

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione con Generative Design di piastre di sterzo motociclistiche
realizzate tramite fabbricazione additiva – Design with Generative
Design method of motorcycle triple clamps made by additive
manufacturing**



**Politecnico
di Torino**

Relatori:

Ing. Manuela Galati

Prof. Luca Iuliano

Ing. Marco Viccica

Candidato:

Alberto Terazzi

Anno Accademico 2021/2022

|

Sommario

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 2 – REVIEW BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1 Generative Design	3
Applicazioni nel mondo del Motorsport	4
2.2 Software	13
Metodo FEM	15
2.3 Tecniche di fabbricazione additiva per metalli	19
Tecnologia L-PBF	20
2.4 Design for Additive Manufacturing	21
Vincoli	22
Supporti	29
Strutture Lattice	31
CAPITOLO 3 - MATERIALI E METODI.....	39
3.1 Materiali	39
3.2 Panoramica sulle piastre di sterzo	41
3.3 Individuazione del sistema di carichi	45
3.4 Impostazione del modello	50
Piastra inferiore	50
Piastra superiore	53
Criteri di progettazione	56
Materiali di studio	58
CAPITOLO 4 – ANALISI DEI RISULTATI.....	59
4.1 Analisi modelli generativi	59
Piastra superiore	59
Piastra inferiore	65
4.2 ottimizzazione piastre	70
Piastra superiore	71
Piastra inferiore	79
5 - CONCLUSIONI.....	86
BIBLIOGRAFIA	88

Indice delle figure

Fig. 1 - diagramma di flusso del processo di GD.....	4
Fig. 2 - bicicletta da cronometro Van Rysel	5
Fig. 3 - pedivella realizzata mediante fabbricazione additiva	6
Fig. 4 - pedivella realizzata con macchina utensile 5 assi.....	6
Fig. 5 - macchina utilizzata da Sram per la produzione della pedivella.....	8
Fig. 6 - confronto bici AM con bicicletta in fibra di carbonio	8
Fig. 7 - Cagiva C590.....	10
Fig. 8 - superbike lightning con forcellone prodotto mediante AM	11
Fig. 9 - forcellone per motocicletta realizzato tramite additive	12
Fig. 10 - motocicletta in alluminio APWorks	13
Fig. 11 - percorso di progettazione GD.....	14
Fig. 12 - esempio mesh esaedrica e tetraedrica	16
Fig. 13 - percorso preparazione modello.....	19
Fig. 14 - processo L-PBF	20
Fig. 15 - strategia scansione EOS	21
Fig. 16 - rimozione polvere da componente cavo	23
Fig. 17 - orientamento del componente rispetto a re-coater	23
Fig. 18 - collasso di superfici a sbalzo inclinate	24
Fig. 19 - inclinazione superfici rispetto alla base.....	24
Fig. 20 - pareti sottili con e senza supporti.....	25
Fig. 21 - pareti alte con sezione ridotta	25
Fig. 22 - struttura triangolare	26
Fig. 23 - provino con distanze tra pareti variabili tra 0.1 e 1mm	26
Fig. 24 - giunto a sfera	27
Fig. 25 - zona critica nei fori.....	27
Fig. 26 - problemi nei fori per dimensione	28
Fig. 27 - sezioni alternative più comuni per fori.....	28
Fig. 28 - a)supporto completo b)supporto esterno c)rotazione parte d)supporti minimizzati	29
Fig. 29 - supporto interno alla struttura	29
Fig. 30 - tipologie di contatto supporti-parte	30
Fig. 31 - tipi di supporti e finitura superficiale della piastra dopo rimozione	31
Fig. 32 - esempio riempimento di un volume.....	32
Fig. 33 - esempio sostituzione di un volume	32
Fig. 34 - lattice eterogeneo.....	33
Fig. 35 - esempio planar lattice	34
Fig. 36 - strutture strut-based standard e composte con relative deformazioni sotto carico assiale	35
Fig. 37 - equazioni di base per strutture TPMS	36
Fig. 38 - esempi strutture TPMS	36
Fig. 39 - combinazione di velocità e potenza laser per evitare difetti	38
Fig. 40 - a)serie di sterzo b)vista esplosa serie sterzo	42
Fig. 41 - a)Jotagas JT300 2013 b)dettaglio finitura superficiale	44
Fig. 42 - misure fondamentali modelli CAD	44
Fig. 43 - modello CAD piastra superiore originale	45
Fig. 44 - modello CAD piastra inferiore originale	45
Fig. 45 - forze agenti durante una frenata di emergenza.....	46
Fig. 46 - inclinazione della forza durante impennata e frenata.....	48

Fig. 47 - modello di manubrio semplificato	49
Fig. 48 - geometria di mantenimento piastra di sterzo inferiore	51
Fig. 49 - vista posteriore e dal basso piastra "alta"	51
Fig. 50 - vista dall'alto e inferiore piastra "bassa"	52
Fig. 51 - condizioni di carico torsione destra e sinistra	52
Fig. 52 - condizione di carico $F_{d,z}$	53
Fig. 53 - condizione di carico $F_{d,y}$	53
Fig. 54 - geometrie di mantenimento piastra superiore	53
Fig. 55 - geometrie di ostacoli cilindriche	54
Fig. 56 - piastra "bassa" con inserto	54
Fig. 57 - piastra "alta"	54
Fig. 58 - condizioni di carico torsione destra e sinistra piastra superiore	55
Fig. 59 - condizione di carico $F_{d,z'}$	55
Fig. 60 - condizione di carico $F_{d,y'}$	56
Fig. 61 - condizioni di carico frenata di emergenza e impennata	56
Fig. 62 - modulo "additivo" per leghe di alluminio	57
Fig. 63 - modelli generativi orientazioni $x+$, $y+$, $z+$, $x-$, $y-$ e $z-$	60
Fig. 64 - supporti consigliati orientamenti $x+$ e $x-$	61
Fig. 65 - supporti consigliati orientamento $z+$	61
Fig. 66 - supporti consigliati orientamenti $y+$ e $y-$	62
Fig. 67 - piastra superiore $z+$ con prefiori e taglio	63
Fig. 68 - modelli generativi orientazioni $x-$, $y-$, $z-$, $x+$, $y+$ e $z+$	64
Fig. 69 - supporti consigliati orientamenti $x-$ e $x+$	64
Fig. 70 - supporti consigliati orientamenti $y-$ e $y+$	64
Fig. 71 - supporti consigliati orientamenti $z-$ e $z+$	65
Fig. 72 - modelli generativi orientazioni $x+$, $y+$, $z+$, $x-$ e $z-$	66
Fig. 73 - supporti consigliati orientamenti $x-$ e $x+$	67
Fig. 74 - supporti consigliati orientamenti $y-$ e $y+$	68
Fig. 75 - supporti consigliati orientamenti $z-$ e $z+$	68
Fig. 76 - modelli generativi orientazioni $x+$, $z+$, $x-$, $y-$ e $z-$	69
Fig. 77 - supporti consigliati orientamento $y-$	69
Fig. 78 - supporti consigliati orientamenti $z-$ e $z+$	70
Fig. 79 - andamento fattore di sicurezza carichi $F_{d,z}$ e $F_{d,y}$	72
Fig. 80 - andamento fattore di sicurezza torsione sinistra e destra	72
Fig. 81 - spostamenti [mm] totali carico $F_{d,z}$	73
Fig. 82 - spostamenti totali [mm] carico $F_{d,z}$ e sistema realistico	74
Fig. 83 - andamento fattore di sicurezza carichi $F_{d,z}$ e $F_{d,y}$ con sistema realistico	74
Fig. 84 - andamento fattore di sicurezza torsione destra e sinistra con sistema realistico	75
Fig. 85 - dettaglio geometrie di mantenimento prima e dopo le modifiche	75
Fig. 86 - dettaglio struttura lattice	76
Fig. 87 - vista in sezione della piastra con le aperture create	76
Fig. 88 - dettagli spigoli vivi prima e dopo le modifiche	77
Fig. 89 - andamento fattore di sicurezza carichi $F_{d,z}$ e $F_{d,y}$ componente definitivo	78
Fig. 90 - andamento fattore di sicurezza torsione destra e sinistra componente definitivo	78
Fig. 91 - andamento fattore di sicurezza carico $F_{d,z}$	79
Fig. 92 - andamento fattore di sicurezza $F_{d,y}$	79
Fig. 93 - andamento fattore di sicurezza torsione destra e sinistra	80
Fig. 94 - valori spostamento totale [mm] carico $F_{d,z}$	81
Fig. 95 - sistema realistico	81

Fig. 96 - andamento fattore di sicurezza $F_{d,z}$ configurazione realistica	82
Fig. 97 - andamento fattore di sicurezza torsione destra configurazione realistica	82
Fig. 98 - dettaglio spigolo vivo critico prima e dopo le modifiche.....	83
Fig. 99 - aspetto piastra dopo le modifiche	83
Fig. 100 - andamento fattore di sicurezza $F_{d,z}$ componente definitivo.....	84
Fig. 101 - andamento coefficiente di sicurezza torsione destra componente definitivo.....	85
Fig. 102 - aspetto definitivo del sistema di sterzo.....	87
Fig. 103 - aspetto sistema di sterzo originale.....	87

Indice delle tabelle

Tab. 1 - proprietà meccaniche leghe AlSi10Mg e AlSi7Mg.....	40
Tab. 2 - proprietà meccaniche lega Al2139AM	40
Tab. 3 - caratteristiche resistenziali tipiche lega Ti6Al4V	41
Tab. 4 - risultati modelli lega di alluminio e componente originale.....	60
Tab. 5 - dati risultati modelli generativi lega di titanio	63
Tab. 6 - dati risultati modelli generativi lega di alluminio e componente originale.....	66
Tab. 7 - dati risultati modelli generativi lega di titanio	68
Tab. 8 - dati modelli scelti.....	70
Tab. 9 - valori di spostamento massimi per condizione di carico.....	72
Tab. 10 - valori spostamento massimo per condizione di carico configurazione reale	74
Tab. 11 - valori dei massimi spostamenti a seguito delle modifiche.....	77
Tab. 12 - valori di spostamento massimi per condizione di carico.....	80
Tab. 13 - valori di spostamento massimi per condizione di carico configurazione realistica	82
Tab. 14 - valori spostamento massimi per condizione di carico modello definitivo	84

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

In molti sport motoristici ridurre il peso è un aspetto fondamentale. In generale minore massa equivale a migliore guidabilità, minori consumi e più basso rapporto peso/potenza. Nella disciplina motoristica del “trial” questi vantaggi si traducono nel superamento di ostacoli sempre più impegnativi.

In questo progetto di tesi vengono sfruttate le più avanzate tecniche di ottimizzazione e tecnologie di produzione, cioè il Generative Design e la fabbricazione additiva, con il preciso scopo di minimizzare la massa delle piastre di sterzo di una motocicletta da trial, rispettando prestabiliti vincoli di resistenza e rigidità.

Le piastre fanno parte di un sistema di sterzo che consente di comandare la parte anteriore della motocicletta. Esse sono il tramite attraverso cui le forze imposte sul manubrio si trasmettono agli steli forcella e poi alla ruota, e viceversa. La posizione in cui sono poste è una zona per la quale ridurre masse e inerzie in gioco è fondamentale per facilitare al pilota lo spostamento della ruota anteriore. I modelli finali delle piastre sono progettati per una moto in particolare, ma potenzialmente intercambiabili all'originale per gran parte delle motociclette da trial in commercio, tutte quelle che montano lo stesso modello di forcella da 39 mm di diametro.

Il Generative Design è una tecnica di ottimizzazione che permette di generare diverse alternative di design per un componente, posizionando materiale solo dove serve e nella quantità necessaria per rispettare determinati criteri imposti dal progettista, grazie ad un processo iterativo. La filosofia su cui si basa il Generative Design si sposa perfettamente con l'obiettivo principale del lavoro e la fabbricazione additiva è la tecnologia produttiva che meno limita questa tecnica; infatti, il componente viene fabbricato grazie alla tecnologia additiva L-PBF (Laser-Powder Bed Fusion), che consiste nella fusione selettiva di strati di polvere metallica depositi successivamente. Il metodo utilizzato pone quindi minori vincoli geometrici rispetto alle tecnologie tradizionali utilizzate per produrre piastre di sterzo per moto da trial, come fusione e fresatura, che si traducono in maggiore libertà al posizionamento o non posizionamento di materiale in determinate zone durante la progettazione generativa.

Il lavoro è organizzato in capitoli, ognuno dei quali si prefigge obiettivi necessari al fine di ottimizzare il risultato. La prima parte è una fase di ricerca e informazione; il Generative Design viene analizzato nell'idea, negli obiettivi e nel funzionamento degli algoritmi. Una serie di componenti realizzati con le stesse tecnologie che si vogliono utilizzare per la progettazione e fabbricazione delle piastre viene studiato per comprendere le possibilità offerte e anche i limiti introdotti dall'utilizzo accoppiato dei due strumenti, oltre che confrontati con gli stessi componenti ultraleggeri realizzati grazie a materiali e tecnologie differenti.

Successivamente ad una spiegazione del metodo degli elementi finiti, utilizzato dal software sia durante la progettazione generativa che nelle analisi successive dei componenti, vengono illustrate le tecniche di fabbricazione additiva disponibili per metalli, con particolare attenzione a quelle basate su sorgente laser per cui viene pensata la produzione del componente in esame.

Il funzionamento del processo di fabbricazione additiva è fondamentale per poter progettare un componente da produrre con tale tecnologia. La conoscenza di una serie di regole, limiti e possibilità intrinseche in esso, noti come Design for Additive Manufacturing sono illustrati appena dopo il processo. Nell'ultima parte del capitolo vengono classificate le strutture lattice, cioè geometrie realizzabili grazie alla fabbricazione additiva e che rappresentano una soluzione di alto livello nelle applicazioni dove è necessario combinare leggerezza a elevata resistenza, come nel caso in esame.

Nel capitolo successivo si prende in considerazione il caso studio specifico. Tra i materiali metallici disponibili per additive manufacturing vengono presi in considerazione solo quelli utili alla produzione delle piastre, in particolare leghe di alluminio e di titanio del produttore EOS. Segue una panoramica completa sulle piastre di sterzo, sul loro funzionamento e sugli aspetti che caratterizzano il mercato di questi componenti per moto da trial.

Il primo e fondamentale passo per la progettazione delle nuove piastre è la definizione del sistema di carichi e vincoli, che ne caratterizza il funzionamento durante lo sport trial e non solo, con attenzione alle condizioni peggiori possibili che si possono presentare.

Stabilite le sollecitazioni, l'ultima parte del capitolo illustra tutti i passaggi seguiti per l'impostazione del modello generativo all'interno del software Autodesk Fusion 360. Il primo passo è la creazione delle geometrie CAD 3D di mantenimento e di ostacoli, seguito dall'applicazione di carichi e vincoli e dall'illustrazione dei criteri produttivi e resistenziali scelti per il modello.

L'ultimo capitolo si apre con l'analisi delle alternative generate dal software. In termini produttivi vengono considerati una serie di fattori, tra cui la quantità e la facilità di rimozione dei supporti, grazie all'utilizzo del software apposito Autodesk Netfabb, con un occhio rivolto anche alla riduzione di operazioni successive alla fabbricazione additiva. Scelte le piastre considerate migliori tra tutte quelle proposte, l'ultima fase del ciclo di progettazione tramite Generative Design prevede il controllo e la modifica delle stesse. Gli accorgimenti sono guidati da analisi agli elementi finiti e portano alla versione definitiva mostrata all'interno delle conclusioni, dove vengono quantificati anche i risultati ottenuti.

CAPITOLO 2 – REVIEW BIBLIOGRAFICA

2.1 Generative Design

Il Generative Design (GD) è un processo di esplorazione eseguito da uno specifico software basato su complessi algoritmi di calcolo. Il progettista inserisce gli obiettivi ricercati all'interno del software di GD, insieme a parametri come prestazioni, vincoli geometrici, materiali, tecnologia produttiva e limiti di spesa. Il software esplora tutte le possibili soluzioni, generando velocemente diversi design alternativi. Il Generative Design rappresenta una nuova frontiera nell'ambito della progettazione. Da tempo gli ingegneri sfruttano le potenzialità dell'ottimizzazione topologica per sviluppare i prodotti, ma il GD si può considerare come l'evoluzione di questa metodologia.

Infatti, l'ottimizzazione topologica permette di eliminare materiale inutile al mantenimento delle caratteristiche strutturali da una geometria esistente, portando ad un unico risultato influenzato da vincoli intrinseci nel modello originale. Il Generative Design, invece, siccome non necessita di un modello di partenza, consente di elaborare più velocemente un più alto numero di soluzioni utili alla risoluzione del problema e in grado di rispettare i vincoli imposti dal progettista, prendendo in considerazione la tecnologia produttiva, il materiale e permettendo al progettista di scegliere i requisiti da privilegiare.

I vantaggi di questa rivoluzione sono molteplici:

- Permette di disporre di molteplici soluzioni di design e consente al progettista di scegliere in base a diversi fattori, che possono essere produttivi ma anche estetici, questione fondamentale in molte applicazioni sul mercato attuale
- I tempi di ricerca e sviluppo possono essere drasticamente ridotti così da permettere all'azienda di acquisire vantaggio competitivo sui concorrenti
- Le nuove tecnologie produttive possono essere sfruttate al massimo
- Riduzione di pesi e miglioramento delle caratteristiche dei prodotti
- Time to market ridotto e aggiornamenti più veloci
- Elevata possibilità di customizzazione.

Oltre ai vantaggi sono presenti anche alcune limitazioni:

- Errori umani durante la progettazione si ripercuotono sui modelli generati
- Il processo è limitato dalla complessità e dall'affidabilità degli algoritmi su cui si basa.

I software di Generative Design utilizzano l'intelligenza artificiale per fornire al progettista una serie di proposte, idee e suggerimenti partendo da una serie di obiettivi e vincoli prestabiliti.

I sistemi di Generative Design impiegano tecniche di machine learning per ottimizzare la forma degli oggetti esistenti. Il software apprende automaticamente, grazie ai dati relativi ai materiali e ai vincoli strutturali e normativi che deve rispettare, ed è pertanto in grado di proporre una serie alternative formali rispetto ai dati di origine.

Come si può vedere dal diagramma riportato in Fig.1, il processo con cui si giunge alla geometria finale è iterativo. Ciò consente al software stesso di apprendere durante la

soluzione del problema. Il progettista deve stabilire gli obiettivi e i vincoli progettuali, avviare il processo e solo alla fine può intervenire per operare delle modifiche sui modelli generati.

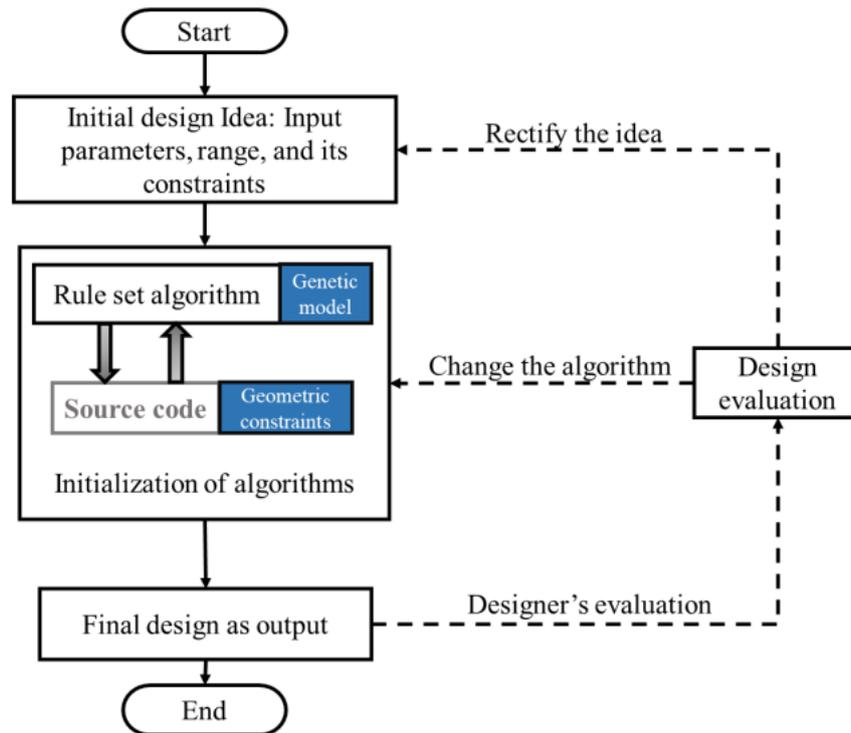


FIG. 1 - DIAGRAMMA DI FLUSSO DEL PROCESSO DI GD [1]

Il Generative Design trova applicazioni in molti settori industriali, tra cui: aerospace, architettura, design, automotive, medicale e sostanzialmente qualsiasi industria in cui risulti utile sfruttare i vantaggi che esso porta.

Applicazioni nel mondo del Motorsport

Il Generative Design ha già trovato diverse applicazioni nel settore sportivo, soprattutto per quanto riguarda prototipi da gara, dove può risultare fondamentale per ottenere un guadagno in termini prestazionali.

Un'azienda molto attiva su questo fronte è Autodesk, fornitore di uno dei principali software di Generative Design, la quale collabora con aziende leader nella produzione di veicoli o parti di essi.

Un esempio è la bicicletta da cronometro sviluppata con Van Rysel (vedi Fig.2), azienda della galassia Decathlon, dove i progettisti hanno utilizzato il software per creare il telaio e la forcella di una bicicletta ottimizzati per la fabbricazione additiva (additive manufacturing nella terminologia anglosassone) in alluminio. La fabbricazione additiva è una tecnologia che permette di produrre componenti per strati a partire da un modello 3D; nel caso dei metalli la costruzione avviene grazie ad una sorgente in grado di fornire calore e fondere selettivamente strati di polvere metallica disposti successivamente su una superficie.

Nella bicycle industry anche piccolissimi miglioramenti, i cosiddetti “marginal gain”, appaiono come un grande successo e questo ambizioso prototipo punta a rivoluzionare il futuro del settore.

La bicicletta viene pensata per essere realizzata grazie a tecniche additive, in alluminio, con l'intento di arrivare ad una struttura rigida e leggera, riducendo al minimo il materiale per aumentare la sostenibilità, ma anche di eliminare quelli che sono alcuni vincoli della produzione classica; infatti, la tecnologia additiva non richiede stampi diversi per le varie taglie ma si presta meglio a qualsiasi modifica e alla produzione su misura per il singolo atleta.



FIG. 2 - BICICLETTA DA CRONOMETRO VAN RYSEL [2]

È necessario però notare che, pur essendo una idea notevole con interessanti prospetti futuri, si tratta attualmente solo di un prototipo con alcune criticità produttive.

Per prima cosa i sistemi di additive per metallo al giorno d'oggi non consentono la produzione di componenti con l'ingombro di un telaio e questo vuol dire che bisognerebbe suddividerlo in più sezioni da saldare successivamente con tutti i problemi del caso. Diverso è il discorso se si pensa a modelli sacrificali per fonderia realizzati con polimeri, ma in questo caso le caratteristiche resistenziali del materiale sarebbero peggiori; mentre la realizzazione tramite pressocolata risulta impossibile.

Altro problema è rappresentato dal materiale stesso, che pur non rivelato dall'azienda che parla genericamente di “alluminio”, dovrebbe essere una lega $AlSi10Mg$, cioè la più utilizzata per additive manufacturing. Il silicio è fondamentale perché dona alla lega ottima fluidità, saldabilità e permette la produzione tramite fabbricazione additiva, che consente di avere caratteristiche superiori alla fusione, ma le proprietà meccaniche rimangono inferiori a quelle delle leghe di alluminio per semilavorati delle serie 2000 e 7000 - UNI EN 573-3 che si utilizzano per componenti da competizione o di alta gamma in questo tipo di industria.

Il Generative Design si può sfruttare al massimo grazie alla fabbricazione additiva, ma trova impiego anche in ambito di lavorazioni tradizionali, come rappresentato in un altro caso

studio realizzato sempre da Autodesk in collaborazione con l'azienda americana Sram [3], produttrice di trasmissioni e componenti per biciclette.

L'azienda, utilizzando l'intelligenza artificiale del GD, ha ottenuto numerosissime soluzioni di design possibili per le proprie pedivelle, tra cui scegliere quelle più adatte da mettere in produzione, seppur attualmente allo stato prototipale.

Per avere un confronto e quindi capire se per il particolare in questione fosse già maturo il tempo di utilizzare la fabbricazione additiva, al software è stata assegnato il compito di esplorare soluzioni di design possibili sia con la suddetta tecnologia, sia con una tradizionale fresatura 5-assi.

Il primo prototipo di pedivella (Fig.3), stando a quanto dichiarato dall'azienda, è stato realizzato tramite innovativa tecnologia additiva basata sulla fusione laser del letto di polvere (Laser Powder Bed Fusion - L-PBF), in lega di titanio e successivamente lavorato alle macchine utensili, sicuramente per eliminare i supporti e il sovrametallo dalle zone di accoppiamento con pedali e movimento centrale. Il secondo prototipo (Fig.4) è stato progettato per essere realizzato con un centro di lavoro a 5 assi di un noto costruttore giapponese, questa volta in lega di alluminio.



FIG. 3 - PEDIVELLA REALIZZATA MEDIANTE FABBRICAZIONE ADDITIVA [4]



FIG. 4 - PEDIVELLA REALIZZATA CON MACCHINA UTENSILE 5 ASSI [4]

La pedivella fabbricata mediante l'additive manufacturing è in lega di titanio, probabilmente Ti6Al4V. In un tipo di industria dove c'è una vera e propria "guerra al grammo" l'utilizzo di questo materiale è indispensabile per poter competere con la fibra di carbonio e le speciali leghe di alluminio utilizzate per metodi di fabbricazione tradizionali.

Il secondo prototipo sfrutta una tecnologia produttiva al momento molto più comune e meno costosa, ma sicuramente ha delle limitazioni dovute al fatto che in certe zone è impossibile andare ad eliminare del materiale inutile e questo pone dei vincoli alle potenzialità del Generative Design. Ha però anche il vantaggio che serve solamente una macchina per produrlo mentre con l'additive manufacturing bisogna comunque finire il sovrametallo sui fori con un centro di lavoro.

Il componente in questione deve essere più leggero possibile, ma allo stesso tempo resistente, affidabile ed estremamente rigido, per non disperdere la potenza espressa dall'atleta. I risultati dichiarati dall'azienda per la pedivella prodotta tramite additive sono eccezionali; infatti, la pedivella in lega di titanio, oltre a possedere un design particolare da un punto di vista puramente estetico, è del 20% più leggera e il doppio più resistente rispetto all'originale.

Quindi oltre ad aver permesso di ridurre il peso e raddoppiare la resistenza, l'articolo mette in luce come il GD associato alla fabbricazione additiva abbia portato ad un aspetto esteticamente accattivante, fattore da non sottovalutare in ottica di una produzione finalizzata alla vendita e non solo alle gare.

Il prodotto è pensato per biciclette da competizione, dove i costi attuali della tecnologia hanno un impatto meno significativo e la possibilità di personalizzare le dimensioni prodotto è fondamentale; infatti, sul mercato si trovano pedivelle di lunghezza compresa tra 165 e 180 mm, con incrementi di 2,5 mm. È evidente come la fabbricazione additiva, ma anche la produzione tramite centri di lavoro, permettano di andare oltre i canonici 2,5 mm di differenza tra misure successive disponibili per i componenti stampati.

Per produzioni di massa per biciclette economiche la tecnologia additiva ha ancora bisogno di tempo per evolversi verso costi più sostenibili.

Questi prodotti di dimensioni contenute sono inoltre quelli che si prestano meglio, per ora, alla produzione mediante additive manufacturing, al contrario del telaio. Sempre dall'articolo[4] si può trovare un filmato dove si riesce a scorgere il sistema utilizzato per la produzione (Fig.5).

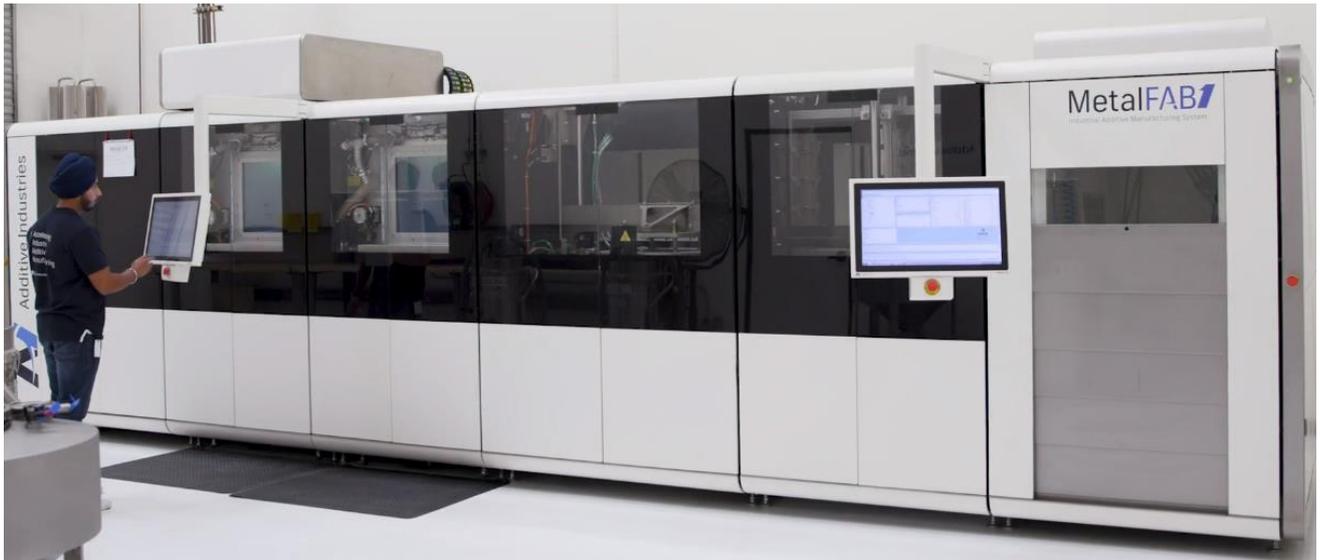


FIG. 5 - MACCHINA UTILIZZATA DA SRAM PER LA PRODUZIONE DELLA PEDIVELLA

Si tratta di una MetalFAB1 di Additive Industries basata con volume di lavoro 420x420x400 mm (X/Y/Z), quindi una macchina piuttosto grande rispetto alla media dei sistemi additive per metallo.

Sempre dal filmato allegato all'articolo si vede che il numero di pedivelle prodotte in un ciclo è diciotto e oltre ai supporti necessari per il sostegno della struttura si può notare come siano state previste delle parti utili allo staffaggio delle pedivelle stesse sul centro di lavoro per la finitura dei fori.

I costi per questi componenti sono ancora alti e, nonostante i vantaggi elencati in precedenza, la fibra di carbonio è ancora il materiale più utilizzato all'interno del mondo "racing". Occorre però considerare un fattore che in futuro giocherà un ruolo sempre più fondamentale, cioè che oltre a vantaggi prestazionali si ottiene anche un minor impatto ambientale.

Il confronto su questo tema è inteso tra un telaio tradizionale in fibra di carbonio e quello prodotto mediante fabbricazione additiva in termini di riciclabilità dei materiali.



FIG. 6 - CONFRONTO BICI AM CON BICICLETTA IN FIBRA DI CARBONIO [5]

La fibra di carbonio è infatti un materiale composito costituito da strati sovrapposti di un tessuto di fibre di carbonio ad alto modulo elastico intrecciate e una matrice di polimeri termoindurenti. Ha proprietà di leggerezza e resistenza molto elevate pur presentando alcuni problemi quali anisotropia e disomogeneità; il difetto principale è però dovuto al riciclaggio di questo materiale, che a causa della resina termoindurente è molto complesso e, nonostante numerosi studi, tuttora grandissima parte dei prodotti di questo materiale viene gettato in discarica a fine vita.

I fattori positivi in realtà sono molti altri. Se il solo concetto di Generative Design porta alcuni vantaggi sotto l'aspetto della sostenibilità ambientale (l'utilizzo intelligente del materiale significa minimizzare gli scarti, le emissioni del ciclo produttivo e anche durante la vita del prodotto), l'additive manufacturing stesso porta numerosi benefici in questo senso [6]:

- Il numero di materiali è ridotto e questo consente di ottimizzare sia i processi di produzione che di riciclaggio.
- La quantità di materiale utilizzato, al di fuori dei supporti e del sovrametallo nelle zone di accoppiamento, è limitato allo stretto necessario.
- La produzione ha una efficienza energetica migliore della maggior parte dei processi tradizionali.
- Le catene di approvvigionamento sono più corte, di conseguenza si riduce l'impatto della logistica esterna, ma anche interna, con tutti i benefici che ne conseguono.
- I requisiti della Lean production si adattano alla tecnologia produttiva permettendo di minimizzare le sovrapproduzioni.
- Tutti i principali produttori sono riuniti nell'organizzazione AMGTA (Additive Manufacturing Green Trade Association) che promuove i benefici della tecnologia e collaborano per uno sviluppo sempre più sostenibile di essa.

Non a caso anche Canyon, una delle aziende più importanti del settore, ha recentemente proposto una mountain bike realizzata in additive promuovendone più la sostenibilità che le prestazioni.

Se nell'industria del ciclismo il concorrente principale del Generative Design applicato alla fabbricazione additiva è la fibra di carbonio, completamente diverso è il discorso se si parla di industria motociclistica.

Ovviamente anche in questo campo c'è grande ricerca in ambito di riduzione dei pesi, in quanto essa consente un miglioramento nel rapporto peso/potenza fondamentale al fine di migliorare le prestazioni.

La fibra di carbonio è stata presa in considerazione per le componenti strutturali a partire dagli anni 80, con alterne fortune. Tra i primi a utilizzare questo materiale è stato il team Cagiva con il prototipo C590 (vedi Fig.7).



FIG. 7 - CAGIVA C590 [7]

Infatti, se la leggerezza è importante in questo settore per ottenere la prestazione, ad essere ancora più fondamentale è la dinamica di guida. La rigidità delle fibre composite di carbonio va contro la necessità di assecondare e smorzare le sollecitazioni presenti durante l'utilizzo, caratteristica in cui eccellono le leghe di alluminio.

Tutte le principali case motociclistiche che competono nella massima categoria del motomondiale hanno sperimentato telai e forcelloni in carbonio; se per i primi attualmente tutti, ad eccezione di KTM che usa acciaio, utilizzano leghe di alluminio, per i secondi si osservano soluzioni differenti, a dimostrazione del fatto che il guadagno in termini di peso può non essere compensato dal comportamento del veicolo.

A questo punto è evidente come il Generative Design e l'additive manufacturing potrebbero rappresentare la migliore soluzione per il futuro, permettendo di ridurre al minimo la massa e allo stesso tempo mantenere le proprietà comportamentali delle leghe metalliche.

Non a caso alcune importanti aziende stanno lavorando su forcelloni prodotti mediante fabbricazione additiva e si ipotizza un futuro impiego in MotoGP.

Attualmente gli algoritmi di calcolo su cui si basa il GD non sono in grado di tenere in considerazione l'aerodinamica, fattore importante in prototipi di così alto livello. Il problema è comunque semplice da superare utilizzando coperture in polimero come si può notare anche nella bicicletta di figura 6.

Alcuni prototipi hanno già utilizzato con successo forcelloni generati tramite questa tecnica di ottimizzazione e prodotti mediante fabbricazione additiva, come ad esempio la superbike elettrica di Lightning motorcycle, vittoriosa alla Pike's peak (Fig.8).



FIG. 8 - SUPERBIKE LIGHTNING CON FORCELLONE PRODOTTO MEDIANTE AM [8]

Il forcellone in lega di alluminio progettato in collaborazione con Autodesk ha permesso di ridurre il peso mantenendo, o in certi casi migliorando, la resistenza alle condizioni di carico rispetto al progetto originale. La scelta della lega di alluminio è dovuta probabilmente ai costi nettamente inferiori alla lega di titanio, visto che il progetto mira alla futura commercializzazione in serie della motocicletta.

Un altro fattore potrebbe essere legato al feeling trasmesso dal materiale al pilota. Infatti, se le proprietà di elasticità dell'alluminio sono favorevoli, per il Ti6Al4V si rischierebbe di avere una rigidità troppo elevata come nel caso della fibra di carbonio.

Due importanti vantaggi ottenibili grazie all'additive sono stati sfruttati nel progetto:

- Il primo è la riduzione del numero di componenti: viene fatto un riferimento al componente originale, che nel caso specifico presenta una soluzione di collegamento tra le parti particolare (viti, probabilmente perché costituito da una lega di alluminio non adatta alla saldatura) ma nella maggior parte dei forcelloni i collegamenti avvengono tramite saldatura, specificando che viene fabbricato utilizzando tecniche classiche e materiali molto comuni. Oltre alla riduzione del numero di parti anche l'eliminazione delle saldature con i rischi e i costi che si portano dietro è un fattore positivo.
- Il secondo riguarda la possibilità di creare nuovi prototipi in un tempo nettamente ridotto: l'azienda è in grado di apportare modifiche rapide e avere una parte attiva sulla motocicletta entro un giorno. Questo è estremamente importante nelle competizioni perché permette ai progettisti di inviare ai collaudatori modelli nuovi in continuazione e operare modifiche secondo le loro indicazioni nel minor tempo possibile, fino ad arrivare ad un prodotto ottimale. Con tecniche di produzione tradizionali il tempo di organizzazione e attrezzaggio della produzione per ogni nuovo prototipo è decisamente più alto.

In realtà la dichiarazione di avere parti attive entro un giorno è troppo ottimistica. Un esempio si può avere grazie al forcellone realizzato dal gruppo dell'università di Bologna per la competizione MotoStudent Electric (vedi Fig.9), sfruttando le potenzialità del Generative Design applicato alla fabbricazione additiva.



