POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione di un telaio motociclistico realizzato mediante tecnologia Additive Manufacturing



Relatore

Prof. Luca Iuliano

Correlatori

Ing. Manuela Galati

Ing. Flaviano Calignano

Candidato

Ivan Vecchio

Anno accademico 2018/2019

INDICE GENERALE

INDICE GENERALE	<u>1</u>
ELENCO DELLE FIGURE	VI
ELENCO DELLE TABELLE	XI
SOMMARIO	XIII
INTRODUZIONE	1
1.1 SCOPO DELLA RICERCA	5
1.2 PROCESS PLANNING	6
1.2.1 Decisioni preliminari	6
1.2.2 Tecnica di costruzione	6
1.2.3 Materiale	7
1.2.4 SUDDIVISIONE DEL TELAIO E ASSEMBLAGGIO DEI PEZZI	8
1.2.5 GLI STEP DI LAVORAZIONE	9
1.3 METODOLOGIE APPLICATE	10
1.4 RIASSUNTO DEI CAPITOLI	10

CAPITOLO 2 ADDITIVE MANUFACTURING	13
2.1 Breve cenno sull'AM	13
2.1.1 APPLICAZIONI	18
2.2 TECNOLOGIE ADDITIVE	19
2.2.1 Powder Bed Fusion	20
2.3 L-PBF	20 24
2.3.1 VANTAGGI DEL L-PBF	24
2.3.2 SVANTAGGI L-PBF	29
2.4 E-PBF	33
2.4.1 REQUISITI PER LE POLVERI	35
2.5 DIFFERENZE TRA EBM E SLM	37
2.6 TITANIO PER L'ADDITIVE MANUFACTURING	39
2.6.1 Lega di titanio <i>Ti6Al4V</i>	40
2.7 REGOLE GUIDA PER IL DESIGN	46
CAPITOLO 3 STUDIO DEL COMPONENTE ORIGINALE	51
CHITOEOU STODIO DEE COMPONENTE ORIGINALE	
3.1 IL TELAIO MOTOCICLISTICO	51
3.1.1 Mono trave	53
3.1.2 BACKBONE	54
3.1.3 Telaio a doppia culla	54
3.1.4 Telaio perimetrale	55
3.1.5 TELAIO A TRALICCIO	56
3.1.6 Installazione del motore al telaio	56
3.1.7 SISTEMA DI SOSPENSIONE POSTERIORE	57
3.1.8 RIGIDEZZA STRUTTURALE	58
3.2 LA GEOMETRIA DEL TELAIO	58
3.3 CARATTERISTICHE DEL TELAIO DI STUDIO	60
3.3.1 SERBATOIO OLIO, CANNOTTO DI STERZO E CULLA MOTORE	62

3.3.2 Strutture laterali	64
3.3.3 ATTACCHI MOTORE	65
3.3.4 TELAIETTO POSTERIORE	66
3.3.5 FORCELLONE E LEVERAGGI	67
3.4 REVERSE ENGINEERING	68
3.5 Analisi strutturale	71
CAPITOLO 4 PROGETTAZIONE DEL NUOVO TELAIO	75
4.1 Obbiettivi	75
4.2 STEP BY STEP	76
4.3 RISULTATO	84
CAPITOLO 5 ANALISI STRUTTURALE PRELIMINARE	85
5.1 CASO 1 ATTERRAGGIO CON ENTRAMBE LE RUOTE	89
5.1.1 Analisi	89
5.1.2 RISULTATI	92
5.2 CASO 2 FRENATA E IMPATTO FRONTALE	93
5.2.1 Analisi	93
5.2.2 RISULTATI	95
5.3 CASO 3 ATTERRAGGIO CON RUOTA POSTERIORE	96
5.3.1 Analisi	96
5.3.2 RISULTATI	97
5.4 CASO 4 ATTERRAGGIO CON RUOTA ANTERIORE	98
5.4.1 Analisi	98
5.4.2 RISULTATI	99
5.5 DESCRIZIONE DELLE RIGIDEZZE DEL TELAIO	100
5.5.1 RIGIDEZZA TORSIONALE	100
5.5.2 RIGIDEZZA LATERALE	100

5.5.3 RIGIDEZZA FLESSIONALE	101
5.6 SIMULAZIONI RIGIDEZZE	102
5.6.1 RIGIDEZZA TORSIONALE	102
5.6.2 RIGIDEZZA LATERALE	103
5.6.3 RIGIDEZZA FLESSIONALE	104
5.7 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	104
CAPITOLO 6 ASPETTI TECNOLOGICI E COSTRUZION	NE DEL TELAIO
<u>106</u>	
6.1 DIVISIONE MODELLO	109
6.2 WORKFLOW PER CONFIGURAZIONE FINALE	113
6.3 CONFIGURAZIONE OTTIMALE	115
6.4 Analisi FEM	116
6.4.1 Modellizzazione	116
6.4.2 SETUP ANALISI	118
6.4.3 RISULTATI ANALISI RIGIDEZZE	122
6.5 Messa in Macchina	124
6.5.1 MACCHINARI UTILIZZATI	124
6.5.2 GENERAZIONE DEI SUPPORTI	126
6.5.3 PARTICOLARI SU MODIFICHE PER DFAM	131
6.5.4 Orientamento dei componenti	132
6.6 Post processing	137
CAPITOLO 7 ANALISI DEI RISULTATI	139
7.1 ANALISI STRUTTURALE DEL MODELLO FINALE	141
7.2 Confronto	144
7.2.1 CONFRONTO RIGIDEZZE	144
7.2.2 Peso	144

CAPITOLO 8	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	<u>146</u>
BIBLIOGRAF	[A	149

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 0-1 schema di processo CNC sopra; schema di processo stampa 3D2
Figura 0-2 schema di processo CNC sopra; schema di processo stampa 3D2
Figura 0-3 cerniera di uno sportello ad ali di gabbiano
Figura 0-4 cerniera ottimizzzata di uno sportello ad ali di gabbiano4
Figura 0-5 Vista al microscopio di un componente in Ti6-4 realizzato con A-
EBM, B- SLM
Figura 0-6 Vista al microscopio di un componente in Ti6-4 realizzato con A-
EBM, B- SLM
Figura 2-1 Principio generale del laser-sintering
Figura 2-216
Figura 2-3 Tecnologie Additive
Figura 2-4 Processo di fusione a letto di polvere. 2018 © Dassault Systèmes20
Figura 2-5 Processo di fusione a letto di polvere. 2018 © Dassault Systèmes20
Figura 2-6 componenti realizzati in AM in una vettura sportiva22
Figura 2-7 componenti realizzati in AM in una vettura sportiva22
Figura 2-8 Processo Direct Laser Sintering (DMLS). 2008 © CustomPartNet24
Figura 2-9 Processo Direct Laser Sintering (DMLS). 2008 © CustomPartNet24
Figura 2-10 Processo di realizzazione del layer
Figura 2-11 Esempio di messa in macchina di un componente
Figura 2-12 Caratteristiche di Processo
Figura 2-13 esempio di difetti di processo
Figura 2-14 Processo EBM. Arcam
Figura 2-15 Processo EBM. Arcam
Figura 2-16 Vantaggi e Svantaggi EBM35
Figura 2-17 Campioni Ti6AL4V fabbricati da EBM e SLM. A: Campione EBM, B:
campione SLM

Figura 2-18 Campioni Ti6AL4V fabbricati da EBM e SLM. A: Campione EBM,
B: campione SLM
Figura 2-19 diagramma di stato Ti6-4. 2008 © calphad.com
Figura 2-20 diagramma di stato Ti6-4. 2008 © calphad.com
Figura 2-21 celle cristalline Ti6-4
Figura 2-22 celle cristalline Ti6-4
Figura 2-23 Diagramma della Struttura cristallina in funzione della temperatura di
raffreddamento
Figura 2-24 Caratteristiche meccaniche del Ti6Al4V realizzato in EBM e SLM ©
Ampower GmbH & Co. KG44
Figura 2-25 Rugosità superficiale del Ti6Al4V realizzato in EBMa sinistra, SLM a
destra. 45
Figura 2-26 grado di tolleranza normalizzato. In verde EBM, in viola SLM 45
Figura 2-27 Angolo critico. Regole di DfAM
Figura 2-28 Regole di DfAM
Figura 2-29 Regole di DfAM
Figura 2-30 Regole di DfAM
Figura 3-1 Componenti di un motoveicolo
Figura 3-2 Single Cradle
Figura 3-3 Backbone
Figura 3-4 Double cradle
Figura 3-5 Telaio perimetrale
Figura 3-6 Trellis frame
Figura 3-7 Sistemi di sospensione
Figura 3-8 Geometria di un motoveicolo
Figura 3-9 Telaio Honda NX650
Figura 3-10 Rake e avancorsa
Figura 3-11 Serbatoio olio
Figura 3-12 Longheroni Inferiori 63

Figura 3-13 Piastre inferiori	63
Figura 3-14 Strutture laterali	64
Figura 3-15 Attacchi motore	65
Figura 3-16 Telaietto posteriore	66
Figura 3-17 Forcellone posteriore	67
Figura 3-18 Sistema di leveraggio	67
Figura 3-19 Scannerizzazione 3D	69
Figura 3-20 Fasi del processo di RE	70
Figura 3-21 Nuvola di punti ottenuta	70
Figura 3-22 Modello CAD dei due componenti	71
Figura 3-23 Risultati spostamento massimo su HyperView	73
Figura 4-1 Zone di non-design Space	77
Figura 4-2 Prototipo concettuale	78
Figura 4-3 Prototipo funzionale	79
Figura 4-4 Telaietto posteriore	80
Figura 4-5 Cannotto di sterzo	80
Figura 4-6 Strutture laterali a traliccio	81
Figura 4-7 Serbatoio olio	82
Figura 4-8 Struttura inferiore	82
Figura 4-9 Attacco Mono superiore	83
Figura 4-10 Collegamento inferiore	83
Figura 4-11 Viste del prototipo funzionale	84
Figura 5-1 Modello per simulazione del movimento	86
Figura 5-2 Giunti leveraggi (sinistra), Cannotto bloccato (destra)	86
Figura 5-3 Simulazione motore	87
Figura 5-4 Dinamica di un salto	89
Figura 5-5 Giunti di collegamento ruote	89
Figura 5-6 Caso 1	90
Figura 5-7 Simulazione Movimento Mono	90

Figura 5-8 Condizioni di carico Caso 1	91
Figura 5-9 Fattore di sicurezza Caso 1	92
Figura 5-10 Caso 1 tensione massima di VonMises	92
Figura 5-11 Condizioni di carico Caso 2-Frenata	93
Figura 5-12 Condizioni di carico Caso 2-Impatto frontale	94
Figura 5-13 Caso 2 tensione massima di VonMises. a) frenata; b) impatto	95
Figura 5-14 Condizioni di carico Caso 3	96
Figura 5-15 Caso 3 tensione massima di VonMises	97
Figura 5-16 Condizioni di carico Caso 4	98
Figura 5-17 Caso 4 tensione massima di VonMises	99
Figura 5-18 Rigidezza Torsionale	100
Figura 5-19 Rigidezza Laterale	101
Figura 5-20 Rigidezza Flessionale	101
Figura 5-21 Rigidezza Torsionale	102
Figura 5-22 Rigidezza Torsionale	102
Figura 5-23 Rigidezza Laterale	103
Figura 5-24 Rigidezza Flessionale	104
Figura 5-25 – Rigidezza: 1) Torsionale; 2) Flessionale; 3) laterale	105
Figura 6-1 zone di contatto pilota-telaio	109
Figura 6-2 Zone di maggiore sollecitazione	110
Figura 6-3 Suddivisione dei componenti	111
Figura 6-4 Workflow	113
Figura 6-5 Configurazione finale	115
Figura 6-6 Parametri del pannello Tetramesh	116
Figura 6-7 Parametri Curvature e Proximity	117
Figura 6-8 Creazione della Tetramesh	117
Figura 6-9 Rappresentazione Connessione rigida del motore	118
Figura 6-10 Vincolo poggia piedi	119
Figura 6-11 Forza applicate per la rigidezza torsionale	120

Figura 6-12 Forza applicate per la rigidezza laterale	121
Figura 6-13 Forza applicate per la rigidezza flessionale	122
Figura 6-14 Risulati Rigidezze	123
Figura 6-15 Arcam Q20 Plus	124
Figura 6-16 Proprietà Meccaniche SLM®500	125
Figura 6-17 Tipologie di supporto	127
Figura 6-18 Supporti EBM	128
Figura 6-19 Tipologie di supporto	129
Figura 6-20 Parametri di supporto	130
Figura 6-21 Orientamento del componente	131
Figura 6-22 Modifiche secondo DfAM	131
Figura 6-23 Messa in macchina	132
Figura 6-24 Orientamento in macchina EBM	134
Figura 6-25 Orientamento in macchina SLM	135
Figura 6-26 Componenti in SLM	136
Figura 6-27 Realizzazione componente in EBM	137
Figura 6-28 Componente As-built	138
Figura 7-1 Fattore di sicurezza	141
Figura 7-2 Particolare della simulazione	141
Figura 7-3 Risulati simulazione	143

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 0-1 Fasi del Progetto di Tesi9
Tabella 2-1 Motivazioni economiche
Tabella 2-2 vantaggi SLM29
Tabella 2-3 Svantaggi SLM32
Tabella 2-4 confronto tra EBM e SLM
Tabella 2-5 Confronto tra i prezzi di un laminato in Titanio,Alluminio,Acciaio39
Tabella 2-6
Tabella 2-7 Composizione Chimica del Ti6Al4V42
Tabella 2-8 Confronto delle caratteristiche e parametri di processo del titanio tra le
due tecnologie44
Tabella 3-1 Proprietà meccaniche Acciaio S275
Tabella 3-2 Parametri del materiale inseriti in HyperMesh72
Tabella 3-3 Tabella risultati rigidezze74
Tabella 5-1 Tensione a snervamento del TiAl6V4 per SLM e EBM85
Tabella 5-2 Rigidezze di riferimento
Tabella 5-3 Condizioni di carico Caso 1
Tabella 5-4 Condizioni di carico Caso 2
Tabella 5-5 Condizioni di carico Caso 3
Tabella 5-6 Condizioni di carico Caso 4
Tabella 5-7 Risultati massima tensione Von Mises
Tabella 5-8 Risultati simulazione rigidezza
Tabella 6-1 Elenco dei componenti
Tabella 6-2 Parametri di costruzione
Tabella 6-3 Caratteristiche della configurazione finale
Tabella 6-4 Numero di nodi ed elementi creati
Tabella 6-5 Proprietà del materiale inserite nel software
Tabella 6-6 Risultati simulazione rividezza

Tabella 6-7 Proprietà Meccaniche Arcam Q20 Plus	124
Tabella 6-8 Proprietà Meccaniche SLM®500	125
Tabella 6-9 Parametri supporto	128
Tabella 6-10 Volume occupato	133
Tabella 6-11 Componenti in EBM	134
Tabella 6-12 Volume occupato	136
Tabella 7-1 Risultati simulazione tensione massima	142
Tabella 7-2 Confronto rigidezze modello originale, modello AM	144
Tabella 7-3 Confronto peso modello originale, modello AM	144

SOMMARIO

Sull'esempio di una complessa struttura di una Honda NX 650 viene mostrato il potenziale e il valore aggiunto della stampa 3D per metallo per l'industria motociclistica.

Il progetto di tesi parte dall'analisi strutturale mediante elementi finiti di un telaio motociclistico realizzato con metodi di costruzione tradizionale, effettuando in seguito una totale riprogettazione che rispetti le regole di Design per Additive Manufacturing. Il telaio, essendo di grandi dimensioni, è stato diviso in più pezzi per poter utilizzare macchinari con tecnologia a letto di polvere. Nello specifico sono stati utilizzati due macchinari con tecnologie differenti: EBM e SLM. Il materiale scelto per la realizzazione del telaio è il *Ti-6Al-4V*, mentre l'assemblamento dei vari componenti è stato pensato mediante saldatura. Una volta scelta la configurazione ideale che rispettasse i parametri di Design per Additive Manufacturing, i componenti sono stati studiati per la messa in macchina, con particolare attenzione per l'orientamento, l'apporto di strutture di supporto e la disposizione in macchina per saturare l'intero volume di lavoro. Una volta realizzato il modello è stato confrontato con quello originale.

Il sistema riprogettato è stato convalidato in ambiente virtuale, analizzandone la rigidezza e le massime tensioni.

INTRODUZIONE

La forte crescita del peso del terziario nell'assetto economico mondiale, lo sviluppo della cosiddetta "economia della conoscenza" in cui il vantaggio competitivo di imprese dipende sempre più dalla capacità di gestire la richiesta dei clienti che esprimono una domanda di elevata qualità e personalizzazione dei servizi e il progresso tecnologico che si sviluppa con velocità esponenziale sono alcuni tra i più rilevanti fenomeni che pongono le imprese di fronte a nuove sfide riguardanti le modalità di gestione dell'innovazione in termini di prodotto e di processi. L'introduzione di innovazioni di successo, orientate al miglioramento dell'efficacia e dell'efficienza aziendale, consente di rispondere positivamente al naturale ciclo di vita dei prodotti e di acquisire vantaggi competitivi differenziali rispetto alla concorrenza [1]. Le innovazioni di prodotto sono incorporate nei beni o nei servizi realizzati dall'impresa e consistono nell'introduzione sul mercato di un'offerta tecnologicamente nuova o sostanzialmente migliorata in termini di performance; soprattutto nel mondo Racing questo concetto è spinto ai massimi livelli. La competizione porta allo studio e alla ricerca intensa per l'ottenimento di obiettivi che possono portare alla vittoria.

Introduzione

Entrando nel particolare, nel campo strutturale, si cerca di trovare una tecnologia di costruzione che possa portare all'ottenimento di telai sempre più leggeri e non subordinati ai vincoli di costruzione. I componenti sono normalmente ricavati da una precedente progettazione e poi da una messa in macchina, come una lavorazione dal pieno su macchine utensili a controllo numerico o processi di fusione mediante iniezione. Tali tecniche risultano però limitative in campo progettuale: il progetto del pezzo è sempre subordinato ai limiti imposti dalla tecnologia utilizzata. Considerevoli sono anche i costi per la produzione di semplici prototipi che coprono un ruolo provvisorio per la sola sperimentazione. Nasce quindi l'esigenza di poter progettare componenti senza alcun vincolo geometrico nel minor tempo possibile, in modo da poter effettuare numerosi test. Al momento, L'Additive Manufacturing rappresenta la risposta più valida. È un processo tecnologico sviluppato negli ultimi decenni che rende possibile la produzione di oggetti di geometria complessa direttamente dal modello matematico realizzato su di un sistema CAD 3D, senza un process-planning. La differenza tra la produzione tradizionale e l'AM risiede nel modo in cui vengono realizzati i componenti.

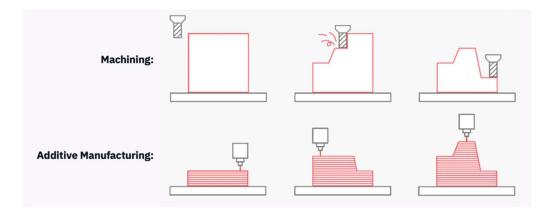


Figura 0-1 schema di processo CNC sopra; schema di processo stampa 3D

I processi produttivi tradizionali utilizzano generalmente un approccio sottrattivo, che include una combinazione di diverse tecnologie per la costruzione del pezzo, un'attenta e dettagliata analisi della geometria per determinare l'ordine delle lavorazioni, quali strumenti e quali processi usare e quali impianti sono necessari per il completamento del pezzo.

Si prenda come esempio la produzione di un oggetto apparentemente semplice come una cerniera di uno sportello di autoveicolo.



Figura 0-3 cerniera di uno sportello ad ali di gabbiano

La sua produzione comporta la forgiatura di alcuni componenti, la rettifica, la fresatura e il montaggio. Parte della materia prima sarà sprecata nel corso del processo e grandi quantità di energia sono spese nel riscaldamento dei macchinari e del metallo. Per ottimizzarne la produzione, si rendono necessari utensili e macchine specializzate nella produzione esclusiva di quel determinato pezzo.

Per contro, attraverso le tecnologie Additive, che necessitano di pochi dettagli dimensionali e di una conoscenza del macchinario e del materiale utilizzato, è possibile produrre la cerniera in un'unica operazione, strato per strato lungo una direzione, fino al completamento del pezzo. Sulla base di questo concetto, virtualmente, può essere realizzato qualunque oggetto. Dopo alcuni lavori di postproduzione, come la pulizia e la rimozione dei supporti a seconda del materiale il pezzo è pronto.



Figura 0-4 cerniera ottimizzzata di uno sportello ad ali di gabbiano

Per volumi bassi di produzione, l'AM offre già un valore significativo. Costi e tempi di sviluppo possono essere ridotti eliminando la necessità di utensili utilizzati nella fabbricazione tradizionale. Dal momento che l'AM permette un controllo preciso del materiale utilizzato, il progettista può ricreare la struttura interna di un prodotto in ottica di ottimizzazione; ad esempio, la creazione di un reticolo a nido d'ape interno al posto di un blocco solido alleggerisce il prodotto senza sacrificarne la resistenza.

I materiali utilizzati sono molteplici: dalla plastica al metallo, ma anche ceramica e materiali compositi in differenti forme, come polvere, filamenti o liquido. Abbinando l'AM alla ottimizzazione topologica è possibile quindi realizzare componenti strutturali e non, con performance al top in termini di resistenza, rigidezza e peso e in tempi e costi ridotti al minimo. Lo sviluppo si concentra quindi maggiormente sul design e ottimizzazione del componente: diventa necessario uno studio più accurato sul design, tralasciando i vincoli progettuali imposti dalle lavorazioni tradizionali. Si va, dunque, verso una conoscenza sempre più accurata del modo in cui lavora un pezzo meccanico

sottoposto a sollecitazioni esterne, con la possibilità di prevedere e simulare al software ogni suo comportamento.

Il progetto di tesi prende in esame un telaio motociclistico di una Honda NX 650 Dominator, una moto con caratteristiche enduro, in cui agilità, elevato rapporto peso-potenza e resistenza alla flessione sono caratteristiche chiave, molto dipendenti dal comportamento strutturale. Il telaio è uno dei componenti principali del corpo del veicolo: deve resistere agli stress dovuti ai carichi statici e dinamici, con grande attenzione all'analisi delle vibrazioni per il piacere di guida.

Con la supervisione del Centro IAM del Politecnico di Torino, è stato studiato un telaio esistente, effettuando un'analisi strutturale del componente. Partendo dai carichi e dai vincoli, il telaio è stato completamente ridisegnato, senza stravolgerne la geometria complessiva, adattandolo alle regole di design per la fabbricazione additiva. Ultimato il modello CAD è stata realizzata un'accurata progettazione di messa in macchina per la stampa effettiva del pezzo, ed infine il suo assemblamento.

1.1 SCOPO DELLA RICERCA

L'idea principale di progetto nasce dall'esigenza di un obiettivo fondamentale: Innovazione. L'AM è il più grande passo avanti compiuto dalla tecnologia industriale negli ultimi decenni, ma è ancora situato in una produzione di nicchia. Grande vincolo è la non competitività in larga scala e lo spazio di lavoro che limita la progettazione a pezzi più piccoli.

L'obiettivo della ricerca è cercare di allargare le prospettive dell'Additive Manufacturing considerando la costruzione di un intero componente telaistico con la giusta implementazione di altre tecnologie di assemblamento. Nello specifico, il punto di arrivo del progetto è dare prospettive per il futuro della costruzione del corpo moto senza alcun vincolo geometrico, ricavandone un

Introduzione

rilevante guadagno di peso. L'obiettivo è quello di rendere competitiva l'AM anche in un campo molto avanzato come quello telaistico, un campo in cui la struttura è già abbondantemente ottimizzata e in cui le regole tradizionali di fabbricazione sono piuttosto già affermate. La produzione in serie rende l'AM poco competitiva, ma se si riuscisse a raggiungere un grande guadagno di peso, ciò potrebbe rappresentare il giusto compromesso tra i pro e i contro, tra cui una bassa produzione di componenti di dimensioni ridotte e l'elevato costo del materiale utilizzato.

