

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria dei Materiali per l'Industria
4.0**

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi e sostituzione del support flag di un aereo ATR cargo con
realizzazione di provini in stampa 3D al fine di analizzare
microstruttura, alleggerimento e riduzione dei costi**



**Politecnico
di Torino**

Relatore:

Prof.ssa Sara Biamino

Relatore aziendale:

Ing. Bruno Di Paolo

Candidato

Syria Nappo

Dicembre 2024

*Ai miei genitori,
con voi ogni giorno
il mio Sole eppur si move*

Abstract

Il seguente lavoro di tesi si inserisce nel contesto della ricerca industriale applicata, condotta presso l'azienda aerospaziale Adler Aero SpA, leader nella produzione di componenti per l'industria dei trasporti. Il lavoro si focalizza sulla sostituzione e ottimizzazione del componente support flag localizzato nella crew door di un aereo cargo ATR. L'obiettivo centrale è individuare soluzioni innovative che consentano di ridurre il peso, migliorarne la microstruttura del materiale e ottimizzarne i costi, sfruttando le potenzialità della produzione additiva e delle tecniche di simulazione avanzate.

La ricerca, articolata in diverse fasi sperimentali, prevede dapprima un'analisi comparativa tra i materiali in campo metallico e polimerico per determinarne la conformità alle proprietà meccaniche previste da progetto. In questa prima fase, si è proceduto a sviluppare un'analisi FEM in CATIA con focus sulla distribuzione degli sforzi e analisi delle zone con maggiore criticità. Le analisi FEM hanno permesso di ottimizzare il design per garantire l'affidabilità e la sicurezza del componente nelle condizioni operative tipiche di un aereo ATR cargo. Con l'analisi delle proprietà meccaniche e delle prestazioni in situazioni di carico, la ricerca si propone di valutare l'effettiva convenienza e fattibilità della sostituzione del materiale metallico con polimeri avanzati, mantenendo elevati standard di qualità e sicurezza aeronautica.

Successivamente nei laboratori del Politecnico di Torino si è potuto investigare le superfici di frattura in seguito a test di trazione e flessione mediante stereomicroscopio. Come era atteso, la lega AlSi10Mg si è rivelata la più prestante sia per quanto concerne le proprietà meccaniche sia per le condizioni di stampaggio e la percentuale di porosità. Nonostante questi risultati, i due polimeri ULTEM™ 9085 e ABS-M30™ sostituiti nel componente support flag hanno mostrato un carico a rottura in accordo con le richieste di progetto avanzate dal customer Leonardo SpA. In via definitiva, valutando l'alleggerimento e le prestazioni meccaniche mostrate dai materiali, il miglior compromesso è stato raggiunto dal polimero ULTEM™ 9085, tra l'altro conforme alle normative FST richieste in ambito aerospaziale.

La tesi si conclude con una valutazione economica della sostenibilità progettuale che ha mostrato come l'adozione di tecniche di additive manufacturing possa rappresentare una soluzione economicamente efficiente per l'industria aerospaziale, riducendo significativamente i tempi e i costi di produzione. La scelta di materiali innovativi per componenti strutturali secondari, quali il support flag, si rivela quindi strategica per l'ottimizzazione delle prestazioni dell'aeromobile, assicurando un migliore rapporto tra resistenza strutturale e peso, oltre a un ridotto impatto ambientale grazie alla diminuzione del consumo di carburante e delle emissioni di CO₂. In termini puramente quantitativi, l'approccio industriale proposto dal presente lavoro ha consentito un alleggerimento del componente del 116,67% e una riduzione dei costi di processo del 69,62%.

Sommario

INTRODUZIONE.....	V
2. SUPPORT FLAG DELLA CREW DOOR: FUNZIONE E CARATTERISTICHE	VI
3. ALSI10MG	XII
4. SIMULAZIONE E MODELLAZIONE CON SOFTWARE CATIA	XXIII
5. ALTERNATIVA MATERIALI POLIMERICI	XXXIII
6. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI IN CATIA.....	XXXIX
7. STAMPA 3D E TESTING DEL COMPONENTE	XLIII
7.1 STAMPA 3D DEL COMPONENTE	XLIII
7.2 TESTING DEL COMPONENTE E RISULTATI	XLVI
8. CARATTERIZZAZIONE ALLO STEREOMICROSCOPIO.....	LX
9. ANALISI ECONOMICA DEL PROCESSO DI ALLEGGERIMENTO	LXVI
10. CONCLUSIONI.....	LXXV

Introduzione

Il presente lavoro di tesi ha lo scopo di sviluppare un'alternativa al tradizionale workflow aziendale del processo produttivo del componente support flag inserito nella crew door dell'aereo ATR cargo. La produzione e la ricerca presso l'azienda Adler Aero SpA ha il compito di presentare ottimizzazioni sostenibili per il customer Leonardo SpA. La valutazione delle possibili alternative di materiali disponibili nel settore aerospaziale riveste particolare importanza, poiché le normative di settore sono estremamente rigorose e mirano a garantire la massima affidabilità dei componenti utilizzati. L'azienda Adler Aero SpA in quanto azienda certificata DOA (Design Organization Approval) secondo il Regolamento (UE) n. 748/2012, Sottoparte J, è autorizzata alla progettazione e produzione di componenti aeronautici conformi agli standard europei di sicurezza e qualità.

L'obiettivo dello studio è composto da due focus objects finalizzati alla valutazione di soluzioni alternative in termini di materiali utilizzati.

Nel primo focus object si considera un'analisi del processo produttivo e del materiale con simulazioni conformi al tipico flusso aerospaziale e realizzate in ambiente CATIA. Le simulazioni prevedono la conoscenza delle norme di progetto e dell'inserimento del support flag nel contesto più complesso della crew door.

Nella seconda area di studio è fondamentale valutare i limiti meccanici del componente e avere una visione macroscopicamente chiara delle superfici di frattura. La valutazione complessiva del comportamento meccanico deve essere condotta valutando le tolleranze dimensionali e l'aderenza del componente alle specifiche progettuali.

Il contesto in cui si svolge il lavoro è inserito nell'ambiente aerospaziale che rappresenta un ambito di eccellenza tecnica e di rigorosa regolamentazione, caratterizzato dalla necessità di garantire elevati standard di affidabilità e sicurezza in ogni aspetto progettuale e produttivo. La progettazione di componenti aeronautici comporta infatti un insieme di vincoli stringenti, sia per quanto riguarda le proprietà meccaniche e la durabilità dei materiali impiegati, sia per la compatibilità con i requisiti strutturali e funzionali del velivolo. La combinazione di simulazioni numeriche, test sperimentali e confronto con le normative permette di applicare metodologie avanzate per l'innovazione aziendale.

Si è deciso di utilizzare tecniche di produzione di additive manufacturing in quanto rappresentano il mezzo più idoneo a soddisfare le esigenze di alleggerimento strutturale e sostenibilità ambientale richieste dal settore aerospaziale. Le tecniche additive offrono infatti la possibilità di progettare e produrre componenti ottimizzati dal punto di vista della distribuzione dei materiali, consentendo una significativa riduzione del peso senza compromettere le proprietà meccaniche. Questa caratteristica risulta particolarmente vantaggiosa per l'efficienza energetica in ottica di ottimizzazione ecosostenibile. In aggiunta, per garantire l'affidabilità e la conformità del progetto, i risultati delle simulazioni devono essere necessariamente confrontati e validati mediante prove sperimentali reali, eseguite in accordo con le direttive internazionali di aeronavigabilità.

L'obiettivo finale è fornire un miglioramento tangibile, rispettando i rigorosi standard del settore aerospaziale e garantendo la sicurezza del componente durante l'intero ciclo di vita operativo.

2. Support Flag della Crew door: Funzione e Caratteristiche

Il support flag è un componente funzionale localizzato all'interno del portellone dell'aereo, la sua applicazione risulta critica per la sicurezza e per il corretto funzionamento di apertura e chiusura del portellone. Il consorzio ATR, joint venture paritetica tra Leonardo e Airbus, è oggi il primo produttore mondiale di aerei a turboelica per i collegamenti regionali con oltre 1.700 velivoli venduti a più di 200 operatori in oltre 100 nazioni nel mondo. L'ATR 42, mostrato in **Figura 2.1**, e l'ATR 72 sono gli aeromobili più venduti nel segmento di mercato con meno di 90 posti, e aprono in media più di 100 nuove rotte ogni anno. Grazie all'efficienza dei motori turboelica e all'innovazione tecnologica continua, gli ATR consumano fino al 40% in meno di carburante ed emettono fino al 40% in meno di CO₂ rispetto ai jet regionali. Leonardo si occupa di realizzare per tutti i velivoli ATR l'intera fusoliera, compresi gli impennaggi di coda orizzontali e verticali.

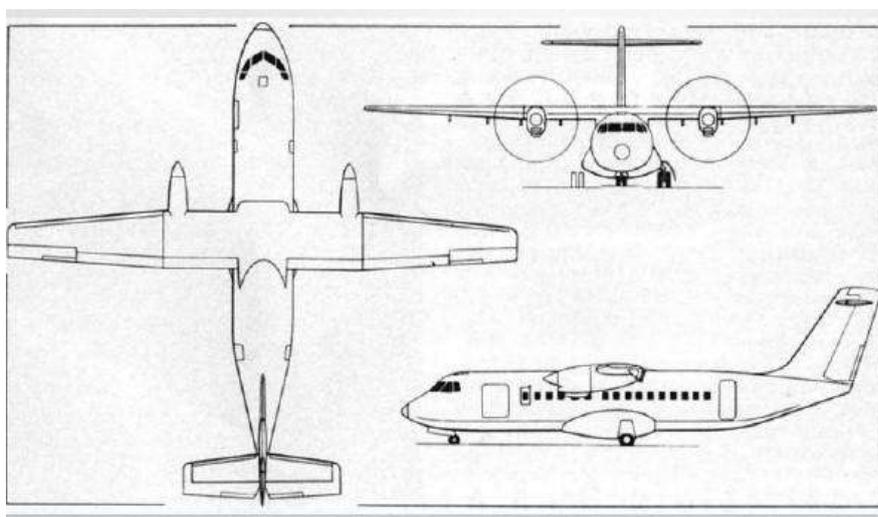


Figura 2.1: Progetto del primo velivolo ATR42 [1]

La conversione di un aereo di linea in un aereo cargo avviene mediante la sostituzione della door con un portellone di carico anteriore e la modifica della cabina per il trasporto merci. Le door degli aeromobili sono tenute fisicamente in posizione da una serie di chiusure elettriche e meccaniche. L'aircraft cargo door è efficacemente sigillata grazie al gradiente di pressione tra la cabina dell'aereo e l'aria al di fuori di essa. Il rischio di apertura accidentale è ridotto al minimo. Il modo in cui le porte degli aerei si aprono può essere diverso, ma il primo movimento è sempre quello del movimento verso l'interno. I meccanismi di bloccaggio multipli degli aerei permettono di attivarsi in maniera automatica quando la porta viene chiusa. Il bloccaggio garantisce sicurezza sfruttando positivamente la fase di pressurizzazione e depressurizzazione.

L'aircraft door è in aggiunta dotata di un sistema di guarnizioni di tenuta capaci di comprimersi sotto effetto della pressione creando uno stabile sigillo ermetico. Durante la fase del ciclo di volo è quindi necessaria la relazione tra la pressione dell'aria, l'area di contatto e la risposta della gomma che costituisce le guarnizioni. Il carico di pressione differenziale si assume, idealmente, uniformemente distribuito sulla sezione trasversale della guarnizione. La natura dei materiali utilizzati per le guarnizioni, spesso in EPDM (Etilene Propilene Diene Monomero), consente di legare il comportamento iperelastico e la natura quasi incompressibile all'ottima stabilità termica e resistenza agli agenti atmosferici.

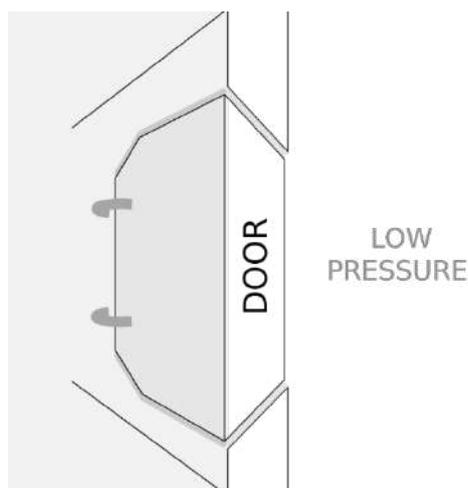


Figura 2.2: Diagramma dimostrativo la differenza di pressione tra la cabina e l'esterno [2]

Il sealing system della crew door dell'aeromobile rappresenta un'interconnessione tra il design del sistema idraulico e il sistema meccanico di guarnizione. In letteratura, [3] l'azionamento della cargo door viene modellato attraverso uno schema di attuatore elettromeccanico lineare (EMA), il cui controllo rientra nella classificazione dei sistemi a circuito chiuso. A tal fine, viene utilizzato un modello basato sulla curva di risposta in velocità, definita come la derivata prima della posizione rispetto al carico applicato. Più nel dettaglio, l'attuatore riceve i segnali di stato della porta e i dati relativi alla pressione residua; successivamente, il personale di terra attiva il pulsante di commutazione della porta sul pannello di controllo per procedere all'apertura o alla chiusura della cargo door. In maniera simultanea alle operazioni sopracitate si possono visualizzare sul pannello di controllo lo stato di funzionamento e le informazioni di diagnostica.

La simulazione del controllo degli attuatori elettromeccanici (EMA) consente un'analisi approfondita della conversione dell'energia elettrica in movimento meccanico, garantendo un'indagine dettagliata delle dinamiche operative del sistema. Per lo sviluppo degli elementi funzionali della cargo door, è di primaria importanza valutare l'intersezione con gli altri elementi cinematici e strutturali, tenendo conto delle rispettive stabilità dimensionali e termiche. In seguito alla revisione dello stato di funzionamento della cargo door, risulta interessante fornire una descrizione più accurata della crew door di interesse.

La crew door dell'aereo cargo è specificamente progettata per facilitare l'ingresso e l'uscita del personale di bordo in modo sicuro e pratico. Queste porte sono solitamente collocate nella parte anteriore della fusoliera, nelle immediate vicinanze della cabina di pilotaggio, al fine di agevolare un accesso rapido all'aeromobile e permettere una gestione efficiente delle operazioni di volo da parte dell'equipaggio.

Attraverso la rappresentazione FEM in CATIA, come illustrato nella **Figura 2.3**, è possibile ottenere il modello della struttura geometrica, che consente di localizzare visivamente il support flag di interesse. Le crew doors sono generalmente equipaggiate con un meccanismo plug-type, il cui principio di funzionamento si basa sull'incastro della porta all'interno di un'apertura leggermente più ampia. Questa configurazione permette l'inserimento della porta nella fusoliera dall'interno dell'aeromobile, in modo tale che la pressione interna della cabina, durante il volo, eserciti una forza supplementare sulla porta, spingendola contro il telaio. Tale meccanismo incrementa l'efficacia della chiusura, assicurando una sigillatura ermetica. L'apertura e la chiusura della crew door avvengono attraverso un'azione manuale, realizzabile mediante una leva situata sia all'interno che all'esterno della porta. Le leve sono collegate a un sistema di meccanismi di bloccaggio, il quale si disinnesta progressivamente durante il processo di apertura, garantendo così un'operazione fluida e sicura.

Questo design facilita un accesso rapido per l'equipaggio e contribuisce alla sicurezza operativa dell'aeromobile.

Durante la fase di chiusura, la crew door viene tirata verso il telaio attraverso un sistema di leve e ganci meccanici, che assicurano un allineamento preciso con l'apertura. Il sistema di bloccaggio è reso più affidabile, dall'aggiunta di serrature e perni, che permettono un fissaggio saldo al telaio. La differenza di pressione tra l'interno pressurizzato della cabina e l'esterno non pressurizzato genera una forza che preme il portellone contro il telaio, realizzando così un sigillo ermetico. Il gradiente di pressione agisce su tutta la superficie della porta, spingendola verso l'interno dell'aeromobile e contro il telaio della fusoliera, rendendo fisicamente impossibile l'apertura della porta in condizioni di squilibrio delle pressioni.

Durante la fase di apertura, invece, è necessario disinnescare il sistema di bloccaggio e tirare la porta verso l'interno, in direzione opposta alla pressione esterna. I Cabin Management Systems (CMS) sono in grado di monitorare automaticamente lo stato di bloccaggio e sblocco, garantendo così la sicurezza nella gestione delle operazioni di apertura e chiusura della porta.

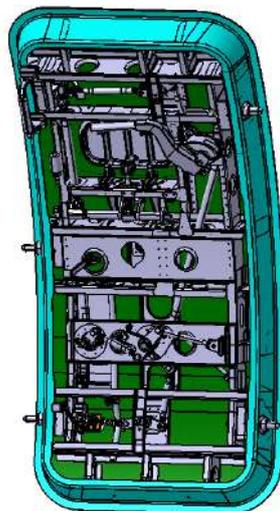


Figura 2.3: Modello crew door ATR cargo in software CATIA

Il support flag rappresenta il componente funzionale analizzato nel presente lavoro, risultando integrato nel sistema di leve e perni che si collegano alla maniglia della crew door. Tale componente, mostrato in **Figura 2.4** e **Figura 2.5**, consente di indicare visivamente lo stato di lock e unlock in relazione al meccanismo di supporto e bloccaggio. La produzione del support flag, la cui immagine CAD è mostrata in **Figura 2.6**, richiede elevati standard di precisione, affidabilità e conformità a rigorosi criteri di sicurezza aeronautica.

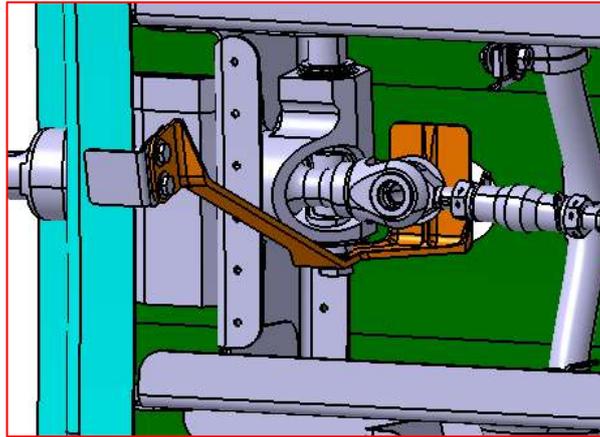


Figura 2.4: Localizzazione del support flag evidenziato con il colore arancione nella parte posteriore della crew door

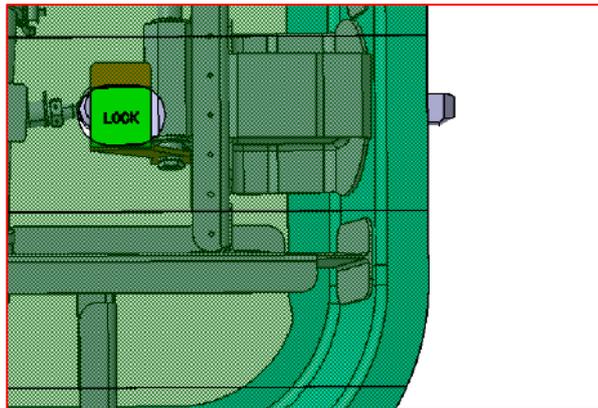


Figura 2.5: Localizzazione del support flag con evidenza della segnaletica LOCK nella parte posteriore della crew door

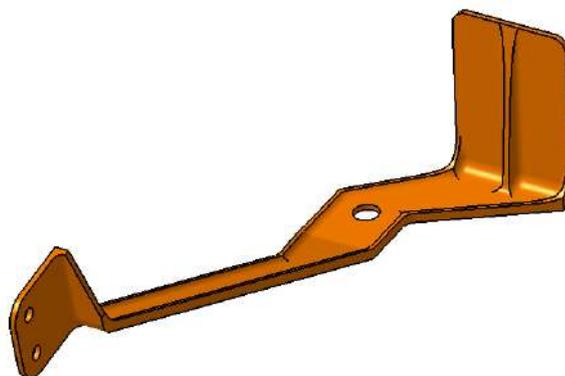


Figura 2.6: Modello CAD realizzato con software CATIA del support flag di riferimento

Prima dell'inizio della produzione, viene effettuata un'analisi strutturale mediante il Metodo degli Elementi Finiti (FEM), al fine di simulare le condizioni operative e verificare che il design sia in grado di resistere alle sollecitazioni previste durante il volo. Il processo di montaggio manuale prevede l'integrazione delle parti meccaniche con eventuali circuiti elettronici, sensori e attuatori. Successivamente all'assemblaggio, ciascun support flag è sottoposto a collaudi funzionali per garantire il corretto funzionamento del meccanismo.

Il support flag oggetto del presente studio è progettato per l'inserimento nella crew door installata e assemblata per il cliente Leonardo SpA.

A tal proposito, viene fornito il CAD drawing contenente tutte le informazioni rilevanti per la progettazione e la successiva produzione. Le dimensioni del support flag, illustrate nella **Figura 2.7**, evidenziano la necessità di modificare il processo tecnologico a causa delle ridotte dimensioni degli spessori. In particolare, i tradizionali processi di formatura prevedono che le lamiere siano sottoposte a stampaggio, piegatura e finitura superficiale. Il settore aerospaziale fa ampio ricorso all'impiego di strutture forgiate e di billette lavorate per la realizzazione di sistemi strutturali ad alto valore. Questo approccio produttivo garantisce un elevato livello di affidabilità nella qualità dei componenti finali, poiché i materiali utilizzati nelle billette possono essere facilmente certificati riguardo alla porosità e alla microstruttura. Tuttavia, tale metodologia comporta significativi costi diretti di produzione e costi derivanti dal considerevole time cycle. La forgiatura richiede, infatti, la progettazione, la fabbricazione e la validazione sperimentale di stampi preformati, comportando così un incremento delle spese. Inoltre, la lavorazione delle billette implica costi intrinsecamente elevati, considerando i rapporti buy-to-fly, generalmente stimati intorno a 20:1, che accentuano ulteriormente il costo del processo produttivo. [4]

Un ulteriore aspetto critico esaminato nell'analisi è la necessità di rigorosi controlli di qualità e certificazione del processo, nonché il lavoro di post-elaborazione necessario per modificare la rugosità superficiale.

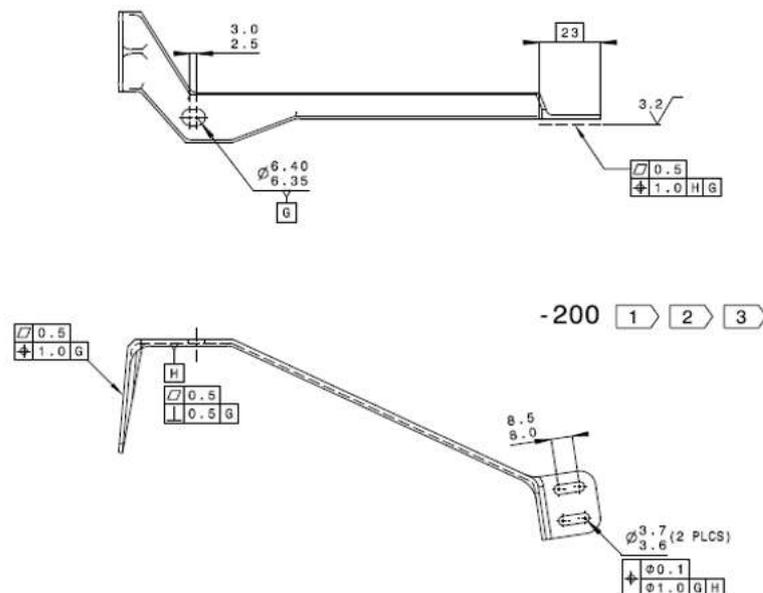


Figura 2.7: Segmento del CAD drawing fornito da Leonardo SpA

La produzione nel settore aerospaziale è soggetta a una molteplicità di obiettivi tecnici ed economici interconnessi, tra cui si possono annoverare le prestazioni funzionali, la riduzione dei tempi di

consegna, l'alleggerimento, la complessità, la gestione dei costi e il supporto. Ognuno di questi obiettivi presenta forti interrelazioni tra loro, e le considerazioni relative a ciascun aspetto devono essere valutate con la massima attenzione al momento della scelta di una soluzione progettuale ottimale.

Nell'ambito della definizione degli obiettivi chiave del processo, è necessario individuare le prestazioni funzionali all'interno di un contesto di programmazione delle consegne piuttosto rigido, garantendo la conformità con l'ambiente operativo previsto. Il focus sull'alleggerimento evidenzia, inoltre, la relazione diretta tra la diminuzione della massa e il miglioramento delle prestazioni economiche e tecniche, inclusi la riduzione dei costi del carburante, l'abbattimento delle emissioni, l'aumento dei carichi utili e una maggiore autonomia operativa.

