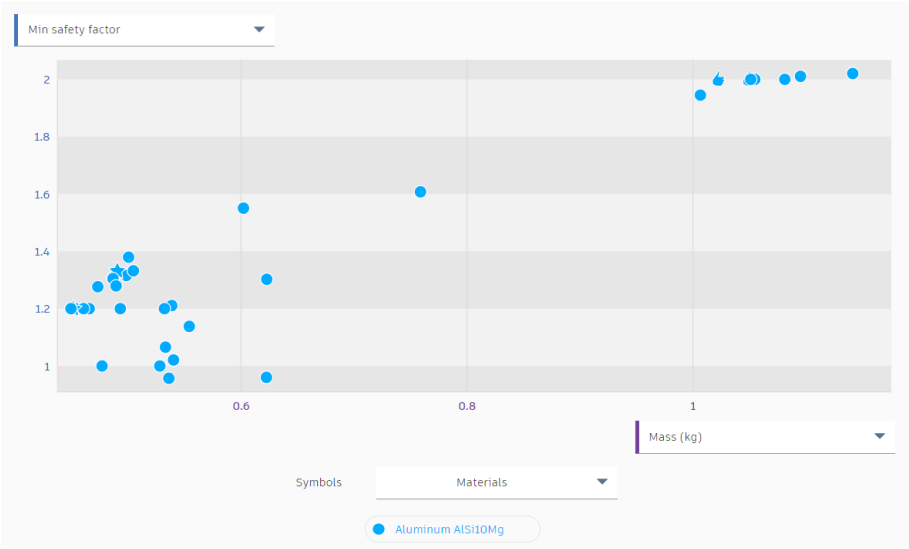


Figura 80: Grafico dello spazio delle soluzioni relativo alla lega AlSi10Mg

stringenti sulla massa, coefficiente di sicurezza minimo e prima frequenza modale, si ottiene un gruppo ristretto di soluzioni possibili. Analizzando ulteriormente i modelli così isolati, si è selezionato il design più promettente tra tutti quelli generati, riportato in Fig81. La soluzione scelta è stata generata considerando l'additive

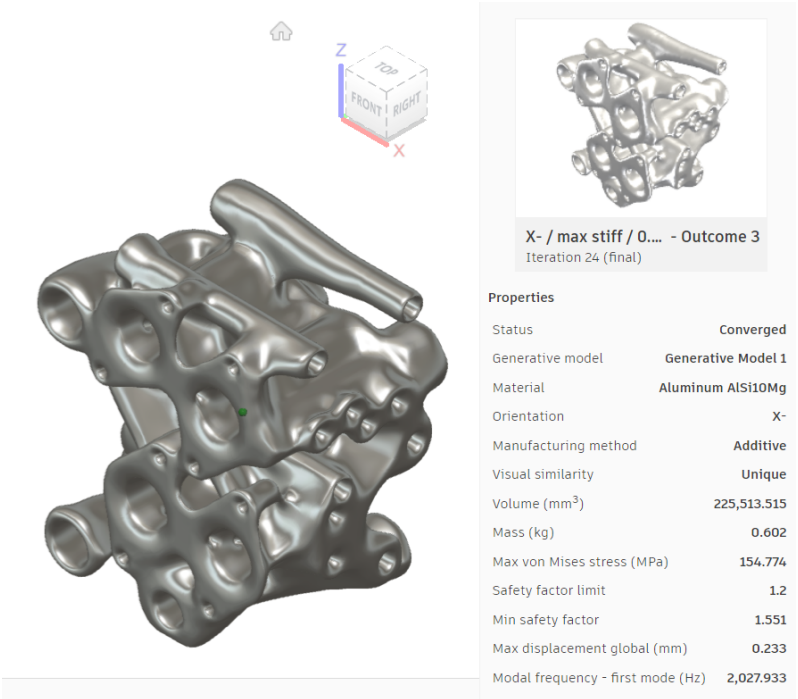


Figura 81: Design generativo finale

manufacturing come processo produttivo, con direzione di crescita lungo la direzione $x-$. Si nota come dalle prime analisi strutturali e modali effettuate durante il processo di progettazione generative, il componente rispetti tutti i vincoli imposti in fase di preparazione dello studio. Il modello presenta infatti il corretto valore di coefficiente di sicurezza minimo e la prima frequenza modale superiore al target imposto. Tuttavia, è evidente come durante il processo di generative design, le zone di ostacolo non siano state rispettate in modo rigoroso. L'algoritmo ha infatti inserito materiale aggiuntivo anche all'interno delle aree definite come *obstacle geometry*. Si

rende quindi necessario un importante lavoro di post-processing del modello così ottenuto, prima di poter procedere alla validazione del design. Per le fasi successive si è scelto di utilizzare il software nTopology, sia per le operazioni di refinement che di validazione del modello tramite analisi modali e strutturali. L'esportazione dei modelli ottenuti tramite generative design da Fusion360 può avvenire tramite mesh o formato CAD. A seguito di alcune prove effettuate esportando il modello nei due tipi di file diverso, si è scelta l'esportazione in formato *.3mf*. Utilizzando questo tipo di mesh si ha maggior controllo sui parametri di esportazione, come densità di triangolazione e qualità della mesh. Esportando invece il modello in formato *.step* il modello perde di qualità. Infatti, a causa della mancanza rigorosa di rispetto delle zone di non design e ostacolo, il programma ha perso le superfici e le *feature* di riferiemento del componente iniziale, generando un corpo solido topologicamente chiuso, ma con una superfice composta da più *patch* unite tra loro in modo discontinuo. Quindi, una volta genrato il file *.3mf* su Fusion360, si importa la mesh all'interno di nTopology. Contemporaneamente si sono importare le geometrie delle superfici di riferimento del corpo valvola in formato CAD.

5.5.5 Validazione design e refinement

Terminata la fase di importazione, si è inizata la modellazione implicita del componente. Per prima cosa, attraverso operazioni booleane di unione e sottrazione, si sono riprisitnate le superfici di accoppiamento delle elettrovalvole, l'alloggiamento dei sensori, le zone designate per i collegamenti filettati e le superfici dei canali interni. Inoltre, durante questa prima fase di modellazione, sono stati realizzati tutti i corpi che verrano utilizzati in seguito per la corretta simulazione del precarico relativo ai collegamenti filettati. In Fig.82 si riporta il risultato delle operazioni di modellazione implicita. Ultimate le operazioni di modellazione, si è passati alla validazione del

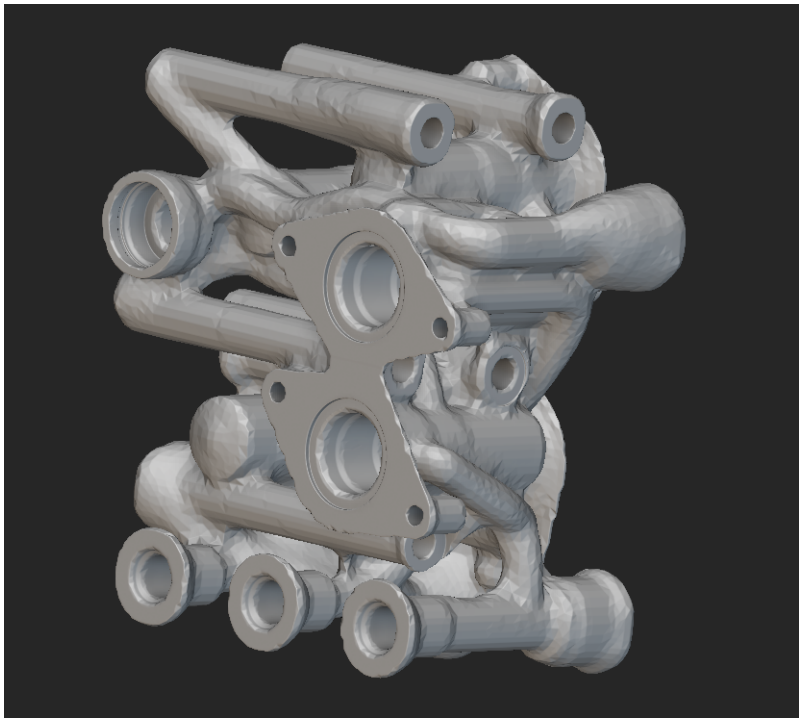


Figura 82: Refinement modello su nTopology

design tramite analisi modale e strutturale. Analogamente a quanto effettuato per la

validazione del modello ottenuto tramite ottimizzazione topologica, a monte delle analisi di verifica, si è creata la mesh della parte, seguendo le idicazioni descritte nelle sezioni precedenti. Una volta ottenta la mesh desiderata, si è impostata l'analisi modale del componente, dopo aver definito i vincoli e le proprietà del materiale. In Fig.83 si riportano i risultati ottenuti. Si sono indagate le prime 6 frequenze

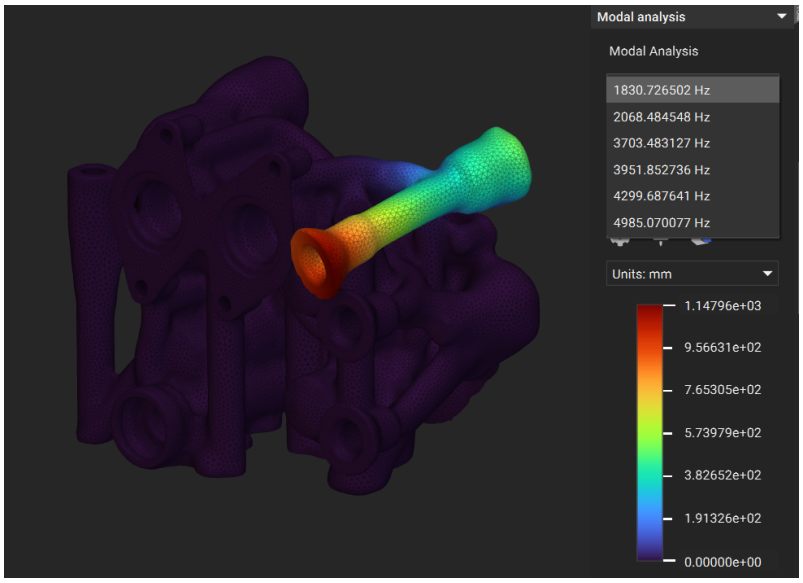


Figura 83: Rusultati analisi modale

naturali. Di particolare interesse è la prima di esse. Tra gli obiettivi vi è un valore della prima frequenza naturale maggiore di $1400\,Hz$. Dall'analisi effettuata la condizione risulta rispettata, in quanto la prima frequenza naturale risulta pari a $1830,73\,Hz$. Verificato il vincolo sulla frequenza naturale, si passa alla definizione della condizione di carico del componente. In modo analogo a quanto effettuato per il componente ottenuto mediante ottimizzazione topologica, si effettua una prima analisi statica preliminare, utilizzando un modello per la simulazione dei collegamenti filettati semplificato. In Fig.84 sono raffigurati i risultati così ottenuti. L'andamento

