

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Dipartimento di ingegneria "Enzo Ferrari"

Corso di laurea magistrale in Ingegneria del Veicolo

**Riprogettazione di un portamozzo mediante
progettazione generativa: confronto con le
soluzioni tradizionali**

Relatore accademico:

Prof. Francesco Leali

Relatore aziendale:

Ing. Andrea Burzoni

Tesi di laurea di:

Francesco Sacchetto

Matricola:

185858

Anno Accademico 2025/2026

Abstract

La tesi affronta la riprogettazione di un portamozzo della Formula Renault 3.5 mediante progettazione generativa, con lo scopo poi di essere sfruttata usando l'additive manufacturing e di valutarne le potenzialità rispetto agli approcci tradizionali. Il lavoro analizza lo stato dell'arte del componente concentrandosi sulla geometria, materiali e tecnologie produttive. Successivamente si utilizza un approccio sistematico, sviluppando una lista di requisiti basati sull'esperienza progettuale di portamozzi esistenti. Si prosegue con la definizione di vincoli progettuali e le condizioni di esercizio, derivate dai carichi che si ricavano dalle manovre di gara. Sulla base dei dati raccolti, viene usato il software CAD "Creo Parametric 12" con l'estensione "Generative shape design" per creare una geometria ottimizzata; questa viene poi validata con un'analisi FEM su "Creo Simulate". Il confronto si basa sulla valutazione di parametri strutturali, prestazionali e infine dei costi. L'obiettivo è identificare il potenziale della progettazione generativa nel contesto motorsport, mostrando geometrie complesse che si possono ottenere, con i vantaggi e svantaggi rispetto alle soluzioni tradizionali. Il lavoro cerca di dare un contributo all'innovazione tecnologica nel settore Motorsport ad alte prestazioni.

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Progettazione generativa nel motorsport	7
1.2	Il portamozzo: Lo stato dell'arte	8
1.2.1	Geometria del componente	9
1.2.2	Materiali	13
1.2.3	Tecnologie produttive	17
2	Definizione del progetto	21
2.1	Pianificazione del progetto	21
2.2	Lista dei bisogni	24
2.3	Componente di riferimento	26
2.4	Analisi delle configurazioni esistenti	27
2.4.1	Portamozzo saldato	27
2.4.2	Portamozzo fresato dal pieno	28
2.5	Geometria di partenza	29
2.6	Vincoli progettuali	30
2.7	Requisiti di progetto	31
2.8	Analisi delle condizioni di esercizio	34
2.8.1	Carichi	35
2.8.2	Vincoli	37
2.8.3	Integrazione al sistema gruppo ruota	37
3	Progettazione generativa	38
3.1	Introduzione alla progettazione generativa	38
3.1.1	Modellazione del volume di base	39
3.1.2	Preserved geometry	40
3.1.3	Condizioni al contorno	42
3.1.4	Impostazioni e criteri della generazione	43
3.1.5	Sensibilità al materiale	44
3.2	Generazione del componente	44
3.2.1	Ricostruzione della mesh	50
3.3	Validazione strutturale	54
3.3.1	Modello di analisi (FEM)	54
3.4	Analisi dei risultati (FEM)	57
3.4.1	Considerazioni finali	63

4	Discussione, conclusioni e sviluppi futuri	64
4.1	Sintesi del confronto	69
4.2	Conclusioni e possibili sviluppi futuri	71

Elenco delle figure

1	Schema sospensione Mercedes F1	8
2	Generazioni di sistema cuscinetti-mozzo (HBU).	11
3	Posizionamento pinza freno	12
4	Diagramma di Ashby	14
5	Leghe per L-PBF	15
6	Diagramma resistenza meccanica al variare della temperatura	16
7	Laser Powder Bed Fusion, L-PBF	19
8	Rsk	20
9	Design paradox	21
10	Technology S-Curve	22
11	Ciclo vita	23
12	Formula Renault	26
13	Portamozzo saldato	27
14	Portamozzo fresato	28
15	Gruppo ruota	29
16	Flusso di trasferimento delle forze	34
17	Volume di base	39
18	Sede cuscinetti	40
19	Fase iniziale della generazione	41
20	Progettazione generativa portamozzo con AlSi10Mg	45
21	Progettazione generativa portamozzo con Scalmalloy [®]	46
22	Sforzi manovre in "generative shape design" report 1	47
23	Sforzi manovre in "generative shape design" report 2	48
24	Generazione della geometria con Ti-6Al-4v	49
25	Problema di ricostruzione	50
26	Ricostruzione della mesh	50
27	Modellazione supporti condotti di raffreddamento	51
28	Portamozzo ottimizzato dettaglio 1	52
29	Portamozzo ottimizzato dettaglio 2	53
30	Modello FEM	54
31	Modello FEM rigid link e weighed link	56
32	Risultati analisi FEM	58
33	Risultati analisi FEM 2	59
34	Condizione di massimo sforzo	60
35	Condizione di massima deformazione	61

Elenco delle tabelle

1	Lista dei bisogni	24
2	Confronto tra configurazione saldata e configurazione fresata.	28
3	Lista dei requisiti.	32
4	Impostazione matrice di valutazione	33
5	Classificazione qualitativa dei carichi per manovra.	36
6	Fattore di sicurezza minimo per ogni manovra	57
7	Verifica fattore di sicurezza per AlSi10Mg	60
8	Verifica fattore di sicurezza per Scalmalloy®	60
9	Variazione di camber e toe	62
10	Confronto Massa dei diversi portamozzi	64
11	Confronto variazione di camber e toe	65
12	Confronto dei costi delle materie prime dei diversi portamozzi.	65
13	Costo dell'impianto e costo operativo orario per L-PBF	66
14	Costi indicativi delle principali operazioni di post-processing per componenti metallici stampati.	66
15	Intervalli di costo per componente metallico finito realizzato in additive manufacturing.	67
16	Sintesi di costo del processo L-PBF	67
17	Confronto dei tempi e dei costi di processo delle tecnologie produttive.	68
18	Principali strategie di riduzione del costo nell'additive manufacturing metallico [12].	68
19	Confronto finale delle varianti di portamozzo	70

1 Introduzione

1.1 Progettazione generativa nel motorsport

Il motorsport ha storicamente costituito uno degli ambiti più avanzati per lo studio e lo sviluppo di componenti ingegneristici ad alte prestazioni. La ricerca della prestazione chiede ai progettisti di sperimentare materiali, geometrie strutturali e processi produttivi al fine di aumentare le performance dei veicoli. Oltre agli scopi competitivi, i risultati possono essere poi utili per veicoli classici di tutti i giorni portando quindi anche uno sviluppo a fini commerciali.

Ciò che distingue di più questo settore è soprattutto la ricerca continua di ottimizzare quasi tutti gli aspetti di un componente, mentre nei veicoli classici si hanno maggiori attenzioni legate ai costi e al comfort, nelle competizioni l'obiettivo principale è la performance, attraverso l'ottimizzazione, con le uniche limitazioni date da regolamenti tecnici della categoria di competizione.

L'assenza dei compromessi, unita a bassi volumi di produzione, consente una progettazione di ogni elemento che forma il componente, con un'attenzione al dettaglio che difficilmente si riscontra in altri contesti. Nel motorsport gli obiettivi progettuali comuni sono la riduzione della massa, l'incremento della rigidità strutturale e l'integrazione funzionale di diversi componenti che possono svolgere funzioni diverse, ottenendo così un componente multifunzionale.

Le difficoltà nascono dal fatto che tali obiettivi possono essere in contrapposizione fra di loro. Diminuire la massa di un componente tende a ridurre la rigidità, la ricerca di ottenere una massa ridotta e, allo stesso tempo avere un'alta resistenza per conferire rigidità al componente è come si vuol dire una "coperta corta", a meno che non siano alleggerimenti mirati e studiati con un alto approfondimento. Proprio per questo problema il settore del motorsport adotta metodi di ottimizzazione capaci di lavorare su più requisiti contemporaneamente.

Tra questi si colloca la progettazione generativa, un approccio in cui la geometria del componente viene generata attraverso l'applicazione di forze, vincoli su un volume di materiale. Oltre a ciò utilizza parametri di produzione assegnati sempre dal progettista per rendere il componente efficacemente producibile. La metodologia sfrutta la libertà di forma resa disponibile dall'additive manufacturing (AM), tecnologia produttiva che negli ultimi anni ha riscosso particolare interesse non solo nel motorsport. La possibilità di realizzare geometrie complesse, difficilmente ottenibili con i metodi tradizionali, ha consentito di evolvere il pensiero ingegneristico.

Al giorno d'oggi la progettazione generativa viene maggiormente impiegata in vetture ad alte prestazioni, come le vetture monoposto a ruote scoperte o meglio conosciute con il nome vetture formula. Tra i componenti di una vettura formula il portamozzo risulta essere uno dei componenti maggiormente ottimizzati, ha un ruolo rilevante sia dal punto di vista strutturale che di performance, per questo motivo si cerca di massimizzare ogni sua caratteristica. Esso realizza il collegamento strutturale tra il mozzo ruota e gli elementi della sospensione e condiziona direttamente il comportamento dinamico della vettura, rappresentando uno dei casi in cui leggerezza, rigidità e integrazione funzionale devono essere il centro dell'obiettivo.

Visti i progressi dell'additive manufacturing durante gli ultimi anni, l'utilizzo di una progettazione generativa applicata alla riprogettazione di un portamozzo rappresenta lo scopo della tesi.

1.2 Il portamozzo: Lo stato dell'arte

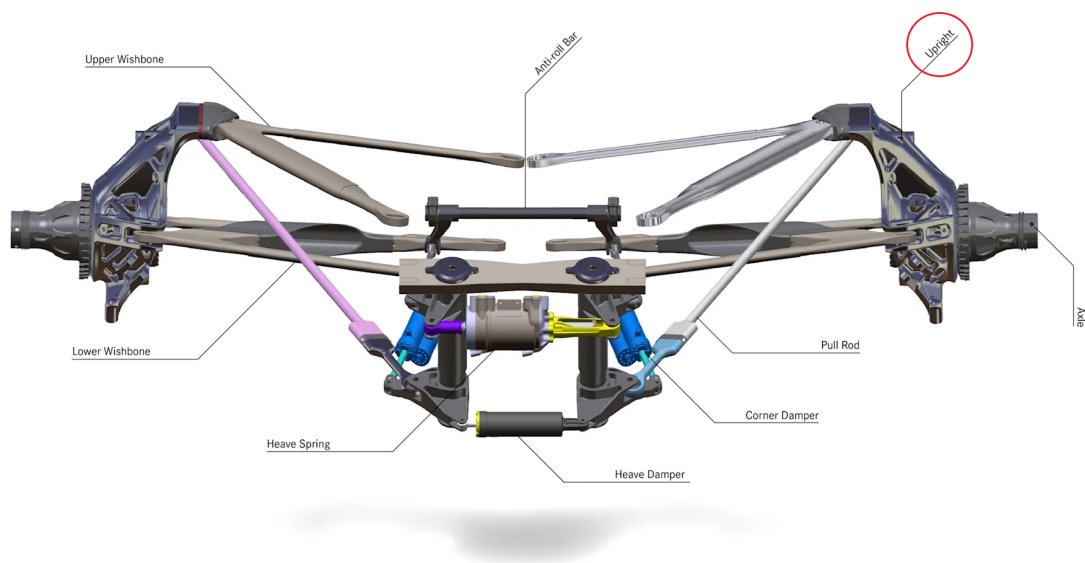


Figura 1: Schema sospensione Mercedes F1

Il portamozzo è un componente strutturale che ha la funzione di collegare le sospensioni al gruppo ruota. Attraverso il portamozzo i carichi generati dal contatto tra pneumatico e suolo, durante la marcia e le manovre dinamiche, vengono trasmessi al sistema delle sospensioni.

Esso è soggetto a uno stato tensionale complesso e tipicamente multiassiale, in cui si combinano sollecitazioni di trazione, compressione, flessione e torsione, spesso di

natura ciclica per via delle sollecitazioni che si ripetono durante un evento di gara. Tale condizione di esercizio comporta che il portamozzo sia uno dei componenti strutturali più critici della vettura.

Oltre alla criticità strutturale assume anche un'influenza sul comportamento dinamico del veicolo, il portamozzo è quindi un componente alla quale si affidano più obiettivi. La rigidità del componente deve essere sufficiente a mantenere l'assetto previsto anche in condizioni dinamiche quando la ruota è sotto carico. Inoltre il portamozzo fa parte del gruppo delle masse non sospese ovvero, quelle masse che non sono sostenute dalla sospensione. Queste masse seguono i profili stradali e determinano l'inerzia che la sospensione deve contrastare per mantenere l'aderenza, è quindi fondamentale mantenere una massa ridotta al fine di agevolare la sospensione a tale compito. Lo spazio in cui viene montato il portamozzo è imposto dal cerchio ruota, deve assicurare la rotazione con l'alloggiamento del mozzo sostenuto dai cuscinetti.

L'evoluzione del portamozzo accompagna quella dell'automobile e dei diversi sistemi di sospensione. Dai primi portamozzi realizzati in materiali grezzi, l'aumento delle velocità e delle sollecitazioni in gioco ha inevitabilmente imposto un maggiore sviluppo su più punti di vista. L'introduzione di sospensioni e pneumatici sempre più performanti ha così trasformato il componente in un elemento fortemente ottimizzato, nel quale la geometria, la scelta del materiale e la tecnologia produttiva seguono l'obiettivo aumentare le prestazioni senza diminuire la sicurezza, che rimane comunque un principio imprescindibile.

1.2.1 Geometria del componente

Oltre alla funzione strutturale, la geometria del portamozzo è determinata dalla necessità di integrare al proprio interno diversi elementi del gruppo ruota, ciascuno dei quali impone requisiti dimensionali e un posizionamento specifico.

Prima di progettare un portamozzo si ha bisogno dello schema sospensivo della vettura, tipicamente le vetture formula montano una sospensione di tipo double wishbone, quindi avente due triangoli uno superiore e uno inferiore ai quali si collega il portamozzo. Definito lo schema sospensivo e quindi i punti cinematici della sospensione, il portamozzo integra oltre al sistema cuscinetti-mozzo, come già accennato in precedenza, anche la pinza freno con eventualmente anche i condotti di raffreddamento dell'aria per il disco freno.

In sintesi gli elementi che bisogna considerare durante la progettazione sono divisi nella sospensione e nel gruppo ruota.

Ciascuno dei gruppi condiziona una zona distinta della geometria, in sostanza possiamo dire che la geometria del portamozzo deriva principalmente dagli elementi che ha attorno.

Punti cinematici e parametri d'assetto - La posizione dei punti di attacco alla sospensione determinano due parametri fondamentali per il comportamento della vettura: il *camber* e la *convergenza*.

Mentre la posizione dei punti fissa i valori di questi angoli in condizioni statiche e dinamiche, la rigidità del componente può variarne il valore sotto carico anche se in minore percentuale. Un portamozzo poco rigido introduce una cedevolezza che si traduce in variazioni indesiderate di *camber* e *convergenza* in condizioni dinamiche, motivo per cui la rigidità costituisce uno dei requisiti prioritari della progettazione.

Il *camber* è l'angolo di inclinazione laterale dello pneumatico nel piano trasversale verticale, misurato rispetto al suolo. Un *camber* negativo inclina la parte superiore dello pneumatico verso la mezzeria del veicolo, mentre un *camber* positivo la inclina verso l'esterno. Un leggero *camber* negativo è necessario per indurre la cosiddetta spinta di *camber*, che contribuisce ad aumentare la forza laterale in curva; durante il rotolamento le sue variazioni devono però essere mantenute al minimo, così da limitare la perdita di spinta di *camber* e le alterazioni nella distribuzione del carico sullo pneumatico. [4] [11]

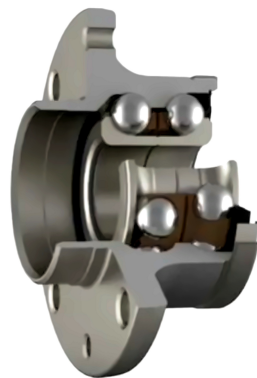
La *convergenza* è l'angolo che lo pneumatico forma con l'asse longitudinale del veicolo nel piano orizzontale; per convenzione è positiva quando i bordi anteriori degli pneumatici sono più vicini tra loro rispetto a quelli posteriori. Una *convergenza* positiva genera una forza laterale costante diretta verso la mezzeria durante l'avanzamento, migliorando la stabilità in rettilineo. La *convergenza* statica deve essere impostata in modo che gli pneumatici non vadano in divergenza nelle fasi di massimo sobbalzo e rollo, evitando che le ruote esterne cariche indirizzino il veicolo verso l'esterno della curva; una *convergenza* negativa, per contro, favorisce il sottosterzo se presente all'anteriore e il sovrasterzo se presente al posteriore. [4] [11]

Sistema di cuscinetti-mozzo - Il sistema di cuscinetti-mozzo (HBU, *Hub Bearing Unit*) definisce la geometria della sua zona centrale, poiché determina le modalità e gli elementi di vincolo oltre al posizionamento delle sedi dove alloggeranno i cuscinetti che dovranno trasmettere le forze dal mozzo al portamozzo senza causare cedimenti.

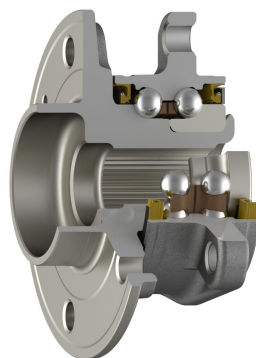
Il dimensionamento deriva quindi dal tipo di cuscinetto utilizzato, in ambito racing ne esistono di diverse tipologie ma per il gruppo ruota differiscono principalmente per tre generazioni, caratterizzate da un crescente livello di integrazione. [12]



(a) HBU1



(b) HBU2



(c) HBU3

Figura 2: Generazioni di sistema cuscinetti-mozzo (HBU).

La prima generazione, HBU1 (Figura 2), impiega un cuscinetto costituito da due soli anelli, uno interno e uno esterno. La semplicità del design e il ridotto ingombro ne contengono il costo, ma richiedono alcune attenzioni in fase di montaggio. In particolare deve essere applicato un precarico, necessario per eliminare il gioco interno e garantire una rotazione fluida e stabile. In sua assenza i cuscinetti genererebbero vibrazioni, usura accelerata, danneggiamento delle piste e potenziali cedimenti. Il precarico tuttavia altera lo stato tensionale e deformativo della struttura, e impone appositi sistemi di ritenuta e tolleranze specifiche.

La seconda generazione, HBU2 (Figura 2), integra una flangia dotata di fori filettati o in alcuni casi di prigionieri. La flangia è presente sull'anello esterno o su quello interno, consentendo su un lato di eliminare il precarico, permettendo un fissaggio più rigido.

La terza generazione, HBU3 (Figura 2), presenta infine una flangia su entrambe le parti: è la soluzione più costosa, ma anche quella che massimizza l'integrazione e la stabilità strutturale.

La generazione adottata condiziona direttamente la geometria della zona centrale del portamozzo e le relative sedi di alloggiamento nonché come le forze si sviluppano internamente .