FIG. 9 - FORCELLONE PER MOTOCICLETTA REALIZZATO TRAMITE ADDITIVE [9]

In questo caso vengono rivelati la tecnologia additiva utilizzata, cioè la L-PBF, e il tempo necessario alla realizzazione, cioè 180 ore.

Aggiungendo qualche ora per le operazioni di finitura si arriva facilmente a 200 ore, che sono comunque poche per un prototipo come questo, ma lontane rispetto alla giornata dichiarata.

Questo tipo di applicazioni nell'industria motociclistica non si limita ai forcelloni, ma esiste una azienda che si è spinta a realizzare una intera motocicletta tramite additive. È chiaro che nell'ottica di un futuro sostenibile il risparmio di peso ottenibile grazie al design generativo permette di aumentare l'autonomia di un veicolo o comunque di limitarne i consumi di combustibile, e questo fa sì che le aziende cerchino di trarre il massimo vantaggio dall'utilizzo della tecnica anche al di fuori delle competizioni.

È il caso della APWorks, che è riuscita a ridurre il peso del 30% rispetto ad una stessa motocicletta prodotta con tecniche convenzionali; un risultato eccellente, visto che tutto il risparmio è avvenuto su telaio e forcellone, con il resto dei componenti rimasti immutati (Fig.10).



FIG. 10 - MOTOCICLETTA IN ALLUMINIO APWORKS [10]

Dall'immagine si può notare come tutte le varie sezioni siano collegate mediante saldatura, il che ha permesso di realizzare la struttura. Utilizzando il software di Generative Design e scegliendo come tecnica di realizzazione l'additive manufacturing, la struttura generata è calcolata per essere priva di saldature. In questo caso, probabilmente, la progettazione è più complessa e richiede decisioni sulle zone in cui posizionare le saldature; bisogna cercare di posizionarle nelle zone meno sollecitate oppure, se i vincoli sulle dimensioni delle singole sezioni non lo permettono, operare modifiche sulla struttura in quei punti.

In ogni caso la struttura completa di saldature va verificata con una successiva analisi FEM che le tenga in considerazione, mantenendo le condizioni di carico originali.

Anche in questo caso si ha un esempio di design for assembly nelle pedane poggia piedi, dove è stato eliminato il meccanismo tradizionale, costituito da un perno e una molla, che permette la rotazione della pedana in caso di urto. La scelta è tuttavia abbastanza pericolosa, in quanto un impatto che normalmente porterebbe semplicemente il meccanismo a scattare, in questo caso farebbe rompere la pedana o comunque a deformare il telaio.

2.2 Software

I software di Generative Design rientrano nell'ambito CAE (Computer-Aided engineering), cioè tra le applicazioni software che utilizzano il calcolo numerico per la risoluzione di problemi ingegneristici.

Nel caso del Generative Design il percorso da seguire per ottenere l'ottimizzazione del componente (vedi Fig.11) parte dagli obiettivi a cui si vuole giungere e da delle geometrie di mantenimento, cioè delle parti su cui il software non può apportare modifiche; questi ultimi possono essere imposti direttamente sul programma ma solitamente sono costituiti da una geometria importata dal CAD (Computer-Aided Design). Ovviamente non significa che viene importata la geometria originale come avviene per l'ottimizzazione topologica, ma solo alcune parti che rappresentano i vincoli di accoppiamento della parte. Per esempio, nel caso di una semplice biella, verranno importati dal CAD due cilindri distanti l'interasse voluto.

La seconda operazione consiste nella definizione di un modello dei carichi a cui è sottoposto il componente, della tecnologia produttiva e del materiale, così che il software possa operare nella conoscenza dei vincoli produttivi e delle prestazioni del materiale. Nel caso della fabbricazione additiva i vincoli sono rappresentati dal Design for Additive Manufacturing.

L'operazione successiva consiste nella generazione di una serie di geometrie in grado di soddisfare le richieste impostate. È la più importante ed è affidata completamente al calcolatore, che la realizza iterativamente utilizzando complessi algoritmi genetici NGSA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) [11] e analisi agli elementi finiti (FEA – Finite Element Analysis).

L'ultima fase della progettazione è invece affidata unicamente al progettista, che deve valutare tutte le opzioni di design proposte dal software e fare una scelta, tenendo sempre in considerazione gli obiettivi iniziali e una serie di criteri comprendenti sicurezza, estetica, peso, facilità di produzione, ecc.

Alla fine, il progettista può anche operare alcune modifiche alla geometria scelta, sempre in base alle necessità di progetto, salvo poi dover effettuare una nuova analisi per valutare che le prestazioni richieste al componente non siano state pregiudicate dalle modifiche effettuate.

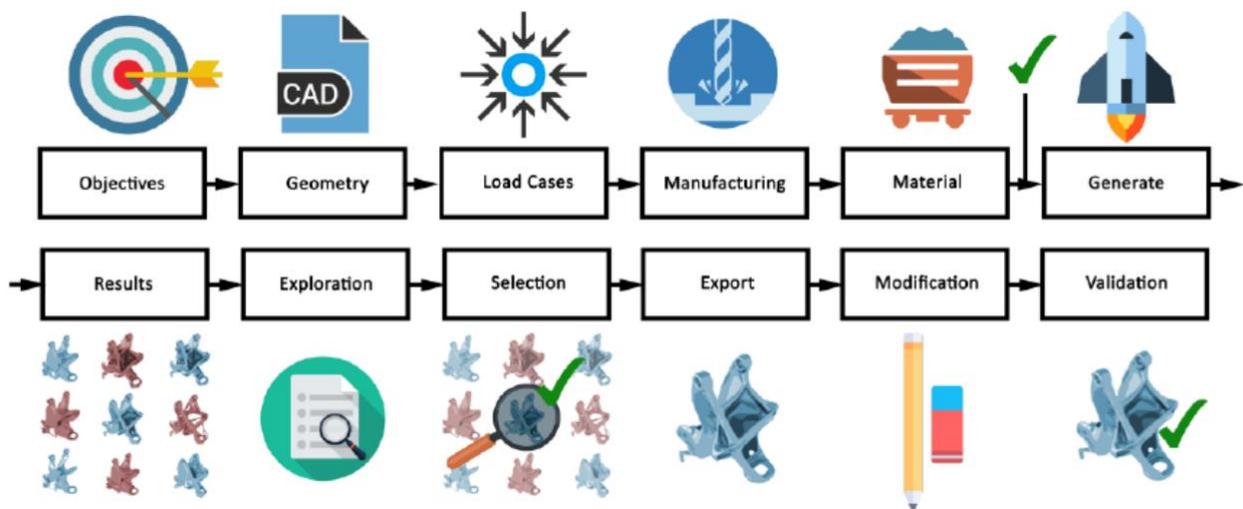


FIG. 11 - PERCORSO DI PROGETTAZIONE GD [12]

Metodo FEM

Il metodo degli elementi finiti (FEM – Finite Element Method) è la tecnica di simulazione numerica su cui si basano le analisi agli elementi finiti.

Gli elementi finiti rappresentano una soluzione numerica in forma integrale su un dominio finito di un problema fisico-matematico descritto con equazioni differenziali alle derivate parziali. L'obiettivo del metodo è la risoluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali, riconducendole ad un sistema di equazioni algebriche.

I problemi risolvibili possono poggiare su leggi costitutive di tipo lineare come gli sforzi-deformazioni in campo elastico e la diffusione di calore nei corpi, ma anche in campo fortemente non lineare, ipotizzando comportamenti di tipo plastico o visco-plastico. Possono anche essere considerate problematiche accoppiate, tramite la realizzazione di analisi separate.

Il primo passo del metodo consiste nello scegliere il funzionale da integrare per risolvere lo specifico campo di applicazione; per questa scelta esistono teoremi o principi che aiutano nella risoluzione in base al tipo di problema da risolvere.

Nel caso di problemi statici si utilizza il principio dei lavori virtuali; con problemi di tipo dinamico si possono utilizzare le equazioni di Lagrange o Raileigh-Ritz, mentre nel caso di problemi accoppiati si utilizzano i metodi di Galërkin.

Il principio dei lavori virtuali dice che dato un continuo infinitesimo di volume dx, dy, dz e un campo di spostamenti e deformazioni virtuali il lavoro interno dovuto alle tensioni e alle deformazioni è uguale al lavoro virtuale esterno dovuto alle forze e agli spostamenti. In pratica, se si perturba infinitesimamente la condizione di perfetto equilibrio di un sistema nella sua deformazione vera, le forze esterne applicate non compiono lavoro.

Grazie al principio dei lavori virtuali si ottiene un unico funzionale integrale che esprime l'uguaglianza tra il lavoro superficiale e di volume delle forze esterne con il lavoro interno:

$$\int_A \{\delta u\}^T \{t\} dA = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \int_V \{\delta u\}^T \{\phi\} dV \quad (1)$$

Altro step fondamentale è la discretizzazione del dominio finito, cioè la trasformazione del continuo in discreto, tramite una mesh.

La mesh è un insieme di elementi fra loro connessi in un numero finito di nodi, che sono quindi vertici degli elementi. Gli elementi, per analisi tridimensionali, possono essere tetraedrici o esaedrici, con un numero variabile di nodi (vedi Fig.12). Scegliere il corretto tipo e un giusto numero di elementi è fondamentale al fine di ottenere una ottima discretizzazione del continuo, pur essendo impossibile eliminare l'errore dovuto a quest'ultima. Teoricamente l'errore diminuisce all'aumentare del numero di elementi, ma bisogna tenere in considerazione anche il costo computazionale che oltre un certo limite non giustifica più il guadagno.

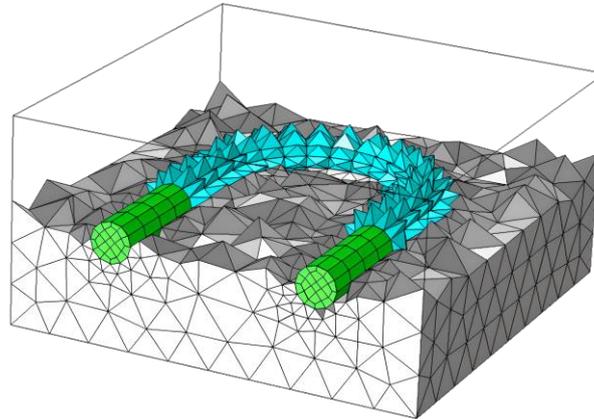


FIG. 12 - ESEMPIO MESH ESAEDRICA E TETRAEDRICA [13]

Il problema è stato ridotto in questo modo ad un sistema matriciale. In base al tipo di elemento adottato vengono inserite una serie di funzioni forma polinomiali $[n]$ che legano il campo degli spostamenti di generici punti interni ai nodi $\{u\}$ al vettore degli spostamenti nodali $\{s\}$:

$$\{u\} = [n]\{s\} \quad (2)$$

Le funzioni forma sono necessarie per approssimare il campo degli spostamenti, a partire dal quale si calcolano poi tensioni e deformazioni.

L'approssimazione dipende, oltre che dal numero di elementi, anche dal grado del polinomio scelto. Per garantire che al diminuire delle dimensioni degli elementi migliori l'approssimazione della soluzione, le funzioni adottate devono rispettare alcune regole:

- Devono essere continue all'interno dell'elemento e con derivata continua sino all'ordine richiesto dal problema.
- Devono rappresentare il moto rigido dell'elemento (energia di deformazione nulla)
- Devono rappresentare uno stato di deformazione costante.
- Devono avere continuità tra elementi adiacenti.

Altra condizione favorevole, seppur non strettamente necessaria, è che la funzione sia geometricamente isotropa.

Sapendo che il vettore delle deformazioni $\{\varepsilon\}$ è la derivata del vettore degli spostamenti, si può scrivere la precedente relazione come:

$$\{\varepsilon\} = [\partial]\{u\} \Rightarrow \{\varepsilon\} = [\partial][n]\{s\} = [b]\{s\} \quad (3)$$

Con $[b]$ matrice di deformazione.

Tensioni e deformazioni sono legate dalla legge di Hooke. Considerando uno stato di tensione già presente $\{\sigma_0\}$ e una deformazione non dovuta all'applicazione di carichi, si scrive:

$$\{\sigma\} = (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\})[E] + \{\sigma_0\} \quad (4)$$

Questo consente di considerare fattori come la dilatazione termica e le tensioni residue all'interno del materiale.

Il problema è che le tensioni create assegnando il campo di spostamento non sono equilibrate in ogni punto; questo, porta alla necessità di modificare la forma dell'equazione dei lavori virtuali al fine di soddisfare l'equilibrio, considerando nell'equilibrio alla traslazione la componente della forza volumica residua di non equilibrio lungo la j-esima direzione ρ_j :

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \phi_j = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \phi_j = \rho_j \quad (5)$$

Questo valore deve essere ridotto più possibile per avvicinare la soluzione approssimata a quella esatta.

L'equazione dei lavori virtuali (1) diventa:

$$\int_A [\{\delta u\}^T \{t\} dA] - \int_V \{\delta u\}^T \{\rho\} dV + \int_V \{\delta u\}^T \{\phi\} dV = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (6)$$

Con $\{t\} = \{t^*\} + \{t_0\}$ vettore della tensione costituito di una parte incognita e una nota.

Inserendo $\{u\}$, $\{\varepsilon\}$ come spostamenti virtuali $\{\delta s\}$ e la legge costitutiva del materiale nell'equazione dei lavori virtuali si ottiene:

$$\begin{aligned} \{\delta s\}^T \int_A [n]^T \{t^*\} dA - \{\delta s\}^T \int_V [n]^T \{\rho\} dV + \{\delta s\}^T \int_A [n]^T \{t_0\} dA + \{\delta s\}^T \int_V [n]^T \{\phi\} dV & (7) \\ = \{\delta s\}^T \int_V [b]^T [E] [b] dV \{s\} - \{\delta s\}^T \int_V [b]^T [E] \{\varepsilon_0\} dV & \\ + \{\delta s\}^T \int_V [b]^T \{\sigma_0\} dV & \end{aligned}$$

Semplificando e scrivendo in formulazione con la matrice di rigidezza:

$$\{f\} + \{f_e\}_{t_0} + \{f_e\}_\phi = [k] \{s\} - \{f_e\}_{\varepsilon_0} + \{f_e\}_{\sigma_0} \quad (8)$$

Dove:

- $[k] = \int_V [b]^T [E] [b] dV$ matrice di rigidezza
- $\{f\} = \int_A [n]^T \{t^*\} dA - \int_V [n]^T \{\rho\} dV$ vettore delle forze generalizzate coniugate agli spostamenti generalizzati $\{s\}$
- $\{f_e\}_\phi = \int_V [n]^T \{\phi\} dV$ carico nodale equivalente a carichi di volume
- $\{f_e\}_{t_0} = \int_A [n]^T \{t_0\} dA$ vettore dei carichi generalizzati equivalenti a distribuzione di tensione superficiale nota
- $\{f_e\}_{\varepsilon_0} = \int_V [b]^T [E] \{\varepsilon_0\} dV$ carico nodale equivalente ad effetti termici
- $\{f_e\}_{\sigma_0} = \int_V [b]^T \{\sigma_0\} dV$ carico nodale equivalente ad una tensione iniziale.

Prima di calcolare la matrice di rigidezza è necessario trovare prima la matrice di deformazione $[b]$, elaborando il vettore delle deformazioni, ed esprimere il termine dA in funzione delle variabili naturali ξ e η . Anche i coefficienti della matrice $[b]$ per essere valutati

necessitano che siano calcolate le derivate delle funzioni di forma n_i rispetto a x e y , le quali vengono messe in relazione con le coordinate naturali ξ e η dalla matrice Jacobiana $[J]$:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial n_i}{\partial x} \\ \frac{\partial n_i}{\partial y} \end{pmatrix} = \frac{1}{\det[J]} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial \eta} & -\frac{\partial y}{\partial \xi} \\ -\frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \xi} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial n_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial n_i}{\partial \eta} \end{pmatrix} \quad \text{con } [J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

La matrice $[k]$ a questo punto può essere calcolata utilizzando uno schema di integrazione numerica, solitamente il metodo di Gauss-Legendre, per il quale si ha:

$$[k] = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_i w_j [b]_{ij}^T [E] [b]_{ij} \det[J]_{ij} h \quad (10)$$

Dove m è l'ordine di integrazione, w_i e w_j i pesi di integrazione e dove $[b]_{ij}$ e $\det[J]_{ij}$ sono calcolati nei punti di integrazione ξ_i e η_i . h è lo spessore del componente.

I punti di integrazione devono essere scelti correttamente per evitare di avere un errore energetico all'interno del componente; questi punti non sono i nodi degli elementi, ma punti interni ad essi e generalmente coincidono con i punti di Barlow, cioè i punti dove le tensioni sono calcolate con lo stesso grado di precisione degli spostamenti nodali.

Noti tutti gli elementi per calcolare le tensioni e gli spostamenti nodali è possibile caratterizzare l'intero campo di tensione e deformazione che interessa il componente.

2.3 Tecniche di fabbricazione additiva per metalli

Per comprendere a pieno i limiti del DfAM e i vantaggi della fabbricazione additiva è necessario conoscere quali sono e come funzionano le tecnologie produttive disponibili sul mercato.

Esistono diverse tecniche per la produzione di componenti metallici, alcune consolidate e altre emergenti. Ognuna presenta una serie di vantaggi e svantaggi, materiali e prestazioni, sia a livello resistenziale che di produttività, differenti.

Per quanto riguarda componenti prodotti in piccole o medie serie per il settore motorsport, che necessitano di buone prestazioni meccaniche, come quello oggetto di studio, le tecniche da prendere in considerazione sono sostanzialmente due, tutte basate sulla fusione del letto di polvere:

- ❖ EBM, Electron Beam Melting.
- ❖ L-PBF, Laser Powder Bed Fusion.

EBM utilizza come fonte di energia un fascio di elettroni per fondere la polvere, ma non verrà presa in considerazione per la produzione delle piastre.

Per tutti i componenti prodotti con queste tecniche, ma con l'additive in generale, occorre svolgere delle operazioni preliminari prima di passare alla fabbricazione. Il primo passo è la conversione del modello CAD in file STL, cioè il formato standard per la trasmissione dei dati in ambito fabbricazione additiva. Durante questa operazione la superficie esterna del modello è approssimata da un numero variabile di triangoli in base alla complessità geometrica della superficie stessa e del livello di precisione che si vuole ottenere.

Successivamente alla conversione in formato STL, alla scelta dell'orientazione, del posizionamento rispetto alla piattaforma di costruzione, alla creazione dei supporti, il componente viene diviso in una serie di strati tramite un'operazione chiamata "slicing". I singoli strati costituiscono i layer che vengono fusi successivamente durante la produzione. Lo spessore può essere costante o variabile (slicing adattivo), con valori compresi tra 20 e 100µm per tecnologia L-PBF, in base alla geometria, ricordando che costituisce uno dei parametri di processo fondamentali.

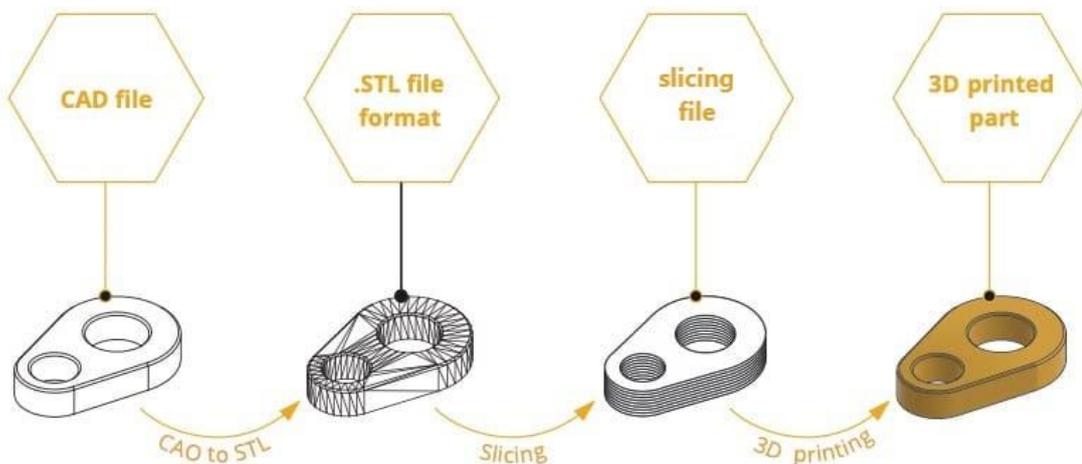


FIG. 13 - PERCORSO PREPARAZIONE MODELLO [14]

Tecnologia L-PBF

Il processo L-PBF consiste nella fusione selettiva di strati successivi di polvere metallica grazie all'energia fornita tramite un laser, solitamente a fibra, guidato da una serie di specchi e focalizzato sulla superficie da una lente f-teta. Il sistema di deposizione della polvere, che può funzionare in modi diversi in base al produttore della macchina, depone uno strato di polvere dello spessore predefinito. La polvere metallica è contenuta in un serbatoio dotato di suo elevatore che ne emette la giusta quantità ad ogni layer; eventuale polvere in eccesso è raccolta grazie ad un apposito serbatoio posizionato dal lato opposto.

Ad ogni strato la piattaforma di base si abbassa dello spessore dello strato successivo, la polvere viene depositata e il laser porta a fusione selettivamente le parti che costituiscono la geometria finale. L'energia fornita dal laser deve essere necessaria a portare a fusione anche parte dello strato precedente per permettere l'adesione con il successivo; il letto di polvere può essere a temperatura ambiente o mantenuto ad una maggiore, per minimizzare le distorsioni dovute ai forti gradienti termici e l'energia richiesta al laser. Per lo stesso motivo, terminata la produzione, il componente deve rimanere in macchina per una quantità di tempo sufficiente ad avere raffreddamento graduale senza essere esposto ad agenti esterni.

Si lavora in atmosfera inerte o sottovuoto per evitare ossidazione del materiale fuso e limitare interazioni tra il laser e impurità.

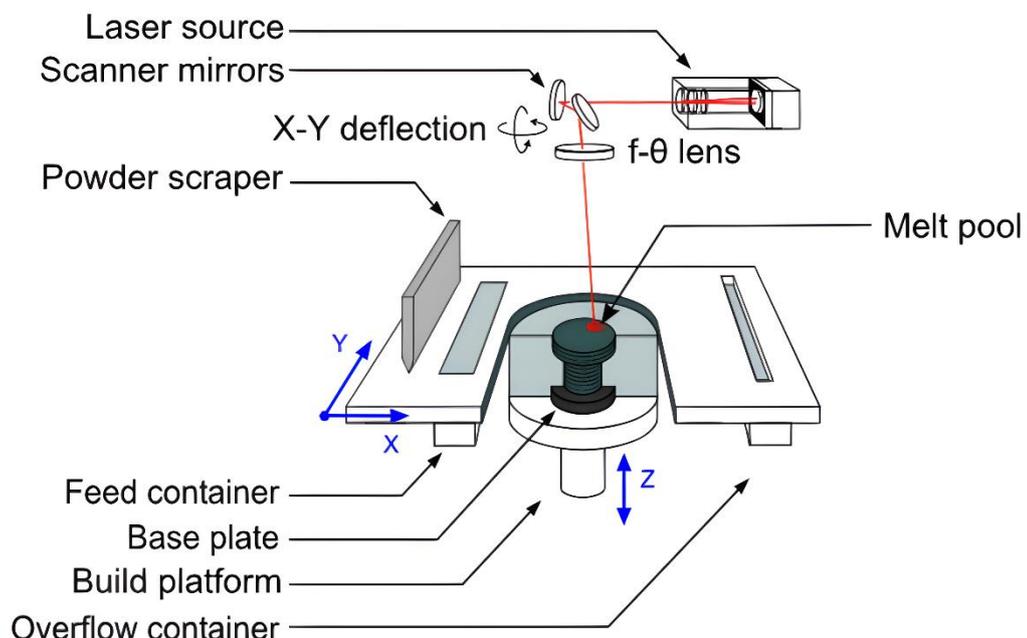


FIG. 14 - PROCESSO L-PBF [15]

La ditta EOS, uno dei maggiori produttori di macchine L-PBF, tra cui la EOS M240 in dotazione al Politecnico, ha brevettato alcune soluzioni che differenziano leggermente il processo di fabbricazione appena illustrato.

I laser utilizzano una potenza minore, sono più concentrati e permettono una precisione migliore, con il contro di impiegare più tempo. Anche le dimensioni dell'area di lavoro sono generalmente inferiori.

La differenza più importante è però la strategia di scansione; più precisamente la direzione del gas inerte, il cui flusso è forzato in direzione contraria rispetto alla direzione di scansione del laser. Questo permette di evitare che i fumi dovuti alla fusione interferiscano con il laser causando porosità nel componente.

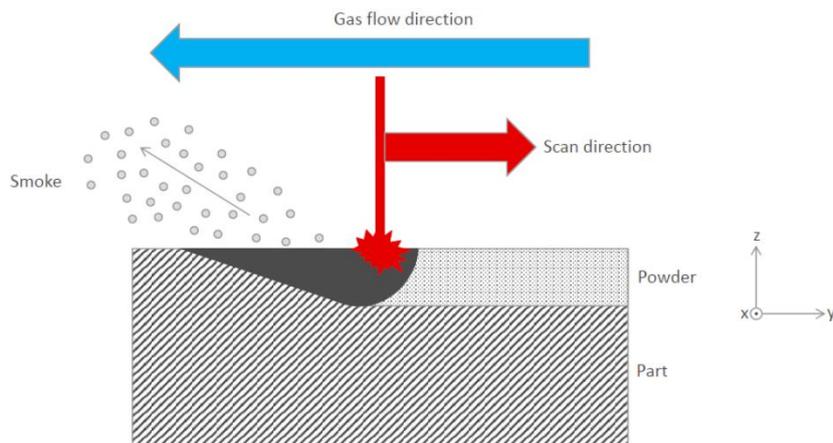


FIG. 15 - STRATEGIA SCANSIONE EOS

2.4 Design for Additive Manufacturing

Il design for additive manufacturing (DfAM) è un metodo di progettazione che mira a rendere un prodotto ottimizzato per la fabbricazione additiva, sfruttando i vantaggi che essa offre e prendendone in considerazione anche i limiti [16]. Molte regole facenti parte del metodo DfAM sono generali per tutti i processi di fabbricazione additiva, ma quelle riportate nell'articolo [16] sono riferite specificatamente alle tecniche L-PBF per metalli.

I tre approcci possibili quanto si deve progettare o riprogettare un componente per la produzione tramite fabbricazione additiva sono i seguenti:

- Replicazione di un componente esistente: in questo caso non ci sono possibilità di intervenire sulla geometria del prodotto, ma bisogna solamente ricostruire più fedelmente possibile l'originale. È il caso, ad esempio, di ricambi che esistono più o di parti per cui non convengano costi e/o tempi di attesa. In questo caso i margini di azione del progettista sono limitati all'ottimizzazione del processo, come l'orientazione del pezzo e il posizionamento dei supporti.
- Adattamento di un componente esistente all'additive: il componente originale può essere modificato per sfruttare alcuni vantaggi della tecnologia di produzione, ma i

marginari operativi sono comunque limitati dalla geometria iniziale. È il caso dell'ottimizzazione topologica.

- Progettazione per produzione additiva: è il DfAM; quindi, il prodotto può essere progettato da zero per sfruttare al massimo i benefici offerti dall'additive. È quello che succede quando si progetta una parte utilizzando il Generative Design.

Sebbene la fabbricazione additiva per metalli abbia molti vantaggi in termini di tempi, geometrici, di sostenibilità, di riduzione del numero di parti, di personalizzazione, ecc., vi sono anche degli svantaggi che ne limitano l'utilizzo:

- Materiali: il numero di materiali disponibili è limitato. Da un lato è vantaggioso perché la messa a punto dei processi è più semplice, dall'altro offre una limitata possibilità di scelta al progettista.
- Costi: questo è il fattore principale; infatti, i tempi di produzione sono ancora piuttosto lunghi, le polveri metalliche o comunque i materiali e le macchine necessarie sono costose, a fronte di dimensioni dell'area di lavoro contenute che limitano le possibilità di utilizzo.
- Operazioni successive alla stampa: rimozione polveri, rimozione della base con EDM e successiva lavorazione della stessa, rimozione dei supporti e del sovrametallo, lavorazioni per migliorare finitura superficiale, eventuali trattamenti termici, ecc.

Noti quindi i problemi della tecnologia produttiva, diventa evidente come l'utilizzo della stessa debba risultare davvero conveniente. Questo è possibile in settori dove il risparmio di tempo, peso, materiale e la possibilità in termini di design e personalizzazione sono fondamentali. Il Design for Additive, come metodologia di progettazione, ha il compito di estendere al massimo il campo di convenienza della tecnologia.

Per poter progettare parti adatte alla produzione tramite fabbricazione che siano più efficienti possibile, prima di conoscere le possibilità più avanzate, bisogna avere chiari quali sono i vincoli imposti dal processo e come fare per risolverli o minimizzarli.

Vincoli

I vincoli che si hanno quando si progetta un componente appositamente per la fabbricazione additiva sono più che altro dovuti a peculiarità e limiti del processo; possono variare in base al materiale e al produttore della macchina ma esistono delle linee guida generali per illustrarli.

Gli algoritmi dei software di Generative Design devono considerare le limitazioni del processo durante i calcoli per la definizione delle geometrie [17], ma molte considerazioni su eventuali modifiche devono essere fatte dal progettista.

1) Rimozione delle polveri: la fabbricazione additiva offre possibilità di creare strutture cave complesse, da cui è necessario rimuovere le polveri intrappolate; per questo motivo vanno previsti fori o intagli in ogni punto in cui vi sia questa necessità (vedi Fig.16). Il posizionamento di sfiati per la rimozione delle polveri non è necessario solo per strutture cave e chiuse, ma anche in zone di difficile accesso come, ad esempio, nei fori lunghi e con traiettorie non rettilinee dei canali conformali.

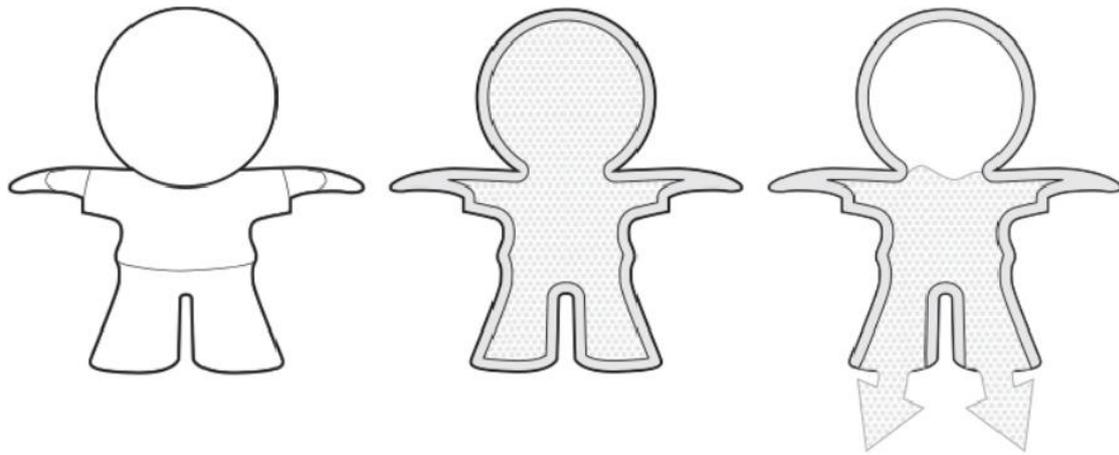


FIG. 16 - RIMOZIONE POLVERE DA COMPONENTE CAVO [18]

2) orientamento e posizione del componente: è un fattore molto importante conoscere i limiti del processo da questo punto di vista per ottenere una geometria e una orientazione ottimale. Tutti i componenti, per evitare l'affondamento nel letto di polvere, devono essere collegati, direttamente o tramite strutture di supporto, ad una piattaforma di costruzione.

Il primo vincolo a cui bisogna fare attenzione durante la scelta dell'orientazione del pezzo sulla piattaforma di base riguarda il posizionamento di geometrie dotate di lati lunghi; questi non devono essere posti perpendicolarmente alla direzione di movimentazione della lama o del rullo, cioè il sistema che posiziona lo strato di polvere successivo (Fig.17a), per evitare impatti che potrebbero danneggiarli. È meglio prevedere un angolo di inclinazione da 5° a 45° (Fig.17b/c) in modo che il contatto sia puntuale. Questo fattore incide sul DfAM nel caso di parti geometrie complesse dove non è possibile evitare questa condizione e quindi bisogna trovare un compromesso.

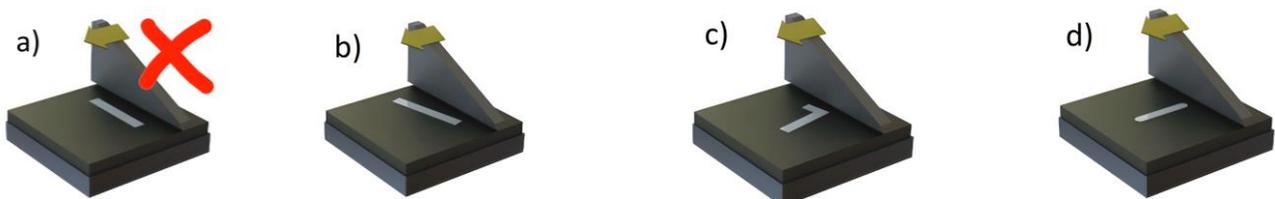


FIG. 17 - ORIENTAMENTO DEL COMPONENTE RISPETTO A RE-COATER [19]

La posizione del componente sulla piattaforma e l'inclinazione delle superfici di esso possono invece avere effetto sulla rugosità del componente [20], a causa dell'inclinazione con cui il laser colpisce le polveri. In casi dove la rugosità è importante anche questo diventa un fattore da considerare.

Un fattore molto importante da considerare quando si decide come orientare un componente è lo scambio termico con la base, al fine da minimizzare gli stress residui che possono portare a cedimenti o alla necessità di trattamenti termici. Bisogna quindi evitare che l'area di contatto sia troppo limitata rispetto alle dimensioni del componente.

L'orientamento del componente è comunque la scelta più importante nella produzione di parti complesse tramite fabbricazione additiva e spesso bisogna tenere in considerazione tutti i fattori successivi per trovare il giusto compromesso.

3) superfici a sbalzo: l'inclinazione delle superfici a sbalzo, perché siano autoreggenti e quindi non abbiano bisogno di supporti (vedi Fig.18), non devono superare alcuni valori che dipendono dal materiale e dalla tecnologia utilizzati per la fabbricazione additiva. Evitare i supporti è importante per risparmiare materiale che andrebbe scartato oltre all'impegno che richiede la loro rimozione.



FIG. 18 - COLLASSO DI SUPERFICI A SBALZO INCLINATE [21]

Per ognuno dei materiali disponibili si ha una diversa indicazione sull'angolo minimo che rende la superficie autoreggente [19]: 30° per l'acciaio inossidabile, 45° per l'Inconel, da 30° a 40° per la lega di titanio Ti6Al4V, 45° per leghe di alluminio e 30° per la lega Cromo-Cobalto. L'inclinazione delle superfici ha una notevole influenza sulla rugosità, sebbene per questo sia necessario valutare anche la posizione del componente sul piano x-y [20].

I supporti possono essere minimizzati variando, se possibile, l'inclinazione del pezzo rispetto alla base (vedi Fig.19). Allo stesso modo la conoscenza di questi limiti permette, anche nel caso non vi siano superfici a sbalzo, di inclinare un intero componente rispetto alla base per ridurre l'area di contatto con la piattaforma.

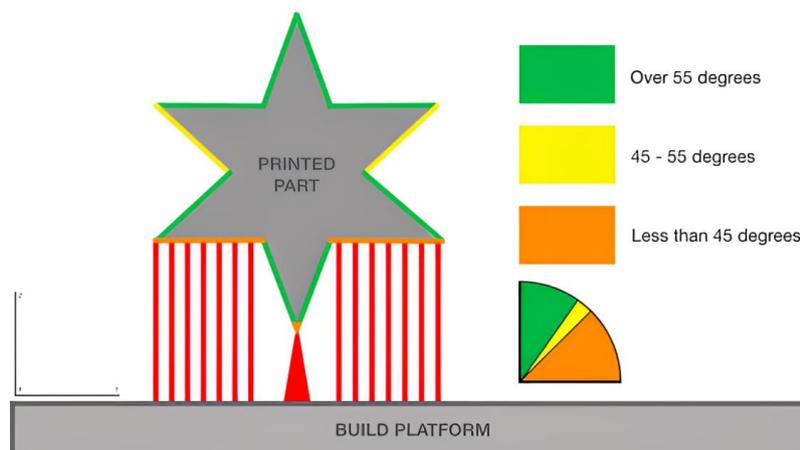


FIG. 19 - INCLINAZIONE SUPERFICI RISPETTO ALLA BASE [21]

Il fatto di inclinare il pezzo rispetto alla base per ridurre i supporti non deve essere esagerato come concetto, altrimenti si rischia di non avere abbastanza contatto e quindi area di scambio termico utile a ridurre gli stress residui al termine del processo.

3)Minimo spessore pareti: lo spessore minimo per le pareti non è limitato dalla macchina; infatti, questa permette di produrre pareti fino a 0.2 mm [22], ma è consigliato non scendere sotto gli 0.4/0.6mm, in base al materiale, per evitare il possibile insorgere di difetti sul componente finale.

Pareti troppo sottili rischierebbero di cedere sotto la tensione degli stress residui causati dai forti gradienti termici che si sviluppano durante il processo. In presenza di pareti sottili un controllo ottimale del processo permette di aumentare l'affidabilità.

Se le pareti sottili sono particolarmente estese, per evitare problemi di distorsione, è necessario prevedere dei supporti (vedi Fig.20) o delle nervature. La presenza dei supporti permette di aumentare l'area della parete.

