



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.A. 2020/2021

Sessione di Laurea luglio 2021

**Benchmarking di sistemi di  
Additive Manufacturing in termini  
di tolleranze dimensionali**

Relatore:

Prof. Luca Iuliano

Co-relatore:

Prof. Paolo Minetola

Candidato:

Enrico Actis



## *Abstract*

L'Additive Manufacturing è una tecnologia manifatturiera innovativa che si contrappone alle tradizionali tecniche sottrattive poiché realizza il prodotto aggiungendo progressivamente il materiale, seguendo un procedimento di costruzione strato dopo strato. Negli ultimi anni, essa sta attraversando un periodo di grande espansione: il suo rapido sviluppo le ha consentito di essere impiegata attualmente in svariati settori e si presume che la sua diffusione continui ad aumentare nel prossimo futuro, grazie ad una crescente consapevolezza in ambito industriale e ad una progressiva riduzione dei costi di macchine e materiali.

L'obiettivo di questo elaborato consiste nel fornire una panoramica dei processi di Additive Manufacturing e nello svolgere un'attività di benchmarking di alcune delle tecniche maggiormente consolidate tramite un'analisi dimensionale in termini di tolleranze dimensionali e geometriche. Lo studio è stato svolto sia su campioni acquistati da un'azienda leader del settore, sia su componenti prodotti internamente al Politecnico di Torino, presso il laboratorio di Integrated Additive Manufacturing (IAM). In entrambi i casi, i materiali utilizzati sono polimeri.

L'elaborato si sviluppa fornendo inizialmente una introduzione all'Additive Manufacturing per comprenderne l'evoluzione nel corso degli anni e lo stato attuale. In seguito, si descrivono i passi compiuti durante l'attività sperimentale di benchmarking dimensionale, per poi discuterne i risultati.

## *Abstract*

Additive Manufacturing is an innovative manufacturing technology that differs from traditional subtractive techniques because it manufactures the product progressively, adding material following a layer-by-layer building approach. In recent years, it experienced a period of great expansion, and its fast development allowed the technology to be deployed, nowadays, in several industries. Moreover, it is supposed that Additive Manufacturing applications will keep spreading in the future, thanks to a growing awareness in the industry and a gradual cost reduction of machines and materials.

The aim of this thesis is to provide an overview of Additive Manufacturing systems and to carry out a benchmarking activity concerning some of its most common techniques, by means of dimensional and geometrical tolerances. The study has been performed on both samples purchased from an industry leader firm and samples manufactured at the Integrated Additive Manufacturing (IAM) laboratory in Polytechnic University of Turin. In both cases, polymers are the involved materials.

Initially, this paper provides an introduction of Additive Manufacturing to better explain the evolution of the technology and its current status. Afterwards, all the steps carried out during the benchmarking activity will be described, and, finally, the results will be discussed.

# INDICE

<b>Introduzione</b> .....	7
<b>Capitolo 1: Additive Manufacturing</b> .....	<b>8</b>
1.1 Storia.....	9
1.2 Stato attuale e campi di applicazione.....	11
1.3 Processo .....	14
1.4 Vantaggi e svantaggi.....	16
1.5 Principali tecniche di Additive Manufacturing.....	18
1.5.1 Stereolitografia (SLA).....	20
1.5.2 Polyjet.....	22
1.5.3 Direct Light Projection (DLP).....	23
1.5.4 Fused Deposition Modeling (FDM).....	25
<b>Capitolo 2: Obiettivi e metodologia d’indagine</b> .....	<b>28</b>
2.1 Oggetto dell’analisi dimensionale .....	28
2.1.1 Benchmark n° 1 .....	29
2.1.2 Benchmark n° 2.....	30
2.2 Metodi di valutazione delle tolleranze.....	31
2.2.1 Gradi ISO IT.....	32
2.2.2 GD&T.....	33
<b>Capitolo 3: Attività sperimentale di benchmarking dimensionale</b> .....	<b>35</b>
3.1 Produzione dei campioni e macchine utilizzate.....	35
3.1.1 Sharebot Rover.....	36
3.1.2 Stratasys Objet30 Prime .....	37
3.1.3 Altri sistemi .....	38
3.2 Sistemi di rilevamento dei punti .....	40
3.2.1 Macchine di misura a coordinate (CMM).....	41
3.3 Programmazione CMM e misurazione delle geometrie .....	43
<b>Capitolo 4: Analisi dei risultati</b> .....	<b>48</b>
4.1 Analisi dimensionale benchmark n° 1 .....	49
4.1.1 Fused Deposition Modeling .....	50
4.1.2 Stereolitografia.....	54

4.1.3 Polyjet.....	57
4.1.4 Confronto fra tecniche.....	61
4.2 Analisi dimensionale benchmark n° 2 .....	64
4.2.1 Direct Light Projection con strato di 50 $\mu\text{m}$ .....	64
4.2.2 Direct Light Projection con strato di 100 $\mu\text{m}$ .....	69
4.2.3 Polyjet.....	72
4.2.4 Confronto fra tecniche.....	76
4.3 Confronto tra le tecniche di AM utilizzate nello studio.....	78
4.4 Trade-off Qualità, Costi, Tempi .....	81
<b>Conclusioni.....</b>	<b>84</b>
<b>Indice delle figure .....</b>	<b>86</b>
<b>Indice delle tabelle .....</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>89</b>

## *Introduzione*

La stampa 3D, termine comune per definire la tecnologia di Additive Manufacturing, è oggi un argomento di grande interesse che coinvolge non solo le grandi aziende manifatturiere e i liberi professionisti, ma anche un gran numero di persone in campo hobbistico. Il suo successo ha permesso lo sviluppo di diverse tecniche che seguono sempre gli stessi principi generali, ma che si differenziano in base ai materiali e ai processi di fabbricazione. L'obiettivo di questo studio consiste nel confrontare le prestazioni garantite da alcune delle tecniche di Additive Manufacturing maggiormente consolidate.

L'elaborato di tesi si sviluppa in quattro capitoli principali. Il capitolo 1 mira a fornire un'introduzione all'Additive Manufacturing, presentando gli avvenimenti più significativi che la hanno portata alla diffusione attuale, i principi su cui si basano tutti i processi, i pro e i contro rispetto alle tecnologie manifatturiere tradizionali, per descrivere infine le tecniche di fabbricazione additiva che saranno sottoposte all'attività di benchmarking. Nel secondo capitolo sono illustrati i due modelli utilizzati come riferimento per la produzione dei campioni e le metodologie impiegate per la valutazione delle tolleranze dimensionali e geometriche. Nel capitolo 3 sono presentati i sistemi di Additive Manufacturing che saranno in seguito oggetto del confronto, i passaggi compiuti per la realizzazione dei campioni e le restanti attività sperimentali finalizzate alla raccolta dei dati dal processo di misurazione. Infine, nel quarto e ultimo capitolo sono esposti i risultati ottenuti e si effettua il confronto delle tecniche analizzate, per concludere con un'analisi dei trade-off qualità, costi e tempi.

## Capitolo 1: Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM), conosciuta anche come “Stampa 3D” e “Fabbricazione Additiva”, è una tecnologia manifatturiera innovativa che consente di realizzare oggetti tridimensionali tramite l’ausilio di sistemi di “Computer Aided Manufacturing” (CAM), dai quali è possibile reperire il modello virtuale del prodotto finale. Il carattere innovativo è legato al processo di costruzione, infatti, come suggerisce il nome, la lavorazione avviene aggiungendo progressivamente il materiale per realizzare strato dopo strato il pezzo. Ciò si dimostra in netta contrapposizione sia con le tradizionali tecniche sottrattive, che prevedono di partire da un pezzo grezzo per poi asportare il materiale in eccesso, sia con lo stampaggio, grazie al quale si ottiene il prodotto in un unico passaggio.

La tecnologia di Additive Manufacturing è stata inizialmente ideata come strumento per ridurre i tempi di prototipazione dei nuovi prodotti, ma nel corso della sua storia, specialmente negli anni più recenti, ha compiuto enormi passi avanti, espandendo le proprie applicazioni fino a diventare una valida alternativa per la produzione di parti definitive e pronte alla commercializzazione. È opportuno considerare che, attualmente, le caratteristiche peculiari del processo di fabbricazione additiva le permettono di essere competitiva dal punto di vista dei costi solamente per bassi volumi di produzione, mentre risulta inadeguata per le produzioni in serie, come dimostrato dal grafico in figura 1 relativo all’andamento dei costi unitari.

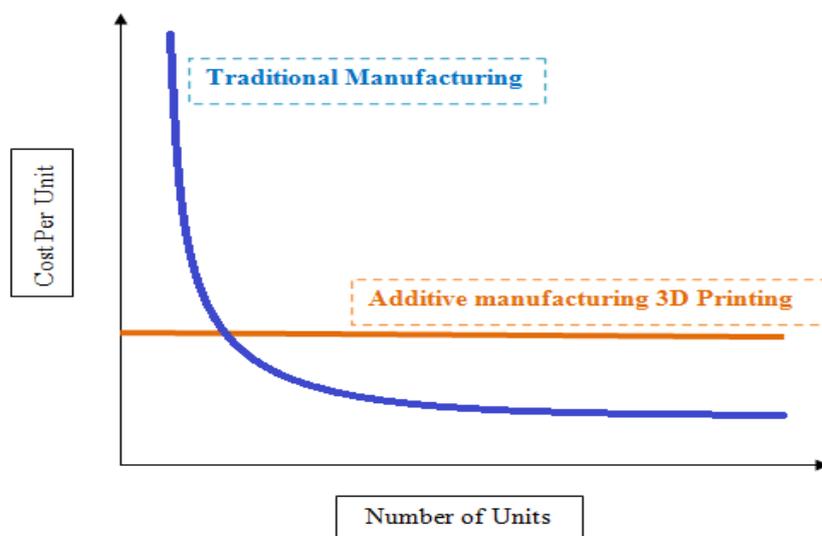


Figura 1. Confronto tra costi unitari in funzione delle quantità prodotte per le diverse tecnologie [2]

La sua efficacia nella produzione di quantità limitate le ha comunque permesso di eccellere nei settori che richiedono un'elevata personalizzazione del prodotto, dove risultano invece carenti le tecnologie manifatturiere tradizionali.

Contestualmente allo sviluppo della tecnologia di AM sono nati i principi del “Design for Additive Manufacturing”, che mirano a sfruttare i punti di forza del processo di fabbricazione additiva per la riprogettazione dei componenti, ottenendone così l'ottimizzazione topologica.

## **1.1 Storia**

Le origini dell'Additive Manufacturing risalgono al 1981, anno in cui il Dr. Hideo Kodama (Nagoya Municipal Industrial Research Institute) rese pubblici i suoi studi relativi alla fabbricazione di un modello tridimensionale tramite la solidificazione, strato per strato, di un fotopolimero a seguito dell'esposizione ad un raggio UV. Kodama avviò le pratiche per brevettare il sistema di prototipazione rapida da lui ideato, tuttavia andò incontro a difficoltà economiche che gli impedirono di completare il processo.

La pietra miliare che simboleggia la nascita della tecnologia che noi chiamiamo oggi “Fabbricazione Additiva” coincide con la brevettazione della Stereolitografia (SLA) da parte di Charles Hull, avvenuta nel 1984. Questa tecnica prevede di raccogliere una resina fotopolimerica in una vasca per sottoporla all'emissione di raggi UV concentrati sulle porzioni che si vogliono solidificare, realizzando così un oggetto in 3D strato dopo strato.

Charles Hull diede seguito alle sue idee, dando inizio alla commercializzazione della sua tecnologia fondando nel 1987 l'azienda 3D Systems, la quale tuttora risiede ai vertici del settore. Il processo di stampa in 3D fu sviluppato appositamente per la realizzazione di prototipi, sia di tipo concettuale che funzionale, con tempi e costi decisamente ridotti rispetto alle tecnologie disponibili all'epoca, per cui questa tecnologia prese il nome di “prototipazione rapida”.

La fine degli anni '80 fu teatro del lancio di nuove tipologie di prototipazione grazie ai crescenti investimenti nel settore, attratti dalla grande utilità che la stereolitografia dimostrò di fornire alle aziende. Le più importanti, e che risultano ancora di largo impiego attualmente, furono denominate Selective Laser Sintering (SLS) e Fused Deposition Modeling (FDM). La prima, SLS, fu sviluppata nel 1986 all'Università del Texas da Carl

Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase, e consiste nell'utilizzo di un fascio laser per sinterizzare selettivamente un letto di polvere del materiale scelto, seguendo un procedimento strato per strato. La seconda, FDM, fu ideata nel 1989 dai coniugi Scott e Lisa Crump, e sfrutta il riscaldamento e la successiva estrusione di un filamento attraverso un ugello per realizzare l'oggetto tridimensionale, sempre rispettando un approccio per strati successivi. Così come Hull, anche i Crump fondarono una delle più importanti aziende di Additive Manufacturing dei giorni nostri: Stratasys (1989).

Nell'ultimo decennio del secolo scorso si ebbe una rapida crescita dell'utilizzo della prototipazione rapida attraverso il miglioramento qualitativo delle tecniche già esistenti e il contemporaneo sviluppo di nuove e svariate metodologie, aventi processi più o meno simili. L'avvenimento di maggior rilevanza fu l'utilizzo, per la prima volta nella storia dell'Additive Manufacturing, di polveri di metallo come materiale da fondere per realizzare l'oggetto desiderato. Ciò accadde nel 1995, quando gli scienziati del Fraunhofer Institute di Aquisgrana in Germania idearono la Selective Laser Melting (SLM). Questa tecnica segue un processo identico alla già esistente Selective Laser Sintering, tuttavia si spinge un passo oltre poiché porta alla completa fusione delle polveri soggette alla radiazione laser.

L'avvento del nuovo millennio segna la trasformazione della manifattura additiva da mero strumento di prototipazione a vera e propria metodologia di produzione, sebbene ancora ad oggi l'impiego principale sia rimasto la realizzazione di prototipi.

Un anno di svolta per la diffusione di ciò che diventò a tutti gli effetti "fabbricazione additiva" è il 2009, quando giunse a scadenza il brevetto per la tecnica di Fused Deposition Modeling. La conseguenza di questo avvenimento fu la caduta delle barriere in ingresso, che portò ad un drastico calo del costo dei macchinari, che, in aggiunta alla contemporanea crescita della qualità dei prodotti realizzati, contribuì ad ampliare enormemente il bacino di consumatori.

Di seguito, a titolo riepilogativo, si presentano in una linea temporale (figura 2) gli eventi di maggiore importanza che hanno caratterizzato la storia dell'Additive Manufacturing.