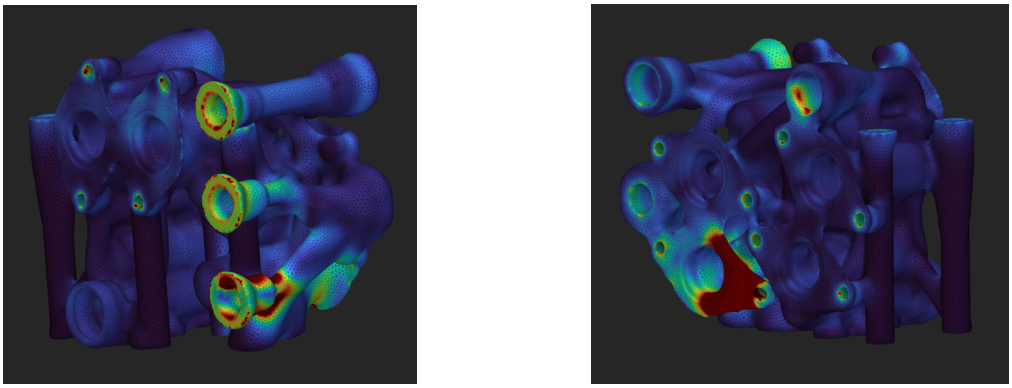


Figura 84: Risultati analisi statica preliminare

delle tensioni evidenzia la presenza di diverse zone particolarmente critiche del componente. In particolare, le criticità sono concentrate nella zona di raccordo tra l'alloggiamento di un sensore con uno dei canali interni e in una porzione della superficie di accoppiamento tra il corpo principale e un'elettrovalvola. Inoltre, si rende necessario procedere alla modellazione dei collegamenti filettati utilizzando il modello sfruttato nel caso dell'analisi strutturale della parte ottenuta tramite ottimizzazione

topologica. Quindi, sulla base dei risultati dell'analisi statica preliminare, si passa nuovamente alla fase di modellazione. Individuate le zone critiche, si modifica la superficie mediante gli strumenti di modellazione implicita all'interno di nTopology. Tramite la creazione di nuovi corpi elementari e attraverso operazioni booleane si sono rinforzate le zone critiche. Sfruttando il controllo sul tipo di raccordo per le operazioni booleane, si sono ottenute geometrie rinforzate perfettamente integrate con la geometria ottenuta tramite generative design. Oltre all'inspessimento e al rinforzo delle zone di concentrazione delle tensioni, è stata aggiunta una porzione di materiale in corrispondenza della superficie di accoppiamento con l'elettrovalvola. Tale zona è stata collegata al corpo solido principale, al fine di irrigidirne la struttura. Inoltre, si è modellata una struttura sottostante il rinforzo stesso avente la duplice funzione di irrobustimento e supporto. In Fig.85 si riporta il componente a seguito della fase di rimodellazione.

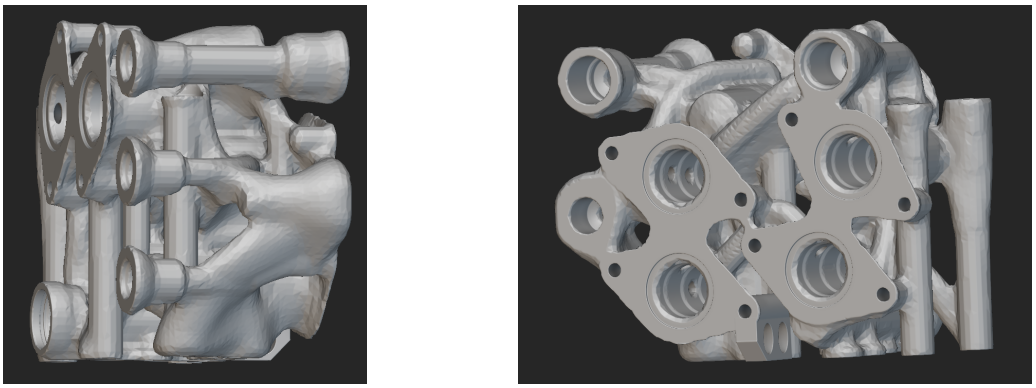


Figura 85: Rimodellazione zone critiche

Terminata la fase di rimodellazione delle zone critiche, si effettua una nuova analisi modale per la validazione del design. Si verificano le prime sei frequenze naturali con i relativi modi, riportati in Fig.86. L'analisi modale di verifica permette

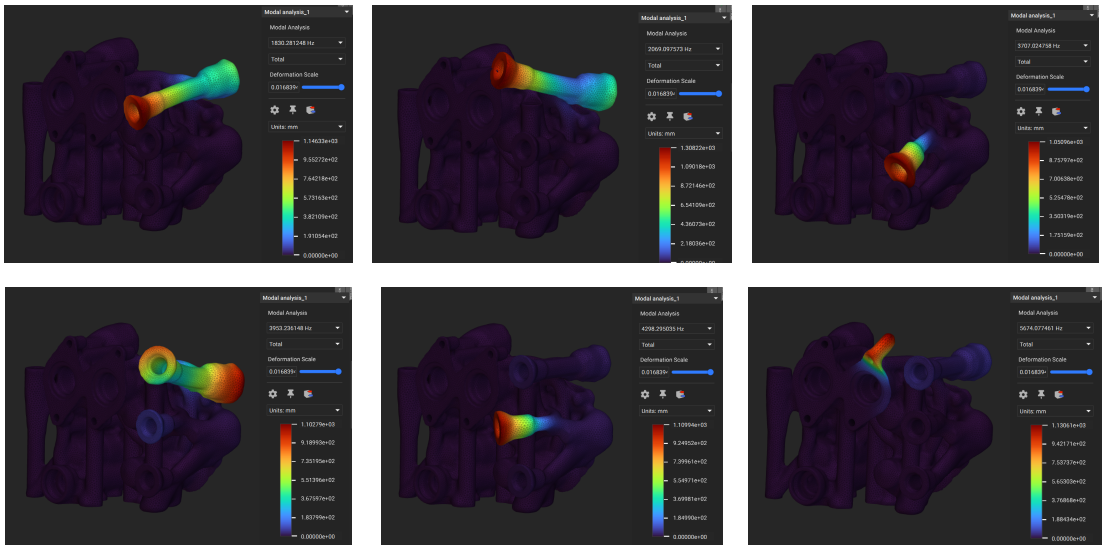


Figura 86: Prime sei frequenze naturali e relativi modi

di validare il design, in quanto l'obiettivo di frequenza naturale minima è rispettato. Poichè i cambiamenti alla geometria del componente sono stati minimi, le frequenze naturali risultano essere pressochè coincidenti con quelle risultati dall'analisi modale preliminare. La prima frequenza naturale è pari a $1830,28\,Hz$, superiore al target

di 1400 Hz. Superata la prima fase di validazione, si passa alla verifica del modello tramite analisi strutturale. A seguito della rimodellazione delle aree critiche, si è resa necessaria anche la rimodellazione dei collegamenti filettati. Infatti, come riportato in precedenza, il modello per la simulazione dei collegamenti filettati non permette di ottenere risultati realistici. Si prosegue quindi con la rimodellazione degli stessi secondo le considerazioni effettuate nella sottosezione 5.4.5. In Fig.87 si riporta il risultato dell'analisi strutturale di validazione. Analizzando i risultati ottenuti,

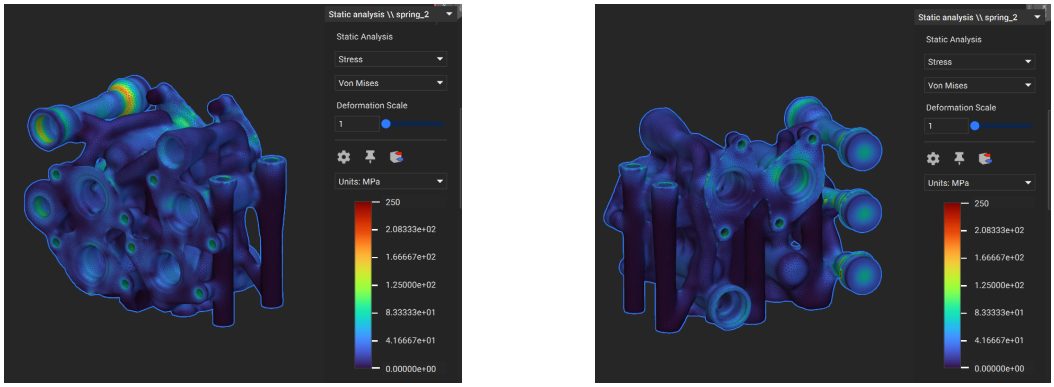


Figura 87: Risultato analisi strutturale di validazione

si nota come attraverso le iterazioni precedenti di redesign delle aree critiche e di rimodellazione dei collegamenti filettati si è giunti positivamente alla validazione del design. Lo stress all'interno del componente risulta essere limitato entro i valori definiti dal target di tensione massima ammissibile dagli obiettivi del caso studio, considerando anche il coefficiente di sicurezza stabilito. La parte del corpo valvola più sollecitata risulta essere quella interessata dai collegamenti filettati. In particolare, i collegamenti filettati relativi ai sensori e raccordi di diametro maggiore presentano valori di tensione localmente più elevati rispetto al resto del componente. Confermata, quindi, la validità del design, si passa al calcolo del risparmio di peso ottenuto. Come per il componente ottimizzato topologicamente, la riduzione di massa rispetto al corpo valvola originale è considerevole. La massa calcolata attraverso nTopology, infatti, risulta essere pari a $458,04\,g$, considerando la densità della lega di alluminio scelta, $AlSi10Mg$ pari a $2650\,kg/m^3$. Si calcola quindi il risparmio di peso rispetto alla parte attualmente in uso:

$$\Delta m\% = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 = 75,89\%$$

Dove:

- m_i: massa del componente originale
- m_f: massa del componente ottimizzato

5.6 Confronto risultati

Analizzando quindi i risultati ottenuti tramite ottimizzazione topologica e generative design si nota come i risultati siano piuttosto simili. In Fig88 si riportano le geometrie ottenute mediante le due metodologie di progettazione utilizzate.

