

Politecnico di Milano
Laboratorio di Tecnologie Aerospaziali
AA 2024–2025

Docente:
Grande Antonio Mattia

Gruppo n. 6

Autori:

Cod. Persona	Cognome	Nome
10770622	Avanzi	Alessandro
10770807	Bonetti	Tommaso
10767830	Cantù	Davide Giuseppe
10836470	Cozza	Beck
10807674	De Angelis	Martina
10907638	Deli	Luca
10850145	Di Palermo	Andrea
10847302	Francalanci	Wilson
10811561	Invernizzi	Riccardo
10824452	Marcotullio	Alice
10861940	Marcuzzi	Giovanni
10915271	Munafò	Giuseppe

Data di consegna: 30/05/2025

Indice

1	Introduzione	2
2	Analisi RAMS del processo produttivo	3
2.1	Materiali	3
2.2	Parametri di processo	3
2.3	Collegamento alla Matrice di Rischio	4
3	Qualità dei componenti prodotti	4
3.1	Strumenti utilizzati	4
3.2	Tolleranze dimensionali	4
3.3	Analisi degli Spessori dei Layer	5
3.3.1	Cilindri	5
3.3.2	Barre	6
3.4	Analisi dei difetti	6
3.5	Prove Meccaniche	7
3.6	Analisi Prove Meccaniche dei Provini	7
3.7	Prove di Flessione	8
3.8	Prove di Compressione	8
3.9	Raccomandazioni per la mitigazione	9
4	Discussione e conclusioni	9

1. Introduzione

L'intensificazione dei programmi di esplorazione lunare da parte delle principali agenzie spaziali mondiali porta con sé una serie di sfide ingegneristiche notevoli. In particolare, l'obiettivo di stabilire una presenza umana sulla Luna impone la necessità di trovare nuove soluzioni e tecnologie che possano essere il più possibile sostenibili, specialmente dal punto di vista logistico ed economico. L'attività di laboratorio in oggetto si inserisce proprio in questo contesto: lo sviluppo e la realizzazione di componenti di diverse tipologie direttamente sulla superficie lunare, sfruttando i materiali a disposizione. Nella pratica è stato sfruttato il processo denominato Digital Light Processing (DLP) - printing impiegando due stampanti, ELEGOO Mars 4 DLP e Phrozen Sonic 8K mini; come materiale invece è stato utilizzato un simulante della regolite lunare, opportunamente miscelato con della resina indurente ai raggi UV. Lo scopo dell'attività è stato dunque l'analisi del processo produttivo di un componente realizzato con questa tecnologia, dalla preparazione CAD fino alle analisi di qualità e ai test meccanici, ponendo particolare attenzione alle variabili determinanti per la realizzazione ottimale del pezzo finito. Nello specifico, quest'ultima si è strutturata come segue (tra parentesi i software e le metodologie impiegate):

1. Disegno del componente con programmi CAD specifici per l'additive manufacturing (Autodesk Fusion)
2. *Slicing* del modello (Voxeldance tango, Chitubox)
3. Analisi delle parti stampate (microscopio ottico ed elettronico, misurazioni manuali)
4. Analisi delle parti sinterizzate (test meccanici, misure geometriche)

Le dimostrazioni pratiche appena citate sono state intervallate da un'attività di analisi da parte del gruppo riguardante le peculiarità del processo produttivo, i materiali, i parametri di processo valutati come critici e la qualità del componente realizzato. In ogni fase del progetto vi è stato un costante scambio tra i membri del gruppo, con una distribuzione equilibrata dei compiti e una successiva verifica dei contenuti, assicurandosi che ciascuno avesse compreso appieno il lavoro svolto. Anche la realizzazione della relazione e dell'esposizione si è svolta allo stesso modo, con un confronto costante tra i vari membri del gruppo e frequenti sessioni di revisione dell'elaborato nel suo complesso.

2. Analisi RAMS del processo produttivo

Il processo produttivo è basato sulla progettazione CAD e sulla stampa 3D del pezzo. A livello di analisi RAMS, le caratteristiche ritenute maggiormente significative sono state i parametri di stampa e il materiale utilizzato. In seguito è presentata un'analisi di alcune di queste, giudicate più critiche.

2.1. Materiali

La regolite è lo strato più esterno della roccia lunare, ridotta in polvere nel corso di miliardi di anni da impatti con meteoriti e da erosioni da parte del vento solare.

Ai fini di questo studio è stata utilizzata una polvere (LHS-1 Highlands Simulant) che simula fedelmente la composizione chimica e le caratteristiche della regolite che si trova sugli altopiani lunari.

Il simulante contiene grani (anortite 74.4%, basalto 24.7%, ilmenite 0.4%) di dimensione variabile tra i 0.04 e i 1000 μm [1]; la regolite reale, invece, è caratterizzata da particelle di dimensione inferiore ai 5 μm ed alta uniformità.

La tipologia di simulante utilizzata e la relativa composizione chimica è molto importante, in quanto può influire notevolmente su parametri quali la capacità di penetrazione da parte dei raggi UV e la formazione di cricche in fase di sinterizzazione.

Per quanto riguarda la resina, sono state utilizzate la Phenylbis(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine oxide e la Trimethylolpropane ethoxylate triacrylate, rispettivamente necessarie ad iniziare la reazione di polimerizzazione sotto luce UV e a conferire rigidità, velocità di reticolazione e resistenza meccanica al materiale finito.

Il fluido ottenuto dalla miscelazione di simulante e resina, con percentuale in peso del primo pari al 70% in questo caso di studio, è non-newtoniano.

2.2. Parametri di processo

Si è reso necessario identificare alcuni parametri di stampa che influenzano maggiormente la qualità dei pezzi finali.

Sebbene molti dei difetti, come le cricche verticali, si generino in seguito al processo di sinterizzazione, l'analisi si concentra prevalentemente sui difetti di stampa. Pertanto, tutta la trattazione statistica riguardante la frequenza dei difetti provocati dai parametri di stampa è stata effettuata sul pezzo non sinterizzato.

Tramite la legge di Pareto sono stati dunque selezionati tre parametri critici, responsabili dell'80% dei difetti ritenuti significativi sul pezzo *green*, di cui segue la trattazione.

TEMPO DI ESPOSIZIONE

Consiste nel tempo per il quale la stampante 3D espone la resina alla luce UV al fine di polimerizzare un singolo strato. Nel caso in esame è stato impostato a 15 s.