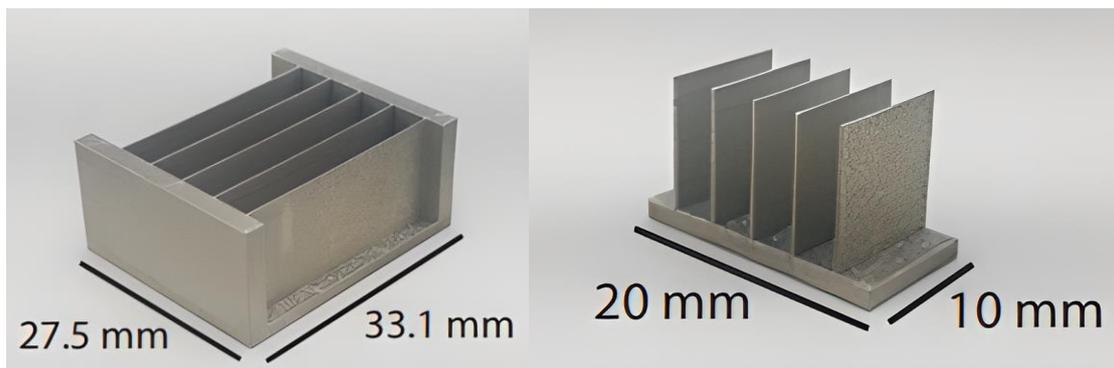


FIG. 20 - PARETI SOTTILI CON E SENZA SUPPORTI [23]

In pareti così sottili il vincolo della perpendicolarità o comunque di una buona inclinazione rispetto alla direzione di movimentazione dei sistemi di posizionamento dello strato di polvere successivo diventa fondamentale per evitare rotture. Pareti di queste dimensioni devono avere sviluppo lungo l'asse z. Altro vincolo da tenere in considerazione per parti con area proiettata sulla piattaforma di costruzione piccola è che il rapporto tra lo sviluppo verticale su z(altezza) e la larghezza della sezione non deve superare il valore di 8:1, altrimenti sono necessari supporti. Se la parte si trova nelle vicinanze di altre equivalenti o maggiormente solide si possono utilizzare come sostegno (Fig.21), altrimenti servono supporti dedicati.



FIG. 21 - PARETI ALTE CON SEZIONE RIDOTTA [19]

Esistono anche alcune strutture (vedi Fig.22), come ad esempio strutture reticolari, che pur molto solide a costruzione terminata, durante la produzione possono presentare lo stesso problema in quanto la sezione delle singole travi è piccola. È quindi necessario prevedere dei supporti nel momento in cui viene superato questo rapporto.

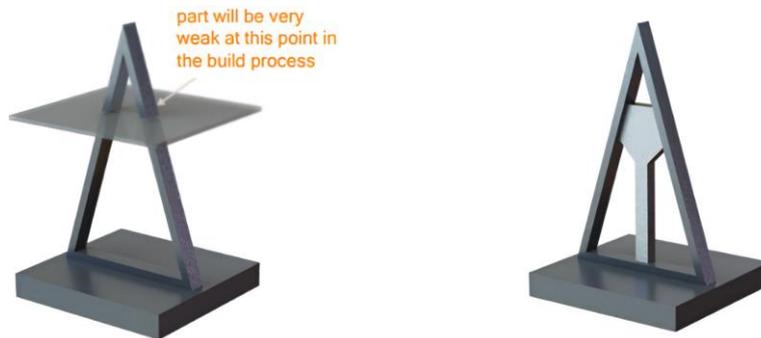


FIG. 22 - STRUTTURA TRIANGOLARE [19]

4) Minima distanza tra superfici: anche la distanza minima tra superfici è influenzata dal materiale, dai parametri di processo e dalle dimensioni delle stesse. Il rischio è che pareti troppo vicine possano saldarsi tra loro durante il processo rovinando la parte; generalmente il minimo dettaglio che si può stampare ha larghezza di 0.2 mm (vedi Fig.23), sull'asse z e se non è troppo profondo. Se la direzione del dettaglio non è lungo l'asse z e per una maggiore sicurezza, se è consentito dagli obiettivi di progettazione, è consigliabile tenere un margine di almeno 0.5mm; anche perché da dettagli di dimensioni minori risulterebbe difficoltosa l'evacuazione delle polveri, fattore sempre influenzato dalla profondità del foro stesso.

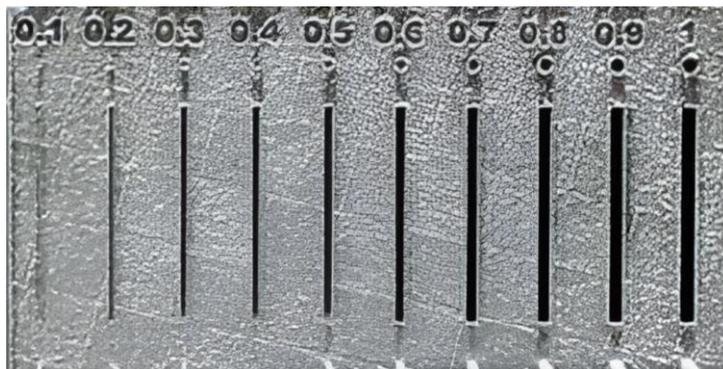


FIG. 23 - PROVINO CON DISTANZE TRA PARETI VARIABILI TRA 0.1 E 1MM [24]

I limiti esposti in questo caso non valgono solamente per dettagli all'interno di una parte, ma sono applicati anche nel caso di più parti collegate che devono avere movimento relativo tra loro; infatti, con la fabbricazione additiva si possono creare giunti, cerniere, rotismi, ecc., permettendo di ridurre il numero di componenti e i tempi di assemblaggio.

Per questi meccanismi 0.5mm è indicativamente la distanza minima, ma in giunti come quello di Fig.24, dove le superfici adiacenti sono vaste, è consigliabile tenere un margine maggiore per favorire l'evacuazione della polvere ed evitare problemi. In costruzioni di questo tipo ognuna delle due parti deve essere saldamente collegata alla piattaforma da supporti che impediscano il movimento relativo, che può avvenire solamente dopo la rimozione degli stessi.

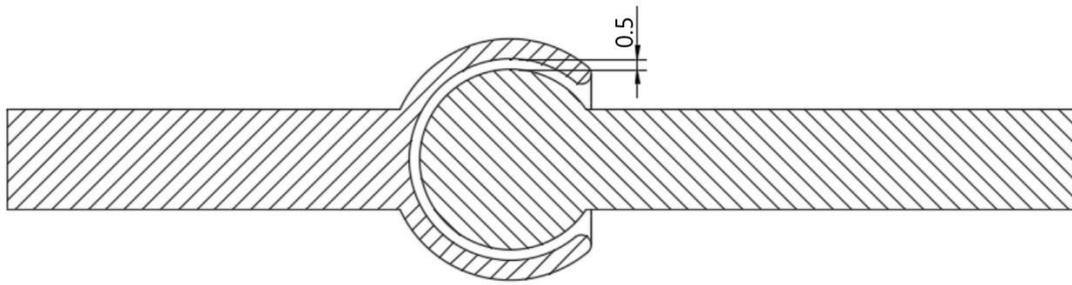


FIG. 24 - GIUNTO A SFERA

5) Fori: uno dei grandi vantaggi dell'AM è sicuramente quello di poter creare fori con traiettorie non rettilinee, slegati dai problemi della produzione tradizionale. Se per fori disposti parallelamente all'asse z l'unico vincolo è sulla dimensione minima (0.5mm) e valgono le considerazioni del punto precedente, per tutti gli altri vi sono però una serie di problemi legati all'eliminazione dei supporti interni e alla finitura superficiale.

Fori con asse parallelo alla direzione di fabbricazione e di dimensioni comprese tra 0.5 e 6 mm non necessitano di supporti interni e le rugosità ottenute sono in linea con quelle caratteristiche del processo e del materiale, pur variando molto in base all'inclinazione del foro rispetto alla base [25]. Oltre i 6mm e fino a 10mm è ancora possibile produrre senza supporti, ma la finitura della parte superiore della sezione del cerchio può risultare scadente. Fori sopra i 10mm di diametro invece necessitano di supporti interni per evitare il collasso della parte centrale superiore.

Questi problemi sono dovuti al fatto che la tangente al cerchio supera l'angolo limite del materiale per strutture a sbalzo (Fig.25) riportato al punto 3), quindi 35° per la lega di titanio e 45° per quella di alluminio, con cui sarà evidentemente possibile realizzare fori più grandi prima di dover adoperare supporti o altri accorgimenti.

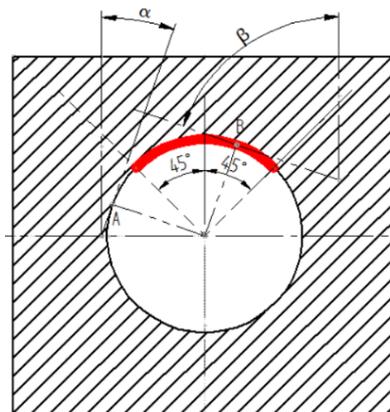


FIG. 25 - ZONA CRITICA NEI FORI [26]

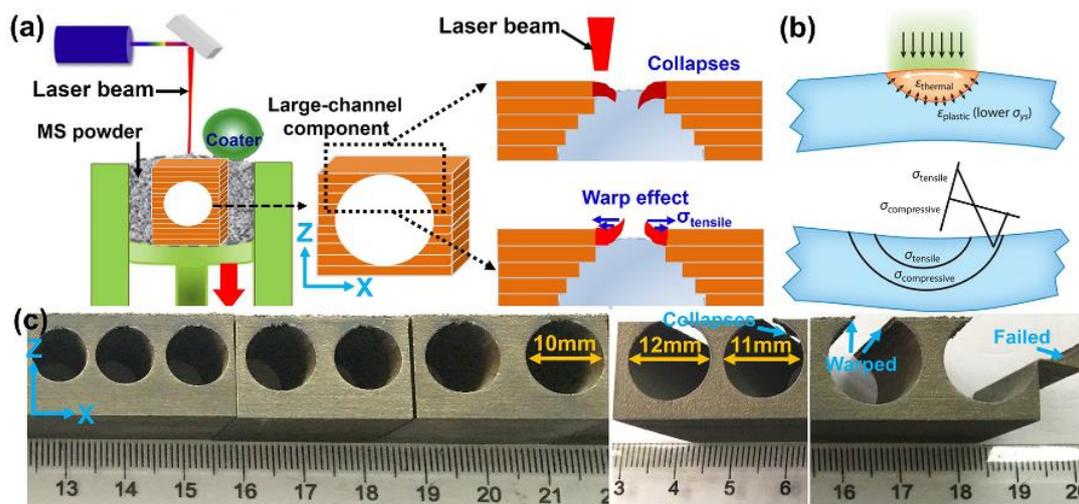


FIG. 26 - PROBLEMI NEI FORI PER DIMENSIONE [27]

I fori non rettilinei di una certa dimensione hanno nei supporti un grosso problema; infatti, la loro rimozione risulterebbe molto difficile, se non impossibile in profondità in certe applicazioni come i canali conformali. Le caratteristiche idrauliche dei fori, che già non sono ottime a causa della rugosità elevata del processo di fabbricazione additiva, andrebbero quindi completamente inficiate.

Una soluzione di compromesso può essere trovata modificando la forma dei fori, in modo da eliminare la zona critica, compatibilmente con le esigenze fluidodinamiche della parte.

Le sezioni più comuni sono: a goccia, quadrata/romboidale ed ellittica (vedi fig.27).

La sezione a goccia è la più utilizzata, ha il limite in dimensione imposto sempre dal massimo angolo autoreggente del materiale con cui viene prodotto il foro. Quella ellittica, ovviamente con il semiasse maggiore orientato parallelamente all'asse z, permette di ottenere fori con altezza fino a 25mm. Per la sezione romboidale vale la stessa regola della goccia e i raccordi servono per ridurre la concentrazione delle tensioni.

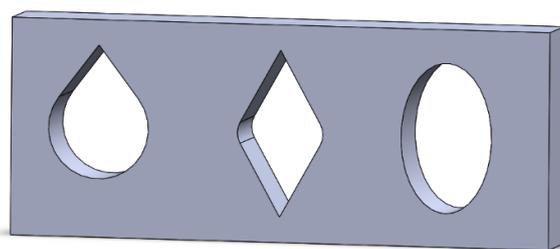


FIG. 27 - SEZIONI ALTERNATIVE PIÙ COMUNI PER FORI

Per quanto riguarda i fori, ma anche gli alberi, è possibile realizzare direttamente filettature fino a M3 con la fabbricazione additiva.

Per dimensioni più grandi è invece necessaria una post-lavorazione alle macchine utensili e si deve quindi lasciare 1mm di sovrametallo.

6) Ponti: per strutture a ponte valgono le stesse regole delle strutture a sbalzo, ma in questo caso è possibile utilizzare dei trucchi per minimizzare i supporti, sfruttando il fatto che la struttura è sorretta su entrambi i lati. Ponti indicativamente fino a 3mm di larghezza possono essere stampati senza supporti, oltre si ha il collasso della struttura e necessità di questi

ultimi, che devono supportare la parte sospesa nell'intera lunghezza (Fig.28a) e risultano anche costosi da rimuovere con elettroerosione a filo. Per limitare il problema si possono costruire supporti esterni (Fig.28b), ma il materiale da scartare e l'energia utilizzata rimangono elevati.

Una soluzione può essere quella di ruotare il componente, compatibilmente con tutti gli altri fattori che ne influenzano l'orientamento in parti complesse e i problemi che nascono diminuendo l'area di contatto con la base (Fig.28c). Il trucco più efficace è però quello di creare strutture di supporto distanziate sfruttando l'angolo massimo che può autosostenersi, oppure degli archi, in modo da minimizzare il materiale di supporto e di facilitarne la rimozione (Fig.28d).

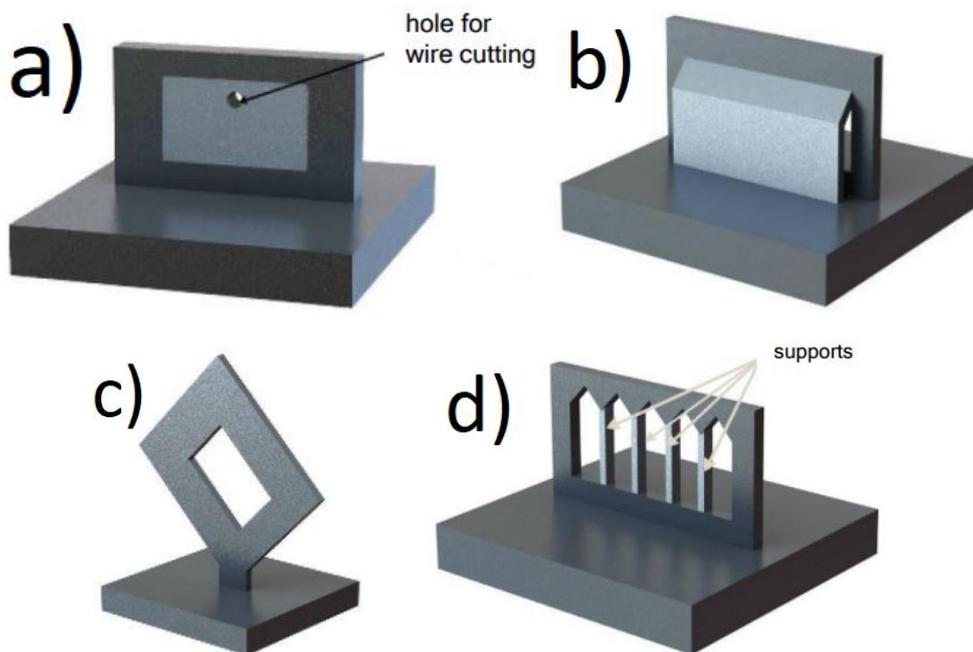


FIG. 28 - A)SUPPORTO COMPLETO B)SUPPORTO ESTERNO C)ROTAZIONE PARTE D)SUPPORTI MINIMIZZATI [19]

In alcuni casi è possibile utilizzare come supporto, in parte, la struttura stessa, al fine di ridurre in supporti, anche se non ho sostegno sui due lati ma solamente su uno (vedi Fig.29). L'obiettivo anche in questo caso è quello di minimizzare le strutture di supporto.

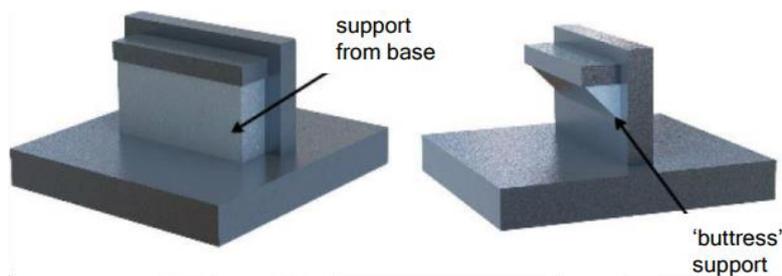


FIG. 29 - SUPPORTO INTERNO ALLA STRUTTURA [19]

Supporti

Come visto i supporti sono fondamentali nel sostegno di alcune strutture, nel collegare le parti alla piattaforma di costruzione, per migliorare la dispersione del calore evitando stress residui pericolosi per la deformazione o la rottura di strutture.

Tuttavia, a differenza di alcune tecniche per polimeri dove la rimozione dei supporti, in materiale differente rispetto alla parte, è semplice, per la fabbricazione additiva di metalli con tecniche L-PBF, la riduzione del numero e della quantità di strutture di supporto è uno dei fattori principali all'interno del DfAM; infatti, questo permette di limitare il tempo di stampa, il consumo di energia e di materiale. Per il posizionamento e la quantità di supporti esistono software appositi, che considerano anche gli altri vincoli per consigliare l'orientamento della parte; il progettista può decidere se intervenire e modificare le scelte operate dal programma.

I problemi portati dai supporti nel processo in realtà ricoprono un'importanza minore rispetto ai tempi e ai costi necessari per le operazioni che richiede la loro rimozione e all'impatto che quest'ultima lascia in termini di finitura superficiale [28]. La rimozione infatti può avvenire manualmente, tramite EDM, oppure con lavorazioni tradizionali ad asportazione di truciolo; in molti casi il processo risulta difficoltoso a causa delle free-form prodotte tramite additive, spesso complicate da serrare e lavorare sulla macchina utensile.

Se è necessario ottenere una elevata finitura superficiale, si può ottenere direttamente con EDM e CNC, oppure con una serie di lavorazioni tradizionali o innovative: post trattamenti di sabbiatura, lucidatura manuale o automatica con processo MMP, rettificazione, processi elettrochimici, burattatura, ecc. Le parti possono anche subire trattamenti galvanici per modificare le proprietà superficiali.

Il supporto alla parte non è completo, ma solitamente il contatto è puntuale e avviene su un'area circolare di dimensioni variabili in base al materiale, alla resistenza necessaria, alla quantità di calore da dissipare, alla finitura che si deve ottenere e altri fattori. Il contatto può essere anche su contorno, linea o su una serie di punti (Fig.30).

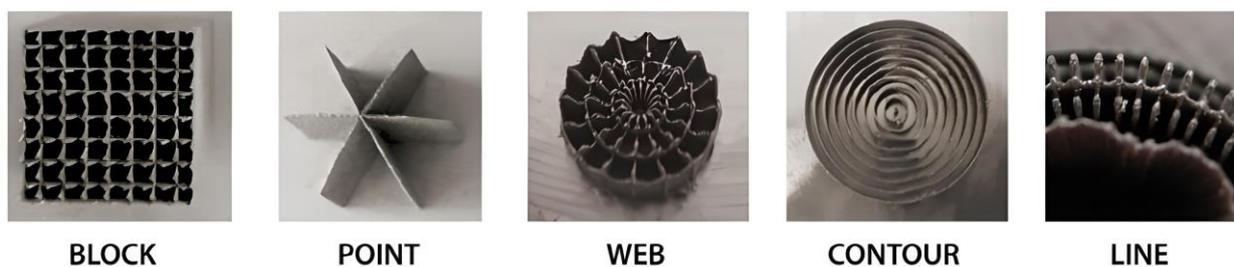


FIG. 30 - TIPOLOGIE DI CONTATTO SUPPORTI-PARTE [29]

Esistono una serie di strutture di supporto studiate appositamente per risparmiare sui tempi, materiali e sulle lavorazioni successive, ma allo stesso tempo in grado di sostenere carichi elevati dovuti ai gradienti termici, impatti e dissipare il calore, oltre che permettere una facile evacuazione delle polveri.

Le analisi agli elementi finiti hanno permesso di ottimizzare una serie di strutture adatte tra cui scegliere in base allo scopo desiderato.

Per i supporti possono anche essere utilizzate le "strutture lattice", ma strutture ad "Y" e "IY" (Fig.31) risultano molto efficienti, soprattutto per la lega AlSi10Mg, in quanto presentano

ottime caratteristiche meccaniche, limitano l'utilizzo di materiale e sono facili da rimuovere [30]. I risultati che si ottengono a livello di finitura superficiale, deformazione e distribuzione del calore sono decisamente migliori di più classiche strutture con una serie di "pin" a fare da sostegno, oltre al risparmio di materiale.

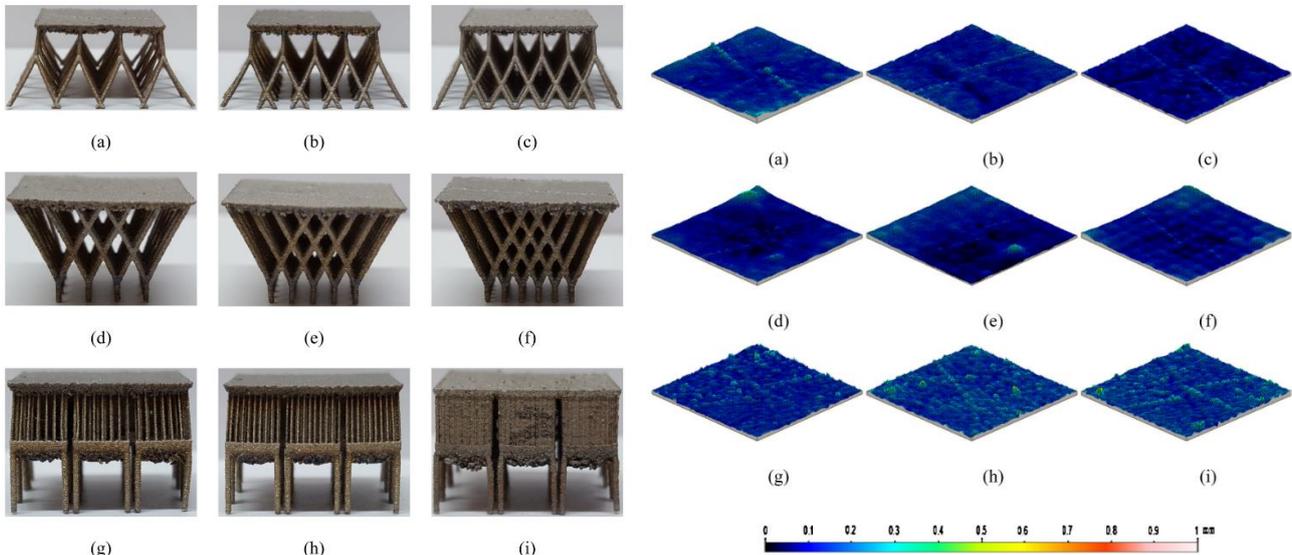


FIG. 31 - TIPI DI SUPPORTI E FINITURA SUPERFICIALE DELLA PIASTRA DOPO RIMOZIONE [30]

Strutture Lattice

Le strutture lattice sono una serie di strutture costituite dalla ripetizione nello spazio di celle elementari. Solitamente la ripetizione delle celle è periodica, ma può essere non periodica o anche stocastica. Ne esistono moltissime, ognuna ha proprietà differenti e sono studiate per rispondere a problemi specifici di vario tipo.

La loro struttura elementare può essere governata da formule matematiche, oppure creata prendendo spunto dalla natura, che sia la replicazione di strutture cristalline o di rifugi animali come il nido delle api [31]. Questo fa sì che siano perfettamente adatte al design for additive manufacturing e ai suoi vincoli, che si possono in qualche modo ritrovare in natura; ad esempio, la struttura ad alveare è ottimizzata per essere leggera e resistente, ma allo stesso tempo deve garantire il passaggio degli insetti, che può essere equiparato alla fuoriuscita delle polveri non trasformate durante il processo. Inoltre, deve auto-reggersi, proprio come le pareti a sbalzo prodotte per additive.

Queste strutture vengono sempre più utilizzate per i supporti, viste le ottime proprietà resistenziali, la bassissima densità e l'elevata possibilità di scambio termico, ma in realtà sono nate per essere sfruttate all'interno delle parti, dove possono ricoprire sostanzialmente tre ruoli[32]:

- Riempire un volume: quindi, possono fare da supporto interno in un volume "vuoto", permettendo di realizzare geometrie altrimenti irrealizzabili, oppure di mantenere a distanza due superfici sostituendo il solido di densità 100%, e allo stesso tempo di

sfruttare le loro proprietà meccaniche, termiche e di leggerezza (vedi Fig.32). Ovviamente deve essere presente uno sfogo per evacuare le polveri.



FIG. 32 - ESEMPIO RIEMPIMENTO DI UN VOLUME [33]

- Sostituire un volume: cioè sostituire il pieno. Con la fabbricazione additiva infatti, avrebbe poco senso, oltre ad essere sconsigliato, produrre parti troppo spesse e la sostituzione di queste con strutture lattice è la soluzione migliore. La più alta applicazione di questa operazione è utilizzata per minimizzare il peso, mantenendo le condizioni resistenziali originali o migliorandole, sfruttando le proprietà meccaniche di alcune di queste strutture, che possono essere orientate in base al tipo di carico presente sulla struttura, realizzando una sorta di ottimizzazione topologica all'interno di un prodotto ottenuto anche mediante Generative Design, come in figura 33.



FIG. 33 - ESEMPIO SOSTITUZIONE DI UN VOLUME [31]

- Ricoprire una superficie: ruolo utile nel caso sia necessario un elevato scambio termico. Più di altre vengono utilizzate a questo scopo strutture di tipo TMPS, che hanno vasta superficie in grado di scambiare calore per convezione coi fluidi.

Le strutture lattice, come anticipato, hanno diverse proprietà che le rendono interessanti per applicazioni a livello industriale. Sicuramente la più importante è la bassissima densità relativa, data dal rapporto tra la densità della struttura lattice e la densità del solido di base, che permette in ogni caso un risparmio di peso, ma soprattutto di avere proprietà meccaniche della parte molto elevate rispetto al materiale utilizzato. Inoltre, le proprietà meccaniche delle strutture lattice sono spesso espresse come frazione delle proprietà della struttura solida; per cui, confrontando i risultati con la densità relativa si comprende l'effettivo

vantaggio ottenuto. Anche la porosità(p) è un parametro legato alla densità relativa ($\bar{\rho}$) dalla legge $p=1-\bar{\rho}$ [34].

Altre importanti caratteristiche intrinseche di molte strutture lattice sono la rigidità, la resistenza a trazione e compressione, dovute anche alla struttura cristallina da cui sono “copiate”, e il fatto che possono essere modulate in base alle necessità variando la densità. Per modulare le proprietà gli altri parametri su cui si può agire in input sono lo spessore delle pareti e la dimensione delle celle. La densità può essere variata anche all'interno della stessa struttura (vedi Fig.34); maggiore densità relativa nelle zone più sollecitate e viceversa. In questo caso si parla di strutture lattice eterogenee.

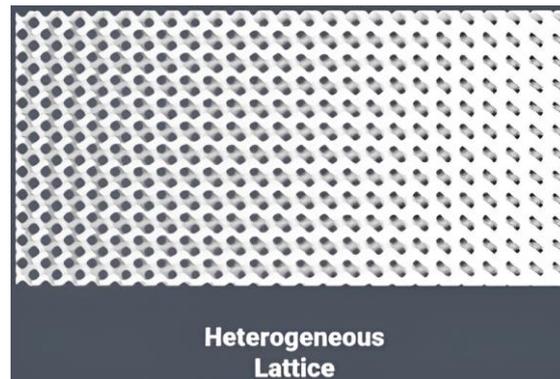


FIG. 34 - LATTICE ETEROGENEO [35]

Ulteriori proprietà disponibili per queste strutture sono:

- Smorzamento delle vibrazioni [36].
- Assorbimento di urti.
- Elevato scambio termico, utile anche durante il processo per diminuire le tensioni.

Oltre a queste è importante citare le proprietà di osteointegrazione, che pur inutile per applicazioni nell'industria meccanica classica, sono importantissime in quella biomedica. Grazie a questo le strutture lattice in titanio hanno avuto grande sviluppo con favorevole impatto sull'ottimizzazione dei parametri di processo.

Ci sono anche altre proprietà minori, soprattutto per quanto riguarda i polimeri esistono strutture in grado di smorzare anche i suoni, soprattutto quelle stocastiche, oppure strutture auxetiche, con coefficienti di Poisson, rigidità, espansione termica e comprimibilità negative [37].

Classificazione

Le strutture lattice, sebbene non esista una classificazione ufficiale, possono essere raggruppate in tre famiglie principali, su base geometrica:

- 1) Planar lattices
- 2) Strut-based lattices
- 3) TPMS structures

Planar lattices

Sono le strutture lattice più semplici in assoluto, basate sulla ripetizione periodica di strutture 2D estruse lungo la terza direzione per creare una struttura tridimensionale. Possono trovarsi in letteratura sotto diverse denominazioni: 2.5D lattices, planar lattice structures, 2D lattices, honeycombs.

Data la loro semplicità di creazione, utilizzando anche CAD tradizionali e senza la necessità di software dedicati, sono state le prime strutture lattice a venir prodotte.

Meccanicamente sono adatte a supportare carichi di trazione e compressione lungo la direzione di estrusione, oltre ad avere buona superficie di scambio termico, e questo le rende una discreta scelta come supporti. Permettono un buon risparmio di peso, ma in molti casi hanno il problema di non poter essere stampate in direzione parallela alla piattaforma.

Sono fragili, cioè non in grado di sopportare urti perpendicolari alla direzione di estrusione e nemmeno carichi di flessione, visto che non hanno una struttura “a nodi” in grado fornire flessibilità come molte altre strutture lattice.

Questi problemi e anche la ridotta ottimizzazione topologica rispetto a strutture più avanzate le rende superate e poco utilizzate.



FIG. 35 - ESEMPIO PLANAR LATTICE [35]

Strut-based lattices

Le strutture lattice strut-based sono così chiamate perché in molte di loro la struttura è effettivamente basata su quella di strutture cristalline presenti in natura nei metalli (BCC ed FCC, cioè cubici a corpo e facce centrate, sono le più utilizzate); possono anche essere derivate da queste, unendo due strutture diverse per sfruttare le proprietà di entrambe.

Ne esistono anche di altro tipo, scollegate dalle strutture cristalline, come le strutture ottaedriche e a diamante. La loro natura le rende molto resistenti e leggere e le possibilità di scelta sono veramente ampie; per questi motivi risultano le strutture lattice più utilizzate in ogni campo.

In questo tipo di strutture la ripetizione delle celle è periodica e i nodi utilizzati per la connessione sono posizionati ai vertici o sul bordo della cella; la presenza di nodi nelle zone di collegamento tra le singole celle è il fattore che caratterizza questo tipo di strutture.

Per le strutture lattice strut-based esiste un metodo per stabilire il tipo di comportamento della struttura, chiamato numero di Maxwell (M), in base al numero di nodi (n) e al numero di celle (s), espresso dalla relazione: [37]

$$M = s - 3 * n + 6$$

Se $M < 0$ le strutture si dicono “bending-dominated”, cioè domina il comportamento a flessione. Il numero di nodi che collegano le celle è limitato e quindi le strutture, se sottoposte a carichi, sono in grado di deformarsi; questo significa che la struttura è meno rigida e si riduce il rischio di collasso della stessa nel caso venga sottoposta a carichi di flessione o torsione, dovuto alla rotazione delle celle attorno ai nodi.

Con $M > 0$ si hanno strutture “stretching-dominated”, dove domina il comportamento a trazione o compressione. L’elevato numero di nodi rende le strutture molto rigide e resistenti, adatte a sopportare elevati carichi assiali ma non in grado di deformarsi e con rischio di collasso in caso di elevati carichi flessionali.

L’utilizzo principale per le strutture lattice strut-based è quello di sostituire un volume o svolgere il ruolo di supporto interno nel caso di componenti sottoposti a carico, sfruttando le loro proprietà meccaniche e la leggerezza. Proprio per la loro elevata resistenza a trazione e compressione le strutture “stretching-dominated” sono molto utilizzate anche come supporto, pur avendo proprietà termiche inferiori rispetto ai TPMS .

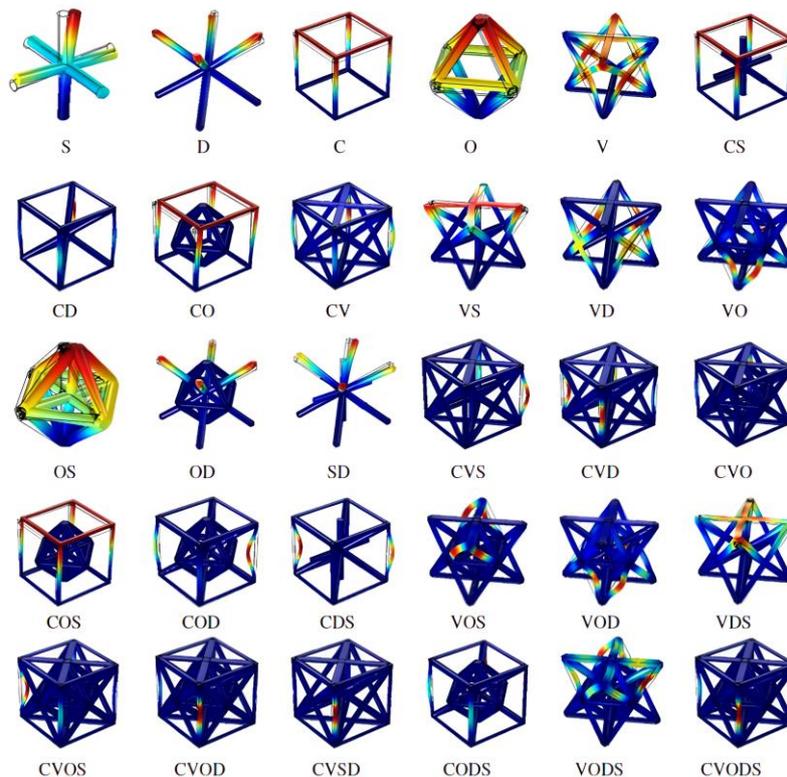


FIG. 36 - STRUTTURE STRUT-BASED STANDARD E COMPOSITE CON RELATIVE DEFORMAZIONI SOTTO CARICO ASSIALE [38]

Altra proprietà utile per questo tipo di strutture è lo smorzamento delle vibrazioni, che diventa ancora maggiore se la ripetizione delle celle non è periodica, ma casuale; si parla di lattice stocastico.

TPMS

Le strutture lattice TPMS (trily periodic minimal surfaces) sono le ultime arrivate in termini di tempo ma hanno già trovato molte applicazioni grazie alle loro proprietà.

Sono basate su formule matematiche (vedi Fig.37) che governano la geometria della struttura, non a caso si trovano in letteratura anche sotto il nome di strutture lattice guidate da equazioni. Le equazioni più comuni sono Schwarz, Gyroid, Neovius e Diamond.

Le equazioni definiscono i confini superficiali tra le zone piene e vuote della struttura[37].

<p>Schwarz: $\cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{L}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right) = P$</p> <p>Gyroid: $\cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{L}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi z}{L}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) = P$</p> <p>Diamond: $\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi z}{L}\right) + \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi y}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right) + \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right) + \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi y}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi z}{L}\right) = P$</p>	<p>P = Isovalue for plotting, "Offset parameter"</p> <p>L = Period of structure</p>
---	---

TPMS function with solid domain: $abs(\text{TPMS Function}) - \text{thickness}$

FIG. 37 - EQUAZIONI DI BASE PER STRUTTURE TPMS [39]

Sebbene non esista una classificazione ufficiale, i TPMS possono essere raggruppati in due famiglie in base al modo in cui vengono creati a partire dall'equazione (Fig.38); i TPMS sheet-based sono ottenute dall'ispessimento delle superfici minimali, mentre nelle strutture cellulari TPMS skeletal-based sono i vuoti tra le minimal surface ad essere riempiti di materiale.

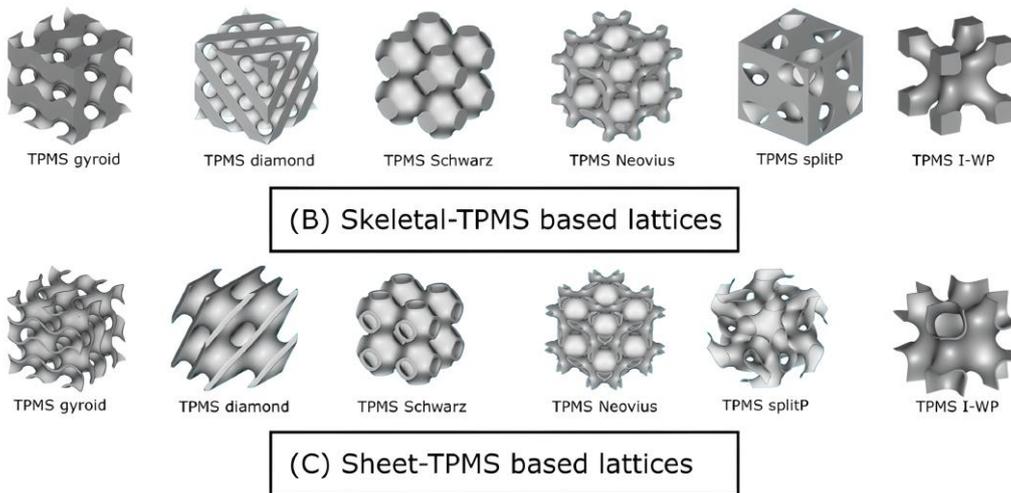


FIG. 38 - ESEMPI STRUTTURE TPMS [34]

Generalmente le TPMS di tipo skeletal hanno un comportamento dominato dalla flessione, mentre le sheet-TPMS sono più adatte ad assorbire carichi di trazione/compressione[40]; mentre per quanto riguarda le sole proprietà meccaniche, le strutture che si sono rivelate più resistenti, a parità di densità, sono quelle derivate dall' equazione Diamond.