Posizionamento della pinza freno - Il terzo fattore che condiziona la geometria del componente è il posizionamento della pinza freno. Esistono diverse varianti, ognuna delle quali segue un preciso obiettivo. Le principali considerazioni riguardano la pinza anteriore come illustrato in Figura 3, ma possono essere replicate con i dovuti accorgimenti anche a quella posteriore. [8]

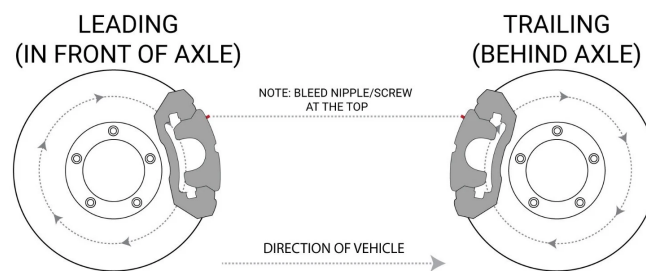


Figura 3: Posizionamento pinza freno

- *Effetto sul beccheggio*: Posizionare la pinza anteriore dietro l'asse della ruota (posizione *trailing*) o la pinza posteriore davanti all'asse (posizione *leading*) contribuisce a contrastare l'affondamento dell'avantreno: in frenata la forza generata dalla pinza crea un momento torcente che, a seconda della posizione, scarica la forza frenante in modo che la sospensione si comprima meno.

- *Baricentro*. Pinze montate più in basso abbassano il baricentro, migliorando la stabilità e la prontezza di risposta.
- *Carico sui cuscinetti*. Una pinza montata anteriormente rispetto al centro ruota comporta un maggiore sovraccarico sui cuscinetti durante le frenate intense rispetto a una montata posteriormente.
- *Vincoli di spazio*. Il posizionamento è fortemente influenzato dal tirante dello sterzo e dalle sospensioni: se il tirante è anteriore, la pinza viene solitamente montata posteriormente per ragioni di ingombro.
- *Praticità*. Pinze posizionate in modo improprio, in particolare con la vite di spurgo non collocata nella parte superiore, intrappolano aria nel circuito, riducendo le prestazioni frenanti.
- *Gestione termica*. Una posizione arretrata e quasi verticale è spesso preferita nei veicoli da competizione, in quanto facilmente raggiungibile dai condotti di raffreddamento (brake ducts).

Nella pratica i vincoli di spazio, la praticità di montaggio e la gestione termica risultano più determinanti rispetto agli effetti sulla dinamica del veicolo; per questa ragione è più comune trovare la pinza freno montata dietro al centro ruota.

I condotti dell'aria per il raffreddamento del disco, più che la geometria del portamozzo, ne determinano il materiale e il range di temperatura di funzionamento. La temperatura circostante rappresenta infatti un parametro critico in fase di progettazione, poiché un suo innalzamento può ridurre le proprietà meccaniche del materiale e comprometterne la stabilità strutturale.

1.2.2 Materiali

La scelta del materiale si basa principalmente su due requisiti: bassa densità ed elevato modulo di resistenza, queste due caratteristiche sono in contrapposizione fra di loro, quindi si cerca il miglior compromesso.

Attualmente sul mercato per la realizzazione del portamozzo in ambito motorsport si identificano principalmente le famiglie che combinano buone proprietà meccaniche, densità contenuta e adeguata lavorabilità, ovvero: gli acciai legati, le leghe di alluminio e le leghe di titanio.

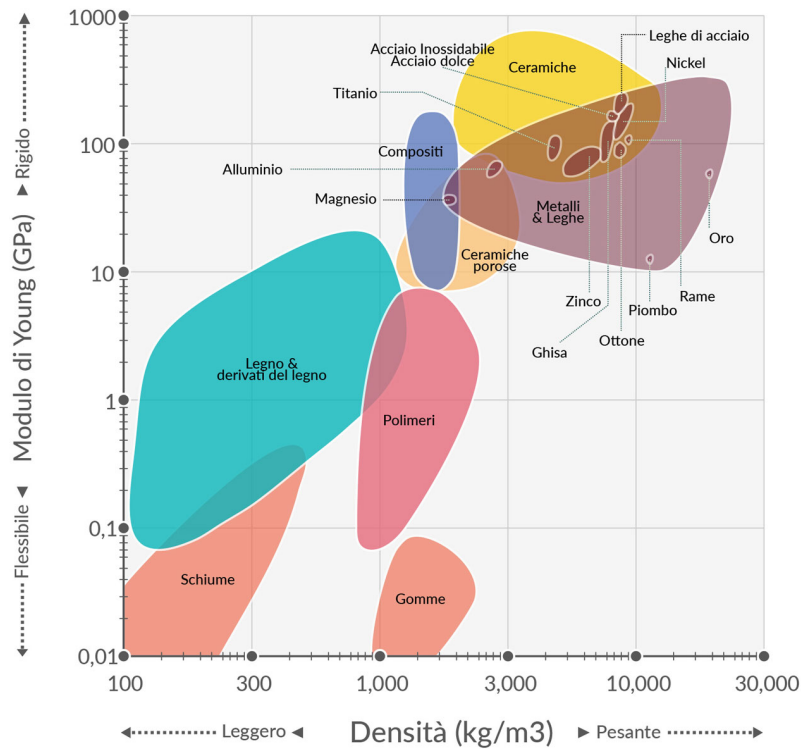


Figura 4: Diagramma di Ashby

La collocazione di queste famiglie nello spazio delle proprietà è illustrata dal diagramma di Ashby di (Figura 4), che riporta il modulo di Young in funzione della densità. Gli acciai occupano la regione ad alto modulo ed elevata densità, le leghe di titanio sono in una posizione intermedia, mentre le leghe di alluminio si collocano nella zona a bassa densità. In questo studio si approfondiranno specialmente materiali adatti alla Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), ovvero la tecnica di additive manufacturing principalmente usata per la realizzazione di componenti metallici ottimizzati, che verrà discussa nel seguito.

In questo campo troviamo maggiormente leghe di alluminio e titanio; le più utilizzate al momento sono: AlSi10Mg, Ti-6Al-4V e Scalmalloy[®]. Sono materiali altamente performanti che si posizionano nella parte destra del diagramma di Ashby. Le loro caratteristiche vengono messe a confronto nella figura 5.

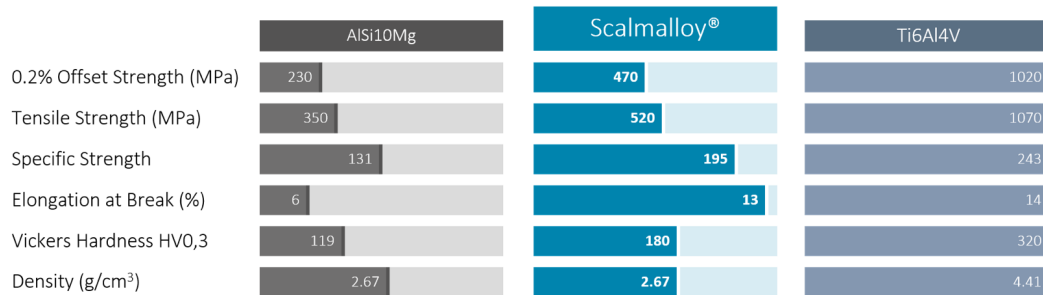


Figura 5: Leghe per L-PBF

AlSi10Mg - È una lega alluminio-silicio-magnesio che deriva dalla fonderia, tra le più diffuse nella fusione laser a letto di polvere e già largamente impiegata nel settore motorsport per il buon compromesso tra leggerezza e proprietà meccaniche. La sua diffusione nell'additive manufacturing deriva dalla composizione prossima all'eutettico Al-Si, che garantisce buona colabilità e un intervallo di solidificazione ristretto, riducendo il rischio di cricche durante la costruzione. La presenza di silicio, inoltre, favorisce l'assorbimento dell'energia del laser e la fluidità del bagno di fusione. Le elevate velocità di raffreddamento tipiche del processo producono una microstruttura fine, non ottenibile per fusione convenzionale, che conferisce alla lega proprietà meccaniche superiori rispetto alla stessa colata tradizionale. Pur non raggiungendo i livelli di resistenza elevatissimi, l'AlSi10Mg rappresenta il termine di riferimento più consolidato ed economico tra le leghe di alluminio per L-PBF. [2]

Scalmalloy® - Si tratta di una lega sviluppata e brevettata da APWORKS (filiale di Airbus) specificamente per la Laser Powder Bed Fusion, L-PBF. Questa origine ne spiega il comportamento: la lega è creata per sfruttare gli elevati gradienti termici e le rapide velocità di solidificazione tipiche del processo L-PBF, condizioni che in essa danno luogo a una microstruttura difficilmente ottenibile con le tecnologie convenzionali. Rispetto alle altre leghe di alluminio impiegate nel settore, lo Scalmalloy offre un vantaggio significativo in termini di resistenza specifica, avvicinandosi al comportamento delle leghe di titanio pur conservando la bassa densità dell'alluminio; a cui si aggiunge anche una buona resistenza a corrosione. [1]

Un appunto importante riguarda il suo costo già dalla sola materia prima, risulta notevolmente elevato a causa della presenza dello scandio. Formalmente dovrebbe essere scartato a priori per la produzione in serie ma a scopo informativo dello studio viene comunque considerato per le sue eccezionali proprietà meccaniche.

Ti-6Al-4V - È la lega di titanio più utilizzata in ambito strutturale e la più comune anche nella produzione additiva. Rispetto alle leghe di alluminio, il Ti-6Al-4V offre caratteristiche meccaniche nettamente superiori, a ciò si affianca anche un'ottima resistenza a corrosione. Il limite principale risiede però nella densità, quasi doppia rispetto a quella delle leghe di alluminio, che ne penalizza il peso specifico.

La lega presenta inoltre una lavorabilità difficoltosa, aspetto che ne complica le lavorazioni a macchina e ne aumenta i costi.

Le tipologie di materiale hanno vantaggi e svantaggi, un altro criterio di valutazione è il decadimento delle proprietà meccaniche ad alte temperature. Infatti per un portamozzo è fondamentale considerare anche la condizione termica in cui opera. La vicinanza al disco freno induce nella zona un incremento delle temperature durante la frenata. L'innalzamento termico che ne deriva può ridurre sensibilmente le proprietà meccaniche, e la soglia oltre la quale ciò avviene varia in misura marcata da materiale a materiale, anche all'interno della stessa famiglia.

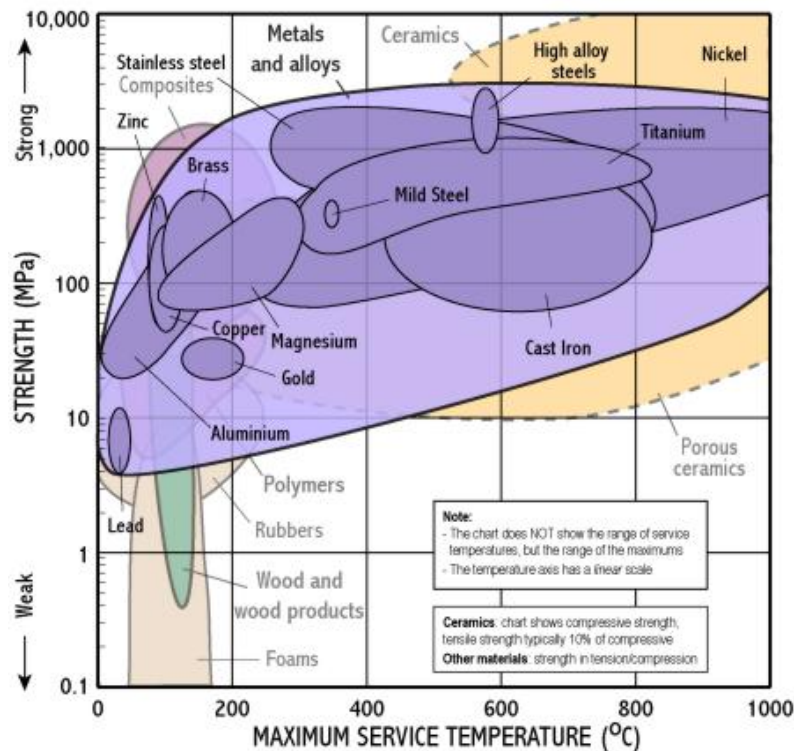


Figura 6: Diagramma resistenza meccanica al variare della temperatura

Il comportamento alle temperature di esercizio, rappresentato dal diagramma di (Figura 6), riporta la resistenza meccanica in funzione della massima temperatura di esercizio. La sua rilevanza è di interesse per capire in quali condizioni può operare il portamozzo. In questo caso prendendo le leghe più comuni per la realizzazione di portamoZZi con metodi di produzione standard, quali fresatura e forgiatura, si può notare ad esempio che la lega 7075, caratterizzata da una resistenza elevata a temperatura ambiente, subisce un decadimento già al di sopra dei 120–150 °C, mentre la lega 2618A, sviluppata per impieghi ad alta temperatura, conserva buone caratteristiche fino a circa 200 °C e resta utilizzabile fino a circa 300 °C. Mentre gli acciai legati conservano le proprie caratteristiche su un intervallo termico più ampio.

Per quanto riguarda invece i materiali di nostro interesse, l'AlSi10Mg è il più sensibile all'aumento di temperatura: allo stato grezzo di la microstruttura che ne garantisce la resistenza risulta instabile a caldo, per cui un impiego in prossimità di sorgenti termiche richiede un adeguato trattamento termico di stabilizzazione, con conseguente riduzione della resistenza iniziale, aspetto rilevante per un componente che opera in prossimità del disco freno.

Lo Scalmalloy[®] presenta una microstruttura stabile fino a temperature dell'ordine di 250 °C , e infine la lega di titanio Ti-6Al-4V mantiene una buona prestazione fino a temperature dell'ordine dei 300 °C.

In conclusione i valori di riferimento, misurati a temperatura ambiente, si discostano da quelli effettivi nelle condizioni di esercizio appena descritte. Un altro aspetto da considerare sono anche i possibili trattamenti termici che possono essere applicati su specifici metalli, questi permettono di aumentare alcune proprietà meccaniche del materiale in base alle caratteristiche finali che si vogliono ottenere.

Oltre a ciò si aggiunge un'altra importante caratteristica che introduce ulteriori considerazioni da valutare, in generale non tutti i materiali si prestano allo stesso tipo di lavorazione, poiché ciò dipende strettamente dalle loro proprietà chimiche e meccaniche; la scelta del materiale, di conseguenza, non può essere separata da quella del processo produttivo.

1.2.3 Tecnologie produttive

Per la realizzazione di un portamozzo le tecnologie più rilevanti sono: la forgiatura, la saldatura, la fresatura e l'additive manufacturing (AM). Saranno esaminate secondo il modo in cui agiscono sul materiale, in particolare l'AM sarà descritta più dettagliatamente data la rilevanza per la progettazione generativa come detto in precedenza.

Forgiatura - In un componente forgiato i grani sono allungati e costretti ad allinearsi lungo una direzione che segue la forma del componente, dando origine a una struttura interna continua e ininterrotta. A differenza del metallo grezzo, che presenta un'orientazione casuale dei grani, il forgiato indirizza le sollecitazioni interne lungo questi percorsi continui, garantendo proprietà meccaniche superiori, poiché:

- aumenta la resistenza a trazione e agli urti grazie alla continuità del reticolo cristallino;
- migliora la resistenza a fatica, ostacolando la propagazione delle cricche;
- incrementa tenacità e duttilità grazie alla chiusura dei difetti interni e alla raffinazione del grano.

Inoltre, il processo viene impiegato per ridurre lo scarto di materiale che si avrebbe con una lavorazione per asportazione di truciolo. Per contro, la forgiatura offre

uno scarso controllo della qualità superficiale e richiede comunque lavorazioni alle macchine utensili per forme complesse e forature. L'investimento per lo stampo è giustificato solo in presenza di elevati volumi di produzione.

Saldatura - La qualità del componente saldato ha una notevole dipendenza dalla manualità dell'operatore. In prossimità dei cordoni occorre considerare la cosiddetta zona termicamente alterata (HAZ, Heat-Affected Zone), per la quale, nel caso dell'acciaio, è buona norma assumere una riduzione delle proprietà meccaniche del 10% rispetto ai valori standard. [?]

Possono inoltre verificarsi deformazioni che alterano le dimensioni nominali, rendendo in certi casi necessaria una successiva lavorazione in macchina. Nonostante questi limiti, in ambito motorsport è comune trovare portamozzetti saldati, in quanto offrono un'elevata efficienza in termini di rapporto rigidità-peso.

Fresatura - La fresatura consente di raggiungere tolleranze dimensionali molto strette e finiture superficiali eccellenti, e risulta ideale per prototipi, geometrie complesse e piccole serie. Presenta inoltre il vantaggio di essere un processo altamente automatizzato: pur potendo richiedere tempi di realizzazione lunghi, questi non dipendono dall'orario di lavoro di un operatore. Per contro, comporta un elevato spreco di materiale e non migliora le proprietà meccaniche del materiale di partenza.

Additive manufacturing - L'additive manufacturing (AM) realizza il componente per addizione successiva di materiale, strato su strato, a partire da un modello tridimensionale. La sua caratteristica più importante è che permette di ottenere geometrie fortemente complesse e ottimizzate. D'altro canto richiede un notevole controllo del processo, poiché la qualità dipende dalla stabilità della macchina e dalla ripetibilità del processo.

Le tecnologie additive si distinguono in base al materiale e al principio di consolidamento. Tra queste, la tecnologia oggi più diffusa per la realizzazione di componenti metallici ottimizzati in ambito racing è il Laser Powder Bed Fusion, (L-PBF). Un laser ad alta potenza fonde selettivamente e in successione, un letto di polvere metallica, ottenendo un componente pienamente denso e con proprietà meccaniche da parte strutturale.

Tra i processi additivi per metalli, L-PBF è la tecnologia di riferimento impiegata in questo lavoro. Per il proseguo dei capitoli quando si farà riferimento all'additive manufacturing si intenderà implicitamente la tecnologia L-PBF.

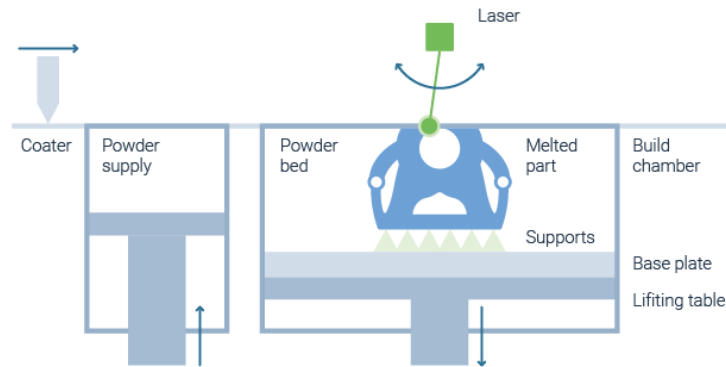


Figura 7: Laser Powder Bed Fusion, L-PBF

La qualità del componente dipende in misura determinante dai parametri di processo, da questo insieme di parametri dipendono le proprietà meccaniche finali.

L-PBF presenta quindi alcune criticità intrinseche da tenere conto in fase di progettazione. I ripetuti cicli termici di fusione e solidificazione generano tensioni residue e possono introdurre porosità, la cui entità dipende dai parametri adottati e dall'orientamento di costruzione.

La crescita per strati successivi determina inoltre una possibile anisotropia delle proprietà meccaniche, con un comportamento del materiale dipendente dalla direzione di accrescimento, aspetto che impone di orientare opportunamente il componente sul piano di lavoro e di considerare, in verifica, i valori riferiti alla direzione meno favorevole.