Una corretta polimerizzazione riduce al minimo le stampe fallite a causa di sottoesposizione o sovraesposizione. La sottoesposizione provoca bassa adesione, perdita di dettagli, supporti fragili e dimensioni inferiori. Se il tempo di esposizione è troppo breve, infatti, gli strati non aderiranno correttamente tra loro, aumentando la probabilità di rotture durante il processo di stampa [2]. D'altra parte, la sovraesposizione provoca difficile rimozione dal piatto, gonfiore nei dettagli e supporti

tropppo spessi.

Per il calcolo della frequenza d'errore associata al tempo di esposizione sono state sfruttate le immagini ottenute al microscopio ottico (vedi [Sezione 2.3](#)). È stata quindi ricavata un'informazione sulla frequenza del difetto associato al tempo di esposizione, che si è potuta sfruttare nell'analisi RAMS. Il valore totale di frequenza di errore ottenuto è stato di 0.021059 ([link calcolo della frequenza](#)).

Poichè gli stessi tipi di difetti possono essere causati da errori riguardanti anche il parametro *lifting speed* e per assenza di sufficienti campioni statistici in cui si potessero isolare i contributi di ogni parametro, si è deciso di distribuire l'errore uniformemente tra questi due parametri, associando a ciascuno il 50% della frequenza ricavata. Si è associato quindi alla frequenza di fallimento del tempo di esposizione un valore di 0.0105295, corrispondente ad una frequenza di 10^{-2} .

LIFTING SPEED

La lifting speed, ovvero la velocità di sollevamento del piatto, è importante perché influenza l'entità della peeling force, ovvero la forza di distacco agente tra il FEP e lo strato appena solidificato.

Se tale forza dovesse raggiungere valori elevati, infatti, si rischierebbero danni importanti al pezzo in fase di stampa e/o alla stampante stessa. Inoltre, il materiale utilizzato richiede di prestare ulteriore attenzione alla lifting speed, dal momento che la miscela di resina e regolite è un fluido non-newtoniano. Di conseguenza è necessario che la lifting speed non sia eccessivamente alta. Se ciò dovesse accadere, infatti, potrebbero verificarsi: rotture o distacchi del layer appena solidificato, deformazione degli strati (warping, layer shifting, microfessure), bolle d'aria o vuoti tra gli strati, usura del FEP e/o del vat. D'altra parte, una lifting speed troppo bassa rischia di aumentare considerevolmente i tempi di stampa, portando a possibili surriscaldamenti della macchina.

La probabilità che si generino errori dovuti alla lifting speed è stata calcolata analogamente al tempo di esposizione. Si associa quindi alla *frequenza* di fallimento della lifting speed un valore di 0.0105295, corrispondente ad una frequenza di 10^{-2} .

Il valore di lifting speed che è stato impostato nel caso in esame è di 80 mm/min .

La severità dei due parametri precedentemente descritti, calcolata tramite una funzione di severità nella [Sezione 3.6](#), risulta del 40,72%.

LAYER HEIGHT

La layer height, ovvero l'altezza del singolo strato di resina, incide su qualità, dettagli e velocità di stampa. Strati più sottili garantiscono maggiore definizione aumentando i tempi di stampa, mentre quelli più spessi velocizzano il processo a scapito del dettaglio e della visibilità delle linee tra gli strati. Per migliorare l'adesione al piano di stampa, è consigliabile iniziare con uno strato più spesso. È inoltre importante che le dimensioni del pezzo siano compatibili con lo spessore degli strati, verificando che il margine d'errore rientri nella tolleranza prevista per l'utilizzo finale. Anche le formulazioni delle resine sono ottimizzate in base all'altezza dello strato: un eccesso di pigmento può ostacolare la polimerizzazione, causando la separazione degli strati e compromettendo la stabilità del pezzo. Scegliere il giusto spessore significa dunque bilanciare velocità, dettaglio e limiti tecnici della

stampante e resina. Le problematiche legate alla layer height si dividono in due categorie: strati troppo spessi causano bassa risoluzione e debole adesione, compromettendo qualità e resistenza; strati troppo sottili aumentano i tempi di stampa e possono provocare iper-polimerizzazione locale, senza danni significativi. Tuttavia, l'errore complessivo per layer si deve a due contributi principali, quello di quantizzazione e quello delle tolleranze meccaniche.

Quantizzazione: passi discreti di 10 µm sulla Phrozen Sonic 8K mini [3] e di 20 µm sulla ELEGOO Mars 4 [4]. Nel caso in analisi: per le barre avendo impostato una layer height di 40µm, multiplo esatto del passo hardware di entrambe le stampanti, l'errore di arrotondamento sarà nullo; per i cilindri, stampati con la ELEGOO Mars 4, il layer height è stato impostato a 50 µm, con conseguente errore di arrotondamento.

Tolleranze meccaniche: gioco negli accoppiamenti, flessibilità delle parti e compressione del film FEP introducono ulteriori ±5 µm, in modo casuale.

Per la caratterizzazione dell'analisi RAMS sono state calcolate la *frequenza di errore* e la *severità* (vedi [Sezione 3.3](#)).

La frequenza è risultata simile sia per cilindri (pari a 6,8 %) che per le barre (3,4 %), nonostante le numerose differenze tra i due provini (layer height, infill, forma).

Per quanto riguarda la *severità*, si è riscontrata una forte differenza tra cilindri ($\bar{S} = 25.72\%$) e barre ($\bar{S} = 9.44\%$), dovuta principalmente allo spessore nominale dei layer rispetto al passo di stampa della ELEGOO Mars 4 (20 µm). Per le barre (40 µm) dato che lo spessore è multiplo del passo, l'errore deriva principalmente da tolleranze meccaniche, mentre per i cilindri (50 µm, non multiplo del passo), si somma anche un errore sistematico di arrotondamento, aumentando significativamente la severità misurata.

2.3. Collegamento alla Matrice di Rischio

I parametri critici **exposure time**, **lifting speed** e **layer height** influenzano la formazione di cricche e di difetti di stampa.

La *severity* (calcolata per i primi due parametri in colonna S della Tabella 4a) misura l'effetto di tali difetti sulle proprietà elastiche del materiale e si colloca nella categoria di Severità Marginale (2).

Per la **layer height**, al fine di garantire un'analisi di rischio conservativa, abbiamo adottato la severità maggiore tra le due calcolate in [Sezione 3.3](#) (25.72 % nei cilindri) come valore di gravità: in tal modo la valutazione riflette il caso operativo peggiore e indirizza le contromisure sulle condizioni a più alto impatto.