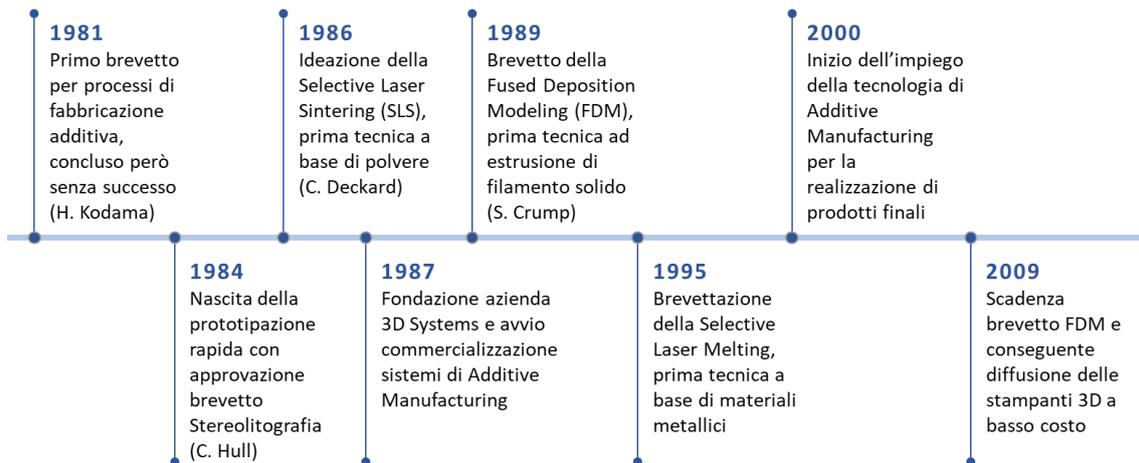


Figura 2. Evoluzione dell'Additive Manufacturing

## 1.2 Stato attuale e campi di applicazione

Come evidenziato nel paragrafo precedente, la tecnologia di stampa 3D si è evoluta nel corso degli anni, superando il concetto iniziale di prototipazione rapida per poi prendere parte anche alla produzione di prodotti finiti, specialmente nei settori caratterizzati da bassi volumi di produzione e alta diversità di prodotti. Attualmente, si stima che circa il 70% dell'utilizzo delle tecniche di fabbricazione additiva sia destinato alla realizzazione di prototipi, mentre la parte restante è dedicata alla produzione di preserie oppure di parti definitive.

La diminuzione dei costi di macchinari e materiali, il miglioramento dei processi di produzione e della qualità di stampa sono i fattori che hanno reso la fabbricazione additiva il metodo più veloce ed efficiente per la realizzazione di prototipi, le cui applicazioni sono in costante sviluppo. Infatti, questa tecnologia sta acquisendo un consenso e un utilizzo sempre maggiore in un gran numero di aziende, trovando spazio dalle fasi di sviluppo prodotto fino ai processi produttivi.

Per giustificare la rapida espansione dell'Additive Manufacturing è opportuno osservare alcuni dati di carattere economico. Il principale riguarda il mercato globale: il fatturato (comprensivo di sistemi, materiali e servizi annessi) generato nel 2017 si attesta con un valore stimato di 7.54 miliardi di dollari, con un aumento del 20.4% rispetto ai 6.26 miliardi di dollari del 2016, e comunque in linea con i trend di crescita annuali [7].

Entrando maggiormente nello specifico delle componenti del fatturato, un parametro interessante da rilevare è l'andamento del fatturato generato dalla vendita di materiali per

la fabbricazione additiva, riportato nel grafico in figura 3 (dati espressi in milioni di dollari). Da esso si evince che, escludendo gli effetti della crisi finanziaria del 2008, il mercato dei materiali negli ultimi anni ha avuto una crescita esponenziale, sintomo della grande diffusione della tecnologia. Nel dettaglio, nel 2017 si è riscontrata una crescita del fatturato del 25%, passando dai 903 milioni del 2016 a 1.13 miliardi di dollari [6].

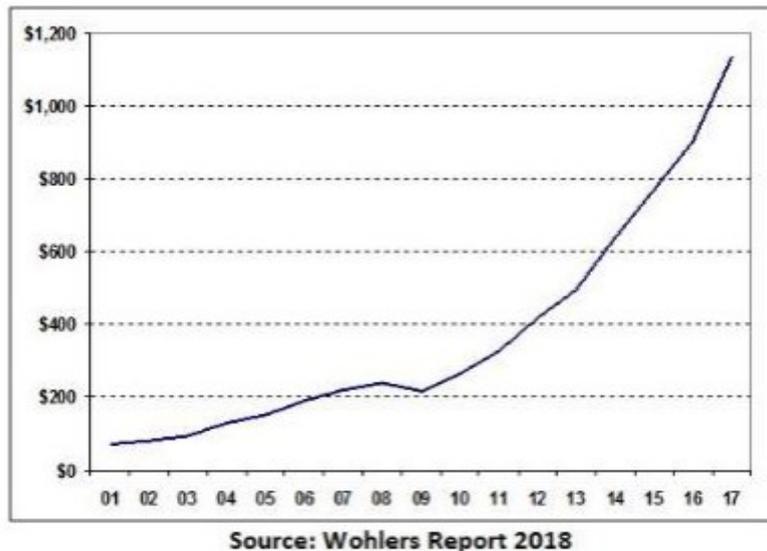


Figura 3. Fatturato generato dalla vendita di materiali per AM [6]

I materiali impiegati nel campo dell'Additive Manufacturing si dividono in quattro categorie [1]:

- Polimeri: materiali con cui è iniziata la storia della prototipazione rapida e ancora attualmente di maggior utilizzo (circa 80%);
- Metalli: famiglia avente un impiego ridotto rispetto ai polimeri (circa 20%), ma che suscitano il maggior interesse per nuove applicazioni e quindi in forte espansione;
- Ceramiche: materiali interessanti per quanto riguarda le proprietà termiche, ma ancora di scarso utilizzo (<1%), principalmente a causa dell'elevato punto di fusione;
- Compositi: composizione di due o più materiali finalizzata al miglioramento delle prestazioni meccaniche finali, ma di impiego ridotto (<1%).

A conferma della grande diffusione che stanno attraversando le tecniche a base di metallo in questo periodo, si riporta in figura 4 il grafico relativo allo storico delle vendite di sistemi di fabbricazione additiva per componenti metallici (dal 2000 al 2017). Infatti,

nell'ultimo anno considerato nell'analisi, la vendita di questi sistemi ha fatto segnare un impressionante +80% rispetto al 2016, arrivando a quasi 1800 unità [6].

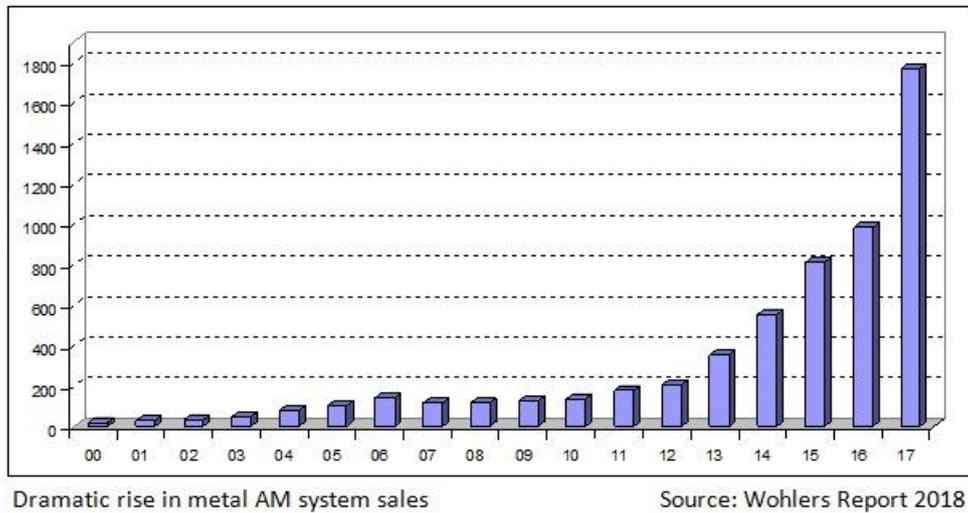


Figura 4. Storico delle vendite di sistemi di AM per componenti metallici [6]

L'evoluzione dell'Additive Manufacturing ha fatto sì che il suo utilizzo si sia consolidato in un gran numero di settori, trovando impiego in svariate applicazioni. Come si può osservare in figura 5, questa tecnologia viene utilizzata principalmente nella produzione di beni strumentali mobili come macchinari industriali e utensili (20%) e nei settori aerospaziale (18.9%) e automotive (16%), ma svolge un ruolo importante anche nella produzione di beni di largo consumo (specialmente gioielleria), in campo medicale e dentale, nelle istituzioni accademiche e in molti altri [6].

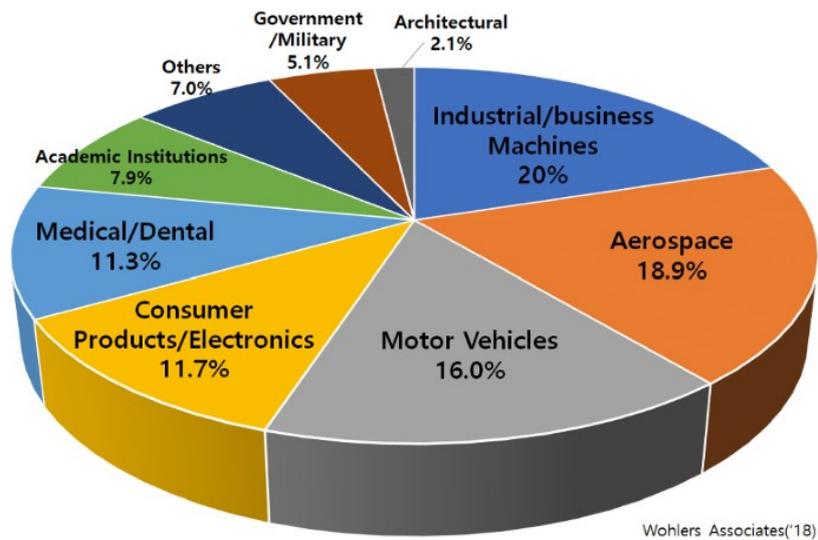


Figura 5. Campi di applicazione della AM [6]

### 1.3 Processo

Per completare il processo produttivo di Additive Manufacturing è necessario seguire un preciso flusso di lavoro, strutturato in una serie di fasi successive che permettono di ottenere l'oggetto fisico desiderato. Di seguito sono elencati tutti i passaggi che compongono il ciclo di Fabbricazione Additiva.

#### **Realizzazione del modello matematico tridimensionale del prodotto**

Il primo passo del processo di AM consiste nel dotarsi del modello matematico del prodotto realizzato su un software CAD tridimensionale. Questo può essere ottenuto disegnando manualmente su uno di questi software oppure tramite l'utilizzo di strumenti di Reverse Engineering. Il modello CAD permette di definire le geometrie e i parametri dell'oggetto da stampare.

#### **Conversione del file in formato STL**

Per fare in modo che il file CAD sia riconosciuto dal sistema di Fabbricazione Additiva, è necessario convertirlo in formato STL (Standard Triangulation Language). Questo step consente di approssimare le superfici interne ed esterne del pezzo tramite una serie di triangoli, come illustrato in figura 6. Per ottenere una rappresentazione più precisa, vengono tracciati triangoli di diversa dimensione a seconda della complessità geometrica, così che si mantenga costante l'errore cordale. Ciò nonostante, la conversione in formato STL non può essere una trasposizione perfetta del modello CAD poiché attraverso l'approssimazione delle superfici curve viene comunque commesso un errore, che si definisce "facetting".



Figura 6. Esempio di transizione da modello CAD a formato STL [8]

### **Orientamento del pezzo e generazione dei supporti**

Si carica il file STL su un software predisposto al posizionamento e all'orientamento dell'oggetto da realizzare all'interno del volume di stampa. Lo stesso software è in grado di analizzare le dimensioni e la collocazione del pezzo e generare automaticamente i supporti, lasciando inoltre all'operatore la possibilità di effettuare eventuali modifiche. La presenza di supporti è infatti fondamentale per la maggior parte delle tecniche di Additive Manufacturing, in quanto essi svolgono le funzioni di:

- Ancorare il modello alla piattaforma di lavoro durante il processo di fabbricazione, consentendo comunque una loro rimozione al termine della costruzione del pezzo;
- Supportare le parti sporgenti per evitarne il collasso e ottenere così una stampa corretta;
- Proteggere le superfici laterali durante la lavorazione.

In questa fase viene anche selezionato il materiale di cui sono costituiti i supporti, che può essere lo stesso dell'oggetto finale oppure, se possibile a seconda della macchina, diverso per facilitarne la rimozione.

### **Esecuzione dello slicing**

L'ultimo passo prima di poter effettuare la stampa consiste nel sezionare il modello virtuale tramite una serie di piani paralleli tra loro e perpendicolari all'asse z, compiendo l'attività denominata "slicing". La sezionatura rappresenta la successione di strati (layer) con cui verrà realizzato il pezzo. Questo procedimento definisce inoltre lo spessore dello strato  $\Delta z$ , un parametro fondamentale poiché determina la qualità della stampa e i tempi di realizzazione. Infatti, ad uno spessore inferiore corrisponde un maggior numero di strati, che implica un tempo di lavorazione maggiore, ma consente di migliorare la precisione. Valori tipici di  $\Delta z$  per i polimeri rientrano all'interno del range da 0.05 a 0.3 mm [1].

In questa fase si verifica il secondo errore del processo, ovvero l'effetto "staircase", dovuto all'approssimazione delle superfici curve. Per limitare questo difetto è possibile eseguire uno slicing adattivo che varia lo spessore del layer in base alla complessità geometrica, tuttavia è attualmente un procedimento di scarso impiego a causa dei limiti tecnologici.

### **Costruzione del pezzo**

Il file contenente il modello tridimensionale e i parametri di processo viene trasferito alla macchina di fabbricazione additiva, la quale realizza automaticamente il prodotto.

### **Operazioni di post-trattamento**

Terminata la lavorazione si eseguono delle attività di post-trattamento, quali la rimozione dei supporti, il trattamento termico per stabilizzare le geometrie, i processi di finitura superficiale e la pulizia del pezzo. È inoltre possibile eseguire ulteriori lavorazioni come colorazione, lucidatura o altri, per migliorare l'aspetto estetico finale del prodotto.

## ***1.4 Vantaggi e svantaggi***

Ponendo a confronto la Fabbricazione Additiva con le tecnologie manifatturiere convenzionali è possibile valutare i pro e i contro della sua adozione, in modo da comprendere le motivazioni per cui questa abbia avuto successo e, di conseguenza, si sia diffusa in determinati settori. Nello specifico, vengono considerati i vantaggi e gli svantaggi offerti da questa tecnologia innovativa in relazione al processo produttivo e alle caratteristiche finali del prodotto realizzato.

Di seguito, sono elencati i vantaggi concernenti il processo di produzione:

- Tempi e costi di produzione in funzione delle dimensioni e non della complessità geometrica: l'incremento di questi parametri al crescere della complessità è enormemente ridotto rispetto a ciò che avviene nelle tecnologie tradizionali. Il confronto tra le due alternative relativo all'andamento dei costi in funzione della complessità geometrica è riportato nel grafico in figura 7.
- Unico step produttivo: è possibile realizzare qualsiasi geometria desiderata utilizzando una sola macchina, senza la necessità di eseguire assemblaggi o cambio di utensili;
- Assenza di attrezzature: non è richiesto nessuno stampo, sistema di bloccaggio o altro tipo di attrezzatura;
- Minimo intervento dell'operatore: l'elevata automazione del processo di lavorazione riduce l'impiego di risorse umane durante il processo, limitandolo alle fasi di progettazione e post-processing;

- Sprechi ridotti ed ecosostenibilità: si ha una fabbricazione “net-shape” con minimo scarto di materiale e riutilizzo del materiale non lavorato.