In realtà non sono queste le proprietà per cui le strutture lattice TPMS vengono maggiormente utilizzate. Per quanto riguarda le proprietà meccaniche anche la rigidezza di

questo tipo di strutture è elevata, ma la caratteristica migliore è l'assorbimento di energia, quindi la resilienza. Le superfici continue, inoltre, sono caratterizzate dall'assenza di nodi dove possono concentrarsi le tensioni e quindi hanno anche migliore resistenza a fatica delle strutture strut-based. Le proprietà meccaniche, inoltre, possono essere facilmente regolate cambiando la densità relativa.

Sebbene le TPMS siano particolarmente adatte alla produzione tramite fabbricazione additiva, vista la facilità di rimozione delle polveri, la geometria che rispetta i vincoli del DfAM e le proprietà di scambio termico, vi sono due problemi che ne limitano l'utilizzo a livello strutturale: il primo è che risulta molto difficile "riempire" i componenti con queste strutture, mentre il secondo è dovuto all'elevata complessità dei calcoli e quindi al costo computazionale necessario per valutare le proprietà meccaniche ottenibili [41].

Per questo motivo l'utilizzo principale dei TPMS è quello di ricoprire le superfici (vengono chiamati anche surface lattices), sfruttando le eccezionali proprietà termiche. Infatti, oltre ad una bassissima densità e un elevato rapporto superficie/volume, queste strutture presentano una elevata permeabilità ai fluidi [42], il che le rende la soluzione migliore nel caso sia necessario avere un elevato scambio di calore. A questo scopo per controllare la direzione dei fluidi, è possibile variare l'orientamento delle celle creando domini di fluido differenti (controlling gyroids [43]).

Problemi

I problemi principali che affliggono le strutture lattice sono sostanzialmente causati dai limiti intrinseci del processo di produzione L-PBF.

I particolari prodotti con queste tecnologie hanno rugosità superficiali elevate, che dipendono dal materiale, dalla posizione del componente sulla piattaforma di costruzione, dall'inclinazione e da tutti i parametri di processo, come la velocità del laser, lo spessore dello strato (quindi l'effetto scala), la strategia di scansione (il percorso del laser), la morfologia e la distribuzione delle polveri. Questi fattori, oltre che sulla rugosità, hanno influenza anche sulla presenza di eventuali difetti microstrutturali, su tutti fasi non volute, inclusioni e fusione non completa, la cui distribuzione è casuale e non prevedibile. Inoltre, i forti gradienti termici sono responsabili di tensioni residue.

Tutti questi problemi sono comunque presenti in qualsiasi componente prodotto tramite fabbricazione additiva e causano problemi sulla resistenza a fatica [44]; ma la morfologia delle strutture lattice, con pareti molto sottili, ampia variabilità della finitura superficiale e concentrazione delle tensioni nelle zone dei nodi, rende la resistenza a fatica il loro tendine d'Achille.

In realtà non esistono prove standardizzate per valutare la resistenza a fatica delle strutture lattice, ma molti studi fatti utilizzando prove LCF e HCF hanno dimostrato che la resistenza a fatica di questi materiali è estremamente correlata alla presenza di difetti e alla qualità superficiale, seppur dipendente dal tipo di cella utilizzata e dalla densità relativa; infatti, all'aumentare della densità, migliora la resistenza a fatica. Un ulteriore problema è dovuto alla correlazione dei numerosi modelli predittivi della durata a fatica basati su analisi FEM con la casualità nella distribuzione dei difetti.

L'elevata rugosità superficiale e i difetti interni come fusione incompleta, inclusioni e bolle di gas, sono pericolose sorgenti in cui possono formarsi delle cricche che si propagano sotto i carichi ciclici e ancora più velocemente nel caso di tensioni residue.

Per quanto riguarda la microstruttura derivante dai processi di fusione delle polveri tramite laser, occorre sottolineare come i forti gradienti termici portino ad una struttura con grani molto fini, pur orientati nella direzione di scansione, che mitigano leggermente i problemi di resistenza a fatica grazie al meccanismo di rafforzamento per bordo di grano.

Tuttavia, viste le piccole dimensioni delle sezioni che collegano i nodi, soprattutto per strutture strut-based, si ha propagazione delle cricche e frattura di alcune celle, con effetti che si propagano in tutta la struttura causandone il collasso.

Esistono una serie di rimedi per evitare o comunque mitigare il problema della limitata resistenza a fatica. Il più banale è ovviamente ottimizzare i parametri di processo e la strategia di scansione per limitare al minimo i difetti microstrutturali. Ad esempio, per le strutture lattice, è buona norma partire a scansionare l'interno e successivamente i contorni.

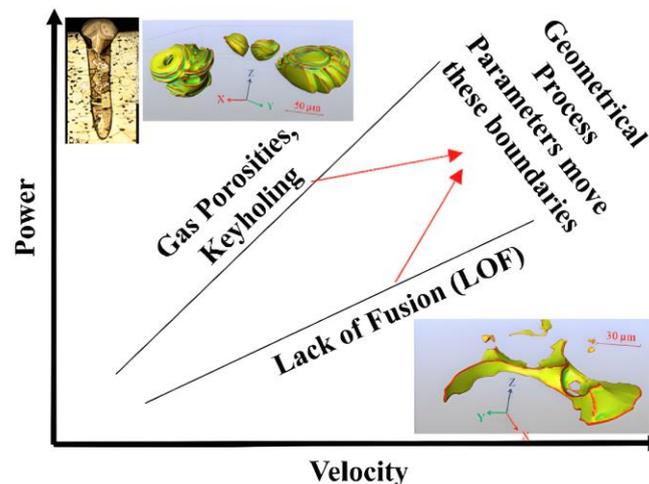


FIG. 39 - COMBINAZIONE DI VELOCITÀ E POTENZA LASER PER EVITARE DIFETTI [44]

Alcune accortezze utili possono anche essere introdotte sulla geometria, tra cui evitare brusche variazioni di spessore o inserire raccordi nelle zone dei nodi per ridurre la concentrazione degli stress, come si fa anche con componenti tradizionali. Le aste sottili che collegano i nodi devono essere rettilinee perché eventuali onde introducono momenti flettenti che causano una riduzione della rigidità della struttura.

Altro metodo per limitare i problemi e massimizzare la resistenza è quello di effettuare trattamenti termici/termochimici. Il più comune per i componenti prodotti con tecniche L-PBF è il processo HIP (Hot Isostatic Pressing), un trattamento termico in cui i componenti sono posizionati in atmosfera inerte ad elevata temperatura e pressione con l'obiettivo di eliminare le porosità e eventuali polveri rimaste intrappolate.

CAPITOLO 3 - MATERIALI E METODI

3.1 Materiali

Per quanto riguarda la fabbricazione additiva di metalli esiste una buona quantità di materiali disponibili, ma il numero di leghe per ognuno di essi è molto limitato.

Questo è dovuto al fatto che i materiali che si possono scegliere sono vincolati ai cataloghi dei fornitori. Il processo di produzione delle polveri, che avviene tramite una tecnologia chiamata atomizzazione, è difficile da mettere a punto per ogni lega e il discorso vale ancor di più per la produzione dei componenti; infatti, ogni materiale richiede un importante know-how per quanto riguarda l'impostazione dei parametri di processo e le aziende preferiscono orientarsi su materiali ben collaudati, che solitamente sono anche la soluzione meno costosa. Oltretutto, non tutti i materiali presentano caratteristiche adatte alla produzione tramite fabbricazione additiva.

I materiali disponibili sono:

- Leghe Alluminio-Silicio
- Acciaio da cementazione 20MnCr5
- Lega Cromo-Cobalto
- Leghe di rame ad elevata purezza
- Oro, argento, platino e palladio per gioielli
- Tungsteno
- Acciai inossidabili
- Leghe Titanio-Alluminio
- Acciai per stampi e utensili

È comunque disponibile una gamma di leghe sempre più ampia grazie agli studi che vengono effettuati.

Per quel che riguarda la componentistica per motorsport i materiali comunemente utilizzati sono le leghe di alluminio, di titanio e cromo-cobalto.

Quest'ultima è adatta ad applicazioni ad alte temperature e dove è necessaria elevata resistenza, ma è troppo costosa e ha densità troppo elevata ($\sim 10 \text{ g/cm}^3$); il suo utilizzo non è quindi giustificato per quanto riguarda il componente oggetto di studio.

Le leghe alluminio-silicio disponibili a catalogo, per quanto riguarda EOS, sono tre:

- AlSi10Mg
- AlSi7Mg0.6
- Al2139 AM

L' AlSi10Mg è la più diffusa, molto adatta alla produzione tramite fabbricazione additiva, poiché già molto usata in ambito fonderia. La sua ampia diffusione è dovuta alle proprietà meccaniche e termiche, quali: elevata resistenza meccanica in rapporto alla bassa densità ($\sim 2.67 \text{ g/cm}^3$), elevata conducibilità termica ed elettrica, ottima resilienza. Oltre a queste, ha

elevata saldabilità e si presta molto bene a trattamenti termici successivi come: T6 (solubilizzazione+ tempra+ invecchiamento artificiale), ricottura o invecchiamento artificiale, allo scopo di modulare le proprietà o ridurre le tensioni residue.

Per le proprietà (vale per questa lega come per tutte le altre), si può parlare di valori generali, in quanto esistono una serie di fattori, anche escludendo i trattamenti termici, che influenzano di molto il risultato; in primis i parametri di processo ma anche la macchina utilizzata.

AlSi7Mg0.6 ha un contenuto maggiore di magnesio, proprietà termiche ed elettriche migliori grazie al minor contenuto di silicio, ma la resistenza meccanica è inferiore e la densità identica alla lega AlSi10Mg. Migliore è invece la resistenza a corrosione. Visto che le piastre di sterzo non necessitano di resistenza ad elevate temperature e proprietà elettriche questo fattore la rende meno adatta all'applicazione di studio; inoltre, una maggiore resistenza a corrosione non è in questo caso positiva, poiché rende il componente meno adatto a eventuali successive personalizzazioni come l'ossidazione anodica.

Lega	Direzione	Rp02 [MPa]	Rm [MPa]	Allungamento %
AlSi10Mg	Orizzontale	220-280	390-440	5-6
	Verticale	220-300	400-440	4-5
AlSi7Mg0.6	Orizzontale	225-235	380-390	8-9

TAB. 1 - PROPRIETÀ MECCANICHE LEGHE AlSi10Mg E AlSi7Mg [45]

Al2139 AM è una lega recentemente introdotta da EOS e sviluppata appositamente per la fabbricazione additiva. Ha contenuto di rame tra il 4.5 e il 5.5%, basse percentuali di manganese e argento e una quantità di silicio inferiore allo 0.1%.

La densità è leggermente più alta rispetto alle altre leghe di alluminio (~2.84g/cm³ contro 2.67g/cm³), ma le proprietà resistenziali sono più elevate e non subiscono variazioni importanti fino a 200°C. il produttore dichiara inoltre che il materiale è particolarmente adatto a trattamenti galvanici come elettrolucidatura e anodizzazione. Queste caratteristiche ne fanno un materiale da prendere in considerazione per un componente racing e per la progettazione generativa.

	Rp02 [MPa]	Rm [MPa]	Allungamento a rottura
Verticale, trattato termicamente	460	520	4%
Orizzontale, trattato termicamente	460	540	6%
Verticale, come fabbricato	350	380	6%
Orizzontale, come fabbricato	350	380	8%

TAB. 2 - PROPRIETÀ MECCANICHE LEGA AL2139AM [46]

Le lega di titanio utilizzata in ambito additive manufacturing è la Ti6Al4V (Tab.3). Al pari della lega AlSi10Mg è una delle più studiate ed è quindi disponibile un ampio know-how per quanto riguarda i parametri da utilizzare e le qualità ottenibili.

Ha caratteristiche resistenziali elevatissime, sia meccaniche che alla corrosione, oltre ad una eccezionale biocompatibilità. Di contro ha bassa conducibilità termica e reagisce all'ossigeno, quindi bisogna controllare attentamente l'atmosfera inerte all'interno della macchina.

La densità è di 4.41g/cm³, quindi circa 1.65 volte maggiore rispetto alle leghe di alluminio, ma la resistenza a trazione e soprattutto a snervamento sono più che doppie, a parità di condizione, nel senso con o senza trattamento termico; questo fa pensare che sia una soluzione decisamente migliore. Tuttavia, bisogna considerare che il guadagno ottenibile con il migliore rapporto densità/resistenza nelle zone in cui la progettazione generativa ha sviluppo "libero" torna contro in alcune geometrie di mantenimento che giocoforza rimangono uguali.

	Come fabbricato	Trattato termicamente
Rm [MPa]	1270	1040
Rp₀₂ [MPa]	1100	930
Allungamento a rottura	8.7%	14%

TAB. 3 - CARATTERISTICHE RESISTENZIALI TIPICHE LEGA Ti6Al4V [47]

Altri fattori negativi sono l'angolo di inclinazione che non necessita di supporti, più basso per il titanio, e il costo al kg della polvere che è mediamente è circa 2.5 volte quello dell'alluminio.

Non a caso il maggiore utilizzo si ha in componenti dove le sue qualità sono strettamente necessarie, oppure in prodotti di alta gamma. Resta quindi una valida alternativa per la produzione da inserire in fase di impostazione del modello e analizzare in seguito.

3.2 Panoramica sulle piastre di sterzo

Le piastre di sterzo sono dei componenti fondamentali dell'avantreno di una motocicletta, in quanto collegano le forcelle, e quindi la ruota anteriore, con il manubrio. Sono quindi il mezzo tramite cui i comandi imposti dal pilota vengono trasferiti alla ruota; allo stesso tempo devono resistere alle sollecitazioni trasmesse da quest'ultima alle forcelle e trasferirle al telaio.

La serie di sterzo, di cui fanno parte le due piastre, è costituita anche da una serie di altri componenti. Un perno centrale, chiamato perno di sterzo (1), è calettato sulla piastra inferiore (2) grazie ad un accoppiamento con interferenza. Un kit cuscinetti di sterzo formato da due cuscinetti obliqui a rulli (3) permette la rotazione; gli anelli esterni sono accoppiati con interferenza sul tubo piantone del telaio, la cui trasparenza è stata aumentata in figura 40a, e due guarnizioni impediscono alle impurezze di penetrare. La ghiera (4) ha lo scopo di precaricare il sistema e fissare la piastra inferiore quando quella superiore (5) non è ancora montata, mentre è presente una vite (6) per fissare la piastra superiore.

La piastra superiore, normalmente, è costituita dalla piastra stessa e dagli alzatori manubrio (7), in gergo si usa il termine inglese “raiser”, fissati alla piastra tramite collegamento bullonato. Il motivo per cui gli alzatori manubrio e la piastra sono due entità distinte è duplice:

- Limitazioni sulla geometria ottenibile imposte dalle tecnologie tradizionali utilizzate per produrre i componenti originali (fusione e stampaggio a stampo chiuso) e anche per i componenti “racing” (fresatura 3 assi)
- Possibilità di cambiare gli alzatori per regolare l’altezza del manubrio, senza dover cambiare la piega del manubrio stesso.

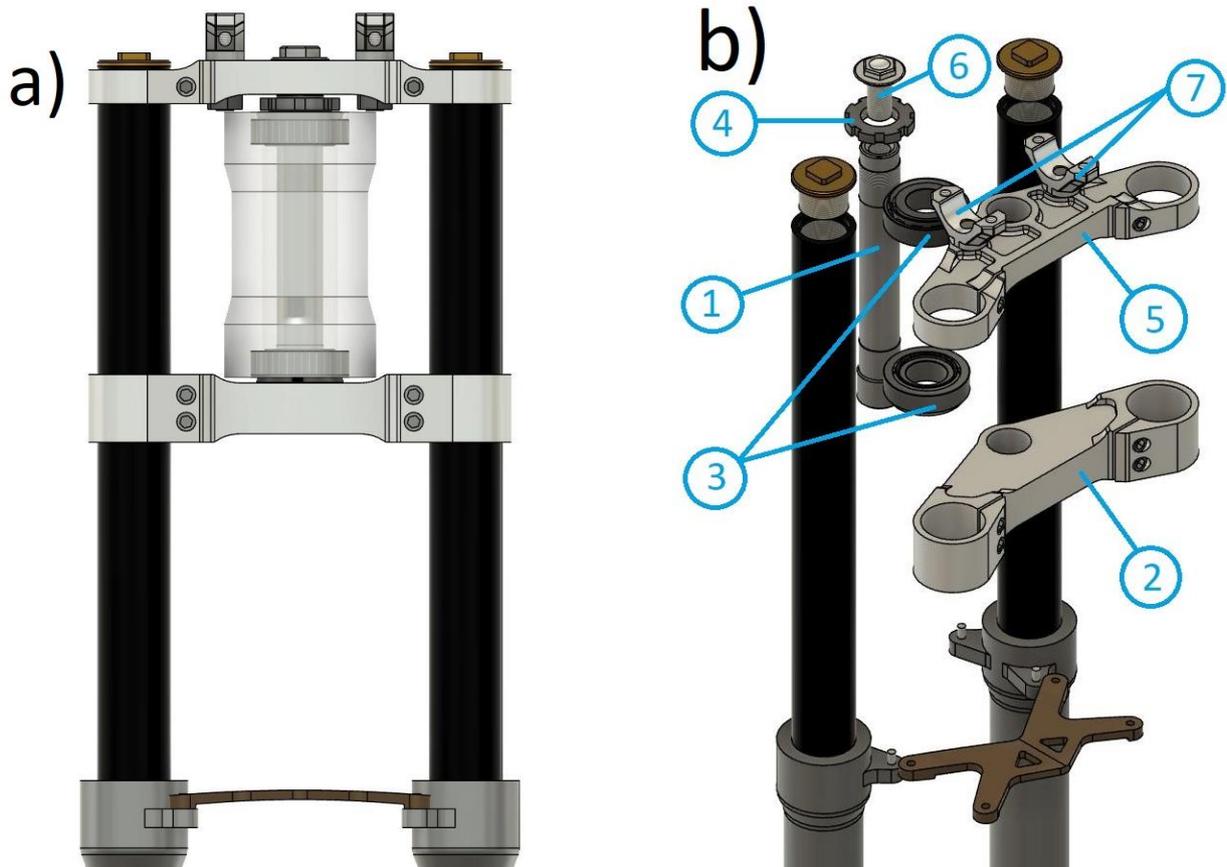


FIG. 40 - A)SERIE DI STERZO B)VISTA ESPLOSA SERIE STERZO

Per quanto riguarda il mercato delle moto da trial, è usanza molto comune per i piloti, e di conseguenza anche per gli appassionati, sostituire alcune componenti originali con componenti ad elevate prestazioni chiamate “special parts”.

Le special parts sono una serie di componenti, di cui fanno parte anche le piastre forcella, che servono a sostituire gli originali, con l’obiettivo di ridurre il peso, aumentare la resistenza o entrambi. I più comuni, oltre alle piastre forcella, sono: pedane, biellette dei leveraggi, coperchi pompa freno e frizione, puntalino freno posteriore e cambio, coperchio carter frizione, viteria.

Solitamente ciò che permette di raggiungere questo risultato è l’utilizzo di un materiale con proprietà meccaniche superiori.

Esistono molti produttori di questa componentistica, che viene utilizzata anche dalle case sulle moto replica. Infatti, tutte le aziende produttrici di moto da trial hanno a listino due

modelli, uno standard e uno “replica”, più simile a quella utilizzata dai piloti ufficiali nei campionati più importanti. Le differenze si concentrano su alcuni settaggi a livello di motore, elettronica e sospensioni, ma soprattutto sul montaggio di alcune parti speciali; le piastre forcella sono sempre una di queste.

La differenza di prezzo tra i due modelli si aggira per tutte le case tra i 1000 € e i 1500 € [48].

Un'altra funzione fondamentale delle special parts è quella estetica; ovviamente ai piloti interessa più il vantaggio in termini di leggerezza e prestazione, ma per l'utente medio, non in grado di percepire il guadagno in questi termini, è forse più importante il colpo d'occhio e l'esclusività. Anche le case produttrici devono tenere conto di questo fattore per poter vendere più motociclette.

Non a caso le special parts hanno quasi sempre colorazioni in tinta con la moto e, se comprate separatamente alla moto sui cataloghi dei produttori, possono essere personalizzate, pagando un extra, con l'incisione del proprio nome.

Le piastre di sterzo originali del modello standard, per le moto da trial più comuni, vengono vendute separatamente come ricambi ad un prezzo di circa[49]:

- 110 € per la piastra inferiore e il canotto di sterzo
- 160 € la piastra superiore completa di alzatori manubrio
- 15 € il dado per fissare la piastra superiore
- 75 € il kit comprendente guarnizioni e cuscinetti

I produttori di special parts più noti sono due e entrambi vendono un kit formato dalle due piastre e dal canotto di sterzo ad un prezzo di poco superiore ai 400€, leggermente variabile in base al marchio della moto. Le personalizzazioni, che sono delle scritte realizzate tramite incisione laser, costano 50€.

I materiali utilizzati per le piastre sono sempre leghe di alluminio 2024 o 7075 t6, identificate a scopo commerciale rispettivamente con i nomi “avional” e “ergal”

Nel costo totale è compreso il trattamento di ossidazione anodica e il canotto di sterzo, che comunque è un albero tornito molto semplice con un'estremità filettata e alcune volte la cava per la chiave a testa esagonale.

Concentrandosi sul componente oggetto di studio, cioè le sole piastre superiore e inferiore, predisposte a mantenere invariato il resto della componentistica originale, l'obiettivo non è solo quello di migliorare le prestazioni, l'estetica e ridurre il peso rispetto al modello originale, ma anche di andare a competere con questo tipo di componenti, sfruttando al massimo le potenzialità del Generative Design e dell'additive manufacturing, nonostante le leghe di alluminio utilizzate per questa tecnologia siano più simili a quelle da fonderia che a quelle da semilavorati utilizzate per la fresatura CNC.

Il mantenimento del tubo di sterzo, del kit cuscinetti, di ghiera e vite originale, che sono diversi per ogni costruttore, è dettata dal fatto di voler rendere il prodotto intercambiabile all'originale, con al massimo piccole modifiche al foro centrale durante la fresatura già necessaria per eliminare il sovrametallo, per tutte le moto che montano la forcella modello Tech Ø39 mm, cioè cinque produttori di moto da trial su sette.

Le piastre di sterzo originali della motocicletta utilizzata per lo studio, una Jotagas JT300 del 2013 (Fig.41a), sono realizzate tramite colata in forma transitoria in terra. I segnali che riconducono a questa tecnica sono la scarsa finitura superficiale (Fig.41b) e la presenza di angoli di sformo.



FIG. 41 - A)JOTAGAS JT300 2013 B)DETTAGLIO FINITURA SUPERFICIALE

Il primo passo dello studio è stato analizzare e successivamente smontare il sistema originale, allo scopo di costruire il modello originale necessario per la progettazione generativa (Fig.42).

Sono stati inoltre realizzati i modelli CAD delle piastre originali, sempre utilizzando il software Fusion 360 di Autodesk, così da poterle successivamente confrontare con i risultati ottenuti dallo studio generativo. Tutte le misure (Fig.42), in mm, sono state rilevate con calibro centesimale.

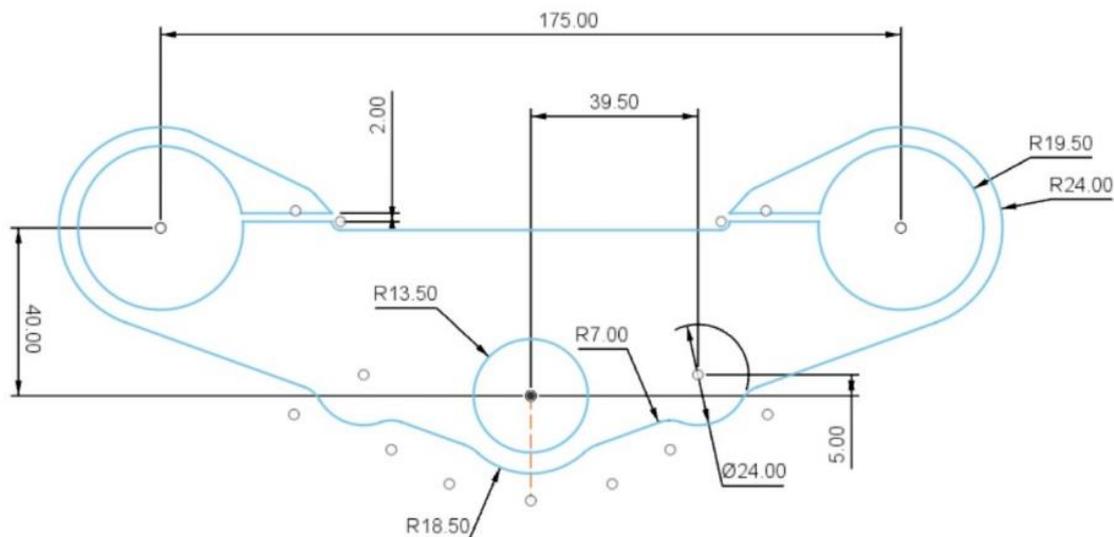


FIG. 42 - MISURE FONDAMENTALI MODELLI CAD

La piastra superiore (Fig.43) è costituita dalla piastra e dagli alzatori manubrio fissati con un collegamento bullonato. La piastra è costituita da una lega AlSi10Mg EN AC 43000, gli alzatori sono invece prodotti tramite pressofusione e la lega è un A356 T6. Considerando per i bulloni un acciaio con densità 8 g/cm^3 , il peso complessivo è di 408g.

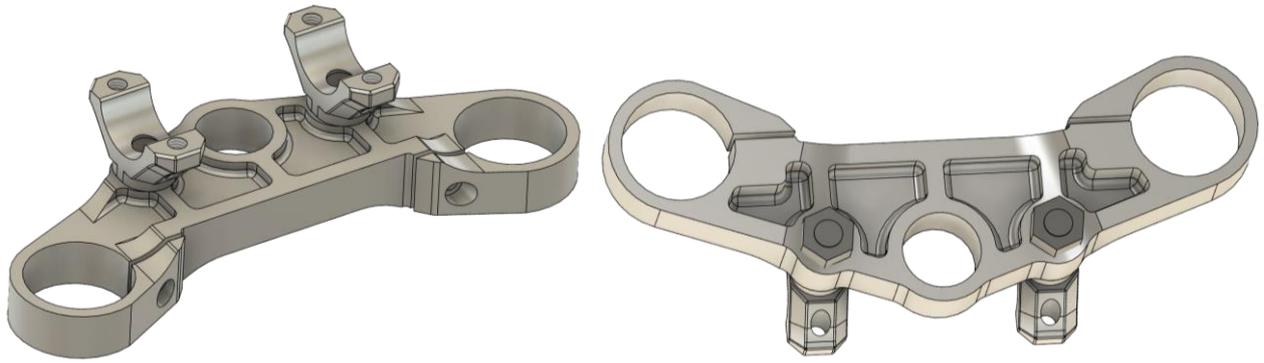


FIG. 43 - MODELLO CAD PIASTRA SUPERIORE ORIGINALE

La piastra inferiore (Fig.44) è formata da un unico componente, sempre in lega di alluminio EN AC 43000. La massa totale è di 494g



FIG. 44 - MODELLO CAD PIASTRA INFERIORE ORIGINALE

3.3 Individuazione del sistema di carichi

Il trial è uno sport differente rispetto agli altri sport motociclistici e questo si ripercuote anche sul sistema di carichi agenti sulle piastre.

I carichi individuati sono applicati alle piastre, nelle zone di accoppiamento tra queste ultime e gli altri componenti del sistema, come gli steli, il manubrio e il perno di sterzo.

La prima forza considerata è quella agente durante la frenata di emergenza. In letteratura è ampiamente collaudato il modello per calcolarla e lo studio di Crocchio [50] ha dimostrato che anche per moto da fuoristrada, trial ed enduro, la frenata di emergenza è la condizione peggiore per quanto riguarda le forze trasmesse lungo la direzione verticale (vedi Fig.45).

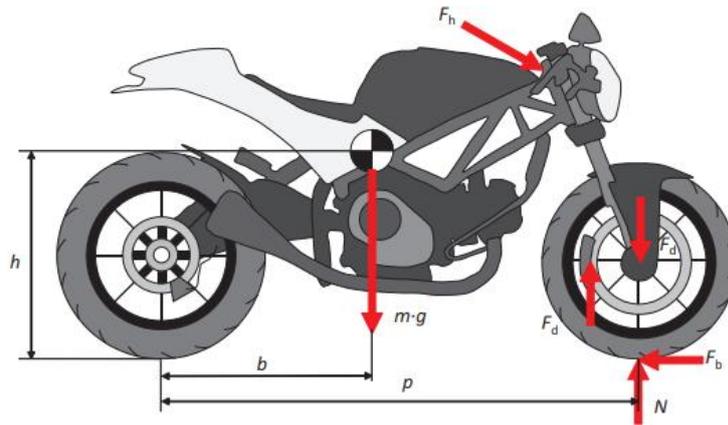


FIG. 45 - FORZE AGENTI DURANTE UNA FRENATA DI EMERGENZA [51]

Il primo passo per ricavare le forze verticali è calcolare la forza di frenata F_b che agisce in direzione orizzontale sul centro di istantanea rotazione, grazie alla relazione:

$$Fb_{max} = \min \left[\mu \times m \times g; m \times g \times \frac{(p - b)}{h} \right] \quad (11)$$

Dove $\mu=0.97$ è il coefficiente di attrito dinamico gomma-asfalto in condizioni ottimali. Normalmente le motociclette da trial vengono utilizzate su terra o roccia, ma essendo omologate per la circolazione su strada la condizione di massima aderenza che può presentarsi è proprio quella con l'asfalto.

Visto i bassi valori di velocità massime che si raggiungono con una motocicletta da trial, circa 60 km/h, l'effetto della resistenza aerodinamica è trascurabile.

I valori di riferimento per una moto da trial sono presenti in letteratura (vedi Tab.4):

m	152	Kg
p	1305	mm
b	500	mm
h	750	mm
r_w	347	mm
r_d	82.5	mm
F_b	1600	N

TAB. 4 - VALORI DI RIFERIMENTO MOTO DA TRIAL[50]

Alla massa di 152 kg è stato aggiunto il peso pilota pari a 100 kg e una moto che in ordine di marcia può arrivare a pesare 80 kg, per un totale di è 180 kg, . Essendo l'ipotesi conservativa, si può trascurare l'influenza sulla posizione del baricentro, visto anche che i dati sono generali e ci possono essere differenze in base a diversi fattori. Quindi, inserendo in (11) questi valori:

$$Fb_{max} = \min \left[0.97 \times 180 \text{kg} \times 9.806 \frac{m}{s^2}; 180 \text{kg} \times 9.806 \frac{m}{s^2} \times \frac{(1.305m - 0.5m)}{0.75m} \right] = \min [1712N; 1894N] = 1712N \quad (12)$$

Per calcolare F_d si utilizza la seguente relazione:

$$Fd = Fb \frac{r_w}{r_d} = 1712N \frac{347mm}{82.5mm} = 7201N \quad (13)$$

Dove r_w e r_d sono rispettivamente i raggi della ruota e del disco freno.

L'angolo presente tra gli steli forcella e la pinza freno è pari a 25° . La forza Fd ha quindi due componenti, una agente lungo la direzione degli steli (14) e l'altra in direzione orizzontale (15), valevoli rispettivamente:

$$Fd, z = Fd \times \cos 25 = 6527 N \quad (14)$$

$$Fd, y = Fd \times \sin 25 = 3043 N \quad (15)$$

I valori ricavati sono validi solamente per la piastra inferiore; infatti, se in questa il valore della forza agente è dato dal peso del pilota sommato a quello della moto, poiché il canotto di sterzo del telaio funge da vincolo, nella piastra superiore la forza è data unicamente dal peso del pilota.

Questo è poi il motivo per cui la piastra superiore è più piccola e serrata tramite una sola vite, mentre quella inferiore con due.

Il modello per ricavare i valori rimane identico, con la sola differenza del peso:

$$Fb_{max}' = \min[0.97 \times 100kg \times 9.806 \frac{m}{s^2}; 100kg \times 9.806 \frac{m}{s^2}] \quad (16)$$

$$\times \frac{(1.305m - 0.5m)}{0.75m} = \min[951.2N; 1052.5N] = 951.2N$$

$$Fd' = Fb' \frac{r_w}{r_d} = 951.2N \frac{347mm}{82.5mm} = 4001 N \quad (17)$$

$$Fd, z' = Fd' \times \cos 25 = 3626 N \quad (18)$$

$$Fd, y' = Fd' \times \sin 25 = 1691 N \quad (19)$$

Durante la frenata di emergenza si ha la condizione peggiore anche per quanto riguarda la forza impressa sul manubrio. Sempre in letteratura è fornita l'equazione per calcolarla [51]:

$$F_{manubrio} = \frac{186N \times 2}{0.3} = 1240N \quad (20)$$

186 N è un valore ricavato sperimentalmente e rappresenta la massima forza applicabile da un braccio umano sotto determinate condizioni al contorno, cioè un angolo di 30° di applicazione e una lunghezza di metà del manubrio pari a circa il 75% della lunghezza spalla-polso. 2 è un coefficiente di sicurezza

Il valore 0.3 al denominatore è inserito perché la forza massima applicabile in condizioni normali, cioè 186N, rappresenta solamente il 30-40% del valore massimo applicabile in una situazione emergenziale, come la frenata considerata.

Entrambe le condizioni sono rispettate anche nel trial. Valutando le immagini (Fig.46) l'inclinazione con cui il pilota imprime la forza è di 30°, non solo per la condizione di frenata di emergenza, ma anche per l'impennata.

Infatti, la stessa equazione può essere utilizzata anche per un'altra condizione di carico presente nel trial, cioè l'impennata, quando il pilota tira il manubrio verso il proprio corpo per sollevare la ruota anteriore.

In quest'ultimo caso il coefficiente di sicurezza viene trascurato, siccome non si tratta di una condizione di emergenza e quindi l'intensità della forza applicabile è inferiore.



FIG. 46 - INCLINAZIONE DELLA FORZA DURANTE IMPENNATA E FRENATA

Per quanto riguarda le forze agenti durante le curve la situazione è molto diversa rispetto agli altri sport motoristici, dove per curvare bisogna inclinare lateralmente la motocicletta e si hanno delle forze agenti lungo l'asse del perno ruota.

Nel trial le curve vengono fatte a bassa velocità ruotando il manubrio. Oltre alle curve è condizione frequente che il pilota, in posizione eretta a moto ferma, ruoti bruscamente il manubrio allo scopo di mantenere l'equilibrio o preparare manovre successive. Durante questo movimento è molto importante per il pilota che la risposta del sistema sia rigida, cioè che non vi sia una percezione di ritardo tra l'imposizione della forza e la risposta della ruota anteriore.

Questo tipo di forze sono state calcolate riferendosi al modello proposto per calcolare la coppia di sterzo, che utilizza la seguente equazione:

$$T = (F_{HB,R} - F_{HB,L}) \times l_a = (F_{S,L} - F_{S,R}) \times l_i \quad (21)$$

Dove F_{HB} sono le forze applicate alle manopole destra e sinistra, mentre F_S sono le forze di reazione che si generano in corrispondenza degli alzatori manubrio (vedi Fig.47).

l_a e l_i sono invece le distanze delle estremità del manubrio e degli alzatori dall'asse di sterzo e valgono rispettivamente 400mm e 39.5mm.

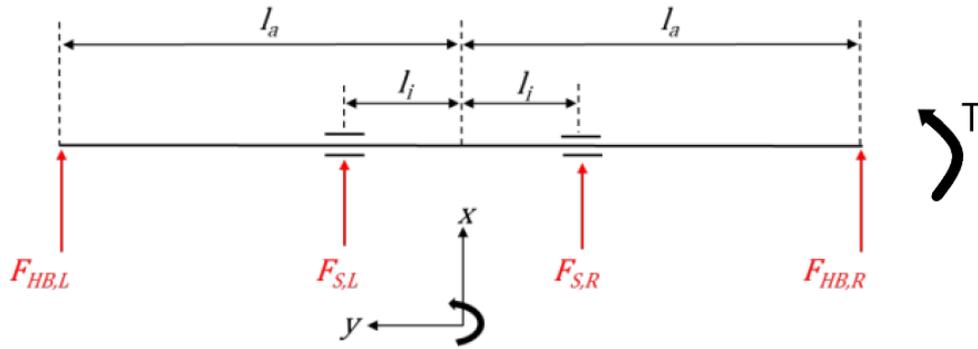


FIG. 47 - MODELLO DI MANUBRIO SEMPLIFICATO[52]

Le forze FHB sono state determinate facendo riferimento sempre alla massima forza applicabile da un essere umano, 186N, sotto determinate condizioni al contorno, che sono valide anche in questa situazione. La forza con cui si tira è considerata uguale a quella con cui si spinge, così da avere la massima coppia di sterzo possibile.

$$T = (186N - (-186N)) \times 400mm = 148800Nmm \quad (22)$$

Con il coefficiente di sicurezza pari a 2 e non considerando lo 0.3 al denominatore, le forze salgono a 372N e la coppia a 297600Nmm.