1.2 PROCESS PLANNING

1.2.1 Decisioni preliminari

In questo sotto capitolo sono elencate e motivate le varie decisioni prese in fase di ideazione del progetto.

1.2.2 Tecnica di costruzione

I processi di costruzione scelti per la costruzione del componente sono:

- Selective Laser Melting;
- Electron Beam Melting;

entrambi i processi appartengono alla famiglia della tecnologia di fusione a letto di polvere, il loro metodo di lavorazione verrà ampiamente descritto nel Capitolo 2. Grande vincolo delle tecnologie Additive, oggigiorno, è la grandezza dello spazio di lavoro: i macchinari da cui si può ottenere un risultato migliore hanno uno spazio di lavoro ben più piccolo del componente preso in studio. Per questo motivo il componente dovrà essere diviso in più parti per poi essere assemblato. La scelta di optare per due tecnologie pone delle domande sull'adattabilità di due processi di costruzione nel medesimo pezzo.

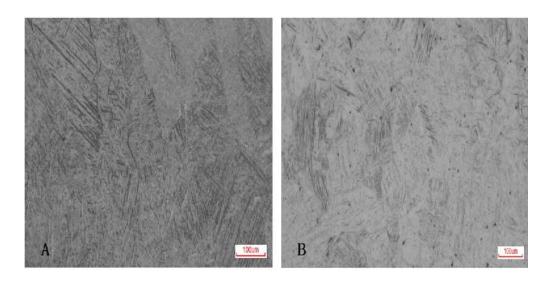


Figura 0-5 Vista al microscopio di un componente in Ti6-4 realizzato con A- EBM, B- SLM. [16]

Lo stesso materiale presenta una struttura cristallografica differente per i due processi. Inoltre, questa decisione porta alla possibilità di considerare le due tecnologie a letto di polvere l'una complementare all'altra e non delle scelte distinte. Viene posta quindi molta attenzione nella possibilità di abbinare due tecnologie, esaltandone i pregi dove è necessario.

1.2.3 Materiale

Per alcuni tipi di materiale l'Additive Manufacturing è molto più di una nicchia alternativa: è in realtà il metodo di produzione ideale. Il titanio è un esempio di quanto appena affermato: è leggero ed ha caratteristiche

Introduzione

meccaniche migliori dell'acciaio. I suoi numerosi vantaggi fanno di lui un materiale apprezzato per la realizzazione di particolari nell'ambito dell'aeronautica, del medicale e del diporto. Ciò premesso, va considerato che la lavorazione di questo materiale non è agevole e richiede tempi piuttosto lunghi a cui si aggiunge una costosa utensileria. Esso ha la tendenza a indurirsi durante il taglio, provocando una forte usura degli utensili e quando viene saldato è suscettibile a contaminazione che indebolisce le saldature, se le dovute precauzioni non sono rispettate. In campo telaistico il Titanio è poco utilizzato per l'alto costo di produzione e processo: realizzare una struttura complessa come un intero telaio motociclistico risulta essere molto difficile da realizzare con tecniche di fabbricazione tradizionali.

Stampare direttamente il titanio è attraente perché elimina i problemi di lavorazione. Per questo motivo il materiale scelto per il progetto è il titanio Ti-6Al-4V, di cui le polveri sono largamente utilizzate in campo AM, con un prezzo molto elevato. Questo materiale è inoltre facilmente lavorabile con entrambe le tecnologie di costruzione scelte. Con una giusta ottimizzazione del telaio si potrebbe trovare il giusto compromesso per compensare l'alto costo delle polveri.

1.2.4 Suddivisione del telaio e assemblaggio dei pezzi

Il criterio di suddivisione dei pezzi si basa sullo sfruttamento dei diversi vantaggi derivanti dalle due tecnologie di costruzione. Il metodo scelto per l'assemblamento dei vari componenti è la saldatura, l'unica tecnologia di fissaggio possibile in questa applicazione, ampiamente utilizzata in campo telaistico.

1.2.5 Gli step di lavorazione

L'elenco sottostante segue l'ordine seguito per le varie fasi del progetto.

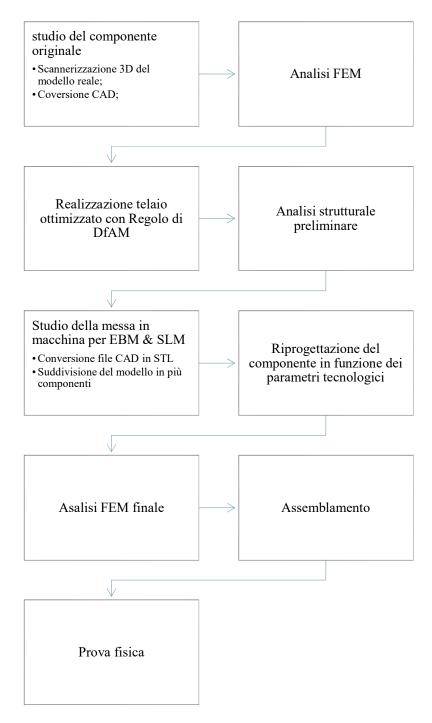


Tabella 0-1 Fasi del Progetto di Tesi

Introduzione

1.3 METODOLOGIE APPLICATE

Per la soluzione di questo lavoro è stato applicato il metodo degli Elementi Finiti al fine di studiare la rigidità dei due telai, per poter realizzare un confronto con i due modelli. Attraverso lo studio di Reverse Engineering è stata creata una nuvola di punti con il software ATOS Professional – 3D Scanning, per avere un riferimento con la costruzione CAD, realizzato in ambiente Solidworks ® e in seguito la geometria è stata importata in un software FEM (HyperMesh-Optistruct).

Il modello è stato riprogettato con il software SolidThinking Evolve® e una prima Analisi strutturale è stata realizzata con l'applicazione di SolidThinking Inspire®. Per la messa in macchina è stato utilizzato il software Materialise Magics®.

1.4 RIASSUNTO DEI CAPITOLI

Questo lavoro di tesi è suddiviso in 8 capitoli, di cui un breve riassunto è steso nei punti che seguono.

Capitolo Uno - Una breve introduzione del lavoro di tesi con una descrizione degli obiettivi e delle decisioni prese.

Capitolo Due - Contiene una descrizione del processo utilizzato:

Additive Manufacturing. In particolare, verranno descritte le tecnologie

EBM e SLM, evidenziandone le differenze. Seguirà una descrizione del

materiale utilizzato per questo progetto e una breve descrizione del

Design for Additive Manufacturing.

Capitolo Tre - Prima di affrontare la riprogettazione del modello è bene affrontare uno studio sul modello originale e uno studio di statica del motoveicolo. Questo capitolo descrive alcuni tipi di telai e si concentra sulle parti del telaio preso in esame. In seguito, verrà descritto il lavoro

- di Reverse Engineering e l'analisi strutturale realizzata sul telaio originale.
- Capitolo Quattro Verrà descritta tutta la fase di riprogettazione del telaio attraverso l'uso dell'applicazione PolyNURBS in ambiente Evolve.
- **Capitolo Cinque -** Simulazioni di vari casi di carichi statici applicati al telaio, per esemplificare l'utilizzo in off-road. I risultati, ottenuti tramite SolidThinking Inspire, sono mostrati e interpretati.
- **Capitolo Sei -** Inizia la riprogettazione seguendo i parametri tecnologici di costruzione. Nella prima parte viene descritta tutta la fase di messa in macchina. Il capitolo termina con l'analisi FEM delle rigidezze.
- **Capitolo Sette -** Confronto del modello riprogettato con quello originale su vari aspetti.
- Capitolo Otto Considerazioni finali del lavoro di tesi. È stata fatta una riflessione sul raggiungimento degli obiettivi, nonché degli ostacoli e dei problemi riscontrati durante il progetto e ne vengono proposte considerazioni sugli sviluppi futuri.

Capitolo 2

ADDITIVE MANUFACTURING

2.1 Breve cenno sull'AM

Additive manufacturing è il termine per indicare una classe di tecnologie che, attraverso l'utilizzo di sistemi CAD, sfruttano una produzione "layer by layer" per la costruzione di modelli che vengono utilizzati direttamente come prodotti finali. Rapid Prototyping (RP) è un'altra nomenclatura che descriveva questa tecnologia prima della nomenclatura Additive manufacturing.

Migliorando sempre di più la qualità del componente in uscita dalla macchina il termine Prototyping inizia ad essere errato poiché, oggi, molti pezzi finali sono direttamente realizzati nello stesso macchinario.

In generale, un tipico processo AM viene eseguito mediante le seguenti procedure [2]:

• Creazione del modello CAD della parte da produrre

La parte da costruire viene modellata utilizzando un software CAD (computer-aided design). Normalmente, un sistema di modellazione solido è in grado di rappresentare oggetti tridimensionali in modo più accurato di un modello wireframe, ottenendo risultati di progettazione

Additive Manufacturing

migliori. Il progettista può utilizzare un preesistente File CAD o crearne uno soggettivamente per scopi di prototipazione.

Conversione del file CAD in STL

I vari software CAD utilizzano un numero di algoritmi diversi per rappresentare oggetti solidi. Per avere un formato unificato, in grado di essere coerente tra il CAD e la messa in macchina, viene adottato come standard per l'industria AM il formato STL. Il secondo passo, quindi, è convertire il file CAD in formato STL. Il formato STL è una rappresentazione triangolare di una superficie tridimensionale. La superficie è tessellata in una serie di triangoli orientati. Ogni sfaccettatura è descritta da un vettore normale orientato verso l'esterno e da tre punti elencati in senso antiorario che rappresentano i vertici del triangolo. Poiché il formato STL usa elementi planari, non possono essere rappresentate le curve in modo esatto. Per ovviare al problema è possibile aumentare il numero dei triangoli migliorando così l'approssimazione a scapito però della grandezza del file.

Taglio del componente in sottili layer trasversali.

Nella terza fase, un programma di elaborazione prepara i file STL da costruire. Con questi programmi è possibile regolare le dimensioni, la posizione e l'orientamento del modello in macchina, parametro questo molto importante. Le proprietà dei prototipi variano tra le coordinate. Ad esempio: i prototipi elaborati da AM sono solitamente più deboli lungo la direzione Z, la direzione di costruzione, rispetto al piano X-Y. L'orientamento determina parzialmente la quantità di tempo richiesta per la costruzione del modello. Posizionare la parte più corta lungo l'asse Z riduce il numero di strati e quindi il tempo di costruzione. Il software di

preelaborazione divide il modello STL in un numero di strati con lo spessore da diversi micrometri a diverse centinaia, a seconda della tecnica di costruzione. Il programma permette di realizzare una struttura ausiliaria in grado di supportare il modello durante la costruzione. I supporti sono utili per funzioni delicate come sporgenze, cavità interne e sezioni con pareti sottili. Devono essere ridotti al minimo per evitare di peggiorare la qualità superficiale del pezzo e, nel contempo, devono essere in grado di ridurre le possibili distorsioni termiche del pezzo durante il processo di costruzione.

• Costruzione del pezzo.

Il quarto passo è la costruzione effettiva della parte. la macchina AM costruisce un layer alla volta, tipicamente in polimero, metallo, ceramica o materiali compositi. L'oggetto tridimensionale viene quindi creato con un consolidamento strato per strato del materiale deposto. Ogni strato consolidato rappresenta una sezione trasversale del modello CAD.

Post processing

Lo step finale è il post processing, che tipicamente consiste nella rimozione del pezzo realizzato dal macchinario, staccando i supporti. Il prototipo richiede anche dei trattamenti secondari quali pulizia, trattamenti superficiali o trattamenti termici. Questi ultimi vengono utilizzati per parti metalliche al fine di ottenere un livello di densificazione desiderato, di ridurre lo stress termico durante la lavorazione e talvolta di migliorare le proprietà meccaniche.

Additive Manufacturing

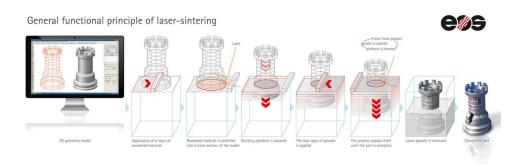


Figura 2-1 Principio generale del laser-sintering. © EOS

Si possono riassumere i vantaggi significativi della tecnologia AM con:

• Velocità di produzione

La tecnologia consente di produrre prototipi e parti con configurazioni complesse senza la necessità di stampi e matrici. La complessità del pezzo non è proporzionale al tempo di costruzione, al contrario delle tecnologie tradizionali.

• Libertà di design

Il design e l'innovazione sono posti in primo piano. L'AM abilita gli ingegneri a provare svariate iterazioni simultaneamente con un minimo costo aggiuntivo. Avere una grande libertà creativa in fase di progettazione, senza penalità in termini di costi e tempo, dà un enorme vantaggio rispetto alle tecnologie tradizionali.

• Riduzione di costi

I file di progettazione possono essere elaborati digitalmente in un'unica posizione centrale, il file 3D può essere inviato da un'unica posizione centrale in tutto il mondo, con la creazione quindi di fabbriche digitali. L'eliminazione del tempo e dei costi associati alla spedizione dei

componenti è uno dei migliori vantaggi. Le parti possono essere create vicino i centri di produzione quando è necessario.

• Processo Green

Processi AM basati su laser per componenti metallici utilizzano il laser come risorsa energetica, con notevole risparmio di energia. Inoltre, il processo non realizza materiale di scarto, poiché il materiale utilizzato è unicamente quello necessario. Il processo di estrazione degli acciai o di rifusione richiesto nella produzione tradizionale richiedono una grande quantità di energia a scapito dell'ambiente. È facile concludere come la tecnologia green dell'AM abbia una forte relazione con lo sviluppo sostenibile.

• Motivazioni economiche

Diverse sono le ragioni economiche che rendono vantaggiose le tecnologie additive rispetto ad altre tecnologie. la domanda nel mercato globale è in continua variazione: oggigiorno nasce l'esigenza di una personalizzazione del pezzo da acquistare. Questo porta ad avere una continua crescita del numero di varianti e della complessità di un progetto con tempi di consegna sempre più stringenti. Le aziende, per continuare ad essere competitive, si trovano a dover ridurre il tempo di prototipazione che è il tempo più grande nel totale della realizzazione del progetto. Con l'additive manufacturing la parte di prototipazione viene nettamente ridotta.

Additive Manufacturing

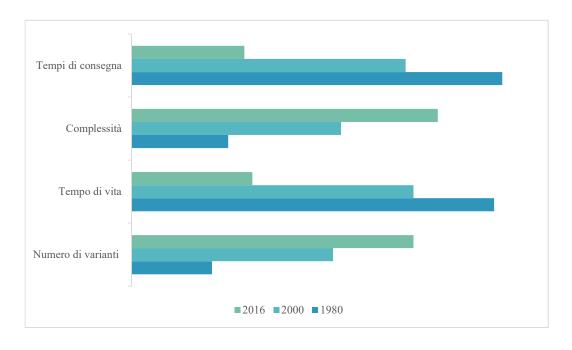


Tabella 2-1 Motivazioni economiche

2.1.1 Applicazioni

Le applicazioni della tecnologia AM coprono molti campi, come aerospace, militare, automotive, medico, ecc. L'applicazione primaria della produzione di parti in AM è quella di fabbricare componenti per motori di aeroveicoli o autoveicoli con geometrie complesse con materiali difficili da lavorare [3]. Una delle soluzioni più vantaggiose è stata proprio l'utilizzo della lega Ti-Al all'interno della struttura di un propulsore. Si riescono a produrre superfici abbastanza vicine al prodotto finale, che non necessitano lavorazioni secondarie per migliorare la rugosità superficiale. L'industria degli utensili applica l'AM per produrre componenti di utensili con funzionalità particolari, in piccoli lotti o a pezzi unici. La produzione stampi e utensili per l'iniezione plastica e utensili per pressofusione si sono dimostrate come due delle applicazioni più promettenti [4]. AM è utilizzato anche nel settore medico, per la produzione di strumenti chirurgici speciali e protesi. L'obiettivo principale

è un peso ridotto di questi componenti pur garantendo buone caratteristiche meccaniche. [5]

2.2 TECNOLOGIE ADDITIVE

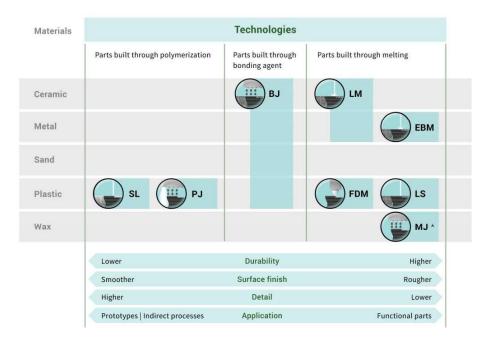


Figura 2-3 Tecnologie Additive

Nella tabella le righe rappresentano i materiali utilizzabili e le colonne indicano le modalità di generazione del sistema additivo. Le colonne sono suddivise in funzione di alcuni parametri:

- durabilità;
- finitura superficiale;
- grado di dettaglio;
- tipologia di applicazione.

I ceramici sono suddivisi in tecnologia da polimero e tecnologia fusorie, rugosità molto elevata, grado di dettaglio non particolarmente elevato.

I metalli possono essere prodotti o per spruzzo di polveri o per letto di polvere; nei metalli il laser viene distinto dall'EBM proprio in funzione di durabilità e rugosità, di grado di dettaglio e dal tipo di applicazione.

Additive Manufacturing

Le materie plastiche si dividono in tecnologie strato per strato (fusorie o utilizzando dei sistemi che somigliano a delle stampanti a getto di inchiostro ma utilizzano degli inchiostri più densi e stampano nvolte sullo stesso punto) o tecnologie fusorie (in cui la materia prima è differente e si hanno FDM e LS). Il Laser Sintering prevede l'utilizzo di polveri polimeriche che vanno fuse localmente tramite una sorgente laser.

Questo capitolo prosegue con la descrizione della tecnologia utilizzata per questo progetto di tesi: la fusione a letto di polvere per metalli.

2.2.1 Powder Bed Fusion

Esistono diverse varianti di tecnologia di fusione per letto di polvere, ma tutte condividono lo stesso principio di funzionamento.

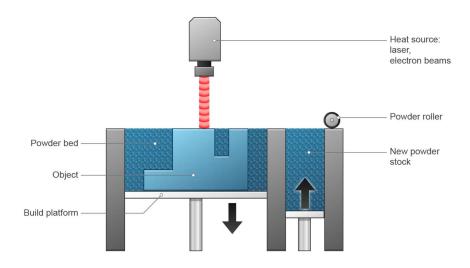


Figura 2-4 Processo di fusione a letto di polvere. 2018 © Dassault Systèmes

La Polvere metallica che serve per la costruzione del pezzo viene sparsa sopra una piattaforma guidata da un pistone di costruzione lungo l'asse Z, grazie ad una racla o un raster. Lo spazio tra la superficie layer realizzato e il bordo inferiore della racla definisce lo spessore e l'altezza del layer da realizzare.

L'altezza dello strato di polvere metallica può variare tra poche decine di micron a poco meno di $100 \ \mu m$. Lo spessore del layer è un importante parametro nella fusione a letto di polvere, viene accuratamente calibrato insieme agli altri parametri fondamentali per questo tipo di tecnologia:

- Diametro del fascio di energia (laser o di elettroni);
- Corrente del fascio;
- Granulometria delle polveri;
- Velocità di scansione;

Una volta che viene disposto il layer di polvere, un fascio di energia (laser o a fascio di elettroni) lo investe focalizzandosi solo sulla sezione da fondere per la creazione del modello. Avviene un'immediata fusione dello strato e una rapida solidificazione che permette al materiale di acquisire caratteristiche meccaniche migliori di quelle ottenute con processi tradizionali. L'energia fornita viene regolata in mondo da rifondere una porzione di struttura precedentemente solidificata, in modo da garantire una perfetta aderenza tra gli strati. Terminata la lavorazione di un layer, la piattaforma di lavorazione viene abbassata di una quota pari allo spessore del layer (layer thickness), il pistone di rifornimento delle polveri viene alzato ed un nuovo strato di polveri viene disteso sopra a quello appena lavorato. Il processo si ripete fino alla conclusione del processo produttivo. Una corretta distribuzione delle polveri è di fondamentale importanza per la buona riuscita del processo produttivo e per questo motivo è necessario un costante controllo dello stato di usura del coat-blade e del livello di disponibilità delle polveri nei pistoni di rifornimento.

Esistono due possibili varianti di tecnologie a fusione per letto di polvere: tecnologia laser e Electron Beam Engine.

2.2.1.1 Applicazione della fusione a letto di polvere in campo automotive

Considerando il costo, la qualità e il tempo di consegna, l'applicazione delle tecnologie Power Bed Fusion per autoveicoli diventa una vera sfida. Per il costo elevato delle parti in AM, possono essere utilizzati solo su veicolo con basso volume di produzione. Le aziende di auto sportive con una limitata produzione di vetture (in media 5000 unità l'anno [6]) adottano componenti realizzati con processi additivi, descritti in figura 2-6.

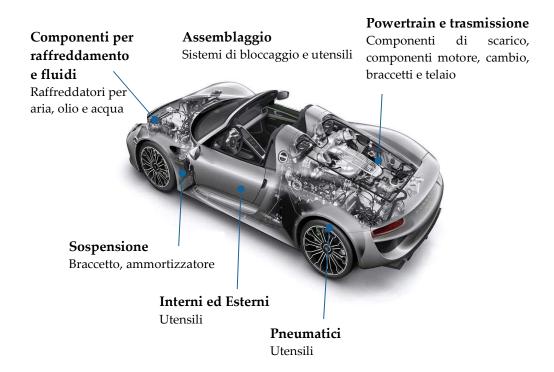


Figura 2-6 componenti realizzati in AM in una vettura sportiva

2.2.1.2 Ciclo di produzione

Preparazione dati

Include l'orientamento del pezzo in macchina e la generazione dei supporti.

Costruzione

Nelle applicazioni di serie la produzione viene eseguita sotto stretto controllo e seguendo specifici parametri di processo. La preparazione manuale della macchina e i processi di pulizia ostacolano l'adozione di queste tecnologie in sistemi di allestimento automatizzati

Rimozione polveri Rimozione delle polveri dall'area di lavoro e dalle cavità del componente per il riciclo delle polveri non utilizzate (almeno un 40% delle polveri non utilizzata viene riciclata)

Trattamento termico

Elimina gli stress residui creati durante la costruzione. Si effettua prima della rimozione del pezzo dalla piattaforma di lavoro. Altri trattamenti possono essere effettuati per raggiungere delle proprietà meccaniche desiderate.

Rimozione supporti Avviene mediante elettroerosione, in seguito inizia il processo di rimozione dei support prevalentemente manuale. Sono in fase di sviluppo nuovi sistemi in grado di automatizzare questa fase

Pallinatura

La qualità superficiale delle parti as-built è molto bassa, a causa di particelle di polveri non totalmente fuse e piccoli cordoni di saldatura sulla superficie. Per geometrie complesse, la pallinatura offre un metodo a basso costo per rimuovere le sbavature e migliorare la qualità della superficie.

2.3 L-PBF

Questa tecnologia a letto di polvere utilizza come fascio di energia la radiazione laser e si suddivide principalmente in SLM e SLS che, fondamentalmente, indicano la stessa tecnica. La differenziazione è dovuta a ragioni storiche, quando la miscela metallica non raggiungeva la completa fusione sotto l'effetto di radiazione laser. Allo stato attuale si ha la completa fusione delle polveri investite dal fascio, ottenendo una densità prossima al 100%.