Le prestazioni tecniche e il carico utile consentito per le strutture aerospaziali, definiti dalla missione, sono fisicamente delineati; pertanto, le variabili libere su cui agire sono spesso limitate. L'obiettivo di alleggerimento è influenzato da vincoli economici relativi alla gestione dei costi, in base ai quali una specifica risorsa finanziaria è destinata a un determinato obiettivo progettuale. Gli obiettivi di gestione dei costi, di alleggerimento e di riduzione dei tempi di consegna sono interconnessi; di conseguenza, il costo consentito del sistema tende ad aumentare per quelle soluzioni in grado di soddisfare gli obiettivi di alleggerimento o di riduzione dei tempi di consegna.

La gestione dei costi si applica a ogni aspetto dell'utilizzo dei componenti, inclusi la certificazione, la manutenzione e le opportunità di riduzione dei costi, minimizzando al contempo il rischio di certificazione. Un ulteriore tema centrale nell'indagine di soluzioni alternative nel settore aerospaziale risiede negli ostacoli legati alla certificazione. È essenziale un allineamento con gli standard esistenti per la produzione tradizionale e con i processi emergenti delle più recenti tecnologie di produzione, come l'additive manufacturing. Un altro parametro di rilevante interesse è la complessità intrinsecamente associata ai progetti aerospaziali, nei quali centinaia o addirittura migliaia di parti compongono sistemi e sottosistemi per raggiungere le prestazioni funzionali desiderate nel contesto operativo previsto.

La complessità geometrica implica, attraverso l'utilizzo dell'additive manufacturing, un allineamento costo-complessità che dà origine alla cosiddetta "complexity for free" mostrata in **Figura 2.8**.

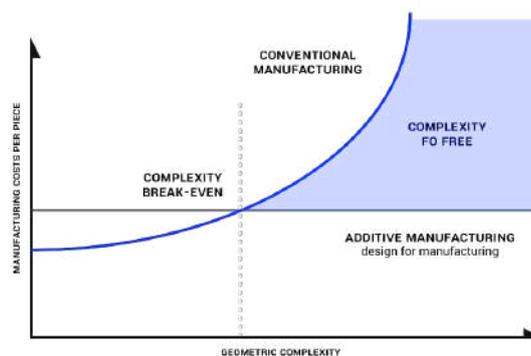


Figura 2.8: Grafico costo unitario del componente in relazione alla complessità geometrica [5]

3. AlSi10Mg

La produzione additiva, delineata dallo standard internazionale ISO/ASTM 52900, comprende sette categorie di processi che includono la deposizione di energia diretta (DED) e fusione del letto di polvere (LPBF), entrambi consentono la fabbricazione di componenti metallici con densità quasi completa. La strategia di scansione laser, lo spessore dello strato, l'atmosfera inerte e il flusso di gas sono stati selezionati in modo da ottimizzare il materiale e il sistema utilizzato. Il processo di AM ha incluso la ricerca simultanea di nuove leghe di materiali personalizzati, come quello utilizzato in fase primaria per la produzione del support flag: AlSi10Mg. Esaminando i requisiti tecnici caratteristici, l'ampio utilizzo delle leghe di alluminio nell'industria aerospaziale è ormai un fattore consolidato, come mostra la **Figura 3.1**. Le caratteristiche versatili principali includono l'eccellente resistenza specifica, l'ottima formabilità, una buona resistenza alla corrosione e una buona conducibilità termica. Tra i numerosi meccanismi di rafforzamento delle leghe di alluminio, risulta di cruciale importanza l'indurimento per precipitazione. [6]

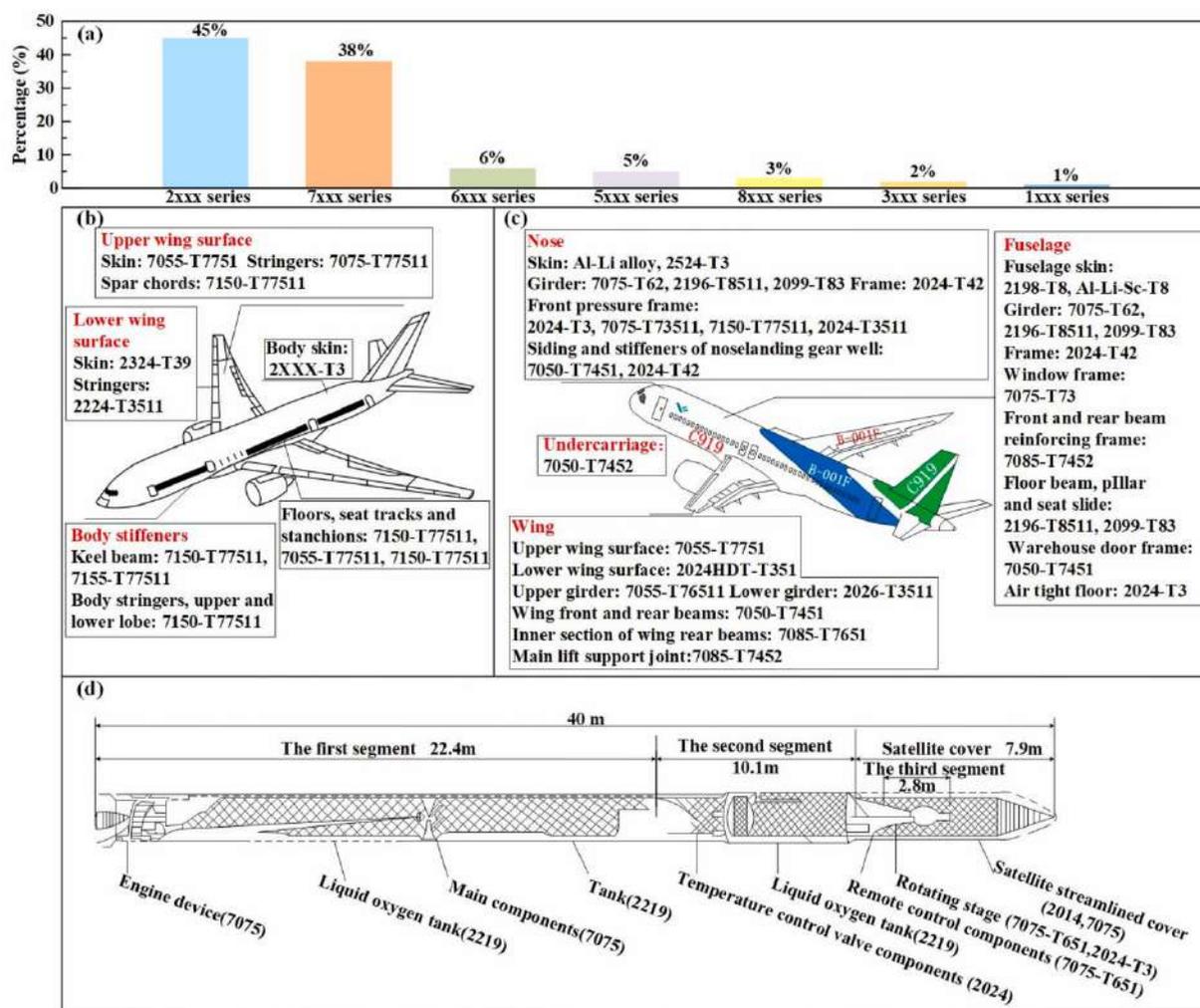


Figura 3.1: Applicazione delle varie leghe di Al usate in aerospace [7]

In letteratura, il comportamento della lega AlSi10Mg prodotta in LPBF è stato ampiamente studiato e discusso. La tecnologia di Laser Powder Bed Fusion (LPBF) utilizza un laser come sorgente di energia, presentando pertanto sfide significative nella produzione di materiali caratterizzati da un elevato contenuto termico e conducibilità. Tra queste sfide si annoverano il basso assorbimento del

laser, l'ossidazione e la fusione a bassa viscosità. L'alluminio, in particolare, si distingue come uno di questi materiali difficili da lavorare, se confrontato con titanio, nichel e acciaio. Tuttavia, il processo di LPBF è in grado di migliorare le proprietà meccaniche dell'alluminio, consentendo incrementi di resistenza impattanti, rendendolo particolarmente adatto per applicazioni nel settore aerospaziale.

Le proprietà meccaniche richieste in ambito aerospaziale sono legate a fattori dinamici di natura complessa che spaziano il campo dei carichi dinamici, dell'usura, della resistenza a fatica e ad alte temperature e dell'aspetto tribologico. Tutte le sollecitazioni di primaria importanza sopportate dai componenti dell'aeromobile sono illustrate in **Figura 3.2**.

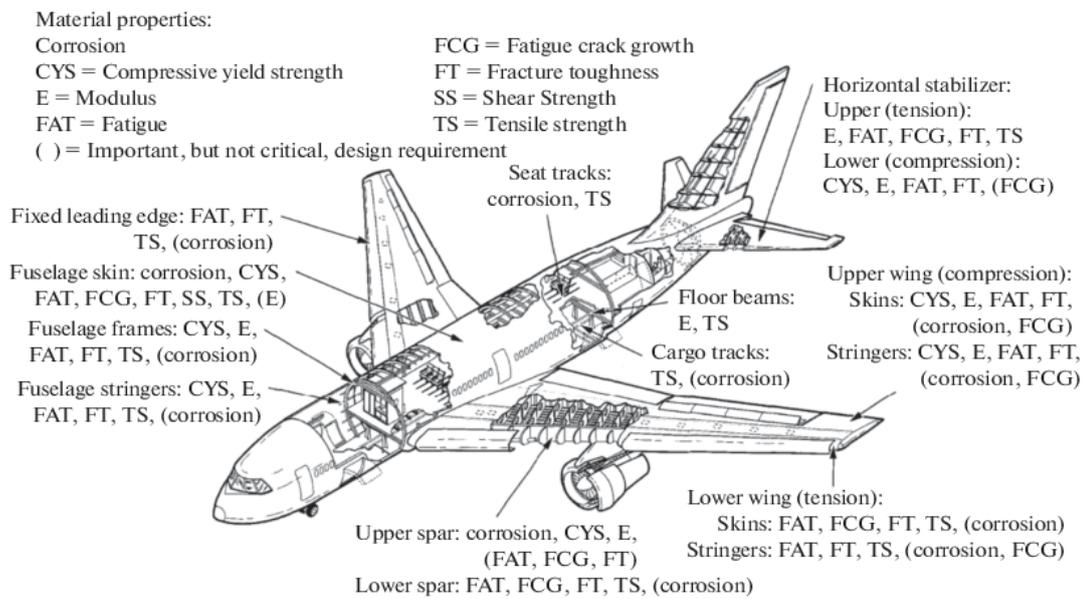


Figura 3.2: Analisi delle sollecitazioni richieste per i componenti in aerospace [8]

Il processo di LPBF richiede una comprensione approfondita sia dei parametri di lavorazione sia della microstruttura risultante. Poiché il gradiente termico è persistente durante la lavorazione, si osserva una crescita direzionale dei grani lungo l'asse di costruzione. Queste caratteristiche strutturali, influenzate dai parametri di lavorazione e dai metodi di scansione adottati, hanno un impatto significativo sulle proprietà meccaniche del materiale. Le proprietà dei materiali ottenuti mediante LPBF tendono a essere equivalenti, se non superiori [9], a quelle delle parti prodotte mediante fusione o forgiatura. Le qualità meccaniche e superficiali del materiale prodotto sono strettamente correlate ai parametri di processo di LPBF, i quali includono la potenza del laser (P , espressa in J/s), la velocità di scansione (v , espressa in m/s), la hatch distance (h , espressa in m) e lo spessore dello strato (t , espressa in m). L'equazione 3.1, [9], illustra la densità energetica del processo LPBF. I valori di energia riscontrati in letteratura sono correlati a un elevato livello di porosità, derivante dalla scarsa consolidazione della polvere.

$$E = \frac{P}{v h t} \quad (3.1)$$

La microstruttura, mostrata in **Figura 3.3**, evidenzia tracce dei pattern di scansione, melt pool solidificati e grani di dimensione micrometrica.

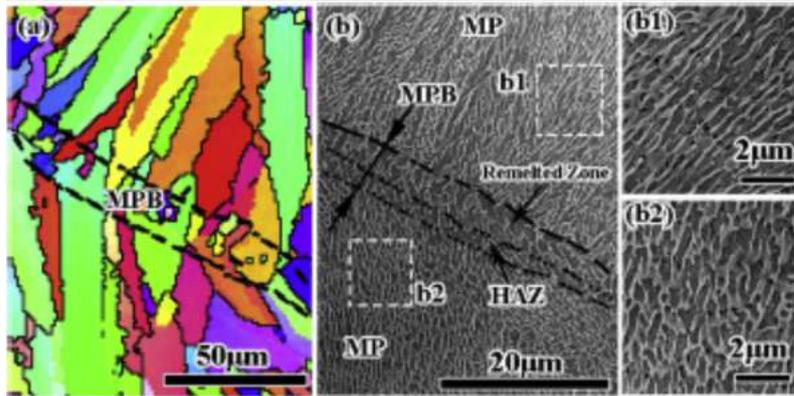


Figura 3.3: Evidenza della microstruttura con focus sulle zone colpite dal calore (HAF) [9]

L'interdipendenza tra i parametri di scansione, velocità di scansione e hatch distance, ha avuto un impatto significativo sulla formazione della porosità. Nel dettaglio, come mostrato nella **Figura 3.4**, un aumento della densità di energia comporta una diminuzione della percentuale di porosità.

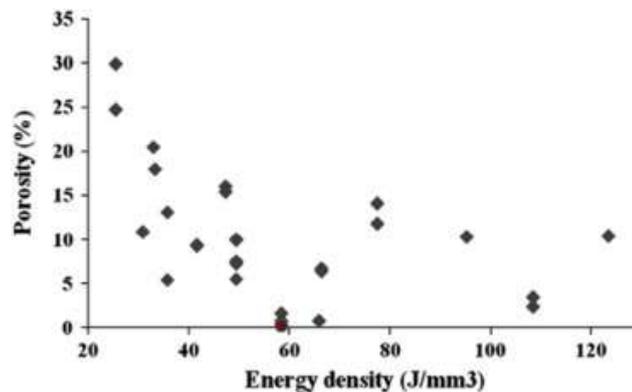


Figura 3.4: Variazione della porosità in relazione all'ottimizzazione del parametro densità di energia [9]

Le tipiche inclusioni dell'AlSi10Mg si mostrano come particelle di ossido ai confini dei pori oppure all'interno di polveri non fuse, come si mostra nella **Figura 3.5**. Le particelle di ossido si formano in seguito alla non completa bagnabilità del metallo fuso e comportano l'inefficiente consolidamento.

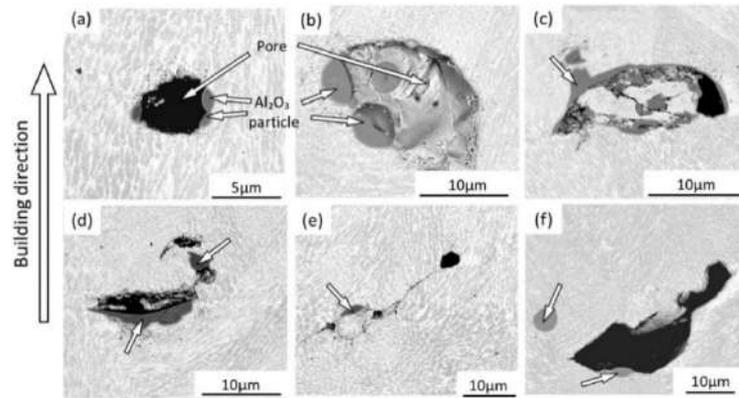


Figura 3.5: Immagine BSE che mostra le particelle di ossido in prossimità dei pori e in relazione alla direzione di crescita. [9]

All'interno del melt pool di fusione, la microstruttura è suddivisibile in tre zone sulla base della morfologia e delle dimensioni delle dendriti cellulari su sezioni trasversali e longitudinali. La zona fine è quella più rappresentativa dell'intero pool di fusione e le dendriti cellulari crescono verso il centro delle tracce laser [10]. Dal bordo verso il centro, la microstruttura risulta maggiormente raffinata per la zona fine e si presenta una dimensione della dendrite cellulare dell'Al di circa 500 nm. La zona grossolana, mostrata in **Figura 3.6**, si localizza solitamente al confine del bacino di fusione e l' α -Al primario è equiassico con lunghezza molto inferiore e larghezza circa il doppio di quello delle zone fini. Le zone colpite dal calore (HAZ), sono quelle in cui il network fibroso di Si è suddiviso in particelle minori. La rete di Si fibroso è influenzata dalla rapida solidificazione delle zone colpite dal laser.

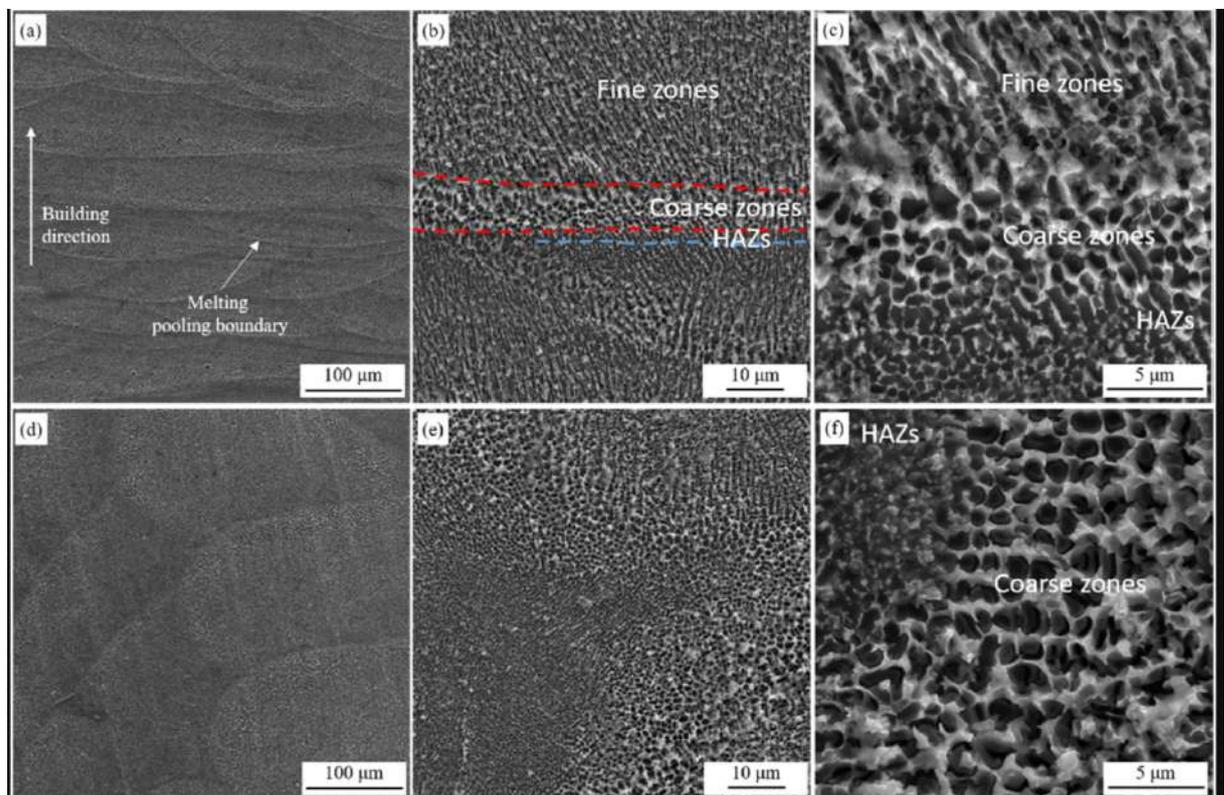


Figura 3.6: Immagini SEM di sezioni longitudinali (a, b, c) e trasversali (d, e, f) [10]

In generale, dopo un'attenta analisi EBSD, si stima una microstruttura in cui i pool di fusione sono composti da piccoli grani equiassici e grani colonnari, i cui secondi tendono ad essere allungati nella direzione di costruzione. Il parametro di solidificazione G/R all'interfaccia solido-liquido, dove G corrisponde al gradiente termico e R corrisponde alla velocità di solidificazione, individua la morfologia della microstruttura. [11]

La quantità di Al primario aumenta con l'aumentare della velocità di solidificazione della lega Al-Si eutettica o ipereutettica. Considerando che Al-Si è un sistema metallo-non metallo, l'interfaccia dell' α -Al cresce con più rapidità rispetto all'interfaccia sfaccettata della fase Si in condizioni di forte sottoraffreddamento, come si nota in **Figura 3.7**. L'elevata percentuale di fase primaria di Al e inoltre l'alta composizione di Si nella struttura eutettica hanno trovato risposta, in letteratura scientifica, nella formazione di una struttura pseudoeutettica.

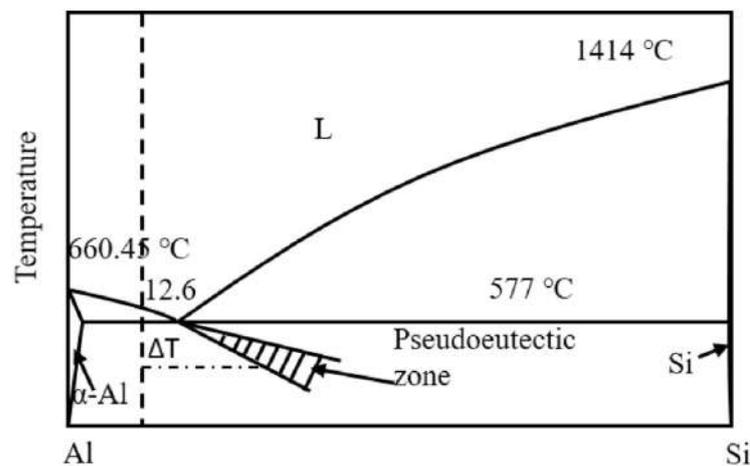


Figura 3.7: Diagramma della zona pseudoeutettica della lega Al-Si [11]

Oltre ai parametri di processo e alla strategia e velocità di scansione, la potenza del laser e la hatch distance influenzano notevolmente la microstruttura e di conseguenza le proprietà del materiale, come si richiama in **Figura 3.8**. I campioni che vengono prodotti utilizzando piattaforme preriscaldate mostrano una resistenza a fatica migliore, con granulometria più elevata e minore presenza di porosità. Il miglioramento delle proprietà a fatica è più evidente se si considera la VHCF (Very High Cycle Fatigue) in cui è più sensibile il fattore di innesco della cricca, principalmente causato in prossimità della struttura cellulare caratteristica. I confini cellulari contengono una miscela eutettica di Al e Si e la presenza di Si nei confini cellulari agisce come riser di stress sotto carico reversibile che porta all'inizio della fessura. Più vicini sono i confini cellulari, più facile è il percorso di propagazione della cricca. [9]

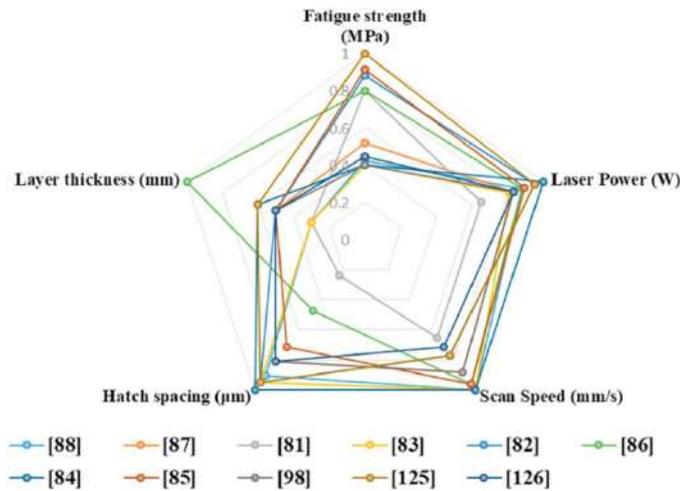


Figura 3.8: Influenza dei parametri di processo LPBF sulle proprietà di fatica ad alto ciclo della lega AlSi10Mg [9]

La fase di ricerca della resistenza a fatica della lega AlSi10Mg prodotta additivamente ha rivelato una divergenza nella stima della vita a fatica che utilizza la legge Paris-Erdogan. Sono stati, quindi, studiati stimatori innovativi per valutare il fattore di concentrazione della sollecitazione a fatica (FSCF) basati su ricerca empirica e condizioni specifiche e fattori globali dei materiali [11]. Alcune formulazioni di carattere emergente hanno mostrato una migliore previsione globale dei risultati. I nuovi modelli sviluppati in Matlab R2010b considerano parametri randomici e conducono analisi di regressione tra i risultati previsti e quelli sperimentali. Sono stati proposti efficaci metodi, utilizzando la Extreme Learning Machine (ELM), per mappare la relazione non lineare tra le rappresentazioni delle caratteristiche del materiale e il suo valore di fattore di FSCF.