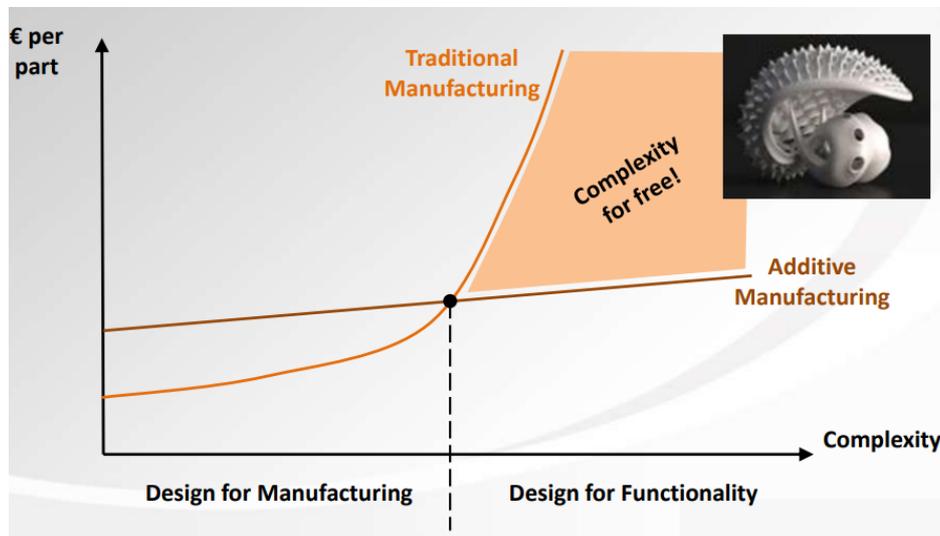


Figura 7. Relazione tra costi e complessità geometrica per AM e manifattura tradizionale [1]

Mentre per quanto riguarda il prodotto si ha:

- Maggiore libertà di progettazione: è possibile realizzare forme non convenzionali, permettendo una maggiore flessibilità nelle scelte di design;
- Ottimizzazione topologica: il prodotto finale è costruito apportando il materiale esclusivamente dove è necessario, consentendo di inserire eventuali cavità finalizzate ad alleggerire il pezzo e a ridurre l'utilizzo delle materie prime;
- Parti integrate: viene fabbricato direttamente il pezzo definitivo, evitando la produzione singola di ogni componente e il successivo processo di assemblaggio richiesto dall'utilizzo delle tecnologie tradizionali;
- Personalizzazione: le caratteristiche del processo rendono agevole la personalizzazione del prodotto finale, assicurando la capacità di adattarsi prontamente alle richieste dei clienti.

Sfortunatamente, l'Additive Manufacturing porta con sé anche delle criticità che ne hanno rallentato la diffusione nel corso degli anni e che tuttora richiedono la ricerca di soluzioni.

I limiti relativi al processo sono:

- Volumi di lavoro e dimensione dei pezzi: la maggior parte delle macchine di AM sono caratterizzate da una camera di lavoro con dimensioni ridotte e ciò si riflette

sulla grandezza massima dei prodotti realizzabili. Risulta inoltre complicato sfruttare appieno il volume di lavoro a causa delle metodologie di lavorazione.

- Velocità di costruzione: considerando l'altezza ridotta dei singoli layer (tipicamente poche decine di micron), la realizzazione strato per strato del pezzo rallenta il processo di lavorazione e, se l'oggetto da produrre è caratterizzato da un volume elevato, ne incrementa i costi;
- Utilizzo dei materiali: gran parte delle macchine attualmente in commercio possono lavorare un solo materiale alla volta, quindi se il prodotto richiede una composizione di diversi materiali è necessario l'intervento dell'operatore durante il processo per cambiare il materiale e le impostazioni di macchina a causa delle loro diverse caratteristiche.

Infine, sono presenti svantaggi legati al prodotto, tra cui:

- Esigenza di strutture di supporto: per evitare eventuali collassi e realizzare correttamente il pezzo bisogna predisporre alcuni sostegni, i quali tuttavia sono da rimuovere nelle fasi di post-processing. In caso di rimozione manuale dei supporti, è altresì richiesta un'ulteriore lavorazione per ridurre la rugosità delle superfici interessate.
- Finitura superficiale: i pezzi prodotti presentano solitamente delle irregolarità superficiali dovute all'effetto scala causato dal processo di slicing. Risulta quindi necessario effettuare delle lavorazioni di finitura al termine della stampa per ottenere risultati simili a quelli garantiti dalle tecnologie manifatturiere convenzionali.
- Gamma e costo dei materiali disponibili: nonostante le applicazioni della Fabbricazione Additiva prevedano oggi l'impiego di diverse categorie di materiali, il numero totale di materiali in commercio rimane comunque esiguo. Come conseguenza, la scarsità di materie prime, in concomitanza alla possibilità di reperirle solamente dalle grandi aziende del settore, comporta un elevato costo dei materiali.

### ***1.5 Principali tecniche di Additive Manufacturing***

Allo stato attuale della fabbricazione additiva, sono presenti un gran numero di tecniche che consentono di realizzare un oggetto tridimensionale tramite processi più o meno

diversi tra loro, ma sempre caratterizzati dal processo di lavorazione strato dopo strato. Questa diversità lascia spazio ad una serie di possibili criteri di classificazione, tuttavia in questa analisi le tecniche sono suddivise in primis in base alla tipologia di materiale utilizzato e in secondo luogo in riferimento allo stato fisico della materia. Nello specifico, i materiali coinvolti sono i polimeri e i metalli, in quanto rappresentano la quasi totalità delle applicazioni di AM, mentre gli stati fisici considerati sono quello liquido, solido e polvere. Per chiarezza di esposizione, si è deciso di fornire una rappresentazione tramite schema concettuale delle tecniche maggiormente consolidate per entrambe le tipologie di materiale impiegato: le tecniche di Additive Manufacturing per polimeri sono espone in figura 8, mentre quelle per metalli in figura 9.

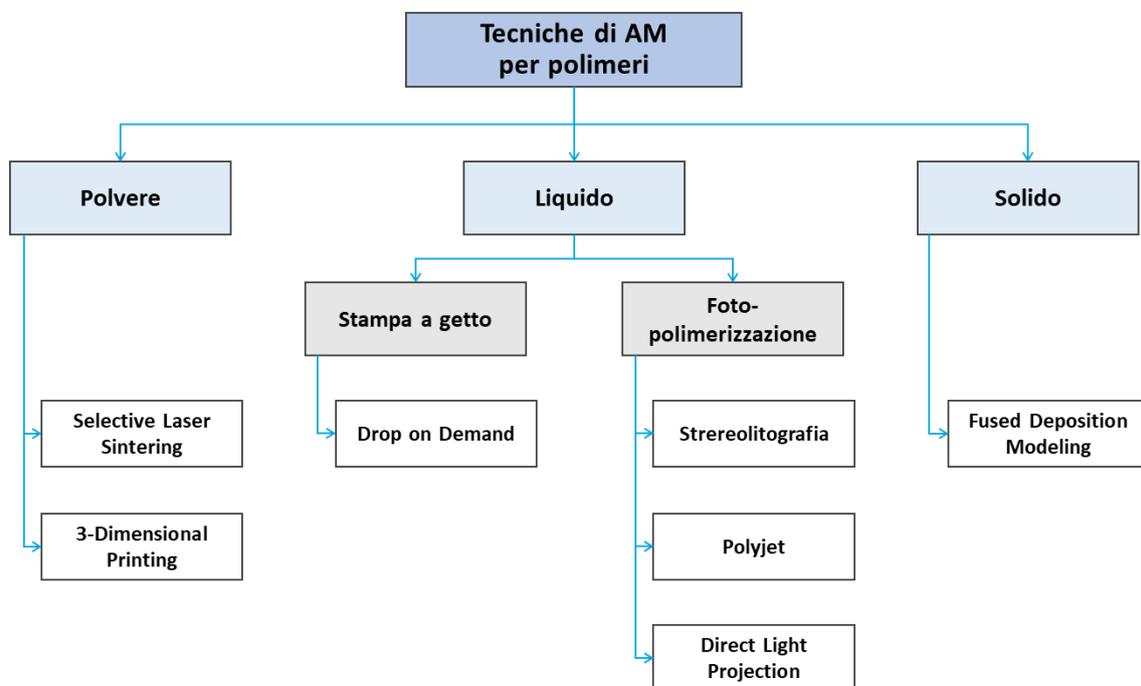


Figura 8. Tecniche di Additive Manufacturing per polimeri

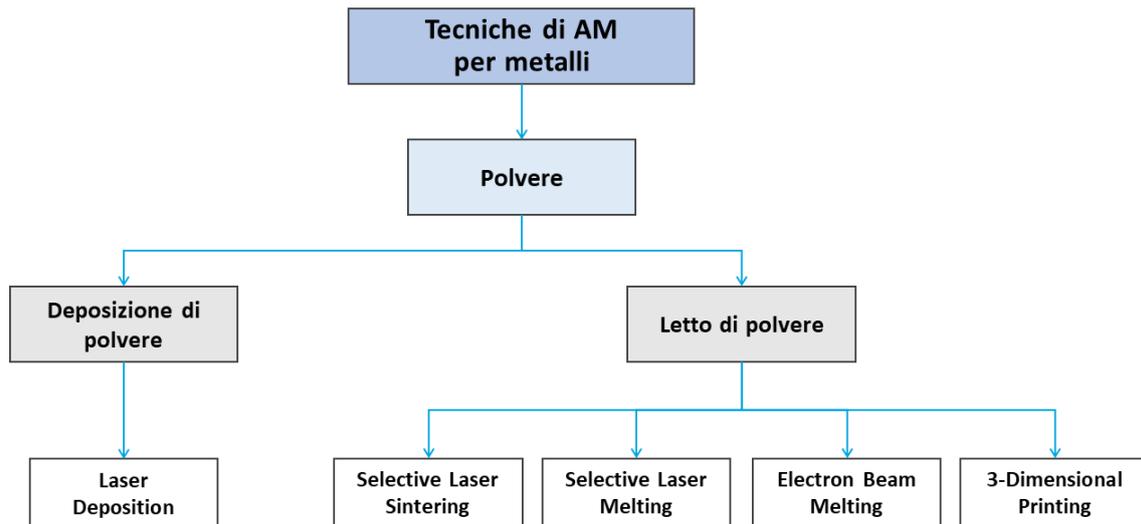


Figura 9. Tecniche di Additive Manufacturing per metalli

Nei paragrafi successivi vengono descritte nel dettaglio le tecniche di Additive Manufacturing utilizzate per realizzare i pezzi che sono stati oggetto dell'attività di benchmarking (vedi capitolo 3): Stereolitografia (SLA), Polyjet, Direct Light Projection (DLP) e Fused Deposition Modeling (FDM).

### 1.5.1 Stereolitografia (SLA)

Acronimo di “Stereolithography Apparatus”, la SLA simboleggia la nascita della tecnologia di Additive Manufacturing e ancora oggi è una delle tecniche maggiormente utilizzate nell'ambito della prototipazione. Il processo di creazione dell'oggetto tridimensionale prevede la solidificazione di fotopolimeri liquidi grazie alla riflessione di un fascio laser.

La lavorazione si suddivide in due fasi principali:

- **Trattamento con il laser:** il fotopolimero (tipicamente una resina) viene inserito all'interno di una vasca e si dispone inizialmente la piattaforma ad una quota  $\Delta z$  (spessore dello strato) sotto il pelo del liquido. Si emette quindi il fascio UV verso uno specchio, che lo riflette punto per punto verso le zone d'interesse del polimero da solidificare. Si preferisce riflettere il fascio UV invece di emetterlo direttamente sul liquido per garantire una maggiore precisione, poiché è molto più semplice movimentare uno specchio piuttosto che la sorgente del laser. Terminata la polimerizzazione del primo strato, si sfrutta un elevatore per abbassare la piattaforma (sempre di una quota pari all'altezza del layer), si rende uniforme la

superficie del liquido grazie ad una lama livellatrice e si procede a realizzare il secondo strato del prototipo. Si ripete l'intero procedimento finché si giunge alla polimerizzazione dell'ultimo strato.

In figura 10 è rappresentato lo schema di funzionamento di un sistema di stereolitografia.

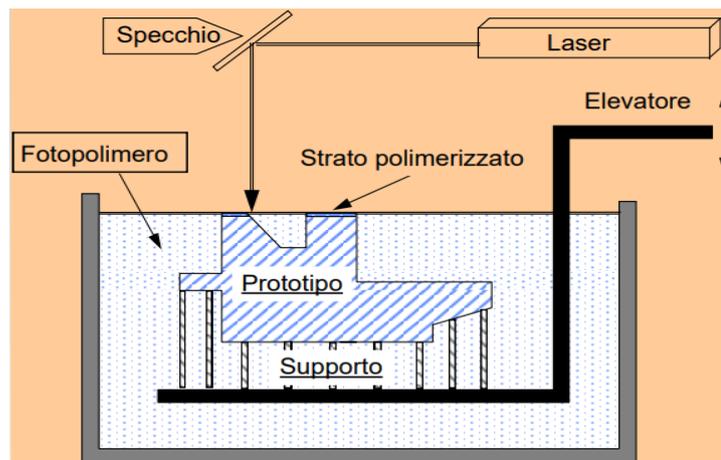


Figura 10. Schema di funzionamento stereolitografia [1]

- Post-trattamento in forno UV: solitamente, soprattutto in caso sia necessario realizzare pezzi di grandi dimensioni, per ridurre i tempi della prima fase si portano alla completa solidificazione solamente le superfici esterne del modello, mentre all'interno rimane un cuore liquido. Il pezzo è quindi estratto dalla vasca e immesso in un forno a luce ultravioletta per completare il processo di solidificazione delle parti interne.

La stereolitografia richiede l'utilizzo di supporti e questi sono necessariamente dello stesso materiale del prototipo, dato che la vasca può essere riempita da un unico fotopolimero liquido.

I principali vantaggi di questa tecnica riguardano le ottime prestazioni in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiali, tra le migliori ottenibili dai processi di Additive Manufacturing, garantendo così anche un gradevole impatto visivo.

Gli svantaggi invece sono legati in primis alla tipologia di materiale impiegato, poiché i fotopolimeri non offrono elevate prestazioni termiche e possono anche essere soggetti a degrado nel tempo o con l'esposizione alla luce, di conseguenza l'utilizzo della SLA è limitato alla realizzazione di prototipi. Inoltre, il processo caratterizzato dalla

solidificazione punto per punto del fotopolimero rende i tempi di lavorazione della stereolitografia più lunghi rispetto ad altre tecniche di fabbricazione additiva. Infine, i supporti e il prototipo sono dello stesso materiale e quindi è necessario rimuoverli meccanicamente.

### 1.5.2 Polyjet

La tecnica Polyjet simboleggia il processo di stampa 3D sviluppato nell'anno 2000 dalla società Israeliana Objet Geometries, acquisita in seguito dal leader del settore Stratasys. Il processo è molto semplice e simile a quello di una tradizionale stampante ad inchiostro, tuttavia in questo caso il materiale utilizzato è un fotopolimero liquido.

Come si può osservare in figura 11, le macchine Polyjet sono costituite da testine di stampa multi-ugello libere di scorrere lungo gli assi x e y, da lampade che fungono da sorgente di raggi UV e da una piattaforma, in grado di traslare lungo l'asse z, sulla quale viene realizzato il pezzo.