Infine, la finitura superficiale allo stato grezzo è relativamente elevata e, incidendo sulle concentrazioni di sforzo in superficie. Per questa ragione, come per le altre tecnologie, il componente richiede quasi sempre operazioni di post-processing e lavorazioni alle macchine utensili per raggiungere le tolleranze e le finiture richieste nelle zone funzionali.

Indipendentemente dal processo adottato, la lavorazione alle macchine utensili è quasi sempre richiesta per ultimare il componente. Mentre le tolleranze gestiscono gli accoppiamenti, la finitura superficiale incide direttamente sugli stress superficiali e, di conseguenza, sulla vita a fatica del componente. Una rugosità elevata induce maggiori concentrazioni di sforzo in superficie. Per questo motivo lo studio dei parametri di lavorazione è rilevante, ed è possibile, attraverso un'analisi FEM, definire zone a rugosità differenti in funzione degli sforzi stimati, ottenendo un risparmio in termini di tempo e di costi di lavorazione.

Una nota importante riguarda la differenza fra rugosità (R_a), ondulazione (W_a) e asimmetria (R_{sk}). La rugosità descrive le componenti a lunghezza d'onda corta, ovvero ad alta frequenza spaziale, mentre l'ondulazione descrive quelle a lunghezza d'onda maggiore e quindi a frequenza più bassa; la skewness (R_{sk}), invece, non è un parametro di frequenza ma un parametro statistico, in quanto descrive l'asimmetria della distribuzione delle altezze del profilo rispetto alla linea media.

R_a misura principalmente la rugosità superficiale media, quindi è un buon indicatore per il controllo di qualità generale e per le superfici estetiche. D'altro canto, W_a e R_{sk} forniscono un'indicazione più dettagliata su come la finitura ottenuta può andare a incidere sulle prestazioni meccaniche.

Un semplice esempio riguarda la differenza fra una R_{sk} positiva e una R_{sk} negativa. Si nota come nel caso di R_{sk} minore di zero il profilo presenti valli profonde: in corrispondenza della valle si ha quindi una minore sezione di materiale e, agendo questa da intaglio, una maggiore concentrazione di sforzi rispetto al picco dove si ha maggiore materiale. [9]

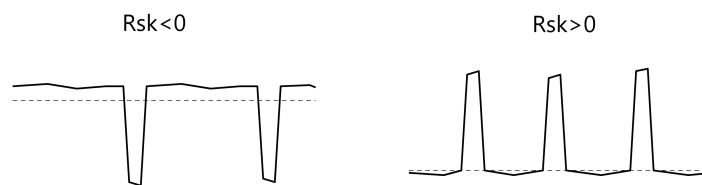


Figura 8: R_{sk}

2 Definizione del progetto

2.1 Pianificazione del progetto

La riprogettazione del portamozzo mediante progettazione generativa è condotta secondo un approccio di progettazione sistematica, nel quale lo sviluppo del progetto segue le fasi di: pianificazione e chiarificazione del compito, progettazione concettuale e progettazione di dettaglio. Prima di intervenire sulla geometria del componente, è necessario definire con chiarezza il punto di partenza e discutere innanzitutto gli obiettivi del lavoro e l'insieme dei bisogni e requisiti che la nuova soluzione dovrà soddisfare.

Un progetto può iniziare da un foglio bianco oppure da un prodotto già esistente. Le due condizioni non sono equivalenti: più ci si allontana dal progetto esistente più sarà innovativo, ma anche più difficile da prevedere. Nel presente lavoro si parte da un portamozzo esistente, già impiegato in competizione, di cui si vuole riprogettare la realizzazione mediante progettazione generativa. Questa scelta riduce l'incertezza, poiché fornisce un termine di paragone consolidato, e consente di concentrare l'analisi sugli effetti della nuova metodologia.

La base di tale approccio è la prototipazione virtuale, a partire da strumenti per la progettazione ingegneristica è possibile creare la geometria ad esempio per l'appunto usando la progettazione generativa e determinarne il comportamento simulando lo stato del componente attraverso i carichi a cui sarà soggetto. Anticipare le decisioni progettuali alle prime fasi dello sviluppo permette di ridurre i tempi complessivi e di contenere i costi legati alle modifiche, che crescono in misura tanto maggiore quanto più tardi vengono introdotte. [5]

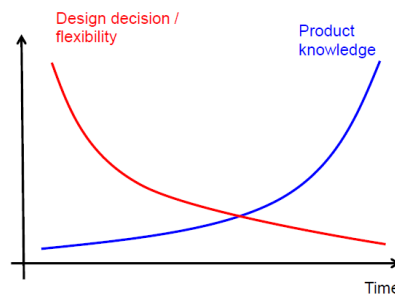


Figura 9: Design paradox

Come illustrato in Figura 9, nelle prime fasi dello sviluppo la libertà di modificare il progetto è massima mentre la conoscenza del prodotto è ancora limitata; con l'avanzare del processo il rapporto si inverte, ed è questa dinamica a rendere conveniente concentrare le decisioni progettuali quando il costo del cambiamento è ancora contenuto.

La progettazione generativa permette di anticipare alcuni aspetti della progettazione, dando al progettista l'opportunità di apportare modifiche utili in vista delle fasi successive.

Per introdurre la progettazione generativa su un componente è necessario valutare prima quattro criteri:

- fase tecnologica
- grado di novità
- ciclo vita
- obiettivo aziendale

Per valutare il potenziale di una tecnologia è possibile fare riferimento alla curva tecnologica a S (Technology S-Curve), che ne descrive l'evoluzione delle prestazioni nel tempo. Come mostrato in Figura 10, ogni tecnologia attraversa tre fasi: una fase iniziale di sviluppo, con incrementi prestazionali limitati; una fase di rapida crescita, in cui le prestazioni aumentano significativamente; e una fase di maturità, nella quale ulteriori miglioramenti risultano progressivamente più difficili da ottenere.

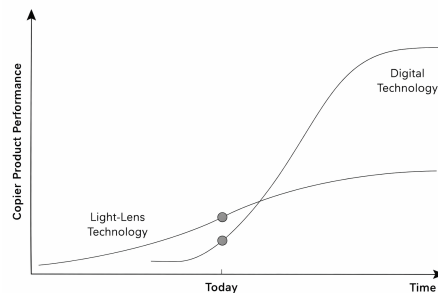


Figura 10: Technology S-Curve

Il portamozzo tradizionale, ottenuto mediante metodologie convenzionali, rappresenta una soluzione già altamente sviluppata e collocabile nella fase di maturità della propria curva. La progettazione generativa associata all'additive manufacturing costituisce invece una tecnologia emergente, situata nella fase di crescita, che apre nuove possibilità di ottimizzazione di carattere geometrico e strutturale. Il presente lavoro si posiziona quindi nella transizione tra una tecnologia consolidata e una metodologia innovativa, con l'obiettivo di valutarne il potenziale.

In funzione di quanto la nuova soluzione si discosta da quella di partenza si distinguono tre categorie di lavoro:

- La progettazione originale: si assegnano nuove funzioni al componente
- La progettazione additiva: si cambia la struttura generale mantenendo inalterate le funzioni precedenti
- La progettazione variante: si ridimensionano le dimensioni di lavoro mantenendo inalterate le funzioni precedenti

Il presente lavoro rientra nella progettazione adattativa: viene riprogettata la realizzazione del portamozzo, ottenuta in modo nuovo attraverso la progettazione generativa e l'additive manufacturing. In definitiva, le funzioni complessive del componente non cambiano, ma cambia il modo in cui è realizzato.

Ogni prodotto attraversa un ciclo di vita articolato in cinque fasi: sviluppo, introduzione sul mercato, crescita, maturità e declino, come illustrato in Figura 11. Raggiunta la maturità le prestazioni economiche si stabilizzano, finché nella fase di declino il prodotto perde progressivamente competitività, richiedendo un aggiornamento dato dall'evoluzione dei bisogni e dall'introduzione di nuove tecnologie.

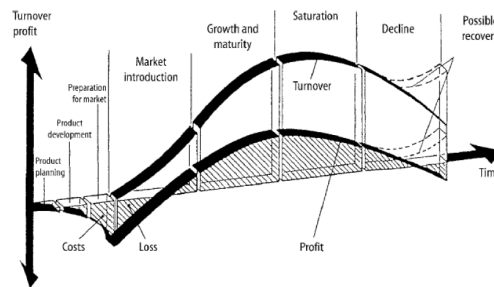


Figura 11: Ciclo vita

In questo caso abbiamo il portamozzo realizzato con tecnologie classiche nella fase di maturità, mentre con la progettazione generativa la possiamo collocare nella fase crescita, ciò motiva l'interesse a esplorare quest'ultima prima che la soluzione consolidata entri in una fase di declino relativo rispetto alle possibilità offerte dalle nuove tecnologie.

L'adozione di una metodo emergente risponde a un obiettivo aziendale strategico alla ricerca del mantenimento della competitività attraverso il continuo aggiornamento tecnologico.

Nel motorsport la maggior parte dei componenti metallici è oggi prodotta mediante lavorazione alle macchine utensili, ma negli ultimi anni la crescita dell'additive manufacturing e di conseguenza della L-PBF e grazie a importanti investimenti

tecnologici, ha reso possibile su molte vetture ad alte prestazioni, l'impiego di componenti fortemente ottimizzati.

Esplorare il potenziale della progettazione generativa applicata a un componente già consolidato come il portamozzo consente di acquisire competenze su una tecnologia in crescita e di valutarne concretamente i vantaggi rispetto alle soluzioni tradizionali. Questi ideali sono in linea con un obiettivo aziendale chiaramente orientato all'innovazione, per mantenersi competitivi e aggiornati in un settore come il Motorsport dove la velocità è tutto.

2.2 Lista dei bisogni

Definito il posizionamento tecnologico del lavoro, è possibile stilare i bisogni che la nuova soluzione dovrà soddisfare. La loro individuazione costituisce il fondamento dell'intero processo, poiché i bisogni guidano in parte le scelte progettuali e, una volta tradotti in requisiti misurabili, forniscono i criteri per il confronto finale tra la soluzione generativa e quelle esistenti.

I bisogni sono elencati nella Tabella 1 e ordinati per importanza secondo una scala da 1 (minima) a 5 (massima); il punteggio assegnato riflette la loro rilevanza ai fini dell'obiettivo del lavoro.

N.	Bisogno	Importanza
1	Rigidezza	5
2	Variazione di camber e toe	5
3	Peso	4
4	Costo	2
5	Resistenza termica	3
6	Resistenza alla corrosione	3
7	Dimensioni ridotte	3
8	Tempo di modellazione	4

Tabella 1: Lista dei bisogni

Il punteggio attribuito ai bisogni deriva direttamente dalla richiesta del lavoro, poiché l'obiettivo è valutare il potenziale della progettazione generativa del portamozzo sotto il punto di vista delle performance strutturali attraverso il confronto diretto con i quelli di riferimento.

- La rigidezza deve essere mantenuta pari a quella delle versioni già esistenti, trattandosi di un componente critico per la sicurezza sarà anche importante verificarne il fattore di sicurezza nelle diverse condizioni di carico.
- Le variazioni di camber e toe nella realtà sono strettamente dipendenti dalla rigidezza del componente. Idealmente si considerano componenti isotropi, ma

come accennato nel Capitolo 1 nella sezione «Tecnologie produttive», l'additive manufacturing può originare anisotropia; per questo una valutazione attenta di questi parametri è necessaria per garantire le prestazioni in termini di dinamica del veicolo.

- Il peso è sicuramente un dato finale importante che può essere assunto come indice prestazionale a parità di comportamento strutturale delle soluzioni.
- Il contenimento dei costi rappresenta un bisogno aziendale rilevante ma non prioritario: non costituisce un criterio fondamentale di un lavoro orientato all'esplorazione tecnologica più che alla produzione di serie.
- La resistenza termica ha sicuramente un impatto notevole e deve essere tenuta in considerazione, è anche vero però che questo problema è sempre stato uno dei punti fondamentali della progettazione di un portamozzo; motivo per cui, nel corso degli anni si sono affermate numerose soluzioni e, grazie all'esperienza maturata, con i giusti accorgimenti può essere gestita in modo efficace.
- La resistenza alla corrosione va di pari passo con la resistenza termica, è necessaria in caso di ambiente umido (come una gara bagnata), va quindi tenuto in considerazione un materiale adatto.
- Dimensioni ridotte possono consentire una maggiore praticità e facilità di montaggio, oltre a guadagnare spazio per la disposizione di altri componenti.
- Il tempo di modellazione è uno dei punti di forza della progettazione generativa, risulta quindi efficace solo se questo viene ridotto, ed è di notevole importanza per il lavoro dei progettisti che devono rispettare le tempistiche per ogni progetto.

2.3 Componente di riferimento



Figura 12: Formula Renault

Per questa analisi progettuale si prenderà come riferimento il portamozzo anteriore della *Formula Renault 3.5* (dal 2017 formalmente World Series Formula 3.5). La vettura montava una sospensione anteriore di tipo double wishbone con push rod, mantenuta invariata durante tutti gli anni della competizione.

La sospensione presenta il push collegato al giunto del triangolo inferiore, ciò significa che vanno considerati effettivamente tre attacchi:

- Triangolo superiore
- Triangolo inferiore
- Tirante sterzo/convergenza

Per il giunto del triangolo superiore è presente una forcella di intermezzo, chiamata forcella di Ackermann. Essa ha il ruolo di integrare anche l'attacco del tirante di sterzo/convergenza, permettendo di ridurre il numero di collegamenti col portamozzo. Inoltre, gestisce un parametro fondamentale sull'angolo di sterzo delle ruote in curva; rappresenta la configurazione geometrica dello sterzo che permette alla ruota interna di sterzare più di quella esterna. Questo è necessario perché, in curva, la ruota interna percorre una traiettoria circolare con un raggio più stretto rispetto a quella esterna. Tuttavia Nella pratica e nel motorsport, si applicano spesso variazioni del 100% rispetto alla teoria, a causa del carico, dell'accelerazione e dell'angolo di deriva degli pneumatici.

Nella zona centrale il portamozzo alloggia i cuscinetti di prima generazione (HBU1), già descritti nel capitolo 1 nell'apposito paragrafo «Sistema di cuscinetti-mozzo». La vettura è equipaggiata con un impianto frenante Brembo Racing dotato di pinza monoblocco in alluminio a quattro pistoncini e disco ventilato.

Il portamozzo di riferimento ha avuto un'evoluzione significativa nel corso degli anni, è stato realizzato fino al 2012 mediante saldatura di lamiere in acciaio, successivamente sostituito da una versione fresata dal pieno in lega di alluminio.

2.4 Analisi delle configurazioni esistenti

Le due soluzioni di portamozzo rappresentano due tecnologie diverse ma per soddisfare lo stesso requisito fondamentale di un'elevata rigidità a fronte di un peso contenuto. Possono quindi essere inseriti nel termine di paragone rispetto al portamozzo ottenuto mediante progettazione generativa.

2.4.1 Portamozzo saldato

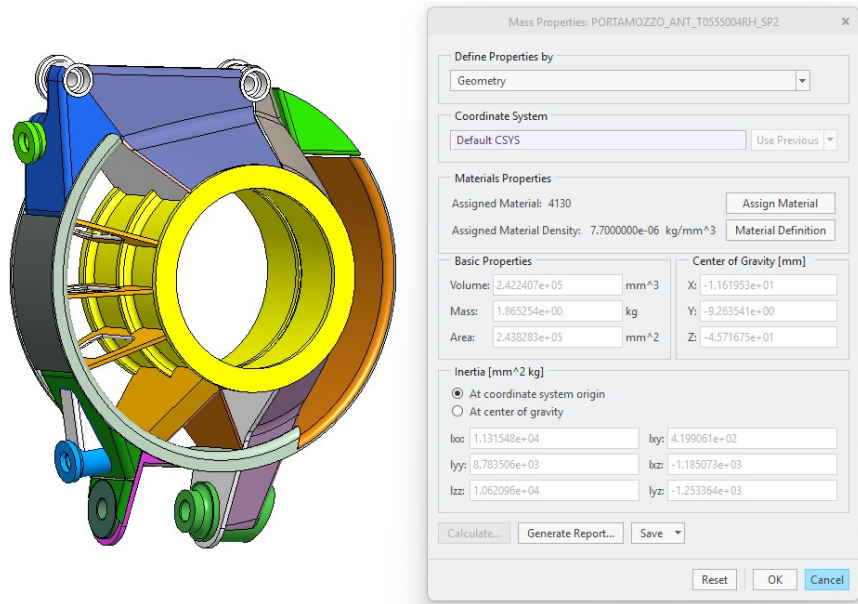


Figura 13: Portamozzo saldato

La prima configurazione è uno scatolato in acciaio, ottenuto per saldatura di lamiere piegate e boccole. Il corpo principale è costituito dalla boccola centrale, dove alloggia il cuscinetto.

Le boccole minori realizzano gli attacchi dei due triangoli e della pinza freno. Le lamiere che collegano la boccola centrale all'anello esterno sono disposte seguendo il flusso delle forze nelle diverse condizioni di sollecitazione, così da indirizzare i carichi lungo percorsi strutturalmente efficienti.

La struttura risultante è internamente cava, sezionandola su piani diversi si presenta molto più vuota di un componente ricavato dal pieno. È proprio questa geometria che consente un peso contenuto e, al tempo stesso, un'elevata rigidità, quest'ultima garantita dall'impiego dell'acciaio. In questa configurazione il componente è realizzato in acciaio 4130 o meglio conosciuto come 30CrMo4.

2.4.2 Portamozzo fresato dal pieno

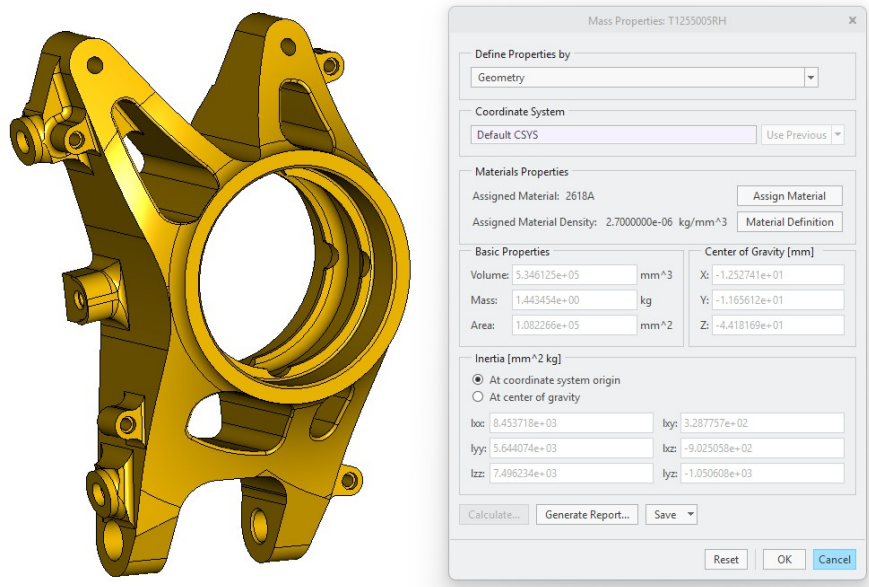


Figura 14: Portamozzo fresato

La seconda configurazione, viene ricavata dal pieno mediante fresatura e presenta una geometria completamente diversa, pur mantenendo invariata la posizione dei punti di fissaggio.