La *frequenza* per **exposure time** e **lifting speed**, stimata misurando l'area dei difetti individuabili nelle foto (cricche e punti di distacco) dividendo per l'area utile (ottenuta sottraendo l'area delle zone in ombra dall'area di acquisizione dell'immagine SEM, al fine di ottenere una migliore precisione, [link calcolo della frequenza](#)), misura la probabilità di insorgenza del difetto e si colloca per ognuno dei 2 parametri nella categoria Frequenti (A).

Anche per la **layer height**, la frequenza di 6.8 % si colloca nel livello di Probabilità Frequenti (A).

Inserendo in ascissa la *probabilità* di insorgenza e in ordinata la *severity S*, otteniamo per ciascun parametro critico un punto nella matrice di rischio mostrata in [Figura 1](#), nel nostro caso tutti i parametri si collocano nella cella 2A.

LIVELLO DI PROBABILITÀ	CATEGORIE DI SEVERITÀ DELLE CONSEGUENZE			
	CATASTROFICO	CRITICO	MARGINALE	INSIGNIFICANTE
Frequent A	4A	3A	2A	1A
Probabile B	4B	3B	2B	1B
Occasional C	4C	3C	2C	1C
Remoto D	4D	3D	2D	1D
Improbabile E	4E	3E	2E	1E
Incredibile F	4F	3F	2F	1F

Figura 1: Matrice di Rischio

3. Qualità dei componenti prodotti

L'analisi della qualità è stata condotta utilizzando un microscopio ottico (senza camera ambientale), un microscopio elettronico a scansione (SEM) e delle prove meccaniche. L'attenzione è rivolta in particolare all'influenza dei parametri di processo sulla formazione di difetti, imperfezioni dimensionali e irregolarità nella granulometria. Dopo aver individuato i difetti principali, l'analisi si concentra sull'identificazione dei possibili fattori mitiganti, al fine di migliorare le proprietà dei pezzi prodotti.

3.1. Strumenti utilizzati

MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE

Il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) è stato impiegato per l'analisi micromecanica dei campioni, consentendo ingrandimenti fino a $4000\times$ grazie all'utilizzo di un fascio di elettroni. Poiché questo tipo di fascio richiede che il campione sia elettricamente conduttivo, i provini sono stati rivestiti con uno strato sottile di oro mediante Sputter Coater in atmosfera di argon. Questo trattamento garantisce la necessaria condutività superficiale, prevenendo l'accumulo di cariche durante l'osservazione e migliorando la qualità delle immagini ottenute. Inoltre, il rivestimento conferisce alla superficie una maggiore riflettività, permettendo una visualizzazione nitida degli strati del materiale e facilitando l'individuazione di fratture o irregolarità interne.

MICROSCOPIO OTTICO

Per l'analisi dei cilindri a giroidi è stato utilizzato un microscopio ottico, ossia uno strumento il cui funzionamento si basa sull'impiego della luce visibile e di un sistema di lenti per ingrandire l'immagine di un campione. L'uso delle due sorgenti luminose ha permesso di variare l'illuminazione, evidenziando caratteristiche diverse dei provini, consentendo un'osservazione più dettagliata dei difetti di linea e dello spessore dei strati.

MACCHINA PER PROVE MECCANICHE

Per determinare le proprietà meccaniche dei materiali si sono effettuate delle prove standardizzate in compressione e flessione per mezzo delle macchine UTM (Universal Testing Machine), note anche come macchine di prova universali. Nel nostro caso è stata impiegata una macchina di tipo idraulico (MTS 858 Mini Bionix II). Un sistema elettronico di controllo acquisisce e gestisce i dati in tempo reale, visualizzando forza, spostamento e tempo, e generando curve di risposta meccanica del materiale.

3.2. Tolleranze dimensionali

In primo luogo è stata effettuata la misurazione delle dimensioni della parte non ancora sinterizzata utilizzando un

calibro digitale. Allo stesso modo, successivamente, sono state rilevate le dimensioni delle parti sottoposte a sinterizzazione, di cui sono stati calcolati, con un intervallo di confidenza al 95%, i valori medi delle diverse grandezze, ottenendo i seguenti risultati:

Sample	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
4.1	33.46	4.69	2.27
4.2	33.52	4.60	2.35
4.3	33.39	4.60	2.24
IC 95%	33.4567 ± 0.1615	4.630 ± 0.1291	2.2867 ± 0.1445
Green	40.15	5.48	2.71

Tabella 1: Dimensioni delle barrette

Sample	Height (mm)	Diameter (mm)	Base Ø(mm)
P1	12.81	6.89	7.22
P2	12.68	6.96	7.25
P3	12.75	6.87	7.22
IC 95%	12.7467 ± 0.1624	6.9067 ± 0.1578	7.23 ± 0.043
Green	15.48	8.21	8.52

Tabella 2: Dimensioni dei cilindri

Confrontando le dimensioni impostate al CAD in fase di progettazione con quelle ottenute in seguito al processo di stampa, è stato rilevato un errore per la barretta di circa il 10% su larghezza e altezza e di circa lo 0.4% sulla lunghezza, mentre per il cilindro è stato calcolato un errore del 3% circa su altezza e diametro.

Comparando invece le dimensioni delle parti sinterizzate rispetto alla "green part" si riscontra nelle barrette una riduzione dell'ordine del 17% della lunghezza e del 15% di larghezza e altezza, mentre nei cilindri una riduzione del 17% dell'altezza e del 16% del diametro, in accordo con i risultati attesi. Nel caso dei cilindri inoltre, a causa dell'effetto "zampa di elefante", è stato misurato un aumento del diametro di base del 3.8% nella "green part" e del 4.7% circa nelle parti sinterizzate.

3.3. Analisi degli Spessori dei Layer

3.3.1 Cilindri

Per caratterizzare la qualità di stampa dei provini, è stata effettuata un'analisi dettagliata degli spessori dei singoli layer dei cilindri, utilizzando immagini ottenute al microscopio ottico. Le immagini acquisite sono state elaborate tramite il software Fiji, applicando l'algoritmo CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) al fine di aumentare il contrasto locale e mettere maggiormente in risalto la definizione dei singoli layer, come mostrato in [Figura 2](#).