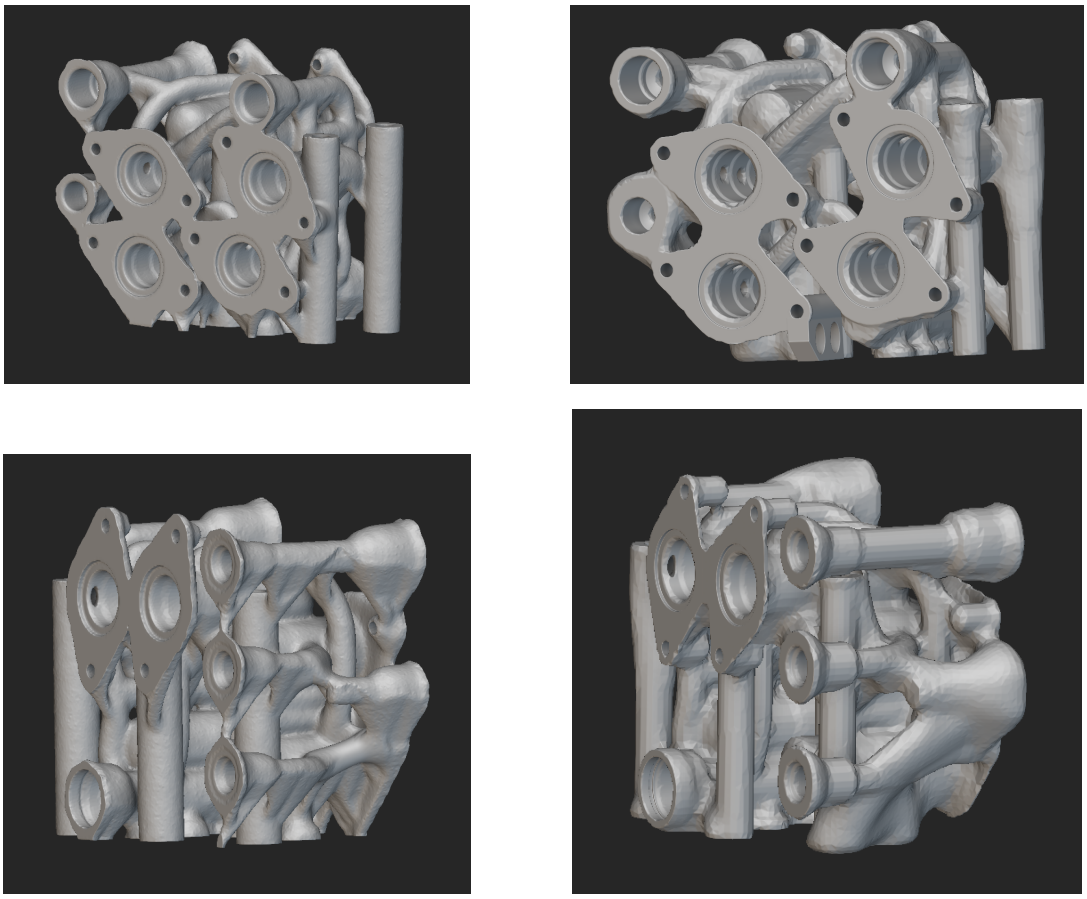


Figura 88: Componenti finali ottenuti tramite TO e GD

La similitudine tra i design ottenuti è strettamente legata alla natura del problema. Il caso studio considerato, infatti, poneva vincoli molto stringenti sulla condizione di carico del componente e sui vincoli di coefficiente di sicurezza, frequenza naturale minima e risparmio di peso. Inoltre, la complessa geometria dei canali interni della valvola limita fortemente la possibilità di ridistribuzione del materiale all'interno del design space. I volumi solidi designati come zone di non design, o di mantenimento, rappresentano infatti una frazione importante dell'intero volume del componente iniziale. Considerando la shell relativa ai canali interni, nel caso studio definita con uno spessore pari a $2\,mm$, le zone di accoppiamento per le elettrovalvole e i collegamenti idraulici, come anche le zone relative ai collegamenti filettati, si ottiene una porzione consistente del corpo valvola iniziale. Si è osservato inoltre come la pressione all'interno dei canali non risulti critica per il componente, in quanto la shell definita con lo spessore minimo considerato, sopporta ottimamente lo stress a cui è sottoposta. Durante le fasi di ottimizzazione topologica e generative design tali zone non presentano margine di miglioramento, in quanto è già stata raggiunta la configurazione ideale di distribuzione del materiale. La parte critica del componente, invece, risulta essere quella relativa ai collegamenti filettati, in particolare alle forze dovute al precarico delle viti. Osservando i risultati riportati in Fig.88 si nota come nel risultato ottenuto mediante TO le zone interessate da collegamenti filettati siano

collegate alle componenti adiacenti del corpo valvola, distribuendo in modo ottimale lo stress. La geometria ottenuta tramite GD presenta più rami scollegati dal corpo principale, sfruttando una distribuzione del materiale più compatta, senza rami di collegamento sottili. In entrambi i design finali risulta evidente la distribuzione del materiale in modo coerente con il processo di fabbricazione additiva lungo la direzione considerata. Infatti, il materiale è disposto in modo da ridurre la quantità di materiale di supporto necessaria durante la fase di fabbricazione. In particolare, nel design ottenuto tramite ottimizzazione topologica, tale aspetto è evidente. Si nota la presenza di numerosi rami che, oltre a svolgere una funzione strutturale, fungono da supporto al componente stesso. La maggior parte delle zone a sbalzo, o dotate di un angolo di overhang eccessivamente ridotto per il processo considerato, sono supportate dal basso attraverso la distribuzione strategica di materiale. Nel componente ottenuto tramite generative design, invece, si osserva un numero maggiore di geometrie a sbalzo, che necessitano di strutture di supporto durante la fase produttiva. Entrambi i modelli, appena ultimata la fase di ottimzzazione e generazione, hanno dovuto subire alcuni interventi di modellazione per il rinforzo di zone risultate particolarmente sollecitate a seguito di un'analisi statica preliminare. Una volta terminata la fase di rimodellazione dei risultati, ambedue i design finali hanno superato la fase di validazione tramite analisi strutturale e modale, mantenendo i valori di stress al di sotto del limite stabilito e presentando la prima frequenza naturale al di sopra del target indicato da Ferrari. La riduzione di peso ottenuta attraverso la progettazione tramite TO e GD risulta similare, in quanto il peso finale dei modelli risulta comparabile, come indicato in Tab.5.11

Metodo di progettazione	**Peso [g]**
Ottimizzazione topologica	459,51
Generative design	458,04

Tabella 5.11: Confronto della massa tra i componenti finali

Infine, occorre porre attenzione al tempo impiegato dai diversi metodi di progettazione per la risoluzione del problema. Il software *nTopology*, utilizzato per la progettazione tramite ottimizzazione topologica, sfrutta l'hardware della macchina su cui si lavora. In particolare, per il caso studio in esame, tutta la fase di progettazione e simulazione è stata svolta utilizzando un PC con le caratteristiche riportate in Tab.5.12.

Componente	**Specifica**	**Valore**
CPU	Intel Core i7	2.3 GHz
RAM	DDR5	32 GB
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060	6 GB
Storage	SSD NVMe	1 TB

Tabella 5.12: Specifiche della macchina utilizzata

In Fig.89 è raffigurato l'andamento del tempo cumulativo in funzione del numero di iterazioni svolte durante la risoluzione di uno degli studi di ottimizzazione topologica effettuati all'interno di *nTopology*.

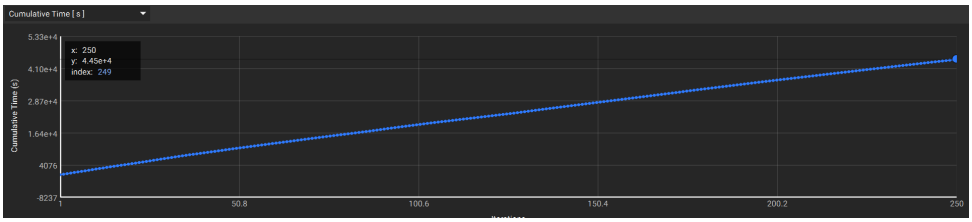


Figura 89: Tempo impiegato per la risoluzione di uno studio di TO

Si nota che il tempo impiegato per la risoluzione di un blocco di ottimizzazione topologica arriva a $4.45{*}10^4\,s$, pari a circa $12\,h$ e $22\,m$, per un totale di250 iterazioni. Il tempo necessario per la risoluzione di uno studio di ottimizzazione topologica, quindi, risulta essere piuttosto importante. Ogni iterazione dello studio, infatti, richiede un numero di ore di calcolo elevato. Considerando la necessità di risolvere lo studio dopo ogni modifica effettuata sul modello, si osserva come il costo computazionale in termini di ore sia oneroso. Per quanto riguarda la risoluzione di uno studio di generative design attraverso *Fusion360*, invece, i tempi di calcolo risultano decisamente più contenuti. Ciò è dovuto principalemte all'utilizzo di cloud computing per la risoluzione del problema, unitamente all'utilizzo di soluzioni avanzate di AI e ML. Grazie all'utilizzo di algoritmi risolutivi avanzati, ogni soluzione richiede un numero limitato di iterazioni, come mostrato in Fig.90.

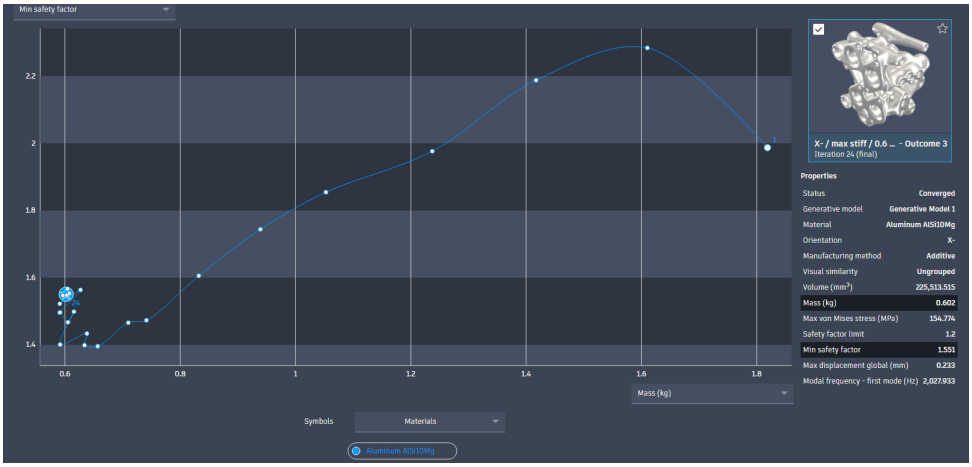


Figura 90: Iterazioni di una soluzione di uno studio di GD

Come raffigurato in Fig.90 si arriva a un massimo di 24 iterazioni per parte, in confronto alle 250 richieste per lo studio di ottimizzazione topologica. Inoltre, durante la risoluzione di uno studio generativo, il software porta avanti la generazione e l'affinamento di più modelli in parallelo. *Fusion360* non rende disponibile un tool per la visualizzazione del solving time per gli studi generative effettuti tramite la licenza EDU. Si è quindi stimato il tempo di risoluzione di un singolo studio generativo cronomentrando il tempo impiegato dal solver arrivare a convergenza. Infine si è calcolato il tempo medio riferito a tutti gli studi di GD effettuati, ottenendo un valore di circa $60\,min$ per risultati con risoluzione media, che arriva a $90\,min$ per risoluzione elevata.