In letteratura, [13] inoltre, si mostra la differenza della lega AlSi10Mg con e senza trattamento termico. Il trattamento termico T6 solitamente ha un impatto sui materiali testati. Per la lega trattata si è riscontrato un aumento della durezza e della resistenza alla trazione e una prevista diminuzione della resistenza all'impatto, correlata alla formazione di fase Si sferica. Per il materiale LPBF, l'aumento della durezza e della resistenza alla trazione non è stato significativo. Mentre, la diminuzione della resistenza all'impatto è stata evidente. A causa del trattamento termico T6 l'energia d'impatto diminuisce, ciò è causato dalla modifica della microstruttura durante il trattamento termico e dalla formazione della fase sferica di Si. Il raffinamento della microstruttura durante il trattamento termico migliora le proprietà meccaniche solo in una certa misura. Un aumento significativo della resistenza alla trazione per i campioni LPBF in AlSi10Mg è giustificato dalla precipitazione della fase Mg_2Si .

Con particolare attenzione alla struttura dei grani in seguito è trattamento termico, sono state condotte analisi EBSD. La lega AlSi10Mg in stato as-built mostra una tipica struttura dendritica, mostrata in **Figura 3.9dx**) con bracci dendritici primari e secondari chiaramente distinguibili come confini di grano ad alto angolo. Il trattamento termico della lega AlSi10Mg determina la dissoluzione dei bracci dendritici secondari e l'evoluzione di una struttura a grani equiassiali, indipendentemente dalle condizioni di raffreddamento, come si nota in **Figura 3.9sx**).

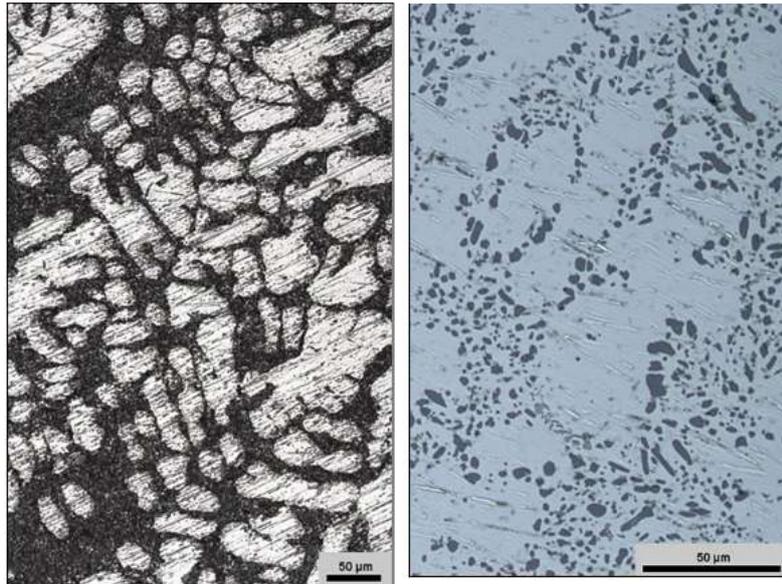


Figura 3.9: Immagini al microscopio ottico LEICA DM4000M della microstruttura cast AlSi10Mg **sx)** prima del T6 e **dx)** in seguito al T6 [13]

Al contrario, nei campioni AlSi10Mg prodotti con LPBF, la struttura dei grani e la microstruttura si differenziano dalla controparte fusa, poiché la solidificazione rapida e direzionale induce la formazione di grani colonnari sottili, orientati lungo la direzione di crescita. Si osserva, in **Figura 3.10**, inoltre lo sviluppo di grani equiassici lungo i bordi del bagno di fusione, risultato della rifusione parziale del substrato.

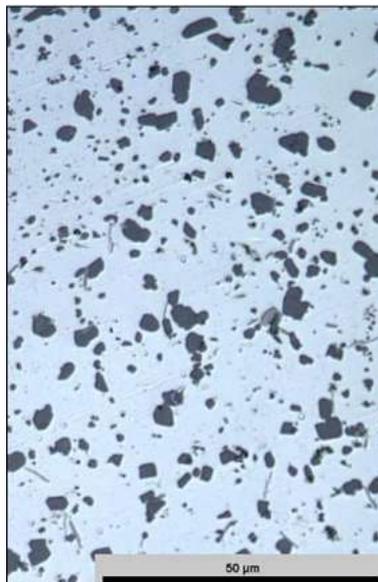
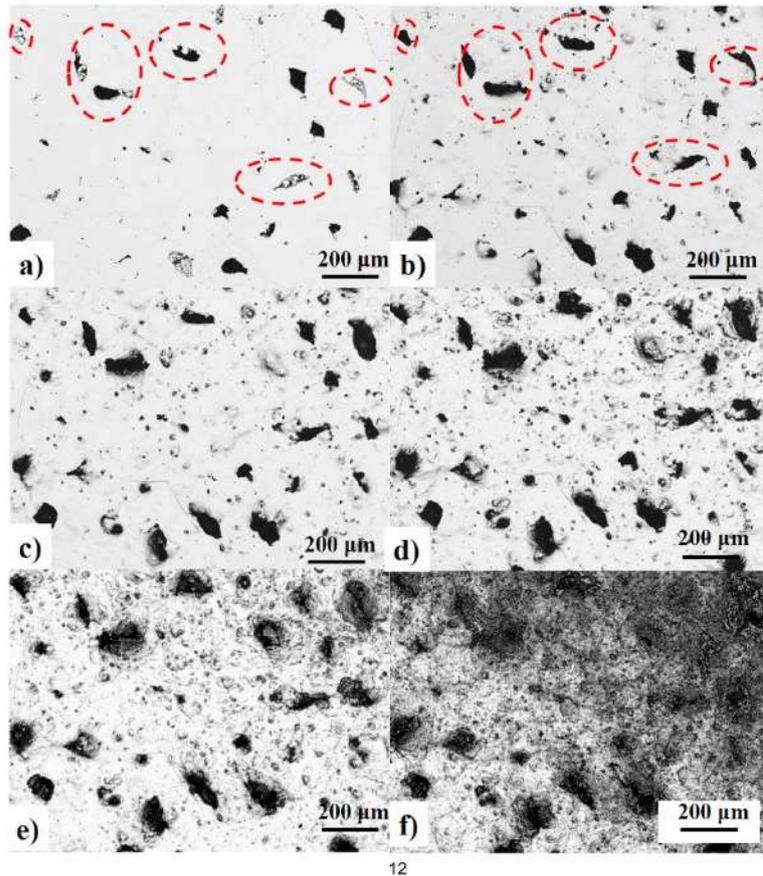


Figura 3.10: Immagini al microscopio ottico LEICA DM4000M della microstruttura LPBF AlSi10Mg in seguito a trattamento termico T6 [13]

Tra gli studi del comportamento meccanico della lega AlSi10Mg prodotta additivamente mediante LPBF si ritrova anche l'analisi del comportamento di erosione da cavitazione. Più nel dettaglio, sono state osservate le microstrutture e i cambiamenti topografici della superficie nella medesima area soggetta a erosione da cavitazione, esaminando in dettaglio il meccanismo di danno che si sviluppa sulla superficie erosa. Le velocità di scansione del laser influenzano sensibilmente la densificazione del materiale e le successive proprietà di erosione: le porosità che si generano variano in termini di dimensioni e morfologia e sono riconducibili a diverse cause, tra cui l'effetto di balling, la presenza di ossigeno residuo nella camera di costruzione e le imperfezioni presenti nella polvere metallica. Dai risultati [14] emerge che il materiale presenta discontinuità in alcuni punti; tale fenomeno potrebbe essere associato alla distribuzione non uniforme del calore durante la scansione laser. Questa variabilità termica porta a differenze microstrutturali nei campioni costruiti con LPBF, registrabile in diverse aree dello stesso campione. I risultati [14] dell'analisi mediante diffrazione a raggi X mostrano forti picchi di alluminio in tutti i campioni. Tuttavia, nei campioni LPBF si osserva un numero maggiore di picchi di silicio rispetto ai campioni lavorati con metodi convenzionali, suggerendo una maggiore precipitazione di silicio dalla matrice di alluminio, confermata anche da osservazioni al SEM. Per caratterizzare il comportamento erosivo dei materiali, si utilizza la curva del tasso di perdita di massa, ovvero la derivata dalla curva di perdita di massa cumulativa. L'erosione dei materiali è comunemente descritta come un processo progressivo attraverso diverse fasi: un periodo di incubazione, un periodo di accelerazione, un periodo di decelerazione e infine un periodo stazionario. Nel periodo stazionario, il tasso di perdita di massa è estremamente basso, tipicamente inferiore a 0,01 mg/min. È stato osservato che le velocità di scansione influiscono sia sul valore massimo del tasso di perdita di massa sia sulla durata del periodo di decelerazione. Il tasso di perdita di massa nel periodo di stato stazionario è estremamente basso, più con esattezza risulta sempre inferiore a 0,01 mg/min. L'influenza delle velocità di scansione si osserva sul valore di picco del tasso di perdita di massa e sulla durata del periodo di decelerazione. Confrontando la topografia della superficie dopo 30 s di test (**Figura 3.11b**) con lo stato originale (**Figura 3.11a**), il numero di vuoti è notevolmente aumentato. Tuttavia, alcune particelle che sono state all'interno dei vuoti allo stato originale non sono più rilevabili dopo 30 s di test di erosione. [15]



12

Figura 3.11: Tracciamento topografico della superficie del campione prodotto con SLM osservato a) allo stato originale; b) dopo 30 s; (c) dopo 1,5 minuti; (d) dopo 6 minuti; (e) dopo 30 minuti e (f) dopo 190 minuti di prova di erosione da cavitazione [15]

Inoltre, sui campioni LPBF si osservano [15] alcune strip orientate in diverse direzioni che diventano evidenti dopo 70 minuti di test di erosione, mostrate in **Figura 3.12**.

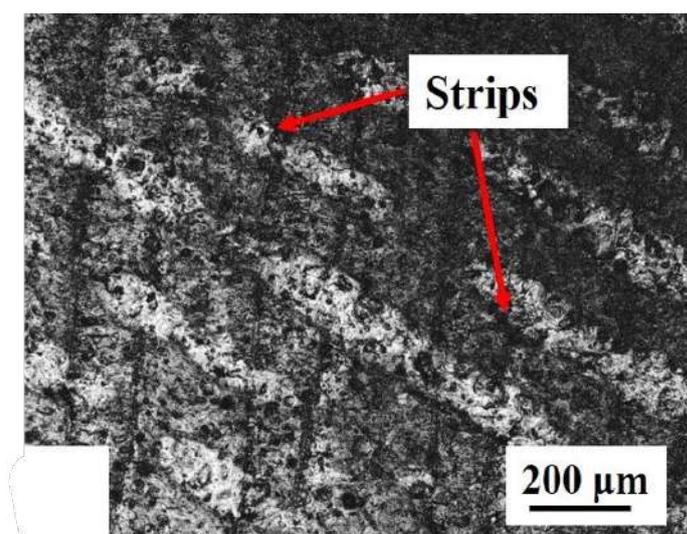


Figura 3.12: Visualizzazione delle strips dopo 70 minuti di test di erosione [15]

Una bassa velocità di scansione del laser comporta un incremento dell'energia in ingresso per unità di tempo, che a sua volta provoca un significativo aumento della temperatura di fusione. Di conseguenza, un ampio volume di polvere metallica si liquefa e rimane nello stato fuso per periodi prolungati. Questo fenomeno induce una considerevole riduzione della viscosità del materiale liquido, associata a elevate sollecitazioni termiche che favoriscono l'interruzione del film liquido. Viceversa, una velocità di scansione elevata determina una bassa densità del materiale e la formazione di numerose porosità. In tali condizioni, l'instabilità del metallo fuso aumenta a causa della convezione di Marangoni, che induce la sferoidizzazione del liquido all'interno del bagno di fusione, fenomeno noto come balling. L'effetto balling comporta la formazione di tracce di scansione discontinue e di pori lungo il percorso di scansione, ostacolando così la piena densificazione del campione. La presenza di queste porosità compromette la continuità delle tracce, lasciando all'interno dei pori particelle di polvere non fuse. Di conseguenza, campioni elaborati con velocità di scansione troppo elevate o troppo basse tendono a presentare numerosi pori, i quali incrementano la perdita di massa nelle fasi iniziali dei test di erosione. Ridurre il numero di pori e aumentare la densità dei componenti prodotti tramite LPBF è dunque cruciale, poiché ciò migliora la resistenza all'erosione, in particolare nelle prime fasi dei test di usura erosiva.

Un ulteriore parametro rilevante nelle analisi è rappresentato dall'incremento della temperatura di preriscaldamento [15], che può ridurre la distorsione reticolare e agevolare la precipitazione dell'alluminio. Nel caso della lega AlSi10Mg prodotta tramite fusione laser selettiva, si forma una soluzione solida sovrassatura di Al-Si a causa dell'elevata velocità di solidificazione. Tale soluzione solida occupa un volume maggiore all'interno del reticolo cristallino rispetto al solo alluminio, generando una distorsione reticolare. Durante i trattamenti termici, questa distorsione si riduce progressivamente per via della precipitazione del silicio. Essendo che il raggio atomico dell'alluminio è maggiore di quello del silicio, il relativo picco di diffrazione subisce uno spostamento. Con l'incremento della temperatura di preriscaldamento, il silicio precipita più facilmente, portando a una riduzione della distorsione reticolare. [16]

L'aumento della temperatura di preriscaldamento, quindi, può influenzare lo stato di tensione residua nella lega AlSi10Mg fusa selettivamente. Inoltre, la direzione del flusso di calore nel processo di scansione uniforme risulta unidirezionale, riducendo così l'efficienza di dissipazione del calore. Il fenomeno del balling causa una diminuzione della densità e una discontinuità nella struttura del materiale, limitando l'adesione tra il materiale fuso e il substrato. Incrementando la temperatura di preriscaldamento, si riduce il gradiente termico tra il bagno di fusione e il substrato, migliorando l'adesione del materiale fuso durante il processo LPBF. A temperature di preriscaldamento più elevate, i pori nei campioni risultano più piccoli e uniformemente distribuiti. Al fine di studiare l'impatto delle sollecitazioni residue sulla variazione della microstruttura, si considerano sia la modalità di scansione sia la temperatura di preriscaldamento.

Dai confronti emerge che la scansione a scacchiera, in definitiva, facilita il rilascio delle tensioni termiche e favorisce una distribuzione più omogenea dello stress residuo. Inoltre, tale modalità supporta un maggiore tasso di sovrapposizione del bagno di fusione all'interno della microstruttura, contribuendo a ridurre l'altezza del bagno di fusione.

In conclusione, considerando il confronto tra la lega AlSi10Mg prodotta mediante additive e casting, la prima delle due tecniche mostra valori di durezza medi più elevati rispetto alla controparte fusa [16].

La resistenza complessiva della lega AlSi10Mg ottenuta per casting è dovuta in gran parte alla presenza di particelle eutettiche di silicio. Tuttavia, la maggiore durezza osservata nel materiale AlSi10Mg appena prodotto rispetto a quello trattato termicamente può essere attribuita a una rapida velocità di solidificazione. Questa caratteristica deriva dalla presenza di un pool di fusione di dimensioni ridotte, situato su un substrato significativamente più ampio, che favorisce un affinamento del grano e permette la formazione di una struttura ricca di silicio, caratterizzata da una

soluzione solida sovrasatura di silicio in α -Al. Il rafforzamento della soluzione solida è principalmente causato dalle differenze nei raggi atomici del Si (0,118 nm) e dell'Al (0,143 nm), si genera così un campo di deformazione nella struttura cristallina della lega che ostacola il movimento delle dislocazioni. Le dislocazioni in movimento risultano ulteriormente bloccate dai precipitati di silicio e dalle fasi eutettiche di Si ai bordi delle celle, rispettivamente attraverso i meccanismi di rafforzamento di Orowan e Hall-Petch. È stato osservato [17] inoltre che aggregati di Mg e co-cluster di Mg-Si accelerano la precipitazione di Mg_2Si , fornendo un contributo aggiuntivo alla resistenza del materiale AlSi10Mg nella sua condizione as-built. La struttura cellulare estremamente fine ottenuta con la rapida solidificazione della produzione additiva laser non viene però mantenuta dopo il trattamento termico di solubilizzazione, comportando una riduzione della resistenza meccanica della lega. Durante tale trattamento, la rete cellulare si dissolve, e le particelle eutettiche di Si tendono a crescere fino a raggiungere dimensioni dell'ordine di alcuni micrometri. Sebbene possa permanere un leggero effetto di rafforzamento della soluzione solida, la perdita di resistenza dovuta alla crescita del grano risulta dominante.

La scelta della lega AlSi10Mg è stata ponderata tenendo conto dei requisiti prestazionali relativamente bassi del componente e della rugosità superficiale prevista dalle specifiche di progetto. Ad esso si affianca la specifica MSFC-SPEC-3717, che fornisce indicazioni dettagliate su:

- Calibrazione e controllo delle attrezzature
- Formazione del personale qualificato
- Sviluppo del Qualified Metallurgical Process (QMP)

Queste certificazioni costituiscono il quadro normativo per l'adozione sicura della produzione additiva nel contesto aerospaziale, con un'attenzione particolare alla qualità e alla ripetibilità dei componenti prodotti.

4. Simulazione e modellazione con software CATIA

L'analisi di sostituzione del support flag con stampa 3D in AlSi10Mg si è sviluppata, con primo approccio, mediante CATIA (Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application), ovvero un software di modellazione tridimensionale sviluppato da Dassault Systèmes. Il software permette di concettualizzare e supportare ogni fase della progettazione grazie a moduli specifici per la modellazione di parti, l'analisi strutturale e la simulazione tramite Generative Structural Analysis (GSA). Il software permette di importare modelli tramite formato CAD oppure di progettare utilizzando il workbench Sketcher. Per avviare correttamente la modellazione in CATIA e garantire che le geometrie siano correttamente posizionate nello spazio, è fondamentale seguire una sequenza precisa di passaggi preliminari. La prima operazione consiste nel selezionare l'origine globale del sistema di coordinate del modello, identificato dal punto di riferimento (0,0,0) nello spazio tridimensionale di CATIA, come si visualizza in **Figura 4.1**. Tale scelta è importante perché il punto di origine costituisce il punto di ancoraggio principale e funge da riferimento costante durante l'intera fase di progettazione e modellazione. In questo modo, si assicura che la parte in fase di modellazione sia allineata con le coordinate globali del progetto, rendendo più semplice il posizionamento e l'orientamento del componente nello spazio virtuale.

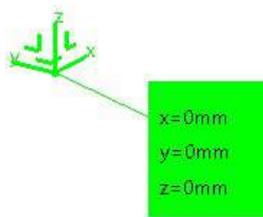


Figura 4.1: Selezione e definizione della terna di assi e del punto di origine

Successivamente, è necessario creare un punto start per la modellazione, visualizzato in **Figura 4.2**. Questo punto, determinato dal disegno tecnico, fornisce un riferimento specifico che permette di posizionare la parte in modo accurato rispetto alle specifiche richieste. Questo punto di partenza è cruciale perché definisce la posizione esatta nello spazio dove inizierà la modellazione, consentendo di creare il componente direttamente nell'orientamento di interesse, in questo caso in posizione di volo. La creazione di questo punto può essere effettuata attraverso gli strumenti di posizionamento di CATIA, come il comando di costruzione punti, che permette di definire coordinate precise in base ai requisiti del progetto.



Figura 4.2: Creazione del punto start nello spazio 3D

Il punto start, secondo il progetto definitivo, è localizzato rispetto al sistema standard di coordinate ATR (Aircraft Technical Reference), mostrato in **Figura 4.3**. Questo sistema di coordinate serve come base per posizionare e definire i componenti del progetto e si struttura attorno a tre assi principali rappresentati da: WL (Water Line), BL (Butt Line) e STA (Station). La WT è la linea di riferimento verticale che indica la quota dei punti rispetto al livello di riferimento, la BT indica la posizione trasversale rispetto al piano di simmetria longitudinale e la STA indica la posizione lungo l'asse longitudinale del progetto.

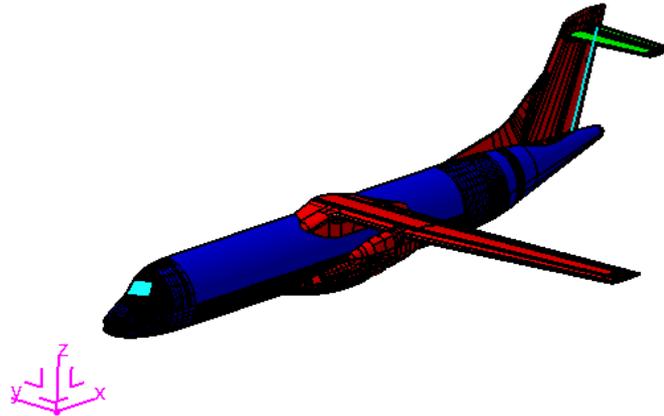


Figura 4.3: Sistema di coordinate ATR con WL, BL e STA.

Una volta definito il punto di partenza, è necessario configurare un ambiente di lavoro bidimensionale per poter procedere con la modellazione della parte. In CATIA, questa operazione è realizzata tramite la creazione di un piano di lavoro 2D che servirà come base per la modellazione della geometria iniziale. Il piano viene creato in corrispondenza del punto start designato e verrà orientato rispetto al riferimento concordato dal sistema di coordinate. Questo passaggio è cruciale per ottenere una coerenza tra il punto di partenza e il sistema di riferimento, consentendo di mantenere un orientamento spaziale corretto. Infine, si procede alla creazione di un piano parallelo che passerà per il punto start creato in precedenza, come mostrato in **Figura 4.4**.

Questo piano viene generato in modo da risultare allineato con il sistema di coordinate scelto, assicurando che la modellazione sia orientata esattamente secondo gli standard progettuali. L'operazione di creazione del piano parallelo richiede la selezione del punto di start come vincolo, insieme alla direzione e all'orientamento corretti per rispettare le indicazioni del disegno tecnico.

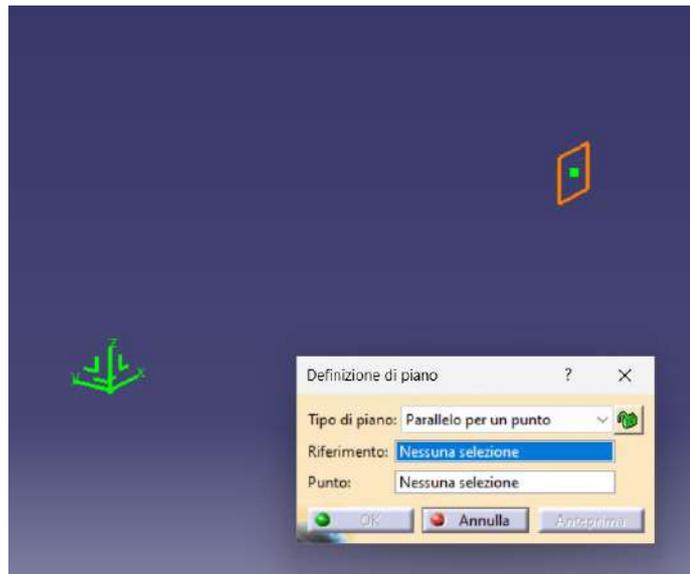


Figura 4.4: Definizione di un piano parallelo per un punto

A questo punto, la creazione del piano start costituisce la base della modellazione. Questo piano viene utilizzato come riferimento per garantire l'allineamento esatto del componente. Una volta selezionato il piano, si procede con la creazione di uno sketch sullo stesso piano. Lo sketch, mostrato in **Figura 4.5**, è necessario per disegnare il profilo bidimensionale del componente. Dopo aver completato il profilo, si esegue un'estrusione dello sketch tramite la funzione di estrusione, che consente di dare spessore e tridimensionalità al profilo 2D, trasformandolo in una forma tridimensionale.

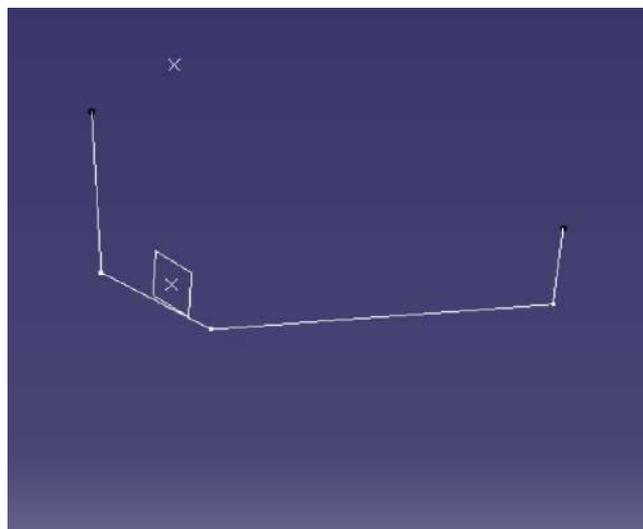


Figura 4.5: Creazione dello sketch nel piano bidimensionale

A questo punto, si imposta un offset della superficie per determinare lo spessore del support flag. In questo caso, è stato selezionato uno spessore maggiore di 2,5 mm per definire la struttura generale del componente. L'offset, visualizzato in **Figura 4.6**, aggiunge una distanza specifica alla superficie esistente, creando così lo spessore desiderato rispetto alla superficie iniziale. Selezionando uno dei

piani di riferimento, si procede con la creazione di due sketch aggiuntivi che permettono di definire il contour specifico del support flag.