In questo caso la leggerezza non deriva dalla geometria cava, bensì dal materiale impiegato, ovvero la lega di alluminio 2618A. Il favorevole rapporto tra rigidità e peso della lega di alluminio consente una soluzione più leggera e compatta. Si tratta inoltre di una lavorazione già orientata all'ottimizzazione, come evidenziano le zone di alleggerimento ricavate nel corpo del componente per rimuovere materiale dove non necessario alla resistenza strutturale.

Il confronto tra i principali parametri delle due soluzioni è riportato nella Tabella 2.

Parametro	Configurazione saldata	Configurazione fresata
Tecnologia produttiva	Saldatura	Fresatura dal pieno
Materiale	Acciaio 4130	Alluminio 2618A
Densità [g/cm³]	7,7	2,7
Volume di materiale [mm³]	2.42×10^5	5.35×10^5
Massa [kg]	1,865	1,443

Tabella 2: Confronto tra configurazione saldata e configurazione fresata.

Il confronto evidenzia un aspetto significativo: la configurazione fresata impiega un volume di materiale più che doppio rispetto a quella saldata, eppure risulta più leggera. Ciò è diretta conseguenza della differenza di densità tra i due materiali, con l'acciaio quasi tre volte più denso dell'alluminio.

Anche a fronte di una geometria molto più piena, la lega di alluminio consente una massa complessiva inferiore. Emerge così come, nelle soluzioni tradizionali, la riduzione del peso sia perseguita agendo prevalentemente su un unico dato alla volta; geometria e materiale o viceversa.

La progettazione generativa, adottata in seguito, offre la possibilità di agire simultaneamente su entrambe, distribuendo un materiale leggero secondo una geometria ottimizzata.

2.5 Geometria di partenza

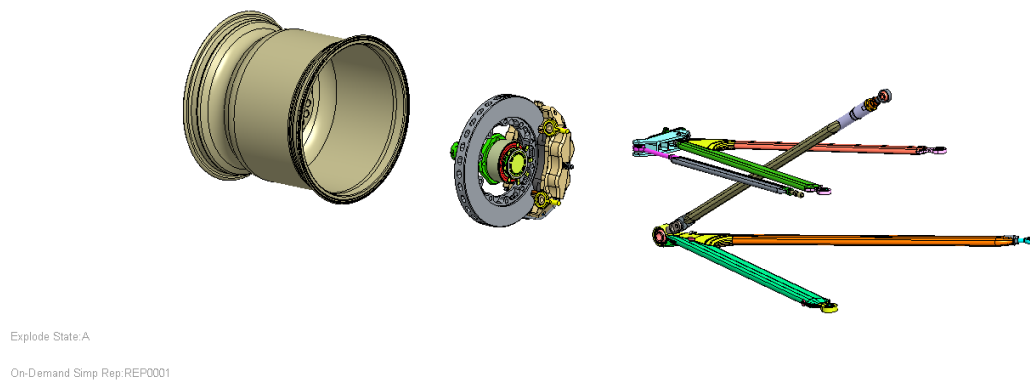


Figura 15: Gruppo ruota

Definite le configurazioni esistenti, è possibile stabilire la base di partenza per la riprogettazione. Poiché l'obiettivo del lavoro è valutare l'effetto della progettazione generativa mediante un confronto diretto con le soluzioni precedenti, è necessario che il nuovo componente operi nelle medesime condizioni di quelle esistenti. A tal fine si è scelto di mantenere invariati i componenti che circondano il portamozzo. Il mantenimento di questi elementi riduce le variabili in gioco, semplifica l'analisi e assicura che le differenze riscontrate nel confronto finale si possano attribuire alla sola metodologia progettuale.

Gli elementi mantenuti invariati sono:

- Sospensione anteriore push rod Formula Renault
- Forcella di Ackermann Formula Renault
- Mozzo Formula Renault
- Cuscinetti di tipo HBU1
- Impianto frenante Brembo racing
- Cerchione e pneumatico da gara della Formula Renault

Il mantenimento di diversi componenti di contorno velocizza l'analisi e riduce possibili discordanze nel confronto. Da questi elementi si hanno i riferimenti geometrici che costituiscono il punto di partenza della riprogettazione.

La sospensione e la forcella di Ackermann fissa i punti di vincolo del portamozzo verso il telaio; il sistema cuscinetti e mozzo definisce la sede di alloggiamento nella zona centrale; l'impianto frenante determina la posizione dell'attacco della pinza. L'insieme di questi riferimenti individua inoltre i punti in cui si applicano i vincoli e le forze agenti sul componente.

Tali riferimenti, ereditati dalle configurazioni precedenti e mantenuti invariati, rappresentano i dati fondamentali su cui si basa la riprogettazione e garantiscono una buona affidabilità per il confronto.

2.6 Vincoli progettuali

I riferimenti individuati nel paragrafo precedente si traducono in una serie di vincoli progettuali, ossia condizioni che la nuova geometria deve necessariamente rispettare perché la soluzione risulti valida e confrontabile con quelle esistenti.

A differenza dei requisiti di progetto, oggetto del paragrafo successivo, i vincoli devono essere rispettati, rappresentano il limite entro cui la riprogettazione generativa deve creare il nuovo portamozzo. Se ne distinguono tre categorie:

- I vincoli strutturali derivano dalla funzione del componente. Il portamozzo deve resistere ai carichi di esercizio, che saranno definiti nel capitolo 3, mantenere un margine di sicurezza adeguato è fondamentale trattandosi di un componente critico per la sicurezza, questa condizione è necessaria.
- I vincoli geometrici e di interfaccia derivano dagli elementi mantenuti invariati. La posizione dei punti di attacco verso la sospensione deve rimanere immutata, così da preservare la cinematica del gruppo ruota e consentire l'applicazione degli stessi carichi delle configurazioni precedenti. Analogamente, devono essere rispettate la sede di alloggiamento del sistema cuscinetti HBU1 e la posizione dell'attacco della pinza freno. Il componente deve inoltre svilupparsi all'interno del volume libero disponibile all'interno del cerchio ruota, senza interferenza con mozzo, disco, pinza ed eventuali condotti di raffreddamento.

- Il vincolo di processo riguarda la producibilità, la geometria generata deve essere realizzabile mediante additive manufacturing, in particolare L-PBF. Questa condizione, pur non incidendo sulla funzione del componente, ne determina la fattibilità.
- Vincoli dati dal regolamento della competizione. Il campionato Formula Renault 3.5 - World series ha fatto affidamento al regolamento FIA imposto in quegli anni. Sono stati quindi presi anche i riferimenti riportati nel regolamento ufficiale. [3]
- Vincoli di montaggio spesso trascurati. La fase di montaggio è fondamentale da tenera a mente durante la progettazione, tutta l'attrezzatura necessaria deve essere considerata al fine di evitare problemi che costringano a rivedere una geometria già definita.

L'insieme di questi vincoli limita lo spazio progettuale entro cui la soluzione dovrà essere generata. Definiti i limiti, restano da stabilire i requisiti che, all'interno di tale spazio, si intende ottimizzare, e i pesi guideranno la valutazione delle soluzioni dei diversi portamozi.

2.7 Requisiti di progetto

La lista dei requisiti costituisce uno dei documenti fondamentali del progetto. Rappresenta la specifica rispetto alla quale la progettazione generativa può essere valutata.

La lista dei requisiti nasce dalla lista dei bisogni definita in precedenza, in cui si effettua la traduzione in termini progettuali, e a formulare ciascun bisogno in modo quantitativo, associando un parametro di verifica misurabile.

Seguendo l'impostazione della progettazione sistematica, i requisiti sono suddivisi in due categorie:

- I vincoli (demand, D) sono requisiti che devono essere soddisfatti a prescindere dal metodo di progettazione.
- Gli obiettivi (wish, W) sono requisiti desiderabili, da ricercare per quanto possibile e da massimizzare rispettando i vincoli; a ciascuno di essi è associata un'importanza, espressa su una scala da 1 a 3, che riflette le priorità per l'obiettivo del lavoro.

Inoltre, sono stati raggruppati per ambito: Condizioni strutturali e di esercizio, Geometria e interfacce, Materiale e produzione e infine Costi. Si è dunque stilata una lista dei requisiti di progetto all'interno della Tabella3.

D/W	Imp.	Requisito	Parametro di verifica
<i>Condizioni strutturali e di esercizio</i>			
D	–	Resistenza ai carichi di esercizio	Fattore di sicurezza ≥ 2 (manovra più severa)
D	–	Rigidezza non inferiore alle linee guida	Spostamento massimo $\leq$ linee guida
W	2	Resistenza alle temperature di esercizio	Proprietà meccaniche mantenute in temperatura
W	2	Resistenza alla corrosione	Nessuna corrosione in ambiente umido
<i>Geometria e interfacce</i>			
D	–	Invarianza dei punti di attacco della sospensione	Posizione invariata
D	–	Compatibilità con sede HBU1 pinza freno	Sedi e posizioni invariate
D	–	Rispetto del volume disponibile nel cerchio	Nessuna interferenza
W	1	Riduzione delle dimensioni complessive	Ingombro ridotto dove possibile
<i>Materiale e produzione</i>			
D	–	Materiale	Alluminio o titanio
D	–	Producibilità mediante manifattura additiva	Realizzabile tramite LPBF
W	3	Riduzione del peso rispetto al fresaio	$\geq 10\%$ ($\leq 1,30$ kg)
<i>Costi</i>			
W	1	Contenimento del costo	Costo per componente contenuto
W	1	Riduzione del tempo di lavoro	Tempo di modellazione inferiore alle linee guida

Tabella 3: Lista dei requisiti.

Definiti e classificati i requisiti, essi costituiscono i criteri rispetto ai quali le diverse soluzioni saranno confrontate. A ciascun criterio che riguardano i obiettivi è associato il peso corrispondente all'importanza attribuita, così da poter valutare in modo strutturato le alternative. La Tabella 4 riporta l'impostazione di tale valutazione, che sarà completata nel Capitolo 4, una volta disponibili i risultati della progettazione generativa e della relativa validazione strutturale.

Parametro	Saldato	Fresato	Stampato in AM
Materiale	Acciaio 4130	Alluminio	–
Densità [g/cm ³]	7,7	2,7	–
Massa [kg]	1,865	1,443	–
Variazione camber/toe [deg/kN]	–	–	–
Costo vari	–	–	–

Tabella 4: Impostazione matrice di valutazione

2.8 Analisi delle condizioni di esercizio

In questa fase si identificano le forze agenti e i vincoli. Una definizione e un posizionamento corretto di vincoli e forze garantisce un'accurata analisi strutturale, per questo prima di procedere è fondamentale aver considerato le condizioni al contorno del portamozzo.

I carichi al quale è soggetto il portamozzo seguono un percorso ben definito attraverso il gruppo ruota definito in Figura 16, definiscono quindi l'obiettivo strutturale del componente e definiscono le zone in cui i carichi entrano ed escono, ovvero le sedi dei cuscinetti e gli attacchi verso la sospensione.

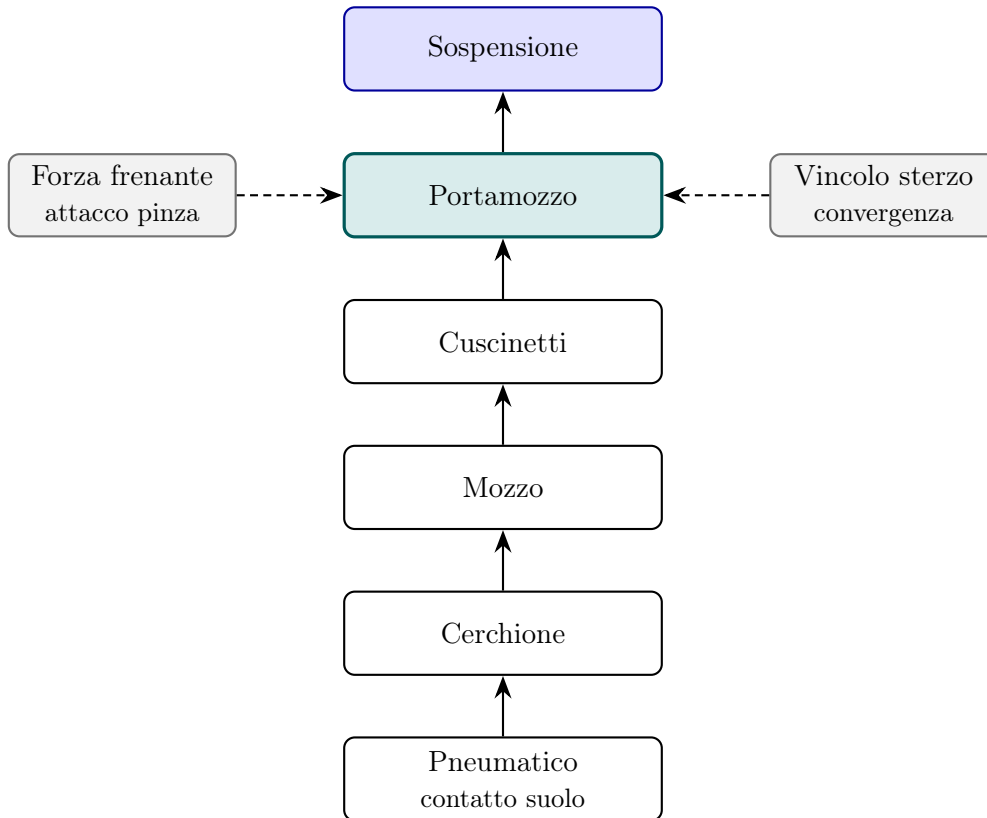


Figura 16: Flusso di trasferimento delle forze

La scelta di mantenere invariati i componenti che circondano il portamozzo, già impiegati sulla Formula Renault 3.5, consente di replicare gli stessi vincoli e gli stessi carichi adottati sulle vetture precedenti. Ciascun componente contribuisce infatti a definire una specifica condizione.

La sospensione stabilisce la posizione degli attacchi e la tipologia dei vincoli; il cerchione e lo pneumatico il punto di contatto al suolo dove si generano le forze; i cuscinetti, il mozzo e il dado permettono di riprodurre le medesime condizioni di precarico, già note e verificate; il mantenimento del pacchetto disco-pastiglie-pinza

consente infine di conoscere l'entità e il punto di applicazione delle forze di frenata, che vengono trasmesse al componente attraverso l'attacco pinza.

In questo modo le condizioni di carico e di vincolo possono essere replicate in modo congruo, e derivano da componenti già consolidati riferiti alla stessa vettura dei portamozzi precedenti.

2.8.1 Carichi

Si definiscono due categorie di carichi:

- Carichi non a fatica: sono carichi costanti o che variano molto lentamente nel tempo. Il materiale cede solo se la tensione supera il suo limite di snervamento o di rottura.
- Carichi a fatica: Sono sollecitazioni variabili, cicliche o ripetute nel tempo. Portano alla rottura del materiale anche se l'intensità massima del carico è inferiore al carico di snervamento o rottura statico.

Per la definizione dei carichi si analizzano le possibili manovre che la vettura compie durante un evento di gara. Il primo passo consiste nell'individuare le condizioni di funzionamento più gravose.

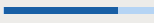
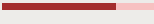
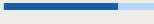
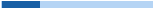
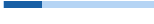
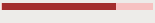
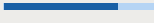
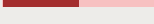
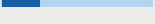
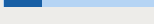
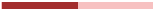
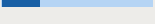
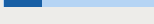
I dati possono essere ricavati da test in pista su vetture precedenti oppure forniti direttamente dal reparto di dinamica del veicolo attraverso simulazioni.

Le manovre considerate sono:

- Jump over kerb
- Side wall
- Pure braking
- Pure cornering (inner wheel)
- Pure cornering (outer wheel)
- Pure acceleration
- Combined braking corner (inner wheel)
- Combined braking corner (outer wheel)
- Combined acceleration corner (inner wheel)
- Combined acceleration corner (outer wheel)

Per ogni singola manovra si ricavano le forze di contatto scambiate tra suolo e pneumatico; tali forze costituiscono lo stato tensionale del portamozzo e quindi la progettazione strutturale. Per motivi di riservatezza non è possibile riportare i valori assoluti delle forze agenti.

Tali valori sono stati comunque classificati qualitativamente nella tabella 5 in base all'intensità e al verso della forza, se concorde (+), se opposto (-). L'intensità è espressa in quattro livelli ordinali (bassa, media, alta,) ottenuti normalizzando ciascuna componente rispetto al carico di picco tra tutte le manovre, il trattino indica componente nulla o trascurabile. Il sistema di riferimento adottato è quello vettura: l'asse x è diretto longitudinalmente secondo la direzione di marcia, l'asse z verticalmente verso l'alto rispetto al suolo e l'asse y trasversalmente concorde con la convenzione dei segni data dagli assi precedenti. Tutte le forze sono riferite al punto di contatto al suolo, tranne nel caso del Side Wall che agisce al centro ruota.

Manovra	F_x	F_y	F_z
Jump Over Kerb	—	—	 Alta (+)
Side Wall*	—	 Media (+)	 Media (-)
Pure Braking	 Alta (-)	—	 Alta (+)
Pure Cornering – Inner Wheel	—	 Bassa (+)	 Bassa (+)
Pure Cornering – Outer Wheel	—	 Alta (-)	 Alta (+)
Pure Acceleration	—	—	 Bassa (+)
Combined Braking – Inner Wheel	 Media (-)	 Bassa (+)	 Bassa (+)
Combined Braking – Outer Wheel	 Alta (-)	 Media (-)	 Media (+)
Combined Acceleration – Inner Wheel	—	 Bassa (+)	 Bassa (+)
Combined Acceleration – Outer Wheel	—	 Media (-)	 Media (+)

* Punto di applicazione: centro ruota.

Intensità:  bassa  media  alta (+) concorde (-) opposto

Tabella 5: Classificazione qualitativa dei carichi per manovra.

2.8.2 Vincoli

La sospensione a quadrilatero con push-rod, dal punto di vista cinematico, ha un solo grado di libertà: lo scuotimento verticale della ruota, governato dalla compressione della molla-ammortizzatore.

Il portamozzo, vincolato ai bracci della sospensione, eredita quindi questo grado di libertà. A esso si aggiunge la rotazione attorno all'asse di sterzo, che non costituisce comunque un moto libero perchè imposto dal tirante di sterzo per l'assale anteriore o dal tirante di convergenza per quello posteriore. I vincoli del componente sono quindi definiti esclusivamente dai collegamenti con la sospensione e dallo sterzo o convergenza.

2.8.3 Integrazione al sistema gruppo ruota

il portamozzo occupa lo spazio interno al cerchio, che deve però accogliere anche il disco, la pinza freno e, dove necessario, i condotti per il raffreddamento dell'impianto frenante.

La presenza di tutti questi elementi delimita fortemente il volume effettivamente disponibile e ne definisce gli ingombri.

Essi costituiscono il vincolo geometrico principale utilizzato nella successiva definizione del volume di base usato nella generazione del componente, descritta nel Capitolo 3.