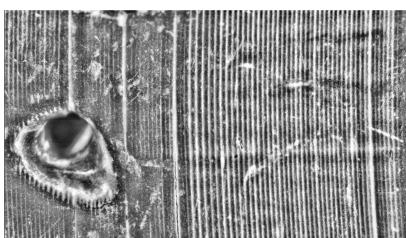


Figura 2: Immagine elaborata tramite CLAHE (cilindro al microscopio ottico).

Metodo e Strumenti

Il software Fiji, da cui abbiamo estratto le immagini, consente l'estrazione automatica dei profili d'intensità delle foto.

Questo procedimento genera file CSV contenenti le informazioni sulla distanza (in mm) e l'intensità luminosa corrispondente (scala di grigi).

Successivamente, i file CSV esportati sono stati importati in MATLAB® ed analizzati tramite uno script personalizzato (vedi Appendice [5]), che individua automaticamente i picchi di intensità corrispondenti ai singoli layer, applica dei filtri di intensità e distanza per selezionare solo i picchi significativi ([Figura 3](#)) e calcola la distanza tra i picchi successivi (che corrisponde allo spessore del layer).

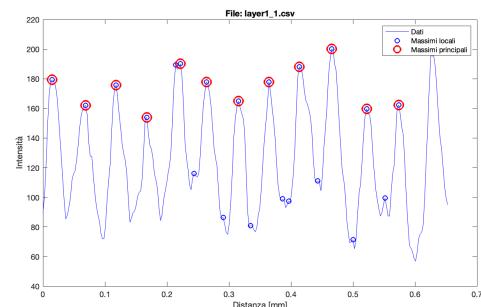


Figura 3: Individuazione dei picchi principali.

I risultati dell'analisi MATLAB® sono stati poi esportati in formato CSV per l'analisi statistica degli spessori rilevati (svolta in RStudio®), la quale ha prodotto i seguenti risultati:

Numero iniziale di misure	$N =$	139
Osservazioni dopo IQR	$N =$	133
Media campionaria	$\bar{X} =$	50.21 μm
Deviazione standard	$\sigma =$	5.20 μm
Errore massimo riscontrato	$e_{\max} =$	14.04 μm

È stato eseguito anche un test statistico (t-test a un campione) per verificare se la media campionaria fosse significativamente diversa dal valore nominale di 50 μm .

Il test ha evidenziato un p-value di 0.6494, indicando quindi che la media campionaria (intervallo di confidenza 95%: 49.31 μm – 51.10 μm) non risulta significativamente differente dal valore nominale, confermando quindi che il processo di stampa è mediamente allineato al target di 50 μm .

I risultati dell'analisi sono stati visualizzati attraverso una carta di controllo degli spessori dei layer ([Figura 4](#)), che mostra chiaramente la variabilità intorno al valore nominale.

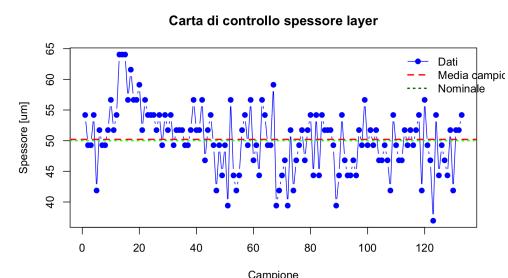


Figura 4: Carta di controllo layer dei cilindri.

In conclusione, la metodologia adottata ha permesso una caratterizzazione approfondita degli spessori dei layer stampati, evidenziando una buona coerenza con il valore nominale e una variabilità moderata ($\sigma = 5.2 \mu\text{m}$). Il processo risulta dunque capace e in controllo.

Calcolo della Frequenza e Severità di Difetto

Per valutare la probabilità di insorgenza del difetto di layer height, abbiamo definito un criterio di non conformità basato sulla perdita di qualità rispetto al valore nominale e rispetto a una tolleranza, calcolata a partire dalla deviazione standard σ degli spessori come $\pm 2\sigma$, in accordo con il *two-sigma rule*, che assicura la copertura di circa il 95 % delle osservazioni in un contesto di variabilità gaussiana. Sia $e_i = |X_i - X_{\text{nom}}|$ l'errore assoluto rispetto allo spessore nominale $X_{\text{nom}} = 50 \mu\text{m}$. Definiamo difettoso un layer con $e_i > 2\sigma$.

La frequenza di difetto è stata calcolata come:

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{1}_{\{e_i > 2\sigma\}}$$

Nel nostro caso il risultato ottenuto è stato:

Tolleranza = $\pm 10.41 \mu\text{m}$ (2σ)

Frequenza di difetto: 6.8% (9/133)

di cui per pezzi sovradimensionati: 3.0 % (4/133)

di cui per pezzi sottodimensionati: 3.8 % (5/133)

Per quantificare la gravità del difetto di layer height, abbiamo definito la severità percentuale di ciascun layer come

$$S_i = 100\% \frac{|X_i - X_{\text{nom}}|}{X_{\text{nom}}} \text{ dove } X_{\text{nom}} = 50 \mu\text{m}.$$

La severità media ottenuta è risultata pari a $\bar{S} = 25.72 \%$.

3.3.2 Barre

Per integrare l'analisi automatica, è stata condotta una misurazione manuale degli spessori dei layer delle barre dalle immagini acquisite dal SEM, utilizzando il software Fiji.

Le 58 altezze di layer così ottenute sono state sottoposte allo stesso workflow statistico già descritto (rimozione outlier, t-test, carta di controllo, calcolo della frequenza di errore).

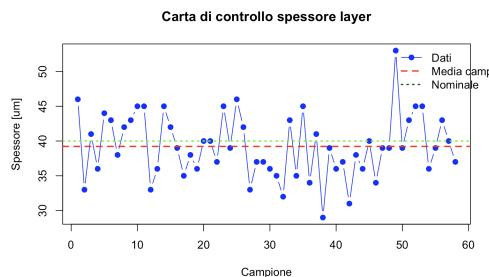


Figura 5: Carta di controllo layer delle barre.

I risultati statistici del campione sono sintetizzati qui di seguito:

Media campionaria	\bar{X}	=	39.22	μm
Deviazione standard	σ	=	4.57	μm
Intervallo di confidenza al 99%	$IC_{99\%}$	=	[37.62, 40.82]	μm
t-test a un campione (p-value)	p	=	0.2016	

Per la valutazione della non-conformità abbiamo adottato, come in [Sezione 3.3.1](#), una tolleranza pari a $\pm 2\sigma = \pm 9.15 \mu\text{m}$.