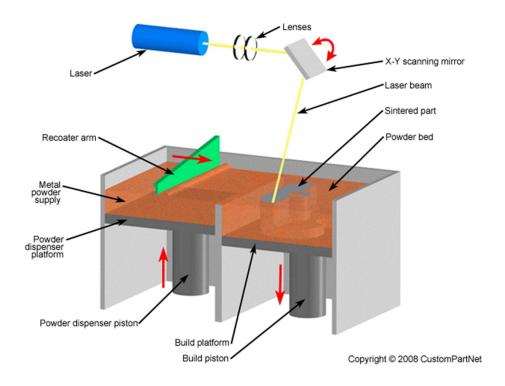


Figura 2-8 Processo Direct Laser Sintering (DMLS). 2008 © CustomPartNet

È una macchina che lavora con una potenza locale pari a 200-400 W, con una camera tendenzialmente fredda, arrivando ad un massimo di 200 °C [7]. La sorgente laser investe una serie di lenti che garantiscono la perpendicolarità del fascio sulla superficie di lavoro e, contemporaneamente, un controllo per

assicurare prodotti con una rugosità al di sotto del decimo di millimetro. L'energia fornita permette di rifondere una porzione di struttura in precedenza solidificata, garantendo la perfetta adesione tra gli strati.

Nel SLM potenza laser, velocità di scansione, distanza di tratteggio e spessore dello strato sono i parametri che si regolano per ottimizzare il processo. Questi influenzano la densità volumetrica dell'energia disponibile per riscaldare e fondere le polveri, le proprietà meccaniche e la rugosità superficiale delle parti prodotte. Il forte ritiro durante il raffreddamento induce nello strato solidificato delle forti tensioni che superano la massima deformazione del materiale; questi gradienti termici possono portare al sollevamento dello strato il quale può andare ad interferire con il rullo. Per tale motivo sono di fondamentale importanza i supporti che, oltre ad ancorare il pezzo in costruzione all'area di lavoro, aiutano nel raffreddamento e limitano le distorsioni. È necessario anche effettuare un trattamento termico per l'eliminazione delle tensioni residue indotte dal processo di costruzione. La macchina lavora in atmosfera controllata alla pressione di 1 atm, usando un gas inerte durante il processo (argon o elio), per prevenire ossidazione o altri problemi che potrebbero impattare sulle proprietà meccaniche della parte finale [8].

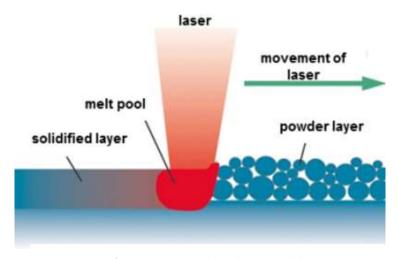


Figura 2-10 Processo di realizzazione del layer

Ciò significa che, tendenzialmente, la macchina dovrebbe essere ben isolata al fine di lavorare leghe di Al, di Ti e che, avendo un sistema ad 1 atm, non ci sia un'evaporazione molto significativa delle fasi presenti (nonostante la superficie della polvere sia > di 2000 °C).

La strategia di scansione laser per ogni layer influenza il gradiente termico del componente incidendo sulle proprietà meccaniche. I principali schemi di scansione possono essere matrici di strisce parallele, spirali, contorno da bordo esterno fino all'interno o tracce a zig zag [9]. Per garantire la massima densità è necessario avere un certo grado di sovrapposizione tra zone di fusione adiacenti, motivo per cui è importante la scelta della giusta strategia di scansione [10].

Il componente finale ha delle caratteristiche simili a un processo di microfusione, anche se non è possibile ottenere tolleranze e rugosità paragonabili a quelle ottenute mediante processi di asportazione di materiale. Per tale motivo, in fase di progettazione, è prevista l'aggiunta di sovrametalli per poter effettuare delle lavorazioni secondarie di asportazione di materiale laddove è richiesta una maggiore tolleranza.

Un problema principale risulta il fenomeno del *balling*, che consiste nella formazione di piccole sfere dal diametro approssimativamente uguale alla dimensione del fascio. Il balling è causato principalmente da una combinazione di bassa potenza del laser, di alta velocità di scansione e di grande spessore del layer, che porta ad avere una energia insufficiente per la completa fusione del pezzo. [11]

2.3.1 Vantaggi del L-PBF

Un grande vantaggio del processo con tecnologia laser è rappresentato dall'ampia scelta di software CAD che può essere utilizzata per la generazione dei file STL, consentendone la modifica, preparandoli per la stampa 3D.

I file STL possono essere orientati e duplicati in modo da poter sfruttare al meglio la spazio di lavoro della macchina. Il progetto deve prevedere la realizzazione di strutture di supporto, poiché al contrario il materiale potrebbe deformarsi o subire delle distorsioni. Le strutture di supporto possono anche fungere da dissipatori di calore, impedendo in modo efficace il disorientamento di piccoli strati dovuti alla distorsione per dilatazione termica. Attraverso i software di preparazione della macchina per la stampa 3D, è possibile creare i layer, i percorsi di scansione e tutti i parametri di macchina per la costruzione del modello. La figura 2-11 mostra un modello computerizzato di una tipica struttura di supporto rappresentata in blu.

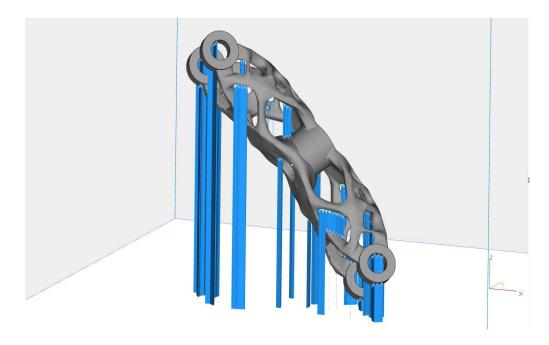


Figura 2-11 Esempio di messa in macchina di un componente

I parametri macchina consigliati per un determinato materiale sono spesso disponibili presso i costruttori della macchina stessa. Per alcune macchine possono essere selezionati dei parametri scelti dal progettista, ma sono richieste conoscenze dettagliate per la selezione della velocità di scansione, lo

spessore del layer e l'offsett del percorso per assicurare una deposizione uniforme.

La sorgente di scansione laser si basa su specchi a guida magnetica che utilizzano dei galvanometri. Questo metodo è usato per consentire un rapido movimento del raggio che impatta sul letto di polvere, evitando il movimento dell'intero sistema laser, come accade per atre tecnologie AM. Questo movimento è soggetto a ritardi durante le forti accelerazioni e richiede un sistema meccanico rigido e accurato per garantire la precisione. Pertanto, l'utilizzo di specchi per la scansione risulta un ottimo vantaggio.

I recenti miglioramenti del processo, che garantiscono una maggiore purezza per i materiali reattivi, includono una maggiore velocità di lavorazione, un processo di pre-riscaldamento della camera e l'immissione di gas inerte, che viene utilizzato per accelerare il raffreddamento dopo il completamento del ciclo di produzione. Molti di questi processi sono completamente automatici, consentendo una visualizzazione remota e il monitoraggio dei parametri in tempo reale.

È possibile realizzare strutture con gusci complessi o strutture in lattice per poter ridurre al minimo l'apporto di metallo, ottimizzando così la resistenza e le funzionalità del componente. Possono quindi essere progettati particolari sistemi di raffreddamento del componente e sistemi per il passaggio di fluidi o gas, a condizione però che la polvere intrappolata durante il ciclo di produzione e i supporti possano essere rimossi durante l'operazione di finitura.

Le operazioni di post processo risultano essenziali per migliorare le proprietà meccaniche del componente e la finitura superficiale. La rimozione e la pulizia della polvere possono essere seguite da operazioni di rifinitura superficiale come pallinatura o lucidatura. I trattamenti termici possono essere utilizzati

per ridurre le sollecitazioni termiche, omogeneizzare le microstrutture o modificare le proprietà meccaniche. Nell'SLM è indispensabile realizzare un trattamento termico di "stress relieving" per evitare distorsioni causate dalle brusche variazioni di temperatura durante la costruzione. Potrebbe essere necessaria la lavorazione CNC per la rimozione della struttura di sovrametalli.

Nella figura sottostante si riassumono i vantaggi della tecnologia laser [12].



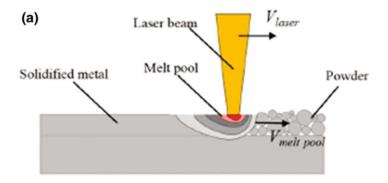
Tabella 2-2 vantaggi SLM

2.3.2 Svantaggi L-PBF

Con la tecnologia SLM si possono ottenere componenti con una densità prossima al 100%. I parametri principali da controllare sono:

- Dimensione del melt pool;
- Spessore dello strato di polvere;
- Potenza del laser;
- Velocità di raffreddamento del melt pool;

• Off-set della linea di scansione, o "hatch spacing";



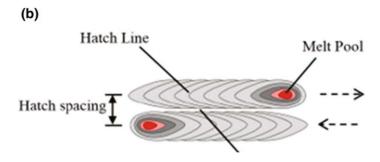


Figura 2-12 Caratteristiche di Processo

Questi parametri sono fondamentali per ottenere la completa fusione, la deposizione negli strati adiacenti e la penetrazione completa nei layer precedentemente solidificati.

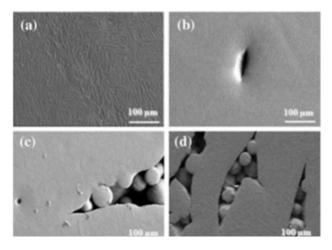


Figura 2-13 esempio di difetti di processo

La figura 2-13 mostra alcune zone non fuse del componente, difetto derivato da un disturbo del processo o da una selezione inadeguata dei parametri.

Per raggiungere l'obiettivo del 100% di densità per determinati materiali sono stati necessari anni di sviluppo del processo in polvere e PBF-L. Per acquisire un livello accettabile di fiducia per una gamma completa di materiali per l'AM è necessaria una maggiore esperienza e la realizzazione di database dei parametri.

Un grande svantaggio è che i macchinari per SLM disponibili in commercio sono limitati alla costruzione di componenti di dimensioni massime di 400-500 mm. Un volume di costruzione più grande richiederebbe chiaramente più polvere di metallo per il riempimento dell'area di lavoro, ma genererebbe anche più materiale inutilizzato destinato al riutilizzo e al riciclaggio. Costruire un piccolo componente all'interno di un'area di lavoro più grande causa una perdita di efficienza perché il tempo di scannerizzazione del fascio laser è in funzione della superficie del componente, mentre il tempo di copertura del layer in funzione della superficie di lavoro. La precisione del processo di copertura richiede una precisa impostazione ed è soggetta a disturbi del processo che possono comportare un accumulo irregolare o un arresto del recoater, finendo con l'arresto del processo di cui il riavvio è molto difficile.

Il peso e il costo della polvere per riempire il volume di costruzione possono essere fattori limitanti. La raccolta automatica delle polveri è disponibile su alcuni sistemi, la percentuale di polvere riciclata che si registra è intorno al 35%. Il livello crescente di automazione può migliorare l'aspetto della raccolta e del riciclaggio delle polveri, dando al loro costo elevato un impatto meno incisivo.

La dimensione del componente è quindi limitata dalle dimensioni dell'area di lavoro.

La rugosità superficiale può variare in funzione della morfologia della polvere, delle condizioni di costruzione e dell'orientamento delle parti all'interno del volume. I problemi di rugosità possono essere controllati in certi limiti con procedure ben sviluppate di controllo dell'orientamento del componente e del riutilizzo delle polveri, ma queste incognite tutt'ora fanno parte dell'aspetto della macchina di questa generazione.

Un altro svantaggio è l'anisotropia del componente realizzato, o variazione della struttura del grano a seconda delle coordinate. Questo fenomeno è in funzione del materiale, delle condizioni di costruzione e dell'orientamento delle parti [12].

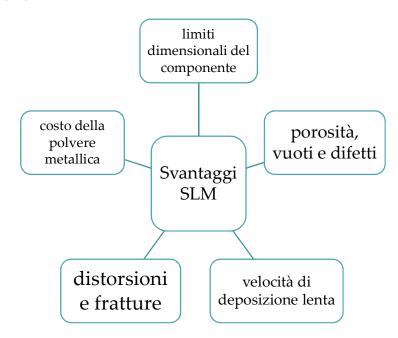


Tabella 2-3 Svantaggi SLM

2.4 E-PBF

Il processo di fusione attraverso un fascio di elettroni (Electron Beam Melting) costruisce parti complesse in polveri di metallo in un ambiente ad alta temperatura e a vuoto.

Il processo comprende la messa a fuoco di un fascio di elettroni direttamente sull'area interessata per la fusione, seguito da ri-solidificazione per la fabbricazione del componente.

Lo schema del processore dell'EBM è mostrato in figura 2-14. Arcam è l'unica azienda che realizza le macchine EBM [13].

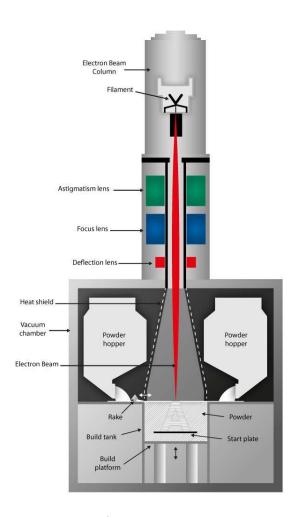


Figura 2-14 Processo EBM. Arcam

Il sistema EBM è costituito da un cannone a fascio di elettroni, una camera a vuoto ($1x10-4\ torr$), serbatoio di accumulo e meccanismi di distribuzione della polvere (polvere tramogge e rastrelli). La camera a vuoto permette l'eliminazione delle impurità e migliora le proprietà del materiale. Il buon ambiente termico porta ad una stabilità della forma e ad una tensione residua inferiore nel pezzo.

All'interno del cannone viene riscaldato un filamento di tungsteno che emette elettroni accelerati ad alta tensione (60~kV), il risultato è un fascio di elettroni che trasposta un'elevata energia (circa 4~kW) controllato da due lenti [7]. La prima focalizza il fascio al diametro desiderato (all'incirca 0.1~mm), la seconda lo devia fino al punto desiderato sulla tavola di costruzione. Quando gli elettroni colpiscono la polvere, l'energia cinetica viene trasformata in calore, permettendo la fusione del materiale. Questo sistema è in grado di raggiungere velocità di scansione del fascio di elettroni fino a 8000~m/s, precisione di posizionamento del fascio di elettroni di $\pm~0.025~mm$ e spessori del layer tra 0.05-0.2~mm [2].

Prima della costruzione la camera di lavoro viene preriscaldata ad una temperatura compresa tra 800-900°C, questo pre-riscaldamento avviene con una serie di passaggi del fascio non focalizzato a bassa potenza ed una velocità fino a 15000 mm/s.

Viene applicato un nuovo strato di polvere e il processo viene ripetuto fino alla completa creazione del componente. Il completamento del processo è seguito da un raffreddamento a Elio della durata di circa 6 ore, a seconda delle dimensioni della costruzione e del materiale utilizzato. La parte estratta dalla camera di lavoro è coperta da un guscio di polvere, detta polvere di fuga. Le polveri residue vengono eliminate attraverso un processo di sabbiatura con la stessa polvere usata nel processo di costruzione.

In figura vengono elencati i vantaggi e gli svantaggi della tecnologia EBM [12].

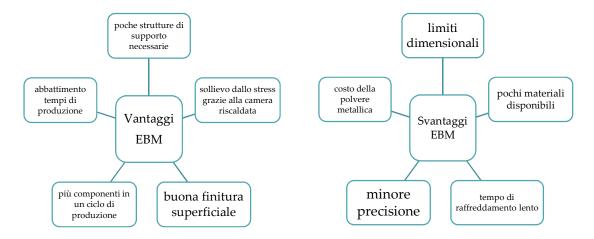


Figura 2-16 Vantaggi e Svantaggi EBM

2.4.1 Requisiti per le polveri

La polvere metallica, per poter essere utilizzata, deve avere delle caratteristiche specifiche:

- Composizione chimica;
- *flowability*: capacità della polvere di scorrere su sé stessa;

Per determinare la fluidità delle polveri vengono seguiti degli standard internazionali B212-09 ASTM. La polvere è lasciata fluire attraverso un flussometro costituito da un orifizio calibrati e una tazza cilindrica con una capacità di 25 cm3 e una distanza di 25 mm tra il fondo dell'imbuto e la parte superiore della tazza [6]. L'alta scorrevolezza migliora l'alimentazione della tramoggia e rende più stabile il rastrellamento in macchina

 Alta densità apparente: maggiore del 50% della densità del materiale solido: maggiore sarà la densità apparente migliore sarà la conduzione del calore e quindi un minore rischio di gonfiore o surriscaldamento del campione. Un valore più alto migliora la qualità dei supporti.

• Forma delle particelle:

Le polveri morfologicamente simili hanno capacità di flusso simili

Forma e distribuzione dimensionale;

L'esame delle polveri può essere eseguito mediante l'uso di uno stereomicroscopio per identificare la forma delle particelle, eventuali particelle estranee o contaminazioni.

• Presenza di difetti o di porosità interne:

La porosità interna è rappresentata da vuoti sferici situati all'interno di una singola particella di polvere e può essere analizzata guardando la sezione trasversale del campione. Per individuare le particelle cave, viene effettuata una analisi che consiste nell' inglobare la polvere in una resina polimerica e, una volta indurita la resina, si procede sezionandola così da poter vedere l'interno della particella.

2.5 DIFFERENZE TRA EBM E SLM

Le differenze tra il processo EBM e il processo SLM derivano dalla fonte utilizzata per l'apporto di energia termica: il primo utilizza un fascio di elettroni che si muove quasi alla velocità della luce, mentre il secondo un insieme di fotoni coerenti. Grazie alla maggiore densità di energia rispetto alla tecnologia SLM, l'EBM consente di elaborare livelli di polvere più elevati, grazie allo spessore più elevato per ogni layer e una dimensione delle particelle di polvere che rimane nell'intervallo di 45-150 μ m, dimensione di particelle più grande di quella utilizzata per SLM [14].

Un componente realizzato per EBM generalmente risulta con una maggiore rugosità superficiale (30-50 micron [15]) rispetto ad un componente realizzato per SLM.

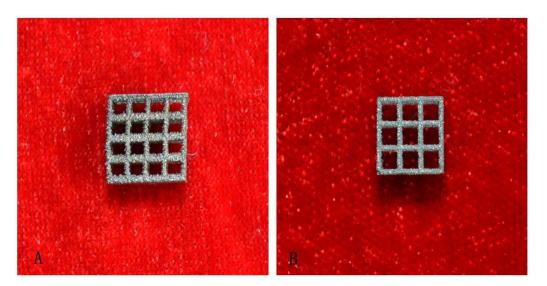


Figura 2-17 Campioni Ti6AL4V fabbricati da EBM e SLM. A: Campione EBM, B: campione SLM. [29]

Una delle differenze fondamentali è che EBM lavora in atmosfera sottovuoto, riducendo le contaminazioni durante il processo; se così non fosse infatti,

passando attraverso un gas, gli elettroni interagirebbero e verrebbero deflessi. Con la sorgente laser non avviene deflessione se il gas ha una lunghezza d'onda diversa dal fascio. Questo ridotto livello di contaminazione è molto utile quando si utilizzano materiali reattivi, come leghe di titanio.

Un'altra grande differenza sta nel fascio di elettroni che, grazie alla sua elevata velocità di scansione, consente un pre-riscaldamento generale della polvere prima della fusione, importante per la riduzione degli stress termici del componente in costruzione [16]. Questo porta ad uno "stress relieved" del componete, limitando così la formazione di crepe o la produzione di materiali fragili.

Nella tabella sono riassunti i vantaggi delle tecnologie.

EBM		SLM	
•	basso livello di difetti	•	vasta gamma di
	interni;		materiali utilizzabili;
•	buone proprietà del	•	buona finitura
	materiale, in particolare		superficiale
	la fatica;		(tipicamente 20-40
•	nessuna limitazione per		micron);
	composizioni chimiche;	•	migliore precisione.
•	minimo stress residuo;	•	Componente as-built
•	poco materiale di		paragonabile al
	scarto;		componente realizzato
			per microfusione.

Tabella 2-4 confronto tra EBM

2.6 TITANIO PER L'ADDITIVE MANUFACTURING

Il Titanio è il materiale più consolidato dell'AM per metalli. Si presta bene per applicazioni in cui complessità e performance meccaniche sono fondamentali e superano in modo molto significativo i limiti legati al costo del sistema produttivo; i campi applicativi principali sono quello aereonautico, aereospaziale e biomedicale.

Il titanio è uno dei materiali con la più alta resistenza specifica ed in ottica di ottimizzazione topologica è quello che dà il massimo dei vantaggi nella riduzione di massa complessiva. Può essere facilmente utilizzato in campo biomedicale in quanto biocompatibile: crea uno strato di ossidi che in certe condizioni facilitano la ricostruzione ossea. Viene utilizzato da tempo per viti e placche in quanto riabilita più velocemente il punto in cui vengono inseriti.

Il costo del titanio rispetto a quello delle materie prime più tradizionali quali acciaio e alluminio è di molto superiore, all'incirca un ordine di grandezza.

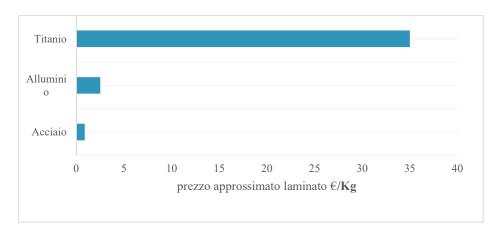


Tabella 2-5 Confronto tra i prezzi di un laminato in Titanio, Alluminio, Acciaio

Risparmiare materiale diventa un punto chiave, questo nell'ottica di sfruttare un sistema produttivo che utilizza solo il materiale necessario per creare il componente è un grande vantaggio.

Il processo produttivo del titanio è abbastanza complesso: parte da un materiale di cava quali sabbie in cui il titanio si trova sotto forma di ossido. L'ossido di titanio è un ossido molto stabile, quindi il processo per passare da ossido a metallo è più complicato di quello per l'acciaio e l'alluminio. È un processo ad alta pressione e temperatura che parte da materiale in polvere. Una volta ottenuto l'ossido di titanio puro si effettua un processo che prima passa attraverso un attacco chimico e clorurazione dell'ossido, dove da biossido di titanio si ottiene tetracloruro di titanio e successivamente, attraverso una declorurazione catalitica, si passa a una struttura in titanio più o meno pura.

Ottenuta una spugna metallica tramite processi di fusione e trattamenti di diverso genere si arriva a materie prime che servono per produzioni tradizionali, o inserendo il lingotto all'interno di un gas atomizzatore si ha la produzione di polveri per AM. Il costo del titanio è dunque molte legato al sistema di trasformazione e estrazione. Queste le ragioni per cui il titanio ha subito suscitato interesse per le tecnologie AM.

La limitazione principale che rende difficile la lavorazione è l'estrema reattività del titanio: il suo ossido è estremamente stabile e richiede grande energia per trasformarlo in metallo, questo comporta che la trasformazione inversa è estremamente facile. Il vero problema è quindi avere delle macchine che garantiscano una non ossidazione del componente.

L'ossidazione è un fenomeno che dipende dalla superficie e nasce dal contatto della materia prima con l'ambiente circostante, avere meno superficie aiuta ad essere più protetti in questa circostanza.

2.6.1 Lega di titanio *Ti6Al4V*

Le leghe di titanio più utilizzate hanno sostanzialmente due forme cristalline: la forma β e la forma α .

Si riporta di seguito il diagramma di stato titanio alluminio:

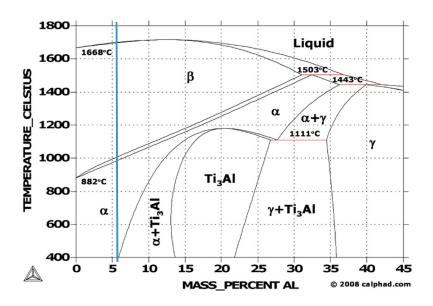


Figura 2-21 diagramma di stato Ti6-4. 2008 © calphad.com

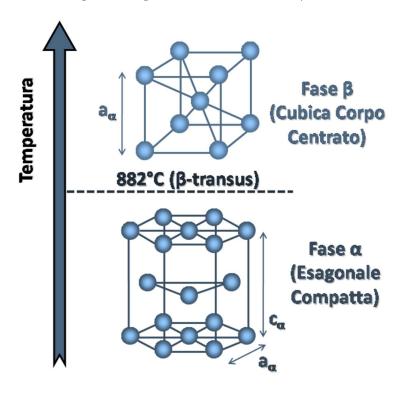


Figura 2-19 celle cristalline Ti6-4

Sono due fasi che garantiscono due strutture cristalline molto diverse, come riportato in figura 2-21

La fase α presenta una struttura esagonale mentre la fase β è cubica a corpo centrato. Nella fase α , il materiale è estremamente deformabile, infatti ad alta temperatura la fase α dà origine a movimenti molto semplici dei piani cristallini e quindi deformabilità molto elevate. Rimanendo in questa forma cristallina il Titanio è capace di avere deformazioni anche del 100% della sua dimensione [12].