3 Progettazione generativa

3.1 Introduzione alla progettazione generativa

La progettazione generativa è uno strumento CAD 3D che tramite intelligenza artificiale permette di generare vari design di un componente attraverso l'assegnazione di carichi, vincoli, materiali e processi produttivi. La progettazione generativa quindi costituisce un vero e proprio metodo di esplorazione progettuale con l'utilizzo di algoritmi computazionali che vanno ad aggiungere materiale in modo intelligente al fine di ottenere un componente ultimato. Questo approccio consente al progettista di interagire con la tecnologia studiando i possibili design per creare con maggiore rapidità componenti innovativi. [10] La progettazione generativa ha diversi scopi quelli principali sono:

- Esplorazione automatica di molte soluzioni
- Ricerca di soluzioni per multi-obiettivo
- Accelerazione del processo di design
- Generazione di geometrie non intuitive

Il campo di applicazione è molto vario, la flessibilità di generazione permette di trovare questi tipi di soluzioni in settori totalmente differenti. Il costo computazionale è notevole ma al giorno d'oggi la progettazione generativa si può trovare già integrata nei più comuni e avanzati software CAD. Prima di entrare nello specifico della progettazione generativa è importante definire la differenza con l'Ottimizzazione topologica spesso confusa.

L'ottimizzazione topologica (TO) è una metodologia per determinare la progettazione ottimale di un oggetto per raggiungere un obiettivo specifico, tenendo conto di vincoli, carichi e condizioni di delimitazione attraverso un algoritmo matematico, il più utilizzato in tale ambito è il Solid Isotropic Material with Penalization method (SIMP), il quale si basa sull'eliminazione del materiale mediante confronto con un valore di soglia (threshold). La topologia risultante è quindi unica. La differenza che bisogna cogliere è che l'OT genera un risultato matematico ottimale tra peso e rigidità, mentre la GD esplora lo spazio delle possibili soluzioni restituendo design con una visione più ampia, dove sono compresi ulteriori parametri per la finalità produttiva.

3.1.1 Modellazione del volume di base

La prima richiesta per la progettazione generativa è la definizione dello spazio volumetrico dove il software può aggiungere materiale per la generazione del componente. In questo caso i limiti sono dati dal:

- Raggio interno del cerchio
- Raggio esterno dei cuscinetti e mozzo
- Posizione della pinza freno
- Posizione del disco freno

Sono stati quindi presi come riferimento tali superfici di ingombro, attorno le quali è stato costruito il volume di riferimento per la generazione del componente, mostrato in figura 17. Una richiesta fondamentale da parte del software è che il volume debba essere un body contenente tutte le features che dovrà avere il portamozzo ultimato.

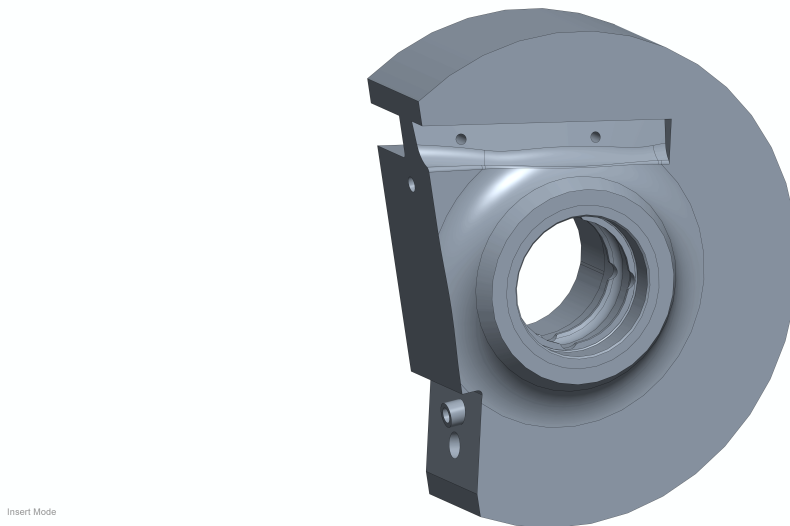


Figura 17: Volume di base

3.1.2 Preserved geometry

Una volta definito il volume di base, all'interno di esso sono stati creati ulteriori body che vengono inseriti nella classe "preserved geometry". Questa classificazione permette al progettista di indicare al software quali elementi si vogliono mantenere durante la generazione del componente. Questi componenti non verranno ottimizzati o deformati dal software ma solo utilizzati come materiale necessario per un collegamento fisico all'applicazione di forze e vincoli.

Si è deciso quindi mantenere la modellazione della sede dei cuscinetti e degli spallamenti, questo nella pratica significa costruire un body "fittizio" nella zona centrale che il risolutore manterrà durante la progettazione generativa. Un appunto fondamentale è assegnare lo stesso tipo di materiale a tutti i body creati per non creare discontinuità ma uniformità di materiale. Come si può notare dalla figura 18 il body creato è perfettamente all'interno del volume di base rispettando il primo requisito imposto dalla progettazione generativa.

Un'ulteriore lavorazione è stata fatta per consentire l'ingresso e il montaggio di tutti i componenti di collegamento come dadi, bulloni ecc. Sono state quindi realizzate delle zone vuote di materiale per realizzare lo spazio di montaggio.

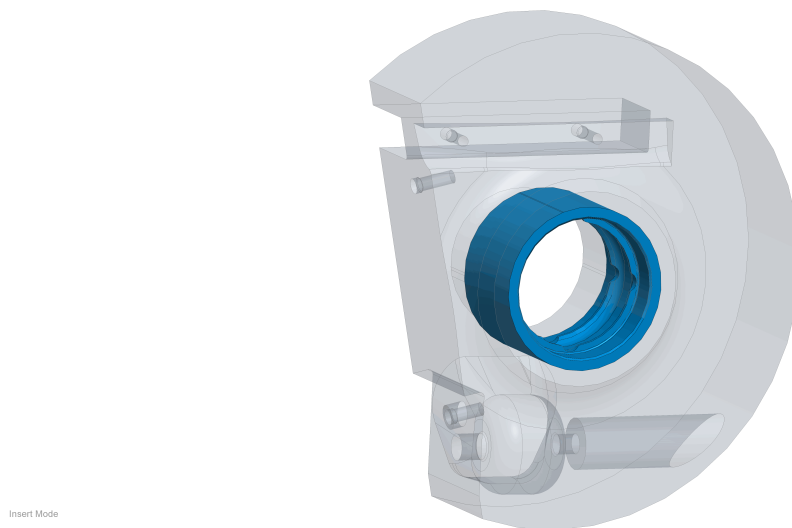


Figura 18: Sede cuscinetti

Il software utilizzato per la progettazione generativa è Creo 12 con l'estensione "Generative Shape design", ciò permette di modellare e generare sullo stesso software. In Creo 12 c'è una funzione che dà la possibilità di inserire direttamente nei tools della "Generative Shape design" uno spazio superficiale contenente un volume materiale a partire da un offset geometrico di una superficie, in parole semplici è una soluzione alternativa alla classe "preserved geometry". Anche se di fatto queste zone sono classificate nella medesima classe appena citata.

Durante i tentativi iniziali di generazione del componente tramite l'utilizzo di questa funzione, si è evidenziata una maggiore stabilità e convergenza al successo della simulazione, rispetto all'assegnazione dei body nella parte 3D. Per questo motivo si è deciso di optare per questa strada, ottenendo in definitiva il luogo materiale di lavoro che non sarà ottimizzato, mostrato in figura 19.

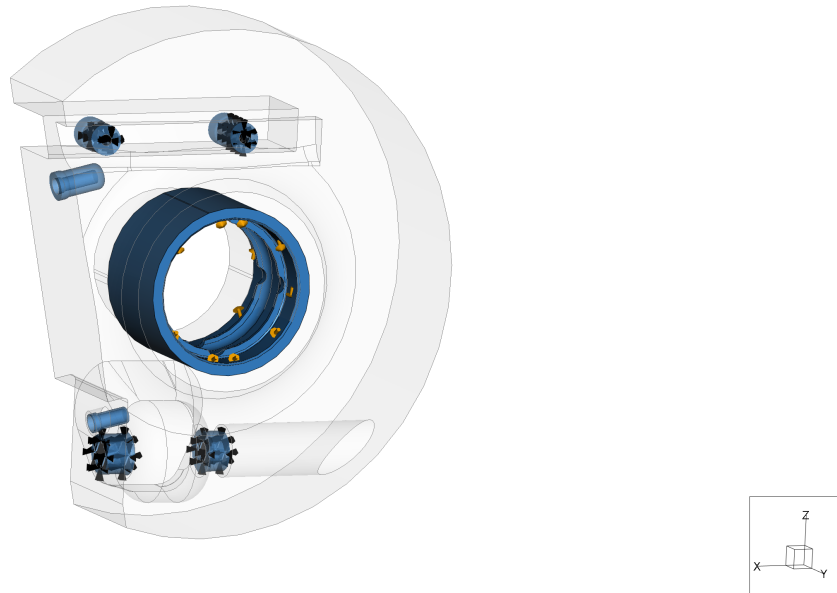


Figura 19: Fase iniziale della generazione

Oltre alla sede cuscinetti già descritta in precedenza sono presenti i volumi di materiale attorno al quale si inseriranno gli elementi di collegamento delle sospensioni e della pinza freno. Queste zone di materiale oltre a permettere il posizionamento di vincoli e forze hanno il ruolo di dare direzionalità alla soluzione generativa.

In realtà questa è una proprietà intrinseca della progettazione generativa, lavorando similmente ad un'ottimizzazione topologica ha bisogno che il componente sia completamente vincolato e che il materiale sia attraversato da un flusso di sforzi per individuare le zone dove mantenere materiale. Infatti, nel caso non ci sia materiale interposto fra le aree di vincolo e le aree d'applicazione delle forze la simulazione fallisce ancora prima di iniziare.

3.1.3 Condizioni al contorno

Prima di procedere alla fase successiva della generazione del componente si devono fare alcune considerazioni preliminari. Avendo integrato da poco la progettazione generativa il software Creo 12 presenta alcuni limiti, dati da:

1. Assiemi
2. Contatti
3. Elementi 1D e 2D
4. Vincoli in un punto
5. Controlli per la mesh

Gli elementi appena citati non sono disponibili nell'ambiente "generative shape design". I risultati ottenuti devono quindi essere valutati con criterio ingegneristico, tenendo a mente queste limitazioni.

La fase successiva dopo la modellazione del volume base di riferimento e dei "preserved geometry" è posizionare i vincoli e forze.

Vincoli - In riferimento alla figura 19, nella parte inferiore, dove alloggerà il giunto sferico del triangolo inferiore, sono stati inseriti vincoli cilindrici sulle facce interne dei fori e di planarità sulle facce piane esterne. Con questa configurazione si riesce a replicare abbastanza fedelmente i vincoli reali dati dall'accoppiamento per mezzo di un bullone.

Mentre nella parte superiore sono stati inseriti vincoli di tipo fixed (zero gradi di libertà), questo per simulare al meglio possibile il vincolo dato dai due prigionieri che si andranno a collegare alla forcella del triangolo superiore e tirante sterzo/convergenza.

Forze - In questo caso invece il software permette la collocazione di forze in un punto, sfruttando questa funzione si possono assegnare tutte le forze descritte nel capitolo 3 raggruppate per ogni singola manovra nel punto di contatto al suolo. Successivamente tramite un impostazione avanzata è possibile collegare queste forze alle sedi dei cuscinetti per mezzo di un RBE3 approssimato.

Di fatti non esiste ancora nessuna mesh e di conseguenza ne anche il concetto di nodi master e slave. Quello che il software applica è semplicemente la trasposizione di forze in modo automatico senza che il progettista debba calcolarsi da solo i momenti di trasporto. Il medesimo procedimento è stato adottato per la forza frenante sulle superfici dei fori di alloggiamento dei prigionieri della pinza freno.

3.1.4 Impostazioni e criteri della generazione

Prima di avviare la generazione è necessario impostare adeguatamente le impostazioni e i criteri della simulazione.

Una delle impostazioni più importanti è il "minimum size element", attraverso il quale si definisce la lunghezza minima dell'elemento di mesh. Qui va fatta una precisazione importante, all'interno dell'ambito "generative shape design" per mesh si intende la rete di punti e linee/curve che formano la superficie del componente ottimizzato, non la creazione di tetraedri o quadrilateri attraverso i nodi, che è la definizione standard di mesh nell'ambito FEM.

Una volta impostato il valore di "minimum size element", il software restituisce il numero di elementi che creeranno la mesh superficiale. Minore è il valore di "minimum size element", maggiore sarà il numero di elementi creati. In aggiunta viene visualizzato un indice di accuratezza della soluzione più la mesh è fitta maggiore sarà il livello di accuratezza finale. Il costo computazionale cresce notevolmente all'aumentare dell'accuratezza, quindi in definitiva bisogna scegliere il valore di "minimum size element" in funzione del miglior compromesso fra qualità e tempistiche.

Per ordine di importanza si devono assegnare al software i seguenti criteri: massimizzare la massa o la rigidità, riduzione percentuale di volume o massima massa ammissibile, e parametri di produzione.

Uno dei requisiti vincolanti della lista dei requisiti (Tabella 3) è ottenere una rigidità pari o superiore ai portamozi esistenti, per questo si è deciso di massimizzare la rigidità.

Mentre uno dei requisiti obbiettivo è quello di ridurre il peso di circa il 10% rispetto al fresato, si è assegnata quindi una massa massima ammissibile pari a 1,3 kg.

I parametri di produzione possono riguardare molti aspetti, per lasciare la massima libertà al software si è deciso di inserire il vincolo di "build direction" a 40° che rispecchia il requisito per la realizzazione in AM.

Per componenti realizzati mediante Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), si adotta generalmente la seguente regola progettuale:

- Angoli superiori a 45° rispetto al piano di costruzione (ovvero circa 45° rispetto all'orizzontale) possono essere realizzati senza strutture di supporto; angoli inferiori a 45° richiedono normalmente l'impiego di supporti.

3.1.5 Sensitività al materiale

L'ultimo passo della progettazione generativa è la scelta del materiale. Come analizzato nel Capitolo 1 nella sezione «materiali», la scelta ricade sui tre materiali maggiormente impiegati per L-PBF.

Una nota da tenere in considerazione è che le leghe di alluminio AlSi10Mg e Scalmalloy[®] hanno circa lo stesso modulo elastico. Ai fini pratici vuol dire che ci si aspetta una soluzione generativa uguale. Il motivo è che il software ragiona tramite una matrice di rigidità, questa dipende dal modulo elastico e dalla geometria.

Per la creazione della geometria ottimizzata il software segue il flusso delle forze, quindi avendo anche i medesimi vincoli e medesime forze assegnate è altamente probabile che la soluzione converga allo stesso risultato. Se ciò non fosse sarebbe un problema e il software non risulterebbe affidabile.

3.2 Generazione del componente

Una volta determinato il contesto in cui il software può operare, durante la progettazione generativa, esso esplorerà una moltitudine di soluzioni portando a termine la migliore che rispecchia tutti i criteri imposti.

In ordine si procede prima con le leghe di alluminio e successivamente con la lega di titanio.

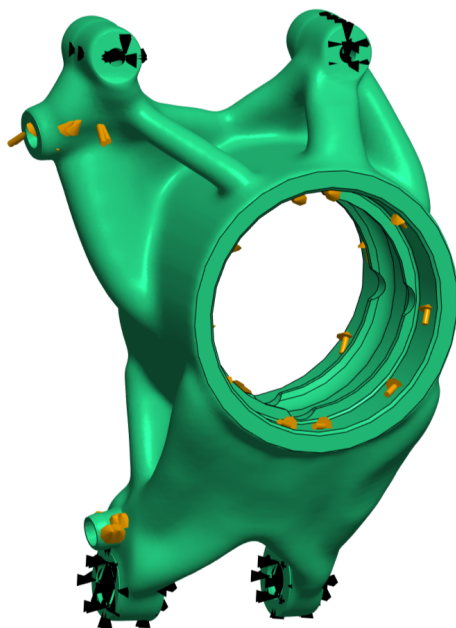
Leghe di alluminio - Come primo step si analizzano le geometrie ottimizzate delle leghe di alluminio AlSi10Mg e Scalmalloy[®].

Lanciando le soluzioni notiamo nelle sottostanti (Figura 20 e Figura 21), la stessa geometria ottimizzata come da aspettative. Il risultato ottenuto rispetta tutti gli input dati precedentemente.

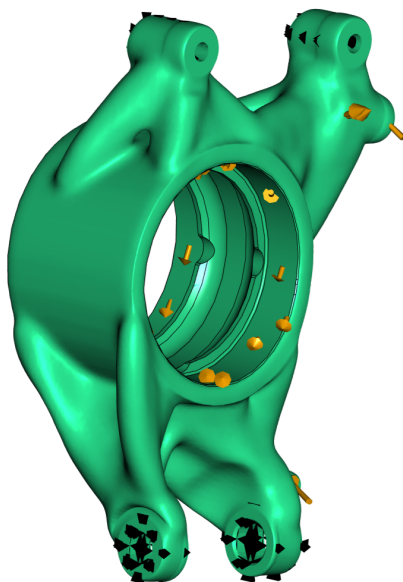
Il peso ottenuto è di 1,289 kg e rispetta tutti i casi di carico delle manovre di gara viste nel capitolo 3.

Il software dà la possibilità di mostrare i risultati degli sforzi agenti sul portamozzo per ogni singola manovra. Questi risultati vanno assolutamente letti con un occhio critico per via delle semplificazioni fatte per i limiti dovuti al software, e si dovrà validare la geometria in ambito FEM.

Nonostante ciò possono dare un primo riferimento dello stato tensionale del componente, per semplicità e sintesi vengono mostrati i risultati delle manovre più gravose riscontrate (Figura 22 e Figura 23). Come ci si poteva aspettare gli sforzi maggiori li abbiamo nei casi di: Jump over kerb, Pure braking, Pure cornering - outer wheel e Combined braking corner - outer wheel.