In questo caso, i risultati ottenuti sulla frequenza di difetto:

Frequenza di difetto: 3.4% (2/58)

di cui per pezzi sovradimensionati: 1.7 % (1/58)

di cui per pezzi sottodimensionati: 1.7 % (1/58)

La severità media, definita come per i cilindri, è risultata pari a $\bar{S} = 9.44 \%$, evidenziando una forte differenza con i cilindri, spiegata in [Sezione 2.2: Layer Height](#).

3.4. Analisi dei difetti

L'analisi dei difetti è stata effettuata al SEM per le barrette e al microscopio ottico per i cilindri a giroidi. Al microscopio ottico sono state rilevate delle cricche evidenti sia in direzione dei layer che in direzione trasversale ([Figura 7a](#)). Certamente lo spessore consistente del layer (50 μm) causa dei difetti di stampa [2] [6]. In aggiunta, la ridotta presenza di fori nella struttura giroscopica (piena al 70%), facilita la propagazione delle cricche, poiché viene a mancare l'azione di crack deflection [7] operata dai fori.

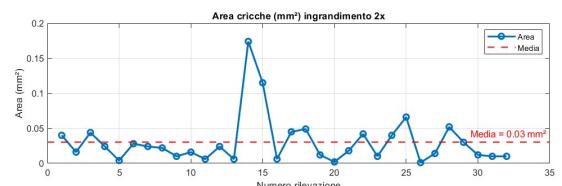


Figura 6: Carta di controllo area cricche (green)

Si nota infatti, che rispetto ad altri gruppi di lavoro che operavano con strutture giroscopiche meno dense, la difettologia associata è drasticamente aumentata. L'assenza di spazio libero nella struttura causa difficoltà anche durante il processo di debinding e sinterizzazione.

L'alta concentrazione di materiale contribuisce ad ostacolare la dissipazione dei gas di scarico (H_2O e CO_2) prodotti durante il debinding [8]. Il debinding è stato effettuato a 600 °C per 2 ore. La sinterizzazione è stata effettuata a 1250 °C per 4 ore, in aria, con velocità di riscaldamento di 1 °C/min. Pertanto, localmente, pressione e temperatura aumentano notevolmente, causando la nascita di cricche evidenti, attraverso cui avviene la dissipazione dei gas. Tale problema può essere parzialmente controllato riducendo la velocità di riscaldamento del materiale. Per effetto della sinterizzazione notiamo come i difetti si ripetano seguendo un pattern. Le cricche partono dai fori e si propagano fino all'esterno.

Analizzando i difetti associati ai fori notiamo crepe di entità evidente dovuti agli effetti di sinterizzazione. Nelle immagini del cilindro non sinterizzato notiamo infatti una minor presenza di cricche. La temperatura di sinterizzazione è fondamentale per la qualità del componente. Imperfezioni minori nella parte non sinterizzata possono infatti espandersi nel processo di sinterizzazione per effetti di carichi opposti (di trazione e compressione) tra due difetti vicini. [9]

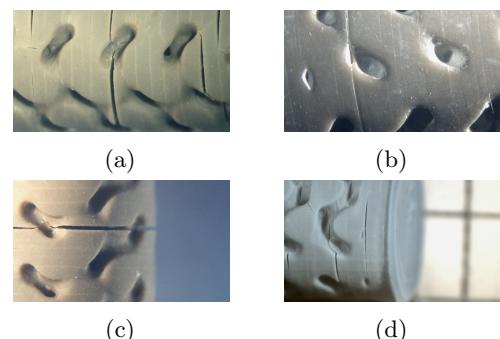


Figura 7: (1.1×) (a) sint, crepe. (b) green, altezza layer. (c) sint, compattazione layer. (d) zampa di elefante.

Si nota, inoltre, un difetto sulla base del cilindro, il primo strato ad essere stato stampato, detto di zampa di elefante ([Figura 7d](#)), dovuto ad eccessivo tempo di esposizione dello

strato di base. Grazie a misure effettuate con il calibro, si apprezza un aumento del diametro tra il corpo del pezzo e la base (vedi Tabella 2).

Al SEM sono stati rilevati difetti nella struttura del campione, come ad esempio scheggiature, crepe o incrostazioni. Inoltre è stato possibile osservare la struttura granulometrica della parte. In particolare si è notato come le particelle di resina più grandi possano provocare la nascita di difetti di linea, come cricche e irregolarità. Nello specifico abbiamo rilevato come in media le particelle di resina abbiano un diametro di $47.93 \mu\text{m}$, pur essendo presenti anche delle particelle di diametro drasticamente maggiore (fino a $82 \mu\text{m}$) che disturbano la struttura polimerica. È stato quindi possibile sviluppare delle carte di controllo per l'area e la lunghezza dei grani.

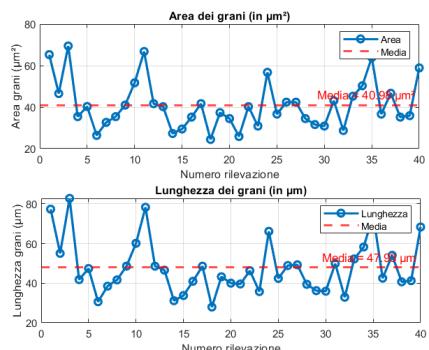


Figura 8: Carta controllo area e diametro dei grani

Questi tipi di difetti (Figura 8) sono dovuti a variabili casuali legate ai materiali. Le cricche da essi generati si propagano ulteriormente una volta sinterizzato il pezzo.

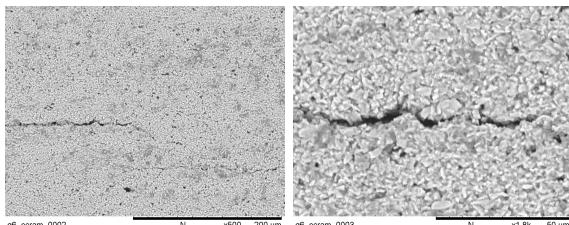


Figura 9: Ingrandimenti SEM della stessa frattura, 500x a sinistra, 1800x a destra

Le due immagini sopra riportate (Figura 9) mostrano, sotto due livelli di ingrandimento diversi, una frattura generatasi durante la fase di sinterizzazione del pezzo.

E' stato inoltre possibile confrontare il pezzo *green* con quello sinterizzato per apprezzare la differenza nella struttura granulometrica (Figura 10).