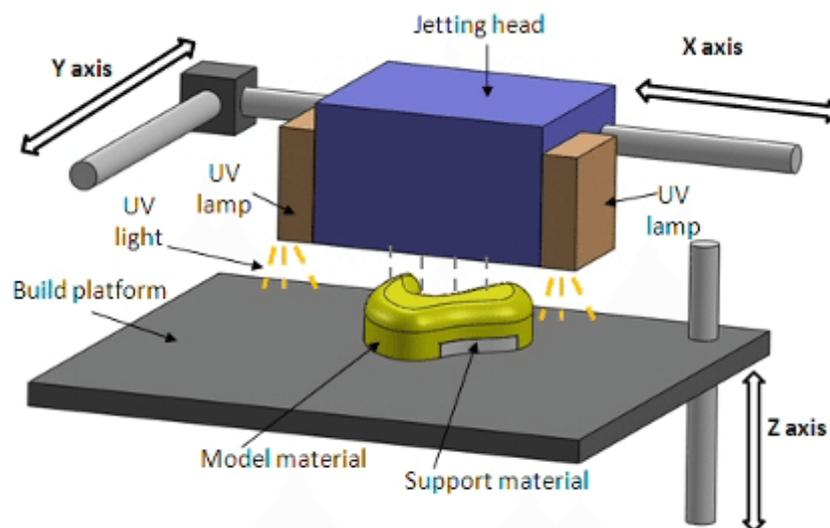


Figura 11. Schema di funzionamento tecnica Polyjet [10]

Gli ugelli depositano sulla piattaforma gocce di fotopolimero, le quali vengono immediatamente solidificate tramite l'emissione di luce UV. La presenza di numerosi ugelli permette di suddividere il loro impiego per depositare contemporaneamente materiali diversi. Ciò consente di differenziare i supporti dal pezzo definitivo o di costruire il prodotto stesso con una moltitudine di materiali per migliorarne le proprietà finali. La testina di stampa si muove sul piano x-y fino a terminare la costruzione del primo strato, dopodiché la piattaforma viene abbassata di una quantità pari all'altezza

dello strato preimpostata e riprende la deposizione del fotopolimero. Questi passaggi vengono ripetuti fino alla conclusione del processo di stampa. Infine, si immerge il prodotto in un bagno di soluzione acquosa per rimuovere i supporti e lasciare le superfici a contatto lisce e precise, evitando così la necessità di eseguire ulteriori trattamenti.

Questa tecnica offre una serie di benefici, tra cui:

- Possibilità di costruire modelli composti da diversi materiali in un'unica fase per variare le proprietà o la colorazione del prodotto finale, migliorandone così la resa estetica;
- Elevata velocità di stampa, mantenendo comunque una buona precisione dimensionale;
- Solubilità dei supporti in soluzione acquosa per facilitarne la rimozione ed evitare operazioni di post-trattamento

I contro sono invece riconducibili alle caratteristiche dei fotopolimeri, come nel caso della stereolitografia, e alle limitate dimensioni del volume di lavoro, in concomitanza con l'impossibilità di sfruttare appieno quest'ultimo lungo l'asse z.

### *1.5.3 Direct Light Projection (DLP)*

La "Direct Light Projection" o "Digital Light Processing", riconosciuta con l'acronimo DLP, è una tecnica caratterizzata da un processo molto simile a quello della stereolitografia, al punto tale che le due sono considerate appartenenti alla stessa famiglia di tecnologie. Anch'essa, infatti, si basa sulla fotopolimerizzazione di resine liquide tramite l'emissione di raggi UV.

Analogamente alle macchine SLA, sono presenti una vasca dove si immette il materiale, una sorgente di luce costituita da un proiettore e una piattaforma sulla quale aderisce il pezzo realizzato, che scorre lungo l'asse z grazie ad un elevatore. In questo caso, tuttavia, la base della vasca deve essere necessariamente trasparente per permettere alla luce di attraversarla e solidificare così il polimero.

In figura 12 è schematizzato il funzionamento di una macchina DLP.

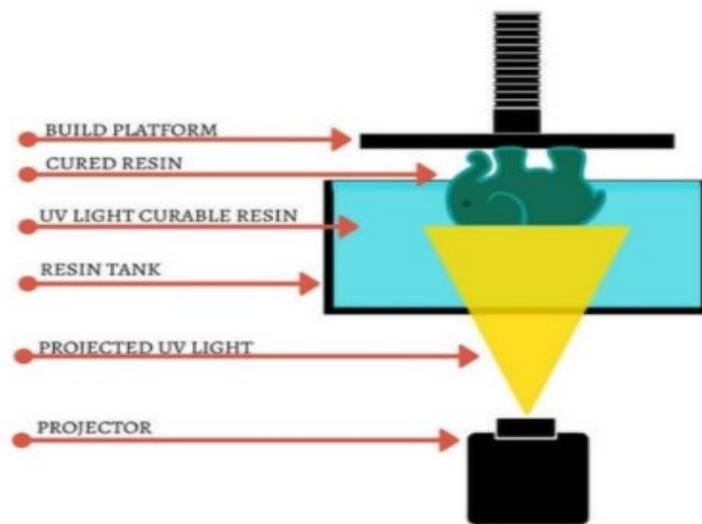


Figura 12. Schema di funzionamento DLP [11]

Il processo inizia ponendo il fotopolimero nella vasca e posizionando la piattaforma alla minima quota disponibile. Il proiettore emana un fascio di raggi UV che colpisce contemporaneamente l'intera superficie inferiore della vasca, di conseguenza tutta la sezione del pezzo giunge ad una simultanea solidificazione. Si termina così il primo strato, si alza la piattaforma di una quota pari allo spessore dello strato e si ripete il procedimento. Al termine della lavorazione, si ottiene il prodotto "a testa in giù". A questo punto si stacca il pezzo dalla piattaforma, si rimuovono manualmente i supporti (stesso materiale del prodotto finale) e si opera un post-trattamento per stabilizzare le geometrie, inserendo l'oggetto della stampa in un forno a luce ultravioletta.

Facendo parte della stessa famiglia, i pro e contro delle tecniche DLP e SLA sono generalmente simili, quindi per avere un'idea più chiara sulle loro possibili applicazioni si effettua un confronto tra le due:

- Velocità di costruzione vs. qualità di stampa: i processi si differenziano per le modalità di solidificazione del polimero, infatti nel caso della Direct Light Projection viene trattata la totalità dello strato, mentre per la stereolitografia si procede punto per punto. Ciò conferisce alla DLP una maggiore velocità di costruzione, mentre alla SLA una migliore qualità di stampa.
- Quantità di materiale utilizzato: le caratteristiche del processo della DLP fanno sì che venga trattata sempre la parte inferiore della vasca, quindi è possibile immettere solamente la quantità di fotopolimero necessaria alla realizzazione del pezzo e dei supporti, minimizzando gli sprechi. La tecnica SLA invece richiede il

riempimento della vasca poiché la piattaforma deve essere in grado di immergersi nel liquido per realizzare tutti gli strati del pezzo.

- Volume di lavoro: sia mediamente che come estremi, la SLA possiede volumi di lavoro maggiori rispetto alla DLP, consentendo di costruire prodotti finali più grandi.

#### *1.5.4 Fused Deposition Modeling (FDM)*

La Fused Deposition Modeling è stata la prima tecnica di Additive Manufacturing ad essere utilizzata non solo per la prototipazione, ma anche per produrre parti definitive. Conosciuta altresì con il nome “Fused Filament Fabrication” (FFF), è attualmente la tecnica additiva maggiormente diffusa grazie alla sua versatilità e al suo largo impiego in campo hobbistico. È infatti possibile acquistare una macchina FDM a prezzi molto contenuti, sebbene le prestazioni siano decisamente diverse dai più costosi sistemi professionali.

Questa tecnica prevede l’estrusione di un filamento di polimero termoplastico tramite un ugello, che viene quindi depositato su una piattaforma di lavoro. Sono predisposte due bobine attorno alle quali sono avvolti rispettivamente il materiale del pezzo in una e quello per i supporti nell’altra, così che pezzo e supporti possano essere realizzati contemporaneamente da due diversi ugelli.

Come per le altre tecniche di fabbricazione additiva, la testina di stampa si muove lungo gli assi x e y seguendo il percorso preimpostato dal sistema CAM e al termine della costruzione di uno strato si trasla la piattaforma lungo l’asse z verso il basso.

In figura 13 è rappresentato lo schema di funzionamento di un sistema FDM.

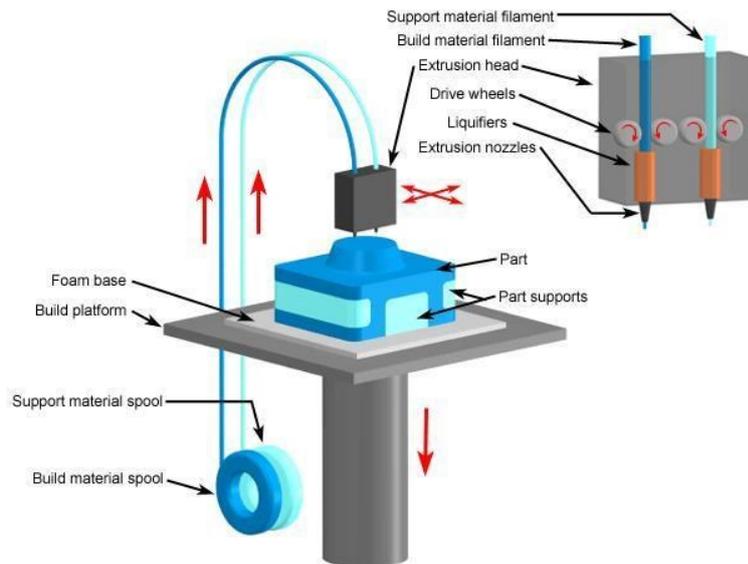


Figura 13. Schema di funzionamento tecnica Fused Deposition Modeling [12]

Durante la lavorazione si controlla la temperatura dell'ugello in modo che possa trasferire al materiale la quantità corretta di calore per fonderlo. Una volta che il polimero raggiunge la piattaforma, questo si solidifica, in quanto l'ambiente circostante si trova ad una temperatura inferiore a quella di fusione. Il controllo della temperatura di estrusione rappresenta il passaggio più delicato poiché è necessario rifondere la superficie dello strato precedente per ottenere una buona adesione tra gli strati e assicurarsi inoltre che non si verifichino eventuali colate o laminazioni.

Per concludere il processo si rimuovono i supporti, manualmente o tramite soluzione acquosa in caso siano realizzati con un materiale diverso rispetto al pezzo, e si effettuano eventuali operazioni di sabbiatura e/o verniciatura per perfezionare esteticamente il prodotto finale.

I vantaggi offerti dall'utilizzo della Fused Deposition Modeling sono riconducibili alla possibilità di produrre parti definitive, alla facilità di rimozione dei supporti (se solubili), al consumo del materiale strettamente necessario per la costruzione del pezzo, senza sprechi, e alla possibilità di non effettuare alcuna operazione di post-trattamento nel caso la resa estetica del prodotto non sia di particolare interesse. È inoltre la tecnica più vantaggiosa economicamente per la realizzazione di prototipi o di prodotti personalizzati.

Tuttavia, la FDM porta con sé importanti svantaggi, tra cui:

- Le più basse prestazioni tra le tecniche di Additive Manufacturing in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiali;

- La generazione di tensioni residue e distorsioni sul componente a causa della contrazione del materiale durante il raffreddamento;
- L'anisotropia delle proprietà meccaniche del pezzo dovute al meccanismo di adesione tra uno strato e l'altro.

## *Capitolo 2: Obiettivi e metodologia d'indagine*

L'attività sperimentale di questo studio consiste nell'effettuare il benchmarking di alcune delle tecniche di Additive Manufacturing maggiormente consolidate tramite un'analisi dimensionale in termini di tolleranze dimensionali e geometriche. Nello specifico, le tecniche considerate sono quelle indicate nel paragrafo 1.5: Stereolitografia (SLA), Polyjet, Direct Light Projection (DLP) e Fused Deposition Modeling (FDM). Queste tecniche sono state utilizzate per realizzare i campioni dei benchmark, oggetto dell'analisi e che verranno descritti nel paragrafo successivo. In seguito, si tratteranno i metodi e le normative utilizzati per valutazione dei risultati ottenuti in termini di tolleranze dimensionali e geometriche dei campioni analizzati.

L'attività di benchmarking è stata effettuata ponendo a confronto alcuni campioni di ognuno dei due modelli proposti, differenziandoli in base a:

- Tecnica di Additive Manufacturing;
- Macchina utilizzata per la produzione;
- Materiale costituente;
- Parametri di processo in fase di costruzione.

### *2.1 Oggetto dell'analisi dimensionale*

L'analisi dimensionale è stata svolta utilizzando come modello due benchmark, i quali si distinguono sia per quanto riguarda le dimensioni che per i materiali impiegati, limitandosi comunque al campo dei polimeri.

Entrambi i pezzi di riferimento sono stati selezionati per rispettare i parametri standard della progettazione di benchmark, tra cui [15]:

- Possedere geometrie impiegate nei prodotti reali;
- Essere costituito da geometrie di diverse dimensioni;
- Dislocazione delle geometrie finalizzata a facilitare il processo di misurazione;
- Garantire varietà di forma delle geometrie, in modo da averne sia semplici che complesse, sia concave che convesse;
- Includere componenti allineati lungo tutti e tre gli assi;

- Consumare una ridotta quantità di materiale.

### 2.1.1 Benchmark n° 1

Il primo benchmark selezionato per l'analisi dimensionale corrisponde ad un modello già consolidato in letteratura, proposto da Minetola et al. [16] nel 2015. Si fornisce una sua illustrazione in figura 14.

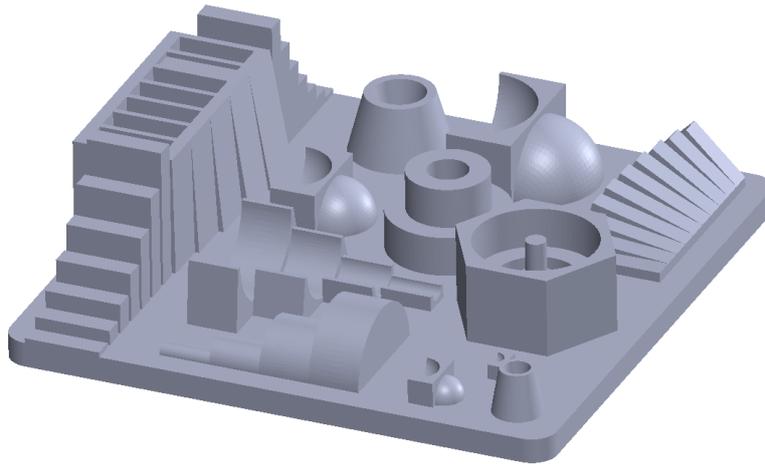


Figura 14. Modello benchmark n° 1

Le dimensioni nominali sono 110 x 110 x 33 mm, tali da consentirne la produzione tramite un'ampia gamma di sistemi di Additive Manufacturing, di qualsiasi fascia di prezzo.

In accordo con le linee guida per la progettazione di benchmark, il modello presenta una serie di geometrie simili, ma di diversa grandezza. Ciò permette di farle rientrare in classi differenti del sistema di gradi ISO IT per effettuare una valutazione più significativa delle tolleranze dimensionali. Inoltre, la particolare dislocazione delle geometrie stesse ha permesso di esaminare la precisione del processo manifatturiero su tutti e tre gli assi e di valutare l'impatto dell'effetto staircase a seconda della diversa inclinazione della superficie in esame.

Al fine di eseguire una corretta analisi dimensionale, si è semplificata la misurazione utilizzando forme standard, come piani, cilindri, sfere e coni, escludendo superfici a forma libera che avrebbero solamente complicato il processo senza fornire indicazioni utili sulle prestazioni delle macchine. Così facendo, è stata sufficiente una configurazione unica della CMM per rilevare i punti, grazie alla libertà di movimento fornita alla testa su

cui è montato il tastatore. In aggiunta, l'impiego di geometrie semplici ha offerto un ulteriore vantaggio, che consiste nella possibilità di realizzare i campioni di riferimento senza applicare strutture di supporto.

Il benchmarking dimensionale del presente modello è stato effettuato su sette campioni, i quali sono stati realizzati tramite le seguenti tecniche:

- tre tramite Fused Deposition Modeling;
- due tramite Stereolitografia;
- due tramite Polyjet.