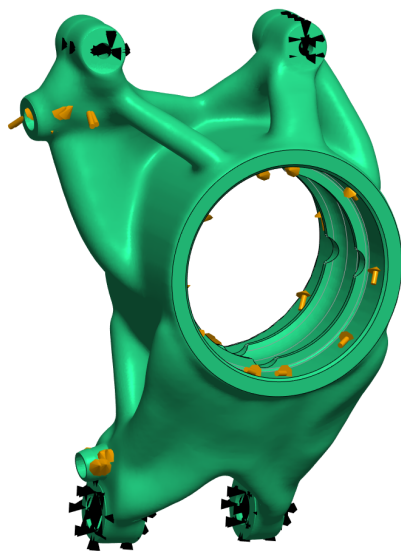


(a) Vista frontale

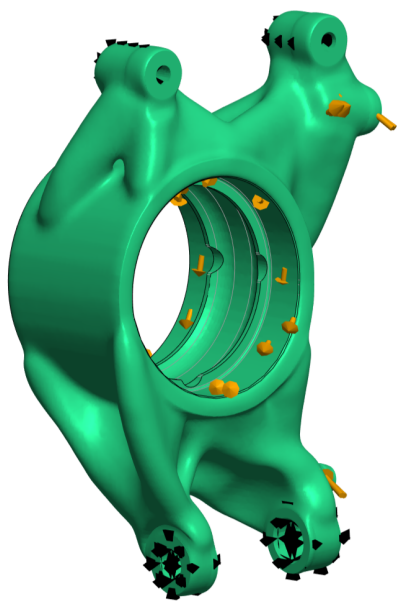


(b) Vista posteriore

Figura 20: Progettazione generativa portamozzo con AlSi10Mg

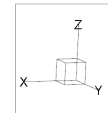
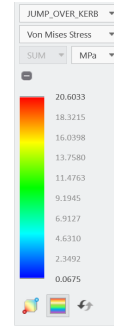
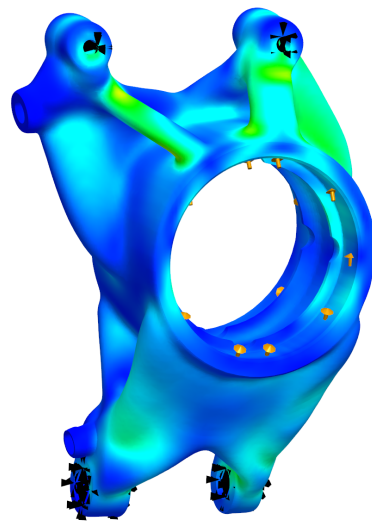


(a) Vista frontale

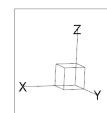
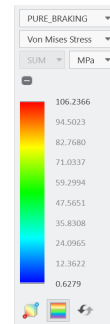
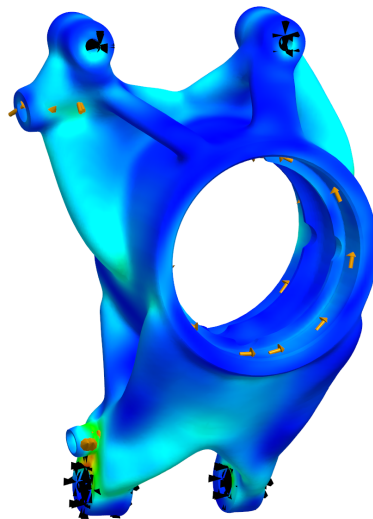


(b) Vista posteriore

Figura 21: Progettazione generativa portamozzo con Scalmalloy[®]

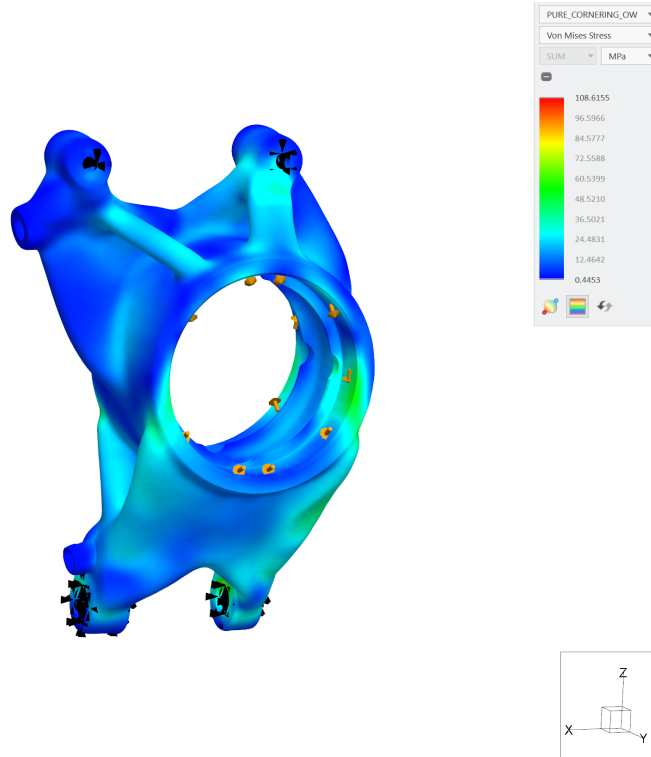


(a) Jump over kerb

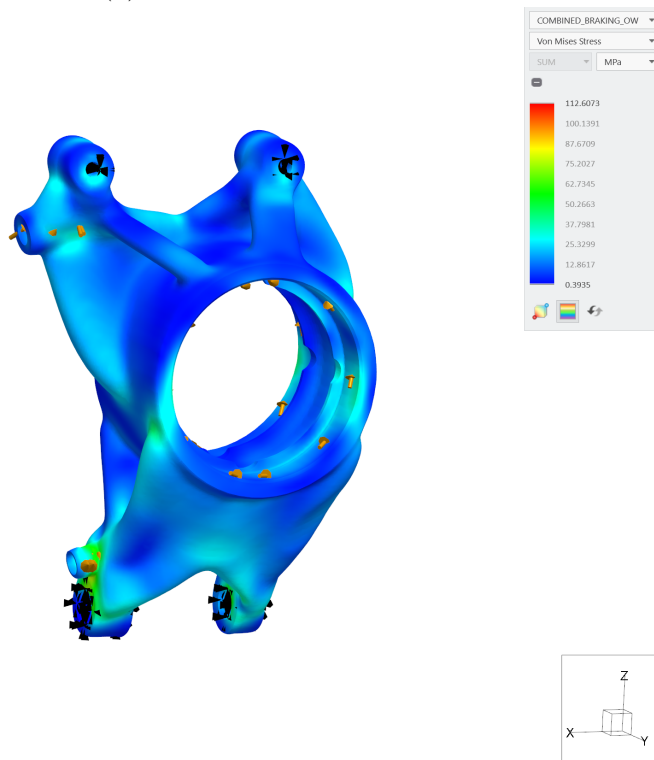


(b) Pure braking

Figura 22: Sforzi manovre in "generative shape design" report 1



(a) Pure cornering - outer wheel



(b) Combined braking corner - outer wheel

Figura 23: Sforzi manovre in "generative shape design" report 2

Lega di titanio - Come secondo step lanciamo la simulazione assegnando la lega di titanio Ti-6Al-4V, il risultato è mostrato in figura 24.

La simulazione converge ma con un warning: la soluzione non rispetta completamente i criteri imposti. Il problema è la massima massa ammissibile assegnata.

Per creare una geometria che massimizzi la rigidità, il software ha bisogno di mantenere una certa quantità di materiale dal volume iniziale ma in questo caso deve eccedere con il limite massimo.

Se analizziamo nel dettaglio la situazione notiamo che la sede centrale dei cuscinetti in titanio pesa da sola circa 0,980 Kg.

Mantenere un volume così grande invariato vincola la generazione, ma è un requisito fondamentale mantenere inalterata la zona centrale del portamozzo.

Inoltre si denotano sezioni molto sottili, la presenza di possibile cricche durante l'AM potrebbe portare più facilmente alla rottura. Per questo motivo si è deciso di non proseguire con la lega di titanio Ti-6Al-4v e portare avanti la geometria generata con le leghe di alluminio.

La scelta finale del materiale sarà determinata dalla validazione FEM.



Figura 24: Generazione della geometria con Ti-6Al-4v

3.2.1 Ricostruzione della mesh

Una volta definita la geometria di riferimento, bisogna importarla nel CAD, per fare ciò, si utilizza la funzione automatica disponibile in Creo 12.

Quello che fa è solidificare le superfici chiuse create dal controllo della mesh eseguendo poi un'operazione booleana di unione con i "preserved geometry". L'importazione automatica non sempre funziona in modo rigoroso, per questo è necessario andare a ricostruire parti mal formate. Nella figura 25 sotto stante ne abbiamo un esempio.

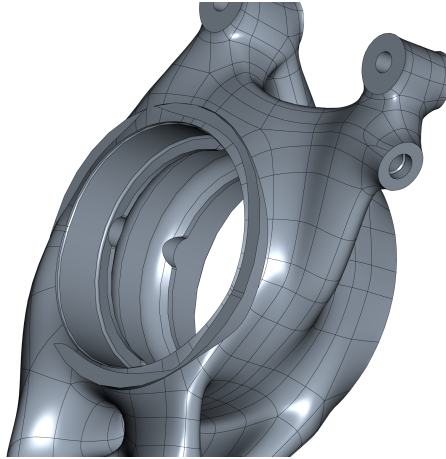
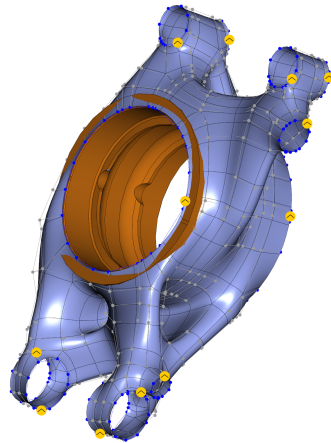
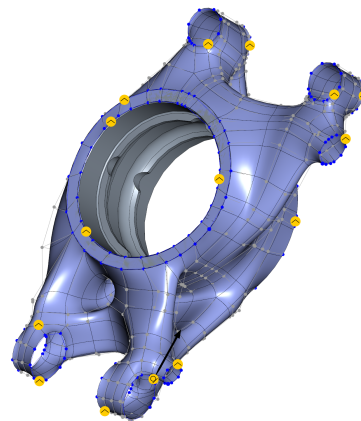


Figura 25: Problema di ricostruzione

La mesh delle superfici ha perso il riferimento e non è stata eseguita correttamente la ricostruzione con l'unione al body centrale della sede dei cuscinetti. Manualmente entrando nella funzione "freestyle" di Creo in ambito CAD è stato possibile riallineare il riferimento (Figura 26a e Figura 26).



(a) Freestyle mode



(b) Ricostruzione della mesh

Figura 26: Ricostruzione della mesh

Sempre tramite la funzione "freestyle" sono stati ricostruiti gli attacchi per i condotti di raffreddamento e per il sensore della ruota fonica. Sono stati modellati in fase successiva in quanto non era di interesse ottimizzare queste zone.

Il condotto di raffreddamento dell'impianto frenante montato sul portamozzo fresato andrebbe in ogni caso riprogettato con la nuova forma del portamozzo.

Gli attacchi sono stati quindi inseriti al solo scopo di essere più fedeli alla versione precedente e per inserire la forza dell'aria che esercita sugli attacchi in ambito FEM.

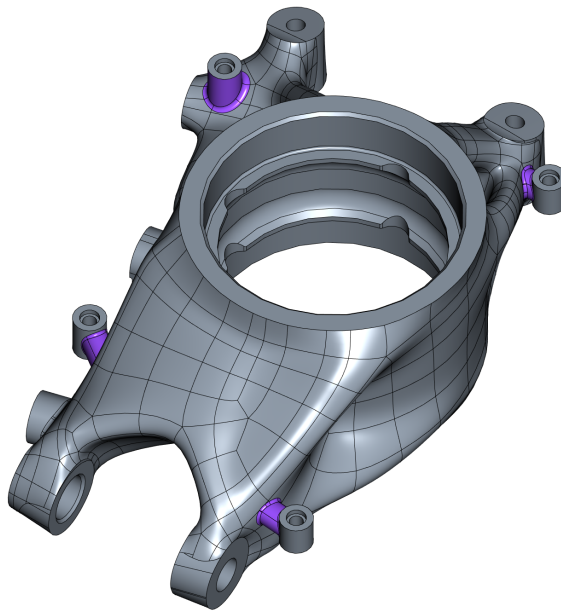
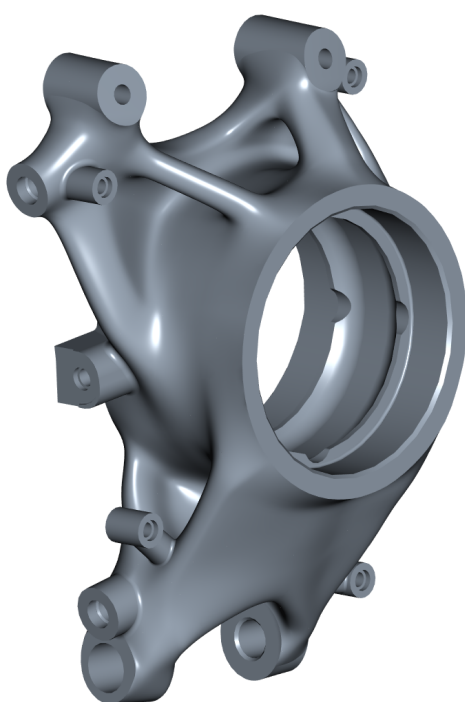
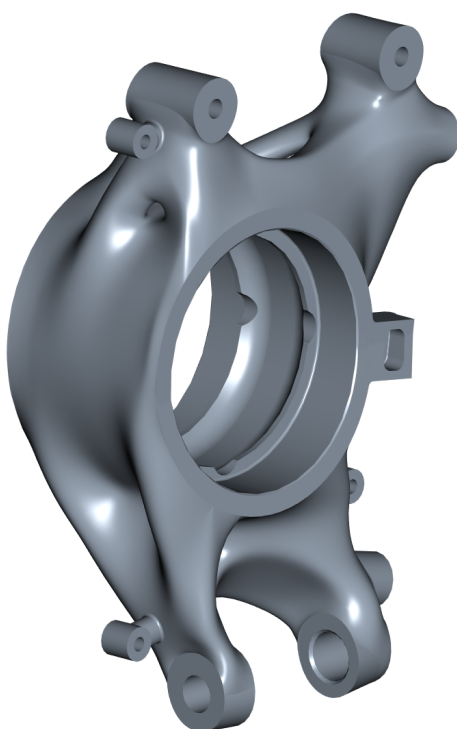


Figura 27: Modellazione supporti condotti di raffreddamento



(a) Vista frontale

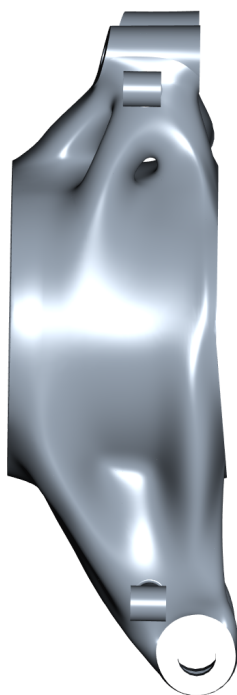


(b) Vista posteriore

Figura 28: Portamozzo ottimizzato dettaglio 1



(a) Vista laterale destra



(b) Vista laterale sinistra

Figura 29: Portamozzo ottimizzato dettaglio 2

3.3 Validazione strutturale

Nonostante la generazione si basi su verifiche strutturali, come abbiamo visto in precedenza ha delle limitazioni che non consentono una affidabilità assoluta dei risultati. In ogni caso dopo una generazione o ottimizzazione è buona norma verificare il componente attraverso una analisi strutturale più approfondita.

Con l'estensione Creo Simulate è possibile eseguire analisi FEM direttamente sul componente generato. L'obiettivo di questa analisi non è una certificazione assoluta dello stato tensionale del componente in ogni ambito degli sforzi, ma un'analisi preliminare volta a comprendere se e come la generazione ha portato a termine una geometria del portamozzo valida a resistere ai carichi dati.

Rispetto al tool "Generative Shape Design" l'ambiente Creo simulate offre maggiori funzionalità. Visto l'obiettivo prefissato, ci si è imposti di rimanere in ambito lineare per favorire la velocizzazione dell'analisi. Il focus è l'integrità strutturale generale del portamozzo, avendo mantenuto parte della geometria invariata questa è già stata validata attraverso analisi più approfondite, è un'approssimazione che va tenuta in conto ma che permette notevolmente di accelerare il processo.

3.3.1 Modello di analisi (FEM)

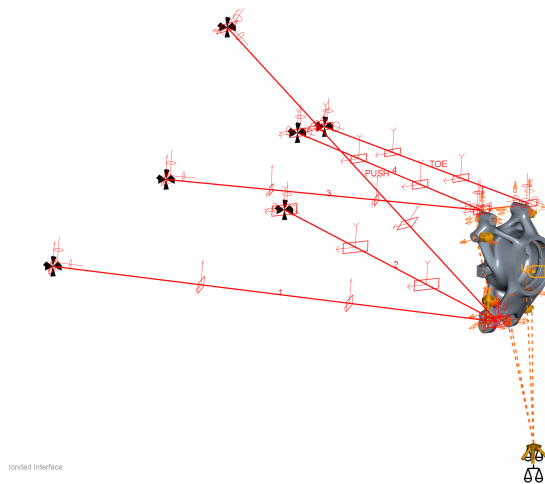


Figura 30: Modello FEM

Per il modello di analisi si è cercato di replicare il più fedelmente possibile il sistema sospensivo su cui verrà montato il portamozzo.

Sono stati importati i punti dei giunti sferisci delle sospensioni sia lato telaio che lato

portamozzo. Tra questi punti sono state create delle travi con sezione equivalente a quella dei bracci e stesso materiale, in modo da replicarne la rigidità.

Tutti i punti lato telaio sono stati vincolati tramite delle cerniere (traslazioni fisse e rotazioni libere) così da ricreare un giunto sferico. Con questa configurazione si ha un sistema perfettamente isostatico.

Ai punti estremali dei bracci lato portamozzo sono state lasciate libere le rotazioni, questo è fondamentale per la creazione di un rigid link con i fori del portamozzo.

Il rigid link ha come nodo master il punto appartenente alla sospensione mentre i punti slave sono quelli creati dalla mesh all'interno delle superfici dei fori. Il rigid link crea un collegamento rigido fra questi punti, non considerando la cedevolezza degli elementi interposti fra sospensioni e portamozzo.

Avviene quindi una trasmissione rigida degli sforzi che dovrà essere considerata nei risultati. Ciò è stato fatto per evitare di inserire altri componenti e contatti che portano a non linearità e risultano superflui per questo tipo di analisi.

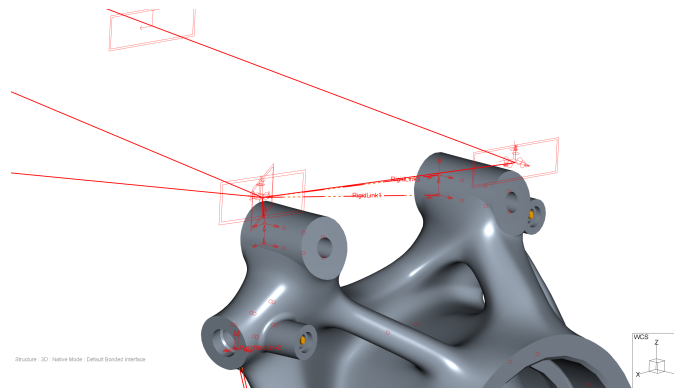
Per quanto riguarda le forze sono state applicate sempre al punto di contatto al suolo, esso è poi collegato tramite un weighted link ai nodi della mesh presenti sulle superfici delle sedi dei cuscinetti. Il medesimo metodo è stato applicato per la forza frenante della pinza freno.

Giusto per completezza e chiarezza si riportano le definizioni di rigid link e di weighted link, più comunemente chiamati rispettivamente RBE2 e RBE3. [7]

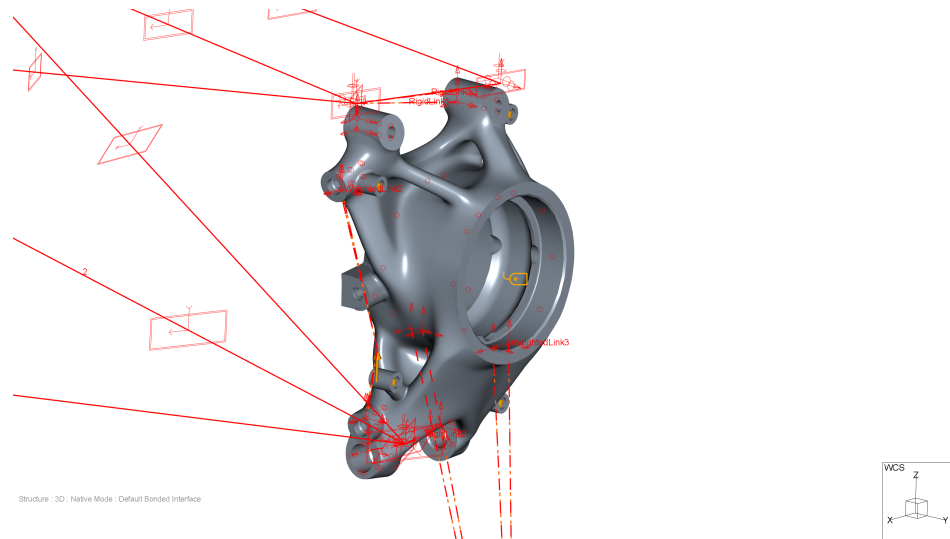
- RBE2: tutti i nodi dipendenti seguono esattamente gli spostamenti del nodo master. Questo aumenta la rigidità locale della struttura.
- RBE3: il moto del nodo dipendente è una media pesata dei nodi indipendenti. Non irrigidisce la struttura, permettendole di deformarsi naturalmente.