5.7 Messa in macchina

In seguito all'identificazione dei design migliori ottenuti tramite ottimizzazione topologica e generative design, si analizza la fase di messa in macchina del componente. Tale fase risulta cruciale per garantire la riuscita dell'intero processo di fabbricazione additiva. All'interno di questo stadio della progettazione di un particolare sono comprese tutte le operazioni preliminari necessarie alla preparazione del job di costruzione, tra cui la definizione dell'orientamento ottimale del pezzo in macchina, la generazione delle strutture di supporto, l'impostazione dei parametri di processo e la disposizione delle parti sul piano di stampa. In particolare, l'orientamento viene scelto valutando attentamente:

- minimizzazione delle strutture di supporto
- qualità superficiale
- distribuzione dello stress termico
- riduzione delle deformazioni

La minimizzazione delle strutture di supporto è fondamentale per ridurre la quantità di materiale di supporto utilizzato, in quanto rappresenta uno scarto del processo di fabbricazione. Inoltre, la realizzazione di strutture di supporto richiede tempi più lunghi, consumo di energia e operazioni di post-processing, oltre al rischio di inficiare la qualità superficiale delle superfici di contatto. In particolare, le operazioni di rimozione dei supporti a seguito del processo produttivo, sono talvolta estremamente delicate e laboriose, in base alla geometria del componente e delle strutture di supporto stesse. La qualità superficiale dipende fortemente dall'orientazione del pezzo in macchina. Le superfici con un angolo di overhang elevato presentano una qualità superficiale migliore, che diminuisce al diminuire di tale angolo. Le superfici quasi orizzontali presentano infatti una rugosità superficiale elevata. Inoltre, la presenza di strutture di supporto diminuisce la qualità della superficie di contatto. Occorre quindi considerare la variazione della qualità superficiale del componente in relazione all'utilizzo della parte stessa. Le superfici funzionali saranno perciò posizionate in modo da avere la migliore finitura superficiale possibile, se non si prevedono lavorazioni alle macchine utensili. È inoltre fondamentale considerare la distribuzione dell'energia fornita dal laser durante il processo. L'orientamento del pezzo, infatti, modifica il percorso del calore e la sua dissipazione attraverso il componente stesso, il letto di polvere e la piattaforma. Orientazioni che presentano sezioni molto estese per singolo layer permettono una dissipazione del calore maggiore, a differenza di sezioni con area ristretta che causano un accumulo di energia termica concentrato. Occorre quindi disporre la parte in modo da evitare, per quanto possibile, brusche variazioni nell'area di esposizione di un singolo strato, cercando di modificare la sezione del particolare in modo graduale, al fine di ottenere un raffreddamento più controllato ed evitare accumuli di tensioni residue causate da elevati gradienti termici. Infine, l'orientazione del pezzo in macchina ha dirette conseguenze sulla presenza di deformazioni nel componente stesso. Le deformazioni sono infatti strettamente correlate alle tensioni residue e alla rigidità della parte. La scelta di un orientamento favorevole che eviti l'accumulo di stress dovuti ai gradienti termici permette di ridurre le tensioni ed evitare distorsioni, in particolar modo in geometrie sottili o con strutture a sbalzo. Una volta definita la posizione, si procede alla creazione dei supporti nelle zone critiche, calibrandone densità e geometria in funzione della lega e

delle specifiche della macchina. Successivamente il componente viene importato nel software di slicing, dove vengono stabiliti parametri come potenza del laser, velocità di scansione, spessore del layer e strategia di scansione. Infine, il job viene verificato tramite simulazioni o controlli automatici di processabilità e quindi esportato nel formato proprietario della macchina L-PBF per essere avviato in produzione.

Le operazioni di messa in macchina si sono effettuate principalmente tramite il software *Materialise Magics*, tuttavia, si sono effettuate anche alcune prove di messa in macchina utilizzando *nTopology*, grazie ad appositi strumenti e plug-in.

5.7.1 nTopology

In particolare, analizzando i test effettuati tramite *nTopology*, si è giunti alla conclusione che il software non offre ancora il pieno controllo delle operazioni di messa in macchina e slicing. Di seguito si analizza il flusso di lavoro all'interno del programma sopracitato. Tramite l'utilizzo di strumenti specifici all'interno del software stesso, si inizia definendo il volume di lavoro associato alla macchina su cui si effettueranno le operazioni di fabbricazione additiva, all'interno dello spazio di progettazione contenente il modello implicito del componente da realizzare. *nTopology* permette di selezionare un volume di lavoro predefinito tra quelli delle principali stampanti L-PBF. Nel caso studio la fabbricazione sarà effettuata su una macchina EOS M 400-4. In Fig.91 è rappresentato il volume di costruzione con il relativo piano di stampa e direzione di costruzione.

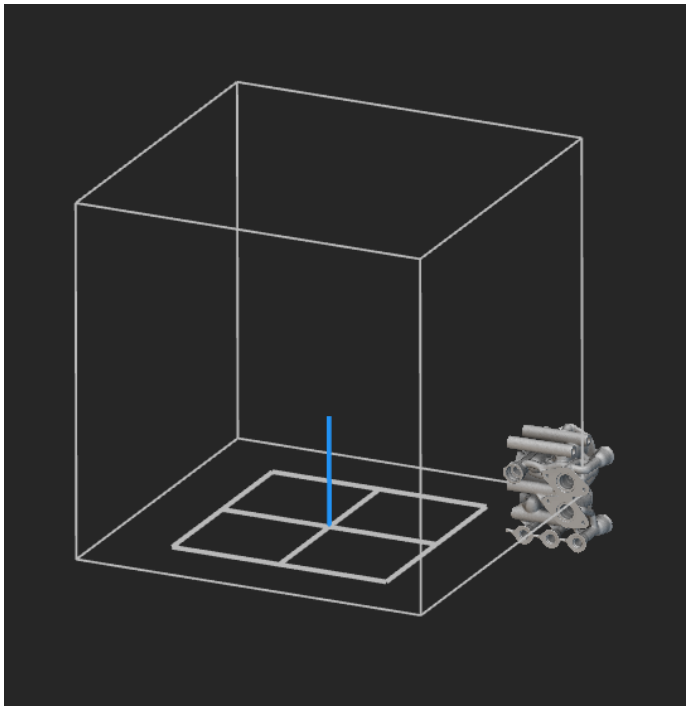


Figura 91: Volume e piano di costruzione di una macchina EOS 400-4

Definito quindi il volume di costruzione disponibile, si passa all'inserimento di due piani ausiliari, paralleli al piano di stampa, con un offset pari a $1,5\,mm$ e $5\,mm$. La geometria così creata è il frutto di alcune considerazioni sul processo di fabbricazione del componente studiato. I piani creati rappresentano infatti l'altezza rispetto al piano di costruzione dove le parti vere e proprie saranno realizzate. Nel caso in cui il componente venga costruito direttamente sul piano di stampa, si considera il piano con offset pari a $1\,mm$. Tale valore rappresenta la quantità di sovrametallo da

applicare alle superfici inferiori del modello al fine di garantire un solido ancoraggio alla piattaforma di stampa e spazio sufficiente per effettuare il distacco delle parti dal piano tramite elettroerosione a filo. Nel caso, invece, di ancoraggio delle parti alla piattaforma di costruzione tramite strutture di supporto, si utilizza il piano definito con offset pari a $5\,mm$, in modo da garantire uno spazio sufficiente per la rimozione dei supporti stessi a valle del processo di fabbricazione. Si passa ora all'orientazione del pezzo all'interno del volume di stampa tramite un algoritmo che permette di calcolare le migliori orientazione indagando quelle che presentano il minor numero di strutture di supporto. Analizzate le alternative proposte dal software, si è scelta quella migliore. Si è quindi applicata una rotazione di 10 al modello al fine di limitare l'esposizoine di superfici perpendicolari alla direzione della lama del sistema di distribuzione delle polveri. Occorre infatti considerare la direzione di ricoprimento della polvere durante il processo produttivo. Nel caso in esame il recoater si muoverà lungo la direzione X della macchina, in entrambi i versi, per aumentare la velocità di produzione, utilizzando una lama con bordo in silicone. È necessario minimizzare l'area di contatto tra i componenti e la lama al fine di evitare urti e collisioni tra gli stessi, con conseguente rischio di danneggiamento di entrambe le parti. Nel caso di danneggiamento della lama in silicone, la stessa presenterà dei solchi in corrispondenza della zona coinvolta nell'urto, a causa dei quali il ricoprimento degli strati di polvere sucessivi non sarà più uniforme. Nel caso di danneggiamento della parte in produzione si possono creare difetti durante il processo produttivo, tra cui il crollo di strutture sottili e fragili, come, ad esempio, le strutture di supporto, con conseguenze disastrose per la corretta riuscita del processo di fabbricazione. Una volta ruotato il pezzo nella direzione desiderata, tramite un strumento interno a *nTopology* si satura la piattaforma di stampa con il numero massimo di parti. In particolare, considerando uno spazio minimo tra le parti pari a $2\,mm$ e un offset dal parimetro di stampa pari a $10\,mm$ si ottiene risultato riportato in Fig.92.

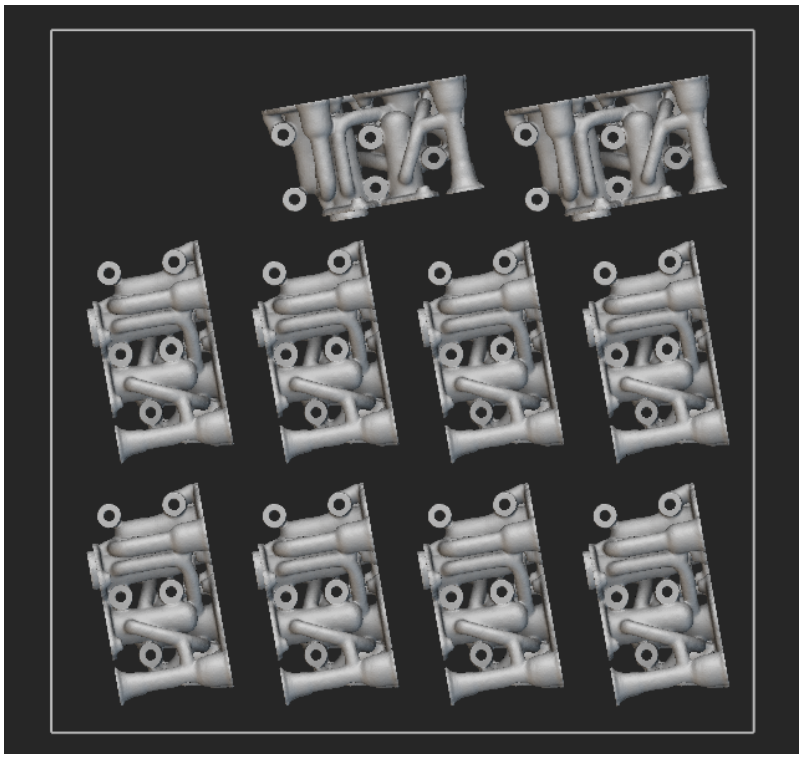


Figura 92: Saturazione del piano di stampa

Osservando il risultato ottenuto, si nota come sia necessario ricollocare le parti poste agli angoli del piano di stampa, in quanto occorre tenere in considerazione, in prima battuta, della presenza delle viti di fissaggio e successivamente della presenza, sugli stessi fori, di golfari atti al sollevamento della piattaforma di costruzione una volta ultimato il processo di fabbricazione. Dopo aver completato la disposizione dei componenti sul piano di stampa si effettuano le operazioni di slicing. *nTopology* permette di effettuare una prima prova di slicing in bianco e nero, ovvero consente di creare uno stack di immagini B&W in sequenza, rappresentanti ogni singolo strato. L'analisi delle immagini così ottenute permette una rapida ed efficace valutazione del processo di produzione. In particolare, si possono facilmente individuare difetti, variazioni delle sezioni e aree a sbalzo. In Fig.93 si riporta l'immagine B&W ottenuta dallo slicing del componente considerato in riferimento al layer numero 29.