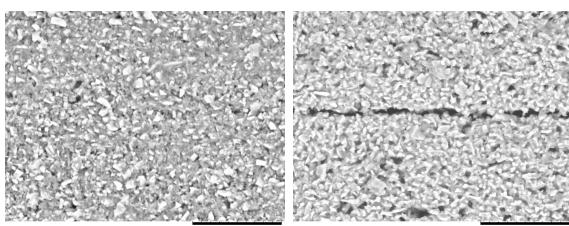


Figura 10: Differenza granulometria tra parte green (2000x) a sinistra e parte ceramica (2000x) a destra

Infatti nel pezzo non sinterizzato è ben evidente la matrice polimerica, più scura, in netto contrasto con le particelle ceramiche, bianche. Nei campioni sinterizzati, invece, la struttura granulometrica appare più omogenea per l'assenza di

resina. Come ipotizzato, i difetti presenti nel pezzo *green* si riscontrano, in forma accentuata, anche nel pezzo sinterizzato.

3.5. Prove Meccaniche

Le prove meccaniche, eseguite in laboratorio, hanno permesso di studiare la resistenza e il comportamento dei pezzi sotto i carichi applicati. In particolare sono stati sottoposti la barra a una prova in flessione e il cilindro a compressione.

Prima di eseguire le prove, si è prestata particolare attenzione al corretto posizionamento dei campioni nella macchina di prova poiché un errato allineamento del pezzo può causare una distribuzione non uniforme delle sollecitazioni, con conseguente compromissione dei risultati. Ad esempio nella prova di flessione, la barra deve poggiare correttamente sugli appoggi e il carico centrale deve essere applicato esattamente nel punto previsto. Per effettuare la prova è stato mantenuta una distanza fissa tra gli appoggi di $23,5 \text{ mm}$ per tutti i provini. Successivamente, è stata effettuata la taratura della macchina di prova, necessaria per garantire l'accuratezza dei dati rilevati. Ciò ha incluso l'azzeramento del sistema di misura, la verifica del corretto allineamento del campione e l'impostazione dei parametri di prova come la velocità di applicazione del carico. Una volta completata la fase di set-up, si è proceduto con le misurazioni. Come si vedrà dai dati ottenuti, avere un infill del cilindro del 70% ha reso il componente più resistente a compressione rispetto a un pezzo equivalente ma con infill del 60% o minore, nonostante i difetti strutturali riportati dal cilindro in fase di fabbricazione.

Le prove sono state effettuate su 3 campioni per ogni componente.

Risulta che per i cilindri, si arriva a rottura dopo circa 105s mentre per le barre dopo 27s.

Da notare che i calcoli effettuati per il cilindro tengono chiaramente conto dell'infll e dunque di un'area di applicazione dello sforzo pari al 70%.

3.6. Analisi Prove Meccaniche dei Provini

In questa sezione riportiamo i risultati delle prove di flessione e compressione condotte sui campioni, nonché il calcolo dei moduli elastici, delle resistenze ultime e della severità dovuta alla presenza di cricche. Il codice MATLAB® che abbiamo sviluppato (riportato in Appendice [10]) per ogni prova effettuata permette di:

1. convertire F-D in $\sigma-\epsilon$
2. selezionare manualmente la regione lineare del diagramma sforzo-deformazione;
3. distinguere, nel caso delle prove di compressione, la fase iniziale di compattazione delle cricche da quella propriamente elastica;
4. interpolare la fase lineare, calcolarne la pendenza come modulo elastico E e calcolare le statistiche descrittive;
5. per la compressione, stimare la *severity* delle cricche, definita come

$$S(\%) = 100 \left(1 - \frac{E_{\text{compattaz}}}{E_{\text{elastico}}} \right) \quad (1)$$

ossia la percentuale di perdita di rigidezza risultante dal confronto tra il modulo iniziale (contributo della chiusura delle microcricche, fase di assestamento) e il modulo lineare "puro", inteso come in assenza di cricche, precedentemente compattate.

3.7. Prove di Flessione

Per ciascuno dei tre provini abbiamo eseguito i seguenti passi:

- conversione dati in $\sigma-\varepsilon$ tramite le formule

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad \varepsilon = \frac{6Dh}{L^2},$$

dove L è lo span del supporto della macchina di prova, F e D sono forza e spostamento misurati e b , h sono le dimensioni geometriche del provino (Tabella 1);

- selezione manuale dei valori $\varepsilon_{\text{start}}$ e ε_{end} che delimitano la zona lineare (vedi Figura 11);
- interpolazione della retta $\sigma = E\varepsilon$;
- calcolo del Modulo di Young E e della resistenza a flessione R_f ;
- calcolo di statistiche descrittive su E e R_f .

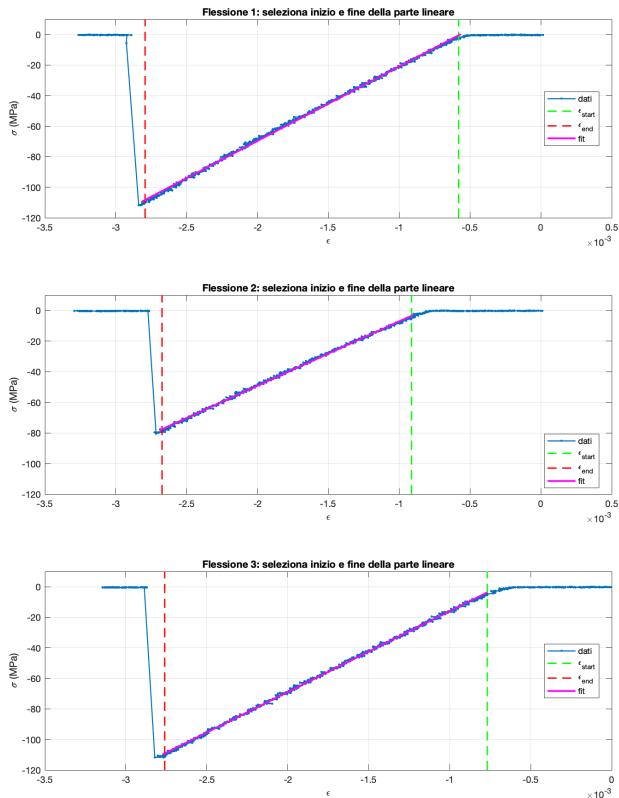


Figura 11: Selezione della regione lineare e interpolazione per il calcolo del modulo elastico in flessione. Le linee tratteggiate verde e rosso indicano rispettivamente $\varepsilon_{\text{start}}$ e ε_{end} .