In tutte le prove realizzate negli articoli consultati [53]–[55], pur rivolgendosi a tipologie di motociclette, condizioni d'uso e dimensioni diverse, le massime coppie di sterzo riscontrate sono sempre comprese tra i 40 e i 65Nmm, cioè 4.6 volte meno rispetto a quella considerata per il caso d'esame.

Per verificare ulteriormente la validità dei risultati si è provato a valutare quale fosse la massima sollecitazione a cui può essere sottoposto il manubrio per evitare snervamento, considerandolo come asta incastrata nel punto dell'alzatore manubrio. Prendendo i dati di uno dei modelli da trial più recenti e di alta qualità di cui sono disponibili geometria (sezione costante circolare cava $D=22.2mm$ $s=5mm$) e materiale (Al2014 con $R_{p0.2}=380Mpa$), si ottiene:

$$\sigma = \frac{M_f}{W_f} = \frac{F \times (400mm - 39.5mm)}{976.16mm^3} \rightarrow F = 1029N \quad (23)$$

Quindi applicando 372N il coefficiente di sicurezza del manubrio risulta pari a 2.7.

Occorre comunque precisare che, in tutti i casi, considerare le forze applicate esattamente all'estremità del manubrio, è una ipotesi conservativa. Nella realtà sono applicate al centro della manopola.

A questo punto è possibile ricavare i valori delle forze massime agenti sugli alzatori manubrio durante la sterzata:

$$F_{S,R} = F_{S,L} = \frac{(372N - (-372N)) \times 400mm}{2 \times 39.5mm} = 3767N \quad (24)$$

Calcolate le forze agenti sugli alzatori manubrio (24), lo stesso modello è stato utilizzato per determinare i carichi agenti sugli anelli delle piastre e quindi sugli steli forcella, in direzione perpendicolare all'asse del manubrio, chiamate F_1 e F_2 :

$$F_1 = F_2 = \frac{F_{S,R} \times 39.5mm}{87.5mm} = 1701N \quad (25)$$

87.5mm è la distanza tra l'asse dello stelo e l'asse di sterzo, come visibile in figura 42.

3.4 Impostazione del modello

Il modello generativo è realizzato tramite il software Fusion 360 di Autodesk.

Il primo passo consiste nell'individuazione delle geometrie di mantenimento, cioè quelle parti della geometria iniziale che devono essere mantenute anche nel componente finale; solitamente sono zone di accoppiamento con altre componenti del sistema e sono le uniche parti su cui si possono applicare i carichi e i vincoli. Sono identificate con il colore verde.

Successivamente alle geometrie di mantenimento, si deve creare, se presente, la geometria di ostacoli, composta di tutte quelle zone dove sono presenti ostacoli durante l'utilizzo del componente finale. In certi casi si può anche definire un offset agli ostacoli. Sono identificate dal colore rosso.

È inoltre possibile fornire al software la geometria originale (colore giallo), ma questo è facoltativo ai fini della progettazione e appesantisce i calcoli; per questo motivo, pur essendo presente in alcune immagini per renderle più chiare, non verrà utilizzata nel momento di avviare la progettazione generativa.

Tutte queste componenti vengono create con il modulo CAD tradizionale e solo successivamente possono essere modificate e assegnate alla loro categoria di appartenenza nel modulo di progettazione generativa.

Piastra inferiore

Per la piastra inferiore le geometrie di mantenimento sono tre anelli, quello centrale sede del perno di sterzo e due laterali accoppiati agli steli forcella (Fig.48). Altezze, posizioni e diametri sono stati mantenuti uguali a quelli originali, trascurando alcuni raccordi per facilitare il processo di progettazione generativa, come consigliato dalla guida all'utilizzo del software.



FIG. 48 - GEOMETRIA DI MANTENIMENTO PIASTRA DI STERZO INFERIORE

Della geometria di ostacoli fanno parte, oltre ai cilindri che simulano gli steli forcella e il canotto di sterzo, una piastra "alta" e una piastra "bassa". La piastra alta impedisce il posizionamento di materiale nella zona dove è presente il tubo di sterzo del telaio, che ha un diametro alla base di 59mm, con margine di 1mm, e delimita le possibilità di sviluppo superiore della generazione.

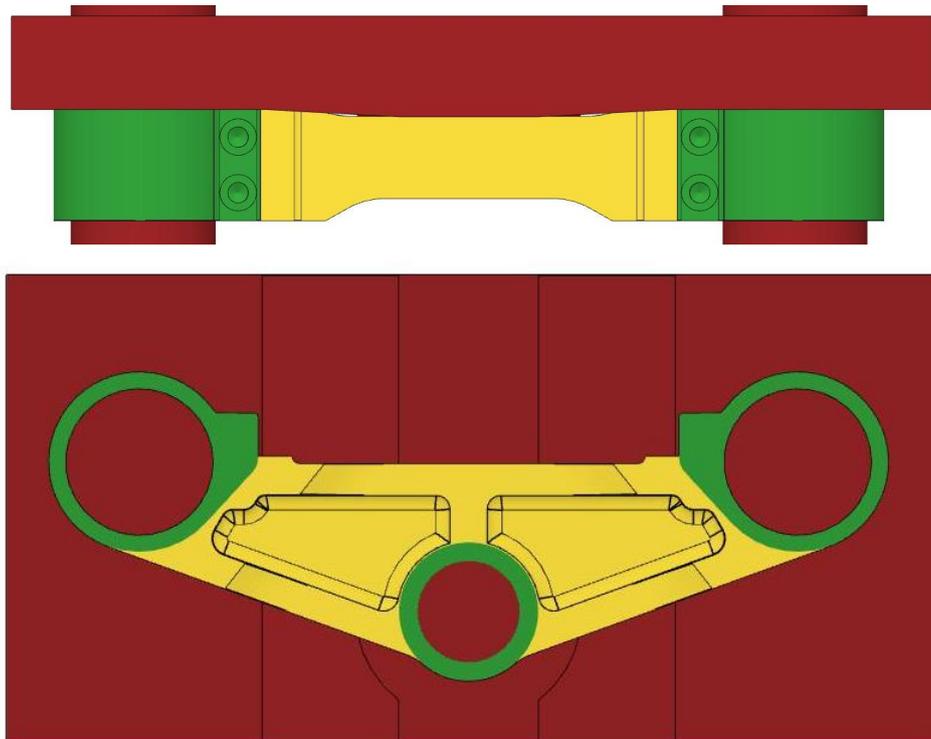


FIG. 49 - VISTA POSTERIORE E DAL BASSO PIASTRA "ALTA"

La piastra "bassa" delimita inferiormente la progettazione e in questo caso l'ostacolo da evitare è il parafrangente della ruota nella condizione di fine corsa della forcella. L'inserto posizionato perpendicolarmente alla piastra ha invece il compito di impedire il

posizionamento del materiale oltre il taglio necessario per il serraggio degli steli, che verrà implementato in una fase successiva.

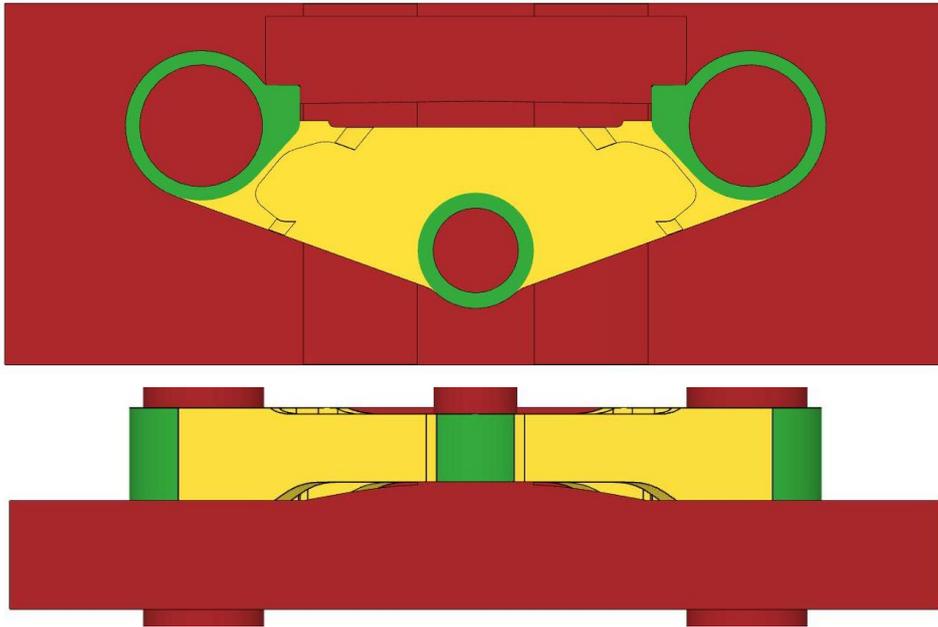


FIG. 50 - VISTA DALL'ALTO E INFERIORE PIASTRA "BASSA"

I carichi e i vincoli sono invece applicati, come anticipato, esclusivamente alle geometrie di mantenimento, quindi ai tre anelli.

Per la piastra inferiore le condizioni di carico applicate sono quattro; due uguali e opposte rappresentano la torsione, una destra e una sinistra, con forze di 1701N ricavate nel capitolo 3.3.

Alla superficie interna dell'anello centrale è applicato il vincolo "fisso" in tre direzioni, scelta conservativa poiché nelle condizioni reali può ruotare, mentre le forze uguali e opposte sono applicate alle superfici interne degli anelli interni.

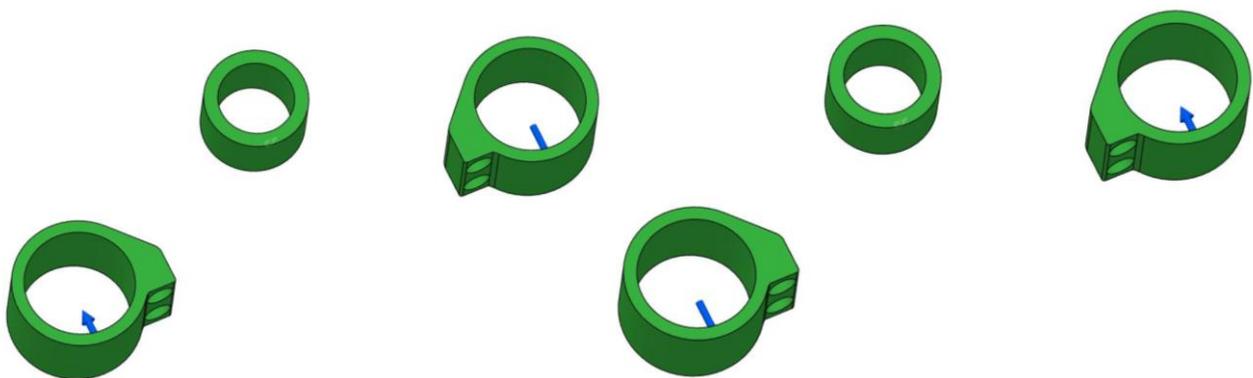


FIG. 51 - CONDIZIONI DI CARICO TORSIONE DESTRA E SINISTRA

Le altre due condizioni di carico rappresentano le forze verticali e orizzontali che si generano durante la frenata di emergenza. La forza verticale $F_{d,z} = 6527\text{N}$ è divisa equamente tra i due steli; sono quindi applicate due forze da 3263.5N alle superfici interne degli anelli esterni e il vincolo "fisso" all'anello centrale, che nella realtà è bloccato verticalmente dal tubo di sterzo del telaio, come illustrato in Fig.53.

La forza orizzontale $F_{d,y} = 3044\text{N}$ è divisa equamente tra i due steli e applicata alla superficie interna dei due anelli esterni. Il vincolo è sempre di tipo “fisso” e applicato sulla superficie interna dell’anello centrale; in questo caso è il perno di sterzo a fungere da vincolo.



FIG. 52 - CONDIZIONE DI CARICO $F_{d,z}$



FIG. 53 - CONDIZIONE DI CARICO $F_{d,y}$

Piastra superiore

Nel caso della piastra superiore l’impostazione del modello richiede un numero maggiore di componenti, sia per le geometrie di mantenimento, che per quelle di ostacoli.

Per quanto riguarda le geometrie di mantenimento ai tre anelli è necessario aggiungere gli alzatori manubrio (Fig.54), a cui andranno applicate le forze impresse dal pilota sul manubrio. Anche in questo caso le quote fondamentali sono state mantenute uguali a quelle del componente originale. Solo la geometria degli alzatori manubrio e la posizione in altezza degli anelli esterni sono state modificate rispetto al componente originale (colore giallo, vedi Fig.57).

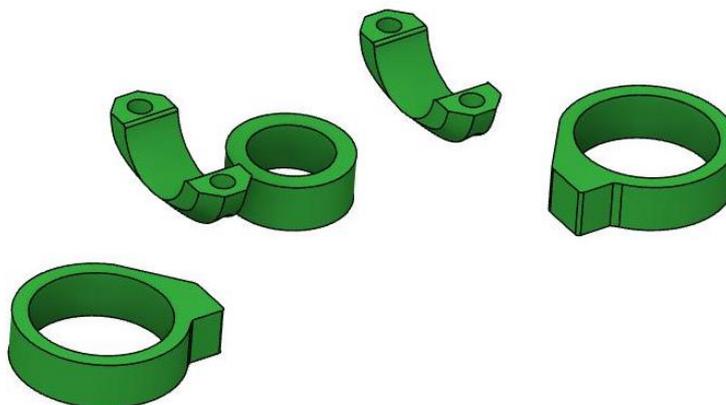


FIG. 54 - GEOMETRIE DI MANTENIMENTO PIASTRA SUPERIORE

La geometria di ostacoli è composta da una serie di cilindri che simulano gli steli, il perno di sterzo, il manubrio e le viti per serrare il manubrio, sempre identificati con colore rosso come illustrato in Fig.55.

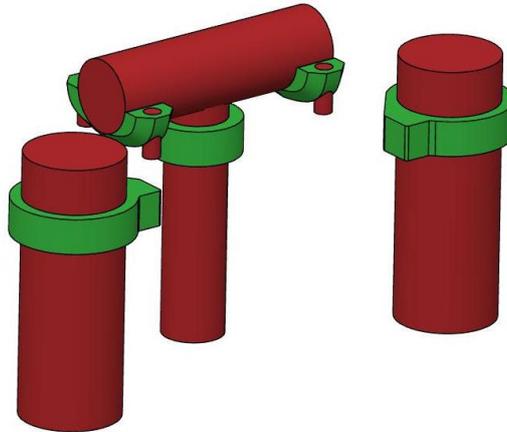


FIG. 55 - GEOMETRIE DI OSTACOLI CILINDRICHE

Due piastre delimitano superiormente e inferiormente la progettazione generativa. La loro geometria tiene conto di vincoli estetici e funzionali, come la presenza e il montaggio del dado e della ghiera per fissare il sistema. L'inserto ha il compito di impedire il posizionamento di materiale oltre il taglio necessario a serrare la piastra sugli steli, che verrà implementato successivamente.

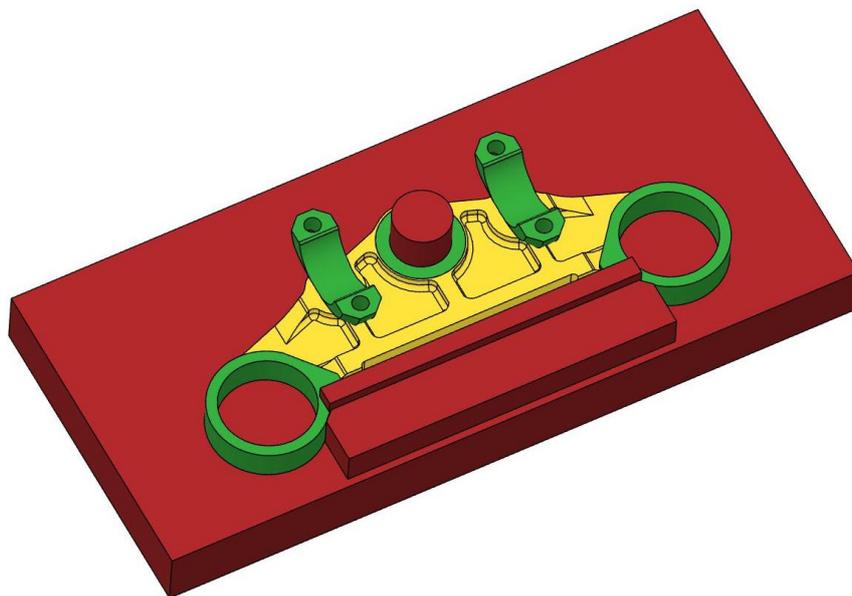


FIG. 56 - PIASTRA "BASSA" CON INSERTO

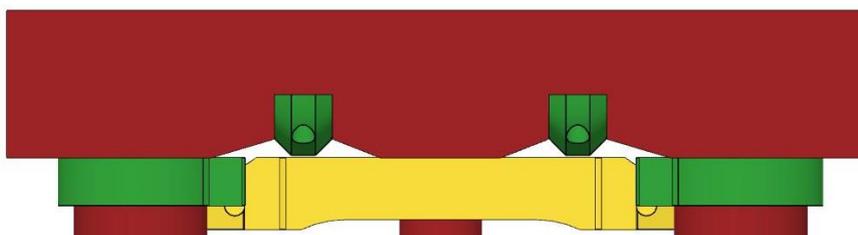


FIG. 57 - PIASTRA "ALTA"

Il numero di condizioni di carico presenti sulla piastra superiore è più elevato, siccome sono presenti i carichi agenti sia sugli anelli che sugli alzatori manubrio

Le condizioni di carico "torsione", destra e sinistra, sono applicate in modo speculare a prima, cioè con il vincolo di tipo fisso sulla superficie interna dell'anello centrale e due forze di 3767N applicate questa volta sulla superficie interna degli alzatori, a contatto con il manubrio. Sugli anelli laterali vengono applicate le reazioni di 1701N, secondo il modello ricavato al paragrafo 3.3 (vedi Fig.58).

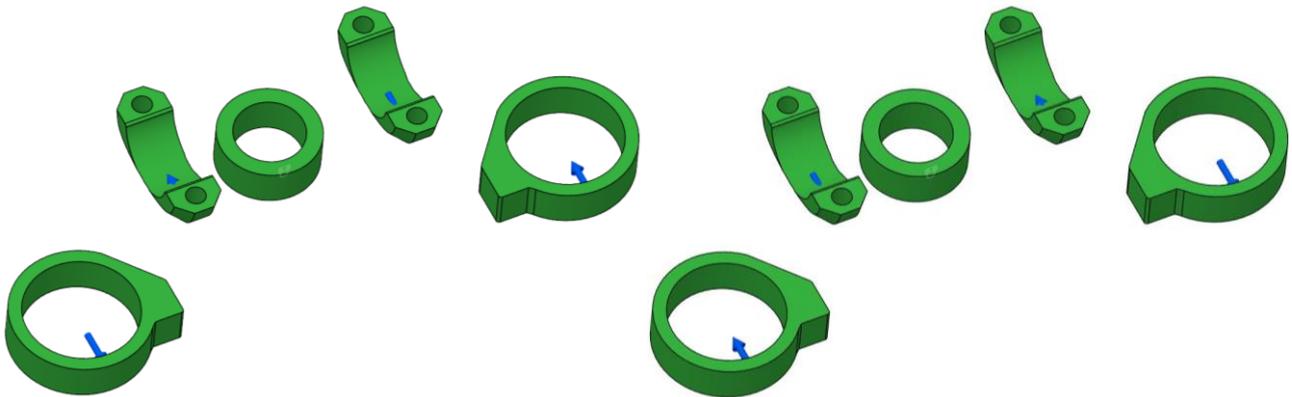


FIG. 58 - CONDIZIONI DI CARICO TORSIONE DESTRA E SINISTRA PIASTRA SUPERIORE

Le forze che agiscono sugli steli forcella durante la frenata di emergenza sono applicate alla superficie interna degli anelli laterali, sempre con il vincolo di tipo fisso applicato sull'anello centrale. I valori sono inferiori rispetto alla piastra inferiore, come dimostrato dal modello di calcolo, e le forze verticali $F_{d,z'} = 3626\text{N}$ e orizzontali $F_{d,y'} = 1691\text{N}$ sono equamente divise tra i due steli (Fig.59 e 60). La direzione della forza orizzontale è opposta rispetto alla piastra inferiore poiché durante la frenata la forza impressa dal pilota ha direzione contrario rispetto alla reazione col terreno. I cuscinetti del perno di sterzo fungono da fulcri tra le due forze $F_{d,y}$ opposte.

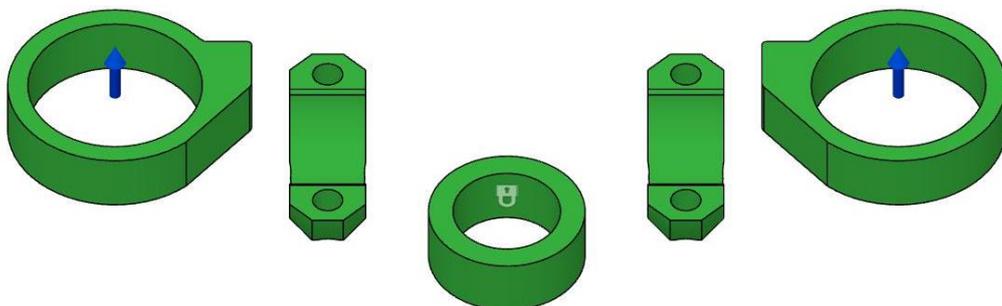


FIG. 59 - CONDIZIONE DI CARICO $F_{D,z'}$

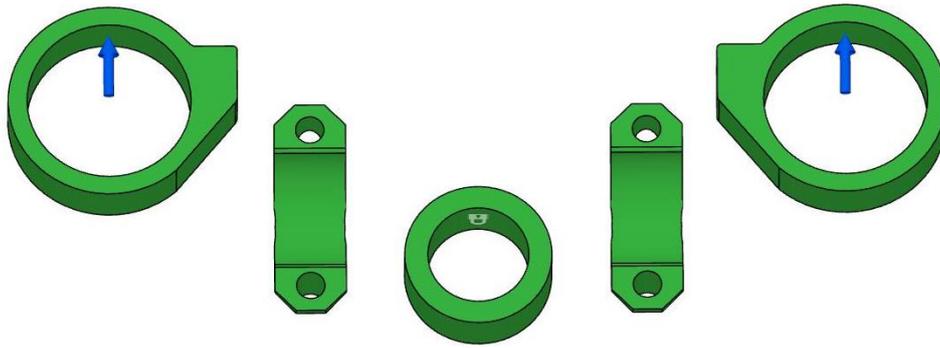


FIG. 60 - CONDIZIONE DI CARICO F_D, Y'

L'ultima condizione di carico applicata alla piastra superiore riguarda le forze che agiscono sulla superficie interna degli alzatori manubrio durante la frenata di emergenza e l'impennata; la prima ha un'intensità di 1240N e la seconda di 620N. Entrambe sono divise equamente tra i due alzatori e inclinate di 30° rispetto alla verticale.

Il vincolo di tipo "fisso" è sempre applicato alla superficie interna dell'anello centrale, tenuto in posizione nella realtà dal telaio e dal perno di sterzo (Fig.61).

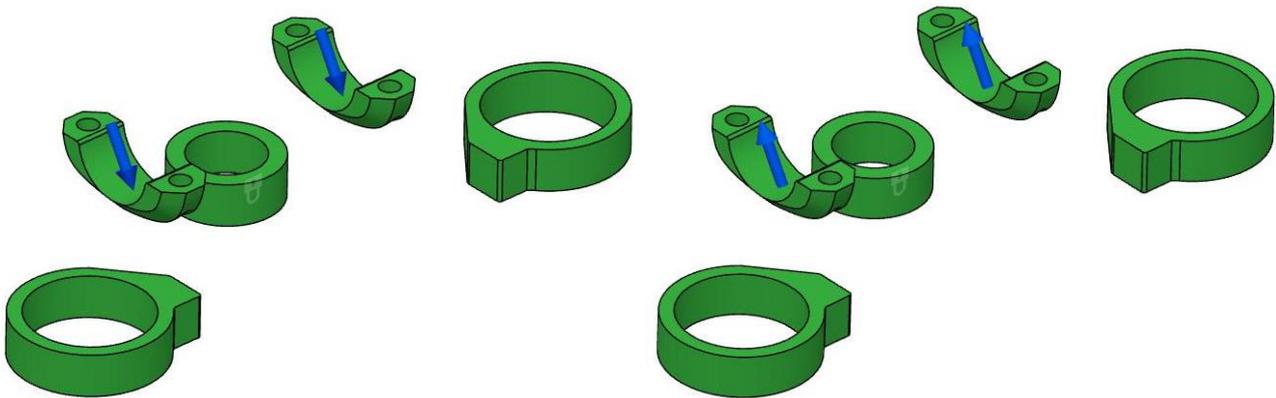


FIG. 61 - CONDIZIONI DI CARICO FRENATA DI EMERGENZA E IMPENNATA

Criteri di progettazione

Completata la costruzione del modello e impostato il sistema di carichi agenti, la fase successiva riguarda l'inserimento dei criteri di progettazione, cioè una serie di obiettivi da raggiungere durante la generazione e i processi produttivi e loro vincoli con cui avviare la stessa.

La finestra riguardante gli obiettivi pone il progettista di fronte a due scelte riguardanti il risultato che si vuole ottenere:

- Ridurre al minimo la massa
- Massimizzare la rigidezza

Nel primo caso il software permette di impostare il minimo coefficiente di sicurezza al di sotto del quale la progettazione generativa non può scendere, mentre nel secondo, oltre al fattore di sicurezza, è possibile impostare il peso massimo entro cui la parte deve rimanere.

A seguito di numerose prove si è scelto di utilizzare come criterio la riduzione al minimo della massa, con un fattore di sicurezza pari a 2.

I motivi sono molteplici; per prima cosa si è notato come la prima scelta fornisca, a parità di coefficiente di sicurezza minimo, modelli più leggeri e esteticamente piacevoli rispetto alla seconda, a fronte di spostamenti massimi solo leggermente superiori. La riduzione di peso è poi fin dalle fasi iniziali riconosciuta come il principale obiettivo da ottenere per il tipo di sport e componente.

Inoltre, nel caso si imposti come obiettivo quello di massimizzare la rigidità e un peso massimo pari a quello che si ottiene con la minimizzazione della massa, si ottengono spesso modelli che non arrivano a convergenza e tempi di generazione molto più lunghi.

La scelta del fattore di sicurezza è determinata a seguito dell'analisi dei risultati ottenuti tramite simulazioni FEM sui componenti originali, impostando lo stesso schema di carichi utilizzato per il modello generativo. Occorre comunque considerare che durante la definizione del sistema di carichi sono state utilizzate ipotesi conservative e coefficienti di sicurezza.

Il modulo riguardante la produzione permette al progettista di avere diverse possibilità in termini di tecniche produttive con cui avviare il processo di progettazione generativa.

I metodi di produzione disponibili sono:

- Non limitato: è un metodo di sola progettazione che esclude i vincoli produttivi dal processo di generazione. Consente di esplorare il risultato teorico migliore possibile ottenibile grazie al design generativo e confrontarlo con quello delle tecnologie produttive reali.
- Additivo: riguarda la fabbricazione additiva. Il software può generare risultati su sei le possibili orientazioni della parte considerando i vincoli produttivi del design for additive. Il vincolo riguardante il massimo angolo di sporgenza, 45° per leghe di alluminio (Fig.62) e 35° per quelle di titanio, è singolo e quindi bisogna avviare uno studio differente per ogni materiale che si vuole valutare. Una ulteriore scelta a discrezione dell'utensile è lo spessore minimo delle pareti, che è stato impostato in 2.5mm, per evitare di avere parti troppo fragili vista la destinazione d'uso del componente in esame, nonostante i limiti imposti dal DfAM permettano di scendere fino a 0.5mm.



FIG. 62 - MODULO "ADDITIVO" PER LEGHE DI ALLUMINIO

- Fresatura: modulo importante utilizzato per esplorare i risultati ottenibili con il design generativo e la fresatura a 3assi, cioè il metodo produttivo più utilizzato dai produttori di special parts, e confrontarli con quelli ottenuti per la fabbricazione additiva. Il modulo di progettazione permette di scegliere fino a sei direzioni dell'utensile e i minimi parametri utilizzabili per quest'ultimo. Il diametro minimo dell'utensile è stato impostato in 6mm con lunghezza spalla di 30mm e diametro testa 30mm.
- Taglio a 2 assi: si riferisce a tecniche di taglio laser, ad acqua o al plasma, ma non c'è interesse verso l'applicazione di queste tecniche per il componente in esame.
- Pressofusione: modulo che permette di ricavare modelli generativi adatti alla produzione mediante tecniche fusorie, quindi le stesse utilizzate per il componente originale, impostando la direzione di estrazione, il minimo angolo di sformo e gli spessori massimo e minimo. Questi sono stati impostati rispettivamente in 3°, 13mm e 3mm come consigliato dal software. L'unica direzione di estrazione possibile è Z.

Una ulteriore e importante funzione del modulo di produzione è la stima dei costi, che permette di avere una indicazione generale del costo di produzione dei singoli componenti realizzati con le varie tecniche sopracitate, inserendo il numero di pezzi che si intende produrre annualmente. Le stime sono interne al software ma basate sull'utilizzo di un sito esterno e sono piuttosto generali in quanto non tengono conto del costo preciso dei materiali, della singola macchina, dei tempi di attrezzaggio e di lavorazioni successive.

Il valore inserito del numero di pezzi annuo su cui calcolare la stima è 200, considerando che si tratta di un prodotto di nicchia pensato per una clientela esigente.

Materiali di studio

Il software permette di scegliere i materiali, diversi per ogni tecnologia produttiva, grazie al modulo "materiali di studio". Come già anticipato sono stati eseguiti due studi diversi, poiché nella fabbricazione additiva si può impostare solo un angolo di sporgenza per studio e alluminio e titanio hanno valori diversi da inserire per questo parametro.

Per ogni tecnologia produttiva sono stati individuati i seguenti materiali, scegliendo dalla libreria del software, a cui associare una progettazione generativa:

- Non limitato: Ti6Al4V e AlSi10Mg, cioè quelli di interesse per la fabbricazione additiva oggetto di studio, con la quale confrontarne i risultati.
- Additivo: AlSi10Mg nel primo studio con angolo di sporgenza 45° e Ti6Al4V nel secondo con angolo di sporgenza 35°.
- Fresatura: leghe di alluminio da semilavorati 6061 e 7075t6, cioè quelle maggiormente utilizzate per produrre parti originali fresate o special parts.
- Pressofusione: A356 T6, che è una lega di alluminio da fonderia disponibile a libreria, utile per il confronto.

Sempre all'interno del modulo materiali di studio è presente un sotto-modulo per la gestione dei materiali. Per lo studio in esame sono stati modificati i parametri dei materiali utilizzati

per la fabbricazione additiva, allo scopo di renderli uguali a quelli disponibili per macchine EOS illustrati nel capitolo 3.1.

I materiali utilizzati per le altre tecnologie non sono stati modificati in quanto servono solamente ad un confronto indicativo con i componenti prodotti mediante additive.

CAPITOLO 4 – ANALISI DEI RISULTATI

4.1 Analisi modelli generativi

Piastra superiore

Lo studio della piastra superiore ha fornito risultati per tutte le tecnologie produttive e orientazioni richieste. Partendo dalla fabbricazione additiva con lega di alluminio il software ha portato a termine i progetti per gli orientamenti x+, x-, y+, y- e z+, mentre per z- non è riuscito ad arrivare a convergenza. Gli orientamenti x+, y+ e z+ indicano quale asse del componente è parallelo alla direzione di costruzione della macchina (asse z della macchina, che non corrisponde all'asse z del componente). Gli orientamenti pezzo negativi corrispondono in direzione a quelli positivi ma con il componente rivolto al contrario.

I progetti sono successivamente stati sviluppati e analizzati con considerazioni economiche, resistenziali, produttive ed estetiche per operare una scelta sull'orientamento da elaborare successivamente. Per aiutare in questo scopo è stato utilizzato il software Autodesk Netfabb Premium 2023, che ha permesso di comprendere la quantità e la posizione dei supporti necessari per ogni orientazione, considerando per tutti i progetti una distanza di 2mm dalla piattaforma di costruzione e tipologia di supporti a y consigliati per L-PBF.

In tabella 5 sono visualizzati i risultati ottenuti.

Nome	Materiale	Metodo di produzione	Costo per pezzo (\$)			Costo medio completo (\$)	Massa (g)	Sollecitaz. di von Mises max (MPa)	Spost. max globale (mm)	volume supporti (cm ³)
			min	max	medio					
6 x+	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	81	171	127	129	244	120	0.52	138
7 y+	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	82	167	124	127	256	120	0.50	143
8 z+	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	79	160	120	122	238	120	0.49	35

9 x-	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	81	171	127	130	245	120	0.63	136
10 y-	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	81	165	123	125	250	120	0.51	130
11 z-	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	83	173	128	131	259	120	0.48	23
originale	Al356	fonderia					408	448	0.18	

TAB. 5 - RISULTATI MODELLI LEGA DI ALLUMINIO E COMPONENTE ORIGINALE

Come si nota immediatamente tutti i modelli per fabbricazione additiva generati dal software hanno costi (stimati dal software in dollari), masse, sollecitazioni massime e spostamenti molto simili.

La sollecitazione sul componente originale di 448MPa, corrispondente ad un fattore di sicurezza di 0.46, è localizzata in un punto del componente, in una zona di contatto tra la piastra e un dado, ed è imputabile ad un difetto di approssimazione della mesh. Il resto del componente è caratterizzato da sicurezze uguali e superiori a 2, in linea coi risultati ottenuti sui modelli generativi, dove però il risultato in questi termini è più uniforme.

I valori di spostamento sono invece più elevati per i modelli ricavati grazie alla progettazione generativa rispetto all'originale, ma questo è dovuto alla riduzione di peso ed è un risultato temporaneo, visto che la rigidità complessiva andrà valutata sul sistema completo.

In Figura 63 sono illustrati tutti i risultati ottenuti per i modelli generativi; mentre dalla figura 64 alla 66 il posizionamento dei supporti consigliato dal software Netfabb per le cinque direzioni sviluppate.