Figura 93: Immagine ottenuta dallo slicing B&W

In seguito si passa allo slicing del modello secondo i parametri indicati. Tale operazione genera un toolpath corrispondente al perimetro esterno relativo a ciascun layer. Per ottenere il percorso utensile completo occorre definire la strategia di scansione. Si impostano quindi i seguenti parametri:

- spacing
- stripe width
- stripe gap
- step angle
- start angle

Tali parametri permettono di definire con precisione i valori relativi allo riempimento della parte, chiamato hatch. Si possono impostare la distanza tra due linee di hatch consecutive, la larghezza delle stripe in cui viene suddiviso il pattern di hatch, la distanza tra le stripe stesse e la rotazione relativa da effettuarsi ad ogni cambio di layer. In questo modo si opera un controllo ottimale sulla riduzione degli stress termici e dell'anisotropia del componente, aumentando l'omogeneità delle proprietà meccaniche. In Fig.94 si riporta il risultato ottenuto.

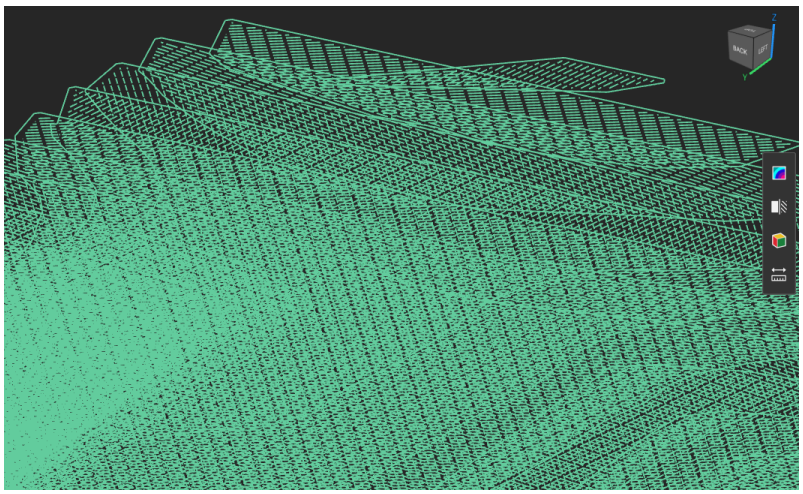


Figura 94: Risultato ottenuto dopo le operazioni di slicing

Osservando l'ingrandimento raffigurato in Fig.94 si nota la presenza delle hatching stripe, orientate secondo i parametri definiti e con la spaziatura prevista. Inoltre, si osserva la rotazione delle stripe a ogni layer, secondo il pattern impostato. Una volta ottenuto il toolpath, *nTopology* permette di esportare il risultato direttamente al software EOSPRINT 2 in formato CLI. Il workflow così definito risulta chiaro e lineare. Inoltre, grazie alla parametrizzazione dell'intero processo, è possibile adattare il flusso di lavoro a diversi componenti in un istante. Tuttavia, il principale problema legato alle operazioni di messa in macchina utilizzando *nTopology* è rappresentato dalla gestione delle strutture di supporto. Il loro inserimento all'interno del modello e la loro modifica richiede un processo estremamente laborioso, in cui si rende necessaria la modellazione degli stessi. Per questo motivo, le operazioni di messa in macchina per la produzione si sono effettuate utilizzando il più diffuso e specifico software *Materialise Magics*.

5.7.2 Materialise Magics

Tramite *Magics* si sono effettuate parallelamente le operazioni di messa in macchina per il componente ottenuto tramite generative design e quello ottenuto per ottimizzazione topologica. Il punto di partenza è l'importazione del modello all'interno del software di preparazione. Si utilizza, in questa fase, il formato di tipo mesh avanzato $.3mf$ ottenuto da *nTopology*. Si passa quindi alla scelta della macchina per la fabbricazione dei componenti, nel caso in esame si tratta di una stampante EOS M 400-4. All'interno del programma viene quindi creata una scena associata al modello di stampante considerato, con i relativi riferimenti. In particolare, all'interno di *Magics* saranno visualizzate le seguenti caratteristiche associate alla macchina:

- volume di produzione
- piattaforma di stampa
- fori di ancoraggio della piattaforma
- aree di competenza associate ai singoli laser
- direzione del flusso del gas inertizzante
- direzione e verso del recoater

Una volta importato il modello e definita la macchina, si analizza il componente prima delle fasi successive. Occorre infatti verificare la bontà della mesh importata. Tramite gli strumenti di analisi della mesh interni a *Magics*, si effettua una diagnosi del modello. Il software è in grado di evidenziare i principali errori in una mesh:

- bordi aperti
- buchi nella mesh
- normali invertite
- triangoli auto-intersecanti
- shell
- triangoli degeneri

Grazie al tool *Fix Wizard* il software è in grado di riparare la maggior parte degli errori individuati in modo automatico. Nel caso di problemi particolarmente complessi, si può ricorrere alla riparazione della mesh in modo manuale, andando ad agire manualmente su un singolo triangolo o gruppi di esso al fine di riparare gli errori riscontrati. Terminata la fase di verifica e riparazione della mesh, si passa alla generazione delle strutture di supporto. Per il caso studio si è sfruttato lo strumento di generazione automatica dei supporti di *Magics*. Così facendo il programma genera in automatico i supporti nelle zone individuate dopo aver impostato dei valori di soglia, come ad esempio l'angolo di overhang. Si ottiene quindi un componente con svariate strutture di supporto. Si passa ora all'analisi delle strutture ottenute in modo automatico, per verificarne l'effettiva necessità. Per i componenti studiati, si è svolto un importante lavoro di pulizia dei supporti, in quanto un gran numero di essi risultavano non indispensabili. Ad esempio, sono state eliminate tutte le strutture di supporto all'interno dei fori e dei canali interni, in quanto risultano essere di un diametro abbastanza piccolo da essere autosupportanti. Inoltre, si sono eliminate molte strutture di supporto che presentavano una conformazione eccessivamente esile. Tali strutture, infatti, risultano piuttosto controproducenti per il processo di fabbricazione, in quanto anche il minimo contatto con la lama del sistema di ricoprimento potrebbe causarne il cedimento, con conseguenze negative per l'intero processo produttivo. Alla fine delle operazioni di rimodellazione delle strutture di supporto, si ottengono i seguenti risultati, riportati in Fig.95.

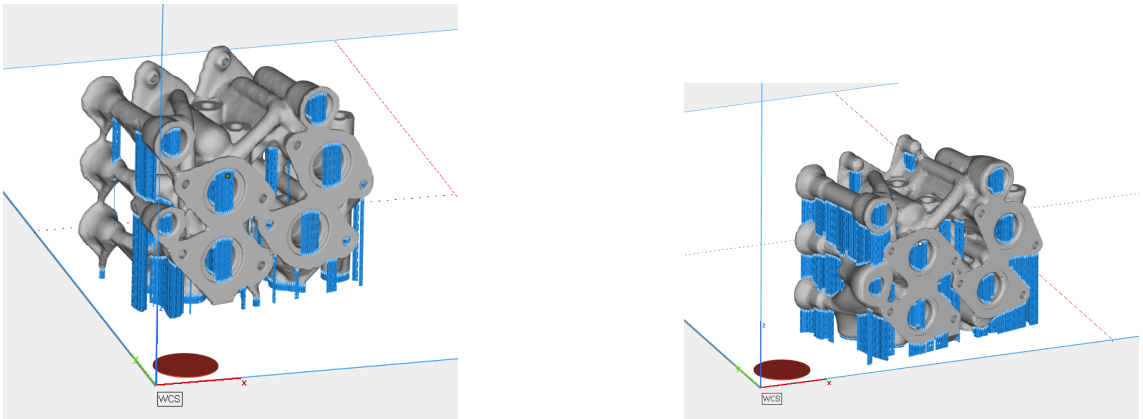


Figura 95: Modelli ottenuti tramite TO e GD con strutture di supporto

Dopo aver completato la fase di posizionamento delle strutture di supporto, si esporta il modello ottenuto per concludere le operazioni di messa in macchina all'interno del software EOSPRINT. Tramite *Magics* si esportano due file differenti, entrambi con estensione *.stl*, per ogni singolo componente, uno relativo alla parte e uno relativo ai supporti. Grazie a questa distinzione è possibile assegnare parametri differenti alle strutture di supporto rispetto al componente in se. Ad esempio, si può risparmiare tempo e materiale scansionando la sezione riferita alle strutture di supporto a layer alternati. Una volta importati entrambi i file relativi al modello considerato su EOSPRINT si possono modificare i parametri di processo. Si può intervenire su una moltitudine di parametri, come ad esempio quelli relativi al laser, ai parametri di scansione, di processo, termici, di supporto e di build&quality. Per il caso studio in esame si sono utilizzati i set di parametri impiegati dal CIM, sviluppati grazie a prove estensive su diversi modelli e materiali. In particolare, si sono effettuate due prove per ogni componente, modificando l'altezza del layer e analizzando le differenze in termini di durata del processo produttivo. Per quanto riguarda il modello ottenuto per ottimizzazione topologica, in Fig.96 si riporta il risultato ottenuto con altezza del layer pari a $40\,\mu m$. Utilizzando i parametri riportati

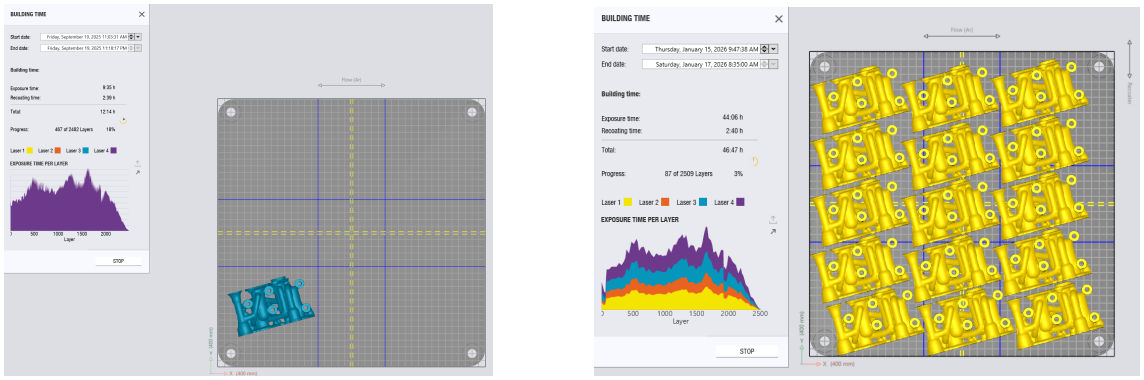


Figura 96: Tempi di stampa con altezza del layer pari a $40\,\mu m$

precedentemente, si ottiene un tempo di produzione della singola parte pari a $12\,h$ e $14\,min$, mentre, se si considera il piano di stampa saturato con 15 parti il tempo totale arriva a $41\,h$ e $22\,min$. Modificando, invece, l'altezza del layer fino a $80\,\mu m$, si ottiene il risultato riportato in Fig.97.