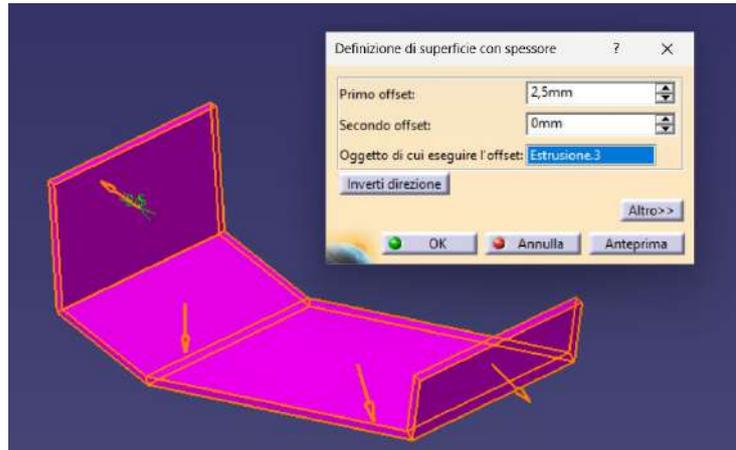


Figura 4.6: Definizione di superficie con offset definita

Successivamente, come mostra la **Figura 4.7**, si utilizza la funzione tasca si esegue una rimozione di materiale lungo i profili definiti. Dopo aver impostato tutti i parametri, si conferma l'operazione ed il software eseguirà la rimozione del materiale secondo il profilo dello sketch e la profondità impostata. A questo punto, la tasca sarà visibile come un'incisione o un foro nel solido, con le specifiche che sono state fornite. Questa operazione scava la forma desiderata direttamente nel solido, conformandosi allo spessore e al contorno stabiliti negli sketch. Con la funzione guscio, come viene mostrato in **Figura 4.8**, si modifica il componente eliminando materiale al suo interno, rendendo le pareti sottili e risparmiando peso, mantenendo l'integrità strutturale della bandierina. In questo caso, si specifica uno spessore sia interno che esterno, creando un guscio che limita lo spessore in una zona precisa del componente.

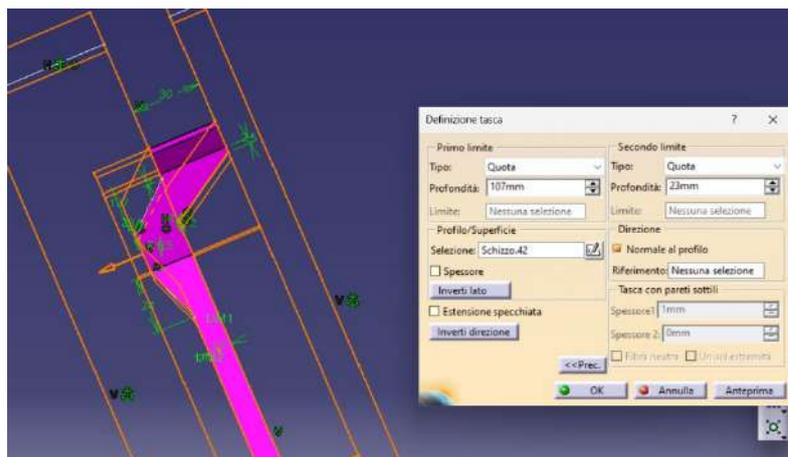


Figura 4.7: Selezione della funzione tasca e visualizzazione dell'esterno della tasca

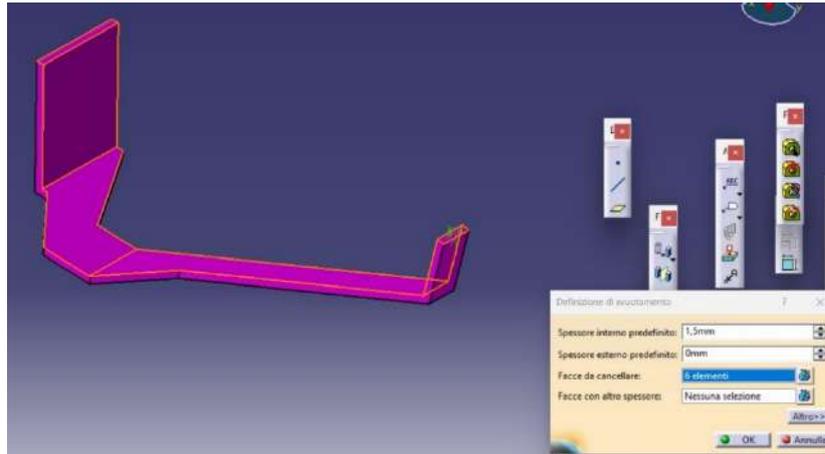


Figura 4.8: Definizione del guscio esterno alla funzione tasca in software CATIA

Dopo aver modellato i prismi a spigolo vivo, si passa alla creazione dei raccordi. Questa operazione è eseguita sugli spigoli esterni del componente per arrotondarli e garantire una transizione più fluida tra le superfici.

Utilizzando le misure di progetto, si applicano i raggi di raccordo necessari a garantire che gli spigoli soddisfino le specifiche di design e migliorino la resistenza del componente alle sollecitazioni. Si procede alla creazione di un prisma addizionale, al cui interno vengono aggiunte tasche per realizzare cavità o alloggiamenti specifici. Queste tasche, mostrate in **Figura 4.9**, sono modellate all'interno del prisma per rispettare la struttura del componente. Le tasche vengono definite tramite sketch e successiva estrusione, determinando la geometria interna del prisma. Una volta completate le estrusioni dei due prismi, si procede a unirli in un unico corpo solido. Questo viene fatto mediante la funzione di unione o boolean, che consente di fondere i due solidi. Dopo l'unione, vengono applicati raccordi tra i due prismi per uniformare i contorni e garantire la continuità strutturale tra le due parti. Per creare un'asola, si utilizza nuovamente la funzione tasca, ma in questo caso con un profilo ellittico o utilizzando una funzione di foro allungato, che consente di modellare l'asola in modo preciso. In alternativa, l'asola può essere costruita disegnando due cerchi collegati da linee rette, unendoli per formare un profilo ovale. Questo profilo viene successivamente estruso come tasca, rimuovendo il materiale al suo interno.

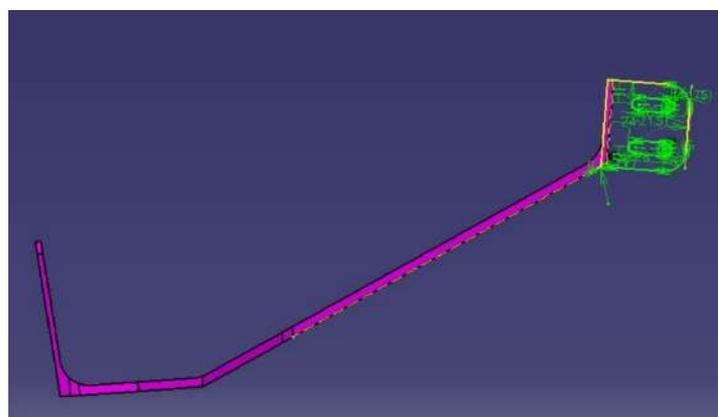


Figura 4.9: Visualizzazione e creazione del prisma e successiva estrusione

Per assegnare le proprietà fisiche al modello, si accede alla sezione Material Library di CATIA. Qui è possibile selezionare il materiale più appropriato per il componente tra quelli presenti nella libreria, oppure aggiungerne uno personalizzato con proprietà specifiche. Nel caso specifico, la composizione del materiale è stata resa disponibile dal fornitore 3DnA srl ed è riportata in **Tabella 4.1**, mentre le caratteristiche meccaniche e fisiche sono riportate in **Tabella 4.2**.

Tabella 4.1: Composizione chimica della polvere di AlSi10Mg fornita da 3DnA srl

Chemical composition*:		
Al	Balance	
Si	09-nov	%
Fe	≤ 0,55	%
Cu	≤ 0,05	%
Mn	≤ 0,45	%
Mg	0,2-0,45	%
Ni	≤ 0,05	%
Zn	≤ 0,10	%
Pb	≤ 0,05	%
Sn	≤ 0,05	%
Ti	≤ 0,15	%

* Chemical composition of the powder

Tabella 4.2: Proprietà fisiche e chimiche della polvere AlSi10MG fornite da 3DnA srl

Physical properties:		
Density:	2,67	g/cm ³
Relative density:	99,85	%
Mechanical properties:		
Yield strength (Rp 0,2%):	240,00 ±20	MPa
Tensile strength (UTS):	440,00 ±30	MPa
Elastic modulus:	70,00	GPa
Elongation at break:	6,00 ±3	%

Dopo aver completato il modello, si passa all'assegnazione del materiale utilizzando la funzione "Applica il Materiale", mostrato in **Figura 4.10sx**). Selezionando l'intero Part Body, viene applicato il materiale scelto dal catalogo di materiali di CATIA. È possibile scegliere il materiale più appropriato, considerando le condizioni operative a cui il modello sarà sottoposto. Dopo aver assegnato il materiale, si accede alle proprietà del materiale per configurare i parametri fisici specifici della lega come modulo di Young, coefficiente di Poisson e coefficiente di dilatazione termica. Una volta definite tutte le proprietà del materiale, è possibile assegnare un nome identificativo alla parte e specificare il tipo di revisione, come mostrato in **Figura 4.10dx**), per una corretta gestione del modello e dei dati relativi nel progetto.

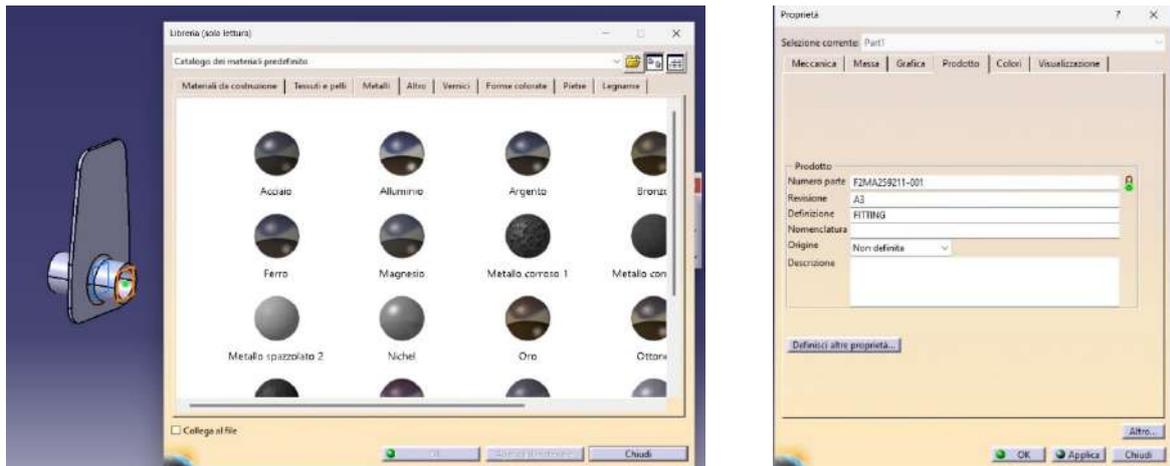


Figura 4.10 sx) Libreria e catalogo dei materiali selezionata una part body, dx) Assegnazione del nome identificativo e della revisione del componente

Per eseguire l'analisi strutturale, si passa all'ambiente Analysis and Simulation e si seleziona la modalità Generative Structural Analysis, visualizzato in **Figura 4.11**. Tale ambiente di simulazione FEA (Finite Element Analysis) permette di analizzare il comportamento del componente in termini di deformazioni, sollecitazioni e punti di cedimento sotto vari carichi e vincoli. In questa fase, il modello viene vincolato e caricato con lo scopo di simulare le condizioni di lavoro previste per verificare la resistenza e la stabilità strutturale della parte. All'interno dell'ambiente di analisi, si passa quindi ad impostare i vincoli per definire le condizioni di fissaggio del componente.

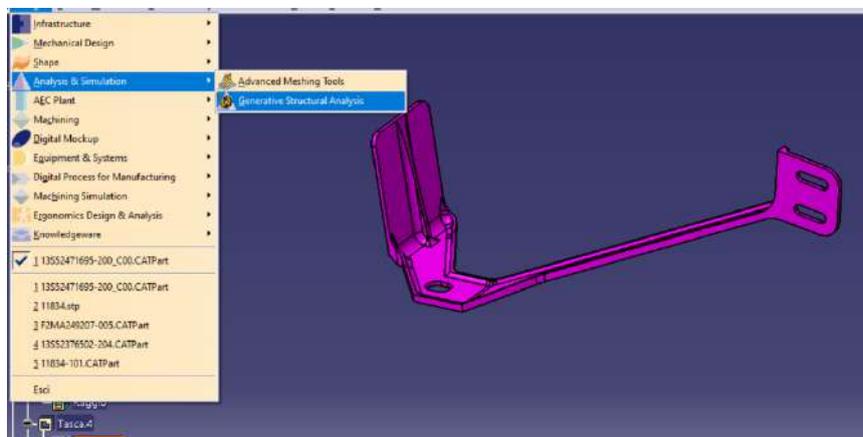


Figura 4.11: Selezione di Analysis & Simulation del part body

La selezione dei vincoli avviene tramite la funzione Fixed Constraint, applicata a superfici o punti specifici del modello. I vincoli determinano i gradi di libertà bloccati, stabilizzando il modello durante l'applicazione dei carichi simulati e sono mostrati in **Figura 4.12**.

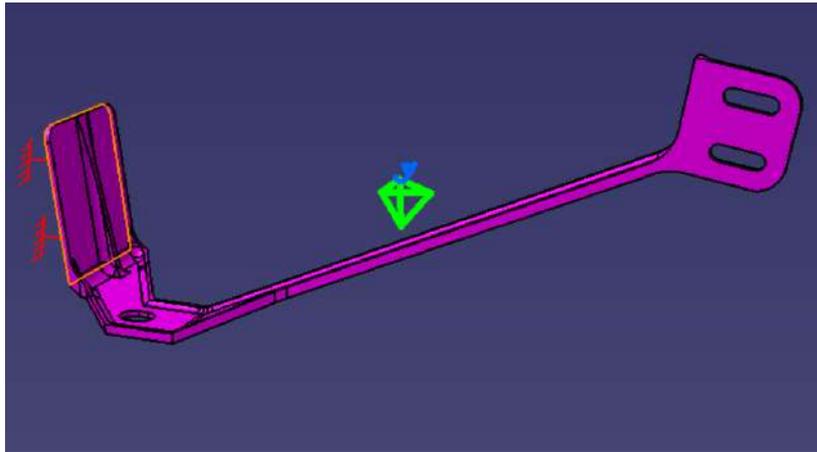


Figura 4.12: Applicazione e visualizzazione dei fixed constraint sul support flag

I vincoli, in questa fase, riproducono le condizioni di supporto e montaggio del componente, assicurandone la corretta posizione e limitando i movimenti nelle aree di fissaggio. Con il vincolo fissato, si procede all'applicazione di una forza distribuita sull'asola del modello. Tale forza, mostrata in **Figura 4.13**, viene posizionata in modo preciso, con l'intensità e la direzione specificate, per replicare il carico che il componente subirà in condizioni reali. La simulazione della forza distribuita sull'asola consente di valutare l'impatto di questa forza sulla parte, evidenziando eventuali zone di concentrazione di stress. Terminata la configurazione di vincoli e carichi, si procede con l'esecuzione della simulazione premendo il comando Calcola. Questo avvia il calcolo degli effetti della forza applicata e dei vincoli sul modello, fornendo risultati numerici e visivi sull'integrità strutturale del componente.

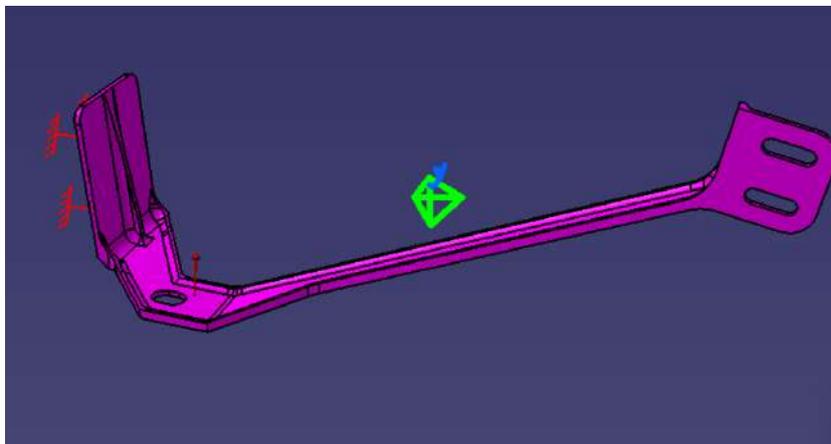


Figura 4.13: Applicazione e visualizzazione della forza sul support flag

Durante questa fase, CATIA elabora dati su spostamenti, deformazioni e sollecitazioni, e fornisce una rappresentazione grafica che illustra come il componente risponde ai carichi impostati. Per analizzare i risultati, si seleziona l'opzione di visualizzazione delle deformazioni, che utilizza una scala cromatica per mostrare le aree di maggiore e minore deformazione. Questa fase permette di individuare eventuali punti deboli o aree critiche dove la deformazione è più marcata, e fornisce un'indicazione visiva della distribuzione delle sollecitazioni nel componente. I risultati sono poi usati per valutare se il modello soddisfa i requisiti di progetto o richiede modifiche per migliorare la resistenza strutturale.

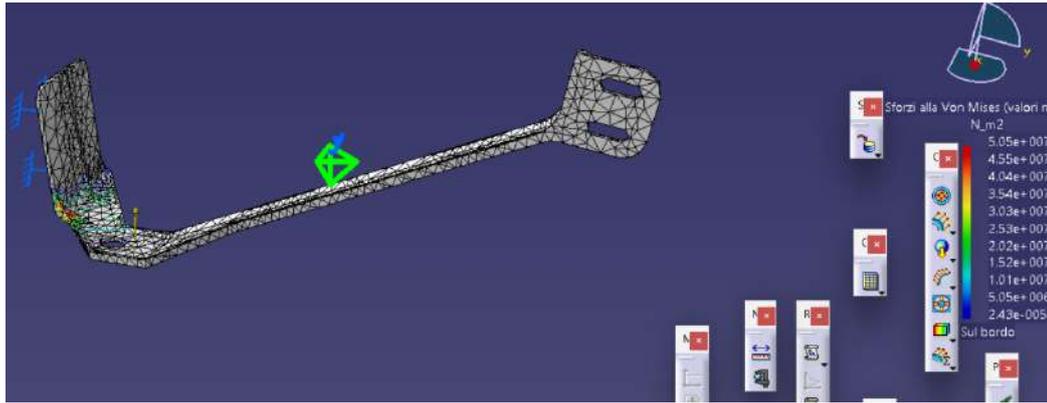


Figura 4.14: Visualizzazione della mesh e dell'analisi degli sforzi alla Von Mises del support flag

L'analisi statica eseguita su CATIA per il componente ha prodotto risultati di elevata precisione e affidabilità. Utilizzando il metodo del calcolo diretto, è stata implementata una soluzione con mesh sulla deformata che ha consentito di evidenziare con accuratezza le caratteristiche strutturali del modello. L'analisi si è focalizzata sugli sforzi di Von Mises a livello nodale, come si visualizza in **Figura 4.15**, fornendo una rappresentazione dettagliata della distribuzione delle sollecitazioni all'interno del componente. La valutazione dei risultati è stata completata con un'indagine sull'errore locale stimato, i cui valori sono risultati contenuti entro limiti tollerabili, dimostrando la stabilità e la validità della soluzione proposta.

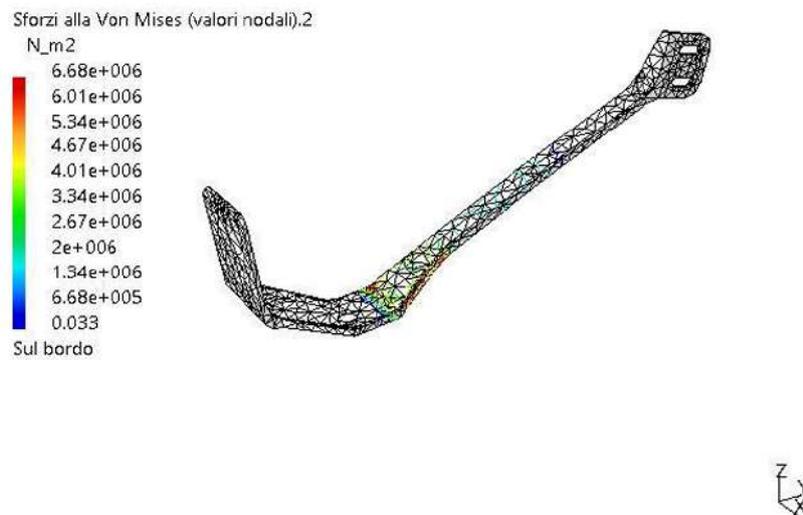


Figura 4.15: Soluzione del caso di analisi statica con riferimento agli sforzi alla Von Mises

In conclusione, l'analisi condotta ha raggiunto un livello di soddisfazione del 100%, come mostrato in **Tabella 4.3**, attestando la conformità del componente ai requisiti progettuali e di resistenza richiesti per le condizioni operative simulate. Si mostra anche la statistica di connettività che rappresenta l'analisi delle connessioni tra i vari componenti del modello e il numero totale di connessioni utilizzate per il modello, ovvero il numero dei nodi.

Tabella 4.3: Risultato di analisi di soddisfazione entro i limiti di errore locale consentito

Connettività	Statistiche
TE4	2056 (100.00%)

5. Alternativa materiali polimerici

È stata condotta un'analisi approfondita degli studi presenti nella letteratura scientifica [18], con particolare attenzione a quelli condotti nel settore aerospaziale e supportati dalle ricerche del NASA Glenn Research Center. In questo contesto, la scelta del materiale ULTEM™ 9085 si è rivelata particolarmente vantaggiosa. Questo materiale polimerico ad alte prestazioni è un termoplastico autoestingente, appositamente selezionato per la produzione digitale e la prototipazione rapida, in grado di garantire una serie di proprietà idonee ai rigorosi requisiti dell'industria aerospaziale. Il polimero ULTEM™ 9085 si distingue, infatti, per l'elevato rapporto resistenza-peso e per la conformità alla normativa FST (Flame, Smoke, and Toxicity), rendendola una soluzione certificata e ideale per il settore dei trasporti, compresi i settori aerospaziale, marittimo e dei veicoli terrestri. Integrato con un sistema di produzione additiva, il materiale ULTEM™ 9085 consente la realizzazione di componenti completamente funzionali, adatti sia per prototipi avanzati che per applicazioni finali, senza i costi e i tempi di attesa associati alle tecnologie tradizionali. Inoltre, i componenti polimerici realizzati con ULTEM™ 9085 offrono significativi vantaggi in termini di riduzione del peso, maggiore resistenza meccanica e capacità di resistere a temperature elevate, caratteristiche fondamentali per migliorare le prestazioni e l'efficienza dei sistemi aerospaziali avanzati. Questi fattori, uniti ai processi di produzione avanzati che ne ottimizzano le proprietà, confermano ULTEM 9085 come una scelta strategica e idonea a soddisfare i requisiti di eccellenza richiesti nel settore aerospaziale.

Per quanto concerne le certificazioni relative alla produzione additiva e ai materiali polimerici stampati in 3D, sono attualmente in fase di sviluppo standard specifici volti a garantire la produzione di componenti aerospaziali metallici di alta qualità e uniformità. Attualmente, l'unico standard ufficialmente disponibile è l'MSFC-STD-3716, emesso dalla NASA, il quale stabilisce i requisiti fondamentali per il controllo delle variabili di processo e per la gestione dei rischi associati alle tecnologie additive. In particolare, l'MSFC-STD-3716 introduce una metodologia strutturata per monitorare e mantenere il controllo sui parametri di produzione, assicurando la sicurezza e l'affidabilità dei componenti stampati. Tali certificazioni costituiscono il quadro normativo per l'adozione sicura della produzione additiva nel contesto aerospaziale, con un'attenzione particolare alla qualità e alla ripetibilità dei componenti prodotti.