Anche in questo caso come per la progettazione generativa sono state analizzate tutte le manovre considerate nel capitolo 3.

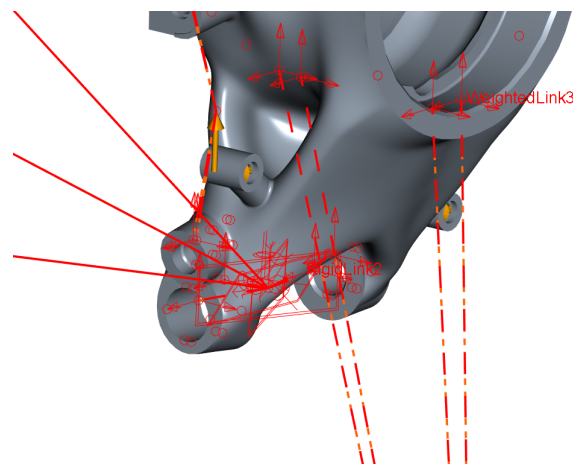
Per velocizzare l'analisi FEM è stato assegnato al portamozzo un materiale avente le caratteristiche di una lega di alluminio. È una considerazione assolutamente accettabile, si ricorda che in ambito FEM gli sforzi vengono calcolati a partire dalla matrice di rigidità che dipende dalla geometria del componente e dal modulo elastico. Di conseguenza avendo per entrambi i materiali un modulo elastico che varia fra i 70 GPa e 74 GPa, è stato preso il valore medio di 72 GPa per uniformare l'analisi FEM.



(a) Vista superiore di dettaglio



(b) Vista centrale di dettaglio



(c) Vista inferiore di dettaglio

Figura 31: Modello FEM rigid link e weighed link

3.4 Analisi dei risultati (FEM)

Per l'analisi dei risultati ci concentreremo principalmente su tre aspetti: fattore di sicurezza, massima deformazione e variazione di camber e toe.

Fattore di sicurezza - Il fattore di sicurezza è un valore adimensionale dato dal rapporto tra: il massimo sforzo registrato sul componente e la resistenza a snervamento del materiale (Si sceglie quest'ultima invece che quella di rottura per essere ancora più conservativi).

Dalla tabella 5 del capitolo 1 si ricavano le resistenze a snervamento delle leghe di alluminio AlSi10Mg e Scalmalloy®.

Dall'esperienza ingegneristica aziendale si consiglia di avere un fattore di sicurezza minimo per le manovre più gravose.

Manovra	Fattore di sicurezza richiesto
Pure Cornering Outer	$SF_{YTS} \geq 2$
Pure Braking	$SF_{YTS} \geq 3$
Jump	$SF_{YTS} \geq 3$
Combined Braking Outer	$SF_{YTS} \geq 2$

Tabella 6: Fattore di sicurezza minimo per ogni manovra

Dalla tabella 6 si hanno i valori di riferimento da verificare con i risultati ottenuti dall'analisi FEM delle singole manovre.

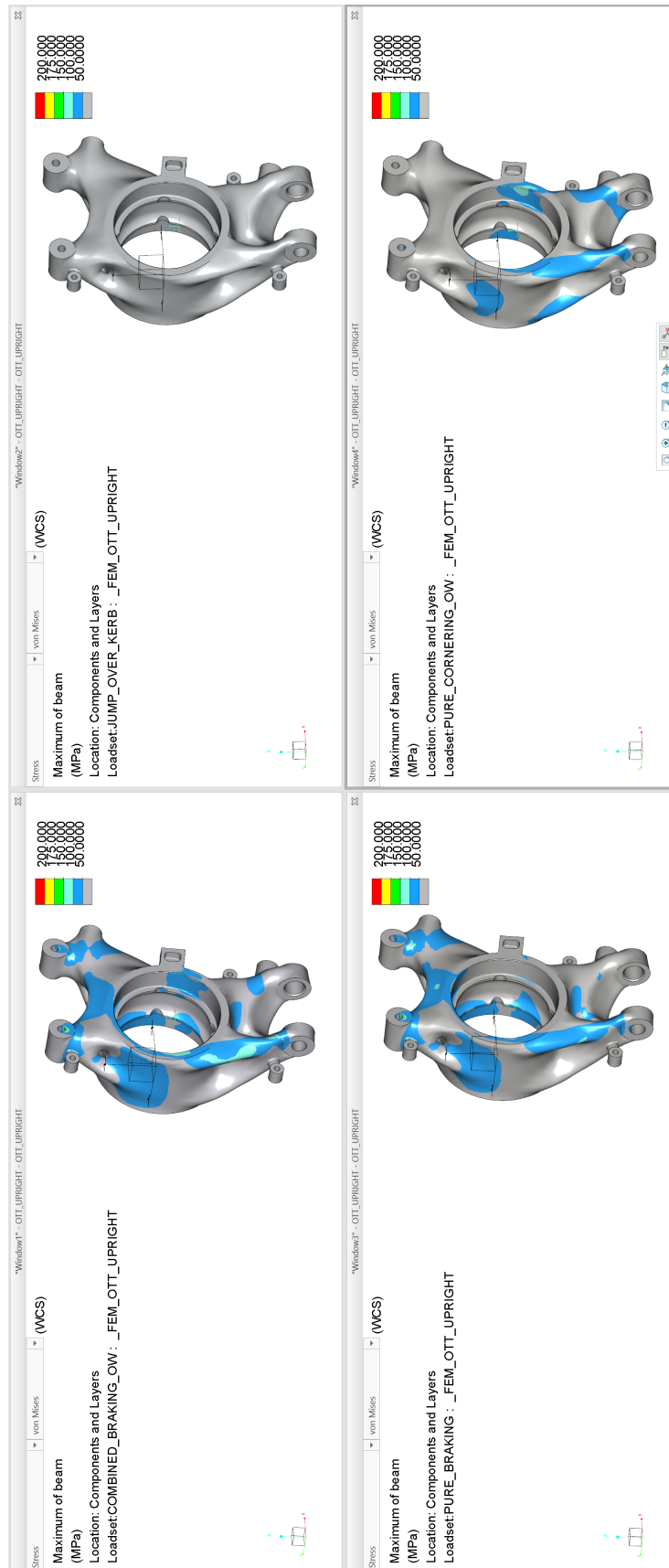


Figura 32: Risultati analisi FEM

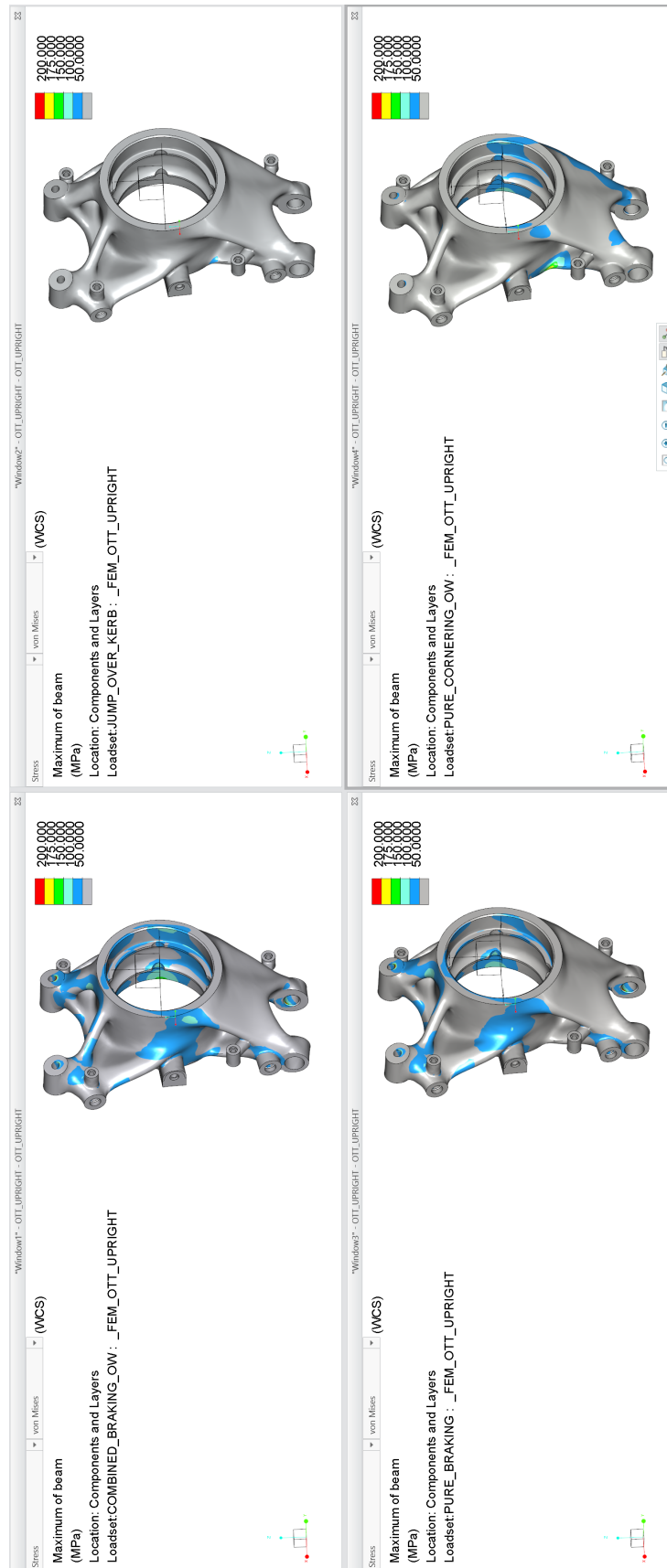


Figura 33: Risultati analisi FEM 2

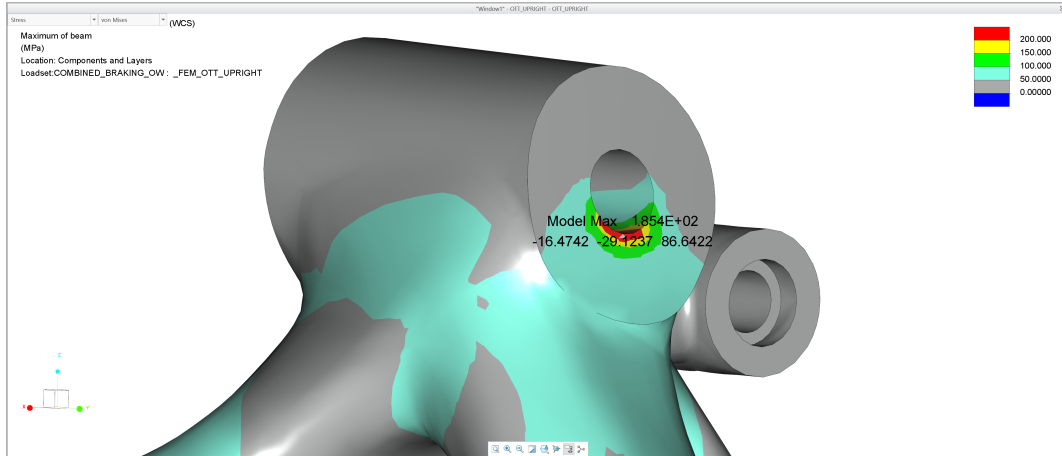


Figura 34: Condizione di massimo sforzo

Lo sforzo massimo si verifica nella manovra Combined braking outer sui fori degli attacchi superiori. Dal valore massimo registrato si può calcolare il fattore di sicurezza. Lo stesso viene fatto per le altre manovre considerate.

Adesso è necessario dividere la verifica nei due casi: uno per la lega AlSi10Mg e uno per la lega Scalmalloy[®], questo perchè i due materiali hanno valori di resistenza a snervamento differenti.

Manovra	Fattore di sicurezza richiesto	Esito
Pure Cornering Outer	$SF_{YTS} \geq 2$	✓
Pure Braking	$SF_{YTS} \geq 3$	✓
Jump	$SF_{YTS} \geq 3$	✓
Combined Braking Outer	$SF_{YTS} \geq 2$	✗

Tabella 7: Verifica fattore di sicurezza per AlSi10Mg

Manovra	Fattore di sicurezza richiesto	Esito
Pure Cornering Outer	$SF_{YTS} \geq 2$	✓
Pure Braking	$SF_{YTS} \geq 3$	✓
Jump	$SF_{YTS} \geq 3$	✓
Combined Braking Outer	$SF_{YTS} \geq 2$	✓

Tabella 8: Verifica fattore di sicurezza per Scalmalloy[®]

Dalle verifiche emerge come il portamozzo in AlSi10Mg non verifica la condizione di Combined Braking Outer.

Dalle semplificazioni fatte in precedenza però, si può dedurre che sia un carico concentrato dovuto alla presenza del rigid link. Inoltre non sono state considerate le cedevolezza interne dei componenti di collegamento e non è stato simulato l'accoppiamento vite - madre vite.

Possiamo quindi assumere che il carico in questione sia un caso isolato, osservando anche il comportamento generale del portamozzo che non supera i 100 MPa.

Il requisito del fattore di sicurezza nella lista dei requisiti (Tabella 3) è vincolante per tale motivo la soluzione del portamozzo in AlSi10mg viene portata avanti ma con le dovute precauzioni, nel caso si volesse arrivare a una produzione sarebbero necessarie ulteriori verifiche più approfondite. Il materiale sarà quindi scelto in base alla matrice di confronto del successivo capitolo 6.

Massima deformazione - La massima deformazione è associata alla rigidezza, per questo è un parametro molto utile per verificare che la rigidezza del portamozzo ottimizzato sia quanto meno pari a quella dei portamozzi esistenti. In questo caso si prende la manovra più gravosa che è risultata essere la Combined braking corner outer wheel e si compara il valore trovato con quello di riferimento. Il dato di riferimento è confidenziale e non può essere divulgato, ma viene comunque riportato l'ordine di grandezza e l'esito del portamozzo ottimizzato.

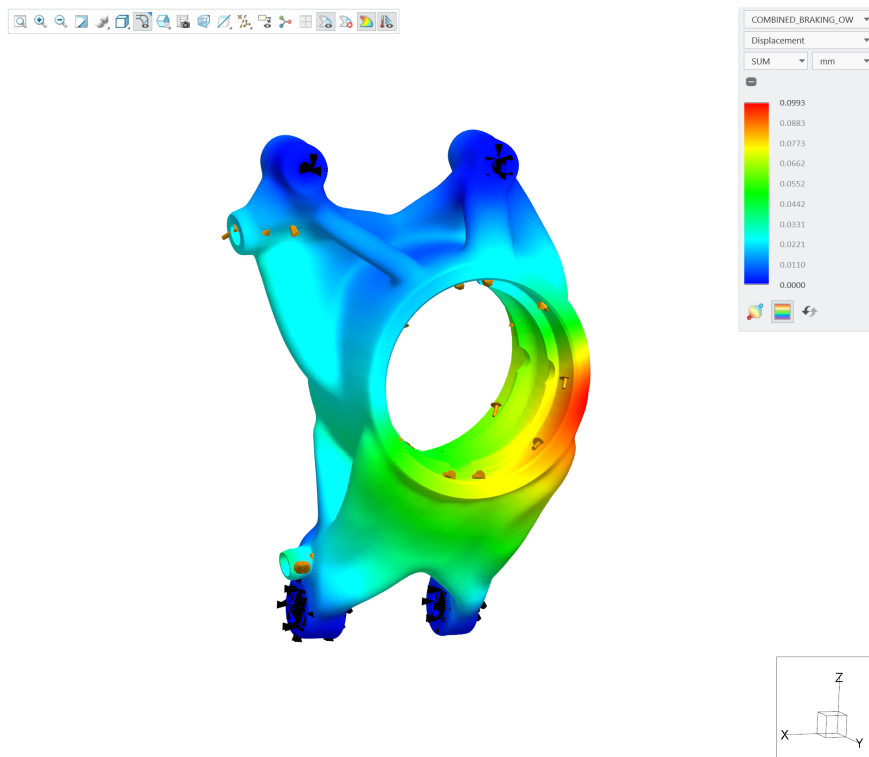


Figura 35: Condizione di massima deformazione

Lo spostamento è risultato essere inferiore dell'ordine di riferimento, quindi la rigidità del portamozzo può considerarsi valida.

Variazione di camber e toe - Per la valutazione delle variazioni di camber e di convergenza è stata adottata una misura sul nodo del centro ruota collegato tramite RBE3 alle sedi dei cuscinetti. Tale connessione trasferisce al nodo di riferimento la rotazione media dell'interfaccia senza introdurre un irrigidimento, lasciando quindi inalterati la deformata e lo stato tensionale nella zona di accoppiamento.

Su questo nodo è stata impostata una misura di rotazione, le cui componenti, riferite alla terna vettura, forniscono direttamente la variazione angolare del piano ruota: la rotazione attorno all'asse longitudinale rappresenta la variazione di camber, quella attorno all'asse verticale la variazione di convergenza. Trattandosi di una rotazione di corpo rigido del riferimento, il valore ottenuto è indipendente dal punto di misura considerato.

Al fine di ottenere un indice confrontabile tra le diverse configurazioni analizzate, la rotazione rilevata è stata normalizzata rispetto alle forze applicate nelle tre direzioni, esprimendo così la variazione angolare per unità di carico.

Questa grandezza costituisce di fatto una cedevolezza angolare del portamozzo e consente di caratterizzarne la rigidità indipendentemente dall'entità del caso di carico.

Compliance	Value	
Toe – Fx 1 kN	0.08	deg/kN
Toe – Fy 1 kN	0.037	deg/kN
Camber – Fy 1 kN	0.048	deg/kN

Tabella 9: Variazione di camber e toe

3.4.1 Considerazioni finali

La validazione presentata è di carattere preliminare difatti essa è finalizzata a verificare il comportamento strutturale della soluzione generativa sotto i casi di carico esaminati, ma non esaurisce l'insieme delle verifiche necessarie alla definitiva validazione del componente.

Conclusa l'analisi FEM in campo statico, rimangono alcuni aspetti che richiederebbero un approfondimento dedicato, in particolare la verifica termica e quella a fatica. Resta inoltre da quantificare l'anisotropia introdotta dalla L-PBF, per la quale è opportuno individuare i valori nella direzione meno favorevole.

Per quanto riguarda la risposta termica, i dati di esercizio della vettura Formula Renault 3.5 indicano, in corrispondenza del gruppo ruota, temperature dell'ordine di indicativamente di 80–120 °C.

Il confronto con i dati dei materiali usati per la progettazione generativa consente di ritenere che tale incremento termico non comprometta l'integrità del portamozzo. È tuttavia opportuno osservare che l'AlSi10Mg risulta più sensibile a tali temperature. Ne consegue che, in condizioni di esercizio con esposizione prolungata a temperatura elevata, il margine di sicurezza dell'AlSi10Mg si riduce in misura maggiore.