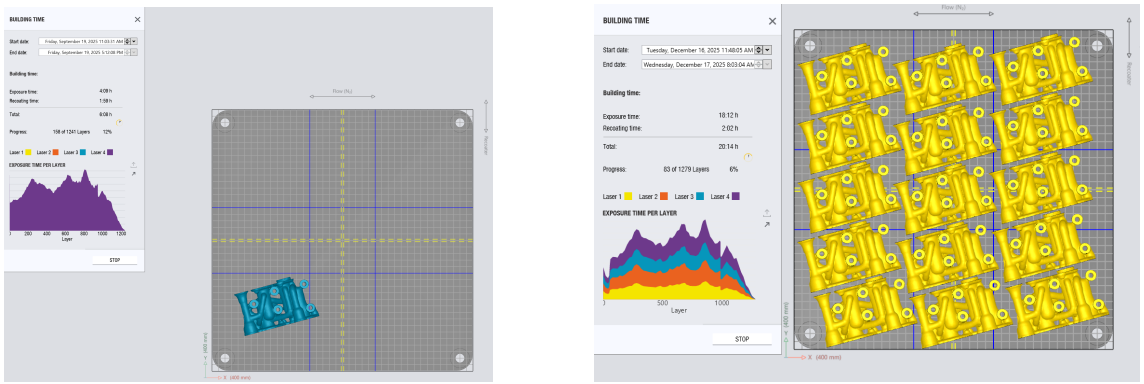


Figura 97: Tempi di stampa con altezza del layer pari a $80\,\mu m$

Con questa configurazione, il tempo di stampa per un singolo componente risulta pari a $6\,h$ e $8\,min$, mentre per il piano saturato si arriva a $20\,h$ e $14\,min$. Si riportano ora le medesime considerazioni in relazione al componente ottenuto tramite generative

design. In Fig.98 si osservano i risultati considerando un'altezza del layer pari a $40\,\mu m$. Si osserva che il tempo impiegato per la produzione di un singolo modello è

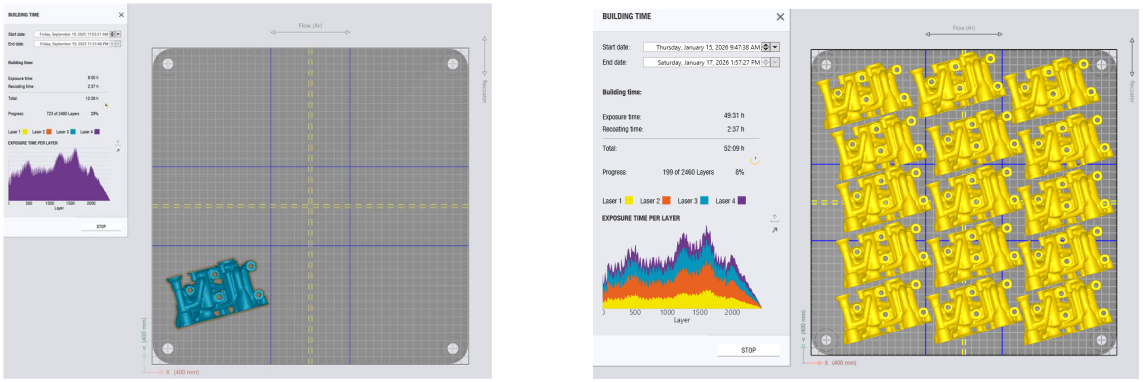


Figura 98: Tempi di stampa con altezza del layer pari a $40\,\mu m$

pari a $12\,h$ e $28\,min$, mentre per l'intera serie di 15 pezzi il tempo risulta essere di $46\,h$ e $44\,min$. Considerando nuovamente uno spessore del layer maggiore, pari a $80\,\mu m$ si ottengono i risultati riportati in Fig.99. Con uno spessore dello strato di polvere più

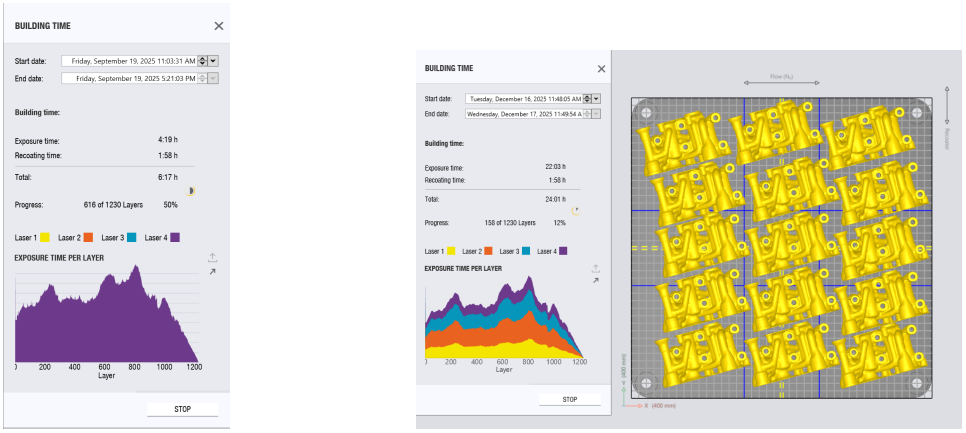


Figura 99: Tempi di stampa con altezza del layer pari a $80\,\mu m$

elevato, il tempo necessario per la fabbricazione di un singolo componente risulta pari a $6\,h$ e $17\,min$, mentre per il piatto di stampa completo si arriva a $24\,h$ e $1\,min$. Infine, si è condotta un'ulteriore prova considerando un singolo componente, con altezza del layer pari a $80\,\mu m$, posto al centro del piano di stampa. La posizione centrale consente l'utilizzo simultaneo dei 4 laser in dotazione alla macchina, riducendo così il tempo di stampa. In Fig.100 si possono osservare i risultati ottenuti. Si osserva come per il modello ottenuto per ottimizzazione topologica, il tempo di stampa per una singola parte, utilizzando 4 laser, scende a $3\,h$ e $24\,min$, mentre per il componente ottenuto tramite generative design il tempo di produzione arriva a $3\,h$ e $29\,min$. Analizzando i modelli ottenuti con i relativi supporti si nota come il componente ottenuto tramite generative design richieda un volume maggiore di strutture di supporto, a causa di un elevato numero aree a sbalzo. La necessità di una quantità maggiore di supporti si riflette anche nei tempi di stampa, i quali risultano leggermente superiori rispetto a quelli relativi al componente ottenuto tramite ottimizzazione topologica. Conoscendo quindi il tempo di stampa per le varie configurazioni è possibile stimare il costo finale delle parti. In particolare, la stima del costo di produzione vede due contributi principali, uno relativo al costo del materiale e uno relativo al costo orario della macchina. La quota relativa al materiale si può stimare considerando il volume



Figura 100: Tempi di stampa con l'utilizzo simultaneo di 4 laser

totale delle parti, visualizzato tramite *Magics*. Il volume totale di materiale di supporto per i componenti ottenuti tramite ottimizzazione topologica risulta essere pari a $393300\,mm^3$, mentre per quelli ottenuti tramite generative design risulta essere pari a $505650\,mm^3$. Il volume considerato tiene conto delle strutture di supporto, per un totale di 15 pezzi, numero che permette la saturazione della piattaforma di saturazione. Considerando quindi la densità del materiale, in questo caso lega di alluminio AlSi10Mg, pari a $2,67\,g/cm^3$, si ottiene la massa totale come segue:

$$Massa_{totale} = Massa_{componente} + Volume_{supporti} * Densita'$$

Si ottiene perciò una massa totale pari a $7942,65\,g$ per il modello ottenuto tramite ottimizzazione topologica e pari a $8220,6\,g$ per il modello ottenuto tramite generative design. Considerando ora il costo della polvere di AlSi10Mg pari a circa $50\,/kg$, si ottiene un costo totale del materiale pari a $397,12$ per il componente ottenuto tramite TO, mentre per il componente ottenuto tramite GD il valore risulta pari a $411,03$. Analizzando infine il tempo di stampa necessario per i due modelli, considerando un costo orario della macchina pari a $100\,/ora$ e considerando il tempo di stampa per entrambe le configurazioni di altezza del layer, si ottengono i costi riportati in Tab.5.13. Si riporta, infine, il costo stimato totale ottenuto considerando il costo

Modello	Altezza layer $[\mu m]$	Tempo di stampa $[h]$	Costo macchina [€]
TO	40	41,37	4137
TO	80	20,23	2023
GD	40	46,73	4673
GD	80	24,02	2402

Tabella 5.13: Costo macchina relativo a ogni configurazione

relativo al materiale e quello relativo al costo orario della stampante. I risultati finali sono riportati in Tab.5.14.

Osservando i risultati riportati in Tab.5.14 si nota come il costo orario della macchina sia la voce nettamente più importante sul costo totale. Poichè i modelli presentano una geometria simile, la differenza principale risiede nei parametri di processo, in particolare sulla scelta dell'altezza del layer. Considerando un altezza

Modello	Altezza layer [µm]	Costo materiale [€]	Costo macchina [€]	Costo totale [€]	Costo singola parte [€]
TO	40	397.12	4137	4534.12	302.27
TO	80	397.12	2023	2420.12	161.34
GD	40	411.03	4673	5084.03	338.94
GD	80	411.03	2402	2813.03	187.54

Tabella 5.14: Costo macchina relativo a ogni configurazione

del layer pari a $40\,\mu m$ si ottiene una qualità superficiale maggiore, con rugosità contenutà e precisione dimensionale migliore. Tuttavia, i tempi di stampa risultano più elevati. Si nota come il costo associato alle ore di stampa risulti pari a circa il 90% del costo totale. Utilizzando, invece, un'altezza del layer pari a $80\,\mu m$, si ottiene una rugosità superficiale maggiore, con prestazioni meccaniche leggermente inferiori rispetto ad uno spessore dello stato di polvere inferiore, a causa di una microstruttura più grossolana. I tempi di stampa, tuttavia, risultano decisamente inferiori rispetto al caso analizzato precedentemente, con una diretta conseguenza sui costi legati al tempo macchina. Infatti, la percentuale associata a tali costi risulta essere intorno a 83%, con piccole variazioni in base al modello considerato. In un'ottica di produzione di serie del componente il layer da utilizzare sarebbe quello da $80\,\mu m$, in quanto permette, come analizzato, di massimizzare la produttività e allo stesso tempo di minimizzare i costi.