I campioni realizzati in ULTEM™ 9085 evidenziano, come riportato nella letteratura scientifica [19], una notevole resistenza alla trazione, con variazioni significative in relazione all'orientamento di stampa. In particolare, i campioni orientati on-edge a 45° mostrano la massima resistenza sia alla trazione che alla flessione, mentre l'orientamento verticale è associato a proprietà meccaniche inferiori. L'analisi dei dati suggerisce, pertanto, che la resistenza alla trazione di ULTEM™ 9085 varia in modo significativo in funzione dell'orientamento dei campioni rispetto alla direzione di deposizione degli strati. I campioni stampati con orientamento on-edge a 45° rispetto all'asse di deposizione presentano una resistenza alla trazione superiore, contribuendo a un comportamento isotropo più uniforme del materiale. Tale orientamento favorisce l'aderenza tra gli strati, un aspetto cruciale per prevenire la delaminazione sotto carichi di trazione. Analogamente, per quanto riguarda la flessione, l'orientamento on-edge a 45° si rivela il più efficace, assicurando una migliore distribuzione delle forze lungo il componente e una resistenza maggiore rispetto agli orientamenti verticale e orizzontale. In aggiunta, i campioni di ULTEM™ 9085 mantengono una buona resistenza alla compressione; tuttavia, questa proprietà è meno influenzata dall'orientamento rispetto alla trazione e alla flessione, in quanto le forze agiscono lungo l'asse di deposito degli strati. Nei test di impatto Charpy, i campioni mostrano un comportamento prevedibile con una resistenza alla frattura moderata. La dissipazione dell'energia d'impatto risulta inferiore rispetto ai metalli, ma adeguata ad applicazioni non strutturali in cui la resistenza agli urti non è un requisito primario. Inoltre, vengono impiegate simulazioni di dinamica molecolare per stimare vari parametri, tra cui il modulo di bulk, il coefficiente di espansione termica, il modulo di Young, la viscosità di taglio in funzione della velocità di taglio, il tempo di reptazione all'interfaccia e la dinamica del necking. Sebbene le simulazioni di dinamica molecolare rappresentino un'alternativa costosa e dispendiosa in termini di

tempo, nonché meno affidabile rispetto all'analisi sperimentale delle proprietà dei polimeri fusi, il loro valore principale risiede nelle stime statistiche dei parametri chiave del modello. Queste stime offrono un legame tra teoria ed esperimento, fornendo così approfondimenti analitici sulla dinamica dei polimeri.

Nella letteratura scientifica [20], sono state condotte prove dinamiche su campioni di trazione in ULTEM™ 9085, utilizzando un carico ciclico fino al punto di rottura. Tali prove hanno fornito informazioni dettagliate sul comportamento alla frattura delle strutture realizzate mediante la tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM), anche quando sottoposte a carichi ripetuti ben al di sotto della loro resistenza alla trazione. È stata osservata un'anisotropia nelle diverse direzioni di costruzione, indicate come X, Y e Z, le cui rappresentazioni sono illustrate nella **Figura 5.1**. A parità di sollecitazione, i campioni orientati nella direzione X hanno mostrato la maggiore durabilità, seguiti da quelli nelle direzioni Y e Z. Con l'aumento del numero di cicli di carico fino a circa 10^4 , si è registrata una significativa diminuzione della sollecitazione massima in tutte le direzioni. Un dato di particolare interesse è che, dopo circa 3000 cicli, le curve di risposta per le direzioni X e Y tendono a sovrapporsi; inoltre, dopo circa 10^5 cicli di carico, queste curve coincidono quasi completamente. Anche la curva corrispondente alla direzione verticale Z mostra una convergenza con l'aumento del numero di cicli, tanto che, dopo circa 10^6 cicli, non si evidenziano differenze significative nella durabilità in funzione della direzione.

Quando si considera l'orientamento delle direzioni X e Y come un laminato classico, possono manifestarsi tensioni locali eccessive a causa delle variazioni nella sezione trasversale e nella disposizione delle fibre, con guasti ricorrenti. [21]

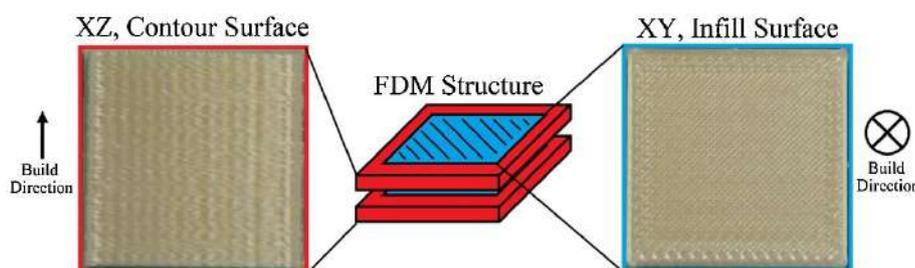


Figura 5.1: Schema degli strati prodotti nel processo FDM [20]

Inoltre, analizzando le curve di durabilità tra campioni non trattati e campioni sottoposti a trattamento chimico, non è stato riscontrato alcun effetto significativo del trattamento sulla durabilità. Si era inizialmente ipotizzato che il trattamento chimico, in particolare nella direzione Z, potesse incrementare la durabilità grazie alla levigatura della superficie e alla riduzione delle imperfezioni tra gli strati. Tuttavia, i risultati hanno confermato tale teoria esclusivamente per i dati statici, senza evidenziare un aumento della vita utile. Pertanto, si conclude che il trattamento chimico non ha mostrato effetti significativi sui carichi dinamici.

Dall'analisi del pattern di riempimento del componente, si osserva che durante il processo di estrusione del polimero su uno strato sottostante, il materiale viene spinto verso l'esterno, generando una forma ellissoidale. L'estruso proveniente dai contorni della stampante definisce la superficie esterna, mentre le aree piane adiacenti costituiscono la superficie di riempimento. È stato notato che un consolidamento inadeguato sulla superficie di riempimento può provocare la formazione di vuoti fino allo strato successivo, un fenomeno che può verificarsi durante il processo di stampa ed è intrinsecamente legato alla tecnologia di Fused Deposition Modeling (FDM). Al contrario, la superficie di contorno mostra una maggiore coesione.

L'analisi post-mortem delle superfici di frattura ha permesso di misurare con precisione l'area totale di adesione, garantendo misurazioni accurate delle sollecitazioni in piano. È stata osservata una

variazione della bagnabilità [22], valutata attraverso l'angolo di contatto; in particolare, le superfici di contorno risultano più idrofobiche a causa dell'aumento della loro area superficiale. Tuttavia, si può ulteriormente applicare un trattamento al plasma, il quale si è dimostrato un metodo efficace per migliorare l'idrofobicità di entrambe le superfici attraverso una riduzione degli angoli di contatto.

In conclusione, si è analizzato il material data sheet di ULTEM™ 9085 scelto per la successiva simulazione del support flag e reso disponibile dal fornitore in **Tabella 5.1**.

Tabella 5.1: Analisi delle proprietà meccaniche del materiale ULTEM™ 9085 fornito da 3DnA srl

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ ORIENTATION	ZX ORIENTATION	XZ ORIENTATION	ZX ORIENTATION
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6,800 psi	4,800 psi	47 MPa	33 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	9,950 psi	6,100 psi	69 MPa	42 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	312,000 psi	329,000 psi	2,150 MPa	2,270 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5.8%	2.2%	5.8%	2.2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2.2%	1.7%	2.2%	1.7%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	16,200 psi	9,900 psi	112 MPa	68 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	331,000 psi	297,000 psi	2,300 MPa	2,050 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	No break	3.7%	No break	3.7%
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.2 ft-lb/in	0.9 ft-lb/in	120 J/m	48 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	14.6 ft-lb/in	3.2 ft-lb/in	781 J/m	172 J/m
Compressive Strength, Yield (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	14,500 psi	12,700 psi	100 MPa	87 MPa
Compressive Strength, Ultimate (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	26,200 psi	13,100 psi	181 MPa	90 MPa
Compressive Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	1,030,000 psi	251,000 psi	7,012 MPa	1,731 MPa

Tra i polimeri più usati per l'AM, si nota in **Tabella 5.2**, le interessanti prestazioni termiche e meccaniche di un altro materiale che si è preso in considerazione per l'analisi di alternative del componente aerospaziale: l'ABS.

Tabella 5.2: Analisi e comparazione dei principali polimeri utilizzati mediante AM in aerospace [23]

Materiale	Resistenza alla trazione (MPa)	Modulo di Young (GPa)	Punto di fusione (°C)	Temperatura di stampa (°C)	Risoluzione di stampa (micron)	Costo (\$/kg)
PLA	60–70	3.5–4	150–160	190–220	50–200	20–40
ABS	30–45	1.5–2.5	220–240	230–260	100–300	20–40
PETG	50–70	2–3	250–260	230–250	50–200	25–45
Nailon	40–85	1.5–3.5	175–190	230–280	50–150	40–80

L'ABS, notoriamente competitivo nell'ambito aerospace, è un polimero termoplastico, largamente diffuso, è costituito dalla combinazione di tre unità monomeriche: acrilonitrile, butadiene e stirene, con formula chimica $[(C_8H_8)_x * (C_4H_6)_y * (C_3H_3)_z]$. Il processo di produzione dell'ABS è relativamente semplice ed economicamente vantaggioso, avviene tramite polimerizzazione dell'acrilonitrile e dello stirene in presenza di polibutadiene. Questo tecnopolimero si forma con

proporzioni variabili di monomeri, generalmente comprese tra il 15 e il 35% di acrilonitrile, il 40 e il 60% di stirene e il 5 e il 30% di butadiene. [24]

Ciascun componente del materiale contribuisce alle sue caratteristiche specifiche: l'acrilonitrile conferisce una migliore resistenza rispetto al polistirene puro grazie al gruppo nitrilico, lo stirene assicura una finitura superficiale lucida, mentre il polibutadiene apporta tenacità anche a basse temperature. L'ABS è un solido amorfo che non possiede un punto di fusione definito, bensì una temperatura di transizione vetrosa di 105 °C. Viene solitamente utilizzato in un intervallo di temperatura tra -20 °C e 80 °C, poiché le sue proprietà meccaniche risultano sensibili alla temperatura. Inoltre, risulta riciclabile e può essere recuperato dai rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, ampliando le sue prospettive come materiale sostenibile nel campo della produzione.

Il test ANOVA (Analysis of Variance) [25] viene utilizzato per analizzare statisticamente l'effetto di variabili di stampa, come spessore dello strato e orientamento del raster, sulle proprietà meccaniche dei campioni di ABS-M30™ stampati in 3D. L'ANOVA è una tecnica statistica che permette di determinare se ci sono differenze significative tra le medie di più gruppi, considerando una o più variabili indipendenti. Nel dettaglio, si possono confrontare due tipi di variabilità:

- Between-group variance: rappresenta la variazione tra le medie dei diversi gruppi, come ad esempio i gruppi con diversi spessori di strato o orientamenti.
- Within-group variance: rappresenta la variazione all'interno di ciascun gruppo, dovuta a differenze casuali o a fattori non controllati.

Si è valutato sia se i campioni con spessori di strato diversi mostrano differenze significative nella resistenza a trazione e nel modulo elastico sia l'effetto dell'orientamento del raster. [26]

Nel dettaglio, entrambe le variabili sopracitate influenzano in modo statisticamente significativo le proprietà del materiale. Di conseguenza, l'ottimizzazione di spessore e orientamento di stampa è fondamentale per migliorare le prestazioni meccaniche dei componenti stampati in 3D.

In aggiunta, è stato necessario ricercare in letteratura [26] test di ispezione delle superfici di frattura, i quali hanno mostrato che il modo di frattura è indipendente dal layer thickness ma cambia rispetto l'orientazione del raster. Le analisi al microscopio in accordo con i test a trazione mostrano valori di resistenza significativamente maggiori nel caso di minori layer thickness con la spiegazione di una più robusta adesione tra gli strati. Il grado di riempimento ottenuto varia in funzione delle particolari caratteristiche del materiale composito fuso. La superficie di frattura del campione di riferimento in ABS-M30™ mostra caratteristiche tipiche di una frattura duttile, comune nei materiali termoplastici. Le superfici di frattura osservate sui campioni sottoposti a trazione, realizzati con i quattro tipi di materiali e stampati nella direzione ZXY, mostrano caratteristiche differenti rispetto a quelle dei campioni stampati nella direzione XYZ. Nei campioni costruiti nella direzione ZXY, le superfici di frattura presentano caratteristiche di fragilità e ampie cavità. Una caratteristica rilevante della superficie di frattura è l'assenza di fibrille ed una morfologia a scaglie, indicativa di una zona di tensione normale estesa e mostrata in **Figura 5.2**.

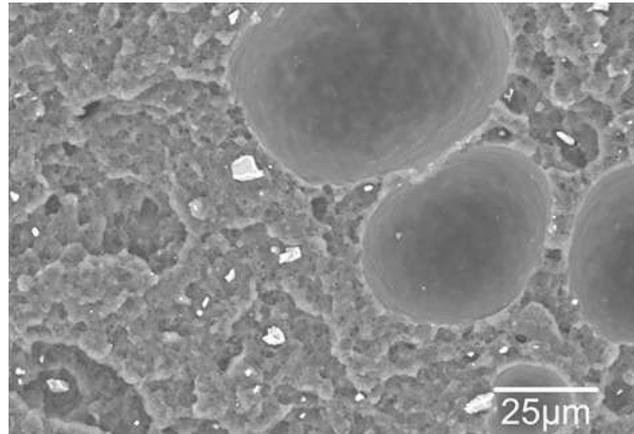


Figura 5.2: Immagine SEM di una superficie di frattura in un campione ZXY [26]

In sostanza, è di primaria importanza studiare l'orientamento ottimale della stampa poiché le superfici di frattura prodotte con orientamenti diversi presentano caratteristiche morfologiche diverse, in particolare data la correlazione degli strati mediante l'interfaccia.

A questo punto, è stato scelto tra le alternative da investigare in fase di formulazione l'ABS-M30™ con proprietà meccaniche riportate in **Tabella 5.3**.

Tabella 5.3: Analisi delle proprietà meccaniche del materiale ABS-M30™ fornito da 3DnA srl

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ AXIS	ZX AXIS	XZ AXIS	ZX AXIS
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,550 psi	3,750 psi	31 MPa	26 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,650 psi	4,050 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	310,000 psi	2,230 MPa	2,180 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7%	2%	7%	2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	1%	2%	1%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	7,000 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	250,000 psi	2,060 MPa	1,760 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	3.5%	4%	3.5%

La scelta è ricaduta su ABS-M30™ poiché è circa il 25-70% più resistente dell'ABS standard con una maggiore resistenza alla trazione, agli urti e alla flessione. In aggiunta, è possibile ottimizzare componenti più lisci con maggior dettaglio delle caratteristiche e utilizza l'opzione Xtend 500 Fortus Plus sviluppata per le stampanti 3D Fortus di Stratasys che consente più di 400 ore di tempo di compilazione automatica. Tale opzione riguarda specificamente il sistema di caricamento dei materiali e offre una capacità estesa per le bobine di materiale, permettendo l'uso di grandi cartucce di filamento di 500 pollici cubi, circa 8200 cc, contro le cartucce standard più piccole.

I sistemi Fortus, basati sulla tecnologia Advanced FDM Technology™ di Stratasys, utilizzano il processo di Fused Deposition Modeling (FDM). Tale tecnologia è stata dunque scelta ed ottimizzata per la produzione additiva di entrambi i materiali polimerici. I modelli di produzione Fortus garantiscono dettagli fini, superfici lisce, accuratezza e resistenza dei componenti prodotti.

La tecnologia FDM consente la realizzazione del componente mediante la deposizione stratificata di termoplastici ad alte prestazioni, garantendo precisione e robustezza strutturale. I principali parametri di processo nella produzione additiva includono la densità di riempimento, la

configurazione geometrica interna, la temperatura di estrusione, il diametro dell'ugello, lo spessore dello strato, l'angolo raster, l'orientamento di costruzione e la velocità di stampa.

Secondo i risultati emersi dalle review in letteratura [27], la densità di riempimento rappresenta uno dei fattori determinanti nel comportamento meccanico dei componenti stampati. In parallelo, anche la struttura geometrica interna svolge un ruolo significativo sulle proprietà meccaniche, influenzando l'interazione tra i filamenti sotto carico. Tra i modelli di riempimento più utilizzati si annoverano quelli di tipo esagonale, lineare e a diamante. È opportuno considerare che un determinato modello di riempimento può garantire risultati ottimali per le proprietà di trazione o compressione, mentre lo stesso modello potrebbe risultare meno efficace per componenti soggetti ad altre tipologie di carico.

Il parametro della velocità di stampa è correlato alla velocità di movimento dell'ugello e delle altre parti mobili della stampante 3D rispetto agli elementi fissi, bilanciando la durata del processo con la qualità delle parti ottenute. Tuttavia, una velocità di stampa eccessiva può portare a una debole adesione tra lo strato appena estruso e la parte già solidificata, compromettendo l'integrità strutturale del modello.

Dal punto di vista numerico, sono state condotte analisi FEM per simulare nell'ambiente di Ansys 2021 R2 Workbench le analisi strutturali statiche. L'analisi di sensibilità [28] ha rivelato che la geometria interna ha la massima influenza sulle prestazioni a fatica dei componenti stampati in ABS con tecnologia FDM. Inoltre, i risultati hanno mostrato che il diametro dell'ugello esercita una notevole influenza sulla continuità del campione stampato e, di conseguenza, sulle sue proprietà meccaniche. L'aumento del diametro dell'ugello comporta una riduzione della continuità del volume interno del pezzo, con un conseguente calo della resistenza a fatica. L'impiego di ugelli a diametro ridotto garantisce una maggiore densità e un miglior impacchettamento del materiale all'interno del volume, riducendo il numero di cavità d'aria. Rispetto agli altri parametri, la velocità di stampa ha un impatto relativamente minore sulle prestazioni a fatica. Dall'analisi di sensibilità non emerge un modello chiaro o una tendenza significativa associata alla variazione della velocità di stampa. In effetti, per carichi e materiali diversi, un incremento della velocità di stampa porta a risultati variabili, senza produrre una tendenza precisa, evidenziando che l'effetto della velocità di stampa è meno prevedibile rispetto ad altri parametri di processo.

6. Risultati delle simulazioni in CATIA

Nel processo di sviluppo del componente support flag sono state analizzate diverse alternative materiali per ottimizzare prestazioni, costi e processi di produzione. In particolare, l'attenzione iniziale si è focalizzata sulla lega AlSi10Mg, nota per le sue eccellenti caratteristiche meccaniche, che garantiscono resistenza e leggerezza, rendendola spesso la scelta primaria nei componenti non strutturali all'interno di applicazioni avanzate. L'analisi delle simulazioni effettuate ha previsto l'elaborazione dell'analisi statica con il supporto delle condizioni termiche e al contorno e ottimizzate su una mesh infittita adeguatamente, come mostra la **Figura 6.1**.

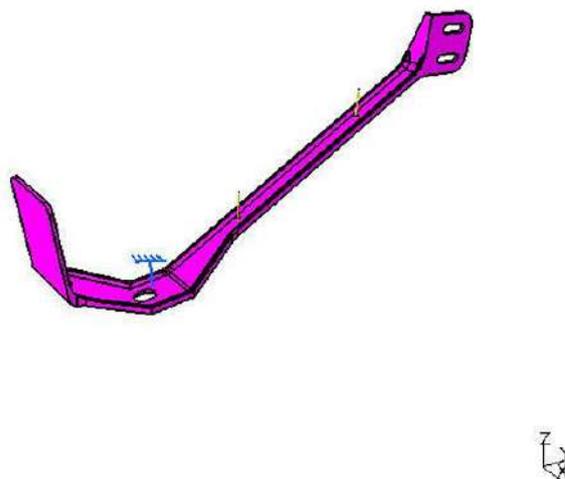


Figure 1

Calcolo STRUTTURA

Numero di nodi	: 811
Numero di elementi	: 2056
Numero di D.O.F.	: 2433
Numero di relazioni di contatto	: 0
Numero di elementi cinematici	: 0

Figura 6.1: Calcolo dei gradi di libertà, dei nodi e degli elementi in simulazione FEM

In CATIA, dopo aver creato la mesh, il software calcola automaticamente i gradi di libertà e associa a ogni nodo i DOF necessari, garantendo che il sistema sia pronto per l'analisi. In aggiunta, è stata supportata l'analisi di distribuzione dei pivot, i quali vengono utilizzati per stabilire punti di riferimento e assi lungo i quali vengono applicate le traslazioni o i vincoli di movimento nei modelli. La corretta distribuzione dei pivot è fondamentale per simulare con precisione i comportamenti del componente sotto carico. Nei pivot di traslazione, CATIA permette di definire i gradi di libertà su uno o più assi di traslazione (X, Y, Z). Si può, quindi, vincolare completamente il nodo o lasciarlo libero di muoversi in determinate direzioni, come solo lungo X o Y. L'origine dei pivot può essere configurata scegliendo punti o linee del modello da cui partire per definire la traslazione. Distribuire i pivot in aree con concentrazioni di stress o nei punti in cui si prevede maggiore deformazione permette di ottenere simulazioni precise senza un eccessivo carico computazionale. A ciascun pivot di traslazione vengono associati vincoli che limitano o consentono il movimento lungo specifici assi. In CATIA, questo avviene tramite il menu di definizione dei vincoli, dove si possono specificare i valori esatti di traslazione e gli angoli. Dopo aver distribuito i pivot di traslazione e definito i relativi vincoli, la simulazione mostrerà come il componente risponde ai carichi e quali parti si deformano o si spostano, come mostrato dalla **Tabella 6.1**

Tabella 6.1: Distribuzione dei pivot traslazionali sul support flag in AlSi10Mg

Valore	Percentuale
10.E3 --> 10.E4	4.4683e-002
10.E4 --> 10.E5	4.4683e-002
10.E5 --> 10.E6	0.0000e+000
10.E6 --> 10.E7	2.6810e-001
10.E7 --> 10.E8	9.8302e+000
10.E8 --> 10.E9	8.7846e+001
10.E9 --> 10.E10	1.9660e+000

Il metodo diretto con errore locale cerca di minimizzare le differenze tra la soluzione approssimata, simulazione FEM, e quella reale nei punti di interesse, ossia nelle aree dove si concentra lo sforzo o la deformazione. In ogni elemento della mesh, viene calcolata la discrepanza tra i valori di stress o deformazione calcolati nei nodi e i valori interpolati sui bordi degli elementi adiacenti. Questa discrepanza rappresenta l'errore locale. In CATIA, è possibile impostare un raffinamento automatico della mesh nelle zone in cui l'errore locale supera una certa soglia. Questo processo suddivide gli elementi nelle aree critiche in elementi più piccoli, riducendo l'errore locale. Il software esegue più cicli di calcolo e raffinamento finché l'errore locale rientra nei limiti prestabiliti. Ogni ciclo di affinamento riduce progressivamente l'errore. Le forze e i momenti permettono di identificare i nodi che sopportano carichi elevati o momenti significativi, aiutando a individuare le zone critiche e a valutare la resistenza del materiale e il corrispondente errore locale, come mostrato in **Tabella 6.2**.

Tabella 6.2: Analisi delle forze e dei momenti nodali applicati e corrispondenti errori locali

Componenti	Forze applicate	Reazioni	Residuo	Errore relativo di ampiezza
Fx (N)	-5.7298e-011	-4.0612e-012	-6.1359e-011	2.7591e-012
Fy (N)	-1.6298e-009	1.7211e-009	9.1328e-011	4.1067e-012
Fz (N)	-4.0000e+000	4.0000e+000	-9.8697e-011	4.4381e-012
Mx (Nxm)	5.2790e+000	-5.2790e+000	-1.3914e-010	9.2644e-013
My (Nxm)	2.6969e+001	-2.6969e+001	4.9120e-010	3.2707e-012
Mz (Nxm)	-1.1063e-008	1.1601e-008	5.3775e-010	3.5806e-012

L'analisi sul componente in lega AlSi10Mg ha dimostrato che, sebbene soddisfatti abbondantemente i requisiti prestazionali, con ordine di efficienza del 100%, il componente potrebbe essere realizzato anche con materiali meno prestazionali, senza compromettere l'affidabilità complessiva.

Considerando questo margine di flessibilità e nell'ottica di ottimizzare i costi e migliorare la sostenibilità dei materiali impiegati, abbiamo quindi deciso di approfondire ulteriormente le

simulazioni con CATIA, valutando polimeri ad alte prestazioni come ULTEM™ 9085 e ABS-M30™. Questi materiali, pur offrendo resistenze meccaniche inferiori rispetto alla lega metallica precedentemente analizzata, sono comunque sufficienti per le caratteristiche richieste dai componenti non strutturali. A questo punto, per valutare l'affidabilità del support flag negli altri due materiali polimerici di interesse, si è deciso di partire dallo stesso modello di riferimento, ovvero il modello support flag descritto e spiegato nel Capitolo 4. Questa scelta consente di mantenere una coerenza metodologica e la possibilità di comparare in modo efficace i risultati ottenuti tra i diversi materiali. Nell'ambito dell'analisi, sono state fissate le medesime condizioni al contorno, mantenendo invariati i vincoli meccanici e le condizioni di carico già applicate nel modello iniziale. L'analisi strutturale è quindi stata replicata in modo identico, assicurando che le uniche variabili modificate fossero le proprietà dei materiali in esame. Questo approccio ha permesso di isolare l'effetto specifico delle caratteristiche dei polimeri scelti, garantendo un confronto diretto e affidabile con i risultati ottenuti precedentemente per il materiale di base. In maniera specifica sono tabellati in **Tabella 6.3** i valori nominali di ABS-M30™.