La lega di titanio di maggiore utilizzo è il Ti-6-4, è dotato di buona lavorabilità ed eccellenti proprietà meccaniche. La lega Ti6Al4V offre le migliori prestazioni a tutto tondo per una varietà di applicazioni di riduzione del peso in attrezzature aerospaziali, automobilistiche e marittime. Ti6Al4V ha anche numerose applicazioni in campo medico: la biocompatibilità del Ti6Al4V è eccellente, in particolare quando è richiesto il contatto diretto con il tessuto o l'osso. Nella tabella è riportata la composizione chimica del materiale da fusione.

Composizione Chimica				
Alluminio	Al	5,5 – 6,75 %		
Vanadio	V	3,5 – 4,5 %		
Carbonio	С	< 0,1 %		
Ferro	Fe	< 0,3 %		
Osssigeno	О	< 0,2 %		
Azoto	N	< 0,05 %		
Idrogeno	Н	< 0,015 %		

Tabella 2-7 Composizione Chimica del Ti6Al4V

Come tutte le leghe, anche le leghe di titanio sono suscettibili a modifiche delle proprietà meccaniche in funzione delle trasformazioni che si possono avere all'interno del diagramma di stato.

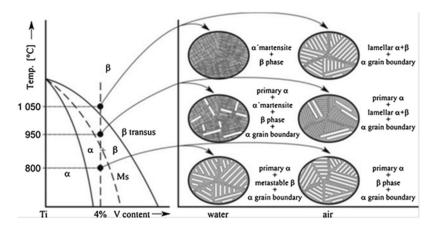


Figura 2-23 Diagramma della Struttura cristallina in funzione della temperatura di raffreddamento.

Come si osserva in figura 2-23, ma man mano che si raffredda si ha la presenza di zone bifasiche α - β fino ad arrivare a una struttura in cui viene regolata la quantità delle due fasi che regola le proprietà meccaniche da una parte e le proprietà plastiche dall'altra, in particolare la resistenza meccanica dipende da β e la deformabilità da α [17].

Le due tecnologie Additive presentano caratteristiche di costruzione diverse, diverse saranno anche le proprietà meccaniche del materiale ottenuto.

Di seguito vengono inserite le caratteristiche delle leghe di titanio che si ottengono con le due tecnologie.

	SLM	EBM
Dimensione del fascio	0.1 – 0.5 mm	0.2 – 1 mm
Spessore del layer	50 – 100 μm	100 μm
Finitura superficiale	Ra 9/12 μm	Ra 25/35 μm

Tensioni residue	Elevate	Minime	
Trattamento termico	Stress-relieving Necessario HIP	Stress-relieving Non necessario HIP	
Chimica	Trascurabile perdita di elementi	Perdita di alluminio da compensare nella composizione della polvere	

Tabella 2-8 Confronto delle caratteristiche e parametri di processo del titanio tra le due tecnologie.

Nell' SLM la struttura è prodotta con un salto termico importante, nell'EBM il processo mantiene la temperatura a 1000°C per tutto il tempo della produzione, ottenendo quindi una microstruttura differente perché molto più di equilibrio. Nell'immagine seguente si vogliono mettere in evidenza le differenti proprietà che si ottengono con microstrutture differenti. Un Elevata velocità di raffreddamento porta ad avere una microstruttura molto fine, aumentando così il limite a snervamento a scapito dell'allungamento a rottura. [18]

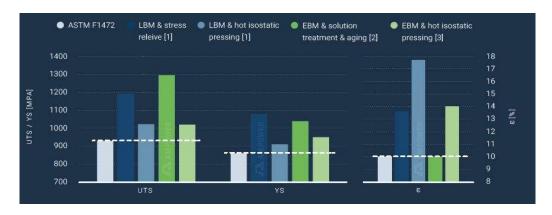


Figura 2-24 Caratteristiche meccaniche del Ti6Al4V realizzato in EBM e SLM © Ampower GmbH & Co. KG.

Per quanto riguarda la rugosità superficiale, le due tecnologie mostrano una rugosità elevata in as-built. Mentre in SLM la rugosità è il risultato di particelle di polveri aderenti e cordoni di saldatura che si sovrappongono, il componente in EBM mostra una serie di difetti superficiali aggiuntivi causati da disturbi del campo elettromagnetico che si instaura tra il fascio di elettroni ed il letto di polvere [15], [18].

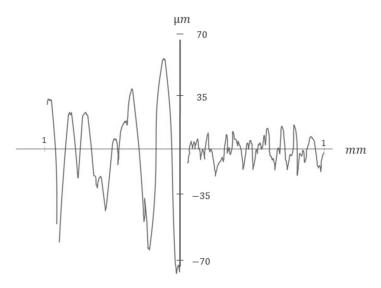


Figura 2-25 Rugosità superficiale del Ti6Al4V realizzato in EBMa sinistra, SLM a destra.

Il grado di tolleranza normalizzato di entrambe le tecnologie corrisponde al grado per lavorazioni grossolane.

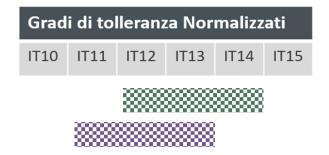


Figura 2-26 grado di tolleranza normalizzato. In verde EBM, in viola SLM

2.7 REGOLE GUIDA PER IL DESIGN

Le regole guida di design per l'Additive Manufacturing vengono utilizzate per sfruttare al meglio le potenzialità del processo. Il componente viene modificato per adattarlo al tipo di tecnologia, in modo da avere un risultato migliore in termini di rugosità superficiale e altre caratteristiche del componente. Le linee guida del design dipendono fortemente dal tipo di materiale, dalla macchina e dai parametri di processo [19].

Prima di tutto, un parametro fondamentale da considerare è la dipendenza della rugosità superficiale con l'orientamento in macchina. Maggiore è l'angolo tra l'asse verticale di costruzione e la superficie del pezzo maggiore sarà la rugosità. Il superamento di un angolo critico porta ad una errata costruzione del layer a causa di un ridotto flusso di calore del letto di polvere rispetto al metallo completamente solidificato. Generalmente il risultato è il fallimento del processo, che può essere evitato utilizzando supporti al di sopra dell'angolo critico. In genere, per il Ti64 l'angolo critico è 20°-30°. [20]

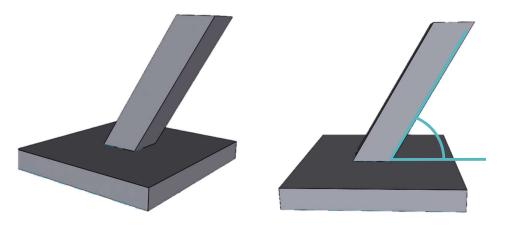


Figura 2-27 Angolo critico. Regole di DfAM.

È da ricordare sempre che la superficie verso l'alto del componente ha sempre una rugosità migliore della superficie verso il basso, quindi è possibile orientare il componente in macchina in base alle esigenze di rugosità. Nella figura in basso viene rappresentata una strategia di orientazione del pezzo in macchina per evitare l'apporto di supporti nella faccia inferiore del componente.

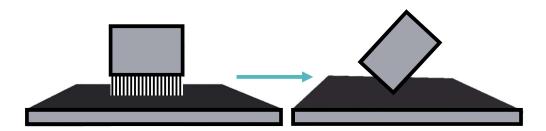


Figura 2-28 Regole di DfAM.

I fori con asse orizzontale con diametro maggiore di 8 mm richiedono l'utilizzo di un supporto. Un foro con un diametro minore di 6 mm è l'ideale, mentre in quelli con diametro più grande la parte superiore della superficie interna presenta una elevata rugosità. Se il foro è puramente estetico può essere ridisegnato in modo da avere una struttura auto reggente, ad esempio una forma a goccia. [21]

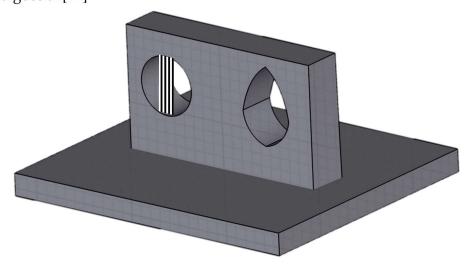


Figura 2-29 Regole di DfAM.

Parametro fondamentale da rispettare è il posizionamento del componente rispetto alla lama durante la lavorazione. La parte deve essere orientata e disposta in modo da ridurre al minimo le forze d'attrito generate durante il movimento del recoater, evitando che questo possa danneggiarsi a causa di una collisione con parti già fuse del componente.

Geometrie longitudinali orientate normalmente alle direzioni di ricoprimento sono degli ostacoli per il giusto movimento della lama (fig. 2-30). La lama potrebbe strappare layer inferiori del componente, potrebbe verificarsi un effetto abrasivo (visibile come una parte lucida dopo il passaggio della lama), oppure si verifica il fermo di lavorazione. Una geometria longitudinale posta in maniera progressiva rispetto la direzione di movimento riduce in maniera rilevante la possibilità che si possano verificare un sollevamento delle polveri o contatti coater-componente [22].

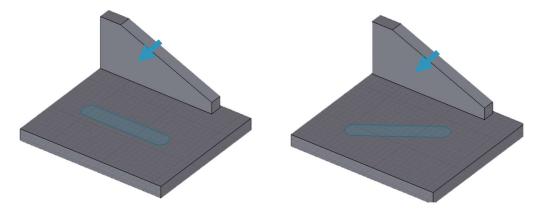


Figura 2-30 Regole di DfAM.

È meglio evitare parti di grandi dimensioni durante un singolo step di lavorazione [19]. La deformazione di componenti di grandi dimensioni può essere prevenuta utilizzando supporti appropriati per lo smaltimento di calore. In questo modo, l'esposizione dell'ampia superficie può essere divisa tra diversi layer in una lavorazione.

Un altro fattore da considerare è lo spessore delle pareti, il minimo dipende dai parametri di processo che influenzano le dimensioni del pool di fusione [23].

Una caratteristica delle parti costruite per AM è l'anisotropia delle proprietà meccaniche, che di solito risultano peggiori nella direzione di costruzione [23]. Al fine di rendere un componente più resistente ai carichi applicati, è possibile orientarlo nel modo migliore.

Orientare correttamente una parte sulla piattaforma significa anche trovare la configurazione che minimizza la quantità di supporti da inserire. L'orientamento ideale è quello in cui il componente non ha bisogno di strutture di supporto, che porta a ridurre il materiale da scartare, ridurre i tempi di produzione e di lavorazione e ad aumentare la qualità della superficie. una volta definito l'orientamento, è possibile apportare alcune modifiche al design per ridurre la quantità di supporti [23]. Per trovare l'orientamento migliore è necessario trovare un giusto compromesso tra supporti, rugosità superficiale, stabilità del processo, distorsioni e qualità del componente. Per testare l'orientamento proposto e le strutture di supporto, è possibile eseguire simulazioni per prevedere linee di restringimento, deformazioni, rotture della ricopertura e rottura del pezzo, con la possibilità di compensarli aggiungendo del materiale o modificando l'orientamento della parte e / o le strutture di supporto.

Capitolo 3

STUDIO DEL COMPONENTE ORIGINALE

Prima di iniziare l'ottimizzazione del pezzo, risulta molto utile studiare la storia del componente originale. Un telaio motociclistico è un componente molto complesso, studiato per anni nei minimi particolari, continuamente in aggiornamento sia in campo dei materiali utilizzati, sia nella geometria e nella tecnica di costruzione. Risulta quindi fondamentale rendere saldi alcuni concetti sulla struttura e sulla dinamica di un motoveicolo per capire come e cosa può essere migliorato.

3.1 IL TELAIO MOTOCICLISTICO

La ciclistica in una moto è molto importante e tutto dipende dal telaio. Questo è progettato e sviluppato per donare al veicolo il giusto equilibrio tra stabilità e maneggevolezza. Deve essere una struttura ideale in grado di resistere a flessione, deve pesare il meno possibile e deve essere progettato con la massima precisione.

Una moto è costituita principalmente da due parti [24]:

telaio posteriore, motore e ruota posteriore;

Studio del componente originale

 Il forcellone anteriore con la ruota anteriore innestato al telaio dal cannotto di sterzo;

Il telaio ha quindi una funzione statica e dinamica. Per la parte dinamica deve garantire uno sterzo preciso, una buona tenuta di strada e un buon comfort. Per ottenere uno sterzo preciso, il telaio deve avere una resistenza a flessione e a torsione in modo che l'asse dello sterzo rimanga sullo stesso piano della ruota posteriore, indipendentemente dai carichi opposti, urti e frenate. La buona maneggevolezza si traduce in minore affaticamento da parte del pilota.

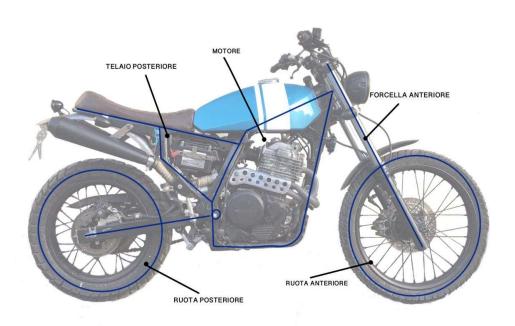


Figura 3-1 Componenti di un motoveicolo

I telai delle moto hanno subito negli anni numerosissime variazioni strutturali e, per la loro realizzazione, sono stati impiegati materiali sempre più pregiati. Derivando dalle biciclette, le moto inizialmente erano dotate di un leggero telaio a culla sul quale veniva installato centralmente il motore. Con l'aumento della potenza, i progettisti hanno cercato di rinforzare questa struttura,

proponendo già a metà del secolo scorso i primi telai che sfruttavano i motori come struttura portante.

Per poter effettuare una buona valutazione delle prestazioni della struttura, è necessario considerare il rapporto rigidezza/peso, indicato come efficienza alla struttura. [25]

Ci sono tante varianti di telaio, qui sotto vengono elencate le più importanti ai fini della tesi.

3.1.1 Mono trave

È il telaio con la geometria più semplice. È caratterizzato da un singolo tubo in acciaio che scende dal cannotto di sterzo fino a dietro il motore, per poi sdoppiarsi per creare una culla per il motore. Viene principalmente utilizzato in campo off road.



Figura 3-2 Single Cradle

Studio del componente originale

3.1.2 Backbone

È un tipo di telaio usato raramente. È composto da una trave solida come fosse una colonna vertebrale con il motore attaccato ad esso. Ha un look distintivo che pecca in termini di rigidezza e resistenza.



Figura 3-3 Backbone

3.1.3 Telaio a doppia culla



Figura 3-4 Double cradle

Basato sul monotrave a singola culla, è costituito da due sezioni tubolari che partono dal cannotto di sterzo per formare una doppia culla da supporto per il motore. Lo sdoppiamento del monotrave porta ad avere una elevata resistenza, rigidità ma anche leggerezza. È molto utilizzato per moto da strada e custom.

3.1.4 Telaio perimetrale

Sono telai studiati per resistere a potenze elevate. È costituto da due bracci che racchiudono il motore fino ad arrivare al perno del forcellone, in modo da ridurre la flessione in accelerazione. Alta rigidezza torsionale e flessionale, diventa un elemento sollecitato anche il motore. Il materiale più utilizzato è l'alluminio, ma sta prendendo piede l'utilizzo di altri materiali come il titanio, il magnesio o la fibra di carbonio.



Figura 3-5 Telaio perimetrale

Studio del componente originale

3.1.5 Telaio a traliccio

Usa gli stessi principi costruttivi del telaio perimetrale: connette il cannotto di sterzo al perno del forcellone racchiudendo tutto il motore usando sezioni tubolari corti in alluminio o acciaio. Questi, saldati insieme, danno una struttura a traliccio che conferisce rigidezza ed elevata leggerezza, ma è molto complicata e difficile da costruire.



Figura 3-6 Trellis frame

3.1.6 Installazione del motore al telaio

Ci sono diversi modi per assemblare il motore al telaio, dipeso dalla geometria della struttura e dal peso e l'ingombro del motore. Normalmente l'istallazione è rigida, così che il motore prenda parte come elemento rigido per aumentare la resistenza dell'intera struttura. In questo modo però le vibrazioni del motore sono direttamente trasmesse in tutto il telaio. Questo rende la moto meno confortevole per il pilota perché è soggetto a tutti i moti vibranti durante la marcia. Il numero di attacchi può essere variabile:

• Due attacchi: questa disposizione molto economica e leggera usa il perno del forcellone come primo attacco e un secondo attacco nella parte anteriore del motore. È usata maggiormente nell'off road.

 Tre attacchi: per aumentare la rigidezza dell'intera struttura è possibile progettare un terzo attacco sulla testata del cilindro. Questa configurazione limita i movimenti del motore, alterando le vibrazioni dell'intero sistema.

3.1.7 Sistema di sospensione posteriore

La sospensione posteriore di una moto collega la ruota posteriore, incernierata ad un braccio oscillante, con la parte anteriore del telaio. Quella in uso sul motoveicolo di prova consiste in un mono-ammortizzatore, ossia una sola unità molla-ammortizzatore, collegata al braccio oscillante mediante leveraggio a quadrilatero (vedi primo schema da sinistra in Figura 3-7). La presenza del leveraggio rende più semplice, rispetto ai sistemi classici o cantilever, l'ottenimento della curva di rigidezza desiderata. I leveraggi si distinguono per punto di attacco dell'ammortizzatore, che può essere inserito tra il telaio ed un elemento triangolare detto bilanciere, oppure tra un'asta di collegamento e il telaio, o ancora tra il forcellone e il rocker (Full Floater, Suzuki).

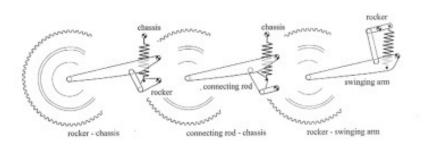


Figura 3-7 Sistemi di sospensione

La scelta progettuale delle caratteristiche delle sospensioni anteriori e posteriori (rigidezze, precarichi, smorzamenti) dipende da molteplici fattori: il peso della moto e del pilota, la posizione del centro di massa, la distribuzione dei pesi sulle ruote, le caratteristiche di rigidezza degli pneumatici e soprattutto le condizioni di uso del veicolo e la superficie stradale percorsa.

Tutti questi fattori sono spesso in contrasto tra loro e il progetto finale delle sospensioni di una moto si trova inevitabilmente in una condizione ottimale di compromesso.

3.1.8 Rigidezza strutturale

La rigidezza dei componenti strutturali di un motoveicolo è un fattore critico per definire le prestazioni. Valori elevati di rigidezza garantiscono precisione alle alte velocità, dando una risposta rapida ai comandi del pilota, ma una elevata rigidezza del telaio viene percepita dal pilota con un comportamento molto nervoso, soprattutto su strade bagnate o su dossi. La flessibilità torsionale può provocare una oscillazione instabile all'avantreno: effetto chiamato effetto wobble. La flessibilità laterale del retrotreno evita l'effetto weave: ondulazione dell'intera moto soprattutto al retrotreno.[24]

3.2 LA GEOMETRIA DEL TELAIO

Le misure degli elementi che compongono il telaio sono molto importanti: La geometria determina la rigidità generale e la posizione del pilota il comfort di marcia. La geometria è studiata per permettere una buona flessione verticale, per assorbire salti o terreni dissestati, ma permette anche una rigidità laterale per rendere il più efficiente possibile il trasferimento di potenza dal pilota alle ruote. Quindi la geometria e la distribuzione di peso sono caratteristiche che influenzano la stabilità.

Nella geometria ci sono due importanti assi:

• asse di sterzo: è l'asse di rotazione dello sterzo che insieme all'asse verticale forma l'angolo di inclinazione dello sterzo, o rake;

 R_r = radius of the torus of revolution radius of the torus of revolution intersection point of the steering head axis with the road p = wheelbase p = wheelbase p = normal rear trail

• asse del forcellone: l'asse su cui ruota la parte posteriore della moto.

Figura 3-8 Geometria di un motoveicolo

I parametri che sono utili per descrivere il comportamento della moto sono[24]:

- il passo: è la distanza tra i punti di contatto delle ruote con il piano stradale. Un aumento del passo comporta una diminuzione della rigidezza flessionale e torsionale del telaio, un aumento del raggio di curvatura minimo e uno sfavorevole aumento della coppia di sterzo per l'entrata in curva. Al contrario si ha uno favorevole aumento della stabilità della moto.
- l'angolo di inclinazione dello sterzo: è l'angolo compreso tra l'asse verticale e l'asse di rotazione dello sterzo. Varia da 21°/24° per moto sportive fino al 27°/34° per turismo.
- l'avancorsa: l'avancorsa è la distanza tra il punto di intersezione dell'asse dello sterzo con il manto stradale e il contatto della ruota.

3.3 CARATTERISTICHE DEL TELAIO DI STUDIO

Questo paragrafo descrive le caratteristiche del telaio originale, esaminato in tutti i suoi componenti, ed i materiali utilizzati per le varie parti.



Figura 3-9 Telaio Honda NX650

È stato preso in esame il telaio di una Honda Dominator NX650: moto dual sport commercializzata negli anni '90 e progettata soprattutto per uso enduristico, motivo per cui il telaio presenterà tutte le caratteristiche di un telaio per uso off-road:

- leggerezza: parametro fondamentale per conferire una buona agilità e non risultare pesante e faticosa da guidare.
- scarsa rigidezza: essendo in off-road le velocità massime molto basse,
 la rigidezza del telaio risulta essere poco influente sulla guidabilità.

Il telaio è un monotrave sdoppiato in tubi quadri d'acciaio, interamente saldato, cannotto di sterzo inclinato con un rake di 28° e avancorsa di 109 mm.

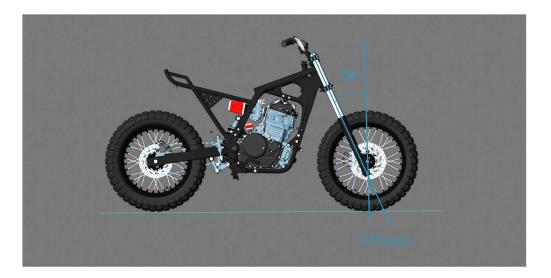


Figura 3-10 Rake e avancorsa

Il materiale utilizzato è l'acciaio S275, facile da lavorare e molto predisposto alla saldatura; è denominato con la sigla EN 10305-3 e le sue proprietà sono esplicitate nella tabella 3-1.

Materiale	Designazione	σ_y	σ_u	E	ρ
Acciaio S275	EN 10305-3	275	430	200	7850
		MPa	MPa	GPa	Kg/m^3

Tabella 3-1 Proprietà meccaniche Acciaio S275

3.3.1 Serbatoio olio, cannotto di sterzo e culla motore

A differenza di altre motociclette, il serbatoio dell'olio è integrato nel telaio. Ciò è reso possibile dal suo inserimento tra il cannotto di sterzo e il monotrave. Con questo design è necessario porre maggiore attenzione nella creazione del nuovo componente, considerando la parte cava e gli eventuali problemi di costruzione.



Figura 3-11 Serbatoio olio

Data la sua posizione, il serbatoio dell'olio deve essere studiato in modo da poter garantire l'adeguata rigidezza torsionale, verticale e laterale.