6 Conclusioni

L'obiettivo primario del lavoro di tesi presentato è il confronto tra i criteri di progettazione, ormai consolidati, dell'ottimizzazione topologica, e quelli, ancora in fase di sviluppo, del generative design. Si è portato avanti un confronto tra le due metodologie di progettazione analizzando un caso studio reale, con vincoli piuttosto complessi, al fine di indagare le potenzialità di entrambe le possibilità di progettazione. In particolare, la riprogettazione del componente studiato, il corpo di una complessa valvola idraulica appartenente alle supercar prodotte da Ferrari, mirava alla massima riduzione possibile del peso del blocco stesso, unitamente alla riduzione del costo unitario, imponendo vincoli sul mantenimento delle geometrie fondamentali per il corretto funzionamento della parte e sulle prestazioni meccaniche. Il lavoro di riprogettazione ha dato esito positivo per entrambe le metodologie di ottimizzazione. In particolare, il risultato ottenuto tramite ottimizzazione topologica e generative design risulta molto simile. Infatti, i componenti finali riportano un peso pressocché identico, con alcune differenze sulla geometria e sulla distribuzione del materiale all'interno del volume solido. È stato necessario porre particolare attenzione alla modellazione dei collegamenti filettati, in quanto, fin dalle prime analisi strutturali, essi risultavano essere la parte più critica del corpo valvola. Si è portato avanti uno studio sperimentale utilizzando diversi software per la corretta modellazione dei collegamenti filettati, al fine di ottenere risultati coerenti e soddisfacenti per il problema in esame. Infine, una volta ottenuti e validati i design finali per TO e GD, si è analizzata la fase di messa in macchina dei componenti, portando avanti una stima dei costi finali. I componenti ottimizzati hanno dimostrato la validità e l'efficacia dei processi di riprogettazione, raggiungendo i seguenti risultati:

- **Ottimizzazione topologica**: peso del componente finale pari a $459,51\,g$, corrispondente ad un risparmio di peso del $75,82\%$ rispetto al blocco valvola originale.
- **Generative design**: peso del componente finale pari a $458,04\,g$, corrispondente ad un risparmio di peso del $75,89\%$ rispetto al blocco valvola originale.

Analizzando, invece, le differenze tra ottimizzazione topologica e generative design, si è notato come entrambe le metodologie siano arrivate ad un risultato simile, utilizzando strategie differenti. In particolare, la riprogettazione tramite ottimizzazione topologica, ha prodotto un risultato migliore rispetto al generative design. Osservando, infatti, i modelli finali e la loro messa in macchina, si nota come il componente ottenuto tramite TO presenti un minor numero di strutture di supporto. Durante la fase di ottimizzazione tramite nTopology, l'algoritmo risolutivo del software ha ottimizzato la distribuzione di materiale all'interno del volume solido al fine di ridurre le superfici con angolo di overhang critico riducendo, di conseguenza, la necessità di supporti. Tuttavia, occorre considerare l'importante costo computazionale richiesto da ogni iterazione di ottimizzazione topologica, superiore a

12 h. Inoltre, a seguito di alcune iterazioni del processo di ottimizzazione, è stato comunque necessario intervenire con modifiche di modellazione della parte, al fine di eliminare alcune zone della parte risultate critiche a seguito di una prima analisi strutturale di validazione.

Indagando, invece, la progettazione tramite generative design, si è notato come questo strumento sia particolarmente adatto alla generazione simultanea di una moltitudine di design differenti, offrendo la possibilità di esplorare soluzioni e strutture dalle complesse geometrie organiche. Il processo di calcolo delle soluzioni al problema considerato, portato avanti tramite il software Fusion360, risulta essere molto più leggero e rapido. L'utilizzo di algoritmi di AI e ML, combinato all'utilizzo del cloud computing, permette di velocizzare enormemente il procedimento di risoluzione. Durante lo svolgimento di questo elaborato di tesi, la risoluzione degli studi di progettazione generativa, è risultata essere di un'ordine di grandezza inferiore rispetto a quella riscontrata per la risoluzione di problemi di ottimizzazione topologica. Inoltre, durante la definizione di uno studio di generative design è possibile applicare vincoli sui parametri di processo additivi e, aspetto particolarmente interessante, sui materiali da utilizzare. In particolare, il vincolo sui materiali associati a uno studio di GD, permette di utilizzare la scelta dei materiali stessi come variabile all'interno del problema. Così facendo, si possono esplorare attraverso una singola analisi, diversi design ottenuti tramite l'utilizzo di materiali differenti. Tale possibilità risulta in particolar modo utile per il rapido confronto tra materiali differenti. Utilizzando i grafici personalizzabili durante la fase di scelta delle soluzioni, si possono facilmente evidenziare le proprietà meccaniche sfruttando diversi materiali.

Tuttavia, si sono evidenziati diversi limiti legati a questa metodologia di progettazione. La prima limitazione riscontrata riguarda le zone di mantenimento, o di non design, e quelle di ostacolo. Si è notato come tutte le soluzioni presentate dal software non abbiano rispettato in modo rigoroso la limitazione imposta da tali spazi. Si è reso necessario, infatti, un importante lavoro di modellazione al CAD per il corretto ripristino delle geometrie. In particolare, tramite operazioni booleane è stato necessario ripristinare la geometria associata ai canali interni del blocco valvola, nonchè delle superfici di accoppiamento dei vari accessori installati. Nell'ambito di tali interventi, si sono riscontrate diverse limitazioni legate all'utilizzo di Fusion360. Il programma è risultato spesso limitante e inadeguato allo svolgimento di operazioni di modellazione complesse. Inoltre, la definizione della condizione di carico all'interno del software stesso è stata eccessivamente complessa e laboriosa, dimostrando importanti carenze. Per ovviare a tali problemi, è stato necessario utilizzare altri programmi per la rimodellazione dei risultati ottenuti dal processso di verifica, cosi come anche per le fasi di validazione.

Il generative design rappresenta, quindi, una tecnologia con moltissimo potenziale, tuttavia ancora acerba. Durante le fasi di preparazione del modello durante lo studio di questo elaborato di tesi, si è notato come la progettazione tramite GD abbia raggiunto ottimi risultati per quanto riguarda geometrie con carichi relativamente semplici e vincoli non eccessivamente stringenti. Nell'ambito di studi effettuati con parametri con tali caratteristiche, gli studi generativi hanno dimostrato ottime capacità, proponendo soluzioni innovative e ottimizzate. Nel caso, invece, di una condizione di carico più complessa e uno spazio di design ristretto, abbinato a vincoli più stringenti, si sono ottenuti dei risultati qualitativamente inferiori. È quindi ragionevole immaginare nel prossimo futuro una notevole crescita nelle potenzialità della progettazione tramite generative design. Essendo una metodologia di progettazione particolarmente legata alla manifattura additiva, considerate le potenzialità dell'AM

di realizzare le strutture complesse tipiche del GD, con il crescente sviluppo e la diffusione della stampa 3D, la domanda di software legati all'ottimizzazione e al DfAM seguirà di pari passo. In particolare, risulta necessario un profondo intervento per migliorare la parte CAD, di simulazione e di studio generativo. Occorre migliorare l'applicazione di carichi e vincoli durante la preparazione di uno studio di GD, al fine di sbloccare tutte le potenzialità che questo tipo di progettazione può offrire. È inoltre fondamentale migliorare gli strumenti CAD e di analisi FEM all'interno di programmi di generative design. Si tratta di aspetti fondamentali per garantire un flusso di lavoro più pulito e lineare, dalla progettazione iniziale tramite CAD, alla rimodellazione e verifica dei componenti ottimizzati.

Bibliografia

[1] Matthew McKnight. «Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer». In: *KnE Engineering* 2.1 (feb. 2017), pp. 176–181. DOI: 10.18502/keg.v2i2.612. URL: https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/612.

[2] Formlabs. *Design generativo: cos'è e come viene utilizzato*. 2024. URL: https://formlabs.com/it/blog/design-generativo/ (visitato il giorno 18/03/2024).

[3] Sivam Krish. «A practical generative design method». In: *Computer-aided design* 43.1 (2011), pp. 88–100.

[4] Matteo Bandiera e Enrico Pisino. *L'Intelligenza Artificiale Generativa per l'Industria: una leva per la competitività delle imprese del Made in Italy*. Rapp. tecn. White Paper. CIM4.0 - Competence Industry Manufacturing 4.0, feb. 2025.

[5] Adriano Nicola Pilagatti et al. «Generative Design and new designers' role in the manufacturing industry». In: *Procedia CIRP* 112 (2022), pp. 364–369.

[6] Autodesk. *Fusion 360 Generative Design Introduction - Expert*. Corso online on-demand di Autodesk. 2025. URL: https://www.autodesk.com/learn/ondemand/course/fusion360-generative-design-intro-expert/unit/6OydpHfxthQabNTQ3Kyk1L (visitato il giorno 24/03/2025).

[7] Sachin Kumar et al. «Machine Learning Techniques in Additive Manufacturing: A State of the Art Review on Design, Processes and Production Control». In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2022). Published online: 10 October 2022. DOI: 10.1007/s00170-022-10252-3.

[8] C. Wang et al. «Machine Learning in Additive Manufacturing: State-of-the-Art and Perspectives». In: *Additive Manufacturing* 36 (2020), Article 101538. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101538. URL: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101538.

[9] Oliver Kramer e Oliver Kramer. *Genetic algorithms*. Springer, 2017.

[10] M. P. Bendsøe. «Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem». In: *Structural Optimization* 1.4 (1989), pp. 193–202. DOI: 10.1007/BF01650949. URL: https://doi.org/10.1007/BF01650949.

[11] O. M. Querin. *Topology Design Methods for Structural Optimization*. Academic Press, 2017.

[12] G. Rozvany. *The SIMP Method in Topology Optimization – Theoretical Background, Advantages and New Applications*. Conference paper. Accessed 24 March 2025. 2000. DOI: 10.2514/6.2000-4738. URL: https://doi.org/10.2514/6.2000-4738.

[13] Formlabs. *Ottimizzazione Topologica: Cos'è e Come Funziona*. Consultato il 24 marzo 2025. 2025. URL: https://formlabs.com/it/blog/ottimizzazione-topologica/ (visitato il giorno 24/03/2025).

[14] János Lógó e Hussein Ismail. «Milestones in the 150-Year History of Topology Optimization: A Review». In: *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences (CAMES)* 27.2–3 (2020), pp. 97–132. DOI: 10.24423/cames.296.

[15] L. Berke e N. S. Khot. *Use of Optimality Criteria Methods for Large Scale System*. AGARD Lecture Series 70, pp. 1–29. Consultato il 24 marzo 2025. 1974. URL: https://ci.nii.ac.jp/naid/20000182383/.

[16] K. Svanberg. «The method of moving asymptotes–a new method for structural optimization». In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 24.2 (1987), pp. 359–373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.

[17] Evangelos Tyflopoulos et al. «State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs». In: *NordDesign 2018*. Linköping, Sweden, ago. 2018.