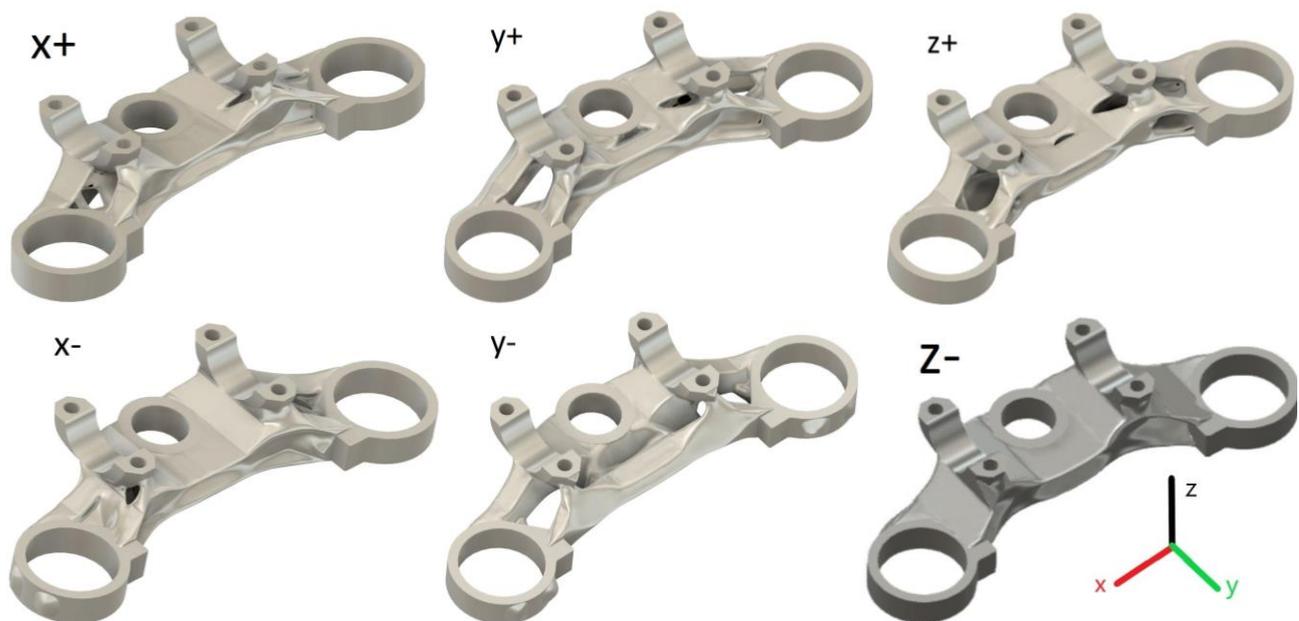


FIG. 63 - MODELLI GENERATIVI ORIENTAZIONI X+, Y+, Z+, X-, Y- E Z-

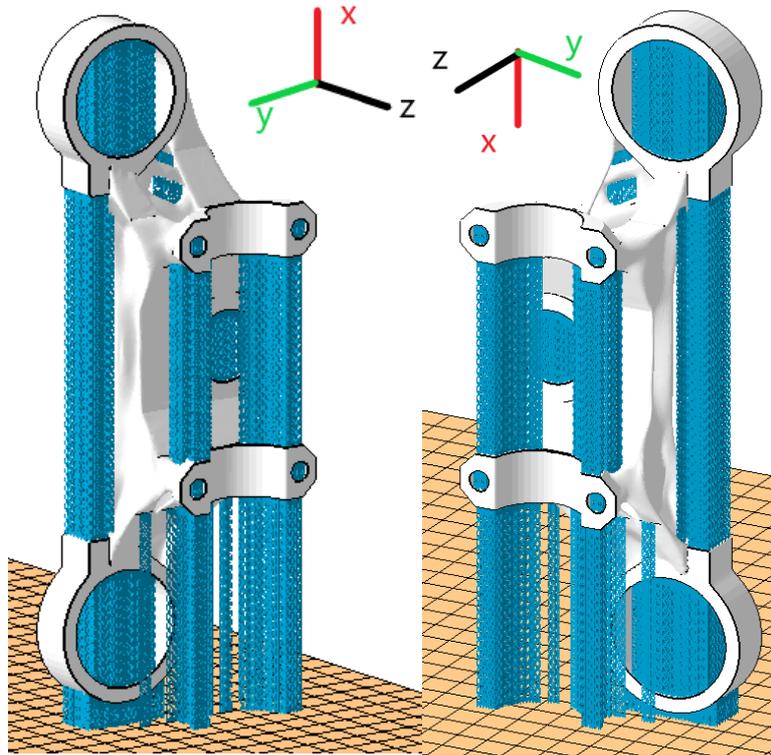


FIG. 64 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI X+ E X-

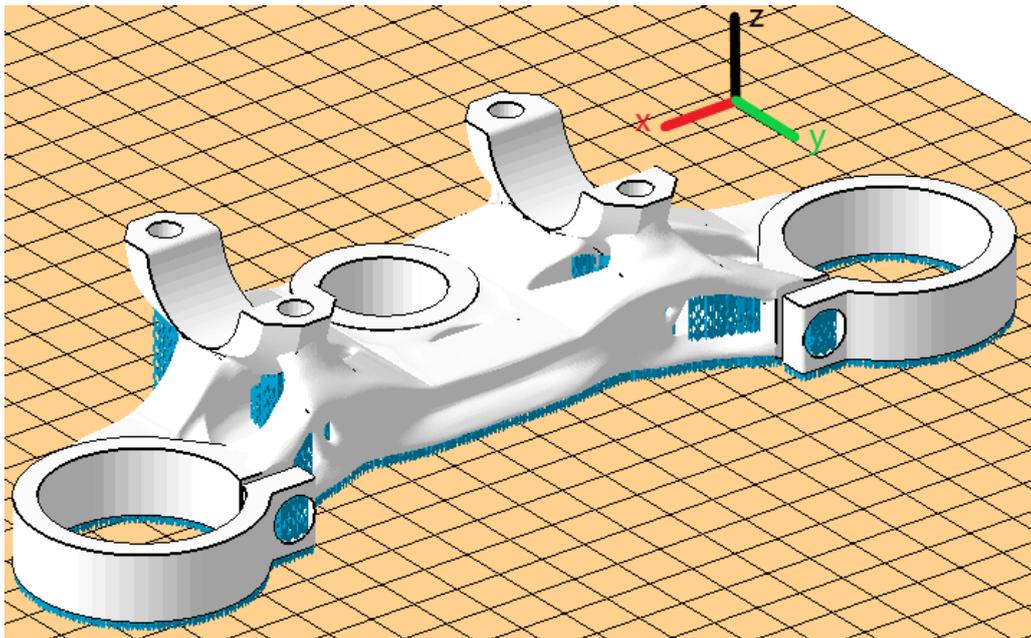


FIG. 65 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTO Z+

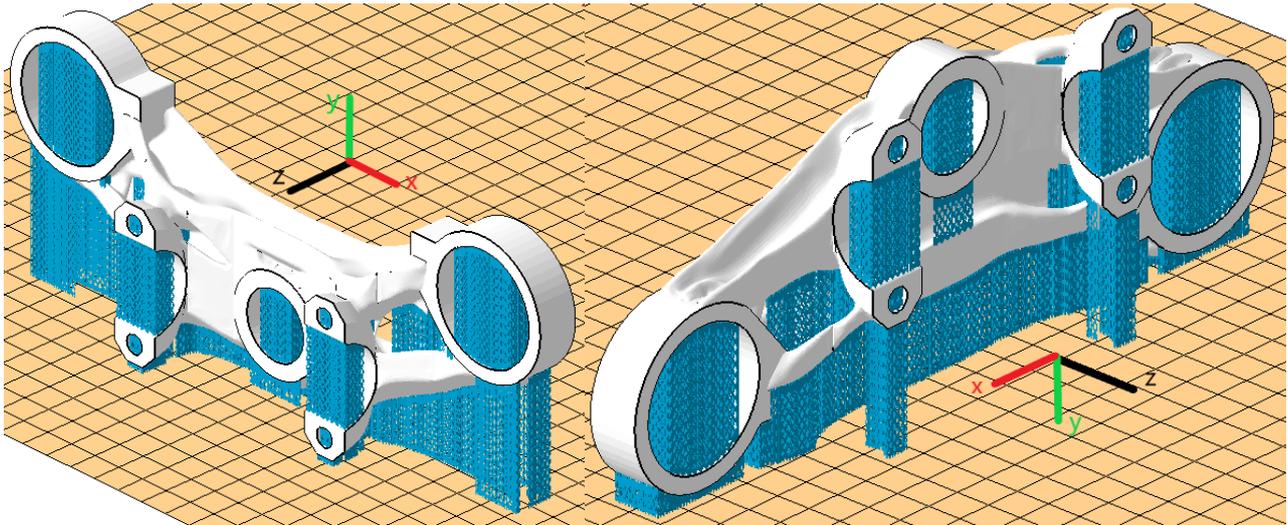


FIG. 66 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI Y+ E Y-

Dalle immagini si può notare come le soluzioni in z siano le migliori; innanzitutto, nel modello generativo semplificato non è presente il taglio di 2mm necessario per il serraggio degli anelli esterni sullo stelo forcella, ma nel modello finale che lo prevederà anche questo non richiederà supporti, che nelle altre orientazioni risulterebbero di difficile rimozione. I fori disposti verticalmente non richiedono supporti; per quelli degli alzatori manubrio e degli anelli esterni il problema riguarderebbe solo lo spreco di materiale di supporto, poiché vanno in ogni caso lavorati visto che richiedono filettature o elevata precisione e rimozione del sovrametallo. Per la superficie interna del foro centrale non è invece richiesta una elevata precisione o finitura; quindi, può essere prodotto senza sovrametallo e non richiede lavorazioni successive.

Quest'ultimo può inoltre essere utilizzato, con una apposita attrezzatura, per fissare il componente sulla macchina CNC durante le successive lavorazioni di finitura e foratura.

La direzione z-, oltre ad avere il problema di richiedere un nuovo tentativo di progettazione, come si può notare dall'anteprima di progetto, richiede una grande quantità di supporti; questo perché gli alzatori manubrio allontanano dalla piattaforma di costruzione il lato superiore della piastra, che deve essere completamente supportato.

Tutte queste caratteristiche rendono il progetto con orientazione z+ il migliore dal punto di vista dei costi dovuti alle lavorazioni successive alla fabbricazione additiva, oltre a rappresentare una soluzione esteticamente gradevole.

La quantità di supporti è nettamente inferiore, da -270% a -310% rispetto alle altre soluzioni, e gran parte sono rimossi direttamente durante il distacco tramite elettroerosione del particolare dalla base, mentre il lato superiore non ha supporti.

Questi fattori portano ad una finitura superficiale migliore rispetto alle altre soluzioni, con conseguenti vantaggi sulla resistenza a fatica e sull'estetica.

Per quanto marginali siano le differenze illustrate in tabella 5, il progetto presenta lo spostamento, la massa e il costo complessivo medio minori tra le soluzioni applicabili.

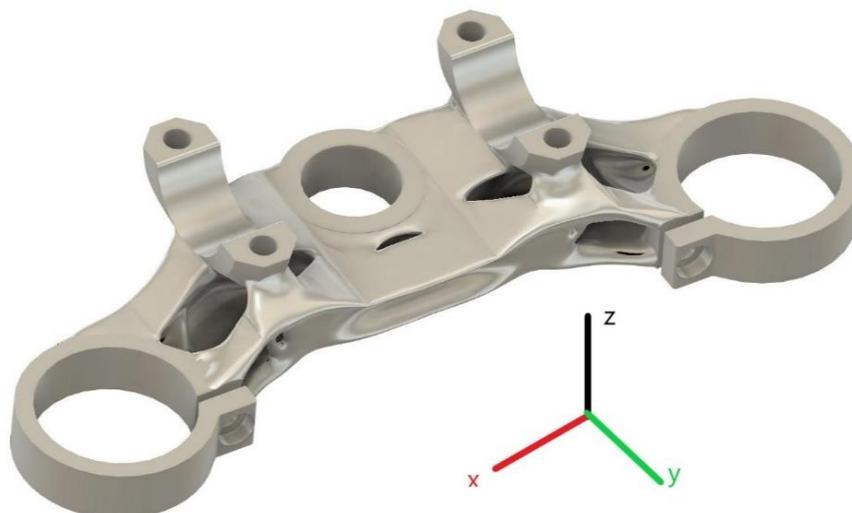


FIG. 67 - PIASTRA SUPERIORE Z+ CON PREFORI E TAGLIO

Lo stesso lavoro è stato portato avanti per i risultati dello studio con la lega di titanio, ottenendo i risultati illustrati in tabella 6.

Nome	Materiale	Metodo di produzione	Costo per pezzo (\$)			Costo medio completo (\$)	Massa (g)	Sollecitaz. di von Mises max (MPa)	Spost. max globale (mm)	volume supporti (cm ³)
			min	max	medio					
1 x+	Ti6Al-4V	Additivo	241	459	322	326	227	441	2,44	69
2 y+	Ti6Al-4V	Additivo	248	470	329	333	237	441	2,68	40
3 z+	Ti6Al-4V	Additivo	241	458	322	326	225	672	2,31	7
4 x-	Ti6Al-4V	Additivo	241	457	321	325	224	441	2,46	71
5 y-	Ti6Al-4V	Additivo	248	471	330	334	239	441	2,70	45
6 z-	Ti6Al-4V	Additivo	208	395	275	279	223	441	2,52	64

TAB. 6 - DATI RISULTATI MODELLI GENERATIVI LEGA DI TITANIO

Anche in questo caso si nota come i risultati in termini di massa, costi e spostamenti siano piuttosto simili tra i vari modelli.

La generazione del modello con orientazione non rispetta il vincolo sul coefficiente di sicurezza minimo pari a 2, avendo come limite 1,3. Il problema può comunque essere risolto in una fase successiva, poiché riguarda una minima parte del componente, a costo di dover aumentare la quantità di supporti, che, comunque, anche in questo caso, risulta di molto inferiore agli altri orientamenti.

I modelli generativi e il posizionamento dei supporti per tutte e sei le orientazioni sono illustrati nelle immagini seguenti (Fig.68 – 71).

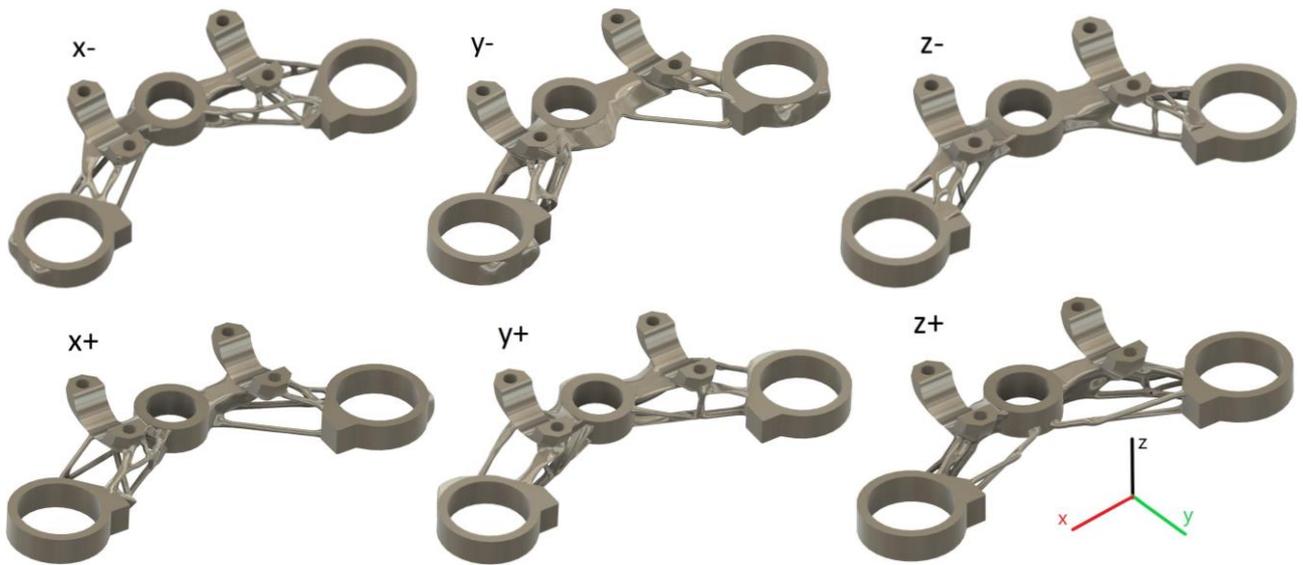


FIG. 68 - MODELLI GENERATIVI ORIENTAZIONI X-, Y-, Z-, X+, Y+ E Z+

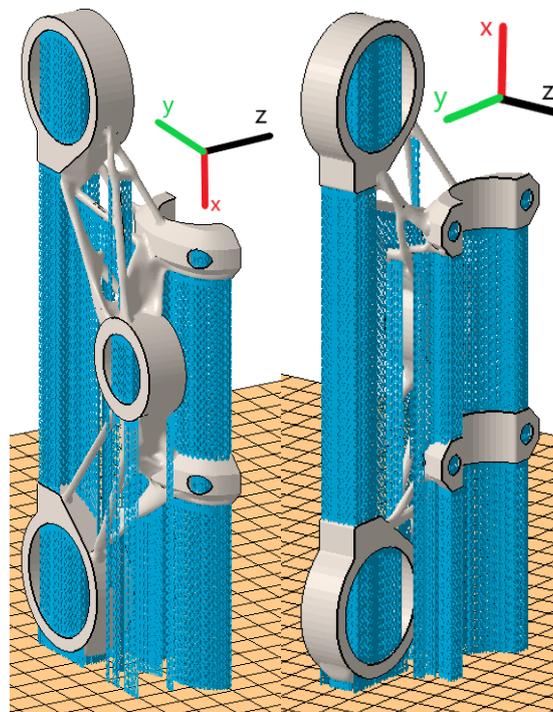


FIG. 69 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI X- E X+

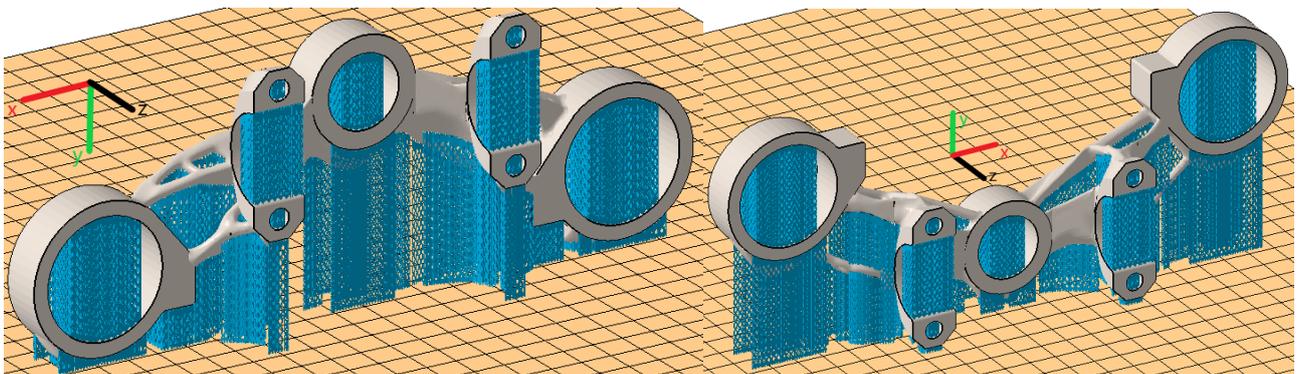


FIG. 70 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI Y- E Y+

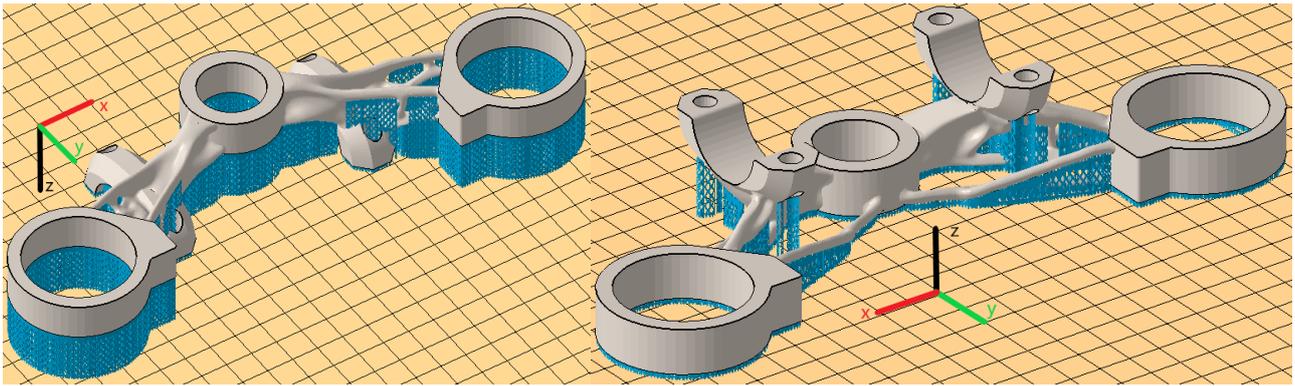


FIG. 71 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI Z- E Z+

Si nota immediatamente come anche per la lega di titanio gli orientamenti z garantiscono di evitare il posizionamento di materiale all'interno dei fori e un generale risparmio di materiale di supporto, soprattutto per l'orientazione z+.

Oltre al problema dell'altezza del volume di lavoro della macchina, che non sempre riesce a contenere i modelli orientati lungo x, si nota ancor di più con questo materiale come sia evidente l'asimmetria tra le due metà dei modelli, non presente o minima nelle altre orientazioni. Infatti, in questo caso, un vincolo di simmetria avrebbe limitato eccessivamente la progettazione generativa, ma allo stesso tempo tale diversità nella geometria porta a spostamenti differenti tra le due metà e problemi in fase di utilizzo.

Il principale problema dei modelli con orientazione y rimane la grande quantità di supporti necessari e la difficoltà di rimozione visto che in alcune aree l'accesso è difficile. Inoltre, rimane il vantaggio degli orientamenti z di non necessitare lavorazione sul foro centrale, che può essere utilizzato per serrare il componente su una macchina CNC, e di non dover rimuovere i supporti dal taglio di 2mm utile a serrare gli anelli esterni sugli steli forcella.

Tra le z la soluzione migliore rimane anche per la lega di titanio quella con orientazione z+, a patto di riuscire a portare il coefficiente di sicurezza minimo a 2. La discriminante è anche in questo caso dovuta alla quantità e alla posizione dei supporti, la cui rimozione andrebbe a influire sulla qualità superficiale del componente nel lato a vista dell'utente finale.

Piastra inferiore

Per la piastra inferiore in lega di alluminio il software ha generato in tempi brevi alternative lungo tutte le sei orientazioni possibili, senza riscontrare problemi. Anche in questo caso tutti i modelli sono stati analizzati tramite Netfabb per valutare la quantità di supporti necessari e il loro posizionamento, mantenendo sempre la distanza tra il componente e la piattaforma di costruzione ad un valore di tentativo pari a 2mm; in realtà, nel job finale tale valore andrà corretto impostando una distanza pari a un multiplo dello spessore del layer che si sceglierà per i supporti.

In tabella 7 sono riportati i risultati ottenuti per i modelli in lega di alluminio e per il componente originale.

Nome	Materiale	Metodo di produzione	Costo per pezzo (\$)			Costo medio completo (\$)	Massa (g)	Sollecitaz. di von Mises max (MPa)	Spost. max globale (mm)	volume supporti (cm ³)
			min	max	medio					
6 x+	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	76	155	113	116	330	120	0,52	138
7 y+	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	92	181	134	137	387	120	0,50	143
8 z+	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	111	217	159	162	318	120	0,49	35
9 x-	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	96	188	139	141	401	120	0,63	136
10 y-	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	111	209	160	161	362	120	0.51	130
11 z-	Alluminio AlSi10Mg	Additivo	74	149	109	112	335	120	0.48	23
originale	Al356	fonderia					494	60	0.18	

TAB. 7 - DATI RISULTATI MODELLI GENERATIVI LEGA DI ALLUMINIO E COMPONENTE ORIGINALE

Come visibile in figura 72 il modello x- risulta esteticamente non accettabile, oltre a presentare lo spostamento più elevato tra tutti i modelli generati, mentre per x+ il risultato è ottimo. Rimane lo svantaggio di richiedere una macchina di dimensioni importanti.

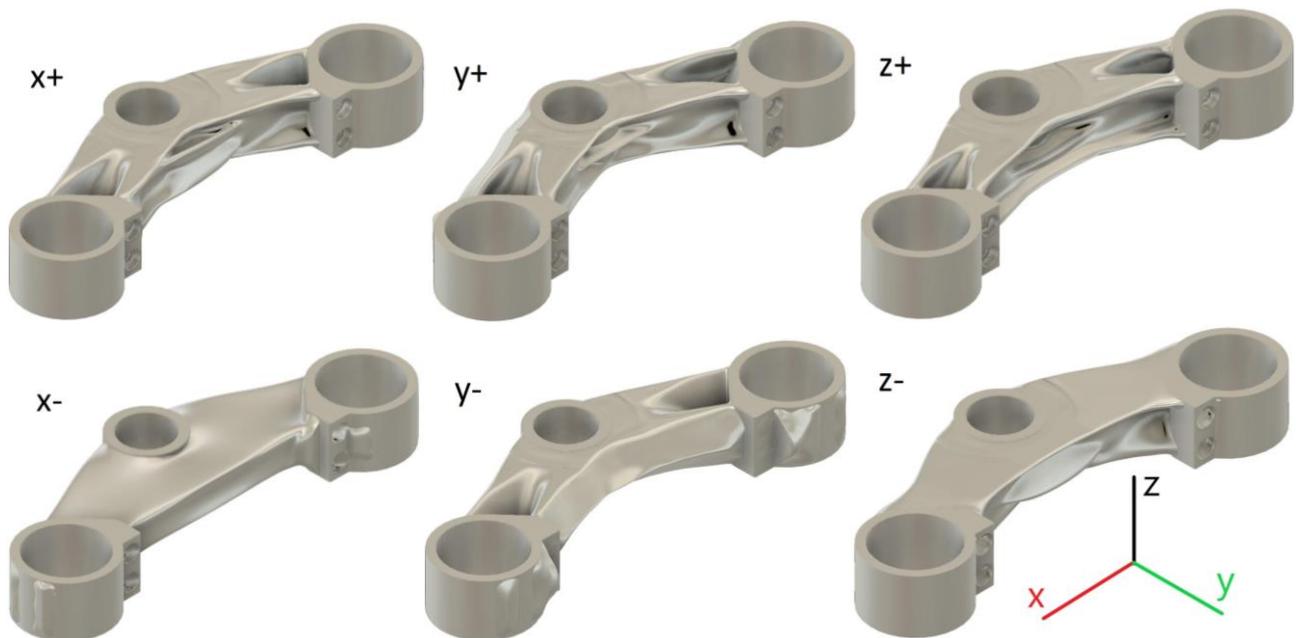


FIG. 72 - MODELLI GENERATIVI ORIENTAZIONI X+, Y+, Z+, X- E Z-

Per il modello y+, come si evince dall'immagine 72, c'è il vantaggio di avere le sedi delle teste delle viti senza supporti; ma è un vantaggio marginale rispetto ai problemi visto che la filettatura deve comunque essere lavorata perché più grande del limite M3 imposto dal DfAM, e quindi il risparmio è solamente su un cambio utensile.

Le versioni sviluppate per la produzione con orientamento z presentano gli stessi vantaggi che avevano nella piastra superiore, tra i quali non necessitare supporti per i fori e i tagli

perpendicolari alla base. Come per la piastra superiore, il foro centrale è sede di un perno passante e non richiede elevata precisione o finitura; può essere quindi prodotto direttamente alla dimensione di progetto e utilizzato per fissare la parte su macchine CNC per le lavorazioni necessarie.

Non a caso i valori riguardanti la quantità di supporti necessari sono di gran lunga i più bassi. Anche i valori della massa e dello spostamento massimo sono sempre tra i migliori. Rimangono anche in questo caso la soluzione più adeguata.

Nella piastra superiore, la presenza degli alzatori manubrio e il fatto che la faccia inferiore fosse perfettamente piana, quindi i supporti removibili direttamente in fase di elettroerosione, facevano propendere sempre per la versione z+. In questo caso, la presenza del parafrangente e l'anello centrale più basso e in alto rispetto a quelli esterni toglie questo vantaggio. I costi indicati dal software, per quanto da rivalutare a progettazione definitiva, e il volume di supporti necessario farebbero propendere in questo caso per la versione z-; in realtà, resta il problema della finitura successiva alla rimozione dei supporti sul lato a vista, che è possibile eliminare con trattamenti successivi ma dal costo non indifferente. Oltretutto, essendo il lato superiore quello rivolto verso la base in fase di produzione, il risultato è una superficie piana meno accattivante a livello estetico rispetto alla versione z+, con il lato migliore visibile in figura 75 nascosto alla vista dell'utente finale.

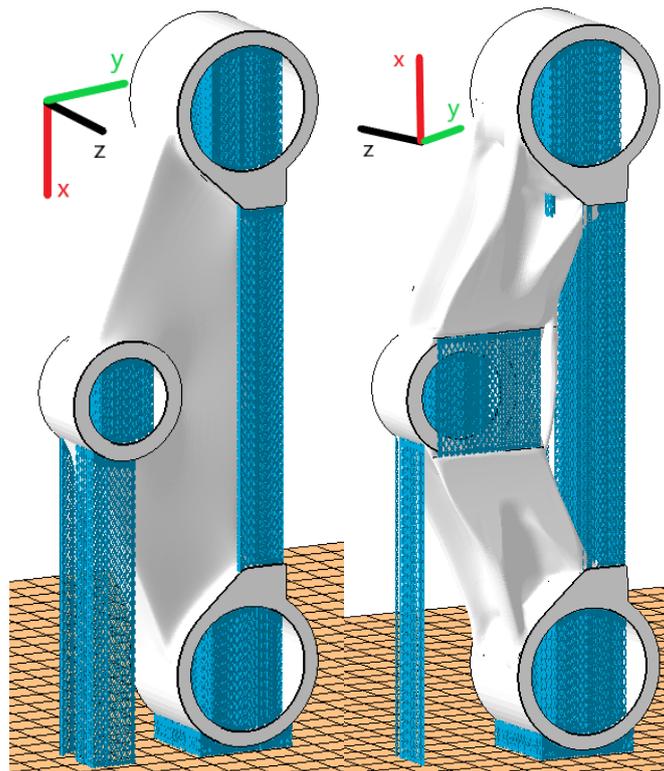


FIG. 73 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI X- E X+

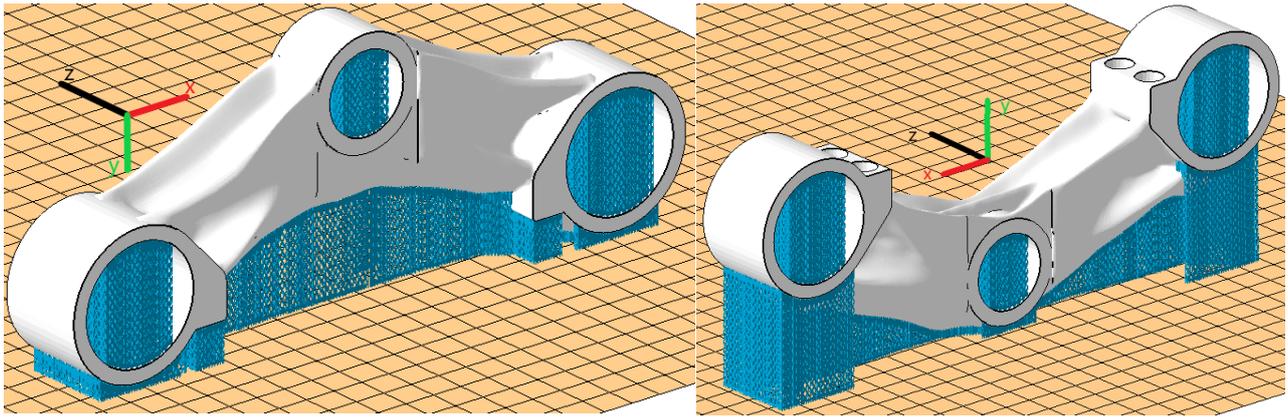


FIG. 74 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI Y- E Y+

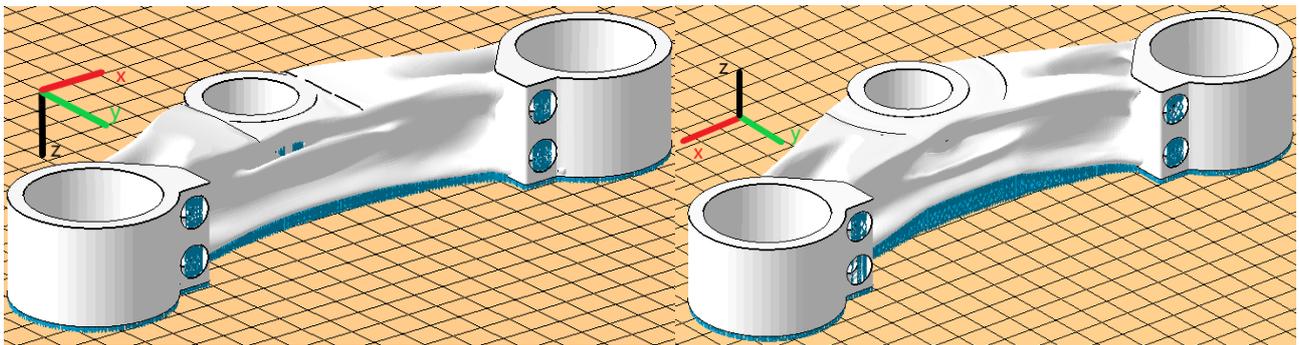


FIG. 75 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI Z- E Z+

Analizzando i modelli z su Netfabb, dove è possibile valutare le singole sezioni, si è inoltre notato come quello con orientazione z- presentasse alcuni supporti in zone dove la rimozione sarebbe risultata difficoltosa.

A differenza della lega di alluminio, per quella di titanio il software non ha completato la progettazione per tutti gli orientamenti possibili, ma manca y+. Inoltre, sono stati generati due modelli, x- e z+, che non rispettano in alcune zone, molto localizzate, il vincolo sul coefficiente di sicurezza minimo pari a 2.

Ormai è comunque noto come per questo componente i modelli orientati lungo z siano quelli più adatti alla produzione mediante fabbricazione additiva; e i dati presenti in tabella 8 non mostrano alcuna eccezione.

Nome	Materiale	Metodo di produzione	Costo per pezzo (\$)			Costo medio completo (\$)	Massa (g)	Sollecitaz. di von Mises max (MPa)	Spost. max globale (mm)	volume supporti (cm ³)
			min	max	medio					
1 x+	Ti6Al-4V	Additivo	264	499	342	346	356	441	2,15	85,6
3 z+	Ti6Al-4V	Additivo	244	461	317	321	313	643	2,38	11,2
4 x-	Ti6Al-4V	Additivo	263	497	341	345	351	663	2,21	83,6
5 y-	Ti6Al-4V	Additivo	276	520	356	360	383	441	2,07	72,7
6 z-	Ti6Al-4V	Additivo	-	-	-	-	319	441	2,25	8,7

TAB. 8 - DATI RISULTATI MODELLI GENERATIVI LEGA DI TITANIO

Per le orientazioni x+ e x- rimane il problema di una evidente asimmetria tra le due metà del componente, come riscontrato per questo materiale anche nella piastra superiore e come visibile in figura 76. Questo causa resistenza e spostamenti troppo differenti per le due parti e rende i modelli generati poco inadatti all'utilizzo finale.

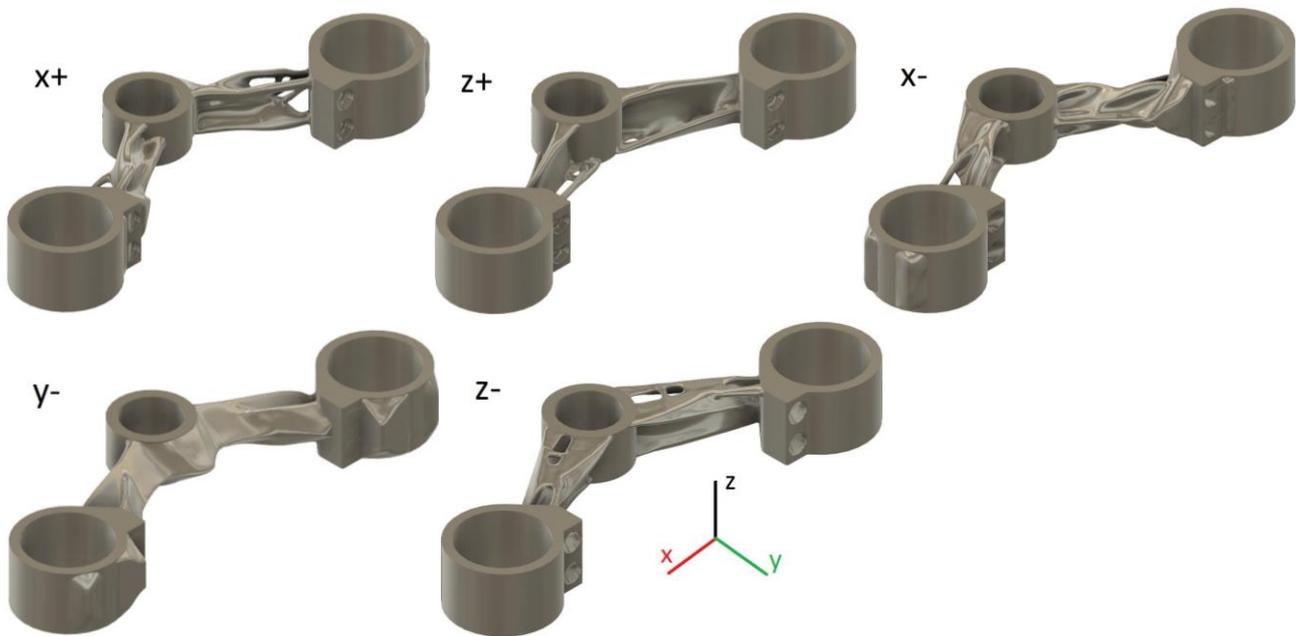


FIG. 76 - MODELLI GENERATIVI ORIENTAZIONI X+, Z+, X-, Y- E Z-

Anche in questo caso tutti i modelli sono stati inseriti su Netfabb per comprendere la quantità di supporti necessaria e la loro posizione, quindi anche la facilità di rimozione (Fig.77 e 78).

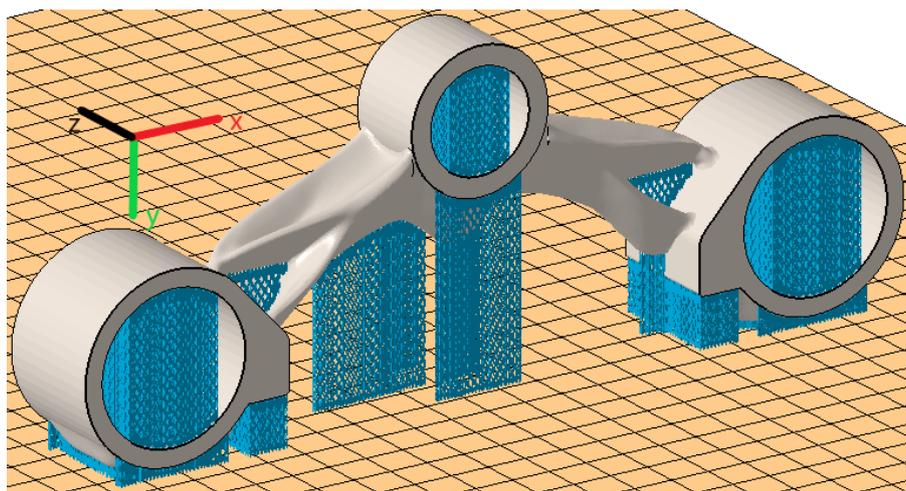


FIG. 77 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTO Y-

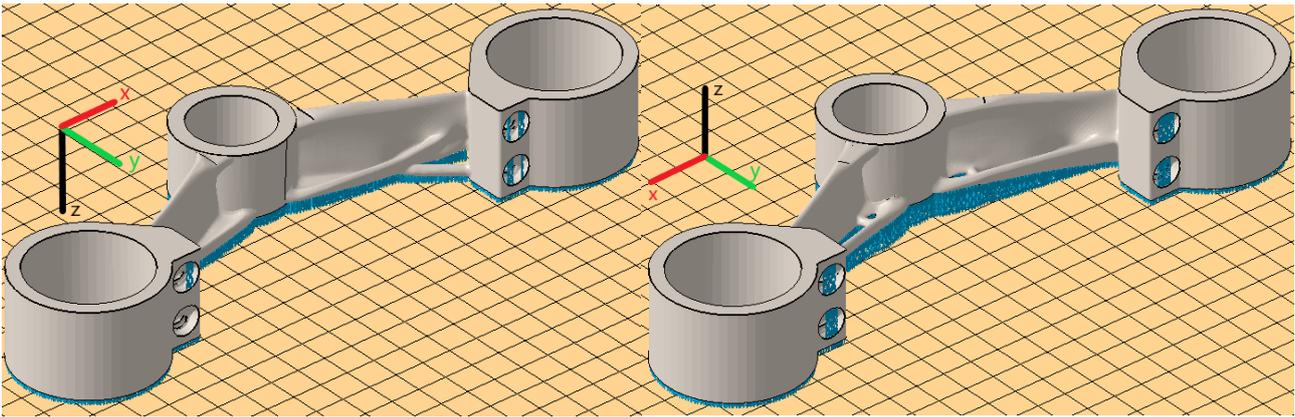


FIG. 78 - SUPPORTI CONSIGLIATI ORIENTAMENTI Z- E Z+

La soluzione y-, oltre alla grande quantità di materiale di supporto necessario, con tutti i problemi che ne derivano, pesa circa 70g in più rispetto alle orientazioni z-. Siccome il peso è un parametro molto importante questo rappresenta un ulteriore problema. Restano poi gli svantaggi descritti per questa orientazione nelle progettazioni precedenti.