Tabella 6.3: Variabili modificate nella seconda simulazione in CATIA

Materiale	ABS
Modulo di Young	3e+009N_m2
Modulo di Poisson	0.37
Densità	1000kg_m3
Coefficiente di dilatazione termica	6e-005_Kdeg
Limite di proporzionalità	0N_m2

È stato inoltre preso in considerazione il parametro in output energia di deformazione come che rappresenta la quantità di energia accumulata nel materiale a causa delle deformazioni indotte dai carichi applicati. Essa è una misura di quanto il materiale resista alla deformazione e può essere interpretata come un indicatore della resistenza strutturale e della distribuzione dello stress all'interno del componente. Maggiore è l'energia di deformazione in un'area, maggiore è il lavoro fatto dal carico per deformare il materiale in quella regione. Le zone che presentano elevata energia di deformazione sono spesso soggette a stress elevato e possono essere punti critici per il cedimento. Nei due casi dei materiali polimerici, date le proprietà meccaniche molto simili, risulta pressoché la medesima, il valore risulta con esattezza pari a 1.014×10^{-4} J.

In definitiva, date le analisi strutturali condotte utilizzando il metodo diretto si è constatato che l'efficienza della qualità dell'elemento progettato per supportare le condizioni impostate, con le proprietà del materiale fissate, è risultata soddisfacente al 100%. Questo risultato indica che il componente, a parità di vincoli imposti e design strutturale, ha superato tutte le valutazioni di performance, dimostrando una capacità ottimale di resistere ai carichi e alle sollecitazioni applicate senza mostrare segni di cedimento o deformazione eccessiva. Tali risultati confermano l'affidabilità e la robustezza del design e del materiale in esame, garantendo così i requisiti richiesti per la sua applicazione specifica.

La connettività dell'elemento, in definitiva uguale per i tre materiali analizzati, fa riferimento alla relazione tra i nodi che compongono un elemento nella mesh. Ogni elemento è definito dai nodi ai quali è connesso, e la sua connettività determina come le forze e le deformazioni si propagano attraverso il modello. Le statistiche di efficienza indicano, invece, quanto bene il modello risponde alle condizioni di carico e alle proprietà del materiale. In genere, queste statistiche comprendono

informazioni su come gli elementi hanno performato durante l'analisi. La percentuale di efficienza indica il grado di soddisfazione del modello rispetto ai criteri di prestazione stabiliti. Una percentuale di efficienza del 100%, come anche nel caso di ULTEM™ 9085, implica che tutti gli elementi hanno soddisfatto i requisiti progettuali, senza mostrare deformazioni eccessive o cedimenti.

7. Stampa 3D e Testing del Componente

La scelta della produzione mediante additive manufacturing è stata articolata considerando due percorsi distinti: uno per il componente realizzato in materiale metallico e l'altro per i componenti prodotti in materiale polimerico. La differenza principale risiede nel processo additivo adottato, che influisce direttamente sulle tipologie di macchine impiegate. In particolare, si è deciso di procedere con la stampa sia del componente ottimizzato nelle dimensioni, progettato mediante il software CATIA, sia dei provini per prove di flessione e trazione, al fine di analizzare le reali caratteristiche meccaniche del materiale.

Per la produzione additiva dei componenti, è stata adottata una strategia basata sulle specifiche esigenze dei materiali. In particolare, per la lega AlSi10Mg è stato scelto il processo Laser Powder Bed Fusion (LPBF), che garantisce elevata precisione e ottime proprietà meccaniche per componenti metallici. Per i polimeri, invece, si è optato per il processo Fused Deposition Modeling (FDM), utilizzando materiali avanzati come ULTEM™ 9085e ABS-M30™, noti per le loro eccellenti prestazioni termiche e meccaniche. Questa scelta consente di sfruttare al meglio le potenzialità dei diversi materiali e processi.

7.1 Stampa 3D del componente

In primo luogo, sono state esaminate le caratteristiche e le proprietà di stampa della lega AlSi10Mg, facendo riferimento alle evidenze emerse dalle ricerche bibliografiche precedentemente citate.

L'AlSi10Mg è una lega di alluminio indurente, con una densità di circa 2,67 g/cm³ ed è particolarmente adatta per la produzione di componenti a pareti sottili e parti con geometrie complesse. La composizione degli elementi della polvere è stata misurata mediante ICP-AES (Inductively Couple Plasma Atomic Emission Spectroscopy) e mostra una composizione mostrata nella **Tabella 7.1**. La polvere essiccata è stata caricata nel serbatoio della polvere, che è stato riempito con gas Argon come gas protettivo per ridurre il contenuto di ossigeno dell'intera camera a meno di 200 ppm. Tale lega presenta una buona lavorabilità e resistenza in ambienti corrosivi, oltre a un'alta conducibilità elettrica. La combinazione di elevate resistenze meccaniche e capacità di carico dinamico ne consente l'uso in applicazioni ad alta sollecitazione. Il profilo di intensità del raggio laser è stato di 70 W/mm². I parametri di elaborazione, forniti da 3DnA srl, sono stati i seguenti: la temperatura di preriscaldamento della piattaforma di stampa è stata aumentata fino a 100°C e il valore di velocità di scansione ottimizzata è stato di 20 mm/s.

Tabella 7.1: Composizione chimica della lega AlSi10Mg fornita da 3DnA srl

Chemical composition [Mass fraction in %]^[8]

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Other total
Balance	9.00 – 11.00	0.55	0.05	0.45	0.20 – 0.45	0.10	0.15	0.05	0.05	0.05	0.15

La granulometria influisce sulla densità della polvere metallica e sulla sua capacità di riempire uniformemente la cassa di costruzione. Una buona distribuzione delle dimensioni delle particelle consente una compattazione ottimale, riducendo gli spazi vuoti e migliorando la densità finale del componente. Inoltre, la dimensione delle particelle influisce anche sulla capacità della polvere di assorbire l'energia laser. Se le particelle risultassero troppo piccole potrebbero comportare una fusione inefficace, mentre se fossero troppo grandi potrebbero non fondere completamente. A causa delle molteplici conseguenze della dimensione e forma delle particelle sulla microstruttura e sulla velocità di stampa, di seguito è riportata la **Tabella 7.2**. La distribuzione granulometrica è fornita dall'apparecchiatura di atomizzazione a gas PSI HERMIGA 75/5VI. Un altro parametro fornito è

stata la conducibilità termica della polvere che influenza notevolmente la velocità di raffreddamento e il consolidamento layer su layer. La conducibilità termica, riportata in **Tabella 7.2**, è strettamente legata al parametro di ottimizzazione della strategia di riempimento e delle successive porosità nel materiale.

Tabella 7.2: Dimensione e forma delle particelle utilizzate per la stampa fornita da 3DnA srl

Pulvereigenschaften			
Particle size ^[6]	20 – 63 µm	Particle shape ^[9]	Sphärisch
Mass density ^[2]	≈ 2.67 g/cm ³	Thermal conductivity ^[6]	130 – 150 W/(m·K)

La scelta della macchina per la produzione additiva della lega AlSi10Mg è ricaduta sulla SLM 500, mostrata in **Figura 7.1**. La macchina scelta utilizza il processo di Laser Powder Bed Fusion (LPBF). Questo tipo di tecnologia consente la fabbricazione di parti complesse e di alta qualità attraverso la fusione di polveri metalliche, che vengono successivamente solidificate layer per layer da un laser ad alta potenza. La fusione laser selettiva utilizza solo la quantità di materiale necessaria per la produzione del pezzo, con pochissimi scarti rispetto ai metodi di produzione sottrattivi, come la fresatura. Inoltre, la polvere non utilizzata può essere raccolta e riutilizzata, riducendo ulteriormente gli sprechi. La macchina SLM 500 offre sistemi di gestione della polvere a circuito chiuso e moduli di filtraggio permanenti. Questi sistemi migliorano la sicurezza degli operatori, minimizzando l'esposizione alla polvere metallica, e garantiscono un ambiente di produzione controllato che mantiene alta la qualità del prodotto. In aggiunta, è stato considerato anche nella gestione e nell'analisi dei costi l'introduzione del gas inerte necessario alla creazione di un'atmosfera priva di ossigeno nella camera di costruzione. L'alluminio, infatti, è altamente reattivo con l'ossigeno, e a temperature elevate tende a formare uno strato di ossido sulla superficie. La presenza di gas inerte attorno al letto di polvere metallica stabilizza il processo di fusione del laser. Senza un ambiente controllato, infatti, le elevate temperature del laser potrebbero creare instabilità nel processo di fusione, portando a una fusione non uniforme. Il gas inerte aiuta a dissipare il calore in eccesso e a mantenere stabile l'area di lavoro. L'Argon, inoltre, contribuisce a ridurre l'accumulo di vapori metallici che possono intrappolarsi nel materiale durante la fusione, diminuendo la porosità nella struttura e garantendo una maggiore compattezza e resistenza della parte. Tale metodologia di lavoro garantisce i bassi livelli di ossigeno e i corretti livelli richiesti di gas passivante per consentire il funzionamento sicuro dell'apparecchiatura anche quando si tratta di un metallo altamente reattivo atomizzatore. L'ambiente protetto, in definitiva, aiuta a mantenere le caratteristiche di resistenza, duttilità e rigidità della lega, rendendola ideale per componenti che devono sopportare carichi strutturali o condizioni meccaniche intense.

I componenti in lega di alluminio prodotti con il processo LPBF presentano una struttura omogenea e quasi priva di porosità, con valori delle caratteristiche meccaniche che rientrano nelle specifiche del materiale.

Attraverso trattamenti successivi, come la tempra, è possibile adattare le proprietà dei componenti per soddisfare requisiti specifici, tuttavia grazie agli elevati tassi di solidificazione, non è necessario applicare il trattamento termico tradizionale T6 ai componenti SLM. La decisione finale è stata esclusivamente di trattare termicamente con una distensione a 300°C per 2 ore dopo il processo SLM®.



Figura 7.1: Schema della macchina SLM 500 con 1) Fusione Selettiva Laser , 2) Modulo di Filtro Permanente, 3) PSV - Sistema di Gestione della Polvere a Circuito Chiuso, 4) Stazione di Rimozione dei Pezzi.

La fase di stampa e il successivo testing sono proseguiti in maniera analoga e lineare anche per i due polimeri: ABS-M30™ e ULTEM™ 9085. Questo approccio ha garantito risultati confrontabili, permettendo di analizzare le differenze nelle proprietà meccaniche e superficiali dei vari materiali. Per i polimeri, la stampa è stata effettuata utilizzando una macchina FDM (Fused Deposition Modeling), in particolare il modello Fortus® 3D, mostrata in **Figura 7.2**. Questa tecnologia di stampa additiva utilizza filamenti polimerici, che vengono fusi e depositati strato dopo strato per costruire il componente.



Figura 7.2: Modello di macchina Fortus® 3D di Stratasys

Durante il nostro processo di progettazione e produzione, si è prestata particolare attenzione alla selezione della direzione di stampa per il componente in questione. Questa scelta è stata effettuata in accordo con il fornitore 3DnA srl, con l'obiettivo di ottimizzare sia i costi che le proprietà meccaniche del prodotto finale. Le direzioni di stampa sono mostrate nella successiva **Figura 7.3**.

La direzione di stampa non influisce solo sulle prestazioni meccaniche, ma ha anche un impatto significativo sul tempo di stampa. Optando per la direzione più appropriata, in particolare la direzione XZ sia per i provini in materiale polimerico sia per quelli in lega AlSi10Mg, si è in grado di ridurre i tempi di produzione, il che ha portato a una diminuzione dei costi complessivi. Una stampa più veloce non solo migliora l'efficienza produttiva, ma consente anche di rispondere più rapidamente alle esigenze del mercato, aumentando la competitività.

Anche nel caso dei polimeri, si è deciso di procedere con la stampa del componente finale utilizzando le dimensioni finali previste dal progetto. Questa scelta ci ha permesso di ottenere un prodotto che rispecchia esattamente le specifiche richieste, garantendo così la funzionalità e l'integrazione del componente nell'applicazione finale. In aggiunta al componente finale, si è anche stampato provini a flessione rettangolari e provini ad osso di cane per la successiva fase di testing.



Figura 7.3: Visualizzazione delle direzioni di stampa del componente fornita da 3DnA srl

7.2 Testing del componente e risultati

Una volta ricevuto il componente in lega AlSi10Mg dal fornitore 3DnA srl, è stata avviata la fase di testing per verificarne le caratteristiche e valutare la qualità della stampa. Questo processo include alcune misurazioni fondamentali per accertarsi che il pezzo soddisfi le specifiche progettuali e le esigenze di applicazione.

La misurazione del peso è essenziale per verificare che il componente sia stato stampato correttamente, senza eccessi di materiale o porosità eccessive che potrebbero influire sulla densità del pezzo. Un peso conforme alle specifiche è un segnale di un processo di fusione uniforme e di un'assenza di difetti interni come pori o inclusioni. Inoltre, il peso rivela se la polvere è stata distribuita correttamente e se il design del pezzo è stato rispettato. Di conseguenza, come prima fase di testing si è utilizzata la bilancia di precisione Kern CFS progettata per misurazioni di peso ad alta accuratezza, mostrata in **Figura 7.4**. Misurare il peso fornisce anche un controllo indiretto sulla densità del componente, che deve essere uniforme e conforme alle specifiche del progetto.



Figura 7.4: Misurazione del peso del componente in AlSi10Mg

A questo punto, sempre mantenendo lo stesso rigore metodologico e utilizzando le stesse apparecchiature, abbiamo proceduto a misurare il peso del componente stampato sia in ABS-M30™ che in ULTEM™ 9085.

I risultati delle misurazioni hanno confermato che il componente realizzato in ABS-M30™ è più leggero, come mostra la **Figura 7.5sx**), rispetto a quello in ULTEM™ 9085, mostrato in **Figura 7.5dx**). Questa differenza di peso è attribuibile alle diverse densità e alle proprietà fisiche intrinseche dei due materiali.



Figura 7.5: Misurazione del peso del componente con bilancia di precisione Kern CFS sx) in ABS-M30™ dx) ULTEM™ 9085

L'analisi dell'alleggerimento rispetto al costo costituisce un primo obiettivo di questo lavoro di tesi, rendendo fondamentale la considerazione della differenza di peso tra i materiali. I dati relativi al peso sono riportati in **Tabella 7.3** ed evidenziano un alleggerimento di circa il 116,67% passando dalla lega AlSi10Mg al support flag realizzato in ULTEM 9085. La differenza di peso tra il componente in ULTEM™ 9085 e quello in ABS-M30™ è di circa 28.57%. La riduzione di peso non solo migliora le caratteristiche funzionali del componente, ma favorisce anche l'efficienza energetica, riducendo potenzialmente i costi operativi.

Tabella 7.3: Risultati dell'alleggerimento dei materiali usati per il support flag

Materiali	Peso (kg)
AlSi10Mg	0,039
ABS	0,014
ULTEM 9085	0,018

Successivamente, è stata eseguita anche una verifica delle tolleranze dimensionali per assicurarsi che il componente rispettasse con precisione le specifiche progettuali. Questo controllo è cruciale perché anche piccole variazioni dimensionali possono influenzare l'adattabilità e l'integrazione del componente nel contesto in cui verrà installato. Per la verifica delle tolleranze dimensionali è stato utilizzato il calibro MarCal 16 ER della Mahr mostrato in **Figura 7.6**. Il calibro è progettato per misurare dimensioni lineari con accuratezza ed è molto utilizzato in ambito industriale nel settore qualità. La corrispondenza con le tolleranze previste garantisce che il componente possa essere intercambiabile con altri pezzi simili senza necessità di adattamenti.



Figura 7.6: Verifica delle tolleranze dimensionali del support flag in AlSi10Mg

Dopodiché con lo stesso rigore metodologico, si è passati a confrontare le tolleranze dimensionali rispettivamente del componente in ULTEM™ 9085 in **Figura 7.7sx)** e del componente in ABS-M30™ in **Figura 7.7dx)**.



Figura 7.7: Misura delle tolleranze dimensionali del componente in **sx)** ULTEM™ 9085 e **dx)** ABS-M30™

I materiali analizzati presentano tutti una conformità con i requisiti tecnici definiti dal customer Leonardo SpA.

Come terza fase di testing si è proposto di analizzare la rugosità superficiale per assicurarsi che il componente abbia un livello di finitura adeguato alla sua funzione. Le misurazioni della rugosità sono particolarmente importanti per componenti prodotti additivamente e che interagiranno con altre parti, in quanto una rugosità elevata potrebbe causare attrito o usura prematura. Una finitura uniforme, oltre a migliorare la resistenza a usura e corrosione, garantisce una migliore funzionalità ed è necessario che sia in linea con le tolleranze richieste in fase progettuale. In questa fase di test è stato utilizzato il Rugosimetro SJ-210 di OptiControl, mostrato in **Figura 7.8sx)**.

Il rugosimetro SJ-210 consente di misurare diversi parametri di rugosità per adattarsi alle esigenze di controllo qualità, tra cui la rugosità media aritmetica, l'altezza massima dei profili e la rugosità totale. In aggiunta, per misurare la rugosità del componente che presenta superfici oblique, è stato

creato un sistema ad hoc, adattando il rugosimetro Mitutoyo SJ-210 per ottenere misurazioni precise nonostante le inclinazioni. Le superfici oblique presentano infatti difficoltà poiché la misurazione della rugosità richiede che il sensore di contatto del rugosimetro mantenga una posizione stabile e perpendicolare alla superficie, condizione difficile da ottenere su angoli non convenzionali. È stato sviluppato un supporto regolabile che permette di inclinare il rugosimetro o il sensore secondo l'angolazione necessaria, mostrato in **Figura 7.8dx**). Questo supporto consente di allineare perfettamente il sensore alla superficie obliqua, migliorando la precisione della misurazione e riducendo la possibilità di slittamenti o errori dovuti alla pendenza. Con una precisione micrometrica e una risoluzione fino a $0,01\ \mu\text{m}$, il SJ-210 offre dati affidabili per superfici con requisiti di finitura molto stringenti. La stabilizzazione del sensore e l'adattamento all'inclinazione assicurano misurazioni ripetibili, minimizzando i margini di errore. I valori di rugosità sono stati misurati secondo la normativa prevista da progetto ISO1997 e la lega AlSi10Mg prodotta mediante LPBF ha mostrato un valore di rugosità media pari a $1,743\ \mu\text{m}$.



Figura 7.8sx): Rugosimetro SJ-210 sul componente in AlSi10Mg e **dx)** Sistema di supporto ad hoc per rilevazione della rugosità delle superfici oblique

Con lo stesso rigore, si è proseguito con il confronto della rugosità superficiale utilizzando il rugosimetro SJ-210, mostrato in **Figura 7.9**. I risultati ottenuti sono stati: $0,937\ \mu\text{m}$ per il componente stampato in ABS-M30™ e pari a $2,924\ \mu\text{m}$ per il componente in ULTEM™ 9085 come mostrato in **Tabella 7.4**. Queste misurazioni sono state effettuate secondo la normativa ISO 1997, che fornisce le linee guida per la determinazione dei parametri di rugosità superficiale previste da disegno e confrontabili con quelle utilizzate per la lega AlSi10Mg. Questa differenza può essere attribuita alle caratteristiche di stampa ma anche alle proprietà fisiche dei materiali utilizzati.

In definitiva, in seguito al confronto con il disegno tecnico del support flag, con particolare attenzione al rispetto della finitura superficiale secondo la specifica ATR D8101, è stata riscontrata una differenza significativa nella rugosità media tra i due polimeri, come riportato in **Tabella 7.4**. La differenza percentuale tra i valori di rugosità di 2,924 μm e 0,937 μm , calcolata rispetto al valore più piccolo, è risultata essere circa del 212%.

Per ridurre la rugosità, è possibile adottare trattamenti superficiali in fase di post-processo. Tuttavia, nel caso specifico, essendo i valori rilevati conformi alla normativa D8101, tali trattamenti non sono stati considerati, in quanto avrebbero comportato un costo aggiuntivo non giustificato.

Tabella 7.4: Valori di Rugosità media Rz mostrata dalle alternative materiali

Polimeri	Rugosità Rz (μm)
ULTEM 9085	2,924
ABS	0,937
AlSi10Mg	1,743

La durezza, infine, è stata misurata per valutare la resistenza del componente alle deformazioni permanenti. La lega AlSi10Mg deve mantenere una durezza che garantisca la capacità del pezzo di sopportare carichi e stress durante l'utilizzo. Misurare la durezza consente di individuare eventuali difetti nel processo di fusione, come una distribuzione non uniforme del materiale o una temperatura di sinterizzazione non ottimale, che potrebbero influire sulla resistenza del componente. Questo controllo è stato fondamentale per confermare che, dopo il processo di SLM, non fosse necessario un trattamento termico aggiuntivo. I risultati delle misurazioni della durezza hanno dimostrato che il componente presentava valori di durezza conformi agli standard richiesti. Questo ha confermato che la microstruttura ottenuta attraverso il processo di SLM era sufficientemente stabile e resistente. Per misurare la durezza del componente stampato, si è utilizzato il System AFFRI hardness tester, un dispositivo altamente preciso e specializzato per la valutazione della durezza dei materiali, mostrato in **Figura 7.11**. Per eseguire questa misurazione in modo corretto, è stato necessario stampare dei provini rettangolari a flessione. In questo caso, i provini a flessione rettangolari presentano una forma che facilita il posizionamento nel durometro e garantisce una superficie di misura adeguata. Questo consente di eseguire test di durezza in modo più semplice e preciso. Il System AFFRI hardness tester, combinato con questi provini, ha permesso di valutare la durezza del materiale in modo efficace, confermando le proprietà meccaniche del componente LPBF e FDM e la sua idoneità all'uso previsto senza necessità di trattamenti termici aggiuntivi. Nello specifico, come richiesto da progetto, è stata utilizzata la normativa ISO 4287 e il componente è risultato in via definitiva conforme alle tolleranze di progetto senza necessario trattamento termico aggiuntivo.



Figura 7.11: System AFFRI hardness tester

Una volta accertato il rispetto dei requisiti di progetto, il componente è stato montato sulla crew cargo door per verificare il perfetto incastro e il corretto allineamento, come mostrato in **Figura 7.12**. Questo passaggio è fondamentale per assicurarsi che il componente non solo rispetti le specifiche di progetto, ma sia anche funzionalmente adatto alla sua destinazione. Successivamente, è stato provato il funzionamento del portellone con il componente installato per verificare che operasse senza attriti o blocchi e garantisse il corretto movimento. Questo test funzionale finale è una conferma dell'adeguatezza del componente rispetto all'applicazione e del buon esito del processo di produzione additiva, che ha rispettato tutte le specifiche progettuali e funzionali.



Figura 7.12: Analisi della funzionalità e intercambiabilità del support flag

Pertanto, si è passati a verificare le caratteristiche funzionali e di assemblaggio dei componenti nei tre materiali analizzati. Questo step, mostrato in **Figura 7.13** e **Figura 7.14**, è fondamentale per assicurare che i componenti non solo si adattino correttamente, ma che possano anche svolgere efficacemente la loro funzione operativa. Un'altra considerazione importante è stata l'intercambiabilità dei componenti. È stato quindi verificato che i nuovi componenti stampati potessero essere sostituiti senza problemi con le parti già esistenti, garantendo così la compatibilità e l'efficienza del sistema. Questo aspetto è essenziale per il mantenimento e l'ottimizzazione delle operazioni nel cargo door.



Figura 7.13: Inserimento del support flag con verifica delle condizioni di assemblaggio nel cargo door



Figura 7.14: Verifica della funzionalità del support flag

A questo punto, avendo verificato che tutti i requisiti di disegno e funzionali fossero rispettati, si è stati in grado di passare all'analisi dei test di trazione e flessione. Questi test sono fondamentali per confermare l'efficienza simulata precedentemente utilizzando il software CATIA.

Per i test a flessione si sono opportunamente stampati i campioni con dimensione rettangolare e si è definito uno spessore di 4 mm tra i punti di appoggio in modo da garantire che il test avvenga in condizioni standardizzate. La velocità di applicazione della forza è stata, secondo lo standard ASTM D790, essere di 2 mm/min. Tale velocità è scelta per garantire che il test venga eseguito in modo controllato, riducendo al minimo l'effetto di eventuali variazioni di temperatura e permettendo di acquisire dati significativi. Il carico è applicato al centro del campione e durante il test è stato monitorato l'allungamento e la deformazione fino a rottura. Le immagini dei test a flessione per la lega AlSi10Mg, ABS-M30™, ULTEM™ 9085 sono rispettivamente mostrate nella **Figura 7.15**, **Figura 7.16sx**), **Figura 7.16dx**).