Il Cannotto di sterzo, porzione del telaio che permette l'alloggio del perno forcella e dei cuscinetti, è un profilo a sezione circolare saldato sul serbatoio dell'olio. È inclinato di 28° sulla verticale, dato che deve necessariamente rimanere invariato, per garantire una corretta guidabilità della moto; all'interno alloggiano dei cuscinetti conici e la precisione di montaggio garantisce una perfetta fluidità durante la sterzata. Nel nuovo telaio, la geometria del cannotto di sterzo non verrà modificata ma sarà posta maggiore attenzione per evitare deformazioni in costruzione e per assicurare un perfetto

alloggio ai cuscinetti. Per connettere il supporto del motore viene utilizzato un profilo a sezione quadrata che conferisce al telaio una migliore rigidezza mantenendo un peso ridotto, al di sotto è presente una struttura che protegge il motore dal terreno, importante soprattutto in uso off-road.

La culla inferiore è composta da due profili che collegano il tubo a sezione quadra alla parte posteriore una culla chiusa. Il profilo a sezione circolare nella parte posteriore è saldato alle travi laterali (sottosezione 3.2.2) dove saranno posizionati i supporti per i poggiapiedi.



Figura 3-12 Longheroni Inferiori

Nella parte posteriore del telaio sono presenti due piastre per l'attacco del bilanciere, punto critico per le tensioni a cui verrà prestata maggiore attenzione nell'ottimizzazione del nuovo telaio.



Figura 3-13 Piastre inferiori

3.3.2 Strutture laterali

Sono travi cave di sezione quadrata saldate, connettono il monotrave anteriore con il forcellone posteriore. Devono garantire una connessione rigida e una resistenza allo stress trasmesso dalla ruota posteriore (attraverso il forcellone) al telaio principale.



Figura 3-14 Strutture laterali

3.3.3 Attacchi motore

In totale sono presenti 11 attacchi per il motore. Questo fissaggio permette di conferire la rigidezza derivante dal motore al telaio, riducendone il peso e integrando il motore nel gioco delle rigidezze in dinamica. Per la progettazione del nuovo telaio gli attacchi rimarranno gli stessi.



Figura 3-15 Attacchi motore

3.3.4 Telaietto posteriore

il telaietto è la parte posteriore del telaio, dove viene montata la sella e il gruppo luci targa posteriore. Non presenta alcun requisito fondamentale in termini di rigidezza, deve poter reggere il peso del motociclista e del passeggero. Nel nuovo telaio questo componente sarà completamente ripensato.



Figura 3-16 Telaietto posteriore

3.3.5 Forcellone e leveraggi

Il forcellone, o swing arm, è la struttura dove viene montata la ruota posteriore. Deve essere in grado di affrontare tutti gli sforzi causati dalle diverse situazioni fuoristradistiche (salti, curve accelerazioni, ecc.)



Figura 3-17 Forcellone posteriore

Questo componente è realizzato in alluminio, con spessore costante, di facile manifattura.

I leveraggi permettono di avere una curva di rigidezza della sospensione migliore. Nella moto in esame il bilanciere (1) è collegato al telaio, mentre la viene chiamato bilanciere-telaio. In questo modo si ottengono masse sospese contenute e un'ampia escursione della ruota, ma tra le varie parti del quadrilatero vengono scambiate forze reattive molto elevate.

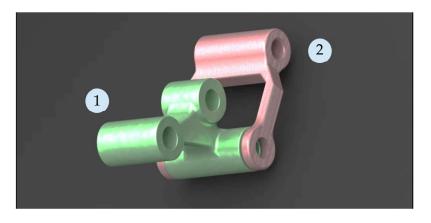


Figura 3-18 Sistema di leveraggio

3.4 REVERSE ENGINEERING

Il modello della Honda Dominator è stato realizzato con uno strumento di grafica, con una realizzazione poco precisa. Per ottenere una precisione maggiore sono state effettuate tutte le misurazioni da integrare al modello CAD direttamente su un telaio reale di una Honda. La strategia più comune è quella di misurare i dati 3D direttamente sull'oggetto e utilizzare le informazioni ottenute per costruire una rappresentazione digitale. La ricostruzione di modelli digitali da dati misurati è stata obiettivo a lungo termine per l'ingegneria; questo processo, chiamato Reverse engineering (RE) o ricostruzione CAD, mira alla generazione di superfici matematiche e caratteristiche geometriche che rappresentano la geometria di una parte fisica. È un problema chiave, che trova molteplici applicazioni in campo ingegneristico.

Le principali fasi del processo RE sono:

- 1) Acquisizione della nuvola di punti
- 2) Elaborazione
 - a. Filtraggio, che consiste in una riduzione del rumore, ovvero punti che non fanno parte della superficie e una semplificazione della gestione grafica;
 - b. Ricomposizione delle viste;
 - c. Riconoscimento delle aree specifiche, o segmentazione;
 - d. Classificazioni delle regioni identificate nella segmentazione;
 - e. Ricostruzione delle superfici analitiche;
 - f. Tessellazione;

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato uno scanner 3D ATOS. Questo è uno scanner ottico 3D la cui tecnologia si basa sulla proiezione di frange in grado di fornire coordinate 3D precise e tracciabili.



 ${\bf Figura~3-19}~Scannerizzazione~3D$

Il telaio è stato rivestito con una patina di ossido di titanio che rende la superficie opaca, consentendo una migliore acquisizione delle immagini. Sono stati applicati dei Landmark per il facile riconoscimento delle superfici da parte dello scanner. Il sensore è stato posizionato manualmente, di fronte al componente. Dopo ogni misurazione, il sensore o il componente vengono spostati per cogliere aree non acquisite dalla scansione precedente.

Ogni singola misura viene trasformata quindi in un comune sistema di coordinate, dando luogo a una nuvola di punti 3D completa.

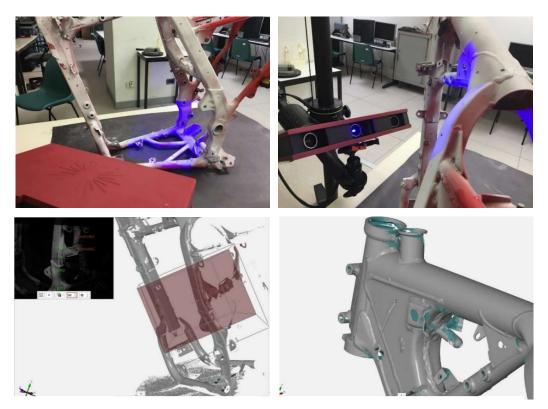


Figura 3-20 Fasi del processo di RE

Il software trasforma la nuvola di punti in una mesh poligonale che descrive le superfici di forma libera. Sono state confrontate le superfici con la geometria nominale CAD, al fine di avere una corretta geometria del componente.



Figura 3-21 Nuvola di punti ottenuta

3.5 ANALISI STRUTTURALE

Per poter effettuare un confronto con il telaio riprogettato con tecnologia AM, è stata realizzata l'analisi strutturale del modello originale, concentrandosi sulle simulazioni delle rigidezze. Vista la difficoltà nella determinazione di una procedura univoca e relativamente semplice per il calcolo delle rigidezze, ogni casa costruttrice adotta delle procedure interne che forniscono delle indicazioni globali sulla rigidezza delle strutture esaminate. Nonostante la ricerca effettuata, non sono stati trovati dati utili circa la rigidezza del telaio in esame, motivo per cui è stata effettuata una simulazione FEM attraverso software.

In questo studio è stata misurata la rigidezza, parametro fondamentale per la guidabilità della moto, basato sulle linee guida di Vittore Cossalter nel suo libro "Dinamica del Motoveicolo" [24].

In questo paragrafo viene illustrato unicamente il risultato dell'Analisi statica effettuata con Optistruct, la descrizione dell'analisi verrà ampiamente descritta nel capitolo 5. Per poter realizzare un modello con risultati affidabili è stato deciso di dividere il modello in due parti: telaio e cannotto di sterzo.

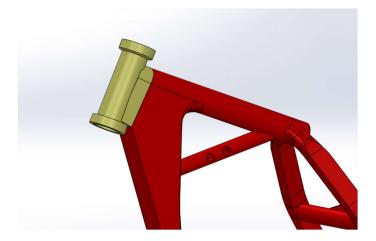


Figura 3-22 Modello CAD dei due componenti

Il motivo di questa divisione risiede fondamentalmente nel fatto che il telaio originale è un insieme di parti saldate tra di loro, con differenti spessori. L'idea

di avere un telaio come pezzo unico induce ad analizzarlo come un guscio con uno spessore specifico. Il risultato dell'analisi FEM può discostarsi troppo dalla realtà costruttiva, quindi è stato deciso di suddividere il cannotto in modo da avere due differenti spessori.

Sui due componenti, che risultano come superfici, è stata effettuata una mesh 2D, con una grandezza dell'elemento media di 2 mm. Dopo aver verificato la qualità della mesh con il tool Autocleanup di Hypermesh, sono state effettuate tutte le procedure di pre-analisi come verrà descritto ampiamente nel paragrafo 6.4. Per il modello è stata scelta la rappresentazione PSHELL, con due differenti spessori:

- Cannotto di sterzo: 5 mm;
- Telaio: 2,5 mm, cifra che deriva da una stima approssimata degli spessori dei componenti di cui fa parte il telaio reale.

I due componenti sono stati uniti simulando una saldatura. Il materiale utilizzato per la simulazione è l'acciaio S275, di cui le caratteristiche importanti per il simulatore sono riportate in tabella 3-2.

Acciaio S275				
E	200000	Мра		
Nu	0,31			
Q	7,85e-09	Tonn/mm ³		

Tabella 3-2 Parametri del materiale inseriti in HyperMesh

Una volta eseguita tutta la fase di pre-analisi si procede con l'analisi attraverso il solutore Optistruct, i cui risultati sono rappresentati in figura 3-21.

Gli spostamenti sono espressi in mm, le forze agenti sugli elementi tetragonali in N.

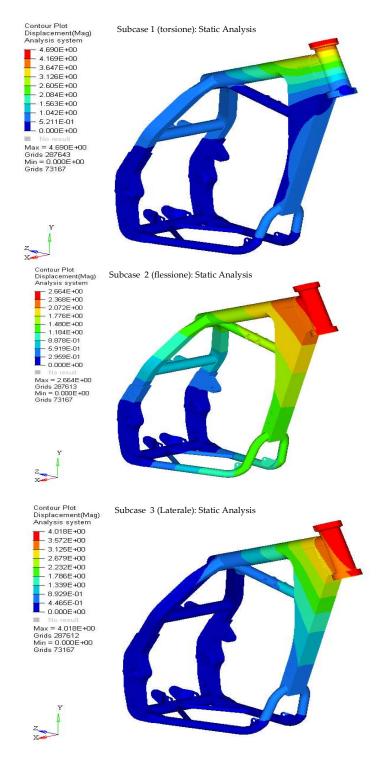


Figura 3-23 Risultati spostamento massimo su HyperView.

Risultati simulazione rigidezza

	Torsionale	Flessionale	Laterale	
Forza/momento	1 kNm	1 <i>kN</i>	1 <i>kN</i>	
Freccia/angolo	4,7 mm	2.66	4,01 mm	
	2,6°	2,66 mm		
Rigidezza	0,38 ^{kNm} / _°	$0,37 \frac{kN}{mm}$	$0.24 \ ^{kN}/_{mm}$	

Tabella 3-3 Tabella risultati rigidezze

Capitolo 4

PROGETTAZIONE DEL NUOVO TELAIO

La progettazione del nuovo telaio stabilisce un cambiamento radicale della struttura. Un aspetto importante è la geometria strutturale: un cambiamento geometrico radicale necessita di uno studio intenso delle tecniche di progettazione di una struttura portante di una moto. Bisognerebbe avere informazioni di costruzione e alcune regole che vanno al di là del compito di questo progetto di tesi, che vuole esclusivamente dimostrare la fattibilità di costruzione attraverso tecnologie Additive Manufacturing. La decisione presa quindi è stata quella di non intaccare la geometria, tralasciando tutte le zone di non design space, concentrandosi sulle parti completamente modificabili, avendo una particolare attenzione a non intralciare gli altri organi della moto. L'intera progettazione è subordianta alle regole del Design for Additive Manufacturing (DfAM).

4.1 OBBIETTIVI

L'obiettivo principale è l'alleggerimento della struttura. Al fine di minimizzare il peso del telaio per prima cosa è stato necessario individuare le zone di non design che devono rimanere inalterate e le zone in cui si può agire modificando la geometria. Partendo dalle prime, è stata cambiata la struttura

Progettazione del nuovo telaio

dove possibile non intaccandone la rigidità ed andando quindi a valutare di volta in volta, mediante analisi strutturale, come varia il comportamento in funzione del nuovo design realizzato.

L'angolo di inclinazione del cannotto di sterzo e l'avancorsa sono geometrie rimaste inalterate. Tutti gli attacchi per il collegamento del motore, forcellone e poggiapiedi sono rimasti allo stesso posto, al fine di non cambiare impostazioni di guida. Sella, serbatoio e altre parti supplementari non sono stati inseriti come vincoli progettuali. Si tiene in considerazione solamente l'ingombro, che dovrà essere sostanzialmente lo stesso di quello originario.

Un telaio ad uso enduro è progettato per ridurre il peso della struttura per garantire una buona agilità di percorrenza di strade sconnesse. L'alleggerimento compromette la rigidezza totale della struttura. La riprogettazione vuole garantire anche un aumento della rigidezza del telaio che vada a pari passo con la riduzione di peso.

4.2 STEP BY STEP

L'individuazione della geometria non modificabile è stato il punto di partenza. Per non modificare l'avancorsa e l'angolo di rake, parametri fondamentali che determinano l'Handling della moto, la parte interna del cannotto di sterzo è rimasta inalterata.

Affinché il telaio possa essere assemblato con i componenti esistenti della moto, gli attacchi sono stati considerati come parte del non-design space. Questi fori di collegamento servono per un assemblamento bullonato, e quindi la rugosità superficiale non è parametro fondamentale di assemblamento. Per tale motivo questi attacchi non necessitano di una rifinitura a fine processo, ma preventivando un aumento di rugosità del componente realizzato tramite Power Bed Fusion, i diametri di tutti i fori sono stati aumentati di 0,5 mm.

Nella figura 4-1 sono raffigurati in verde il cilindro interno del cannotto di sterzo e in rosso le zone di giunzione con gli altri componenti:

- 11 attacchi per motore;
- 2 attacchi perno forcellone posteriore;
- 2 attacchi per poggiapiedi e leva freno;

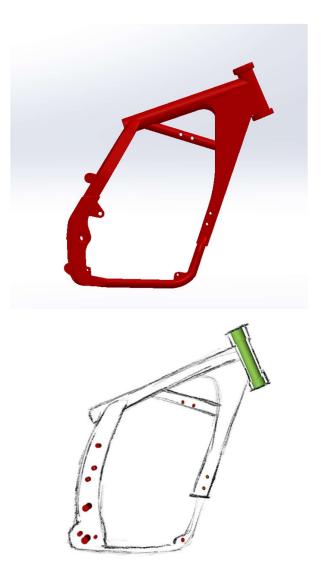


Figura 4-1 Zone di non-design Space

Progettazione del nuovo telaio

Il secondo step è stato quello di realizzare uno schizzo del prototipo concettuale, delineando le linee e la forma che in linea di massima potessero soddisfare i requisiti di Design for Additive Manufacturing.

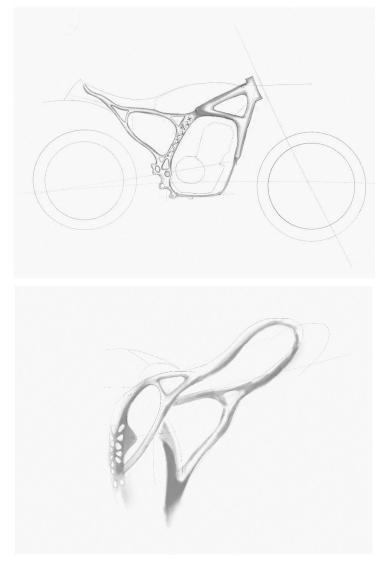


Figura 4-2 Prototipo concettuale

Il software scelto per la rimodellazione fa parte di un pacchetto software dell'azienda Altair, chiamato Solidthinking Evolve, un modellatore 3D con funzioni parametriche per lo studio e la progettazione del modello. Consente di iniziare il progetto da uno schizzo e di esplorare alternative di design,

combinando la libertà di modellazione delle superfici 3D con il controllo parametrico dei solidi. Il metodo di modellazione è basato sulla tecnologia delle curve e superfici NURBS. Le matematiche NURBS sono in grado di rappresentare qualsiasi forma, sia analitica che di forma libera.

La figura 4-3 mostra il modello finale realizzato con Solidthinking Evolve, eseguito con l'ausilio della modellazione secondo PolyNURBS.

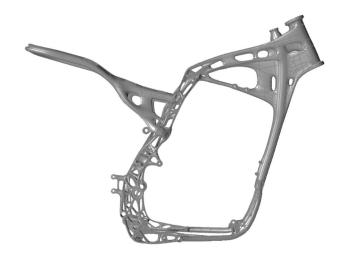


Figura 4-3 Prototipo funzionale

Questo modello rappresenta un primo prototipo funzionale. Andando più nello specifico, nelle pagine seguenti in questo Capitolo, verranno illustrati i particolari e le decisioni prese.

Progettazione del nuovo telaio

Il telaietto posteriore è stato totalmente modificato. Questo è stato possibile considerando un cambio totale dei componenti della parte posteriore della moto. Per il gruppo ottico è stato pensato di applicare una striscia a Led, modernizzando la parte posteriore. A tal fine, è stato progettato l'alloggio del LED da inserire direttamente nel telaio.



Figura 4-4 Telaietto posteriore

Il cannotto di sterzo è stato rinforzato per aumentare la rigidezza. Dalla figura 4-8 si notano due grosse fasce per aumentare la rigidezza laterale e torsionale, la parte inferiore è stata riempita per avere un impatto positivo sulla rigidezza flessionale.

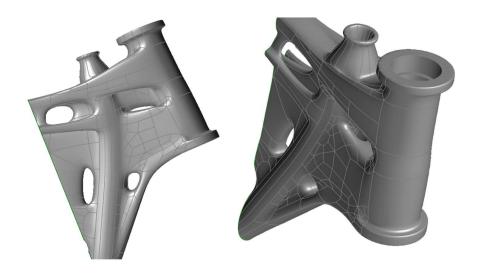


Figura 4-5 Cannotto di sterzo

La parte centrale della struttura è quella che caratterizza maggiormente la tipologia di telaio. Per avere una parte leggera e strutturalmente valida è stato pensato di combinare il telaio a doppia culla con la struttura leggera e resistente del telaio a traliccio. Sono stati creati due longheroni uniti tra di loro con una struttura a traliccio al posto delle strutture quadrate cave laterali. Queste strutture si congiungono nella parte superiore della struttura, composta sempre da un sistema a traliccio che arriva fino al serbatoio dell'olio.





Figura 4-6 Strutture laterali a traliccio

Il serbatoio dell'olio è stato modificato totalmente, semplificandone la geometria. Si tratta essenzialmente di un cilindro cavo di diametro variabile, in cui la parte cava ha una forma a goccia, una struttura autoreggente che non necessita di strutture di supporto durante la messa in macchina.

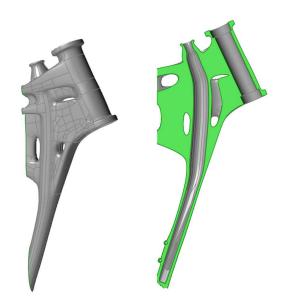


Figura 4-7 Serbatoio olio

La geometria della parte inferiore è rimasta inalterata, è stata modificata la sezione in modo da aumentare l'alleggerimento. È stato deciso di mantenere la simmetria in questa zona, particolare non presente nel telaio originale.



Figura 4-8 Struttura inferiore

La struttura che sorregge il mono nella parte superiore è un punto molto critico: per tale motivo è stata posta particolare attenzione nel realizzare una struttura quanto più resistente senza avere zone cave, in cui sarebbe stato difficile rimuovere la polvere non utilizzata dopo la lavorazione in macchina.



Figura 4-9 Attacco Mono superiore

La parte inferiore dell'attacco del sistema di leveraggi è la parte più complicata, in questa parte coesistono gli attacchi del leveraggio, gli attacchi per la forcella e gli attacchi per il motore.

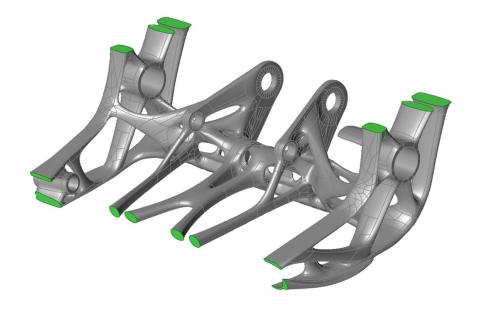


Figura 4-10 Collegamento inferiore

4.3 RISULTATO

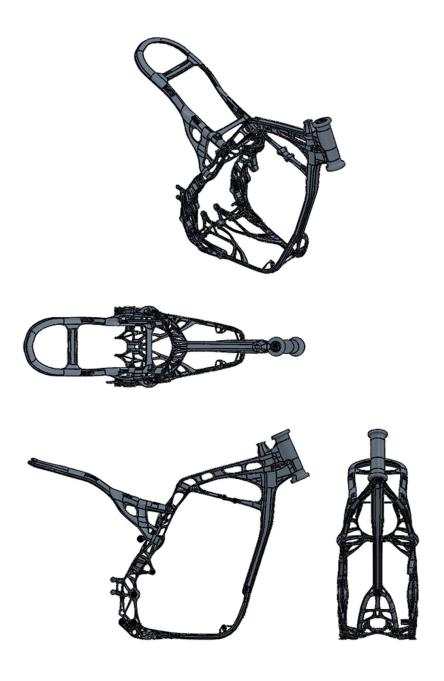


Figura 4-11 Viste del prototipo funzionale

Capitolo 5

ANALISI STRUTTURALE PRELIMINARE

L'analisi strutturale dovrebbe coprire tutte le possibili forze a cui il telaio è sollecitato, per tale motivo è stata realizzata una analisi preliminare con più casi studio. Un' analisi strutturale mediante elementi finiti definitiva verrà effettuata dopo lo studio del componente per la messa in macchina. Il materiale della struttura è il Ti6-4 utilizzato per l'Additive anufacturing. Le proprietà meccaniche dello stesso materiale dipendono dalla tecnologia utilizzata. Comparando le proprietà meccaniche del titanio delle due tecnologie utilizzate per la realizzazione della struttura, è stata scelta la tecnologia che restituisce le proprietà meccaniche meno elevate.

Ti-Alloy TiAl6V4	SLM500	Arcam EBM
Yield strenght Rp 0,2	960 MPa	950 MPa

Tabella 5-1 Tensione a snervamento del TiAl6V4 per SLM e EBM

Analisi Strutturale preliminare

È stato deciso di utilizzare il software Solidthinking Inspire per lo studio del movimento e dei casi studio, mentre è stato utilizzato il software HyperWork Optistruct per uno studio più accurato sulle rigidezze della struttura.

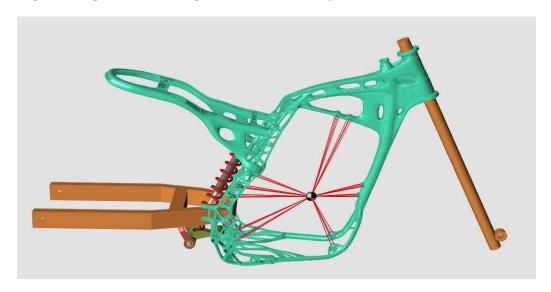


Figura 5-1 Modello per simulazione del movimento

Per ottimizzare i tempi di risoluzione e ridurre il numero di parti, il modello è stato semplificato. Tutte le parti saldate sono state unite: è stato considerato l'intero telaio come unica parte. La grandezza media degli elementi per l'analisi è di 5 mm.