A differenza di tutti gli altri casi dove l'orientazione migliore risultava z+, in questo caso la faccia superiore a vista di z- è sì interessata dalla presenza dei supporti, ma anche piana e quindi il trattamento per migliorare la finitura superficiale è semplice. Oltre a questo, non vi è il problema di dover modificare la parte per rispettare i vincoli resistenziali come in z+.

La differenza in termini di spostamento è minima ma comunque favorevole a z-.

4.2 ottimizzazione piastre

Analizzati i modelli migliori nei paragrafi precedenti bisogna operare una scelta del sistema su cui portare avanti un lavoro di ottimizzazione, tra lega di alluminio e titanio.

Nome	Materiale	Metodo di produzione	Costo per pezzo (\$)			Costo medio completo (\$)	Massa (g)	Sollecitazione z. di Von Mises max (MPa)	Spost. max globale (mm)	volume supporti (cm ³)
			min	max	medio					
sup z+	Alluminio AISi10Mg	Additivo	79	160	120	122	238	120	0,84	16
sup z+	Ti6Al-4V	Additivo	241	458	322	326	225	672	2,31	7
inf z+	Alluminio AISi10Mg	Additivo	111	217	159	162	318	120	0,49	35
inf z-	Ti6Al-4V	Additivo	-	-	-	-	319	441	2,26	9

TAB. 9 - DATI MODELLI SCELTI

Confrontando i dati tra i diversi materiali appare subito evidente come i costi forniti dal software, per quanto solamente indicativi, per i componenti in titanio siano notevolmente più alti rispetto alla lega di alluminio; allo stesso tempo, gli spostamenti massimi, che si hanno sempre agli estremi degli anelli esterni, sono notevolmente più alti; questo significa che la lega di titanio ha un rapporto tra rigidità e densità di massa inferiore all'alluminio

I valori riguardanti le masse sono comunque molto simili per i due materiali. Con il titanio sicuramente c'è più margine per eliminare materiale dalle geometrie di mantenimento, che presentano coefficienti di sicurezza ovunque superiori a 15, ma allo stesso tempo la necessità di ridurre gli spostamenti massimi porterebbe a dover aggiungere molto materiale sui bracci, con la conseguente difficoltà nel rispettare i vincoli del DfAM e la necessità di aggiungere supporti, soprattutto per la piastra superiore.

Per questi motivi delle piastre di sterzo in lega di titanio non sarebbero competitive sul mercato a livello di costi e la loro produzione è adatta solamente ad una eventuale produzione di nicchia per clienti estremamente esigenti, vista la loro bellezza, particolarità e esclusività, ma comunque richiederebbero un importante lavoro di ri-modellazione e ottimizzazione.

Da tali osservazioni si è deciso di portare avanti il lavoro di ottimizzazione per le sole piastre in alluminio ottenute mediante generative design.

Il primo passo consiste in una analisi in termini di spostamenti, fattore di sicurezza e deformazione equivalente sui componenti, mantenendo il sistema di carichi individuato in fase di progettazione generativa; successivamente i componenti possono essere modificati in alcune aree per ottenere ulteriori miglioramenti, sia in termini di prestazioni che in termini di produzione, per poi essere nuovamente analizzati.

Il ciclo verrà ripetuto fino ad arrivare al risultato desiderato e considerato migliore possibile.

Piastra superiore

Prima di lanciare le simulazioni il modello z+ scelto come piastra superiore è stato dotato di uno smusso sulla superficie superiore interna dell'anello centrale che era stato trascurato nella prima fase, come consigliato dalla guida del software, e delle viti in acciaio classe 12.9, quindi con una resistenza allo snervamento di 1080 MPa e a trazione di 1200 MPa, uguali a quelle originali.

I risultati vengono forniti per ognuna delle forze applicate e ricavate nel capitolo 3.3 e visualizzati tramite una mappa colorata. Il primo termine preso in considerazione è il fattore di sicurezza (CS), che rappresenta il rapporto tra il carico di snervamento del materiale e la sollecitazione ricavata localmente (Fig.79 e 80).

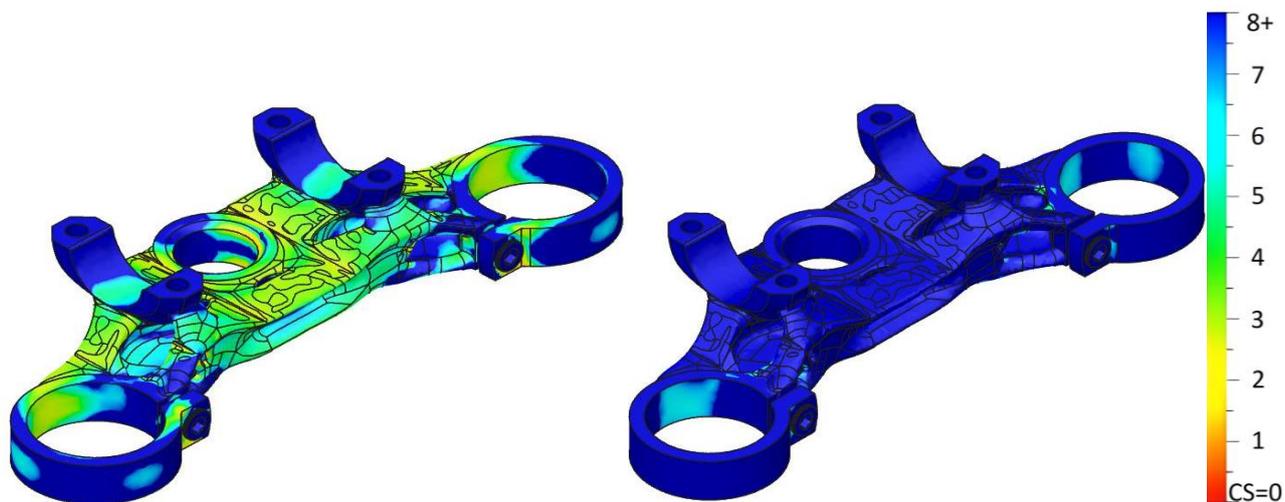


FIG. 79 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA CARICHI $F_{D,z}$ E $F_{D,y}$

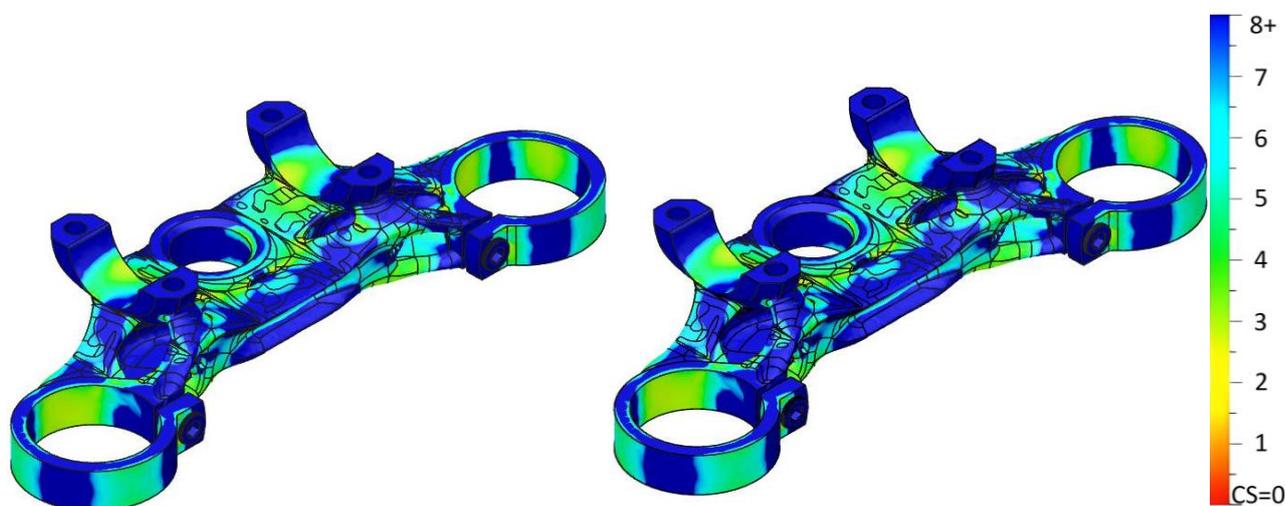


FIG. 80 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA TORSIONE SINISTRA E DESTRA

Per quanto riguarda la $F_{manubrio}$, cioè i carichi agenti sugli alzatori manubrio durante la frenata di emergenza e l'impennata, il modello risulta interamente blu, con coefficiente di sicurezza ovunque uguale o superiore a 8. Per questo motivo non sono presenti le immagini.

Un altro fattore molto importante da tenere in considerazione per operare modifiche sono gli spostamenti nodali calcolati, espressi in tabella 10 come valori numerici.

Condizione di carico	Spostamenti massimi [mm]			
	totale	x	y	z
$F_{d,z}$	0.924	0.12	0.098	0.917
$F_{d,y}$	0.172	0.087	0.158	0.027
Torsione destra	0.35	0.033	0.302	0.140
Torsione sinistra	0.35	0.174	0.295	0.129
Forza su alzatori in frenata	0.036	0.012	0.006	0.038
Forza su alzatori impennata	0.019	0.006	0.003	0.019

TAB. 10 - VALORI DI SPOSTAMENTO MASSIMI PER CONDIZIONE DI CARICO

La forza $F_{d,z}$ che si sviluppa durante la frenata di emergenza è la condizione di carico più gravosa sia per quanto riguarda le tensioni e gli spostamenti generati. Il valore di 0.924mm

riguarda l'estremo dell'anello esterno come in figura 82, dove è visibile anche la deformazione regolata al 2.5% delle dimensioni del modello.

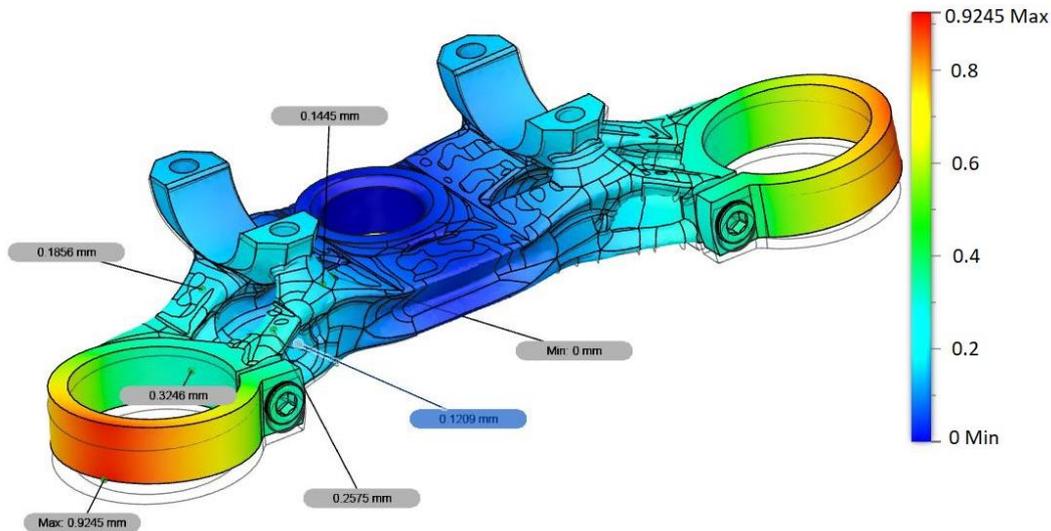


FIG. 81 - SPOSTAMENTI [MM] TOTALI CARICO Fd,Z

I risultati in termini di spostamenti non rappresentano quanto accade sul modello reale; infatti, a causa dei limiti software presenti durante la fase di progettazione generativa, le geometrie di ostacoli come gli steli forcella vengono considerate solamente come zone in cui non posizionare materiale, e non come corpi parte di un sistema accoppiato a quelle che sono le geometrie di mantenimento.

La presenza degli steli della forcella in realtà limita lo spostamento totale dell'anello esterno lungo z ad un valore inferiore a quello che è il valore di circa 0.92mm, cioè quello massimo, indicato sul punto di indagine sulla superficie esterna dell'anello in Figura 81.

Per confermare questa ipotesi e rendere il modello realistico sono stati aggiunti due cilindri che simulano la presenza degli steli forcella, una piastra a simulare la presenza della piastra inferiore e il perno di sterzo, impostando i contatti tra queste parti e la piastra uguali a quelli nelle condizioni reali. Tra il perno di sterzo e la piastra superiore vi è un accoppiamento con gioco; la funzione del perno in questo caso, accoppiato alla vite di figura 40, è solo di bloccare il movimento verticale della piastra, condizione già simulata dal vincolo di tipo "fisso" presente in tutte le condizioni di carico sulla superficie interna dell'anello centrale.

A seguito dell'aggiunta degli steli gli spostamenti risultano effettivamente inferiori su tutto il componente, nettamente sulla parte esterna dell'anello ma anche nei bracci della piastra (vedi Fig.82).

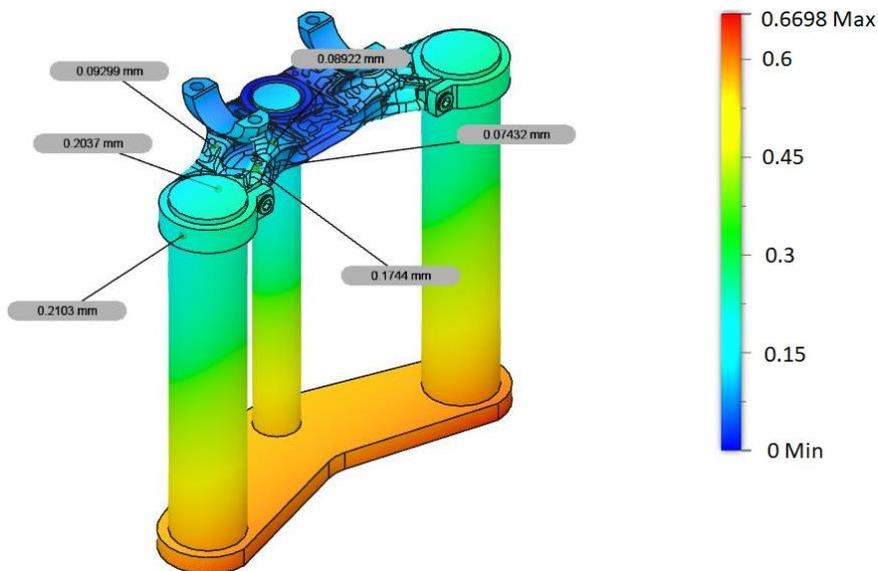


FIG. 82 - SPOSTAMENTI TOTALI [MM] CARICO $F_{D,z}$ E SISTEMA REALISTICO

Molto importante è anche notare come la transizione dal colore blu della parte centrale vincolata all'azzurro che si trova al termine dei bracci sia molto uniforme. Questo significa che i bracci che collegano l'anello centrale a quelli esterni presentano una rigidità uniforme per tutta la loro lunghezza; i valori trovati nei punti di indagine confermano questo.

Condizione di carico	Spostamenti massimi [mm]			
	totale	x	y	z
$F_{d,z}$	0.285	0.06	0.043	0.28
$F_{d,y}$	0.036	0.016	0.034	0.032
Torsione destra	0.137	0.068	0.10	0.099
Torsione sinistra	0.138	0.068	0.10	0.104
Forza su alzatori in frenata	0.023	0.010	0	0
Forza su alzatori impennata	0.007	0.004	0	0.006

TAB. 11 - VALORI SPOSTAMENTO MASSIMO PER CONDIZIONE DI CARICO CONFIGURAZIONE REALE

Oltre che sui valori di spostamento, la presenza degli steli, del perno di sterzo e della piastra inferiore porta ad un miglioramento generale anche dei fattori di sicurezza (Fig.83 e 84). Per ottenere maggiore chiarezza sull'elemento piastra di interesse nelle immagini seguenti è nascosta la presenza di tali corpi.

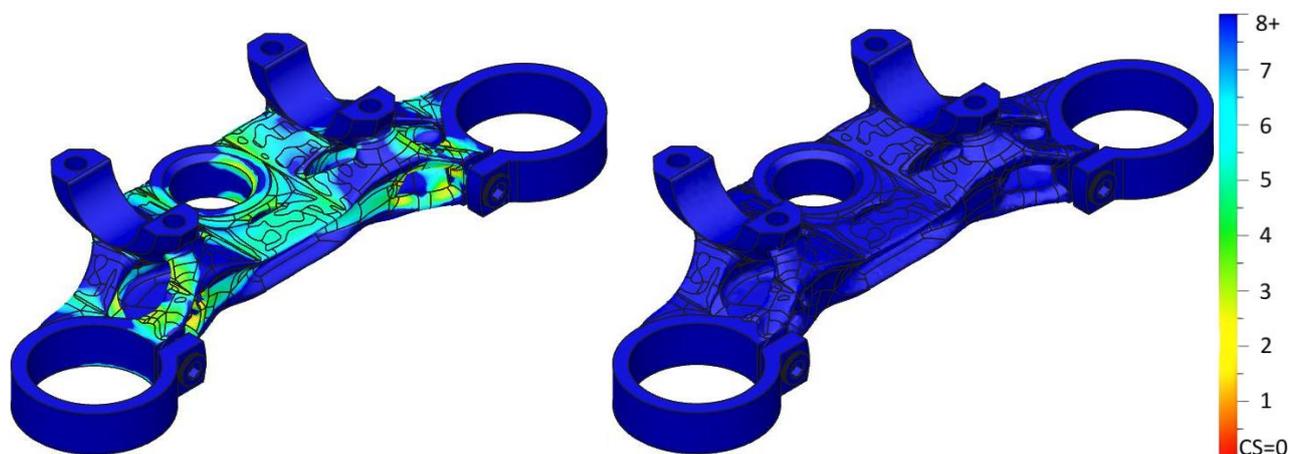


FIG. 83 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA CARICHI $F_{D,z}$ E $F_{D,y}$ CON SISTEMA REALISTICO

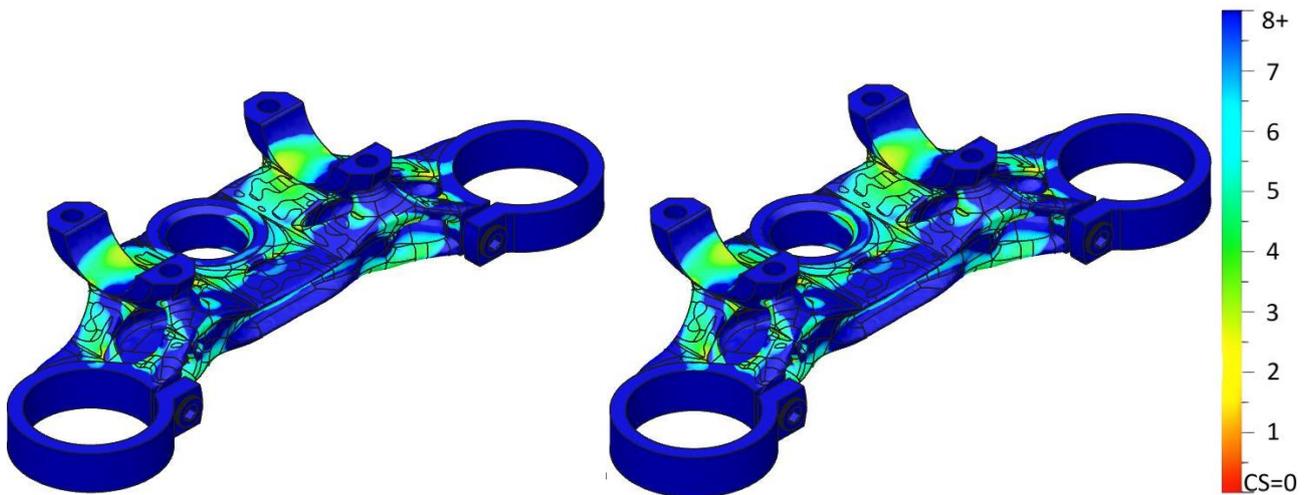


FIG. 84 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA TORSIONE DESTRA E SINISTRA CON SISTEMA REALISTICO

Anche in questo caso non sono presentate le immagini riguardanti le forze agenti in fase di frenata e impennata sugli alzatori manubrio poiché da coefficienti di sicurezza ovunque uguali o superiori a 8.

Analizzando nel dettaglio i risultati proposti nelle figure 83 e 84 si nota come le geometrie di mantenimento sono effettivamente poco sollecitate; questo fa sì che, come previsto, siano le zone con maggiore possibilità di intervento.

Si è deciso di creare una fessura a forma di asola, con altezza di 6mm decisa dopo numerose simulazioni, sulla parete degli anelli esterni (Fig.85). Nella parte frontale e posteriore dell'anello il margine di intervento è maggiore, ma si è deciso di non intervenire poiché sono le zone che hanno il compito di bloccare lo stelo della forcella nel momento in cui si serrano le viti e che sopportano la maggior parte del carico in fase di torsione. Anche nella zona immediatamente laterale alle viti è stato eliminato del materiale inutile, asimmetricamente tra la parte superiore e inferiore, in modo da rispettare i vincoli del DfAM ed evitare di dover aggiungere supporti in fase di produzione. Dalle simulazioni è inoltre emersa la necessità di aumentare il raggio del raccordo



FIG. 85 - DETTAGLIO GEOMETRIE DI MANTENIMENTO PRIMA E DOPO LE MODIFICHE

Ovviamente il ponte che si viene a creare inserendo l'asola ha una lunghezza che obbliga a dover inserire una grande quantità di supporti e la successiva necessità di rimuoverli. Si è quindi deciso di inserire all'interno della stessa delle strutture lattice (vedi Fig.86), che pur non presenti nelle successive simulazioni assicurano resistenza e peso molto ridotto.

Oltre alla funzionalità la loro presenza è importante a fini estetici e di esclusività del prodotto.



FIG. 86 - DETTAGLIO STRUTTURA LATTICE

La cella elementare scelta per creare la struttura lattice è stata, tra quelle disponibili, la BCC. Il risultato è una struttura appartenente alla tipologia strut-based. La cella cubica ha lati di 3mm, mentre il diametro di ciascuna struttura è pari a 1mm.

Il numero di nodi limitato fa sì che il comportamento sia di tipo “bending-dominated” e quindi, pur essendo meno rigida e resistente di una struttura a più nodi, permette di avere piccole flessioni senza problemi di collasso della struttura lattice; questo perché durante il montaggio e lo smontaggio della forcetta una minima flessione deve essere possibile.

Altre zone dove è possibile intervenire sono le superfici piane sulla faccia inferiore del componente, dove le simulazioni hanno evidenziato come i coefficienti di sicurezza siano molto elevati rispetto alle altre parti del componente; oltre a questo la loro presenza è inutile al fine di sostenere il materiale posizionato più in alto; inoltre, i supporti necessari a sostenere il materiale rimosso vengono anch’essi eliminati. La geometria finale delle due aperture simmetriche (Fig.87) è stata ricavata a seguito di diverse iterazioni e gli ampi raccordi permettono di ridurre la concentrazione delle tensioni.



FIG. 87 - VISTA IN SEZIONE DELLA PIASTRA CON LE APERTURE CREATE

Ulteriore vantaggio che viene a crearsi grazie alle due aperture riguarda la facilità di evacuazione delle polveri.

Per gli alzatori manubrio invece, nonostante presentino un coefficiente di sicurezza generalmente molto elevato, si è preferito non intervenire, visto che in caso di cedimento di tale componente la sicurezza del pilota è messa a serio rischio; inoltre, già durante la progettazione le geometrie di mantenimento degli alzatori erano state concepite per ridurre al minimo la quantità di supporti necessari.

In alcune zone è stato necessario intervenire in senso opposto; soprattutto dove erano presenti spigoli vivi indotti dalla presenza delle geometrie di ostacoli della progettazione generativa, evidenziati in figura 88, che portavano a margini di sicurezza ridotti.

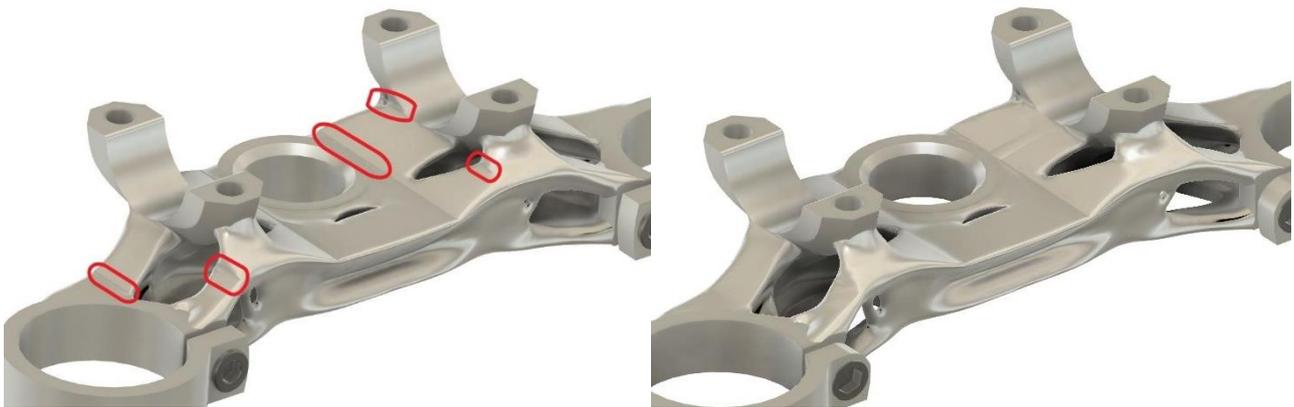


FIG. 88 - DETTAGLI SPIGOLI VIVI PRIMA E DOPO LE MODIFICHE

Anche i contatti tra piastra e viti sono stati modificati per eliminare problemi, impostando contatti accoppiati in presenza delle filettature e separazione dove sono effettivamente presenti giochi.

A seguito delle modifiche si riportano in tabella 12 i nuovi valori degli spostamenti, a parità di impostazioni per la creazione della mesh, con il modello non modificato. I valori tra parentesi di fianco ai a quelli di spostamento totale rappresentano la differenza percentuale tra i valori del modello non modificato (Tab.11) e quelli finali.

Condizione di carico	Spostamenti massimi [mm]			
	totale	x	y	z
Fd,z	0.207 (-27.4%)	0.054	0.028	0.207
Fd,y	0.043(+17.2%)	0.018	0.041	0.004
Torsione destra	0.140(+1.4%)	0.073	0.118	0.107
Torsione sinistra	0.139(+1.5%)	0.073	0.115	0.107
Forza su alzatori in frenata	0.007(0.0%)	0.004	0.002	0.006
Forza su alzatori impennata	0.022(-4.3%)	0.01	0.006	0.021

TAB. 12 - VALORI DEI MASSIMI SPOSTAMENTI A SEGUITO DELLE MODIFICHE

A conferma della bontà degli interventi effettuati si può notare come lo spostamento più critico, cioè quello riguardante la forza Fd,z, sia stato ridotto del 27.4%, a fronte di piccole e trascurabili perdite durante la sollecitazione a torsione. L'importante aumento in termini percentuali sugli spostamenti dovuti alla forza Fd,y è in realtà limitato a 7µm.

Il risparmio di peso ottenuto con le modifiche effettuate è del 5.2%, poiché si è passati da 229g a 217g; il tutto a fronte di una differenza nettamente inferiore in termini di spostamenti.

Per quanto riguarda i margini di sicurezza del componente finale non si registra nessuna criticità (vedi Fig.89 e 90). Il margine minimo impostato durante la progettazione generativa, pari a 2, viene raggiunto solamente in aree superficiali e in presenza di raccordi molto piccoli dove non rappresenta un problema; infatti, aumentando il numero di elementi della mesh e quindi l'approssimazione della superficie, i margini di sicurezza in queste zone tendono a salire.

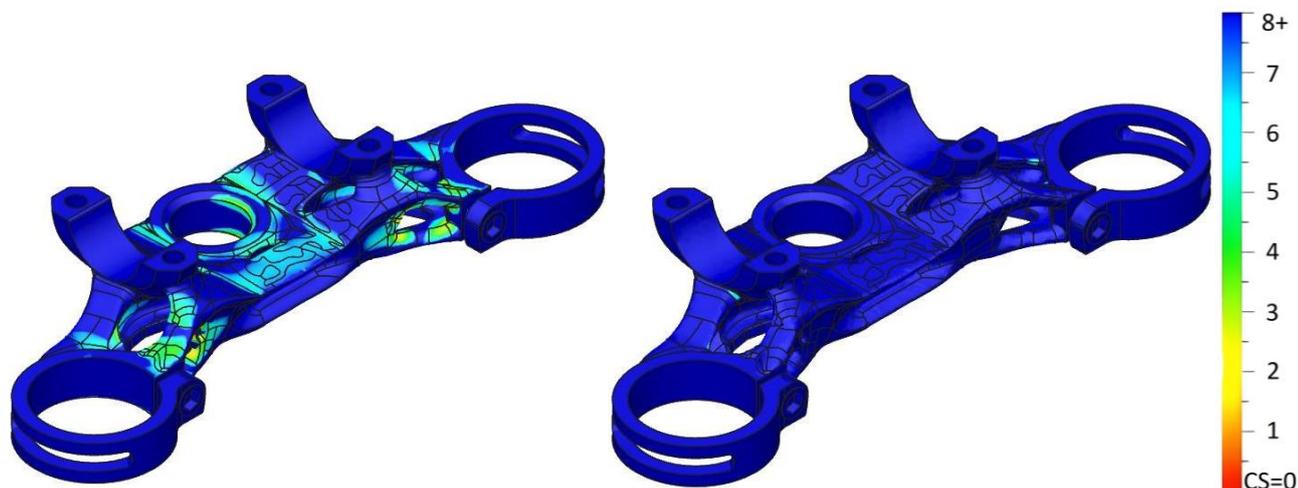


FIG. 89 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA CARICHI $F_{d,z}$ E $F_{d,y}$ COMPONENTE DEFINITIVO

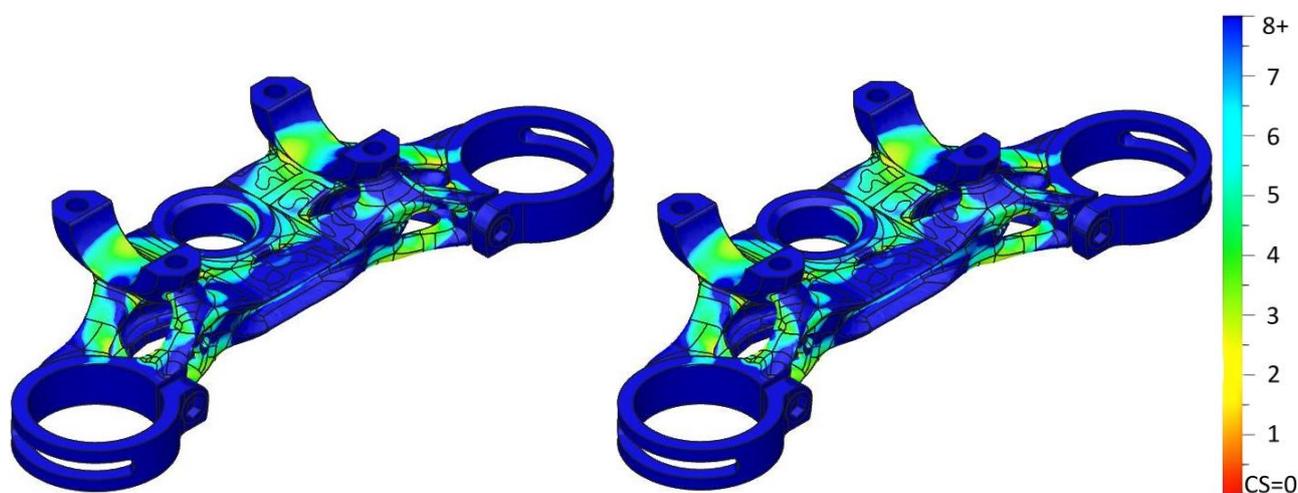


FIG. 90 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA TORSIONE DESTRA E SINISTRA COMPONENTE DEFINITIVO

Importante notare come le modifiche effettuate abbiano avuto un impatto trascurabile sui margini di sicurezza delle zone adiacenti, oltre ad aver dato una maggiore uniformità di sollecitazioni sul componente, che si traduce in una rigidità uniforme importante dal punto di vista strutturale quanto per la risposta fornita al pilota. Tale aspetto emerge anche analizzando i risultati forniti dal software in termini di deformazione equivalente.

Le concentrazioni di tensione presenti sugli spigoli vivi sono state limitate con le marginali modifiche alla struttura, comunque facilmente realizzabili grazie alla tecnologia di produzione utilizzata.

Piastra inferiore

Anche per la piastra inferiore il primo passo prevede una simulazione sul componente scelto tra le alternative generate, utilizzando lo stesso schema di carichi della progettazione generativa.

I termini analizzati in questa fase sono sempre il fattore di sicurezza (da Fig.91 a 93), che rappresenta lo stato di tensione locale, e gli spostamenti assoluti, correlati alla deformazione del componente, per ogni carico.

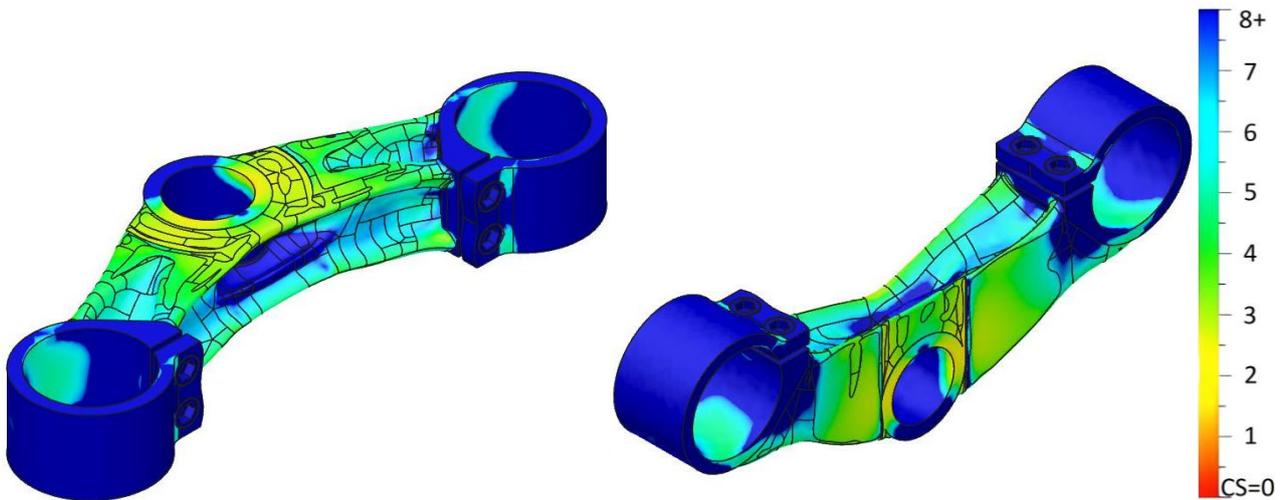


FIG. 91 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA CARICO $F_{d,z}$

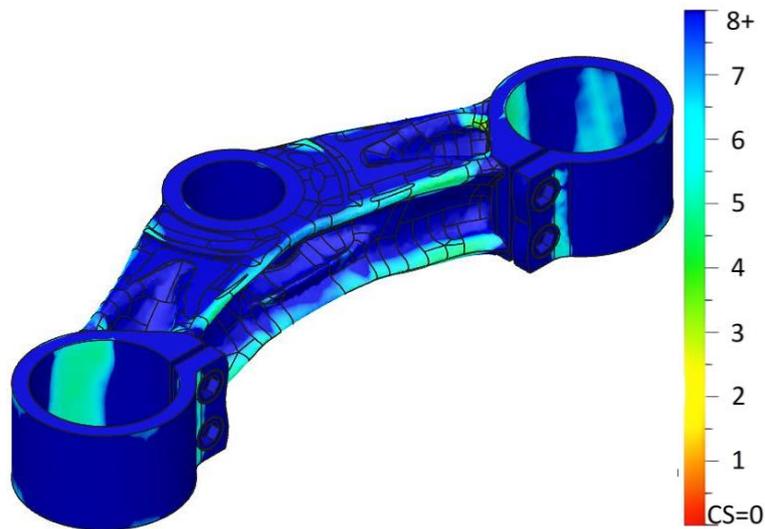


FIG. 92 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA $F_{d,y}$

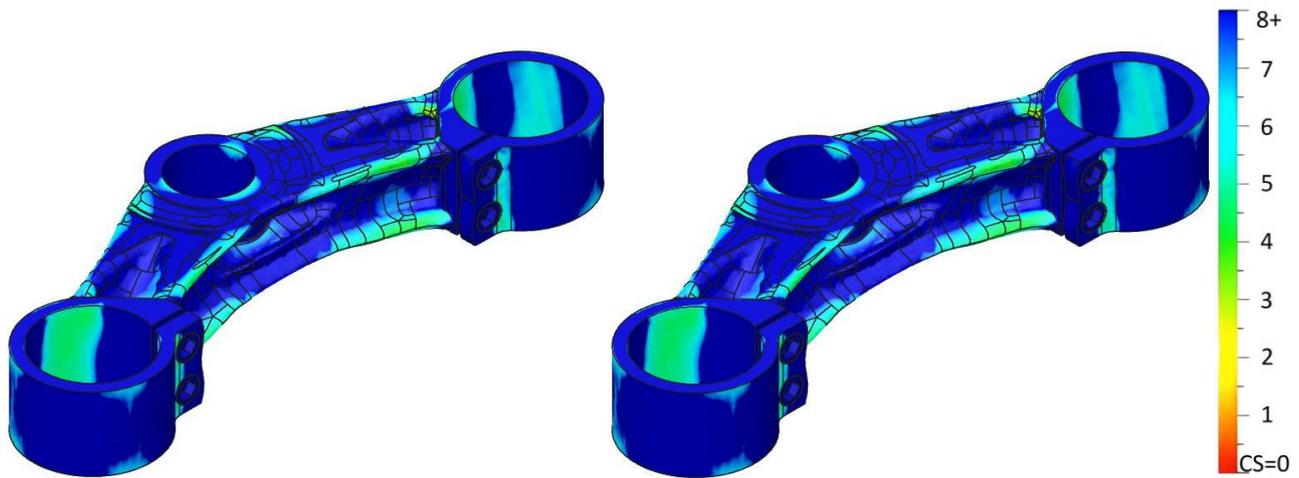


FIG. 93 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA TORSIONE DESTRA E SINISTRA

Emerge subito la necessità di ridurre gli spigoli vivi presenti a causa delle geometrie di ostacoli della progettazione generativa, sia nel lato superiore dove poggia il cuscinetto, sia sul lato inferiore. Anche i raccordi adiacenti alle viti sulle geometrie di mantenimento necessitano di un aumento del raggio per ridurre la concentrazione delle tensioni.