Figura 7.15: Test a flessione su provino in lega AlSi10Mg secondo lo standard ASTM D790



Figura 7.16: Test a flessione su provino in **sx)** ULTEM™ 9085 e **dx)** ABS-M30™ secondo lo standard ASTM D790

Le prove di trazione sono state svolte secondo lo standard GB/T 228-2002 e sono state progettate per determinare le proprietà meccaniche dei materiali metallici a temperatura ambiente nelle condizioni previste da progetto. Il campione, con geometria definita, è stato posizionato nella macchina di prova REP e viene applicata una forza di trazione crescente fino alla rottura del materiale. La velocità di applicazione del carico impostata è 2 mm/minuto. La geometria del provino, mostrata in **Figura 7.17** e utilizzata nelle prove di trazione, è stata progettata secondo lo standard con una lunghezza di lavoro di 57 mm, una larghezza di lavoro di 13 mm e uno spessore di 3,2 mm. Mentre i test a flessione sono stati eseguiti nel laboratorio di analisi dell'azienda Adler Aero, i test a trazione per i due polimeri non sono stati effettuati in azienda a causa di problemi di scivolamento dei provini dagli afferraggi. Questa problematica ha portato alla decisione di condurre i test di trazione presso il laboratorio del Politecnico di Torino, dove sono disponibili attrezzature più adatte per garantire risultati affidabili dei componenti polimerici. Durante i test di trazione, è fondamentale che il provino sia fissato saldamente agli afferraggi per garantire che la forza applicata si trasferisca uniformemente al campione. Per risolvere la problematica di scivolamento, sono stati utilizzate morse idrauliche. Questi afferraggi sono progettati per garantire un fissaggio sicuro e stabile del provino durante il test, offrendo il principale vantaggio di poter essere facilmente regolati per adattarsi a diversi spessori e forme di provini. La versatilità delle morse di questo tipo permette di controllare e regolare il carico applicato in modo preciso, migliorando l'affidabilità dei risultati dei test. Le morse idrauliche applicano una pressione uniforme e costante attorno al provino, riducendo il rischio di scivolamento e assicurando che il carico venga trasmesso correttamente. Tale sistema di afferraggio, mostrato in **Figura 7.18**, è progettato per distribuire il carico in modo uniforme su tutta la superficie di contatto, riducendo il rischio di concentrazioni di stress che potrebbero portare a risultati errati. Nel dettaglio, è stata utilizzata la macchina Instron Testing System, conforme alla normativa ASTM D695. I provini sono stati preparati secondo le specifiche della norma, assicurando che abbiano le dimensioni e le forme appropriate. I risultati ottenuti sono stati poi analizzati per calcolare la resistenza alla trazione e l'allungamento percentuale, e sono stati poi confrontati con i requisiti progettuali.

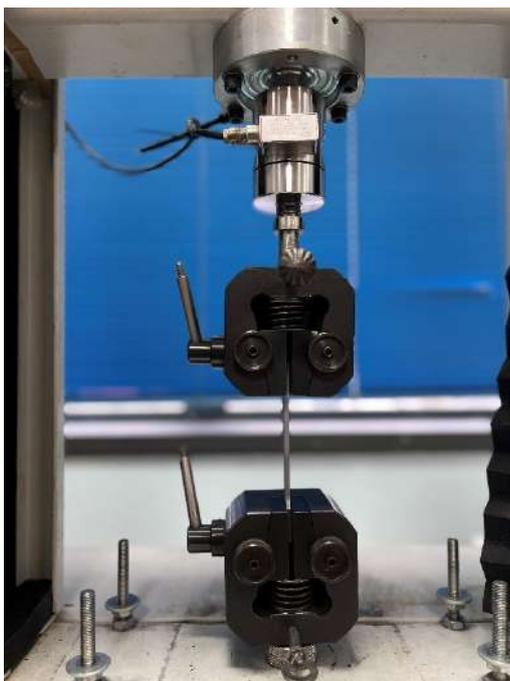


Figura 7.17: Test di trazione su provino in AlSi10Mg in Adler Aero



Figura 7.18: Test di trazione con afferraggi idraulici al laboratorio del Politecnico di Torino

I risultati ottenuti hanno comportato un'analisi approfondita dei grafici e dei valori derivanti dai test di trazione e di flessione. Poiché non erano disponibili un numero sufficiente di campioni per garantire risultati con una deviazione standard significativa e per ottenere un campione che consentisse una valutazione apprezzabile dell'errore, il test è stato definito come un accertamento delle simulazioni realizzate mediante CATIA. Nel caso di accettazione da parte del customer e successiva produzione, si prevede di ampliare il numero di campioni e di migliorare la precisione dei risultati ottenuti. In via definitiva, misurando lo sforzo a rottura con una cella di carico da 10 kN e una velocità di 2 mm/ minuto e con i provini ad osso di cane con lunghezza di lavoro di 57 mm,

una larghezza di lavoro di 13 mm e uno spessore di 3,2 mm. I risultati dello sforzo a rottura e della deformazione a rottura sono mostrati in **Tabella 7.5**.

Tabella 7.5: Risultati dello sforzo a rottura e deformazione a rottura in seguito al test a trazione per i materiali in esame

Materiali	Sforzo a rottura (MPa)	Def. a rottura (%)
AlSi10Mg	399	4,46
ABS	15	1,94
ULTEM 9085	37	3,64

I valori della lega AlSi10Mg risultano significativamente superiori rispetto a quelli dei materiali polimerici, come previsto. L'analisi del campione di AlSi10Mg ha evidenziato una rottura a trazione localizzata nelle vicinanze degli afferraggi, presumibilmente a causa del numero impresso sul provino, indicante la direzione di stampa e l'orientamento del campione. Pertanto, sarebbe consigliabile ripetere il test utilizzando campioni con la numerazione di identificazione più piccola o posizionata più distante dagli afferraggi, per ridurre l'influenza di tale fattore sui risultati. La superficie di frattura, osservata tramite stereomicroscopio come descritto nel Capitolo 8, mostra una tipica frattura in prossimità della curvatura caratteristica del provino a osso di cane.

In dettaglio, entrambi i materiali polimerici non raggiungono il valore minimo di sforzo a rottura previsto dal disegno tecnico del support flag del customer Leonardo S.p.A. Esaminando le curve ingegneristiche dei provini in ULTEM™ 9085 e in ABS-M30™, si osserva una simile morfologia delle curve ma una differenza di circa il 26,45% nei valori del modulo di Young. Il modulo di Young misurato è di 1194,78 MPa per il provino in ULTEM™ 9085 e di 915,69 MPa per il provino in ABS-M30™. Più nel dettaglio, i valori del Modulo di Young sono mostrati in **Tabella 7.6**.

Tabella 7.6: Risultati del Modulo di Young in seguito al test a trazione per i materiali in esame

Materiali	Modulo di Young (MPa)
AlSi10Mg	68000
ABS	915
ULTEM 9085	1194

Inoltre, la deformazione a rottura del campione in ULTEM™ 9085, pari al 3,64%, evidenzia una maggiore capacità di deformarsi prima della rottura, suggerendo così una migliore duttilità e una maggiore resistenza ai carichi variabili. Al contrario, l'ABS-M30™ ha mostrato una deformazione a rottura inferiore, pari all'1,94%.

La maggiore pendenza della curva ingegneristica per il provino in ULTEM™ 9085 segnala una superiore rigidità, attribuibile sia alla struttura cristallina dei domini nel materiale sia alla presenza di interazioni intermolecolari all'interno delle catene polimeriche.

Considerando, invece, i risultati ottenuti dal test a flessione su campioni rettangolari e con parametri di velocità pari a 2mm/ min e una larghezza di 4 mm tra i punti di appoggio, si sono ottenuti valori di carico a rottura mostrati in **Tabella 10.2**.

Tabella 10.2: Risultati del carico a rottura in seguito al test a flessione per i materiali in esame

Materiali	Carico a rottura (N)
AlSi10Mg	1264
ABS	75,4
ULTEM 9085	203

In questo caso la differenza percentuale del carico a rottura con sollecitazione di flessione tra i due polimeri è ancora più rilevante del caso del test di trazione, si parla di una differenza percentuale del 169,28%.

8. Caratterizzazione allo stereomicroscopio

Per l'analisi e la caratterizzazione allo stereomicroscopio delle superfici di frattura il procedimento si è svolto nei laboratori del Politecnico di Torino. Questo processo consente di valutare le caratteristiche della lega e la presenza di eventuali difetti o porosità che possono influenzare le proprietà meccaniche del materiale. Inizialmente, i provini sono stati preparati utilizzando la macchina di taglio BRILLANT 220, mostrata in **Figura 8.1**, un'apparecchiatura di precisione progettata per ottenere sezioni nette e controllate senza compromettere la struttura interna del campione. Le condizioni operative impostate hanno incluso una velocità di taglio di 1600 giri/minuto e una corrente massima di sicurezza impostata a 2,5 A. Il valore della corrente di sicurezza è stato scelto per garantire stabilità elettrica durante il processo di taglio ed evitare l'eccessivo riscaldamento del campione. Il valore della velocità di taglio è stato scelto in base al tipo di materiale in modo tale da permettere un'operazione di taglio controllata e riduce il rischio di danneggiamenti termici. Durante il processo di preparazione dei campioni con la macchina di taglio BRILLANT 220, è stato previsto un sistema di raffreddamento ad acqua. Questo accorgimento permette di evitare il surriscaldamento eccessivo del materiale durante il taglio, preservando così le proprietà della microstruttura interna della lega AlSi10Mg e riducendo il rischio di alterazioni termiche. Il raffreddamento ad acqua è cruciale poiché il calore generato durante il taglio potrebbe modificare localmente la struttura del materiale, compromettendo l'accuratezza dell'analisi successiva. È stata selezionata una dimensione dei provini di circa 1,5 cm; questa misura è ottimale per gestire il campione in sicurezza e visualizzare in maniera ottimale le superfici di frattura.



Figura 8.1: Macchina di taglio BRILLANT 220

Il taglio del componente in lega AlSi10Mg è stato effettuato con lama abrasiva diamantata, come si mostra in **Figura 8.2**. La stessa lama è stata riutilizzata per i materiali polimerici garantendo un taglio pulito e controllato e riducendo il rischio di surriscaldamento e deformazioni. Nel caso dei

polimeri è stata utilizzata una velocità di taglio più bassa per mantenere la stabilità del campione durante il taglio. Questo approccio evita la creazione di irregolarità e permette di ottenere una superficie di taglio omogenea, facilitando le successive fasi di preparazione e analisi.



Figura 8.2: Fotografia interna del meccanismo di taglio con la macchina BRILLANT 220

Per procedere in maniera ottimale, si è scelto di investigare una panoramica delle superfici di frattura utilizzando lo stereomicroscopio Leica EZ4W, mostrato in **Figura 8.3**. Questa fase è cruciale perché consente di avere una visione d'insieme del campione, identificando zone di interesse che poi possono essere analizzate più a fondo al microscopio ottico. Lo stereomicroscopio Leica EZ4W offre un'immagine tridimensionale e una profondità di campo adatta a evidenziare i dettagli della superficie. Tale panoramica è particolarmente utile e permette di osservare velocemente la conformità o eventuali difetti superficiali subito dopo la frattura.



Figura 8.3: Immagine dello stereomicroscopio Leica EZ4W utilizzato per le analisi

In primo luogo, sono stati analizzati i campioni rotti in seguito a test a flessione e quelli rotti a seguito di test a trazione. L'analisi delle superfici di frattura ha rivelato caratteristiche distintive in relazione al tipo di sollecitazione applicata. I campioni hanno mostrato una frattura di tipo fragile, evidenziando l'influenza della modalità di sollecitazione sul comportamento meccanico della lega. Queste osservazioni sono di fondamentale importanza per comprendere a fondo le proprietà della lega AlSi10Mg e per ottimizzare i processi di progettazione e produzione. I dati raccolti contribuiranno a una previsione più accurata del comportamento della lega in applicazioni pratiche, migliorando così la qualità dei componenti fabbricati.

La **Figura 8.4** mostra una superficie di frattura che presenta un aspetto irregolare, caratterizzato da una rugosità marcata e una serie di zone frastagliate con asperità ben visibili. Il cedimento del campione in AlSi10Mg ha mostrato una certa evidenza di frattura fragile, caratterizzate da superfici relativamente piatte e brillanti, suggerendo un tipo di frattura senza una significativa deformazione plastica. I valori ottenuti risultano comparabili con le previsioni ottimizzate tramite software. La rigidità dei materiali analizzati, impattati dal risultato del modulo di Young, risulta in accordo con le simulazioni di analisi statica.

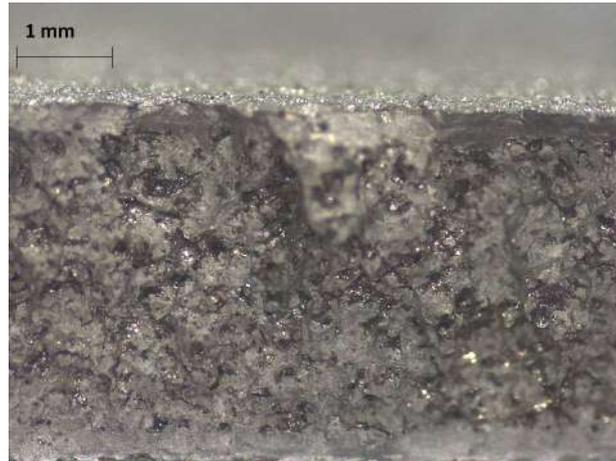


Figura 8.4: Superficie di frattura in seguito a flessione del campione in lega AlSi10Mg

La superficie di frattura in seguito a trazione della lega in AlSi10Mg è mostrata in **Figura 8.5**. La morfologia è più uniforme e meno frastagliata e la rottura è avvenuta in corrispondenza del numero stampato sulla superficie del componente. Il campione è stato analizzato nella direzione XZ e in definitiva la superficie relativamente uniforme con poche inclusioni evidenti, indicando una buona distribuzione del materiale, ma con la presenza di porosità come difetti principali.

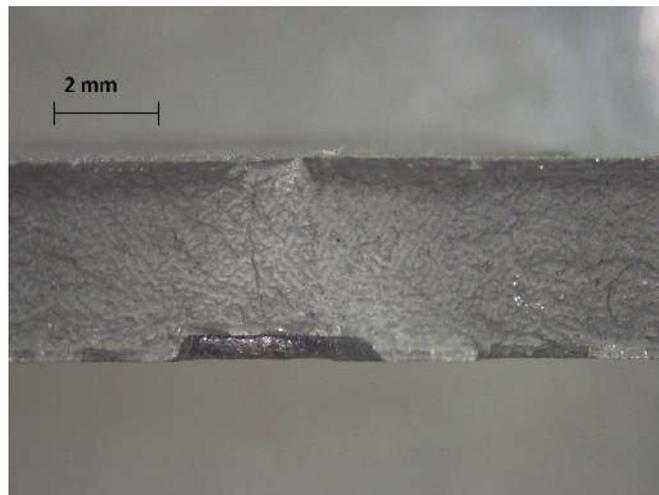


Figura 8.5: Superficie di frattura in seguito a trazione del campione in lega AlSi10Mg

Analogamente, sono state analizzate le immagini allo stereomicroscopio Leica EZ4W dei due polimeri ABS-M30™ e ULTEM™ 9085. La **Figura 8.6** mostra chiaramente la movimentazione del filo di apporto che genera linee visibili lungo i layer di stampa. Il campione mostra chiaramente una frattura di tipo fragile, il primo approccio topografico e morfologico prevede un ulteriore approfondimento della superficie di frattura e un'analisi approfondita nella spaziatura tra i layer. La qualità dell'adesione dei layer è, infatti, un fattore determinante per la resistenza meccanica finale del componente.

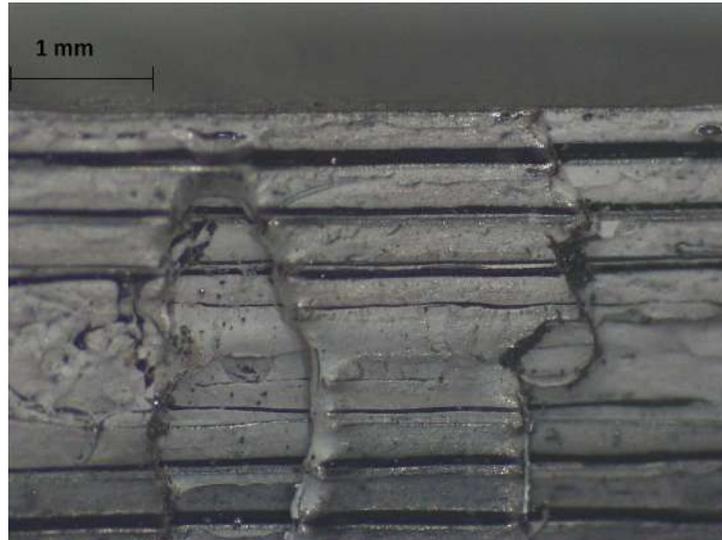


Figura 8.6: Provino in ABS rilevato in seguito a frattura con carico flessionale

Le tensioni residue che possono portare debolezza intrinseca nella struttura sono da valutare per materiali come l'ABS, che tendono a contrarsi durante il raffreddamento, aumentando così le possibilità di formazione di vuoti o difetti di adesione. Osservare il campione stampato in FDM sia lungo la direzione di stampa sia nella direzione perpendicolare è interessante perché offre una comprensione dettagliata delle caratteristiche morfologiche e delle anisotropie del campione. In **Figura 8.7** è mostrato la morfologia trasversale agli strati e si può dedurre la mancanza di delaminazione, warping e altre imperfezioni che possono essere critiche per l'integrità del pezzo stampato.

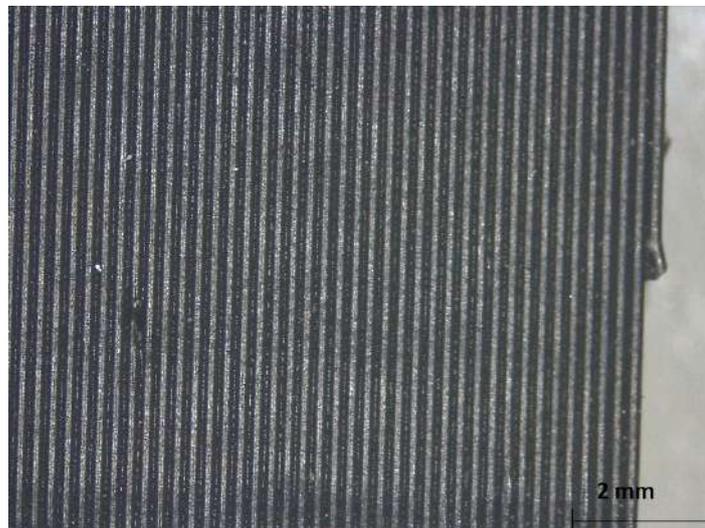


Figura 8.7: Provino in materiale ABS rilevato nella direzione perpendicolare alla direzione di stampa

Analogamente, visualizzando la morfologia di stampa allo stereomicroscopio Leica EZ4W del campione in ULTEM™ 9085 nella **Figura 8.8**, è possibile notare il modello di deposizione del filamento adottato per la costruzione di campioni con orientamento XZ. L'ispezione visiva della frattura superficiale evidenzia la presenza di alcuni vuoti in corrispondenza dell'interfaccia del

contour. Il campione in ULTEM™ 9085 si mostra più poroso dei precedenti campioni analizzati, e questo è confermato anche dall **Figura 8.9**. Per avere una stima quantitativa della porosità percentuale è opportuno identificare la presenza di vuoti con un'analisi statistica su un numero consistente di immagini al microscopio ottico.

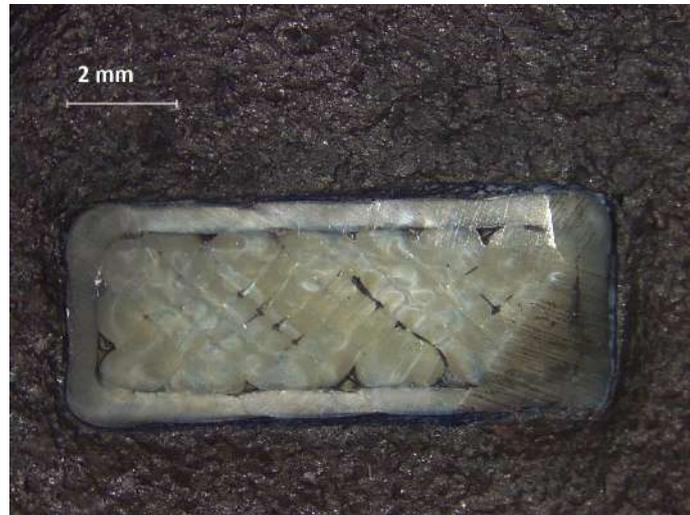


Figura 8.8: Provino in ULTEM™ 9085 rilevato in seguito a frattura con carico flessionale

Come confermato dai risultati dei test di trazione e flessione, i provini in ULTEM™ 9085 risultano più resistenti con valori di UTS maggiore ma minore allungamento percentuale. Il materiale in ULTEM™ 9085 risulta quindi meno duttile. Il pattern di stampa per questo materiale influenza molto la capacità di deformazione plastica prima della rottura.

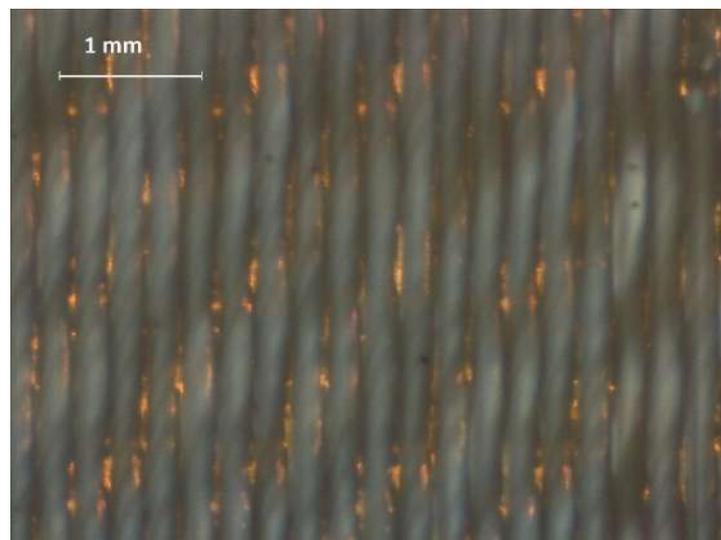


Figura 8.9: Provino in ULTEM™ 9085 rilevato nella direzione perpendicolare alla direzione di stampa

9. Analisi economica del processo di alleggerimento

L'investimento iniziale per l'acquisto del macchinario SLM 500 rappresenta uno degli elementi chiave nell'analisi dei costi di produzione. Con un costo d'acquisto storico di 1.500.000 euro, il macchinario richiede un significativo impegno finanziario per l'azienda. Tuttavia, per comprendere meglio l'impatto di questo investimento sul costo complessivo di produzione, è essenziale considerare il processo di ammortamento.

L'ammortamento, calcolato secondo l'**Equazione 9.1**, è il metodo contabile attraverso il quale il costo del macchinario viene ripartito lungo la sua vita utile. Nel caso del SLM 500, l'azienda ha stabilito un ammortamento annuo di 300.000 euro. Questo significa che ogni anno, per la durata prevista della vita utile del macchinario, l'azienda deve allocare una quota di 300.000 euro come costo fisso per il macchinario, indipendentemente dall'effettivo utilizzo.

$$\text{Amm.to macchinario orario} = \frac{\text{Costo storico}}{n_{\text{year}} \times h_{\text{year}}} \quad (9.1)$$

Per analizzare più a fondo il costo associato all'utilizzo del macchinario, possiamo esaminare l'ammortamento orario. Supponendo un totale di 7.200 ore di lavoro annuali, il costo di ammortamento per ogni ora di operatività del macchinario è di 41,7 euro, come mostra la **Tabella 9.1**. Lo stesso costo di ammortamento del macchinario è mostrato nel caso dei materiali polimerici in **Tabella 9.2**. Questo costo orario di ammortamento è un componente critico da considerare quando si stima il costo di produzione per ciascuna unità prodotta, in quanto influisce direttamente sul prezzo finale del prodotto e sulla marginalità del progetto. Pertanto, si andrà ad allocare l'ammortamento orario al prodotto finale in base alla durata del ciclo di stampaggio: 17 ore per il materiale da progetto in lega di alluminio per un totale allocato di 708,3€, 10 ore per le componenti in materiale polimerico per un totale allocato di 416,7€.

Tabella 9.1: Ammortamento Macchinario per lega AlSi10Mg

Ammortamento Macchinario AlSi10Mg	
SLM500 (€)	1500000
Amm.to annuo (€)	300000
Ore di lavoro (h/anno)	7200
Amm.to orario (€)	41,67 €
Amm.to imputato (€)	708,33 €

Tabella 9.2: Ammortamento Macchinario per i due materiali polimerici: ABS e ULTEM

Ammortamento Macchinario Polimeri	
Fortus3D (€)	500.000 €
Amm.to annuo (€)	100.000 €
Ore di lavoro (h/anno)	7200
Amm.to orario (€)	13,89 €
Amm.to imputato (€)	138,89 €

Oltre ai costi legati all'acquisto e all'ammortamento del macchinario, un altro fattore cruciale da considerare nell'analisi dei costi di produzione è il consumo energetico. Il macchinario SLM 500, utilizzato per la stampa 3D in additive manufacturing, ha specifiche di consumo energetico che variano a seconda delle condizioni operative. In particolare, i consumi possono essere suddivisi in tre scenari distinti:

- Consumo massimo quando il macchinario opera alla massima potenza, il consumo energetico raggiunge un picco di 8,5 kW;
- Consumo medio durante il normale funzionamento, il consumo energetico medio si attesta intorno ai 2,4 kW;
- Consumo con riscaldamento della piattaforma quando è attivato il riscaldamento della piattaforma, il consumo energetico aumenta a circa 3,2 kW.