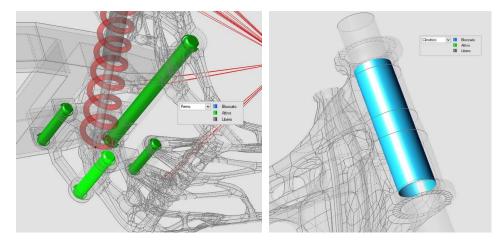


Figura 5-2 Giunti leveraggi (sinistra), Cannotto bloccato (destra)

Il forcellone ed i leveraggi sono stati collegati al telaio attraverso dei giunti rotanti. Il sistema di ammortizzatore anteriore è stato semplificato considerando un' unica forcella collegata rigidamente al cannotto di sterzo, questa semplificazione non altera i risultati. [26]

Il motore è stato considerato come una massa collegata rigidamente al telaio attraverso gli attacchi originali presi dal vecchio telaio. Il peso del motore equivale a 52 Kg.

Il carico totale è stato concepito considerando un carico totale di 200 Kg, che considera il peso del motociclista e del passeggero più un carico extra. Approssimando l'accelerazione gravitazionale a $10\,m/s^2$, la forza totale agente sul telaio da carichi esterni è di 2000 N.

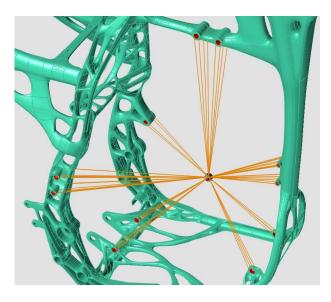


Figura 5-3 Simulazione motore

A causa della mancanza di carichi standardizzati da applicare nello studio, i risultati sono analizzati senza garanzie prima di un test sperimentale. Per questo motivo, sono stati ideati una serie di casi che ricreano varie situazioni di uso in off-road. Come punto di riferimento per le rigidezze è stato preso in considerazione lo studio del telaio di Vittor Cossalter nel sul libro "Dinamica del Motoveicolo". [24]

Analisi Strutturale preliminare

In questo studio è stato applicato un carico di 1 kN o un momento di 1 kNm a seconda dei casi.

Componente	Torsionale $\binom{kNm}{\circ}$	Laterale $\binom{kN}{mm}$	Verticale $\binom{kN}{mm}$	
Frame	3-7	1-3	5-10	

Tabella 5-2 Rigidezze di riferimento

Lo studio di Vittore Cossalter è stato realizzato tenendo in considerazione una moto stradale sportiva con cilindrata di 1000 cc, in cui il telaio deve necessariamente avere una rigidezza complessiva molto alta per avere una giusta stabilità anche ad alte velocità. Un telaio da enduro presenta la caratteristica di avere una struttura più leggera a scapito della rigidezza, per tale motivo, il limite minimo di rigidezza non è rispettato per lo studio del telaio preso in considerazione.

La rigidezza è ottenuta dividendo il carico applicato per lo spostamento (Eq. 1) o, in caso di momento, diviso per la rotazione (Eq. 2);

Equazione 1

$$k = \frac{F}{\delta}$$

Equazione 2

$$k = \frac{M}{\theta}$$

5.1 caso 1

ATTERRAGGIO CON ENTRAMBE LE RUOTE

5.1.1 Analisi

Per il primo set-up, è stato analizzato il modello con l'idea di simulare le sollecitazioni che il telaio subisce quando la moto atterra da un salto con entrambe le ruote. È stato scelto l'atterraggio da un salto perché porta all'estremo le forze applicate durante una corsa normale.



Figura 5-4 Dinamica di un salto

Per simulare l'atterraggio, le estremità delle forcelle sono state vincolate per simulare le ruote.

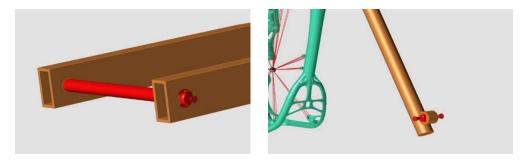


Figura 5-5 Giunti di collegamento ruote

Analisi Strutturale preliminare

Le forze sono state applicate sul telaietto posteriore, per simulare un atterraggio seduto e per verificare anche la rigidezza della parte posteriore. Per semplificare i calcoli, la totalità del carico è stata applicata sul telaietto, ma non può essere assunto come simulazione reale.

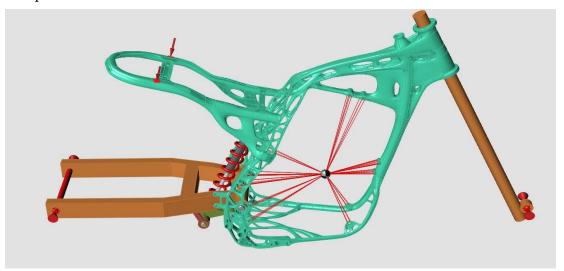


Figura 5-6 Caso 1

Attraverso il software Inspire è possibile simulare il movimento, così da avere l'andamento delle forze agenti sul telaio durante la simulazione. È possibile effettuare l'analisi considerando i picchi di forza di tutta l'azione. Nella figura 5-7 è raffigurato il diagramma della forza agente sul mono ammortizzatore in un tempo di 2 s.

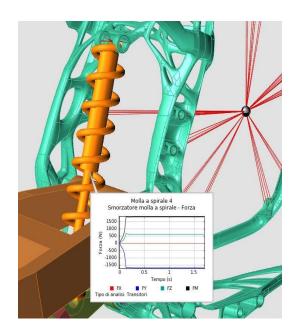


Figura 5-7 Simulazione Movimento Mono

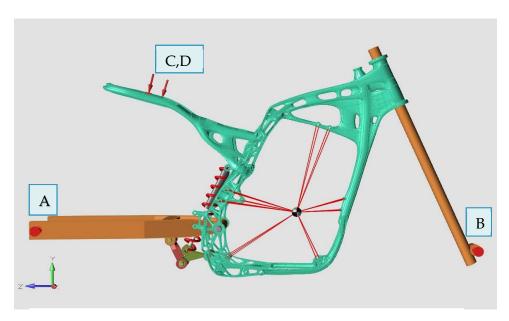


Figura 5-8 Condizioni di carico Caso 1

Condizioni di carico	Tipo	Tag	х	Y	Z	RX
Perpendicolare al telaietto	Supporto	A	Fisso	Fisso	Fisso	Libero
	Supporto	В	Fisso	Fisso	Fisso	Libero
	Forza 1000 <i>N</i>	С	0.23799	0.93768	0.25320	-
	Forza 1000 <i>N</i>	D	0.23799	0.93768	0.25320	-

Tabella 5-3 Condizioni di carico Caso 1

5.1.2 Risultati

Quando la moto atterra con entrambe le ruote il carico è ben distribuito: si concentra maggiormente lungo la parte posteriore. Il fattore di sicurezza minimo è 1.3, ma è localizzato nel punto di giunzione del forcellone, questo potrebbe rappresentare un punto singolare e dipende dal solutore dell'analisi e dalla sua accuratezza. Tutto il resto del telaio risulta essere con un coefficiente di sicurezza al di sopra di 2.

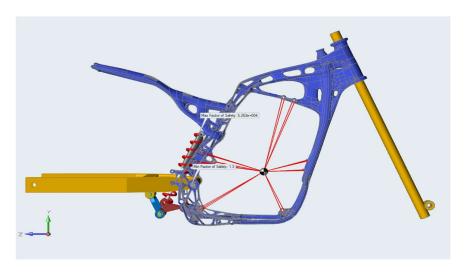


Figura 5-10 Fattore di sicurezza Caso 1

La figura 5-10 presenta il risultato della massima tensione di Von Mises, mostrando una tensione massima di 501 Mpa.

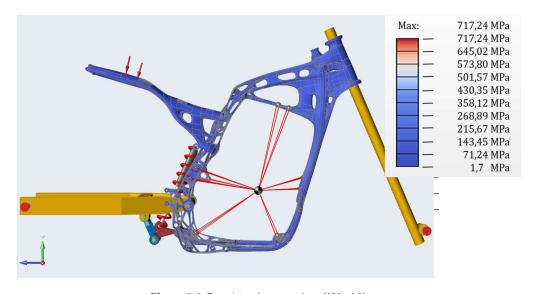


Figura 5-9 Caso 1 tensione massima di VonMises

5.2 caso 2

FRENATA E IMPATTO FRONTALE

Il secondo caso si basa su un carico applicato al telaio che simula la frenata del mezzo. È stata realizzata una verifica ulteriore per impatto frontale.

In frenata, si consideri che tutto il peso sia supportato dalla ruota anteriore, con la forza sulla parte posteriore nulla.

5.2.1 Analisi

Il carico scelto è sempre di 2000 N, valore al di sopra di una tipica frenata. Questa volta il carico è stato applicato all'estremità della forcella, posizione in cui è calettata la ruota anteriore (rappresentato in figura 5-11). Il supporto è stato inserito solamente sul forcellone lasciando libero il movimento longitudinale dell'intera struttura e della ruota anteriore.

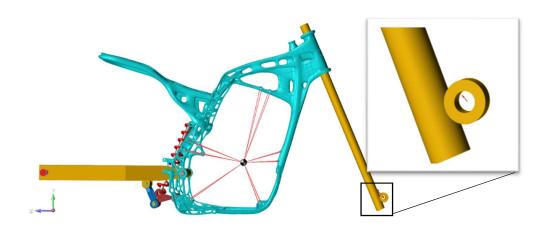


Figura 5-11 Condizioni di carico Caso 2-Frenata

L'impatto frontale, anche se di minore importanza in questo studio, sollecita maggiormente la flessione della parte anteriore del telaio. La posizione dei supporti è sempre la stessa.

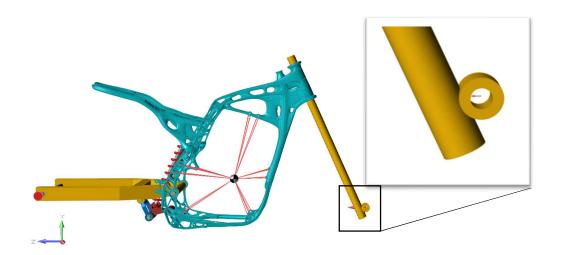


Figura 5-12 Condizioni di carico Caso 2-Impatto frontale

Condizioni di carico	Tipo	Tag	X	Y	Z	RX
	Supporto	A	Fisso	Fisso	Fisso	Libero
Frenata	Supporto	В	Fisso	Fisso	Libero	Libero
	Forza 2000 <i>N</i>	С	0	0,5	0,5	-
	Supporto	A	Fisso	Fisso	Fisso	Libero
Impatto	Supporto	В	Fisso	Fisso	Libero	Libero
frontale	Forza 2000 <i>N</i>	С	0	0	1	-

Tabella 5-4 Condizioni di carico Caso 2

5.2.2 Risultati

I risultati sono simili: in frenata la forza applicata è scomposta in componente orizzontale e componente verticale, mentre nell'impatto frontale è presente solo la componente orizzontale. Questo causa uno spostamento in direzione orizzontale per l'ultimo caso e uno spostamento orizzontale e verticale per il primo.

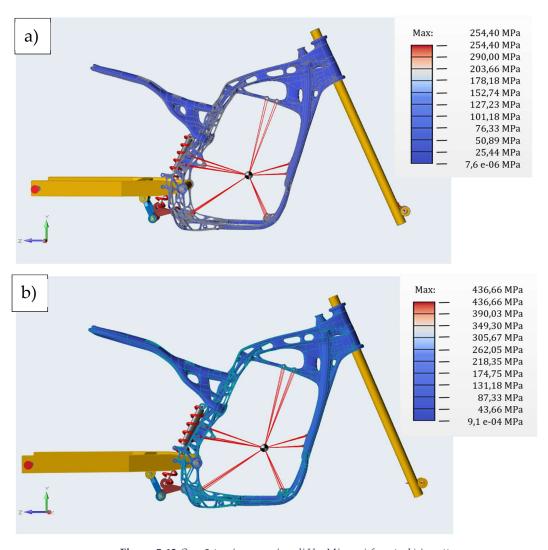


Figura 5-13 Caso 2 tensione massima di VonMises. a) frenata; b) impatto

5.3 CASO 3

ATTERRAGGIO CON RUOTA POSTERIORE

In questa configurazione è stato preso in esame l'atterraggio della moto con la sola ruota posteriore, tenendo in considerazione che di solito, dopo un salto, una moto non attera con entrambe le ruote contemporaneamente.

5.3.1 Analisi

Per simulare questa configurazione, i vincoli sono applicati nei supporti per i piedi, il carico incide sulla parte posteriore del forcellone. In questo modo viene applicata una sollecitazione maggiore sul forcellone, ma nel caso studio non viene considerato e viene preso in esame solamente il telaio.



Figura 5-14 Condizioni di carico Caso 3

Condizioni di carico	Tipo	Tag	X	Y	Z	RX
	Supporto	A	Fisso	Fisso	Fisso	Fisso
	Forza 1000 <i>N</i>	С	0	1	0	-
	Forza 1000 <i>N</i>	D	0	1	0	-

Tabella 5-5 Condizioni di carico Caso 3

5.3.2 Risultati

La massima tensione di Von Mises che viene registrata è 837,94 Mpa.

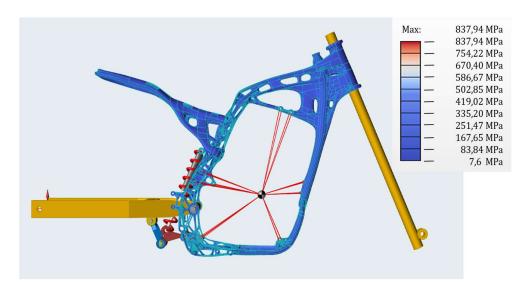


Figura 5-15 Caso 3 tensione massima di VonMises

5.4 caso 4

ATTERRAGGIO CON RUOTA ANTERIORE

Questo tipo di atterraggio non è frequente nel mondo dell'off-road, ma viene preso in considerazione comunque per testare con accuratezza la parte del cannotto di sterzo.

5.4.1 Analisi

Per simulare questa configurazione, è stato applicato un carico sul perno della ruota anteriore vincolando la struttura nel supporto per i piedi, come è stato fatto nel caso precedente.



Figura 5-16 Condizioni di carico Caso 4

Condizioni di carico	Tipo	Tag	х	Y	Z	RX
	Supporto	A	Fisso	Fisso	Fisso	Fisso
	Forza 2000 <i>N</i>	С	0	1	0	-

Tabella 5-6 Condizioni di carico Caso 4

5.4.2 Risultati

Il valore massimo di stress registrato è di 361 Mpa.

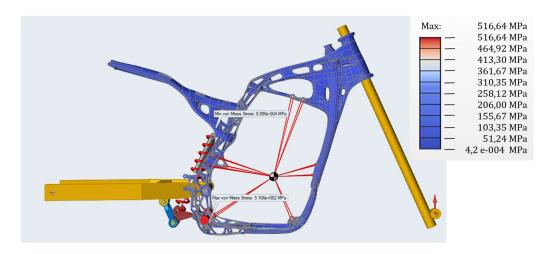


Figura 5-17 Caso 4 tensione massima di VonMises

5.5 DESCRIZIONE DELLE RIGIDEZZE DEL TELAIO

5.5.1 Rigidezza torsionale

- Perno forcellone e poggiapiedi bloccati;
- Momento applicato in direzione normale all'asse del cannotto di sterzo;
- $K_{torsionale} = \frac{M}{\delta}$; $M = 1 \ kNm$

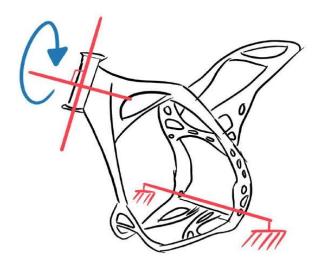


Figura 5-18 Rigidezza Torsionale

5.5.2 Rigidezza laterale

- Perno forcellone e poggiapiedi bloccati;
- Forza perpendicolare all'asse del cannotto di sterzo, posizionata sul suo centro;
- $K_{laterale} = \frac{F}{f}$; F = 1 kN

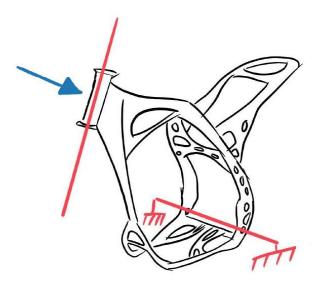


Figura 5-19 Rigidezza Laterale

5.5.3 Rigidezza flessionale

- Perno forcellone e poggiapiedi bloccato
- Forza applicata lungo l'asse del cannotto di sterzo
- $K_{flessionale} = \frac{F}{f}$; F = 1 kN

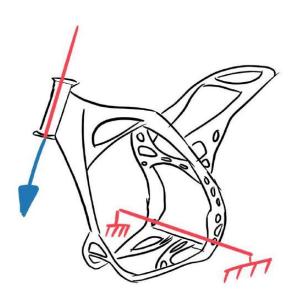


Figura 5-20 Rigidezza Flessionale

5.6 SIMULAZIONI RIGIDEZZE

5.6.1 Rigidezza torsionale

- Connessione rigida che collega i giunti del motore, in modo da considerare il motore infinitamente rigido.
- Supporti cilindrici con incastro lungo il perno forcellone e dei poggiapiedi.
- Momento generato da due forze di 5 kN di verso opposto, con distanza dal centro del cannotto di 10 cm

 Dalla simulazione si trova il punto in cui è presente la freccia massima δ, conoscendo la distanza dal centro del

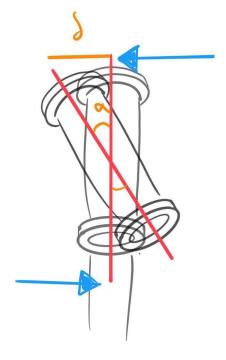


Figura 5-21 Rigidezza Torsionale

cannotto di sterzo si trova l'angolo di massima torsione.

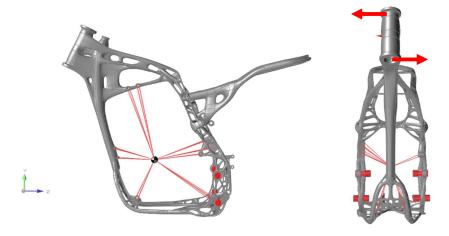


Figura 5-22 Rigidezza Torsionale

Equazione 3

$$\frac{\delta}{\overline{AO}} = \tan \alpha$$

 $\overline{AO} = 100 \ mm;$

5.6.2 Rigidezza laterale

- Connessione rigida che collega i giunti del motore, in modo da considerare il motore infinitamente rigido.
- Supporti cilindrici con incastro lungo il perno forcellone e dei poggiapiedi.
- Connessione tra il cannotto di sterzo e il centro di taglio.
- Forza di 1 kN perpendicolare al piano di simmetria del telaio applicata sul centro di taglio.

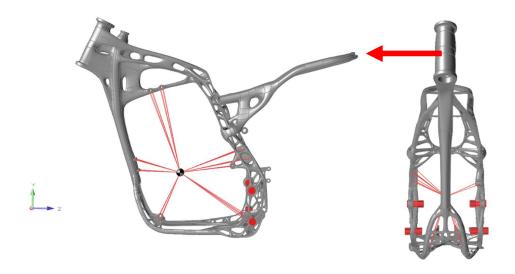


Figura 5-23 Rigidezza Laterale

Analisi Strutturale preliminare

5.6.3 Rigidezza flessionale

- Connessione rigida che collega i giunti del motore, in modo da considerare il motore infinitamente rigido.
- Supporti cilindrici con incastro lungo il perno forcellone e dei poggiapiedi.
- Forza di un 1 kN applicata lungo l'asse del cannotto di sterzo, che copre tutti i punti del cilindro.

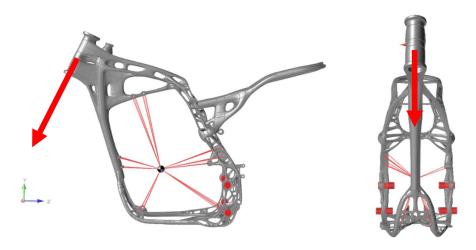


Figura 5-24 Rigidezza Flessionale

5.7 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

In questa fase preliminare di analisi strutturale si può notare una buona progettazione della struttura, sollecitata a carichi in diverse configurazioni, rispecchiando il più possibile la realtà. Nella tabella vengono riportati i valori degli stress massimi per ogni caso.

Risultati simulazione rigidezza

	Torsionale	Laterale	Flessionale
Forza/momento	1 kNm	1 <i>kN</i>	1 <i>kN</i>
Freccia/angolo	0,711 mm	0,828 mm	0,681 mm
	0,40°		
Rigidezza	2,5 ^{kNm} / _°	$1,20 ^{kN}/_{mm}$	$1,46 \frac{kN}{mm}$

Tabella 5-8 Risultati simulazione rigidezza

Risultati massima tensione Von Mises [Mpa]

Caso 1	475
Caso 2 – Frenata	254
Impatto frontale	436
Caso 3	837
Caso 4	361

Tabella 5-7 Risultati massima tensione Von Mises

Nella figura 5-24 sono riportati i risultati delle tre rigidezze fondamentali per lo studio del telaio, ripresi nella tabella 5-8

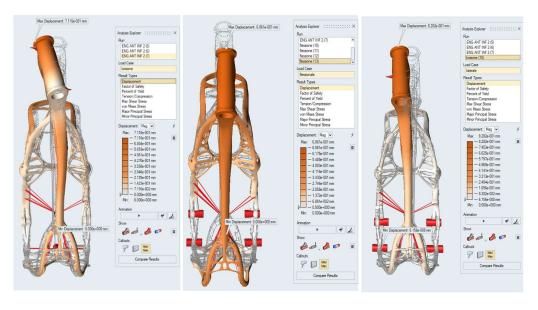


Figura 5-25 – Rigidezza: 1) Torsionale; 2) Flessionale; 3) laterale

Capitolo 6

ASPETTI TECNOLOGICI E COSTRUZIONE DEL TELAIO

Questo capitolo descrive le modifiche apportate al progetto per considerare i parametri di costruzione e i macchinari utilizzati. Il telaio è un componente troppo grande per essere lavorato in una unica macchina. Si sposta quindi l'attenzione nella divisione del modello in componenti più piccoli, con successiva saldatura.

I parametri da prendere in considerazione sono:

- Avere bordi di divisione dei pezzi uniformi e di adeguate dimensioni per la saldatura;
- Riuscire ad avere un'area di saldatura il più possibile accessibile per l'attrezzatura di assemblaggio;
- Dividere il componente in zone con basse tensioni di Von Mises.

La scelta di costruzione tra PBF-L e EBM è stata realizzata considerando le caratteristiche di rugosità superficiali migliori per PBF-L e l'impacchettamento migliore per costruzione in EBM.

Il componente, realizzato in ambiente Solidthinking Evolve, è stato esportato in file x_t, un file Parasolid di modellazione geometrica CAD che contiene dati

Risultati delle simulazioni

del modello 3D come geometria e topologia. Il modello esportato da Evolve

contiene svariati errori di identificazioni geometriche, ma grazie ad un tool di

Solidworks di diagnostica di importazione è stato possibile riparare le

superfici difettose, trasformandole in corpi chiusi e trasformando i corpi chiusi

in solidi. Questa capacità di riparazione è necessaria perché i dati di superficie

importati hanno spesso problemi che impediscono la conversione di superfici

in solidi validi. Questi problemi includono:

Geometria superficiale errata

Topologia superficiale errata (curve di taglio)

Superfici adiacenti i cui bordi sono vicini tra loro ma non si

incontrano, creando così degli spazi tra le superfici

Il formato Parasolid è stato a sua volta convertito in un file STL per poter essere

caricato su un software di pre-processing per AM, Materialise Magics. Per fare

ciò, sono stati imposti i valori di tolleranza delle superfici esterne ed interne.

Questi vengono espressi rispettivamente tramite i parametri di deviazione e

dell'angolo di deviazione. Tali valori sono necessari per definire quanti

triangoli saranno presenti all'interno del componente.

Ovviamente al diminuire di questi valori si ha una mesh più fine creando di

conseguenza un file di dimensioni maggiori. Perciò, si è cercato di imporre dei

valori tali per cui la dimensione del file non sia molto grande.

I valori impostati sono stati:

• Deviazione: 0,03;

Angolo: 6°.