Per i pezzi prodotti dalla stessa tecnica, ognuno è stato realizzato tramite materiali diversi per fornire dati maggiormente indicativi per l'analisi. La loro produzione è stata quasi interamente commissionata all'azienda Stratasys, mentre solamente i campioni della Polyjet sono stati realizzati internamente al Politecnico di Torino, presso il laboratorio di Rapid Manufacturing (RMLAB).

### 2.1.2 Benchmark n° 2

Il secondo benchmark individuato per l'analisi dimensionale è illustrato tramite due diverse viste in figura 15 (a) e (b), in modo da evidenziare tutte le geometrie presenti.

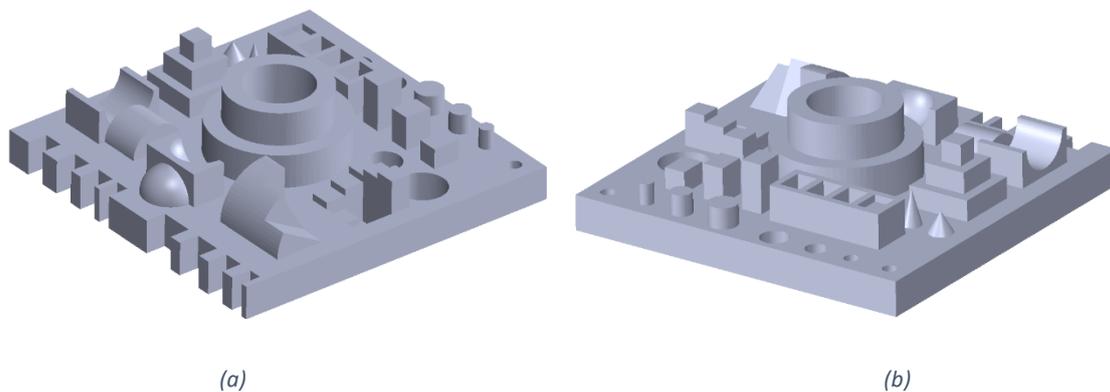


Figura 15. Modello benchmark n° 2 con vista (a) e vista (b)

In questo caso, le dimensioni nominali sono 50 x 50 x 15 mm. Un'importante ripercussione causata dalle dimensioni ridotte riguarda le classi del sistema di gradi ISO IT coinvolte nell'analisi, in quanto si è forzata l'esclusione delle due classi oltre i 50 mm poiché non sono più presenti geometrie ad esse associabili. Per contro, è stato possibile produrre la totalità dei campioni di riferimento presso il Politecnico di Torino, garantendo

una maggiore libertà nell'impostazione dei parametri di processo per poter così verificare gli effetti di una loro variazione.

Anche questo modello è costituito da geometrie standard, di varie dimensioni e orientamento, per assicurare che i processi di misurazione e analisi siano semplici e al tempo stesso accurati.

La maggiore autonomia nella produzione ha consentito di effettuare l'attività di benchmarking su un maggior numero di campioni prodotti dallo stesso sistema. Per questo modello, le tecniche coinvolte sono:

- Polyjet;
- Direct Light Projection.

Come già accennato, oltre ai diversi materiali impiegati, ogni singolo campione è stato prodotto variando i parametri del processo di costruzione. Nello specifico, la variazione ha riguardato lo spessore degli strati che formano il pezzo.

## ***2.2 Metodi di valutazione delle tolleranze***

Nei processi manifatturieri è inevitabile che le geometrie dei prodotti presentino differenze tra le misure reali e quelle nominali. Questi errori possono essere causati da difetti delle macchine utensili oppure da imprecisioni degli strumenti di misura impiegati nel controllo dimensionale. Risulta quindi essenziale riconoscere le deviazioni generate per valutare l'accuratezza del processo produttivo. A questo scopo vengono definiti degli intervalli, chiamati tolleranze, ai quali devono appartenere le misure reali delle diverse geometrie.

Le tolleranze rivestono un ruolo fondamentale in ambito manifatturiero poiché indicano quanto deve essere spinto un processo per garantire le prestazioni richieste. Ciò ovviamente si riflette anche sui costi di produzione, di conseguenza si rende necessario trovare un compromesso in base alle funzioni specificate in fase di progettazione.

Esistono due approcci per rappresentare gli scostamenti tra misure reali e nominali:

- Le tolleranze dimensionali, che regolano la misura di ciascuna geometria e sono definite dai gradi IT della normativa ISO;

- Le tolleranze geometriche, che considerano gli errori di forma di ogni geometria e le cui caratteristiche sono classificate dal sistema GD&T.

Questi due metodi non sono alternativi tra loro, in quanto si focalizzano su diversi aspetti per valutare la precisione globale del sistema. Entrambi sono quindi stati utilizzati per l'attività di benchmarking, che verrà trattata più avanti in questo elaborato. Di seguito, si fornisce una breve introduzione ai due approcci per chiarirne l'impiego nella presente analisi dimensionale.

### 2.2.1 Gradi ISO IT

I gradi IT (International Tolerance) della normativa ISO fanno parte di un metodo consolidato finalizzato a valutare la capacità in termini di precisione dimensionale di un processo manifatturiero. Essi definiscono una serie di intervalli che consentono di identificare, a seconda dello scostamento tra misura reale e nominale, il grado di appartenenza di ciascuna geometria del prodotto. La normativa prevede 20 gradi di tolleranza (IT01, IT0, IT1, ..., IT18) per geometrie di dimensioni nominali fino a 500 mm e 18 gradi (da IT1 a IT18) per misure da 500 mm a 3150 mm. Le tolleranze ammissibili variano a seconda della dimensione esaminata [17].

Considerando le caratteristiche tipiche dei processi produttivi di Additive Manufacturing e le dimensioni dei benchmark soggetti all'analisi dimensionale (vedi paragrafo 2.1), in questo studio vengono considerati solamente i gradi da IT5 a IT18 relativi a dimensioni nominali fino a 120 mm. In tabella 1 sono riportati i valori delle tolleranze per le suddette categorie.

Nominal size		International Tolerance Grade													
Above	Up to	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>2</sub> [mm]	Maximum tolerance in µm							Maximum tolerance in mm						
1	3	4	6	10	14	25	40	60	0.10	0.14	0.25	0.40	0.60	1.00	1.40
3	6	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.30	0.48	0.75	1.20	1.80
6	10	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.90	1.50	2.20
10	18	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.70	1.10	1.80	2.70
18	30	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.30	2.10	3.30
30	50	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1.00	1.60	2.50	3.90
50	80	13	19	30	46	74	120	190	0.30	0.46	0.74	1.20	1.90	3.00	4.60
80	120	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.40	2.20	3.50	5.40

Tabella 1. Classificazione dei gradi IT secondo la normativa ISO 286-1:2010 [17]

Entrando maggiormente nel dettaglio, i dati forniti in tabella 1, corrispondenti ai gradi da IT5 a IT18, sono calcolati tramite la formula (1):

$$T = n \cdot i$$

dove  $T$  [ $\mu\text{m}$ ] rappresenta il valore della tolleranza (limite inferiore) del grado IT considerato,  $n$  è il numero di unità di tolleranza e  $i$  [ $\mu\text{m}$ ] è un fattore standard di tolleranza.

Nella suddetta formula,  $n$  e  $i$  sono ricavati come segue (2) (3):

$$n = 10^{0.2 \cdot (ITG-1)}$$

$$i = 0.45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0.001 \cdot D$$

dove ITG rappresenta il grado IT considerato e  $D$  [mm] è la media geometrica delle dimensioni estreme  $D_1$  e  $D_2$  (4) [18]:

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2}$$

### 2.2.2 GD&T

GD&T, acronimo di “Geometric Dimensioning and Tolerancing”, è un linguaggio utilizzato in ambiti ingegneristici che sfrutta alcuni simboli per descrivere efficacemente le tolleranze geometriche dei prodotti. Il punto di forza di questo sistema risiede nella sua capacità di trasmettere le funzionalità richieste, lasciando il compito di definire i valori numerici delle tolleranze dimensionali delle singole geometrie ai gradi IT. Per questo motivo, entrambi i metodi sono utilizzati congiuntamente per fornire una migliore descrizione delle deviazioni rispetto alle dimensioni nominali.

Il sistema è composto da 14 caratteristiche geometriche a cui corrispondono un numero equivalente di simboli per rappresentarle [20]. Queste sono raggruppate in diverse categorie in base alle loro finalità:

- tolleranze di forma: controllano l'uniformità della superficie;
- tolleranze sull'orientamento: verificano l'inclinazione di una superficie rispetto ad un piano di riferimento;
- tolleranze di localizzazione: controllano la posizione del centro della geometria in relazione ad un riferimento;

- tolleranze del run-out: verificano la deviazione massima a seguito di una rotazione di 360° della geometria attorno al proprio asse.

Nello specifico di questo studio, per l'analisi dimensionale sono state impiegate le seguenti caratteristiche geometriche del sistema GD&T: planarità, cilindricità, parallelismo, perpendicolarità, angolarità, posizione, coassialità.

## ***Capitolo 3: Attività sperimentale di benchmarking dimensionale***

Come già accennato nel precedente capitolo, l'attività di benchmarking dimensionale è stata effettuata sia su campioni acquistati esternamente e quindi pronti per la misurazione, sia su campioni prodotti presso il Politecnico di Torino.

Nel paragrafo 3.1 si riporta quindi nel dettaglio il procedimento seguito per la realizzazione dei campioni e si presentano i sistemi che saranno oggetto del benchmarking, mentre nei paragrafi successivi si descrive il processo di misurazione delle geometrie finalizzato all'analisi dimensionale.

### ***3.1 Produzione dei campioni e macchine utilizzate***

Come descritto nel paragrafo 1.3, la produzione dei singoli campioni richiede il compimento di una serie di passaggi. Avendo già a disposizione il file CAD del modello del benchmark in formato STL, il primo passo eseguito è coinciso con l'importazione del file all'interno del software di gestione del sistema di Additive Manufacturing. Tramite il software, è stato possibile definire l'orientamento del pezzo, selezionare i parametri di processo e pianificare le caratteristiche e la dislocazione delle strutture di supporto. Stabilite queste informazioni, il software ha effettuato automaticamente il sezionamento del modello con strati di dimensioni pari allo spessore selezionato. A questo punto, è stato possibile trasmettere il file alla macchina per costruire il campione.

Le macchine utilizzate presso il Politecnico di Torino per realizzare i pezzi sono due: la Sharebot Rover e la Objet30 Prime. Per ragioni legate al volume di lavoro disponibile, la prima è stata impiegata solamente per la costruzione dei campioni riferiti al benchmark di dimensioni 50 x 50 x 15 mm, mentre la seconda è stata utilizzata per la realizzazione dei campioni di entrambi i benchmark. Nel seguito si riportano le principali caratteristiche di queste due macchine.

I restanti campioni del benchmark di dimensioni 110 x 110 x 33 mm sono stati invece commissionati all'azienda Stratasys, che per la loro produzione ha usato le seguenti macchine: Fortus 450mc, Fortus 400mc e V650 Flex 3D.

È importante far presente che, terminata la fabbricazione, non sono state eseguite operazioni di post-processo che avrebbero modificato la precisione superficiale dei campioni. La motivazione risiede nella scelta di voler osservare le reali prestazioni dei processi di lavorazione dei sistemi analizzati.

### 3.1.1 Sharebot Rover

La Sharebot Rover (figura 16) è una macchina che sfrutta i principi della tecnica DLP per solidificare una resina fotosensibile tramite l'applicazione di un fascio di luce UV. La gamma di materiali disponibili è studiata dall'azienda stessa per fornire all'oggetto stampato diverse caratteristiche tecniche e funzionalità.



Figura 16. Sistema Sharebot Rover [21]

Le specifiche tecniche della macchina sono riportate in tabella 2.

<b>Specifiche tecniche Sharebot Rover</b>	
Volume di stampa massimo	62 x 115 x 100 mm
Risoluzione x-y	47 $\mu$ m
Risoluzione z (spessore strato)	Min. 20 $\mu$ m, max. 100 $\mu$ m
Dimensioni	460 x 353 x 200 mm
Peso	15 kg

Tabella 2. Specifiche tecniche sistema Sharebot Rover [21]

Tramite la Sharebot Rover sono stati realizzati sei campioni del modello di riferimento n° 2 (vedi paragrafo 2.1.2). Questi sono stati suddivisi tramite due diverse impostazioni in relazione allo spessore dello strato: 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . Inoltre, per ogni categoria di spessore sono state impiegate tre diverse resine fotopolimeriche: S-Clear, S-Hard e G-Strong.

Per produrre i pezzi sopraelencati è stato scelto di impostare un angolo di lavorazione di 45°. Ciò ha inciso negativamente sui tempi di realizzazione poiché il campione è stato suddiviso in un maggior numero di strati, ma ha consentito di ottenere una migliore precisione di stampa.

Per ogni campione, terminata la fase di produzione si è reso necessario eseguire alcune attività di post-processing. Innanzitutto, il pezzo è stato rimosso dalla macchina, immerso in una soluzione di alcool isopropilico e inserito all'interno di una macchina ad ultrasuoni per 30 minuti, con lo scopo di rimuovere i residui di resina in eccesso. In seguito, si è effettuata manualmente la rimozione dei supporti e si è inserito il campione all'interno di un forno con camera a raggi UV per 20 minuti per completare la polimerizzazione del materiale e stabilizzare le geometrie.

### 3.1.2 Stratasys Objet30 Prime

La Objet30 Prime di Stratasys (figura 17) si basa invece sulla tecnica Polyjet. Essa offre tre diverse modalità di stampa, selezionabili a seconda delle caratteristiche richieste in termini di precisione e tempistiche di produzione.

I dettagli riguardo le specifiche tecniche sono indicati in tabella 3.

<b>Specifiche tecniche Objet30 Prime</b>	
Volume di stampa massimo	294 x 192 x 148,6 mm
Risoluzione x-y-z	600 x 600 x 1600 dpi
Spessore strato	16 $\mu\text{m}$ ; 28 $\mu\text{m}$
Dimensioni	826 x 600 x 620 mm
Peso	106 kg

Tabella 3. Specifiche tecniche stampante Objet30 Prime [22]



Figura 17. Stampante 3D Stratasys Objet30 Prime [22]

La Objet30 Prime è stata utilizzata per produrre due campioni di entrambi i benchmark. Per il primo modello (vedi paragrafo 2.1.1), i due pezzi si differenziano sia per il materiale impiegato che per lo spessore del layer, rispettivamente di 16  $\mu\text{m}$  e 28  $\mu\text{m}$ . Anche in questo caso, i materiali utilizzati sono resine fotopolimeriche, denominate rispettivamente Vero-White e Vero-Clear. Per entrambi i campioni del secondo modello è stato invece impiegato lo stesso materiale (Vero-Clear), ma si è differenziato lo spessore dello strato, sempre di 16  $\mu\text{m}$  e 28  $\mu\text{m}$ .

Contrariamente a ciò che è avvenuto per la DLP, la tecnica Polyjet ha richiesto minime attività di post-processo, quali la rimozione manuale dello strato di supporto e la rimozione di eventuali residui con getto d'acqua a pressione.

### 3.1.3 Altri sistemi

La produzione dei restanti campioni, tutti relativi al primo benchmark, da sottoporre alla misurazione è stata commissionata all'azienda Stratasys. Di seguito si fornisce un elenco delle macchine e dei materiali utilizzati per la produzione:

- Stratasys Fortus 450mc: sistema che si basa sulla tecnica Fused Deposition Modeling le cui specifiche tecniche sono indicate in tabella 4.