Per stimare l'impatto economico del consumo energetico sul costo complessivo di produzione, è necessario moltiplicare il consumo energetico (in kW) per il costo dell'energia elettrica (espresso in €/kWh). Supponendo un costo dell'energia pari a 0,20 €/kWh, possiamo calcolare il costo orario dell'energia per ciascuno dei tre scenari:

- Consumo massimo: $8,5 \text{ kW} \times 0,20 \text{ €/kWh} = 1,70 \text{ €/h}$
- Consumo medio: $2,4 \text{ kW} \times 0,20 \text{ €/kWh} = 0,48 \text{ €/h}$
- Consumo con riscaldamento della piattaforma: $3,2 \text{ kW} \times 0,20 \text{ €/kWh} = 0,64 \text{ €/h}$

Questi valori rappresentano il costo orario dell'energia necessario per operare il macchinario in differenti condizioni. Il consumo energetico medio fornisce una buona stima per i costi operativi durante la produzione standard, mentre il consumo massimo potrebbe essere utilizzato per prevedere costi durante fasi particolarmente intensive o critiche del processo produttivo.

Di seguito si riporta, a titolo esemplificativo, la stima dei costi energetici relativi alla produzione del materiale in lega AlSi10Mg che presuppone 17 ore di processo produttivo e 1 ora di consumo elettrico massimo. I polimeri in esame invece presuppongono un costo di tempo produttivo di 10 ore. I confronti della stima dei costi energetici sono esplicitati in **Tabella 9.3**.

Tabella 9.3: Stima dei costi energetici del processo di produzione

Elettricità		(€/h)	AlSi10Mg(€)	Polimeri (€)
Consumo medio (kW)	2,4	0,48 €	8,16 €	4,80 €
Consumo riscald. (kW)	3,2	0,64 €	10,88 €	6,40 €
Consumo massimo (kW)	8,5	1,70 €	1,70 €	1,70 €
Costo orario totale (€/h)	0,20 €	Totale	20,74 €	12,90 €

Un aspetto cruciale nella produzione additiva è l'utilizzo di software CAD/CAM per la progettazione e la preparazione dei modelli da stampare. Il software CAD/CAM, essenziale per garantire precisione e qualità nel processo di produzione, ha un costo annuale che deve essere considerato nell'analisi complessiva dei costi di produzione.

Nel caso specifico, l'abbonamento annuale al software CAD/CAM ammonta a 763 euro, come mostrato in **Tabella 9.4**. Per distribuire equamente questo costo su base oraria, è necessario considerare il numero di ore di utilizzo annuo del software. Con un utilizzo giornaliero di 8 ore e un totale di 2.400 ore annue, il costo orario del software è stato calcolato dividendo il costo totale annuale per il numero di ore di utilizzo.

Tabella 9.4: Analisi dei costi software CAD/CAM

Software CAD/CAM	
Software CAD/CAM (€/annuo)	763
Ore utilizzo giornaliero (h)	8
Ore utilizzo annue (h)	2400
Costo orario (€)	0,32

Pertanto, il costo orario di utilizzo del software CAD/CAM risulta essere 0,32 euro/ora. Questo valore rappresenta una quota del costo complessivo di produzione che deve essere aggiunta ai costi di altri elementi, come l'energia, la manodopera e l'ammortamento del macchinario, per ottenere una stima precisa del costo di produzione per ciascuna unità prodotta.

In conclusione, la stima del costo orario di utilizzo del software CAD/CAM è una componente fondamentale nell'analisi dei costi, poiché permette di ripartire il costo annuale del software su base oraria, garantendo così una visione più accurata e dettagliata dei costi operativi complessivi associati alla produzione additiva.

Un elemento chiave nell'analisi complessiva dei costi di produzione è rappresentato dal costo della manodopera, in **Tabella 9.5**, che include non solo lo stipendio lordo dei dipendenti, ma anche una serie di oneri aggiuntivi che devono essere considerati per determinare il costo totale per l'azienda.

Per il ruolo di designer, lo stipendio lordo annuale è di 35.000 euro. A questo importo, l'azienda deve aggiungere i contributi previdenziali a suo carico, che ammontano a 10.500 euro, il Trattamento di Fine Rapporto (TFR) di 2.590 euro. Sommando tutte queste voci, il costo lordo totale annuo per il designer risulta essere di 48.090 euro. Questo si traduce in un costo lordo orario di 23 euro considerando un monte ore annuo lavorato dal dipendente. Analogamente, per un operaio con uno stipendio lordo di 26.000 euro, i costi aggiuntivi includono contributi previdenziali per 7.800 euro, TFR per 1.924 euro. Il costo lordo totale annuo per l'operaio risulta quindi pari a 35.724 euro, con un corrispondente costo lordo orario di 17 euro. L'analisi costi della manodopera è rappresentata in **Tabella 9.5**.

Tabella 9.5: Rappresentazione dei costi di manodopera

Manodopera	
RAL Designer (€)	35.000 €
Contributi (€)	10.500 €
TFR (€)	2.590 €
Costo lordo totale(annuo)	48.090 €
Costo lordo totale(orario)	23 €
RAL Operaio (€)	26.000 €
Contributi (€)	7.800 €
TFR (€)	1.924 €
Costo lordo totale(annuo)	35.724 €
Costo lordo totale(orario)	17 €

Questi costi rappresentano un'importante componente del costo complessivo di produzione, poiché la manodopera è essenziale in ogni fase del processo produttivo, dalla progettazione iniziale alla produzione e alla finitura del prodotto. È fondamentale includere questi costi nella determinazione del prezzo di vendita del prodotto, in modo da garantire la sostenibilità economica dell'intero progetto.

In sintesi, la valutazione accurata del costo lordo del personale consente di comprendere meglio l'incidenza dei costi di manodopera sul costo totale di produzione, fornendo una base solida per la pianificazione finanziaria e la strategia di prezzo dell'azienda.

Per un progetto specifico, la produzione di componenti in lega AlSi10Mg ha richiesto un totale di 17 ore. Analogamente, la produzione di componenti polimerici ha richiesto 10 ore. Infine, la fase di progettazione, che è cruciale per definire le specifiche e ottimizzare il processo produttivo, ha richiesto 1 ora di lavoro da parte del designer per ogni singolo componente. I calcoli dei costi diretti seguono l'Equazione 9.2.

$$C_d = \left(C_{doper} + \frac{C_{CAD}}{h} \right) \times t_d + (C_{manod} \times t_s) + C_e \quad (9.2)$$

Di seguito, in **Tabella 9.6**, sono riportati i costi totali di progettazione e produzione per ogni componente.

Tabella 9.6: Costo totale di progettazione e produzione per i 3 materiali in esame

Costo totale Progettazione e Produzione	
Support Flag AlSi10Mg	315,4 €
Support Flag ABS	195,2 €
Support Flag ULTEM	195,2 €

Nell'ambito di un processo di stampaggio 3D, l'analisi del costo del materiale per ciascun componente è cruciale per determinare la sostenibilità economica dell'intera produzione. Il materiale rappresenta una delle principali voci di spesa, e la sua ottimizzazione può influire significativamente sul costo finale del prodotto. Comprendere il peso, il costo unitario e la quantità necessaria per ogni pezzo permette di identificare eventuali sprechi, migliorare la scelta dei materiali in base alle loro proprietà e costo, e valutare la convenienza rispetto ad altre tecniche produttive. Questa analisi segue l'Equazione 9.3 e fornisce un quadro chiaro sui margini di profitto e sull'efficienza complessiva del processo di produzione.

$$C_{mat} = W_m \times C_{powder} \quad (9.3)$$

Di seguito, in **Tabella 9.7**, si riporta la stima dei costi del materiale per ognuna delle componenti.

Tabella 9.7: Analisi del costo del materiale per il componente analizzato

Costo materiale	
Support Flag AlSi10Mg	
Peso (kg)	0,019
Costo (€/kg)	65 €
Costo materiale (€)	1,24 €
Support Flag ABS	
Peso (kg)	0,009
Costo (€/kg)	530 €
Costo materiale (€)	4,77 €
Support Flag ULTEM	
Peso (kg)	0,009
Costo (€/kg)	750 €
Costo materiale (€)	6,75 €

I costi di setup, calcolati secondo l'Equazione 9.4, di un macchinario per stampaggio 3D includono diverse attività iniziali necessarie per avviare correttamente il processo di stampa. Questi costi non riguardano solo il materiale, ma anche il tempo e le risorse impiegate per rendere la macchina pronta all'uso. Ecco i principali elementi da considerare:

- Riempimento del distributore: il costo di questa fase dipende dalla quantità di materiale e dal tempo necessario per il riempimento. La gestione corretta di questa fase è essenziale per garantire la qualità della stampa e minimizzare gli sprechi;
- Preparazione e controllo della camera di stampa: prima dell'avvio della stampa, la camera della macchina deve essere pulita e controllata per garantire che non ci siano residui o impurità che potrebbero influire sul risultato. Anche la calibrazione della temperatura, l'umidità e altri parametri ambientali possono rientrare in questo processo. Questo passaggio richiede tempo e risorse per garantire che l'ambiente sia ottimale per la stampa;
- Rivestimento della piattaforma di costruzione: la piattaforma su cui verrà costruito il componente deve essere trattata per favorire l'adesione del primo strato del materiale e per prevenire difetti durante la stampa. Spesso, viene applicato un rivestimento che può variare a seconda del materiale utilizzato. Il costo deriva sia dal tempo per applicare il rivestimento sia dal costo del materiale di rivestimento stesso.

Preparazione e controllo della camera di stampa: prima dell'avvio della stampa, la camera della macchina deve essere pulita e controllata per garantire che non ci siano residui o impurità che potrebbero influire sul risultato. Anche la calibrazione della temperatura, l'umidità e altri parametri

ambientali possono rientrare in questo processo. Questo passaggio richiede tempo e risorse per garantire che l'ambiente sia ottimale per la stampa;

- Rivestimento della piattaforma di costruzione: la piattaforma su cui verrà costruito il componente deve essere trattata per favorire l'adesione del primo strato del materiale e per prevenire difetti durante la stampa. Spesso, viene applicato un rivestimento che può variare a seconda del materiale utilizzato. Il costo deriva sia dal tempo per applicare il rivestimento sia dal costo del materiale di rivestimento stesso.

$$C_{\text{setup}} = k_1 C_{\text{fill}} + k_2 C_{\text{env}} + k_3 C_{\text{build plat}} \quad (9.4)$$

I costi di setup, riportati in **Tabella 9.8**, incidono direttamente sulla produttività e sull'economia di scala del processo. Se il setup richiede molto tempo o è complesso, il costo unitario per componente stampato aumenta, soprattutto per piccole produzioni. Pertanto, una corretta ottimizzazione di queste fasi è fondamentale per ridurre i tempi morti e i costi operativi, aumentando l'efficienza complessiva del processo di stampa 3D.

Tabella 9.8: Analisi dei cost di set-up

Costi Set-up	
Riempimento distributore (€)	0,01 €
Preparazione camera (€)	3,09 €
Rivestimento piattaforma (€)	2,05 €
Totale per parte (€)	5,15 €

In sintesi, i costi di setup coprono vari aspetti necessari per garantire una produzione efficiente e di alta qualità. Il costo di riempimento del distributore è molto basso e si riferisce al materiale consumato per parte. Il costo di preparazione e controllo della camera è più elevato e copre le operazioni di preparazione e monitoraggio del processo produttivo. Infine, il costo di rivestimento della piattaforma di costruzione si riferisce alla manutenzione della superficie su cui vengono costruite le parti. Tutti questi costi contribuiscono a garantire che la produzione avvenga senza intoppi e con risultati ottimali.

I costi di post-processo in una produzione 3D sono altrettanto importanti quanto quelli di setup e di produzione, poiché influiscono sulla qualità finale del prodotto e possono rappresentare una parte significativa del costo totale. Il post-processo comprende una serie di operazioni che servono a perfezionare e rendere funzionale il pezzo stampato, come per esempio il costo della rimozione dei supporti.

Durante la stampa 3D, vengono utilizzati supporti per sostenere le parti del modello che, altrimenti, non potrebbero essere stampate correttamente a causa della gravità o della complessità geometrica. La rimozione di questi supporti è una fase delicata del post-processo che richiede sia tempo che competenze tecniche. In base al tipo di materiale e al metodo di stampa, la rimozione può essere effettuata manualmente, meccanicamente, o con tecniche chimiche.

Il costo di questa operazione include:

- Tempo di lavoro manuale o meccanico
- Utilizzo di attrezzature specifiche
- Eventuali soluzioni o prodotti chimici per la dissoluzione

I costi di post-process includono anche i costi di finitura superficiale e del trattamento termico successivo. Nel caso dei componenti analizzati non è risultato necessario provvedere a trattamenti di finitura superficiale, i componenti hanno mostrato, infatti, tolleranze dimensionali in linea con le richieste di progetto. In generale, i costi di post-process sono stati considerati secondo l'**Equazione 9.4**.

$$C_{\text{post proc}} = k_3 C_{\text{rem supp}} + k_1 C_{\text{post treat}} + C_{\text{polishing}} \quad (8.4)$$

Questi costi, riportati in **Tabella 9.9**, possono variare considerevolmente in base alla geometria, al materiale e agli standard di qualità richiesti per il pezzo finito. Un'analisi attenta di queste operazioni è fondamentale per valutare la convenienza della stampa 3D rispetto ad altre tecnologie produttive. Ridurre al minimo le operazioni di post-processo, ottimizzandole o scegliendo i materiali e i parametri di stampa adeguati, può migliorare significativamente la redditività complessiva del progetto.

Tabella 9.9: Costi di post-processo del Support Flag

Post-processo Support Flag	
Trattamento termico (€)	30 €
Rimozione supporti (€)	0,3 €
Totale	30 €

Il costo industriale totale rappresenta la somma di tutte le spese sostenute per realizzare un componente attraverso il processo di stampa 3D. Questo include il costo del materiale, i costi di progettazione e produzione, i costi di setup della macchina, e i costi del post-processo. Analizzare il costo industriale totale è fondamentale per avere una visione completa dell'investimento necessario per la produzione, considerando sia le risorse materiali che quelle operative. L'obiettivo di questa analisi è stato individuare eventuali aree di ottimizzazione, migliorare l'efficienza produttiva e valutare la competitività della stampa 3D rispetto ad altre tecniche di produzione.

Per i componenti in alluminio AlSi10Mg è stato aggiunto anche il costo dell'argon riportato nella successiva **Tabella 9.10**.

Tabella 9.10: Costo aggiuntivo dovuto al gas inerte per il componente in AlSi10Mg

Argon	
Costo (€/L)	0,005 €
Litri (L)	40000
Costo totale (€)	200 €

10. Conclusioni

Il lavoro di tesi ha avuto l'obiettivo di valutare, in ottica aziendale, le alternative sia dal punto di vista produttivo sia dal punto di vista dei materiali. Le considerazioni che sono emerse, nel principale compito di ottimizzare il parametro interconnesso costo-alleggerimento, sono state soddisfacenti. Dal punto di vista dei costi, il marcato decremento degli stessi è risultato significativo. La differenza di costo tra i due polimeri risulta essere esigua; pertanto, la scelta del support flag tra i due materiali non sarà influenzata da considerazioni di natura economica legate ai costi industriali. La scelta finale del materiale dovrà considerare non solo i risparmi immediati sui costi, ma anche i benefici a lungo termine in termini di prestazioni e sostenibilità. In conclusione, l'analisi evidenzia l'importanza di un approccio integrato che contempli sia l'alleggerimento che la riduzione dei costi, per garantire soluzioni progettuali ottimali nel settore aerospaziale. I dati relativi al peso hanno mostrato un alleggerimento di circa il 116,67% passando dalla lega AlSi10Mg al support flag realizzato in ULTEM™ 9085. La differenza di rugosità passando dal componente in lega AlSi10Mg al componente in ULTEM™ 9085 aumenta circa del 67,76%, tuttavia questo dato non è critico per le specifiche tecniche e può essere migliorato con trattamenti di finitura superficiale.

Questo primo approccio ha avuto il focus principale di proporre al customer Leonardo SpA un'alternativa aziendale sostenibile con un efficientamento del processo aziendale. Il processo di sostituzione con materiali alternativi per il support flag permette di stimare una roadtrip ulteriormente percorribile per complementari ottimizzazioni.

Nell'ambito dei polimeri analizzati, si è scelto di proporre in via definitiva la sostituzione del componente in ULTEM™ 9085 per garantire un margine di sicurezza, poiché la differenza di costo e peso rispetto l'ABS-M30™ risulta trascurabile. La scelta dell'ULTEM™ 9085 è particolarmente significativa, in quanto presenta prestazioni eccellenti in termini di resistenza a trazione e flessione, migliorando così l'affidabilità e la sicurezza complessive del componente.

In aggiunta, valutando una imminente sostituzione è interessante utilizzare questo polimero poiché ha visto un uso regolare nell'industria aerospaziale, risulterebbe quindi in un approccio alle regolamentazioni più rapido e industrializzabile.

Dal punto di vista macrostrutturale la morfologia delle superfici di frattura ha suggerito possibili miglioramenti sia meccanici che produttivi sulla qualità del componente. I parametri di stampa possono essere ulteriormente investigati al fine di gestire meglio l'adesione tra gli strati mediante una fusione più efficace del materiale. La valutazione della velocità di deposizione e la gestione del raffreddamento con regolazione dinamica potrebbe consentire una soldificazione più uniforme con minore formazione di vuoti. In aggiunta, sarebbe interessante valutare al microscopio ottico l'overlapping tra gli strati per considerare la continuità del materiale e il pattern di deposizione migliore per ottimizzare la resistenza del componente. Ad esempio, l'aumento della temperatura dell'ugello potrebbe migliorare l'adesione tra gli strati e ridurre la porosità. In modo sinergico, si suggerisce di ridurre la velocità di deposizione per consentire al materiale di distribuirsi in modo più uniforme e di fondere completamente con lo strato sottostante.

Oltre a modificare i parametri di stampa, nel caso di componenti che necessitano di proprietà meccaniche superiori, si potrebbe considerare l'utilizzo di un polimero rinforzato. Inoltre, data la sua ampia applicabilità, esistono diverse soluzioni per migliorare la bagnabilità e la forza di adesione del polimero ULTEM™ 9085, attraverso trattamenti al plasma, particolarmente utili nel settore aerospaziale.

In conclusione, i risultati ottenuti nel presente lavoro di tesi hanno fornito un quadro generale delle potenziali soluzioni alternative nel contesto aziendale, prestando particolare attenzione alla sostenibilità economica ed ecologica.

BIBLIOGRAFIA

[1] [ATR compie 40 anni | Leonardo](#), 2024.

[2] [Plug door - Wikipedia](#), 2024.

[3] Wang Xiaolu, Wang Danyang, Wu Hao, Yu Jian, Guo Peng, Nie Zhenjin, **Integrated modelling and simulation method of a cargo door actuator**, The Journal of Engineering, 2020.

[4] Byron Blakey-Milner, Paul Gradl , Glen Snedden et al, **Metal additive manufacturing in aerospace: A review**, Materials & Design, 2021.

[5] [8 motivi per cui dovresti produrre in PEEK con la stampa 3D | Roboze](#), 2024.

[6] N. Eswara Prasad, R. J. H. Wanhill, Volume 1: Aerospace Materials, **Aerospace Materials and Material Technologies**, 2017.

[7] Shuang-Shuang Li, Xin Yue, Qing-Yuan Li et al, **Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry**, Journal of Materials and Research Technology, 2023.

[8] Pooja Dwivedi, Arshad Noor Siddiquee, Sachin Maheshwari, **Issues and Requirements for Aluminum Alloys Used in Aircraft Components: State of the Art**, PHYSICAL METALLURGY AND HEAT TREATMENT, 2021.

[9] A. Raja, Srinivasa Rakesh Cheethirala, Pallavi Gupta, Nilesh J. Vasa, R. Jayaganthan, **A review on the fatigue behaviour of AlSi10Mg alloy fabricated using laser powder bed fusion technique**, Journal of Materials Research and Technology, 2022.

[10] Xihe Liu, Congcong Zhao, Xin Zhou, Zhijian Shen, Wei Liu, **Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy**, Materials and Design, 2019.

[11] Lei Hu a , Yang Li Haowei Wang, Qianglong Wei , Zhe Chen, An Wang, Yihao Wang et al, **Microstructure evolution in AlSi10Mg alloy fabricated by laser-based directed energy deposition**, Vacuum, 2024.

[12] Baoxian Wang, Weigang Zhao, Yanliang Du, Guangyuan Zhang, Yong Yang, **Prediction of fatigue stress concentration factor using extreme learning machine**, Computational Materials Science, 2016.

[13] Krystian Zyguła, Bartłomiej Nosek, Hubert Pasiowiec, Norbert Szysiak, **Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique**, World Scientific News, 2018.

[14] Miaoxian Guo, Yi Ye, Xiaohui Jiang, Lianfeng Wang, **Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress of Selective Laser Melted AlSi10Mg**, Journal of Materials Engineering and Performance, 2019.

[15] J. Zoua, Y.Zhua, M. Panb, T. Xiea, X. Chena, H. Yang, **A study on cavitation erosion behavior of AlSi10Mg fabricated by selective laser melting**, Wear, 2016.

- [16] Riccardo Casati, Milad Hamidi Nasab, Maurizio Vedani, **Effects of Platform Pre-Heating and Thermal-Treatment Strategies on Properties of AlSi10Mg Alloy Processed by Selective Laser Melting**, MDPI, 2018.
- [17] S.I. Shakil , A. Hadadzadeh , B. Shalchi Amirkhiz, H. Pirgazi, M. Mohammadi , M. Haghshenas, **Additive manufactured versus cast AlSi10Mg alloy: Microstructure and micromechanics**, Results in Materials Volume 1, 2021.
- [18] Kathy C. Chuang, Joseph E. Grady, Robert D. Draper, **ADDITIVE MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF ULTEM POLYMERS AND COMPOSITES**, The Composites and Advanced Materials Expo, 2015.
- [19] Blanca Boado-Cuartero, Pérez-Álvarez, Elena Roibás-Millán, **Material Characterization of High-Performance Polymers for Additive Manufacturing (AM) in Aerospace Mechanical Design**, Aerospace, 2024.
- [20] Tait D. McLouth, Sara M. Gustafson, Hyun I. Kim, Rafael J. Zaldivar, **Enhancement of FDM ULTEM® 9085 bond strength via atmospheric plasma treatment**, Journal of Manufacturing Processes Volume 66, 2021.
- [21] Matthias Fischer, Volker Schöppner, **Fatigue Behavior of FDM Parts Manufactured with Ultem 9085**, JOMS, 2016.
- [22] Dmitry G. Luchinsky, Halina Hafiychuk, Vasyl Hafiychuk, Kevin R. Wheeler, **Molecular dynamics of ULTEM 9085 for 3D manufacturing: spectra, thermodynamic properties, and shear viscosity**, NASA/TM–2018–220213, 2018.
- [23] Abdul Hai Alami, Abdul Ghani Olabi , Adnan Alashkar, Shamma Alasad, Haya Aljaghoub et al, **Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals**, Ain Shams Engineering Journal, 2023.
- [24] S. K. Selvamani; M. Samykano; S. R. Subramaniam; W. K. Ngui; K. Kadirgama; G. Kanagaraj; M. S. Idris, **3D printing: Overview of ABS evolvement**, Proceedings of the 3rd international conference on automotive innovation green energy vehicle, Volume 2059, 2019.
- [25] Behzad Rankouhi, Sina Javadpour, Fereidoon Delfanian, Todd Letcher, **Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation**, Journal of Failure Analysis and Prevention, Volume 16, 2016.
- [26] Angel Torrado, David A Roberson, Ryan B. Wicker, **Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials**, Journal of Failure Analysis and Prevention, 2014.
- [27] Mohamed Daly, Mostapha Tarfaoui, Manel Chihi, Chokri Bouraoui, **FDM technology and the effect of printing parameters on the tensile strength of ABS parts**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 126, 2023.
- [28] Andrey Yankin, Gaini Serik, Saniya Danenova, Yerassyl Alipov, Ali Temirgali, Didier Talamona, Asma Perveen, **Optimization of Fatigue Performance of FDM ABS and Nylon Printed Parts**, Micromachines (Basel), 2023.

Ringraziamenti

L'unica mia viscerale dedica d'amore va alla mia famiglia,
mi rendete ogni giorno la persona più fortunata del mondo.

Grazie di cuore.