Provino	E [GPa]
1	48.74
2	42.12
3	53.02
Media	47.96
Dev. std.	4.48
CV (%)	9.3

(a) Moduli elastici

Provino	R_f [MPa]
1	111.88
2	80.55
3	111.85
Media	101.43
Dev. std.	14.76
CV (%)	14.6

(b) Resistenze ultime

Tabella 3: Moduli elastici e resistenze ultime in flessione e relative statistiche.

3.8. Prove di Compressione

Nel caso dei cilindri compressi, il diagramma $\sigma-\varepsilon$ presenta:

- una *fase di compattazione* iniziale (dove le cricche vengono compattate);
- la fase elastica da cui si ricava E_{elastico} ;
- la fase non lineare con conseguente carico di collasso $R_c = \sigma_{\text{max}}$.

Una volta definito manualmente l'inizio e la fine del tratto lineare, nota la presenza di un tratto di assestamento, il codice MATLAB® [10] per ogni prova:

- effettua due fit lineari separati ($E_{\text{compattaz}}$ e E_{elastico});
- calcola la *Severity* (Eq1) e la resistenza a compressione R_c ;
- determina le statistiche su E_{elastico} , S e R_c .

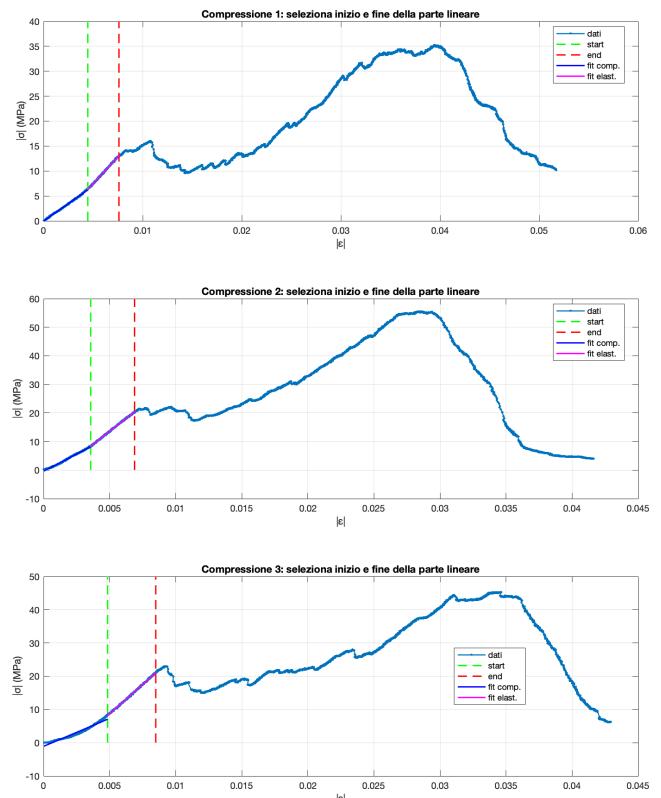


Figura 12: Selezione delle due fasi (compattazione e lineare) nelle prove di compressione. Il fit blu evidenzia la compattazione iniziale; il fit magenta l'elasticità vera e propria.

Provino	E [GPa]	S [%]
1	2.14	34.6
2	3.62	33.7
3	3.53	52.3
Media	3.10	40.72
Dev. std.	0.68	8.5
CV (%)	21.8	21.2

(a) Moduli elastici e Severity

Provino	R_c [MPa]
1	35.26
2	55.57
3	45.3
Media	45.38
Dev. std.	8.29
CV (%)	18.3

(b) Resistenze ultime

Tabella 4: Moduli elastici, Severity e resistenze ultime a compressione e relative statistiche.

3.9. Raccomandazioni per la mitigazione

Si osserva che la layer height è senza dubbio uno dei parametri che, per la legge di Pareto, influenza maggiormente la qualità del prodotto finale [9]. Un'altezza del layer di $50 \mu m$ non consente una corretta foto-polimerizzazione degli strati, il che si traduce in una scarsa finitura dei pezzi.

La regolarità e le dimensioni dei grani del simulante oltre alla loro composizione in termini, soprattutto, di anortite e basalto, sono estremamente rilevanti per la capacità di assorbimento dei raggi UV da parte della miscela resina-simulante. Per lo stesso motivo, un utilizzo della parte non magnetica della polvere è consigliabile.

Gli accorgimenti da implementare per ottenere una stampa di qualità maggiore possono quindi essere:

- ottimizzare l'exposure time per migliorare l'adesione intralayer
- diminuire la lifting speed
- effettuare un post-curing termico maggiormente controllato, con rampe lente per attenuare gli shock termici
- impostare una layer height che sia un multiplo esatto del passo minimo dell'asse z della stampante, per evitare errori sistematici dovuti ad approssimazioni meccaniche e migliorare la precisione stratigrafica del processo di stampa.
- utilizzo di stampanti più performanti, soprattutto per quanto riguarda la potenza della sorgente UV e la possibilità di regorarla in funzione della tipologia di composto utilizzato
- ottimizzare la percentuale di infill nella progettazione dei cilindri, raggiungendo un compromesso tra proprietà meccaniche e rischio di propagazione dei difetti

4. Discussione e conclusioni

L'analisi RAMS dei componenti, sfruttando la legge di Pareto, si è concentrata su tre parametri di stampa: exposure time (15 s), lifting speed (80 mm/min) e layer height (40 μm barre, 50 μm cilindri).

Un altro parametro potenzialmente critico è il rest time before lift che ha un'influenza significativa in particolare sui tempi di produzione. Nei processi industriali esso ha, in genere, un valore compreso tra 0.5s e 1.5s; se non correttamente impostato, può essere ritenuto responsabile degli stessi difetti associati ad exposure time e lifting speed. Nel caso in analisi, tale parametro non è stato considerato critico, perché il valore impostato è particolarmente elevato (7s). Pertanto, la probabilità che esso sia causa dei difetti riscontrati si è ridotta ad un livello trascurabile.

Nell'analisi è stato constatato che i difetti di stampa più significativi sono le cricche intra-layer, con un'area media di $0.03 \mu m^2$.

Per quanto concerne le tolleranze dimensionali, le misurazioni manuali hanno evidenziato errori accettabili (ordine del 5%) tra il pezzo progettato in CAD e quello realizzato. L'analisi statistica della layer height, sia per i cilindri che per le barre,

ha confermato che i processi sono sotto controllo e presentano un'adeguata capacità. È stato però evidenziato un livello di severità associato ai cilindri (25.72%) molto più alto rispetto a quello delle barre (9.44%), per effetto dell'errore di quantizzazione associato alle stampanti utilizzate.