<b>Specifiche tecniche Fortus 450mc</b>	
Volume di stampa massimo	406 x 355 x 406 mm
Risoluzione x-y	Non fornita
Spessore strato	127 µm; 178 µm; 254 µm; 330 µm
Dimensioni	1295 x 902 x 1984 mm
Peso	601 kg

Tabella 4. Specifiche tecniche Stratasys Fortus 450mc [23]

I due campioni realizzati con questa macchina sono costituiti rispettivamente dai materiali Antero800NA e Policarbonato (PC\_White), entrambi polimeri termoplastici.

- Stratasys Fortus 400mc: anche questa macchina sfrutta la tecnica FDM. Le specifiche tecniche sono riportate in tabella 5.

<b>Specifiche tecniche Fortus 400mc</b>	
Volume di stampa massimo	355 x 254 x 254 mm
Risoluzione x-y	Non fornita
Spessore strato	127 µm; 178 µm; 254 µm; 330 µm
Dimensioni	1281 x 895,35 x 1962 mm
Peso	687 kg

Tabella 5. Specifiche tecniche Stratasys Fortus 400mc [24]

Tramite la Fortus 400mc è stato prodotto un unico campione con il materiale PPSF, cioè il polifenilsulfone (noto anche come PPSU), sempre della categoria dei polimeri termoplastici.

- Stratasys V650 Flex 3D: sistema di stereolitografia che presenta le seguenti specifiche tecniche (tabella 6).

<b>Specifiche tecniche V650 Flex 3D</b>	
Volume di stampa massimo	508 x 508 x 584 mm
Risoluzione x-y	2000 dpi
Spessore strato	Min. 100 µm
Dimensioni	2110 x 1400 x 2440 mm
Peso	998 kg

Tabella 6. Specifiche tecniche Stratasys V650 Flex 3D [25]

Il singolo campione realizzato con questa macchina è costituito da una resina fotopolimerica denominata Somos\_Next.

### 3.2 Sistemi di rilevamento dei punti

Per effettuare la misurazione è necessario dotarsi di adeguati sistemi in grado di rilevare con precisione le geometrie dell'oggetto in esame. Questi sistemi sono solitamente costituiti da [1]:

- Dispositivi di acquisizione: sensori, sonde o tastatori tramite i quali avviene la rilevazione dei punti, con o senza contatto con il pezzo;
- Apparatî di trasporto e supporto: strutture che consentono lo spostamento del dispositivo di acquisizione e, durante il processo di misura, la definizione della posizione e dell'orientamento del sistema;
- Eventuale attrezzatura ausiliaria: strumenti predisposti per il sostegno e il bloccaggio dell'oggetto.

Sul mercato è presente una vasta gamma di sistemi di acquisizione, di conseguenza si effettua tipicamente una classificazione basata inizialmente sulla metodologia di rilevamento, che può avvenire tramite scansione o digitalizzazione, e in seguito si differenzia tra procedimenti con o senza contatto [1]. In figura 18 è illustrata una comune classificazione dei sistemi di acquisizione dei punti.

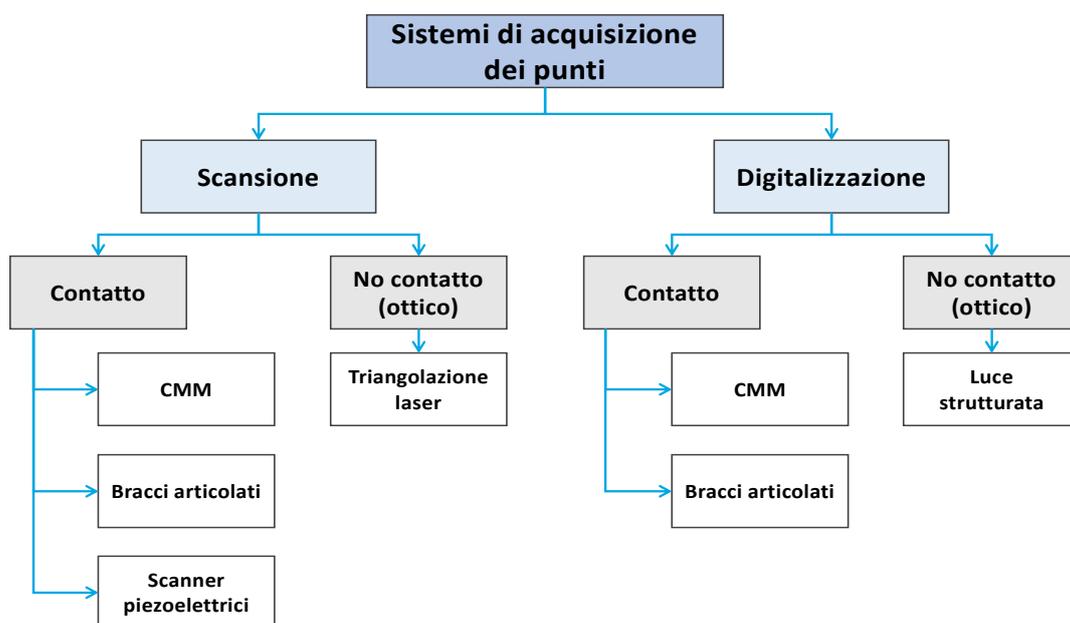


Figura 18. Classificazione sistemi di rilevamento dei punti

Ogni sistema utilizzabile offre differenti vantaggi, ma inevitabilmente porta con sé anche degli svantaggi, quindi è necessario ponderare la propria scelta in base alle caratteristiche richieste. Le diverse prestazioni sono riconducibili principalmente alla modalità di rilevamento. Infatti, i sistemi a contatto garantiscono una maggior precisione nella misurazione, ma sono limitati dalla lentezza del processo e dalla possibilità di operare solamente su pezzi di dimensioni ridotte. Inoltre, la pressione esercitata sulla superficie dell'oggetto durante la misurazione potrebbe causarne la deformazione, di conseguenza è opportuno che questo sia sufficientemente rigido per evitarla. I sistemi senza contatto, contrariamente, sono molto più efficienti in termini di velocità di acquisizione e non presentano problemi legati alla deformabilità del pezzo, tuttavia offrono una minore accuratezza e, talvolta, richiedono il trattamento della superficie con spray opacizzanti per assicurare la correttezza della misurazione.

Considerate le caratteristiche dei pezzi soggetti all'attività sperimentale, quali le ridotte dimensioni, la rigidità dei materiali di cui sono costituiti e la necessità di eseguire una misurazione ad elevata precisione per effettuare in seguito il benchmarking dei diversi prodotti, si è scelto di utilizzare un sistema a contatto e, nello specifico, una macchina di misura a coordinate (CMM).

### *3.2.1 Macchine di misura a coordinate (CMM)*

Le CMM, acronimo di "Coordinate Measuring Machine", sono dei dispositivi atti alla misurazione delle geometrie di oggetti fisici tramite la movimentazione di un tastatore a contatto (sonda). Come rappresentato in figura 19, esse sono tipicamente costituite da una piattaforma (C) sulla quale viene posizionato e fissato il pezzo per definirne il sistema di riferimento e da una struttura sovrastante (A) che include una testa, libera di muoversi sul piano x-y, su cui è montato il tastatore (B), che si muove invece lungo l'asse z. Le macchine di misura a coordinate sono anche accompagnate da una piattaforma desktop (D) che svolge la funzione di controllo.

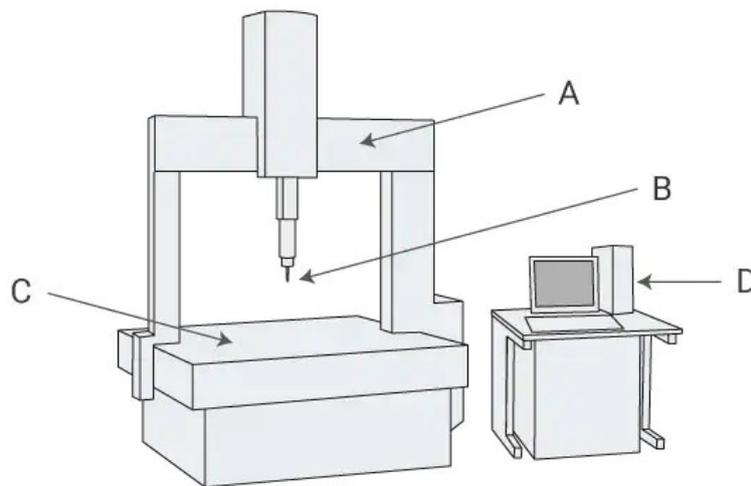


Figura 19. Sistema CMM a contatto [26]

La misurazione può essere effettuata manualmente tramite un joystick oppure automaticamente, sfruttando la presenza del sistema di controllo per impostare un percorso da seguire. In ogni caso, per ottenere un'adeguata accuratezza è necessario posizionare la macchina in un ambiente a temperatura controllata e assicurarsi che la temperatura dell'oggetto da misurare sia stabile. È inoltre richiesto, ad ogni avvio della macchina, calibrare il tastatore.

Le CMM sono molto diffuse per la semplicità di utilizzo e la precisione della misurazione, anche se la loro velocità di acquisizione dei punti rappresenta un limite importante.

Nel presente studio è stata utilizzata la macchina DEA Iota 0101 (figura 20), i cui parametri tecnici sono riportati in tabella 7.

#### Specifiche tecniche DEA Iota 0101

Volume di lavoro (x-y-z)	590 x 590 x 440 mm
Tipologia di movimentazione	Scorrimento tramite circuito aria compressa
Accuratezza [ $\mu\text{m}$ ]	$5 + 6 \cdot L$
Carico massimo	1000 kg

Tabella 7. Specifiche tecniche CMM DEA Iota 0101

Dove L [m] rappresenta la lunghezza della geometria misurata.



Figura 20. Macchina di misura a coordinate DEA Iota 0101

### ***3.3 Programmazione CMM e misurazione delle geometrie***

L'obiettivo dell'attività sperimentale è di ispezionare i pezzi di riferimento per verificarne la precisione dimensionale, tuttavia, prima di poterlo effettuare, è necessario compiere una serie di passaggi preliminari per assicurarsi che ci sia corrispondenza tra il modello matematico virtuale e le geometrie reali misurate.

Come affermato nel paragrafo precedente, si prevede che le macchine di misura a coordinate siano utilizzate in cooperazione con un sistema di controllo. Quest'ultimo si appoggia ad un software in grado di rilevare le coordinate dei punti acquisiti e di comandare alla CMM i movimenti da eseguire. In commercio sono disponibili diversi software e il loro impiego dipende tipicamente dalla macchina scelta. Per questo studio si è utilizzato PC-DMIS, che rappresenta il software di metrologia leader a livello globale.

Nella sua versione PC-DMIS CAD, la funzione principale risiede nell'ispezionare un oggetto fisico, dove la ricostruzione virtuale ottenuta dall'acquisizione dei punti viene confrontata con il relativo modello CAD precedentemente importato. Nello specifico, per la ricostruzione delle singole geometrie è utilizzato il metodo dei minimi quadrati [27]. È così possibile misurare gli scostamenti dai valori nominali per valutare le prestazioni del

sistema produttivo di Additive Manufacturing e l'influenza dei diversi parametri di processo.

Il software si avvale del modello CAD per riconoscere le geometrie del pezzo e facilitare all'operatore la programmazione, suggerendo la serie di movimenti necessari per una corretta misurazione, ma permettendo anche di apportare eventuali modifiche.

Si è quindi importato il file CAD corrispondente al campione da analizzare all'interno del software PC-DMIS in modo da avere a disposizione le dimensioni nominali del benchmark e di tutte le geometrie da misurare. A questo punto si sono presentati due scenari alternativi:

- misurare manualmente, tramite l'utilizzo di un joystick associato alla macchina di misura a coordinate, ogni singola geometria del pezzo oggetto di studio;
- programmare i movimenti della CMM in modo che la misurazione possa essere svolta automaticamente (ad esclusione della definizione del sistema di riferimento del benchmark e di eventuali modifiche al programma per garantire una corretta misurazione).

Considerando la necessità di eseguire il processo di misurazione su un numero elevato di campioni, per ragioni legate all'efficienza e alla ripetibilità del processo è stato selezionato il secondo metodo.

La programmazione è stata interamente effettuata su PC-DMIS, prendendo sempre come riferimento le dimensioni nominali del pezzo. In figura 21 si riporta un esempio di interfaccia del software, dove è possibile osservare:

- il codice per la programmazione dei movimenti da impartire alla macchina di misura a coordinate;
- Il modello CAD del benchmark in fase di misurazione;
- Le coordinate che identificano la posizione attuale del tastatore.

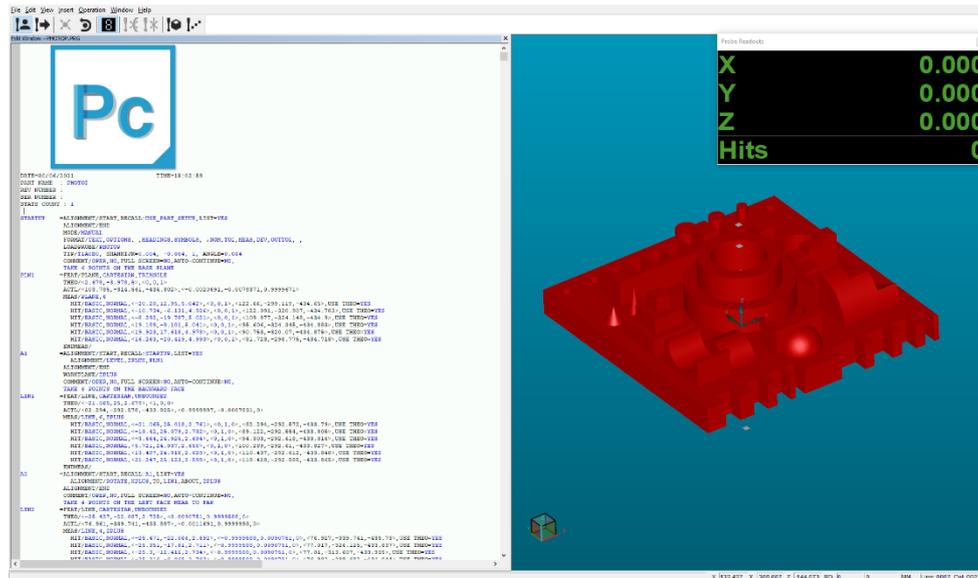


Figura 21. Interfaccia software PC-DMIS

Per ogni geometria presente è stato utilizzato il comando “Inserisci, Feature”, così che il software abbia potuto riconoscere la tipologia di geometria selezionata e generare in automatico una successione di movimenti della CMM per effettuare la misurazione. Per alcune geometrie sono stati modificati manualmente alcuni parametri per assicurare la corretta misurazione oppure semplicemente per ottenere una rappresentazione più accurata di esse. Siccome il sistema di rilevamento dei punti prevede la scansione per contatto e potrebbe quindi scontrarsi accidentalmente con un ostacolo, si è reso necessario impostare dei comandi aventi come scopo di garantire la mobilità del tastatore. Seguendo lo stesso principio, sono anche stati programmati gli spostamenti del tastatore svolti durante l’intervallo tra le misurazioni di differenti geometrie per ottenere un corretto posizionamento del tastatore stesso.