Rispetto alla piastra superiore in questo caso la forza $F_{d,z}$ è maggiore, mentre gli sforzi di torsione sono inferiori non essendoci le componenti sugli alzatori manubrio. Infatti, dalle prime simulazioni si nota subito come la prima condizione sia quella più gravosa.

Anche in questo caso le geometrie di mantenimento esterne risultano essere le zone con più margine di intervento; si comprende anche quali sono le zone delle stesse più sollecitate, cioè la parte frontale e quella posteriore sulla superficie interna degli anelli.

I valori di spostamento massimi del componente per ogni condizione di carico sono riportati in tabella 13.

Condizione di carico	Spostamenti massimi [mm]			
	totale	x	y	z
$F_{d,z}$	0.524	0.112	0.061	0.510
$F_{d,y}$	0.316	0.162	0.298	0.025
Torsione sinistra	0.369	0.190	0.348	0.024
Torsione destra	0.369	0.190	0.348	0.024

TAB. 13 - VALORI DI SPOSTAMENTO MASSIMI PER CONDIZIONE DI CARICO

La condizione peggiore rimane anche da questo punto di vista $F_{d,z}$, ma i valori sono più uniformi tra le varie sollecitazioni. Rimane comunque valida la considerazione per cui i valori sono influenzati dalla mancanza del sistema circostante e soprattutto degli steli forcella.

Dalla figura 94 è evidente come sia più netta la transizione di colore e la differenza tra i valori nei punti di campionamento successivi sugli anelli esterni piuttosto che nei bracci. Anche la deformazione regolata permette di evidenziare al meglio questo comportamento.

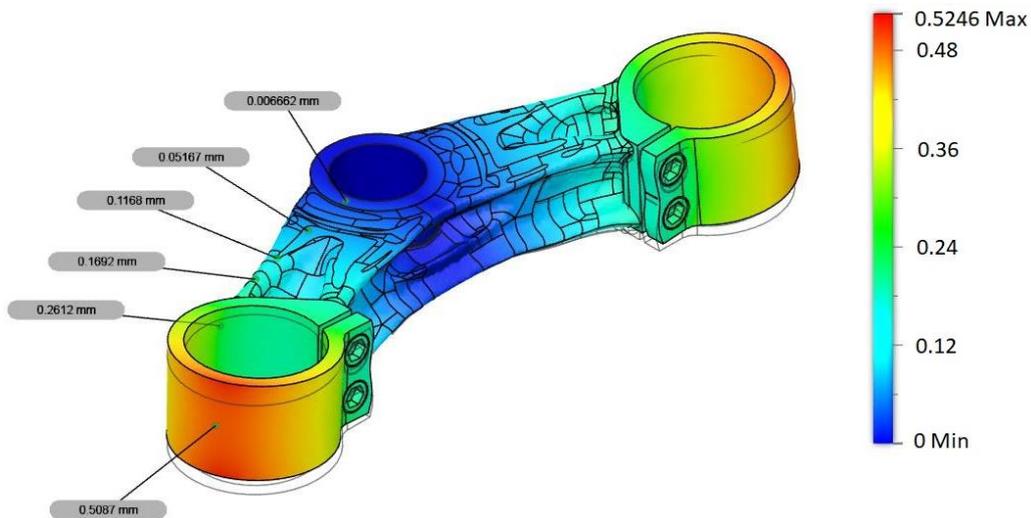


FIG. 94 - VALORI SPOSTAMENTO TOTALE [MM] CARICO Fd,z

Emerge anche in questo la necessità di creare un sistema, semplificato per velocizzare le simulazioni durante la fase di ottimizzazione, degli elementi che circondano la piastra e ne influenzano tensioni e deformazioni. A differenza della piastra superiore, in questo caso è molto importante anche la funzione svolta dall'archetto (Fig.95). il perno di sterzo non è presente poiché la sua funzione, cioè bloccare i movimenti sul piano x-y della piastra è simulata dal vincolo di tipo "fisso" nelle tre direzioni inserito sulla superficie interna dell'anello centrale. Il blocco nella terza direzione, cioè quella verticale, è svolto dal cuscinetto alloggiato nel telaio, anch'esso non presente nel modello.



FIG. 95 - SISTEMA REALISTICO

Il risultato conseguente all'aggiunta degli steli e degli altri elementi del sistema che impediscono possano inclinarsi è un netto miglioramento in termini di spostamenti (Tab. 14).

Condizione di carico	Spostamenti massimi [mm]			
	totale	x	y	z
Fd,z	0.174	0.016	0.037	0.171

Fd,y	0.051	0.022	0.049	0.003
Torsione sinistra	0.112	0.060	0.106	0.005
Torsione destra	0.114	0.060	0.108	0.005

TAB. 14 - VALORI DI SPOSTAMENTO MASSIMI PER CONDIZIONE DI CARICO CONFIGURAZIONE REALISTICA

Anche i coefficienti di sicurezza, quindi le tensioni presenti all'interno della piastra, presentano un generale miglioramento successivo all'aumento di rigidità complessiva del sistema portato dall'aggiunta dei nuovi componenti, che per avere maggiore chiarezza sono stati nascosti nelle immagini (Fig.96 – 97).

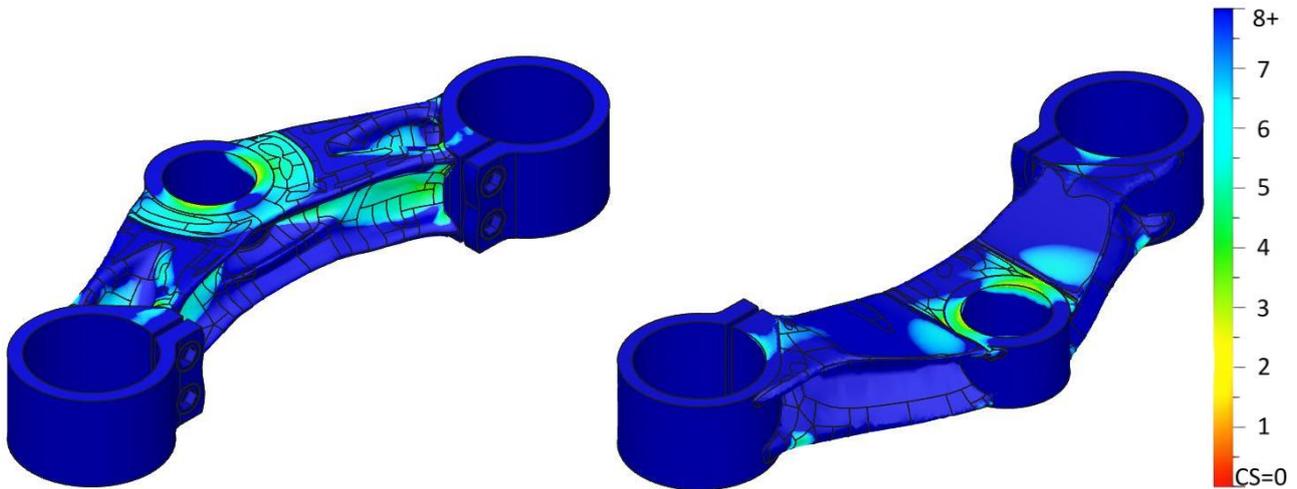


FIG. 96 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA Fd,z CONFIGURAZIONE REALISTICA

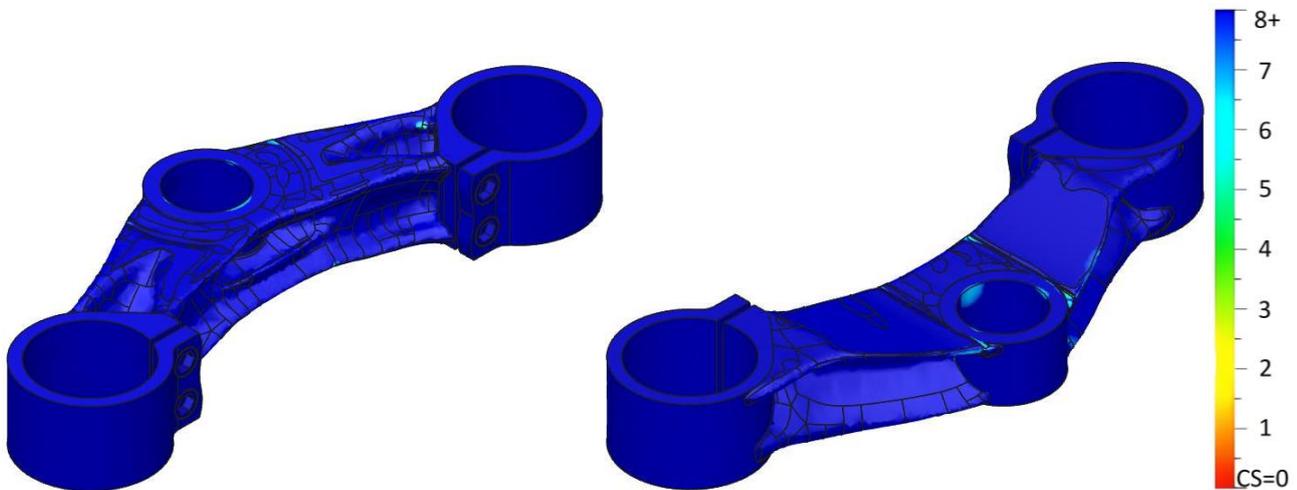


FIG. 97 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA TORSIONE DESTRA CONFIGURAZIONE REALISTICA

Per tutte le condizioni di carico, ma in particolar modo per la più gravosa Fd,z, le uniche criticità, in termini di coefficiente di sicurezza, emergono in corrispondenza degli spigoli vivi presenti a causa della geometria di ostacoli.

I primi interventi riguardano queste zone, dove è stata effettuata una ricostruzione delle superfici atta a eliminare le criticità presenti (vedi Fig.98).

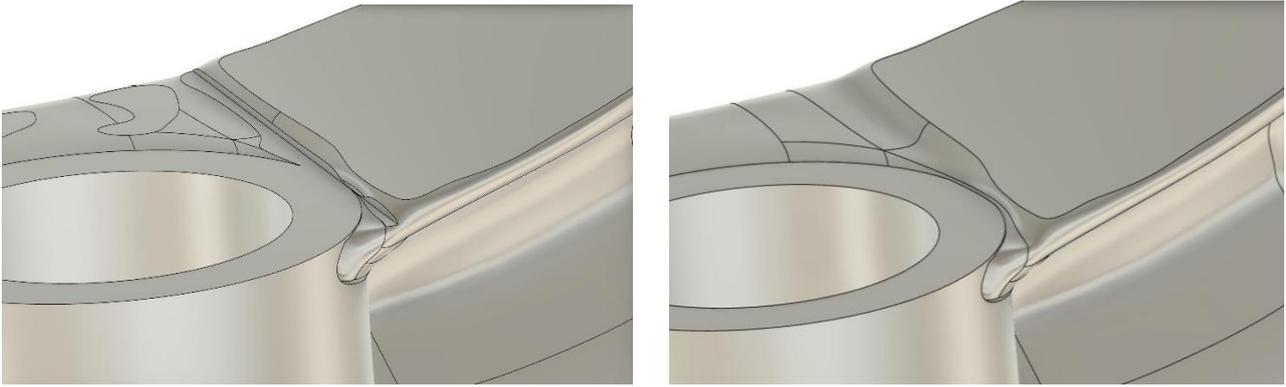


FIG. 98 - DETTAGLIO SPIGOLO VIVO CRITICO PRIMA E DOPO LE MODIFICHE

Altre modifiche sui bracci non sono in questo caso necessarie. Lo stato di tensione è uniforme, in qualsiasi configurazione si analizzi il componente, e qualsiasi modifica volta alla riduzione di materiale andrebbe a richiedere l'introduzione di nuovi supporti (vedi Fig.75).

Le geometrie di mantenimento presentano in ogni punto coefficienti di sicurezza molto elevati. Le modifiche si concentrano nella zona delle viti, dove è stato eliminato materiale rispettando ampiamente i vincoli produttivi sul massimo angolo autoreggente tipico del materiale.

Oltre alle zone delle viti sono state introdotte, al pari della piastra superiore, due asole nelle zone meno sollecitate. Per massimizzare la dimensione delle asole sono state introdotte anche in questo caso delle strutture lattice basate sulla ripetizione di celle BCC, che consentono di avere una minima flessione della parte durante il montaggio della forcella, hanno ottime caratteristiche resistenziali rispetto alla bassa densità e permettono di evitare il posizionamento dei supporti che tale apertura richiederebbe se non ne fosse dotata. Le celle cubiche su cui è basata la struttura hanno lati da 3mm e il diametro è pari a 1mm per i cilindri.

Tutte le modifiche permettono di ridurre la massa del componente, ma al tempo stesso aggiungono valore in termini estetici al componente finale.



FIG. 99 - ASPETTO PIASTRA DOPO LE MODIFICHE

Le modifiche hanno avuto un impatto minimo sul componente, con la massima variazione in termini di spostamento che avviene in condizione $F_{d,z}$ pari a 0.01mm, pari al 5.7% in più rispetto al modello senza modifiche. Anche l'impatto sulle sollecitazioni di torsione è minimo. Nella simulazione non sono comunque presenti le strutture lattice, che sicuramente permettono di limitare ulteriormente le differenze in termini percentuali (vedi Tab.15).

Inoltre, è molto importante notare come i valori ottenuti siano vicini a quelli di tabella 12 riguardanti gli spostamenti massimi della piastra superiore definitiva.

Condizione di carico	Spostamenti massimi [mm]			
	totale	X	Y	Z
$F_{d,z}$	0.184 (+5.7%)	0.017	0.034	0.180
$F_{d,y}$	0.051 (+0.0%)	0.022	0.048	0.004
Torsione sinistra	0.120 (+7.1%)	0.063	0.113	0.005
Torsione destra	0.121 (+6.1%)	0.064	0.114	0.005

TAB. 15 - VALORI SPOSTAMENTO MASSIMI PER CONDIZIONE DI CARICO MODELLO DEFINITIVO

A fronte dei limitati aumenti sugli spostamenti massimi, le modifiche degli spigoli vivi hanno permesso di portare i coefficienti di sicurezza sopra la soglia minima prevista pari a 2; l'aggiunta delle asole e la rimozione di materiale nella zona delle viti non portano nessuna criticità sugli anelli esterni, dove le tensioni rimangono ampiamente sotto il limite previsto (vedi Fig.100 – 101).

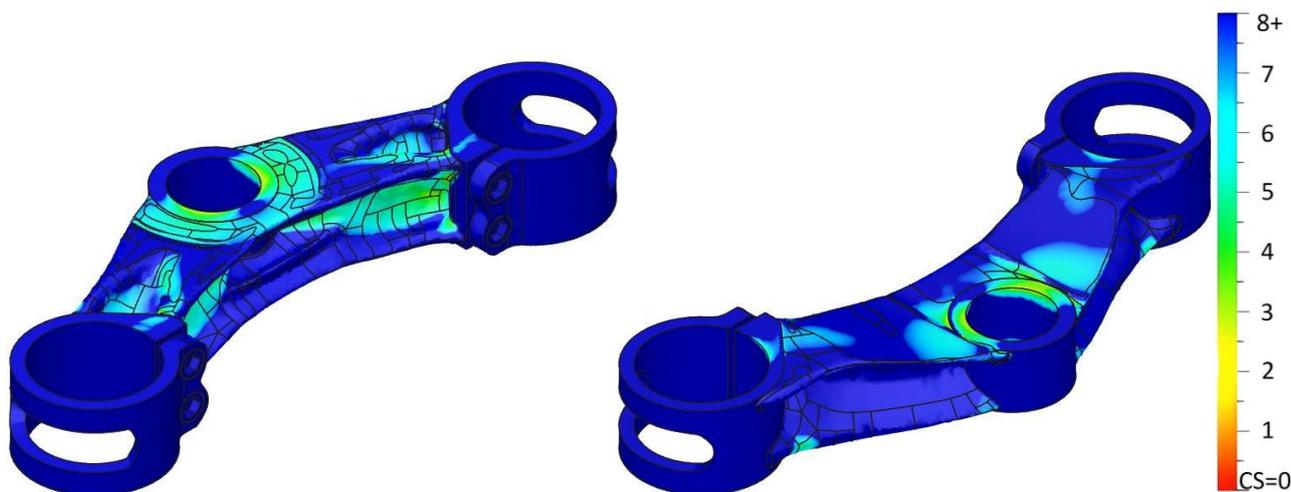


FIG. 100 - ANDAMENTO FATTORE DI SICUREZZA $F_{d,z}$ COMPONENTE DEFINITIVO

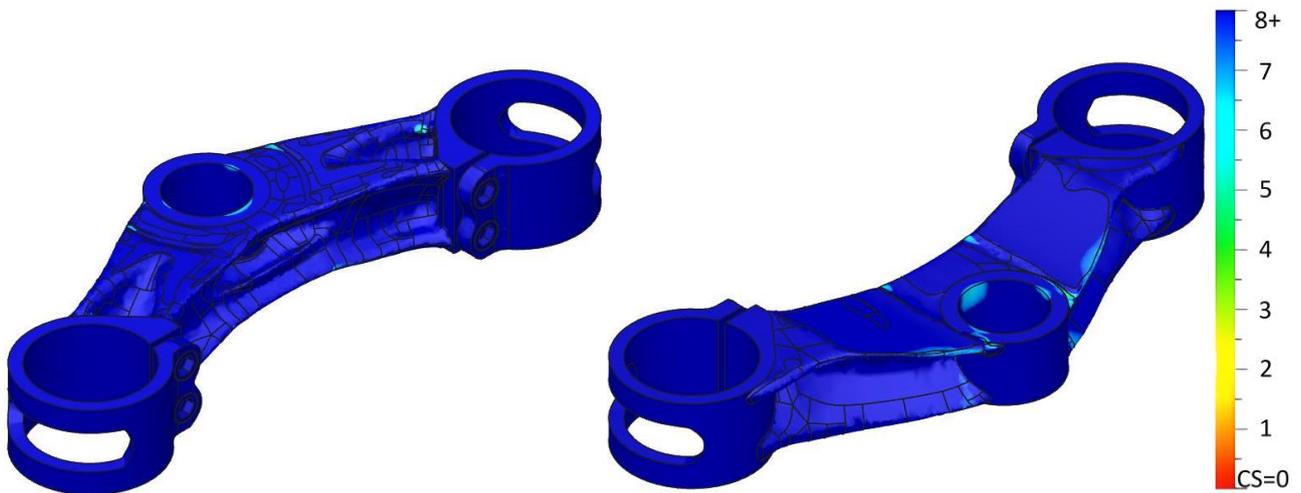


FIG. 101 - ANDAMENTO COEFFICIENTE DI SICUREZZA TORSIONE DESTRA COMPONENTE DEFINITIVO

Le immagini riguardanti $F_{d,y}$ non sono presenti poiché il coefficiente di sicurezza è ovunque superiore a 8; mentre la torsione sinistra ha valori uguali e opposti alla destra.

Rispetto alla piastra superiore i coefficienti di sicurezza sono generalmente più alti; questo non è un problema in quanto il risultato più importante da ottenere è l'uniformità tra le due piastre nei valori di spostamento e non in quelli riguardanti stato tensionale.

Il risparmio in termini di massa del componente, considerando la sola piastra senza viti, ottenuto grazie alle modifiche è di 17g, pari al 5.6% del totale. Si è passati da 303g a 286g.

5 - CONCLUSIONI

Il presente elaborato illustra gli step eseguiti durante la riprogettazione delle piastre di sterzo di una motocicletta da trial, con l'obiettivo di ridurre al minimo la massa di tale componente in uno sport dove la leggerezza è sempre più fondamentale.

Per giungere a questo risultato è stato dapprima analizzato e poi utilizzato il Generative Design, una delle più moderne e avanzate tecniche di ottimizzazione disponibili, associato alla fabbricazione additiva Laser-Powder Bed Fusion, cioè la tecnologia di produzione che permette di sfruttarne al meglio i vantaggi.

L'utilizzo della fabbricazione additiva come metodologia produttiva fornisce molti vantaggi ma ha richiesto la conoscenza di una serie di vincoli e regole noti come Design for Additive Manufacturing, che permettono di progettare un componente specificatamente per la produzione additiva; limiti che possono variare molto in base al materiale e alla tecnologia utilizzata. Queste conoscenze hanno inoltre permesso di orientare la scelta di due specifiche piastre tra le numerose alternative di design offerte dal software di progettazione generativa.

Il sistema di carichi e vincoli necessario all'impostazione del modello generativo è stato studiato specificatamente per una moto da trial. Le equazioni per quantificare e orientare le forze agenti sulle piastre sono state in parte ricavate in letteratura e in parte modificate per l'utilizzo specifico.

I modelli di piastre ottenuti grazie al Generative design e al sistema di carichi studiato appositamente hanno permesso di ottenere una notevole riduzione delle masse; la piastra superiore è passata dai 408.1g del componente originale, un assieme formato da sette componenti, ai 229g dell'unico componente ottimizzato realizzato con lega AlSi10Mg. La piastra inferiore invece, è passata da 494.2g del componente originale in lega Al356 a 303g del modello generativo in AlSi10Mg.

Grazie all'utilizzo di analisi FEM e delle conoscenze apprese nei primi capitoli, sui modelli generativi sono state operate attente modifiche atte a risolvere alcune criticità presenti dal punto di vista della resistenza dei componenti, e altre per ridurre ulteriormente la massa o migliorare il processo produttivo.

I risultati finali sono veramente soddisfacenti. La piastra superiore in versione definitiva ha una massa 217g, un risparmio del 46.8%, mentre quella inferiore a 286g, pari al 42.1% in meno del componente originale. Un risparmio totale di 399g pari al 44.2%.

Nonostante il guadagno, i criteri di sicurezza prefissati sono stati completamente rispettati e l'andamento delle sollecitazioni all'interno dei componenti è più uniforme rispetto alle parti originali. Questo si traduce in una crescita lineare degli spostamenti, comunque molto limitati, partendo dal centro e andando verso gli anelli esterni delle piastre. Risultato ancora più importante da questo punto di vista è la congruenza nei valori di deformazione sotto carico ottenuta per le piastre separatamente, nonostante la piastra superiore presenti mediamente tensioni più elevate, soprattutto durante le sollecitazioni di torsione.

Oltre alla pura performance, in ottica di una produzione per la vendita, è da considerare anche l'aspetto estetico del componente finale, visto che gli elevati costi della tecnologia produttiva utilizzata lo collocherebbero in una fascia di mercato "premium". Esiste una

componente di appassionati per cui questo aspetto non è secondario. Il Generative Design, la fabbricazione additiva e le modifiche effettuate hanno permesso di ottenere un ottimo risultato, pur soggetto a valutazioni soggettive, sotto questo punto di vista (vedi Fig.102 e 103). L'utilizzo delle strutture lattice permette di ottenere una elevata resistenza rispetto alla bassa densità e, oltre al guadagno in termini di massa e rimozione supporti, consente di sottolineare ancora di più il carattere "premium" del prodotto.



FIG. 102 - ASPETTO DEFINITIVO DEL SISTEMA DI STERZO

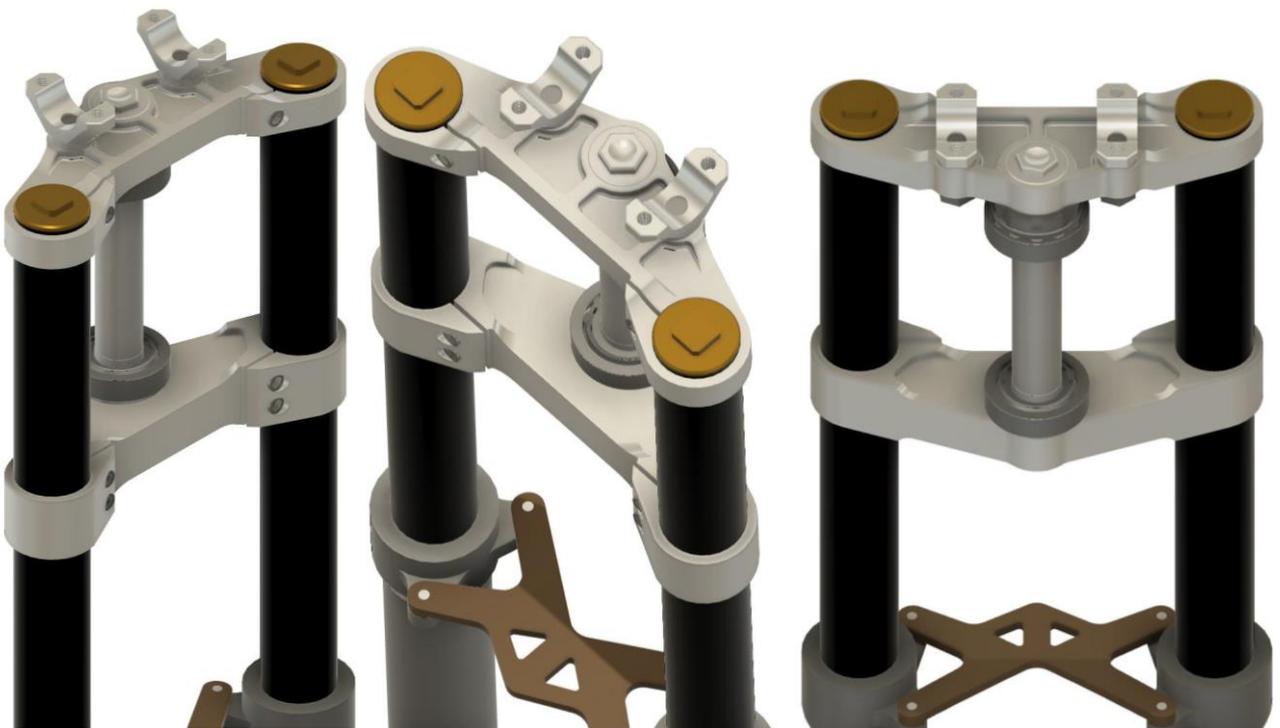


FIG. 103 - ASPETTO SISTEMA DI STERZO ORIGINALE

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. J. Martínez *et al.*, “Generative Design Method (GDM)-A State of Art You may also like Measurement of MacMullin Numbers for PEMFC Gas-Diffusion Media The association between maternal exposure to fine particulate matter (PM 2.5) and gestational diabetes mellitus (GDM): a prospective birth cohort study in China Influence of Cathode Gas Diffusion Media Porosity on Open-Cathode Fuel Cells Generative Design Method (GDM)-A State of Art”, doi: 10.1088/1757-899X/1104/1/012036.
- [2] “VAN RYSEL (@van_rysel) • Foto e video di Instagram.” https://www.instagram.com/van_rysel/ (accessed May 30, 2022).
- [3] “SRAM.” <https://www.sram.com/en/sram> (accessed Oct. 28, 2022).
- [4] “SRAM | Generative Design | Autodesk.” <https://fom.autodesk.com/sram/p/1> (accessed Apr. 20, 2022).
- [5] “Homepage | Specialized.com.” <https://www.specialized.com/it/it> (accessed May 30, 2022).
- [6] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, R. Suman, and S. Rab, “Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability,” *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, no. 4, pp. 312–322, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.AIEPR.2021.07.005.
- [7] “Cagiva 500 GP 1980-1995: proud passion.” http://www.italian.sakura.ne.jp/bad_toys/cagiva500/ (accessed May 30, 2022).
- [8] “Autodesk e Lightning | Generative Car Design.” <http://generativecardesign.altervista.org/autodesk-e-lightning/> (accessed Apr. 25, 2022).
- [9] “Il forcellone della Alpha Leonis - Universuicidio.” <https://ingsuicidio.it/il-forcellone-della-alpha-leonis/> (accessed Apr. 25, 2022).
- [10] “APWorks Light Rider: ecco la prima moto stampata in 3D.” <https://www.motorbox.com/moto/magazine-moto/moto-novita/apworks-light-rider-ecco-la-prima-moto-stampata-in-3d> (accessed May 30, 2022).
- [11] “How the generative design process works? | Tools Software.” <https://prototechsolutions.com/cad-notes/generative-design/> (accessed May 23, 2022).
- [12] F. Buonamici, M. Carfagni, R. Furferi, Y. Volpe, and L. Governi, “Generative design: An explorative study,” *Comput Aided Des Appl*, vol. 18, no. 1, pp. 144–155, 2020, doi: 10.14733/CADAPS.2021.144-155.
- [13] “Aggiornamenti della mesh - Novità principali di COMSOL® 5.3.” <https://www.comsol.it/release/5.3/mesh> (accessed May 24, 2022).
- [14] “Pollen AM | Digital Chain.” https://www.pollen.am/digital_chain_general_introduction/ (accessed Jul. 18, 2022).
- [15] “(1) (PDF) Online quality control of selective laser melting.” https://www.researchgate.net/publication/268293509_Online_quality_control_of_selective_laser_melting (accessed Jul. 18, 2022).

- [16] Y. Tang and Y. F. Zhao, "A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance", doi: 10.1108/RPJ-01-2015-0011.
- [17] Z. Wu and R. Xiao, "A topology optimization approach to structure design with self-supporting constraints in additive manufacturing," *J Comput Des Eng*, vol. 2022, no. 2, pp. 364–379, doi: 10.1093/jcde/qwac004.
- [18] "Design Guides | Multicolor+ 3D Printing | i.materialise." <https://i.materialise.com/en/3d-printing-materials/multicolor-plus/design-guide> (accessed Oct. 28, 2022).
- [19] Crucible, "Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)".
- [20] "(PDF) Effect of Building Platform Position on the Surface Quality, Dimensional Accuracy, and Geometrical Precision of Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Parts." https://www.researchgate.net/publication/328538615_Effect_of_Building_Platform_Position_on_the_Surface_Quality_Dimensional_Accuracy_and_Geometrical_Precision_of_Direct_Metal_Laser_Sintering_DMLS_Parts (accessed Apr. 27, 2022).
- [21] "Design guidelines for metal printing - Materflow." <https://www.materflow.com/en/design-guidelines-for-metal-printing/> (accessed May 23, 2022).
- [22] J. Kranz, D. Herzog, and C. Emmelmann, "Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4," *J Laser Appl*, vol. 27, no. S1, p. S14001, Feb. 2015, doi: 10.2351/1.4885235.
- [23] "METAL LASER POWDER BED FUSION DESIGN GUIDELINES," 2019.
- [24] "Star Rapid - Low-Volume Manufacturing & Prototyping." <https://www.starrapid.com/> (accessed May 23, 2022).
- [25] H. Teich, C. Maucher, and H.-C. Möhring, "INFLUENCE OF LPBF PARAMETERS AND STRATEGIES ON FINE MACHINING OF PRE-BUILT BORES," *Journal of Machine Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 91–101, 2021, doi: 10.36897/jme/133344.
- [26] "Fori e cavità – Creative Metal 3D Printing." <http://www.addmelab.polimi.it/stampare-in-metallo/la-tecnologia-slm/progettazione/regole-di-progettazione/fori-e-cavita/> (accessed May 30, 2022).
- [27] C. Tan *et al.*, "Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds," *Mater Des*, vol. 196, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.MATDES.2020.109147.
- [28] M. Mele, A. Bergmann, G. Campana, and T. Pilz, "Experimental investigation into the effect of supports and overhangs on accuracy and roughness in laser powder bed fusion," *Opt Laser Technol*, vol. 140, p. 107024, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2021.107024.
- [29] P. K. Venuvinod and Weiyin. Ma, "Rapid prototyping : laser-based and other technologies," p. 389, 2004.
- [30] M. Leary, T. Maconachie, A. Sarker, O. Faruque, and M. Brandt, "Mechanical and thermal characterisation of AlSi10Mg SLM block support structures," *Mater Des*, vol. 183, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.MATDES.2019.108138.
- [31] A. du Plessis *et al.*, "Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing," *Addit Manuf*, vol. 27, pp. 408–427, May 2019, doi: 10.1016/J.ADDMA.2019.03.033.

- [32] “Guide to Lattice Structures in Additive Manufacturing | nTopology.”
<https://ntopology.com/blog/guide-to-lattice-structures-in-additive-manufacturing/> (accessed May 06, 2022).
- [33] “How 3D Printed Lattice Structures Improve Mechanical Properties - 3D Printing.”
<https://3dprinting.com/tips-tricks/3d-printed-lattice-structures/> (accessed May 07, 2022).
- [34] M. Benedetti, A. du Plessis, R. O. Ritchie, M. Dallago, S. M. J. Razavi, and F. Berto, “Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication,” *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 144, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.MSER.2021.100606.
- [35] “Types of lattices for additive manufacturing - the terms all engineers need to know - Gen3D.”
<https://gen3d.com/news-and-articles/types-of-lattices-for-additive-manufacturing/> (accessed May 06, 2022).
- [36] W. P. Syam, W. Jianwei, B. Zhao, I. Maskery, W. Elmadih, and R. Leach, “Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation,” *Precis Eng*, vol. 52, pp. 494–506, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2017.09.010.
- [37] T. Maconachie *et al.*, “SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges,” *Mater Des*, vol. 183, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.MATDES.2019.108137.
- [38] S. Altamimi, D.-W. Lee, I. Barsoum, R. Rowshan, I. M. Jasiuk, and R. K. A. Al-Rub, “On Stiffness, Strength, Anisotropy, and Buckling of 3D Strut-Based Lattices with Cubic Crystal Structures,” 2021, doi: 10.1002/adem.202101379.
- [39] “Additive Manufacturing of TPMS Lattices for Heat Exchange or Filtration – Daniel Morton.”
<https://danielpmorton.github.io/AMLattices/> (accessed May 18, 2022).
- [40] O. Al-Ketan, R. Rowshan, and R. K. Abu Al-Rub, “Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials,” *Addit Manuf*, vol. 19, pp. 167–183, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ADDMA.2017.12.006.
- [41] M. Jin *et al.*, “Investigation on the mechanical properties of TPMS porous structures fabricated by laser powder bed fusion,” *J Manuf Process*, vol. 76, pp. 559–574, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2022.02.035.
- [42] F. S. L. Bobbert *et al.*, “Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties,” *Acta Biomater*, vol. 53, pp. 572–584, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.ACTBIO.2017.02.024.
- [43] “Top 10 Architected Materials & Lattice Design Videos | nTopology.”
<https://ntopology.com/blog/top-architected-materials-design-videos/> (accessed May 07, 2022).
- [44] N. Sanaei and A. Fatemi, “Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: A state-of-the-art review,” *Prog Mater Sci*, vol. 117, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.PMATSCI.2020.100724.
- [45] “AlSi10Mg material data — Metal powder | Sandvik.”
<https://www.metalpowder.sandvik/en/products/metal-powder-alloys/aluminium/alsi10mg-alsi7mg-material-data/> (accessed Jul. 21, 2022).
- [46] “EOS Aluminium Al2139 AM Material Data Sheet Metal Solutions”.

- [47] "Material data sheet-FlexLine", Accessed: Jul. 21, 2022. [Online]. Available: www.eos.info
- [48] "Moto e Scooter per cilindrata, categoria e prezzo," <https://www.dueruote.it/listino>.
- [49] "BosiShop Offroad/Ricambi Beta," bosioffroad.it.
- [50] D. Croccolo, M. de Agostinis, and N. Vincenzi, "An analytical approach to the structural design and optimization of motorbike forks," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 226, no. 2, pp. 158–168, 2012, doi: 10.1177/0954407011416178.
- [51] T. Ehlers and R. Lachmayer, "Design of a Motorcycle Triple Clamp Optimised for Stiffness and Damping," *Proceedings of the Munich Symposium on Lightweight Design 2020*, pp. 1–17, 2021, doi: 10.1007/978-3-662-63143-0_1.
- [52] A. Wahl, F. Kaut, E. Dikmenli, M. Klews, and R. Bosch GmbH, "Steering Torque Measurement on Motorcycles".
- [53] A. Bonci and G. A. Scala, "Regional Operative Plan (POR) MARCHE Region FESR (Fondo Europeo di Sviluppo Regionale)," *AXIS*, vol. 1, 2014, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002685.
- [54] S. Piantini, A. Giorgetti, N. Baldanzini, C. Monti, and M. Pierini, "machines Design of a Motorcycle Steering Damper for a Safer Ride," 2020, doi: 10.3390/machines8020024.
- [55] L. Nehaoua, A. Khetat, H. Arioui, H. Imine, and S. Espié, "Rider Steer Torque Estimation for Motorcycle Riding Simulator," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 18, pp. 505–510, Jan. 2010, doi: 10.3182/20100913-3-US-2015.00112.