Per quanto riguarda l'analisi a fatica, richiederebbe una trattazione maggiore che va al di là dello scopo di tale studio, poiché la vita del componente non dipende unicamente dallo stato tensionale ma anche dal post-processing applicato al materiale. Trattamenti come la distensione termica e le lavorazioni superficiali agiscono infatti sulle tensioni residue, sulla porosità interna e sulla finitura superficiale, tutti fattori che possono causare la propagazione di cricche nei componenti realizzati per L-PBF, in definitiva la verifica a fatica è destinata a sviluppi futuri della seguente tesi.

Nel complesso, pur nei limiti di un'analisi preliminare, i risultati ottenuti sono soddisfacenti per entrambe le leghe, le due configurazioni rispettano i fattori di sicurezza minimi richiesti in tutte le manovre, con la dovuta giusta prudenza per la lega di alluminio AlSi10Mg. Inoltre, Mantengono una variazione di camber e toe comparabile con i riferimenti, confermando la validità della soluzione generativa.

Per concludere, un'analisi FEM più raffinata, con contatti reali e accoppiamenti bullonati, permetterebbe di chiarire la natura del picco di sforzo nel caso Combined Braking Outer e lo studio dell'orientamento di costruzione e dell'anisotropia indotta dalla L-PBF, insieme alla realizzazione di un prototipo e alla sua validazione sperimentale, consentirebbe di chiudere il ciclo di verifica confrontando i dati numerici con misure reali.

4 Discussione, conclusioni e sviluppi futuri

Le tre configurazioni esaminate nei capitoli precedenti, nello specifico il portamozzo saldato in acciaio 4130, quello fresato dal pieno in lega di alluminio 2618A e quello ottenuto mediante progettazione generativa in lega di alluminio AlSi10Mg o lega di alluminio Scalmalloy[®], rappresentano l'esito di tre progettazioni differenti. L'obiettivo comune rimane un'elevata rigidità con una massa ridotta.

Il presente capitolo mette a confronto le soluzioni, allo scopo di quantificare il beneficio effettivo dato dall'introduzione della progettazione generativa rispetto alle soluzioni consolidate.

Il confronto è condotto rispetto ai requisiti posti nel Capitolo 2 (Tabella 4).

Analizzeremo quindi: le prestazioni, espresse dalla massa e dalla variazione di camber e convergenza; i costi, relativi al materiale e al ciclo produttivo.

Poiché i valori assoluti di assetto delle configurazioni di riferimento sono coperti per riservatezza, il confronto su tali grandezze è espresso in forma relativa o qualitativa, riportandone l'ordine di grandezza.

Prestazioni - Il confronto prestazionale riguarda la massa e la variazione di assetto, ovvero i due parametri a cui la lista dei bisogni attribuisce priorità alta.

La massa dei tre componenti è riportata in Tabella 10. La geometria che deriva dalla progettazione generativa risulta la più leggera delle tre, con una riduzione del circa 10,7% rispetto alla configurazione fresata e del 30,9% rispetto a quella saldata.

Parametro	Saldato	Fresato	Additive manufacturing	
Materiale	Acciaio 4130	Alluminio 2618A	AlSi10Mg	Scalmalloy [®]
Densità [g/cm ³]	7,7	2,7	2,7	2,67
Massa [kg]	1,865	1,443	1,289	1,285

Tabella 10: Confronto Massa dei diversi portamozzi

La variazione di camber e convergenza per la soluzione generativa è descritta dalla tabella (Tabella 9), grandezza che esprime la rigidità del componente indipendentemente del caso di carico e che rende immediato il confronto tra configurazioni. I valori di riferimento delle soluzioni esistenti sono confidenziali ma si può dire che la cedevolezza angolare del portamozzo generativo risulta inferiore o comparabile a quella delle configurazioni di riferimento, confermando il mantenimento delle prestazioni in termini di dinamica del veicolo.

Compliance	Value
Toe – Fx 1 kN	0.08 <0.1 (Fresato) deg/kN
Toe – Fy 1 kN	0.037 <0.1 (Fresato) deg/kN
Camber – Fy 1 kN	0.048 <0.1 (Fresato) deg/kN

Tabella 11: Confronto variazione di camber e toe

Costi La valutazione economica ha un peso limitato nel presente lavoro (importanza bassa nella lista dei bisogni), trattandosi di uno studio orientato all'esplorazione tecnologica più che alla produzione di serie.

Ciononostante, il confronto dei costi resta necessario per posizionare correttamente la soluzione generativa rispetto alle alternative consolidate e per individuare quali voci incidono maggiormente sul costo finale di un componente realizzato mediante additive manufacturing.

Le voci principali restano due: il costo della materia prima e il costo del ciclo produttivo; nel caso della L-PBF a queste si aggiungono l'investimento impiantistico e il post-processing, che pesano in misura non trascurabile sul costo per pezzo.

Per inquadrare i valori delle tre soluzioni in un contesto di mercato più ampio, si fa riferimento ai dati aggiornati raccolti da una piattaforma specializzata nell'approvvigionamento di componenti industriali in additive manufacturing [6], che riporta gli intervalli di costo per le principali voci del processo di stampa metallica a letto di polvere. I dati sono espressi in intervalli, poiché il costo effettivo dipende dalla lega, dalla geometria, dai volumi e dal fornitore.

Costo del materiale. Il costo della materia prima segue la reperibilità e la lavorazione della polvere. L'acciaio 4130 è economico e diffuso; la lega 2618A ha un costo intermedio; la polvere di AlSi10Mg ha un costo elevato; la polvere di Scalmalloy[®], essendo una lega Al-Mg-Sc-Zr contenente scandio, presenta un costo specifico notevolmente superiore rispetto agli altri materiali, dovuto alla scarsità e alla difficoltà di estrazione dello scandio, incidendo in modo determinante sul costo del componente. I valori medi per chilogrammo dei quattro materiali del confronto, ricavati da fornitori specializzati, sono riportati in Tabella 12.

Parametro	Saldato	Fresato	AM1	AM2
Materiale	Acciaio 4130	Alluminio 2618A	AlSi10Mg	Scalmalloy [®]
Costo [€/kg]	3-7	10-20	50-100	4.000-10.000

Tabella 12: Confronto dei costi delle materie prime dei diversi portamozi.

Da questo confronto, dovendo scegliere tra la lega di alluminio AlSi10Mg e la lega di alluminio Scalmalloy[®], la decisione cade indubbiamente sulla prima: il divario di costo è talmente ampio da rendere non sostenibile una produzione con Scalmalloy[®], nonostante le sue proprietà meccaniche superiori.

Costo di processo e voci accessorie. Oltre alla materia prima, il costo di un componente L-PBF è governato dal tempo macchina, dall'investimento impiantistico e dalle lavorazioni successive. Il tempo macchina rappresenta la voce dominante del processo additivo, con tariffe orarie dei sistemi SLM/DMLS comprese tra 175 e 345 €/h. La Tabella 13 indica in termini di costo impianto e costo operativo della L-PBF impiegata.

Tecnologia	Costo impianto [€]	Costo operativo [€/h]
L-PBF	115.000–575.000	175–345

Tabella 13: Costo dell'impianto e costo operativo orario per L-PBF

Il componente stampato richiede quasi sempre operazioni di post-processing, il cui peso può incrementare il costo totale fino al 40%. Le principali voci accessorie e i relativi costi indicativi sono raccolti in Tabella 14: per un portamozzo in lega di alluminio realizzato in L-PBF sono rilevanti soprattutto la distensione termica, l'eventuale pressatura isostatica a caldo (HIP) e la finitura CNC delle zone funzionali.

Operazione di post-processing	Costo indicativo	Scopo
Pressatura isostatica a caldo (HIP)	115–345 € per ciclo	Elimina i vuoti interni, migliora la densità
Finitura CNC	60–175 €/h	Garantisce tolleranze ristrette e superfici lisce
Finitura delle superfici	20–100 €/h	Lucidatura, sabbiatura, verniciatura

Tabella 14: Costi indicativi delle principali operazioni di post-processing per componenti metallici stampati.

La combinazione di queste voci si traduce in un ampio intervallo di costo per il componente finito. La fonte [6] indica per un pezzo semplice e di piccole dimensioni un costo compreso tra 60 e 575 €, mentre per un componente grande o geometricamente complesso si raggiungono valori tra 575 e 11.500 € (Tabella 15). Un portamozzo, per dimensioni e complessità geometrica, si colloca nella fascia superiore.

Tipologia di componente	Costo indicativo [€]
Semplice / di piccole dimensioni	60–575
Grande / complesso	575–11.500

Tabella 15: Intervalli di costo per componente metallico finito realizzato in additive manufacturing.

Un quadro di sintesi degli intervalli di costo delle principali voci del processo L-PBF è riportato in Tabella 16; esso consente di avere un riferimento immediato dell'ordine di grandezza di ciascuna voce indipendentemente dalla specifica geometria.

Voce di costo	Intervallo
Polvere metallica	60–1.150 + €/kg
Investimento stampante	115.000–575.000 €
Tempo macchina	175–345 €/h
Post-processing	+10–40% sul costo totale

Tabella 16: Sintesi di costo del processo L-PBF

Confronto tra le tre tecnologie del lavoro. Le tre tecnologie considerate nel confronto si distinguono nettamente per la struttura di costo. La saldatura dipende dalla manualità dell'operatore: il costo è governato dal tempo di lavoro manuale e da eventuali riprese per correggere le deformazioni, con scarsa ripetibilità. La fresatura è un processo automatizzato a costo prevedibile, indipendente dall'orario dell'operatore, ma penalizzato da tempi macchina lunghi e da un elevato scarto di materiale. La L-PBF ha un costo dominato dal tempo macchina, funzione dell'altezza di costruzione, a cui si sommano il costo della polvere e un post-processing. Il confronto complessivo dei tempi e dei costi di processo è riportato in Tabella 17.

Strategie di riduzione dei costi per l'AM - La fonte [6] individua alcune leve principali per contenere il costo dell'additive manufacturing, sintetizzate in Tabella 18. Tra queste, la più significativa è l'ottimizzazione della geometria mediante ottimizzazione topologica e strutture reticolari, che può ridurre l'impiego di materiale fino al 54%, seguita dalla gestione automatizzata e dal riciclo della polvere, che consente un recupero fino al 100%.

È rilevante osservare come questa prima leva coincida, di fatto, con la metodologia adottata nel presente lavoro: la progettazione generativa opera secondo un principio analogo all'ottimizzazione topologica, distribuendo il materiale solo dove necessario lungo il flusso degli sforzi. In questo senso l'approccio generativo agisce direttamente sulla voce di costo più critica del processo L-PBF, ovvero la quantità di

polvere impiegata, riducendo al contempo il tempo macchina attraverso una minore altezza e massa di build.

Aspetto	Saldatura	Fresatura	L-PBF
Costo dominante	Manodopera (lavoro manuale)	Tempo macchina CNC	Tempo macchina + polvere
Tariffa oraria	30–65 €/h ^a	35–120 €/h ^b	175–345 €/h
Tempo di realizzazione	Dipendente dall'operatore	Lungo, ma non presidiato	Funzione dell'altezza di build
Scarto di materiale	Contenuto	Elevato	Ridotto (polvere riciclabile)
Automazione	Bassa	Elevata	Elevata
Ripetibilità	Bassa (manualità)	Alta	Media (stabilità di processo)
Investimento impianto	Basso	Medio	Elevato (0,5–1,5 M€)
Post-processing	Riprese per deformazioni	Finitura di dettaglio	Fino a +40% del costo

^a Fascia superiore riferita a saldatura strutturale certificata (ASME IX / ISO 15614).

^b 35–50 €/h per centri a 3 assi; 75–120 €/h per centri a 5 assi, rappresentativi per geometrie complesse.

Le tariffe indicano il costo orario di processo (*shop rate*) e non il costo del singolo componente, non deducibile in assenza dei tempi effettivi di lavorazione.

Tabella 17: Confronto dei tempi e dei costi di processo delle tecnologie produttive.

Strategia	Beneficio potenziale
Ottimizzazione topologica	Riduzione del materiale fino al 54%
Gestione e riciclo automatizzato della polvere	Recupero della polvere fino al 100%

Tabella 18: Principali strategie di riduzione del costo nell'additive manufacturing metallico [12].

Sintesi economica. Nel complesso, la soluzione generativa risulta la più dispendiosa tra le tre, principalmente per effetto del costo delle polveri e del tempo macchina; tale onere va tuttavia ponderato dal fatto che si tratta di una produzione a volumi minimi, in cui l'ammortamento degli attrezzaggi tipico della fresatura e della saldatura ha un ruolo diverso, e che le leve di ottimizzazione proprie dell'additive manufacturing prima fra tutte la progettazione generativa stessa consentono di contenere il divario di costo rispetto alle alternative consolidate.

4.1 Sintesi del confronto

Il quadro complessivo è riepilogato in Tabella 19. Sul piano strutturale il portamozzo realizzato mediante progettazione generativa eguaglia la rigidità delle configurazioni esistenti e ne rispetta i margini di sicurezza; sul piano prestazionale ne riduce la massa, e si allinea alle variazioni di camber e toe ammesse; sul piano economico il confronto resta qualitativo, per l'assenza di dati di costo certi, ma fornisce comunque un'indicazione attendibile sulla costosità ancora permanente di tale tecnologia.

Con l'attribuzione dei pesi assegnati nella lista dei bisogni, gli esiti sono messi a confronto nella tabella 19. La soluzione generativa è positiva sui criteri a priorità più alta: rigidità, controllo dell'assetto e massa e risulta penalizzata solo sul costo, a cui è attribuita un'importanza minore ma comunque considerevole. All'interno della stessa progettazione generativa la scelta ricade sull'AlSi10Mg, lo Scalmalloy[®], pur offrendo una resistenza specifica superiore, resta oggi difficilmente sostenibile per il costo della materia prima. Questi esiti costituiscono la base della valutazione strutturata delle alternative, impostata in Tabella 19 secondo l'analisi del valore della progettazione sistematica.

Parametro	Saldato	Fresato	AM1 (generativo)	AM2 (generativo)
Materiale	Acciaio 4130	Alluminio 2618A	AlSi10Mg	Scalmalloy®
Densità [g/cm ³]	7,7	2,7	2,7	2,67
Massa [kg]	1,865	1,443	1,289	1,285
Variazione camber/toe [deg/kN]	confidenziale (< 0,05)	confidenziale (< 0,1)	Toe-Fx 0,08; Toe-Fy 0,037; Camber-Fy 0,048	≈ AM1
Costo materia prima [€/kg]	7	10	50	4.000–10.000
Costo dominante di processo	Manodopera (saldatura manuale)	Tempo macchina CNC	Tempo macchina polvere	+ = AM1
Tariffa oraria di processo [€/h]	30–65	35–120	175–345	= AM1
Investimento impianto	Basso	Medio	Elevato (0,5–1,5 M€)	= AM1
Scarto di materiale	Contenuto	Elevato	Ridotto (polvere riciclabile)	= AM1
Post-processing	Riprese per deformazioni	Finitura di dettaglio	Fino a +40% del costo	= AM1

Tabella 19: Confronto finale delle varianti di portamozzo

4.2 Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Il presente lavoro ha affrontato la riprogettazione del portamozzo anteriore della Formula Renault 3.5 mediante progettazione generativa applicata all'additive manufacturing, in particolare L-PBF. L'obiettivo era di valutare il potenziale rispetto alle due soluzioni tradizionali di riferimento, quella saldata in acciaio 4130 e quella fresata dal pieno in lega di alluminio 2618A. Il confronto è stato condotto in modo sistematico, mantenendo invariati i componenti del gruppo ruota, i punti di attacco delle sospensioni e le condizioni di carico, così da ricondurre le differenze riscontrate alla sola metodologia progettuale.

Nel complesso, il lavoro dimostra che la progettazione generativa consente di agire contemporaneamente su geometria e materiale, superando il compromesso tipico delle soluzioni tradizionali.

Il portamozzo generativo eguaglia la rigidità dei riferimenti e ne rispetta con le dovute considerazioni i margini di sicurezza. Inoltre, riduce la massa, confermando il potenziale della metodologia come contributo all'innovazione nel settore.

Si è quindi introdotto un lavoro utile per la valutazione di quale soluzione progettuale adottare in base all'obiettivo che ci si pone quando si vuole progettare un portamozzo. I risultati, di carattere preliminare, aprono a diversi sviluppi futuri, lo studio può essere esteso con aggiuntivi campi di ricerca.

Oltre ai campi già citati come un'analisi termodinamica e uno studio a fatica, alcuni sviluppi futuri possono essere integrare un la realizzazione di un portamozzo in fibra di carbonio e del suo processo produttivo.

Questo amplierebbe ancora di più le visioni preliminari, consentendo di inserire e confrontare le soluzioni maggiormente utilizzate in ambito motorsport.

La Tesi inoltre ha permesso di acquisire competenze tecniche di progettazione importanti e di rilievo, da quelle classiche e tradizionali a quelle che guardano più all'innovazione. Nell'ambito del motorsport la meccanica è sempre stata orientata alla sperimentazione e questo studio è stata un'opportunità di consolidare e affinare le competenze attuali.

Riferimenti bibliografici

- [1] Aconity3D GmbH. Data sheet scalmalloy[®]: Almg4.5sc0.7zr0.3. Scheda tecnica, Herzogenrath, Germania, March 2020. Consultato nel 2026.
- [2] EOS GmbH. Material data sheet: Eos aluminium als10mg. Technical report, EOS GmbH. https://www.eos.info/.../material_datasheet_eos_aluminium-als10mg_en_web.pdf, Consultato nel 2026.
- [3] Fédération Internationale de l'Automobile. Fédération internationale de l'automobile (fia). <https://www.fia.com/>. Consultato nel 2026.
- [4] William F. Milliken Jr. Race car vehicle dynamics. 1995.
- [5] Francesco Leali. Design methods. Materiale didattico, Corso di [Ingegneria del veicolo], 2024.
- [6] MakerVerse. Costi delle polveri metalliche nella stampa 3d: Guida degli esperti ai prezzi (2025), 2025. Consultato nel 2026.
- [7] Sara Mantovani. Progettazione di telaio. Materiale didattico, Corso di [Ingegneria del veicolo], 2024.
- [8] Meccanica del Veicolo. La posizione delle pinze freno. <https://meccanicadelveicolo.com/2018/02/04/la-posizione-delle-pinze-freno/>, 2018. Consultato nel 2026.
- [9] Luca Pignacca. Chassis and body design. Materiale didattico, Corso di [Racing car design], 2024.
- [10] PTC Inc. What is generative design? <https://www.ptc.com/en/technologies/cad/generative-design>, 2026. Consultato nel 2026.
- [11] Nikhil Raj. *RACE Car Suspension*. 2017.
- [12] SKF. Hub bearing units, 2026.

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare il prof. Francesco Leali per il suo aiuto nello svolgimento della tesi e per il supporto nel corso di questi ultimi mesi. Un grazie all'azienda Dallara e a tutte le persone che ne fanno parte, in particolare Andrea Burzoni per l'occasione data e per avermi consentito di proseguire questo percorso lavorativo. Alessandro Fava che mi ha guidato nei miei primi passi da stagista, con l'aiuto anche di Domenico Di Palma. E infine, tutti i ragazzi del reparto design group per avermi accolto in modo amichevole fin da subito.