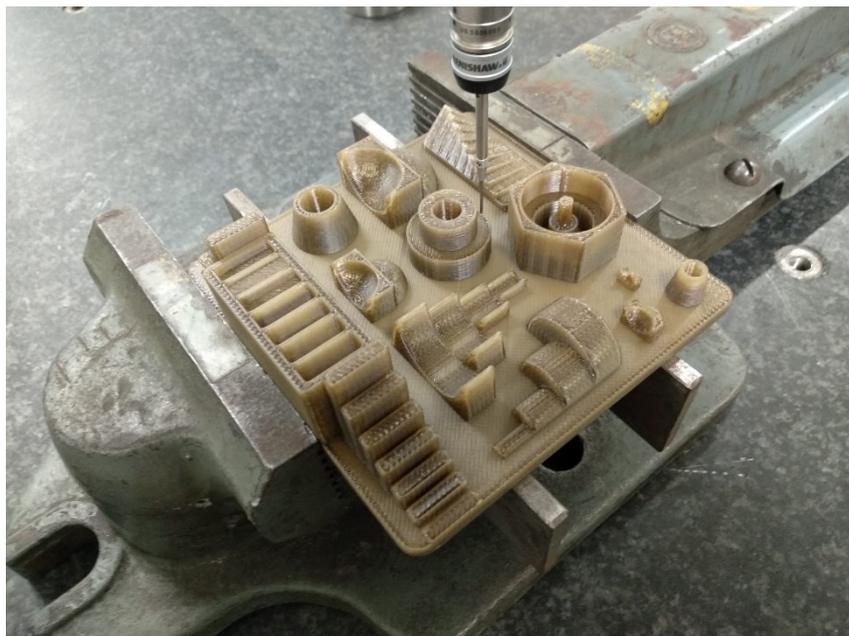
Terminata la programmazione dei movimenti per la misurazione, sul software PC-DMIS è stato inoltre strutturato un report per analizzare i risultati ottenuti. Si sono quindi selezionate le funzioni in grado di riportare gli scostamenti tra le dimensioni reali e quelle nominali di ogni geometria del benchmark, in modo da valutare le tolleranze dimensionali secondo il grado IT e quelle geometriche in base ai valori delle caratteristiche GD&T.

A questo punto è stato possibile procedere con il vero e proprio rilevamento dei punti. Come tipicamente avviene per l’utilizzo delle CMM, è stato eseguito un bloccaggio preventivo per evitare eventuali variazioni della posizione del pezzo durante il processo di misura. Inoltre, è stato necessario effettuare una calibrazione della macchina o, più

precisamente, del tastatore, con l'obiettivo di garantire la correttezza della misurazione delle geometrie.

La differenza delle dimensioni dei due benchmark ha influito sia sulla distanza tra le geometrie, sia sulle dimensioni delle geometrie stesse. Di conseguenza, per assicurare la corretta misurazione di tutte le geometrie si è reso necessario utilizzare due tastatori aventi un rubino sferico di diverso diametro. Nello specifico, per tutti i campioni del benchmark di dimensioni 110 x 110 x 33 mm è stato utilizzato un tastatore Renishaw con rubino di 2 mm di diametro, mentre per quelli relativi al benchmark di dimensioni 50 x 50 x 15 mm è stato utilizzato un tastatore Renishaw con rubino di diametro pari a 1 mm.

In seguito, si è avviato il programma precedentemente definito su PC-DMIS, il quale, prima di procedere automaticamente con la misurazione, ha richiesto di definire il sistema di riferimento del benchmark per avere una corrispondenza tra le coordinate impostate sul software e quelle effettive del tastatore della CMM. Questo procedimento è stato eseguito manualmente, prendendo dei punti sul pezzo utilizzando il joystick della macchina ed effettuando così un allineamento secondo il metodo 3-2-1. Definita l'origine, si è lanciato il programma e ha avuto inizio la fase automatica di misurazione e la conseguente compilazione del report. In figura 22 viene evidenziata la fase di misurazione del campione, dove è possibile osservare il sistema di bloccaggio, il tastatore e il campione stesso.



*Figura 22. Misurazione delle geometrie del campione*

Al termine del processo, il report è stato copiato su un file di testo e, quindi, importato su un file Excel per l'analisi dei risultati, di cui si tratterà nel capitolo 4.

Per ogni campione, l'intero processo di misurazione, compresi l'allineamento per la definizione dell'origine, la compilazione e l'esportazione del report, è stato ripetuto tre volte. Si è effettuata questa scelta per ottenere un maggior numero di dati sulle stesse geometrie, mitigando così gli effetti di errori casuali verificatosi durante la misurazione. In seguito, è stata calcolata la media dei risultati delle tre misurazioni per ottenere i valori definitivi associati a ciascun campione.

L'ultima attività da eseguire in preparazione dell'analisi dei risultati consiste nella creazione dei grafici riassuntivi delle prestazioni di ogni sistema in termini di tolleranze dimensionali tramite i gradi ISO IT e di tolleranze geometriche tramite le caratteristiche del sistema GD&T. A questo scopo è stato utilizzato il software R, il quale però ha richiesto il file Excel in formato CSV (Comma-Separated Values). Quindi, a partire dal file Excel contenente i valori definitivi di ciascun campione, sono stati generati i file di questo formato in modo da renderli leggibili per il software R.

I passaggi descritti in questo paragrafo sono stati ripetuti per la verifica dimensionale e la successiva generazione dei grafici di tutti i campioni disponibili.

## Capitolo 4: Analisi dei risultati

L'obiettivo dell'analisi consiste nel confrontare i diversi sistemi di Additive Manufacturing, valutandone le prestazioni in termini di tolleranze dimensionali tramite la normativa ISO dei gradi IT e di tolleranze geometriche tramite il sistema GD&T. Secondo quest'ottica, nei paragrafi successivi verranno effettuate le attività di benchmarking relativamente ai campioni di entrambi i modelli. Infine, saranno riportati i dati relativi ai costi e ai tempi di produzione per presentare un'analisi di trade-off di qualità, costi e tempi.

Per l'analisi è stato seguito il procedimento proposto da Minetola et al. [28], il quale, come detto in precedenza, per la valutazione delle prestazioni di ciascun sistema prevede la triplice ripetizione del processo di misurazione, finalizzata al calcolo della media dei valori ottenuti per ridurre l'impatto di eventuali errori. Questi valori sono poi utilizzati per calcolare i gradi IT associabili all'accuratezza di ciascun sistema di AM e quattro caratteristiche geometriche del sistema GD&T: planarità, parallelismo, perpendicolarità e coassialità.

Prima di addentrarsi nell'analisi, è necessario fare alcune precisazioni sul metodo di valutazione dell'accuratezza dimensionale di ciascun sistema. In accordo con la normativa ISO 286-1:2010 [17], per valutare il grado IT associato a ciascuna geometria si verifica in che intervallo della tabella 1 illustrata nel paragrafo 2.2.1 cade la deviazione misurata. In questo studio è stato utilizzato un metodo equivalente per rappresentare gli stessi intervalli, che tuttavia riconduce il calcolo del grado IT solamente al parametro  $n$ , corrispondente al numero di volte che il fattore di tolleranza  $i$  rientra nei diversi intervalli, come riportato in tabella 8.

Grado IT	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Tolleranza ( $n \cdot i$ )	$7i$	$10i$	$16i$	$25i$	$40i$	$64i$	$100i$	$160i$	$250i$	$400i$	$640i$	$1000i$	$1600i$	$2500i$

Tabella 8. Gradi IT per dimensioni da 1 mm a 500 mm [17]

In tabella 9 si indicano invece i valori assunti dal fattore  $i$  per le diverse classi dimensionali, calcolati tramite l'equazione (3) del paragrafo 2.2.1.

<b>Da</b>	<b>D<sub>1</sub> [mm]</b>	1	3	6	10	18	30	50	80
<b>A</b>	<b>D<sub>2</sub> [mm]</b>	3	6	10	18	30	50	80	120
<b>Fattore</b>	<b><i>i</i> [μm]</b>	0,542	0,733	0,898	1,083	1,307	1,561	1,856	2,173

Tabella 9. Fattore di tolleranza *i* per diverse classi dimensionali [28]

Tramite l'equazione (5) è quindi possibile calcolare il valore di  $n$ :

$$n_j = \frac{1000 \cdot |D_{jn} - D_{jm}|}{i}$$

dove  $D_{jn}$  e  $D_{jm}$  rappresentano rispettivamente la dimensione nominale e la dimensione misurata della generica geometria  $j$ .

Calcolati i valori di  $n$  per tutte le geometrie, si è deciso, sempre seguendo il metodo proposto da Minetola et al. [28], di considerare quello corrispondente al 95-esimo percentile come rappresentativo del massimo errore dimensionale del sistema di Additive Manufacturing, associandone quindi il relativo grado IT per ogni classe dimensionale.

Infine, per quanto riguarda l'esposizione dei risultati, è stato ritenuto preferibile utilizzare dei grafici ad istogrammi per le tolleranze dimensionali e dei grafici a box-plot per le tolleranze geometriche.

Per accompagnare l'analisi e favorire una comparazione visiva delle prestazioni dei sistemi sono inoltre illustrate, per ogni campione, le acquisizioni a microscopio di alcuni dettagli superficiali ritenuti più indicativi per la valutazione dell'accuratezza dimensionale.

#### 4.1 Analisi dimensionale benchmark n° 1

Per il presente benchmark si è deciso di suddividere l'analisi secondo i seguenti passaggi:

- Confronto tra i sistemi appartenenti alla stessa tecnica di fabbricazione, allo scopo di selezionare quello maggiormente rappresentativo;
- Comparazione delle diverse tecniche.

Il sistema selezionato come rappresentante di ciascuna tecnica è quello che offre le migliori prestazioni globali tra quelli confrontati, tenendo in considerazione sia le tolleranze dimensionali che quelle geometriche. È stata effettuata questa scelta poiché si è ritenuto maggiormente rappresentativo per valutare le capacità garantite da ciascuna

tecnica considerata. Ulteriori dettagli sui criteri di determinazione del sistema migliore per ciascuna tecnica verranno presentati nel corso dell'analisi.

#### 4.1.1 Fused Deposition Modeling

In tabella 10 si riportano i sistemi FDM impiegati per la realizzazione dei tre campioni oggetto dell'analisi. Si ricorda che la loro produzione è stata commissionata all'azienda Stratasys.

Macchina	Spessore strato	Materiale
Fortus 450mc	254 $\mu\text{m}$	Antero800NA
Fortus 450mc	178 $\mu\text{m}$	PC_White
Fortus 400mc	254 $\mu\text{m}$	PPSF

Tabella 10. Sistemi tecnica FDM per benchmark n° 1

In figura 23 sono illustrati i dettagli superficiali di ciascun campione, ottenuti tramite l'acquisizione a microscopio.

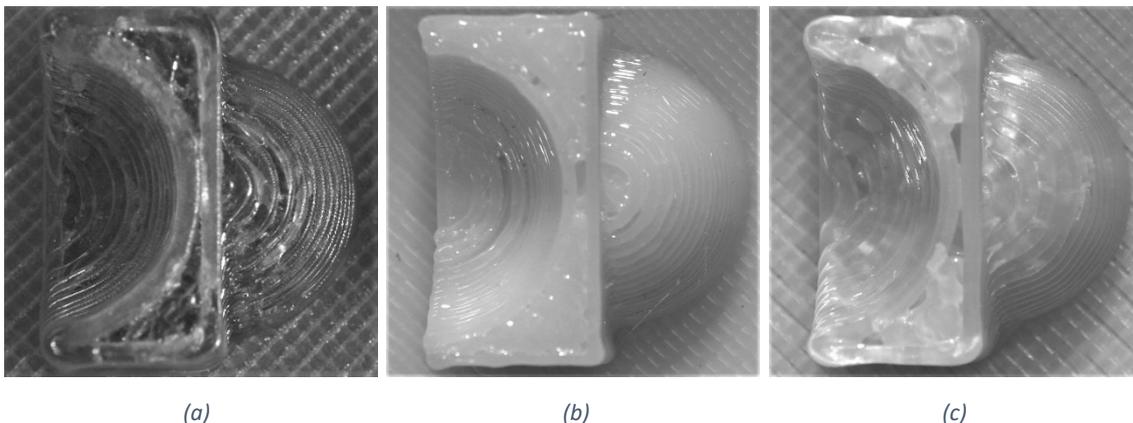


Figura 23. Dettagli superficiali campioni FDM di materiali (a) Antero800NA; (b) PC\_White; (c) PPSF

Si osserva che per tutti e tre i campioni è chiaramente visibile la separazione tra strati successivi causata dall'effetto staircase, sintomo di un'impresione piuttosto elevata dei tre sistemi impiegati per la loro fabbricazione.

Per approfondire il confronto, nelle tabelle 11, 12 e 13 si riassumono, rispettivamente per ognuno dei campioni, i risultati delle misurazioni che permettono di valutare la precisione dimensionale del sistema, definendone il grado IT di appartenenza. Oltre al valore di  $n$  corrispondente al 95-esimo percentile utilizzato per calcolare il grado IT, per ogni classe

di misura sono indicati i valori medi e la deviazione standard di  $n$  per favorire una comprensione più completa dei risultati.

**Antero800NA - Fortus 450mc**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 120
<b>Media</b>	166,044	132,471	136,563	119,223	116,979	32,701	37,489	28,001
<b>Dev.St</b>	115,843	110,659	115,837	84,011	102,036	22,873	27,350	18,575
<b>95%</b>	397,305	330,270	354,854	277,271	312,840	80,259	88,674	52,620
<b>Grado IT</b>	14	14	14	14	14	11	11	10

Tabella 11. Valutazione gradi IT Antero800NA - Fortus 450mc

**PC\_White - Fortus 450mc**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 120
<b>Media</b>	111,484	86,214	89,191	76,075	61,969	54,545	71,038	87,435
<b>Dev.St</b>	107,147	73,822	69,431	56,752	43,891	37,374	39,884	21,078
<b>95%</b>	327,398	228,186	226,084	170,315	134,621	126,277	134,417	123,470
<b>Grado IT</b>	14	13	13	13	12	12	12	12

Tabella 12. Valutazione gradi IT PC\_White - Fortus 450mc

**PPSF – Fortus 400mc**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 120
<b>Media</b>	168,372	157,019	143,742	98,858	86,196	71,854	98,806	115,618
<b>Dev.St</b>	141,309	126,476	101,109	87,810	72,542	40,602	41,514	38,317
<b>95%</b>	456,328	384,314	320,838	282,443	211,492	141,552	149,743	165,907
<b>Grado IT</b>	15	14	14	14	13	12	12	13

Tabella 13. Valutazione gradi IT PPSF – Fortus 400mc

In generale, si osserva che per tutti i campioni si verifica una diminuzione del grado IT, che corrisponde ad una maggiore precisione dimensionale, all'aumentare della grandezza delle geometrie. I gradi IT variano da un massimo di 15 ad un minimo di 10. È possibile, inoltre, notare che i valori di deviazione standard sono molto alti, ad indicare la presenza di una variabilità considerevole nelle prestazioni offerte, specialmente per quanto riguarda le geometrie fino a 30 mm. Ciò ha un forte impatto sul grado IT risultante,

poiché, nonostante i valori medi di  $n$  siano decisamente inferiori, per la sua determinazione si è deciso di considerare il valore corrispondente al 95-esimo percentile.

Per poter comparare visivamente le prestazioni dei suddetti sistemi, i valori del 95-esimo percentile di  $n$  indicati nelle precedenti tabelle sono raccolti nel grafico ad istogrammi di figura 24.