Trasferito il file sulla piattaforma Magics, il passo ulteriore è stato quello di

valutare gli errori rilevati dal programma.

107

L'analisi degli errori ha riguardato:

- le normali delle superfici;
- la posizione degli spigoli che sono stati mal cancellati durante la creazione di ottimizzazione del file
- le shells, ovvero le parti del componente che Magics identifica. Se esse sono maggiori di uno vuol dire che il software riconosce più shells rapportate ad unico componente. Questo rappresenta un errore dovuto principalmente alle conversioni dei file dette prima;
- intersezione dei piani;
- overlaps.

L'errore di intersezione dei piani e degli overlaps sono quelli più pericolosi che si possono individuare, poiché possono compromettere la realizzazione del pezzo. Questi si creano soprattutto quando i parametri inseriti per la creazione del file STL non sono adeguati.

Individuati gli errori si è proceduto ad eliminarli. L'operazione di rimozione di tutte le tipologie di errori sopra elencate può essere eseguita in maniera automatica dal software o in maniera manuale. Quest'ultima si verifica quando il programma non è in grado di ridurre a zero gli errori e allora è richiesto un intervento manuale. Per poter procedere all'eliminazione degli errori è opportuno partire dall'unificazione della shell in modo che il programma lavori su un unico componente. Tramite l'analisi automatica degli errori sono stati individuati overlaps non eliminabili dal programma. Pertanto, si è proceduto nell'eliminare manualmente questi ultimi.

I passi eseguiti sono stati:

- 1. Individuazione degli errori tramite il comando "Mark Colored";
- Eliminazione delle parti selezionate con il comando "Delete Marked", ottenendo errori di tipo Holes;

3. Correzione degli errori Holes.

Il controllo si è concluso con l'eliminazione di tutti i possibili errori.

Una volta ottenuto un modello in STL senza errori si procede con la divisone del modello.

6.1 DIVISIONE MODELLO

Avendo la possibilità di sfruttare due diverse tecnologie, il modello è stato diviso così da poter sfruttare gli aspetti positivi di entrambe. Con la tecnologia PBF-L si ottiene un componente con una rugosità superficiale migliore rispetto ai componenti realizzati per EBM. Una rugosità eccessiva potrebbe causare problemi al contatto con i vestiti del pilota. Effettuare un lavoro di rifinitura per i componenti realizzati mediante EBM porterebbe ad un ulteriore ciclo di lavorazione e quindi un ulteriore costo aggiunto. Per tale motivo sono state individuate le zone in cui una rugosità migliore fosse più importante: quelle di contatto tra telaio e pilota. Queste zone verranno realizzate mediante SLM.

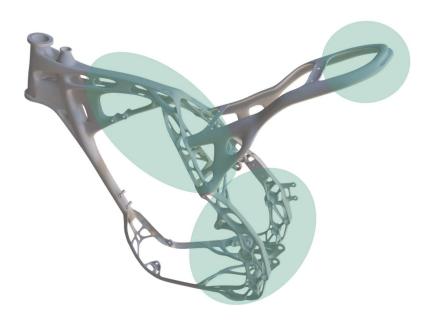


Figura 6-1 zone di contatto pilota-telaio

Un'altra attenta valutazione è stata effettuata verificando le zone con maggiore sollecitazione, giungendo alla decisione di ottenere come unico componente le

parti dove il materiale è maggiormente sollecitato. Per non incidere sulla rigidezza dell'intero telaio è stato deciso di lasciare come pezzo intero il cannotto di sterzo (fondamentale per un'accettabile rigidezza) e la parte posteriore, in cui viene scaricata forza che arriva dal forcellone posteriore, il quale risulta un punto critico in tutte le configurazioni dell'analisi strutturale. La parte posteriore verrà realizzata mediante SLM, poiché soggetta a più sollecitazioni: la forza proveniente dai poggiapiedi e la forza scaricata dal leveraggio, proveniente dal mono.

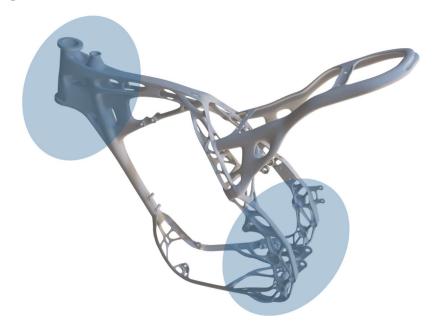


Figura 6-2 Zone di maggiore sollecitazione

Queste due parti saranno i componenti più grandi e per tale motivo sono parti le cui dimensioni fanno da cardine per trovare un macchinario adeguato alla realizzazione.

Utilizzando le due tecnologie EBM e SLM si è pensato di costruire il componente con i macchinari aventi volumi di lavoro tra i più grandi in commercio per le due tecnologie a letto di polvere. È stato scelto l'Arcam Q20 Plus per EBM e SLM®500 per la tecnologia laser. Basandosi sulle dimensioni delle zone di lavoro, è stato suddiviso il telaio rispettando i requisiti tecnici

spiegati nel paragrafo precedente. È stato riprogettato il componente in modo da poter essere saldato con facilità e in maniera adeguata. Dopo diverse prove per la configurazione migliore che soddisfi il maggior numero di parametri si ha il modello finale diviso considerando l'ingombro macchina.

Nella figura 6-3 sono raffigurati i vari componenti divisi del telaio, elencati in tabella 6-1.

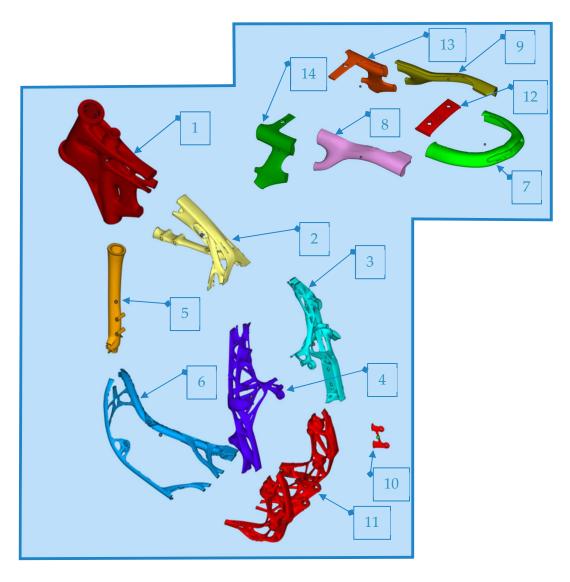


Figura 6-3 Suddivisione dei componenti

Numero pezzo	Colore	Nome
1	Granata	Cannotto sterzo
2	Crema	Monotrave
3	Turchese Chiaro	Troncone DX
4	Viola	Troncone SX
5	Oro vivo	Serb. Olio
6	Blu Dodger	Sottostruttura
7	Verde	Punta Posteriore
8	Glicine	Telaietto SX
9	Ecrù	Telaietto DX
10	Rosso	Freno
11	Rosso	Mono
12	Carminio	Centro-sella
13	Ocra	Intra-telaietto DX
14	Verde Foresta	Intra-telaietto SX

Tabella 6-1 Elenco dei componenti

6.2 Workflow per configurazione finale

Sono state eseguite diverse prove in modo da trovare la configurazione tale da soddisfare i parametri di costruzione.

Di seguito viene rappresentata un workflow del ciclo attuato per la realizzazione finale del componente

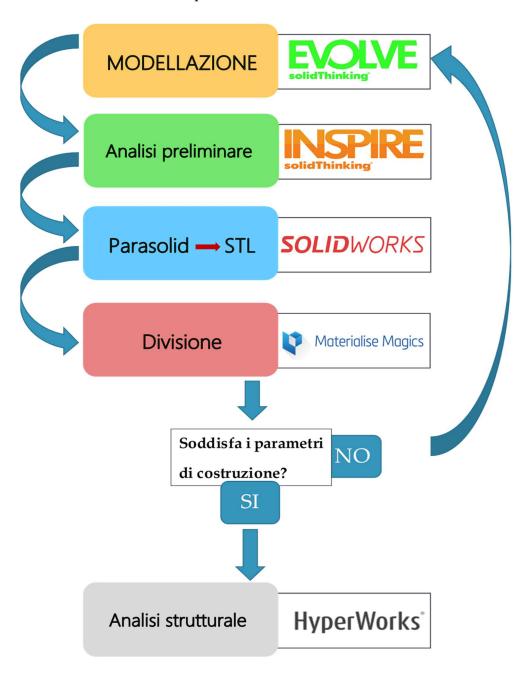


Figura 6-4 Workflow

I parametri di costruzione tenuti in considerazione sono:

Parametri di Design per l'Additive Manufacturing

- Evitare di creare un numero elevato di supporti, specialmente nelle zone interne del pezzo;
- Avere una distribuzione del calore più omogenea ed uniforme possibile;
- Realizzare i fori in maniera ottimale garantendo il mantenimento della concentricità di essi;

Parametri di saldatura

- Realizzare sezioni più regolari possibili nelle zone da saldatura;
- Realizzare componenti per avere un cordone di saldatura più omogeneo possibile;
- Consentire una buona accessibilità nella zona di giunzione per la saldatura;

Tabella 6-2 Parametri di costruzione

Il design è stato creato in ambiente SolidThinking Evolve, passando per il software Inspire per una prima analisi preliminare, è stato importato in ambiente Solidworks per adattarlo al software Magics in cui è stato diviso per confrontarlo con i parametri tenuti in considerazione.

Una volta trovata la giusta configurazione, l'ultimo passo è stato l'analisi FEM.

Le analisi strutturali sono state modellate ed effettuate utilizzando il software Hypermesh (come preprocessore) e il solutore Optistruct mentre i risultati sono stati studiati in Hyperview.

6.3 CONFIGURAZIONE OTTIMALE

Nelle figure sottostanti è presente l'ultima configurazione del componente, ottimizzato per i parametri di costruzione secondo le regole di Design per Additive Manufacturing che soddisfa i requisiti progettuali.

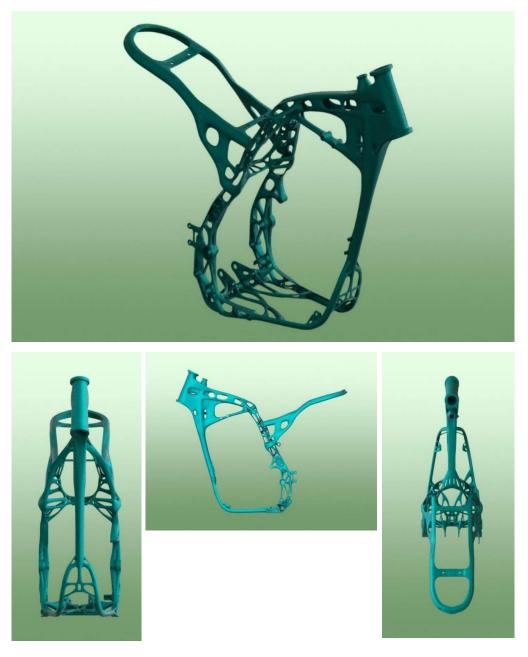


Figura 6-5 Configurazione finale

Caratteristiche				
Materiale	Ti-6Al-4V			
Peso	16,001	kg		
Volume	3630,44	cm^3		
Ingombro massimo	31,5 * 108,4 * 108,7	cm		

Tabella 6-3 Caratteristiche della configurazione finale

6.4 ANALISI FEM

6.4.1 Modellizzazione

Ultimato il modello viene trasferito in ambiente HyperWorks per effettuare l'analisi delle rigidezze, così da poter confrontare i risultati con l'analisi effettuata per il vecchio telaio. La complessità geometrica del componente e le sue dimensioni hanno portato a diverse problematiche di gestione degli elementi. Attraverso il software si è cercato di risolvere gli errori in fase di fixing in seguito all'importazione del file .step con l'utilizzo di appositi tools per la pulitura della geometria, come Autocleanup o riparazioni manuali per identificare le superfici. Una volta identificato il solido lo step successivo è stato quello di preparare la mesh. È stata scelta una mesh volumetrica di elementi tetragonali con dimensione media dell'elemento di 5 mm.



Figura 6-6 Parametri del pannello Tetramesh

A causa della complessità dell'elemento non è stato possibile infittire la mesh nei fori usando Curvature e Proximity, in modo da migliorarne la qualità.

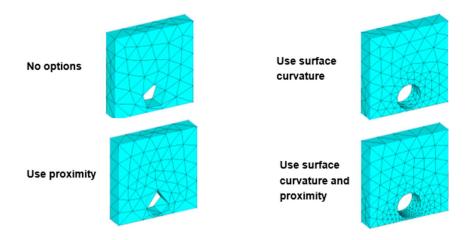


Figura 6-7 Parametri Curvature e Proximity

Questa scelta ha portato comunque al conseguimento di una corretta validazione e modellazione.

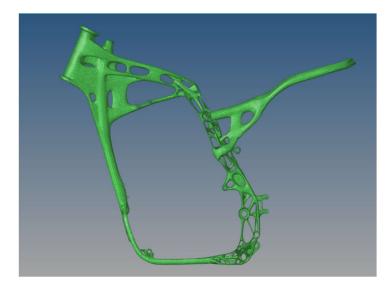


Figura 6-8 Creazione della Tetramesh

In tabella sono riportati i dati relativi al numero di nodi ed elementi creati.

Tipologia	Quantità
Nodi	69628
Elementi	228094

Tabella 6-4 Numero di nodi ed elementi creati

6.4.2 Setup Analisi

Per lo studio della rigidezza è stata seguita la procedura descritta nel libro di Vittore Cossalter [19]: in primis è fondamentale integrare la rigidezza data dal motore. Per fare questo è stato creato un punto indipendente al quale sono state collegate le superfici dei fori di attacco, definiti come nodi dipendenti, mediante collegamenti di tipo rigido RBE2.

La posizione del baricentro del motore è stata collegata in posizione mediana della culla del telaio.



Figura 6-9 Rappresentazione Connessione rigida del motore

Dopo aver creato il relativo load-collector dei vincoli (SPC) questi sono stati applicati in corrispondenza di appoggio dei piedi del motociclistica, è stato scelto di collegare ad un nodo indipendente le superfici dei perni dei poggiapiedi, bloccando tutti i gradi di libertà. Stesso procedimento viene fatto per il perno del forcellone.

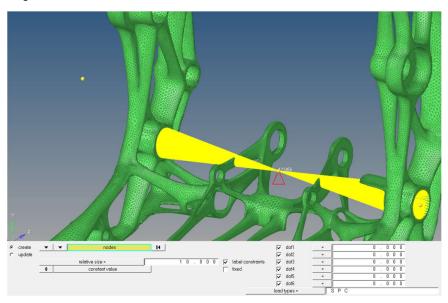


Figura 6-10 Vincolo poggia piedi

Viene scelta la proprietà del modello. Questa indicazione è utile a Hypermesh per capire la formattazione dell'entità per il solutore. Per Optistruct un componente può essere formato in PSHELL o PSOLID.[27]

- PSHELL: si definiscono le superfici, il materiale e lo spessore.
- PSOLID: si definisce un elemento solido e il materiale.

Per il telaio in esame è stata scelta la rappresentazione PSOLID.

Il materiale è il TI64 e le proprietà prese in considerazione sono elencate in tabella 6-5.

TI64		
E	116500	Mpa
Nu	0,31	
Q	4.41e-09	Tonn/mm ³

Tabella 6-5 Proprietà del materiale inserite nel software

Le condizioni di carico sono le stesse descritte ampiamente nel capitolo 5, con tre tipi di rigidezze da analizzare: torsionale, laterale, flessionale.

Dopo aver creato i load-steps relativi a tutte le condizioni di carico, il modello è quindi pronto per essere lanciato in Optistruct.

Per la **Rigidezza Torsionale**, si ricava la freccia massima δ , conoscendo la distanza dal centro del cannotto di sterzo si trova l'angolo di massima torsione.

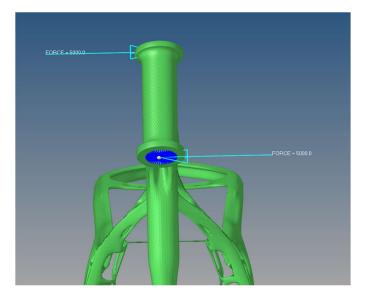


Figura 6-11 Forza applicate per la rigidezza torsionale

Grazie alle equazioni 2 e 3 si trova la rigidezza torsionale:

$$k = \frac{M}{\alpha}$$

$$\frac{\delta}{\overline{AO}} = \tan \alpha$$

 $\overline{AO} = 100 \ mm;$

Per la **Rigidezza Laterale** viene applicata una forza di 1 kN lungo l'asse normale al cannotto di sterzo, in un nodo indipendente collegato alla superficie del cannotto.

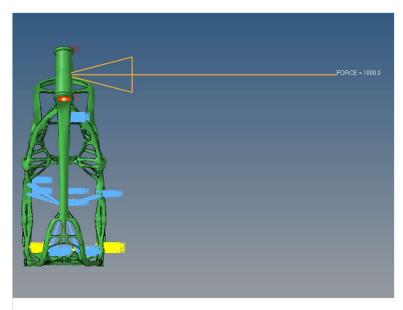


Figura 6-12 Forza applicate per la rigidezza laterale

Per la **Rigidezza Flessionale** viene applicata la medesima forza lungo l'asse del cannotto.

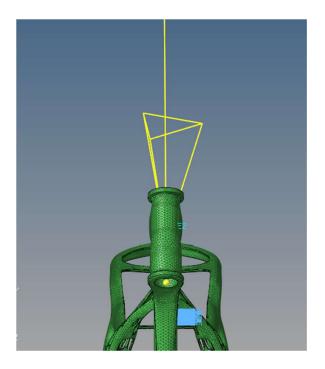


Figura 6-13 Forza applicate per la rigidezza flessionale

6.4.3 Risultati Analisi Rigidezze

Nella figura 6-14 sono stati riportati i plot degli spostamenti massimi. Gli spostamenti sono espressi in mm, le forze agenti sugli elementi tetragonali in N.

Risultati simulazione rigidezza

	Torsionale	Flessionale	Laterale
Forza/momento	1 kNm	1 <i>kN</i>	1 <i>kN</i>
Freccia/angolo	0,85 mm	0,642 mm	0,828 mm
	0,48°	0,042 111111	0,020 11111
Rigidezza	2,08 ^{kNm} / _°	$1,55 \frac{kN}{mm}$	$1,20 \frac{kN}{mm}$

Tabella 6-6 Risultati simulazione rigidezza

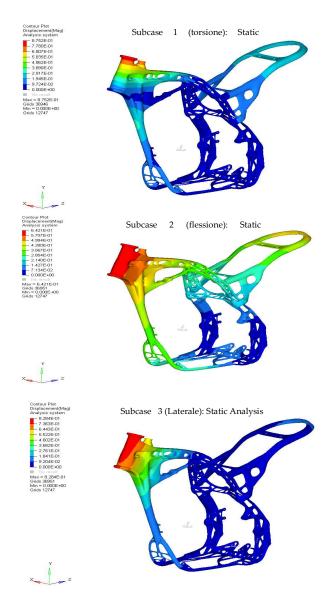


Figura 6-14 Risulati Rigidezze

6.5 Messa in Macchina

Si procede alla disposizione dei componenti nel volume di lavoro. Si è optato per i macchinari con volume di lavoro più grande in commercio per ridurre al minimo i job.

6.5.1 Macchinari utilizzati

Per EBM la scelta è caduta sulla Arcam Q20 plus, nella figura sono elencate le specifiche tecniche ed evidenziato il volume di lavoro. [13]



Figura 6-15 Arcam Q20 Plus

La dimensione delle particelle della polvere Ti6Al4V è in un range tra $45 \div 100 \,\mu m$. Le proprietà meccaniche delTi6Al4V realizzato con un macchinario Arcam sono elencate in tabella 6-7.

	ArcamTi6Al4V Typical
Yield Strength (Rp 0,2)	950 MPa
Ultimate Tensile Strength (Rm)	1020 MPa
Elongation	14%
Reduction of Area	40%
Fatigue strength* at 600 MPa	>10,000,000 cycles
Rockwell Hardness	33 HRC
Modulus of Elasticity	120 GPa

Tabella 6-7 Proprietà Meccaniche Arcam Q20 Plus

Seguendo lo stesso criterio di ricerca si è optato per SLM®500 per rappresentare la tecnologia laser.[28]



Figura 6-16 Proprietà Meccaniche SLM®500

Le caratteristiche meccaniche del materiale variano in base alla potenza del laser, il data sheet del titanio è stato preso direttamente dal sito dell'azienda SLM considerando una potenza del fascio laser di 400 W.

	SLM 500
	Layer thickness 30
	micron, 400 W
Yield strenght (Rp 0,2)	1170 MPa
Ultimate Tensile	1289 MPa
Strenght (Rm)	
Elongation	9%
Reduction of Area	29%
Vikers Hardness	362 HV10
Modulus of Elasticity	117 GPa

Tabella 6-8 Proprietà Meccaniche SLM®500

6.5.2 Generazione dei supporti

Le strutture di supporto sono una parte fondamentale per il processo AM, e il loro design non è una semplice decisione. Da un lato, queste strutture sono fondamentali per sostenere alcune zone del componente, dall'altro, i supporti sono indesiderati. La realizzazione dei supporti causa un aumento del tempo di lavorazione e del materiale utilizzato, inoltre la loro rimozione aggiunge un processo, ma vincola maggiormente la parte. Lo scopo primario è ridurre gli stress termici residui generati durante la fase di solidificazione. Per la tecnologia a letto di polvere e soprattutto per il processo laser, l'ampio gradiente termico generato durante il processo richiede un grande utilizzo delle strutture di supporto, al fine di evitare distorsioni nel componente.

Il software Materialise Magics genera automaticamente queste strutture, seguendo un algoritmo che calcola per ogni layer le aree non supportate e calcola la necessità di strutture di supporto basandosi su varie condizioni come l'area totale, il cambiamento di area sotto il layer e l'interferenza con la parte. È compito però del progettista essere in grado di posizionare manualmente i supporti, secondo le sue conoscenze ed esperienza, al fine di ridurre materiale aggiuntivo o rinforzare, dove è necessario, l'intera struttura.

Sono disponibili diversi tipi di supporti: [17]

- Point support;
- Web support;
- Line support;
- Block support;
- Countour support;

Il contatto tra le strutture di supporto e le parti può essere a punti, a linee o aree a seconda della forza di supporto. Il punto di contatto costituisce la parte più debole della struttura, garantendo una facilità di rimozione durante il post processo mediante l'utilizzo di strumenti meccanici o fisici.

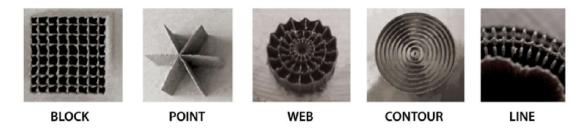


Figura 6-17 Tipologie di supporto

Per l'uso dei vari tipi di supporto esistono delle guide generali. Il supporto a blocchi (block support) è utilizzato per geometrie piene, mentre il supporto a linea o a punti è utilizzato per le aree più piccole.

Poiché le tecnologie utilizzate sono basate su differenti parametri sono stati scelti tipi differenti di supporto per ogni tecnologia.

6.5.2.1 Supporti per EBM

Grazie ad una migliore compattazione delle polveri, dovuta al preriscaldamento dell'area di lavoro, la tecnologia EBM permette di avere strutture di supporto non ancorate alla piattaforma, ma direttamente sulla polvere. I piccoli gradienti termici danno la possibilità di progettare la struttura di supporto più leggera, in modo da facilitarne la rimozione.

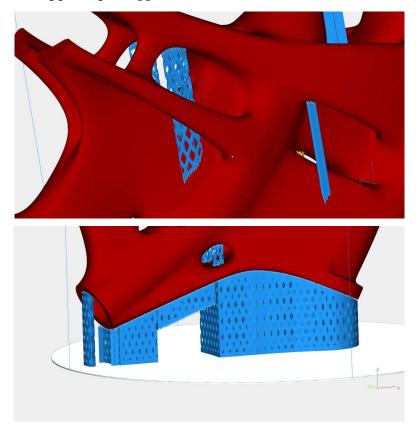


Figura 6-18 Supporti EBM

Per tale motivo lo scheletro della struttura scelta presenta delle perforazioni a diamante, con caratteristiche elencate in tabella 6-9.