[18] G. I. N. Rozvany. *Structural Design via Optimality Criteria*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. DOI: 10.1007/978-94-009-1161-1. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-009-1161-1.

[19] G. I. N. Rozvany. «Shape and Layout Optimization of Structural Systems and Optimality Criteria Methods». In: *CISM Courses and Lectures*. 325. Wien: Springer-Verlag, 1992. DOI: 10.1007/978-3-7091-2788-9. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2788-9.

[20] Y. M. Xie e G. P. Steven. «A Simple Evolutionary Procedure for Structural Optimization». In: *Computers & Structures* 49 (1993), pp. 885–896.

[21] P. Hajela, E. Lee e C. Y. Lin. «Genetic Algorithms in Structural Topology Optimization». In: *Topology Design of Structures*. A cura di M. P. Bendsøe e C. A. M. Soares. Vol. 227. NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences. Dordrecht: Springer, 1993, pp. 117–133. DOI: 10.1007/978-94-011-1804-0_10. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-011-1804-0_10.

[22] Francesco Daino. «Studio sull'uso dei materiali compositi nel design contemporaneo». Tesi consultata internamente. Tesi di laurea magistrale. Università degli Studi di Firenze, 2023.

[23] ISO/ASTM. *ISO/ASTM 52900:2021 — Additive Manufacturing — General Principles — Fundamentals and Vocabulary*. International Standard. Standard ISO/ASTM 52900:2021, disponibile su https://www.iso.org/standard/74514.html. 2021.

[24] Luca Iuliano et al. *La manifattura additiva: un fattore chiave per l'industria. Scenari e linee guida per le imprese del Made in Italy*. Rapp. tecn. White paper. CIM4.0 - Competence Center, mar. 2024.

[25] Heiner Lasi et al. «Industry 4.0». In: *Business & information systems engineering* 6 (2014), pp. 239–242.

[26] Microsoft Azure. *Che cos'è il cloud computing?* Consultato il 7 aprile 2025. 2024. URL: https://azure.microsoft.com/it-it/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-cloud-computing (visitato il giorno 07/04/2025).

[27] Michael Nofer et al. «Blockchain». In: *Business & information systems engineering* 59 (2017), pp. 183–187.

[28] *ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing – General principles – Terminology*. 2021.

[29] BCN3D Technologies. *Introduction to Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing Technology*. White Paper. WH-03-EN-v1.2, consultato il 7 aprile 2025. BCN3D, 2019. URL: https://www.bcn3d.com.

[30] Marek Pagac et al. «A review of vat photopolymerization technology: materials, applications, challenges, and future trends of 3D printing». In: *Polymers* 13.4 (2021), p. 598.

[31] J.P.M. Pragana et al. «Hybrid metal additive manufacturing: A state–of–the-art review». In: *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 2 (2021), p. 100032. ISSN: 2666-9129. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100032. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666912921000027.

[32] unknown. *Schema del processo Multi Jet Fusion*. Fonte web sconosciuta, immagine rielaborata per scopi didattici. 2025.

[33] Freeman Technology. *Developing an Effective Metal Powder Specification for Binder Jet 3D Printing*. Consultato l'8 aprile 2025. 2023. URL: https://www.freemantech.co.uk/news/developing-an-effective-metal-powder-specification-for-binder-jet-3d-printing (visitato il giorno 08/04/2025).

[34] ebrary.net. *Material Jetting Printing Methods*. Consultato l'8 aprile 2025. 2023. URL: https://ebrary.net/158162/engineering/material_jetting_printing_methods (visitato il giorno 08/04/2025).

[35] Torsten Petrat et al. «Microstructure of Inconel 718 parts with constant mass energy input manufactured with direct energy deposition». In: *Procedia Manufacturing* 36 (gen. 2019), pp. 256–266. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.08.033.

[36] Engineering Product Design. *Sheet Lamination*. Consultato l'8 aprile 2025. 2023. URL: https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/ (visitato il giorno 08/04/2025).

[37] Emre Tascioglu et al. «Machining-induced surface integrity of Inconel 718 alloy fabricated by powder bed fusion additive manufacturing under various laser processing parameters». In: *Machining Science and Technology* 26 (dic. 2021), pp. 1–23. DOI: 10.1080/10910344.2021.1998107.

[38] Harvard Business Review. *The Limits of 3D Printing*. Harvard Business Review Digital Articles. 23 Giu. 2015. URL: https://hbr.org/2015/06/the-limits-of-3d-printing (visitato il giorno 24/03/2025).

[39] Jason Bromberger e Richard Kelly. *Additive Manufacturing: A Long-Term Game Changer for Manufacturers*. Accesso effettuato il 13 novembre 2018. McKinsey & Company. 2018. URL: https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/additive-manufacturing-a-long-term-game-changer-for-manufacturers (visitato il giorno 13/11/2018).

[40] Autodesk Research. *Project Dreamcatcher*. Consultato il 24 marzo 2025. 2025. URL: https://www.research.autodesk.com/projects/project-dreamcatcher/ (visitato il giorno 24/03/2025).

[41] British Stainless Steel Association. *The Development of Aluminium Additive Manufacturing*. Consultato l'8 aprile 2025. 2023. URL: https://bssa.org.uk/the-development-of-aluminium-additive-manufacturing/ (visitato il giorno 08/04/2025).

[42] Renishaw plc. *Industrial Applications of Renishaw Metal Additive Manufacturing Technology*. Consultato l'8 aprile 2025. 2023. URL: https://www.renishaw.com/en/industrial-applications-of-renishaw-metal-additive-manufacturing-technology--15256 (visitato il giorno 08/04/2025).

[43] 3DPrint.com. *Reducing Part Count with 3D Printing: What Are the Advantages?* Consultato l'8 aprile 2025. 2021. URL: https://3dprint.com/284009/reducing-part-count-with-3d-printing-what-are-the-advantages/ (visitato il giorno 08/04/2025).

[44] 3Dnatives. *Dental Additive Manufacturing: How is 3D Printing Used in Dentistry?* Consultato l'8 aprile 2025. 2023. URL: https://www.3dnatives.com/en/dental-additive-manufacturing-250220195/ (visitato il giorno 08/04/2025).

[45] Today's Medical Developments. *Renishaw's Additive Manufacturing Creates Orthopedic Implants*. Consultato l'8 aprile 2025. 2021. URL: https://www.todaysmedicaldevelopments.com/news/renishaw-additive-manufacturing-orthopedic-implants/ (visitato il giorno 08/04/2025).

[46] Lorenzo Ansaldi e Fabrizio Ricci. *Riprogettazione di un componente per fabbricazione additiva tramite L-PBF*. Elaborato di progetto universitario. Progetto del corso Tecniche di Fabbricazione Additiva, rel. prof.ssa Manuela Galati. 2024.

[47] Fabrizio Ricci. *Foto piattaforma SLM*. Scatto personale realizzato presso CIM4.0. 2025.

[48] Novick Europe. *Novicut AM 3D – Metal 3D Printed Support Removal Machine*. Immagine consultata l'8 aprile 2025. 2024. URL: https://novick.eu/novicut-3d-am-additive-cutting/novicut-am-3d-metal-3d-printed-support-removal-machine-the-best-way-to-remove-3d-metal-printed-parts-from-build-platform (visitato il giorno 08/04/2025).

[49] Martin Leary et al. «Design for Additive Manufacturing: A Method to Explore Unexplored Regions of the Design Space». In: *Additive Manufacturing* 12 (2016), pp. 1–17. ISSN: 2214-8604. DOI: 10.1016/j.addma.2016.05.003. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221486041630286X.

[50] Flaviana Calignano. «Slide del corso "Tecniche di Fabbricazione Additiva"». Dispense fornite durante il corso presso il Politecnico di Torino. 2024.

[51] Gladys D. Goh et al. «Additive Manufacturing Design Principles: A Roadmap for Design for AM». In: *Design Studies* 80 (2022), p. 101073. DOI: 10.1080/09544828.2022.2136478. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09544828.2022.2136478.

[52] CIM4.0. «Presentazione CIM4.0». Presentazione PowerPoint, CIM4.0. 2025.

[53] CIM4.0. *Chi siamo – CIM4.0*. Consultato il 24 marzo 2025. 2025. URL: https://cim40.com/chi-siamo/ (visitato il giorno 24/03/2025).

[54] Ferrari S.p.A. *Sito ufficiale Ferrari*. Consultato l'8 aprile 2025. 2025. URL: https://www.ferrari.com/it-IT (visitato il giorno 08/04/2025).

[55] Cristiano Rissone. «Analisi di fattibilità tecnico-economica di un componente per il settore luxury automotive in Metal Binder Jetting». Tesi consultata internamente. Tesi di laurea magistrale. Politecnico di Torino, 2024.

[56] Autodesk Inc. *Fusion 360 – Panoramica del prodotto*. Consultato l'8 aprile 2025. 2025. URL: https://www.autodesk.com/it/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription#top (visitato il giorno 08/04/2025).

[57] nTopology Inc. *nTop – Design Software for Advanced Engineering*. Consultato l'8 aprile 2025. 2025. URL: https://www.ntop.com/ (visitato il giorno 08/04/2025).

[58] Siemens Digital Industries Software. *Siemens NX – Software di Progettazione Avanzata*. Consultato l'8 aprile 2025. 2025. URL: https://plm.sw.siemens.com/it-IT/nx/ (visitato il giorno 08/04/2025).

[59] Materialise NV. *Materialise – Innovators You Can Count On*. Consultato l'8 aprile 2025. 2025. URL: https://www.materialise.com/en (visitato il giorno 08/04/2025).

[60] EOS GmbH. *Material Data Sheet: EOS Aluminium AlSi10Mg*. Accessed: 7 October 2025. Electro Optical Systems GmbH. 2022. URL: https://www.eos.info/en/material-pdfs/metal-materials/eos-aluminium-alsi10mg.pdf.

[61] ANSYS Inc. *Bolt Pretension Object: Modeling the Bolt and Preload*. PDF interno. Presentazione tecnica su Ansys Mechanical. 2023.

[62] *UNI EN ISO 898-1:2013 - Proprietà meccaniche degli elementi di fissaggio di acciaio al carbonio e di acciaio legato - Parte 1: Viti e prigionieri*. ISO 898-1:2013, EN ISO 898-1:2013. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2013.

Ringraziamenti

Ringrazio il Professore Luca Iuliano per avermi dato la possibilità di svolgere il lavoro di tesi presso il CIM, azienda di cui è presidente, offrendomi l'opportunità di approfondire e applicare quanto appreso durante il corso di studi appena concluso.

Un ringraziamento speciale va a tutti i ragazzi e le ragazze del CIM per avermi accolto e guidato durante un'importante fase della mia crescita accademica e professionale. In particolare, desidero esprimere la mia gratitudine all'Ingegnere Bernardo Puddu per la disponibilità e il supporto costante durante tutte le fasi dello sviluppo del lavoro di tesi.

Infine, ringrazio i miei amici e la mia famiglia per esserci sempre stati, soprattutto nei momenti più difficili di questo percorso.