Dal punto di vista meccanico, per i cilindri sottoposti a compressione sono stati calcolati: un modulo elastico medio di $3.10 GPa$, una resistenza ultima media di $45.38 MPa$ e una deformazione del 3.4%. Per le barre sottoposte a flessione sono stati calcolati: un modulo elastico medio di $47.96 GPa$, una resistenza ultima media di $101.43 MPa$ e una deformazione dello 0.133%.

A seguito dei vari test, si è giunti alla conclusione che:

- tempo di esposizione e lifting speed sono responsabili, con lo stesso peso, dei difetti di linea intra layer, dovuti a problemi di adesione degli strati tra loro;
- la layer height influenza la finitura del pezzo: uno spessore di $50 \mu m$ rende più difficile una polimerizzazione corretta, creando dunque un maggior numero di cricche e una rugosità più alta;
- l'infill del materiale influenza fortemente le proprietà meccaniche: nel caso in esame, con un valore del 70%, la resistenza meccanica misurata è più alta dei modelli con percentuali di infill minori, nonostante i maggiori danni strutturali. Allo stesso tempo, però, per effetto della maggior presenza di materiale possono crearsi più difetti e ci sono meno fori in grado di bloccare la propagazione delle cricche;
- ulteriori cricche partono da difetti di punto, dovuti alla variazione nella dimensione dei grani del materiale (diametro medio di $47.93 \mu m$, ma presenza di grani fino a $82 \mu m$);
- la sinterizzazione e il debinding causano la propagazione dei difetti pre-esistenti nel pezzo non sinterizzato. Inoltre, il processo di sinterizzazione del pezzo è responsabile in toto dei difetti trasversali alla direzione di stampa, nati per effetto di carichi opposti sulle cricche presenti su layer vicini. A causa dell'alta percentuale di infill del materiale, l'outgassing post debinding è stato reso ancora più difficile, provocando una scarsa finitura dei pezzi.

Ulteriori approfondimenti sullo studio sono necessari per fornire una maggiore rilevanza statistica del campione. Inoltre sarebbe interessante valutare singolarmente l'effetto di ogni parametro di stampa sulla finitura e sulla resistenza del pezzo finale, in modo da rendere meno qualitativa la selezione dei parametri critici di stampa.

L'analisi non si è concentrata approfonditamente sulla minimizzazione dei tempi e dei costi produttivi, poiché l'applicazione di questo tipo di processo produttivo in ambito spaziale è ancora in fase di studio. In vista di un futuro utilizzo della regolite lunare come materiale ceramico in missioni spaziali, sarà necessario ricercare la combinazione migliore, in ottica di massimizzazione delle proprietà meccaniche, dei parametri di stampa.

Riferimenti bibliografici

- [1] E. LAB. *LHS-1 Lunar Highlands Simulant / Fact Sheet*. URL: <https://github.com/dipa0010/Laboratorio-di-Tecnologie-Aerospaziali/blob/main/Regolite.pdf> (cit. a p. 3).
- [2] G. Cappellari. *DLP 3D Printing of High Dense Lunar Regolith Ceramic Parts*. 2024 (cit. alle pp. 3, 6).
- [3] *Phrozen Sonic Mini 8K User Manual*. URL: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0436/6965/1618/files/User_Manual_Sonic_Mini_8K_EN.pdf?v=1686221392 (cit. a p. 4).
- [4] *ELEGOO Mars 4 DLP Photocuring 3D Printer User Manual*. 2023. URL: <https://www.sunnysoft.cz/download/en-peo-007-013-vo.pdf> (cit. a p. 4).
- [5] A. D. Palermo. *Appendice: Codice MATLAB per la Misura Automatica dei Layer*. https://github.com/dipa0010/Laboratorio-di-Tecnologie-Aerospaziali/blob/main/Analisi_layer.m. 2025 (cit. a p. 5).
- [6] R. Pisani. *Beneficiation of Lunar Regolith: Assessing the Best Basalt Content for DLP-based Additive Manufacturing*. 2023 (cit. a p. 6).
- [7] E. C. Janet B. Davis Annika Kristoffersson e W. J. Clegg. "Fabrication and Crack Deflection in Ceramic Laminates with Porous Interlayers". In: *Journal of the American Ceramic Society* (2000) (cit. a p. 6).
- [8] M. Isachenkov, A. M. Grande e G. Sala. *Optimizing lunar regolith for vat polymerization and sintering: pre-processing mineral composition impact*. 2024 (cit. a p. 6).
- [9] T. D. Sachini Wickramasinghe e P. Tran. "FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments". In: *polymers* (2020) (cit. alle pp. 6, 9).
- [10] A. D. Palermo. *Appendice: Codice MATLAB per Analisi delle Prove Meccaniche*. https://github.com/dipa0010/Laboratorio-di-Tecnologie-Aerospaziali/blob/main/prove_meccaniche.m. 2025 (cit. alle pp. 7, 8).
- [11] M. Isachenkov, R. Pisani, A. M. Grande e G. Sala. *Enhancing Additive Manufacturing of Lunar Regolith Ceramics through Magnetic Beneficiation*. ISACM02-24.pdf. 2024.
- [12] M. Isachenkov. *Esercitazione 1: Introduction to Additive Manufacturing For Earth and for Space*. Documento fornito dal docente in aula. 2025.
- [13] G. Sala, L. D. Landro, A. Airolidi e P. Bettini. *Dispensa di Tecnologie e Materiali Aerospaziali*. 2022.
- [14] A. Aiello, D. D. Felicis e A. D. Giulio. *Microscopia Elettronica a Scansione Sem*. 2019. URL: <https://limeacademy.uniroma3.it/blog/2019/03/03/microscopia-elettronica-a-scansione-sem/#:~:text=Questo%20strumento%20utilizza%20come%20sonda,la%20luminosit%C3%A0%20del%20pixel%20misurato>.
- [15] M. Isachenkov, A. M. Grande e G. Sala. *3D-Printing of Lunar Regolith Ceramics with High Mechanical Properties via SLA-based Approach*. 2023. URL: <https://re.public.polimi.it/bitstream/11311/1250501/1/ISACM02-23.pdf>.
- [16] M. S. Corporation. "Multipurpose, Side Loading Hydraulic Wedge Grips". In: *MTS services and accessories catalog* (2022).