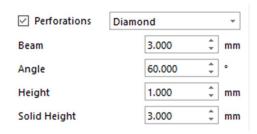


Tabella 6-9 Parametri supporto

A titolo di esempio è stato considerato il componente #1 (cannotto di sterzo) per entrare maggiormente nel dettaglio per le scelte delle strutture di supporto. L'immagine 6-19 presenta tre diversi tipi di strutture.

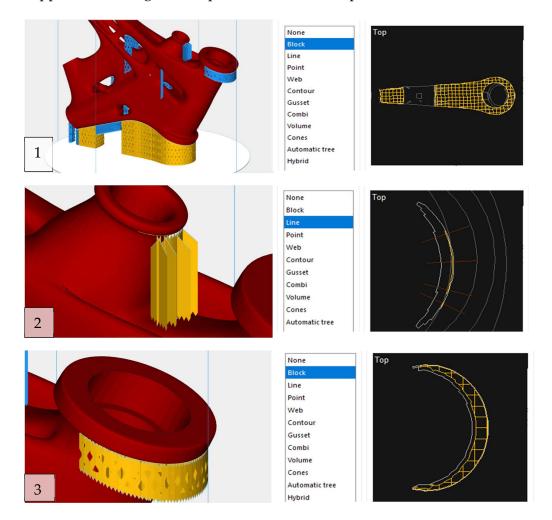


Figura 6-19 Tipologie di supporto

- 1. Per sostenere l'intero componente è stata scelta una struttura a blocco, che ricopre l'intera area sottostante.
- 2. Per le parti del componente in cui non è necessario un'estesa area di sostegno, l'ideale è il supporto lineare. Nel caso in esempio il supporto poggia direttamente sul pezzo. Questo provoca un peggioramento della qualità superficiale, ma è il giusto compromesso per una migliore fedeltà geometrica.

3. La struttura a blocco in figura parte direttamente dalla polvere. La lunghezza minima per garantire la stabilità è 20 mm.

6.5.2.2 Supporti per SLM

I supporti per SLM sono ancorati alla piattaforma di lavoro, sono stati progettati considerando il più rilevante compito di ridurre gli stress termici lungo il componente. Per tale motivo, la struttura risulta essere più spessa rispetto quella utilizzata per EBM. È stata utilizzata una perforazione che sia utile alla facile rimozione, non compromettendo la stabilità.

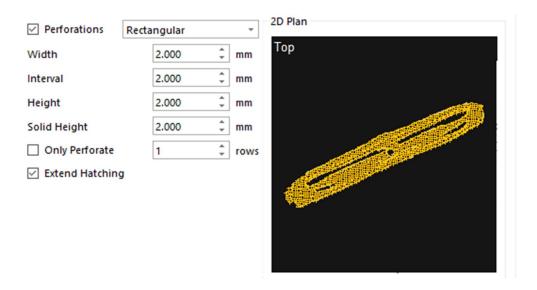


Figura 6-20 Parametri di supporto

La struttura maggiormente utilizzata è quella a blocco, come a titolo d'esempio è illustrata nella figura 6-20 per il componente #7.

Un ruolo importante assume l'orientamento del pezzo al fine di evitare una massiccia aggiunta di strutture di supporto. La figura 6-21 mostra differenti orientamenti e il differente numero di supporti da inserire per il medesimo componente.

Gli orientamenti che portano ad una quantità minima di supporti comportano tempi di processo più lunghi, poiché in questi casi le dimensioni maggiori sono più o meno allineate lungo la direzione di costruzione. L'orientamento scelto per il componente #7 è il primo mostrato in figura, in cui viene ridotta al minimo l'introduzione di supporti.

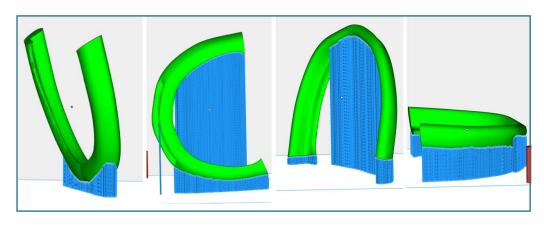


Figura 6-21 Orientamento del componente

6.5.3 Particolari su modifiche per DfAM

Per seguire le regole di Design per l'Additive Manufacturing, sono stati pensati alcuni accorgimenti per ridurre il numero di supporti. Come è stato detto nel capitolo 2, i fori con asse orizzontale con diametro maggiore di 8 mm richiedono un supporto.

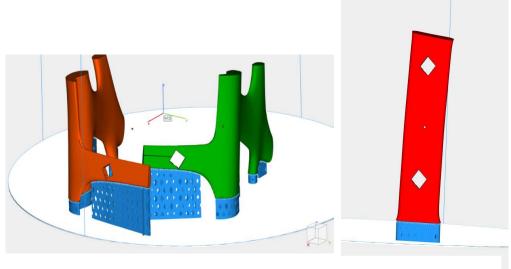


Figura 6-22 Modifiche secondo DfAM

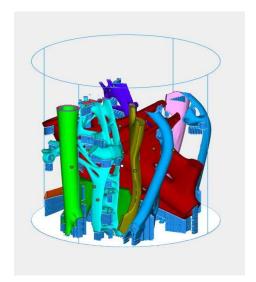
Una volta scelto l'orientamento dei componenti, si è analizzata la possibilità di cambiare il design per ridurre il numero di supporti. In particolare, per i pezzi #12 #13 #14 è stato cambiato il design dei fori, non essendo la loro forma un vincolo per il collegamento. Per tale motivo, è stata scelta una forma rombica per avere una struttura autoreggente per il foro.

6.5.4 Orientamento dei componenti

La scelta dell'orientamento è partita disponendo i componenti più sollecitati in due differenti macchinari: il componente #1 è stato posizionato e orientato nell'area di lavoro della macchina EBM, mentre il componente #11 nella area di lavoro della SLM.

6.5.4.1 Arcam EBM Q20 plus

Come già detto nei capitoli precedenti, i supporti per la tecnologia EBM non hanno la necessità di partire dalla piattaforma di lavoro. Il processo di preriscaldamento compatta maggiormente le polveri nel volume di lavoro e
questo consente di realizzare strutture di supporto partendo direttamente
dalle polveri. Sfruttando questa peculiarità, si è deciso di saturare l'intero
volume di lavoro del macchinario.



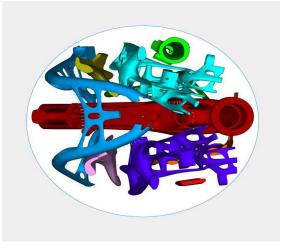


Figura 6-23 Messa in macchina

La disposizione e l'orientamento di pezzi sono stati pensati per rispettare le regole di Design for Additive Manufacturing, mentre per i supporti sono state rispettate le stesse regole elencate nel paragrafo 6.5.2. Considerando il volume di lavoro del macchinario e il volume dei pezzi, la tabella 6-10 riassume la percentuale di volume di ingombro dei componenti nel job. Per il calcolo del volume di lavoro viene considerata l'intera altezza disponibile.

Volume occupato

		2
Parti	$1,346 * 10^3$	cm^3
Supporti	30,535	cm^3
Totale	$1,377 * 10^3$	cm^3
Volume di lavoro	$3,541 * 10^3$	cm^3
Fattore di riempimento	3,76 %	

Tabella 6-10 Volume occupato

Un volume di lavoro più saturo consente di avere una migliore uniformità nello smaltimento del calore durante il processo, aspetto importante che porta a ridurre le possibili distorsioni dovute al raffreddamento. Per evitare possibili collisioni, tutti i pezzi sono distanziati tra loro di almeno 5 mm.

Nella tabella 6-11 vengono elencati i pezzi inseriti, in figura 6-24 ne vengono mostrati l'orientamento e la posizione.

Nome componente	Numero
Cannotto sterzo	1
Troncone DX	3
Troncone SX	4
Serb. Olio	5
Sottostruttura	6
Telaietto SX	8
Telaietto DX	9

Centro-sella	12
Intra-telaietto DX	13
Intra-telaietto SX	14

Tabella 6-11 Componenti in EBM



Figura 6-24 Orientamento in macchina EBM

6.5.4.2 SLM®500

All'interno dell'area di lavoro dell'SLM è stato inserito il componente #11, orientato verticalmente per ridurre al minimo l'apporto di strutture supplementari, ma che rimangono sempre tante. Una soluzione sarebbe stata quella di dividere ulteriormente il componente per una migliore posizione in macchina. Questa alternativa avrebbe però potuto compromettere il risultato dell'analisi strutturale, poiché risulta essere il componente con maggiore sollecitazione. Inoltre, la suddivisione di altri componenti avrebbe portato ad un ulteriore lavoro di saldatura per poterli assembleare. È stato quindi deciso di tenere il componente #11 intero, a scapito dell'elevato numero di supporti. La posizione verticale del componente ha permesso di non avere supporti lungo i fori di assemblaggio.

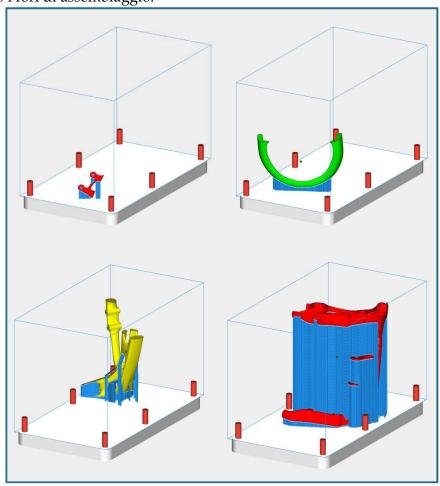


Figura 6-25 Orientamento in macchina SLM

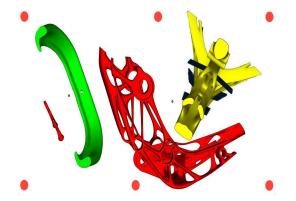
La tabella 6-12 mostra il volume totale occupato delle parti e il fattore di riempimento del macchinario. Per il volume di lavoro viene considerata l'intera altezza.

Volume	occupato
--------	----------

Parti	149,362	cm^3
Supporti	117,515	cm^3
Totale	266,877	cm^3
Volume di lavoro	51,100 * 10 ³	cm^3
Fattore di riempimento	0,52 %	

Tabella 6-12 Volume occupato

L'angolazione di tutti i componenti rispetto all'asse della piattaforma perpendicolare al movimento del recoater è necessaria al fine di rendere graduale il contatto tra la lama e lo strato solidificato, poiché superfici parallele alla lama potrebbero causare forti impatti e conseguenti deformazioni dello strato appena solidificato, oltre che inceppamenti della lama durante il suo movimento, con conseguente sospensione del job.



Numero
11
7
2
10

Figura 6-26 Componenti in SLM

6.6 Post processing

Una delle prime operazione dopo il completamento del ciclo di produzione è la rimozione dei componenti dal letto di polvere e dal piano di costruzione. Questo include la rimozione fisica delle strutture di supporto e il recupero delle polveri.

A titolo di esempio la figura mostra una struttura di supporto e la sua rimozione per un pezzo del telaietto posteriore.

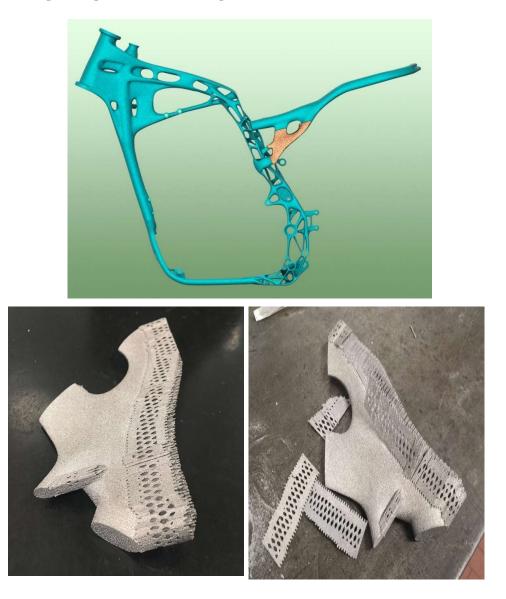


Figura 6-27 Realizzazione componente in EBM

Il recupero della polvere e il suo riciclo richiedono diverse procedure di filtraggio, in modo da essere adatte a successivi lavori. La buona progettazione delle strutture di supporto consente una facile rimozione di questi dal componente, mentre la rimozione dalla piattaforma viene generalmente eseguita tramite elettroerosione, fresatura o sega a nastro. Come già scritto nel Capitolo 2, nel processo SLM sono presenti nel componente tensioni residue, dovute agli elevati gradienti termici che si verificano in macchina. Risulta, dunque, opportuno eliminare queste tensioni prima di procedere al distacco del componente dalla piattaforma, viene quindi effettuato un trattamento di stress relieving per i componenti realizzati tramite PBF-L. Questo processo termico, che agendo solo sugli stati tensionali e non modificando la microstruttura, favorisce la stabilità geometrica e dimensionale del componente. La distensione del titanio può avvenire utilizzando varie combinazioni di temperatura-tempo, ma la riduzione delle tensioni è sostanzialmente legata alla temperatura a cui viene eseguito il trattamento. Eliminate le tensioni residue, è possibile procedere alla separazione del pezzo dalla piattaforma.



Figura 6-28 Componente As-built

Capitolo 7

ANALISI DEI RISULTATI

Nel presente Capitolo sono stati raccolti i dati relativi alle analisi strutturali, al fine di avere un confronto tra il telaio originale e il modello realizzato per AM.

I dati raccolti riguardano gli spostamenti massimi agenti sugli elementi tridimensionali di ogni configurazione del componente nella condizione di inviluppo delle 3 rigidezze studiate.

Sarà eseguito un confronto finale tra la soluzione del telaio originale e quello riprogettato, evidenziandone le differenze per valutare l'efficacia e la convenienza di una riprogettazione in Additive Manufacturing, stabilendo se la riprogettazione attuata sia stata valida al fine del perseguimento degli obiettivi preposti nell'Introduzione di questo lavoro di Tesi.

7.1 Analisi strutturale del modello finale

Seguendo le configurazioni descritte nel capitolo 5 per la simulazione dinamica della struttura in vari casi di uso off-road, è stata realizzata l'analisi strutturale del telaio finale.

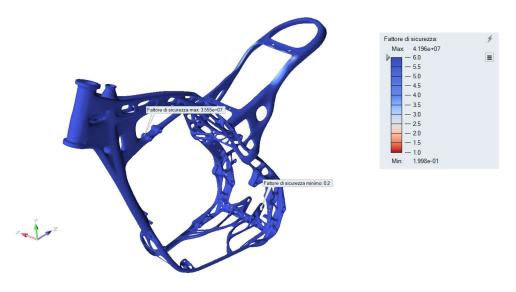


Figura 7-1 Fattore di sicurezza

La figura 7-1 mostra il risultato del fattore di sicurezza nel caso 1 della configurazione finale. L'unica parte ad essere al di sotto di un coefficiente di sicurezza 2 è un punto particolare nella zona di giunzione con il bilanciere (figura 7-2), questo risultato può essere dato da un problema durante la costruzione automatica della mesh realizzata dal software.



Figura 7-2 Particolare della simulazione

Analisi dei risultati

Tutto il resto della struttura si trova con un coefficiente superiore a 2. Questo problema si riscontra anche con gli altri casi in esame.

Nella tabella 7-1 vengono riassunti i risultati delle tensioni di Von Mises dei vari casi presi in esame. Tali valori sono acquisiti non considerando i punti particolari.

Risultati massima tensione	Von Mises [Mpa]
Caso 1 atterraggio con 2 ruote	430
Caso 2 – Frenata	365
Impatto frontale	400
Caso 3 atterraggio con ruota posteriore	377
Caso 4 atterraggio con ruota anteriore	207

Tabella 7-1 Risultati simulazione tensione massima

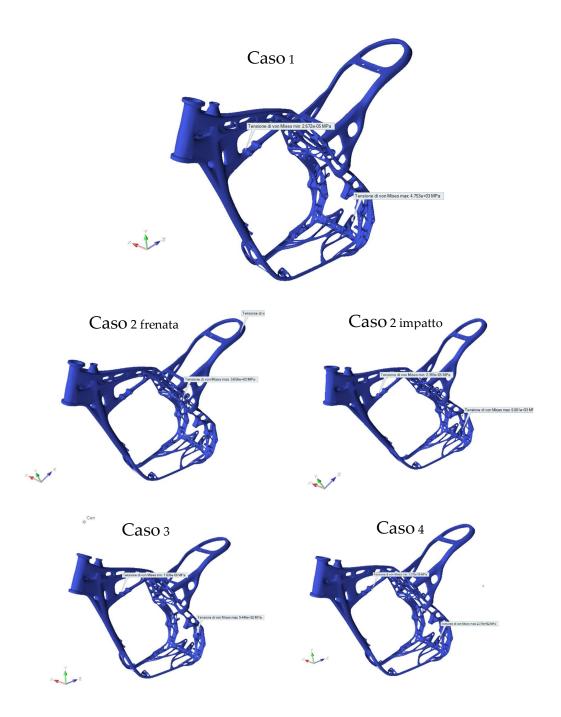


Figura 7-3 Risultati simulazione

Analisi dei risultati

7.2 CONFRONTO

Per completare il progetto viene effettuato un confronto del telaio riprogettato con il telaio originale.

7.2.1 Confronto rigidezze

Vengono ripresi dal capitolo 3 e 6 i risultati delle analisi delle rigidezze dei due modelli.

Rigidezza	Modello originale	Modello AM
Torsionale	0,38 ^{kNm} / _°	2,08 ^{kNm} / _°
Flessionale	$0,37 \frac{kNm}{mm}$	1,55 $^{kN}/_{mm}$
Laterale	$0,24 \frac{kNm}{mm}$	$1,20 \frac{kN}{mm}$

Tabella 7-2 Confronto rigidezze modello originale, modello AM

Dalla tabella si evince un notevole guadagno in termini di rigidezza. Durante la fase di riprogettazione è stato scelto di ottenere un elevato aumento di rigidezza, adattando il nuovo telaio anche per un uso stradale, evitando così fenomeni di instabilità che si verificano a velocità elevate.

7.2.2 Peso

In Tabella 7-3 sono riportati i valori espressi in kg del peso totale del nuovo componente messo a confronto con quello originale.

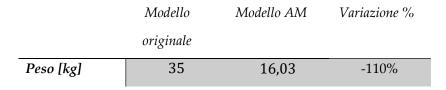


Tabella 7-3 Confronto peso modello originale, modello AM

Come si evince dalla tabella si ottiene una significativa riduzione del peso della struttura. Questo risultato è ottenuto grazie al cambio di materiale e alla ottimizzazione. Volendo fare un confronto, considerando solo

l'ottimizzazione del telaio, considerando lo stesso materiale la riduzione di peso è del 20%.

Capitolo 8

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Alla luce di tutte di tutte le considerazioni tratte dai precedenti Capitoli di questo lavoro di Tesi emerge che, attualmente, l'impiego dell'Additive Manufacturing all'interno del panorama industriale mondiale trova sempre maggiori giustificazioni.

La riprogettazione per AM della struttura portante di un motoveicolo, oggetto di studio su cui si è fondato il presente lavoro di Tesi, ha portato ad avere una grande libertà di progettazione ed ha permesso il perseguimento di due grande vantaggi:

- Notevole aumento di rigidezza;
- Diminuzione della massa finale pari a circa il 110% rispetto all'originale;

Aspetto importante del lavoro di tesi è stata la visione di entrambe le tecnologie SLM e EBM come tecnologie complementari e non come competitrici. Questa decisione ha portato alla suddivisione del telaio in funzione dei vantaggi delle due tecnologie, guardando anche l'aspetto produttivo oltre a quello progettuale.

Sebbene durante il lavoro di tesi non si sia riuscito a completare l'analisi strutturale, considerando il telaio come un insieme di componenti saldati tra di loro, si è cercato comunque di dedurre il possibile comportamento meccanico valutando il modello come unico componente.

Il progetto lascia in eredità largo spazio a degli sviluppi futuri per la verifica della fattibilità. Poter effettivamente procedere alla fase di saldatura porta ad uno studio sull'adesione di due componenti realizzati con tecnologie differenti, considerando la diversa la struttura cristallografica del titanio realizzato in EBM e SLM.

Un secondo obiettivo è quello di realizzare, con le tecnologie additive, un modello full-scale in accordo con le specifiche e con gli obiettivi preposti, in modo da poter effettuare test in banco prova e un confronto con in risultati delle simulazioni eseguite in questo progetto di tesi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. V, "Consumo e comunicazione: merci, messaggi e pubblicità nelle società contemporanee," 2002.
- [2] D. Gu, Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. 2015.
- [3] C. T. Kelbassa I, Wohlers T, Quo vadis, laser additive manufacturing? J. 2012.
- [4] N. K. et al Mazumder J, Choi J, The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components. 1997.
- [5] M. M. Palčič I, Balažic M, Potential of laser engineered net shaping (LENS) technology. 2009.
- [6] M. Munsch, M. Schmidt-Lehr, Matthias, and E. Wycisk, "Additive Manufacturing of Automotive Components," vol. 2, no. March, pp. 1– 31, 2018.
- [7] P. F. Flaviana Calignano, Diego Manfredi, Elisa Paola Ambrosio, Sara Biamino, Mariangela Lombardi, Eleonora Atzeni, Alessandro Salmi, Paolo Minetola, Luca Iuliano, "Overview on Additive Manufacturing Technologies," *Proc. IEEE*, vol. Vol. 105,.
- [8] and J. R. T. Kurzynowski, E. Chlebus, B. Kuz'nicka, "Parameters in

- selective laser melting for processing metallic powders," SPIE, 2012.
- [9] C. Hauser, "Direct selective laser sintering of tool steel powders to high density. Part A: Effects of laser beam width and scan strategy," *Proc.* 14th Solid Free. Fabr. Symp, 2003.
- [10] M. M. Van Elsen, "Complexity of selective laser melting: A new optimization approach," 2007.
- [11] and W. J. R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang, "Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process," 2011.
- [12] L. Yang et al., Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. 2017.
- [13] "Arcam EBM.".
- [14] N. G. and M. C. Leu, *Additive manufacturing: Technology, applications and research needs*. 2013.
- [15] M. Galati, P. Minetola, and G. Rizza, "Surface roughness characterisation and analysis of the Electron Beam Melting (EBM) process," *Materials (Basel).*, vol. 12, no. 13, 2019.
- [16] J. W. H. Tang, Review on metals additively manufactured by SEBM. 2016.
- [17] J. O. Milewski, Springer Series in Materials Science 258 Additive Manufacturing of Metals. 2017.
- [18] AMPower, "Additive Manufacturing of Automotive Components," vol.2, no. March 2018, pp. 1–31, 2018.
- [19] D. W. Rosen, "Design for Additive Manufacturing: A Method to Explore Unexplored Regions of the Design Space," pp. 402–415.
- [20] J. Kranz, "Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4," no. December 2014, 2015.

- [21] "Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Introduction," 2015.
- [22] J. J. Lewandowski and M. Seifi, "Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties," 2016.
- [23] ISO/TC261/SC and ISO/DIS52911-1:2017(E), "Additive manufacturing

 Technical Design Guideline for Powder Bed Fusion Part 1: Laser-based Powder Bed Fusion of Metals," ISO 2017, 2017.
- [24] V. Cossalter, Motorcycles Dynamics. 2008.
- [25] Tony Foale, Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science. 2002.
- [26] A. De and N. Do, "Structural Evaluation of a Motorcycle Frame," no. October, 2014.
- [27] Altair, "Practical Aspects of Finite Element Simulation."
- [28] "SLM solution.".
- [29] H. Wang, B. Zhao, C. Liu, C. Wang, X. Tan, and M. Hu, "A comparison of biocompatibility of a titanium alloy fabricated by electron beam melting and selective laser melting," *PLoS One*, vol. 11, no. 7, pp. 1–19, 2016.