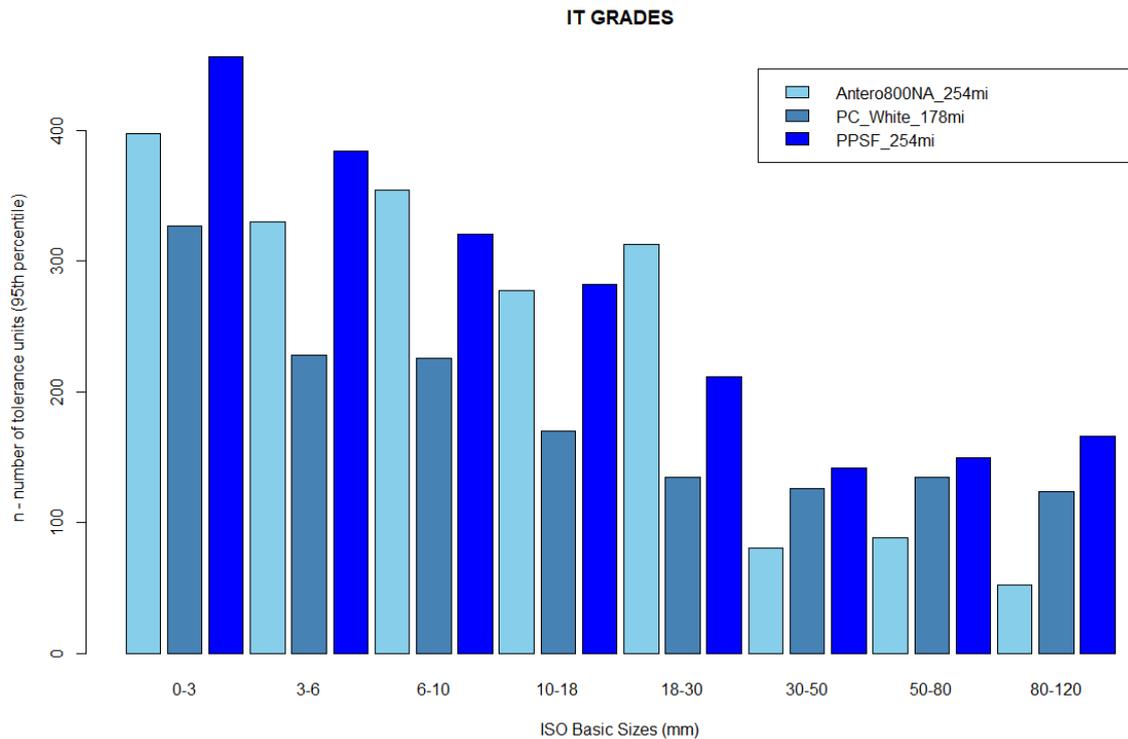


Figura 24. Comparazione dei sistemi FDM tramite gradi IT (95-esimo percentile di  $n$ ) per benchmark n° 1

Dal grafico si evince che le differenze tra i sistemi sono maggiori per le geometrie di dimensioni fino a 30 mm, mentre tendono ad assottigliarsi per le classi successive. È possibile affermare che il campione in materiale PC\_White prodotto con la macchina Fortus 450mc offre un'accuratezza migliore rispetto agli altri sistemi fino alla classe 18-30 mm, mentre dai 30 mm fino ai 120 mm si verifica un'inversione di tendenza e il materiale migliore diventa l'Antero800NA, sempre prodotto con la Fortus 450mc. Complessivamente, il campione in PPSF realizzato con la Fortus 400mc offre invece prestazioni peggiori in tutti i casi analizzati.

Dovendo valutare il sistema migliore tra i tre proposti solamente in termini di tolleranze dimensionali, quello selezionato sarebbe il Fortus 450mc con materiale PC\_White. La scelta si spiegherebbe ponderando le prestazioni fornite per tutte le classi dimensionali e premiando inoltre il comportamento maggiormente costante.

Per completare l'analisi dei diversi sistemi FDM è necessario effettuare il confronto anche per quanto riguarda le tolleranze geometriche, che si basa sulle caratteristiche geometriche del sistema GD&T. Nello specifico, le caratteristiche coinvolte nell'analisi sono: planarità (a sua volta suddivisa in base all'angolazione del piano), parallelismo, perpendicolarità e coassialità.

I valori ottenuti dalle misurazioni sono stati raccolti ed esposti sotto forma di box-plot in figura 25.

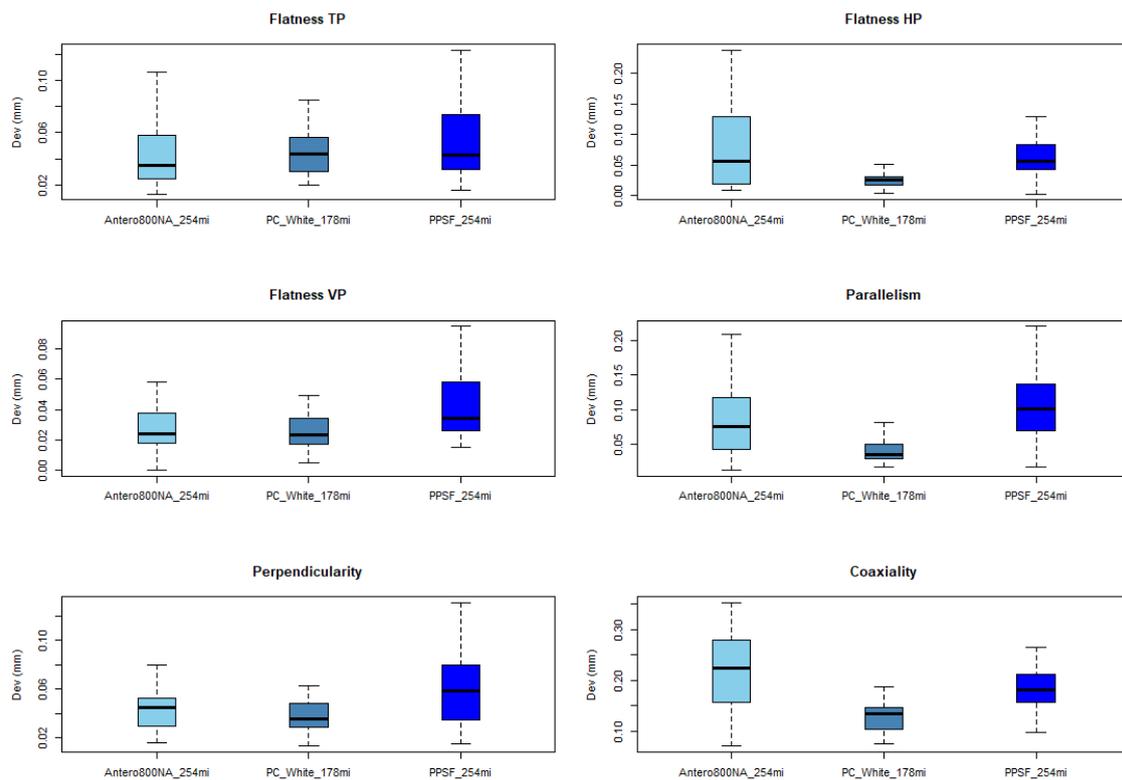


Figura 25. Comparazione dei sistemi FDM tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 1

Analizzando i valori di planarità, il sistema Fortus 450mc - PC\_White offre le migliori prestazioni. È inoltre possibile osservare, per ogni campione prodotto, un comportamento molto diverso a seconda dell'angolazione del piano considerato. Ponendo a confronto i risultati ottenuti nella presente analisi con quelli di studi precedenti [16] [28], le prestazioni del sistema Fortus 450mc - PC\_White sono in linea con le aspettative, in quanto la precisione è migliore per i piani orizzontali e peggiore per quelli inclinati a causa della presenza dell'effetto staircase. Il sistema Fortus 450mc - Antero800NA è invece in controtendenza con i risultati attesi, presentando valori di deviazioni per piani orizzontali doppi rispetto agli altri piani.

Anche per quanto riguarda il parallelismo, la perpendicolarità e la coassialità, si conferma la superiorità del sistema Fortus 450mc - PC\_White sia per i valori medi che per la dispersione dei risultati, mentre i due sistemi restanti offrono prestazioni tra loro altalenanti.

In conclusione, ai fini del confronto tra tecniche che verrà trattato nel paragrafo 4.1.4, considerando le prestazioni in termini di tolleranze sia dimensionali che geometriche, il sistema selezionato come rappresentante della tecnica Fused Deposition Modeling è il Fortus 450mc con materiale PC\_White. Si può giudicare il risultato in linea con le previsioni dato che questo presenta lo spessore dello strato minimo tra i sistemi a disposizione.

#### 4.1.2 Stereolitografia

In tabella 14 si riportano i sistemi SLA impiegati per la realizzazione dei due campioni oggetto dell'analisi. Anche in questo caso, la loro produzione è stata commissionata all'azienda Stratasys.

Macchina	Spessore strato	Materiale
Non indicata	127 $\mu\text{m}$	SC1000P
V650 Flex 3D	127 $\mu\text{m}$	Somos_Next

Tabella 14. Sistemi tecnica SLA per benchmark n° 1

Come in precedenza, in figura 26 sono mostrate le acquisizioni a microscopio dei dettagli dei due campioni analizzati.

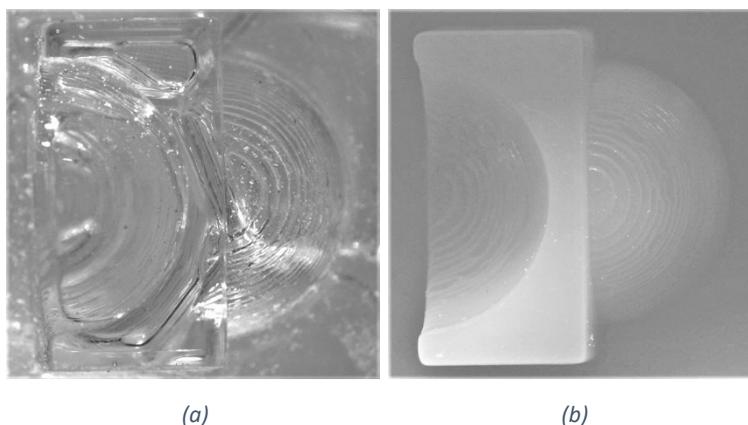


Figura 26. Dettagli superficiali campioni SLA di materiali (a) SC1000P; (b) Somos\_Next

Anche in questo caso è possibile notare la successione di strati in entrambi i campioni, ma l'altezza del layer inferiore rispetto ai sistemi FDM assicura un impatto ridotto, seppur ancora notevole, dell'effetto staircase.

Nelle tabelle 15 e 16 si riassumono, rispettivamente per ognuno dei campioni, i risultati delle misurazioni che permettono di valutare la precisione dimensionale del sistema, definendone il grado IT di appartenenza.

**SC1000P – Macchina non indicata**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 120
<b>Media</b>	313,675	212,901	174,827	153,492	104,494	42,714	43,056	30,748
<b>Dev.St</b>	271,052	186,632	160,701	132,357	105,310	32,069	29,413	21,372
<b>95%</b>	858,244	602,265	492,084	401,082	321,102	99,537	102,806	68,291
<b>Grado IT</b>	16	15	15	15	14	11	12	11

*Tabella 15. Valutazione gradi IT SC1000P*

**Somos\_Next - V650 Flex 3D**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 120
<b>Media</b>	189,943	131,782	108,511	94,545	60,773	25,748	29,263	32,201
<b>Dev.St</b>	179,101	134,862	116,397	84,263	63,376	22,233	20,875	15,301
<b>95%</b>	555,931	375,852	300,518	269,143	200,019	65,427	63,357	53,008
<b>IT</b>	15	14	14	14	13	11	10	10

*Tabella 16. Valutazione gradi IT Somos\_Next - V650 Flex 3D*

Come si verifica per la FDM, per i sistemi di stereolitografia si conferma la diminuzione del grado IT all'aumentare della grandezza delle geometrie. Anche in questo caso, i valori di deviazione standard di  $n$  per le geometrie di dimensioni fino a 30 mm sono molto alti, tuttavia si osserva una loro considerevole diminuzione per le classi successive, segnalando una grande variabilità nella precisione garantita a seconda delle diverse dimensioni considerate.

In figura 27 è illustrato il grafico di comparazione tra i due sistemi SLA in termini di tolleranze dimensionali secondo la normativa dei gradi ISO IT.

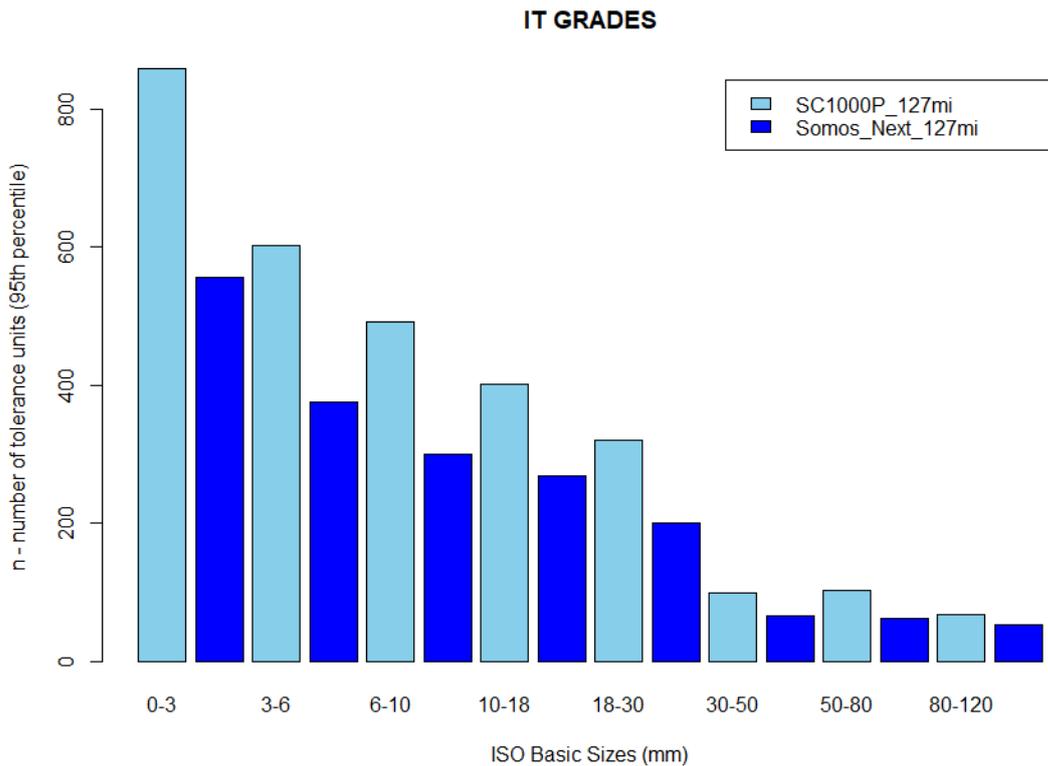


Figura 27. Comparazione dei sistemi SLA tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 1

Dal grafico è chiaramente visibile la migliore qualità del campione in materiale Somos\_Next, prodotto dalla macchina V650 Flex 3D, per qualunque dimensione considerata. Si osserva inoltre che, come in precedenza, le prestazioni dei due sistemi tendono ad equivalersi per le geometrie di grandi dimensioni.

Di seguito, in figura 28 si fornisce la comparazione tra i due sistemi in termini di tolleranze geometriche.

La superiorità del sistema V650 Flex 3D - Somos\_Next viene confermata anche dalla valutazione delle tolleranze geometriche, sia per quanto riguarda i valori medi che per il loro intervallo di variabilità, per tutte le caratteristiche geometriche considerate. È inoltre interessante osservare che, analizzando i campioni singolarmente, le differenze di planarità al variare dell'angolazione del piano sono minime, in contrapposizione a ciò che si è verificato per i sistemi FDM.

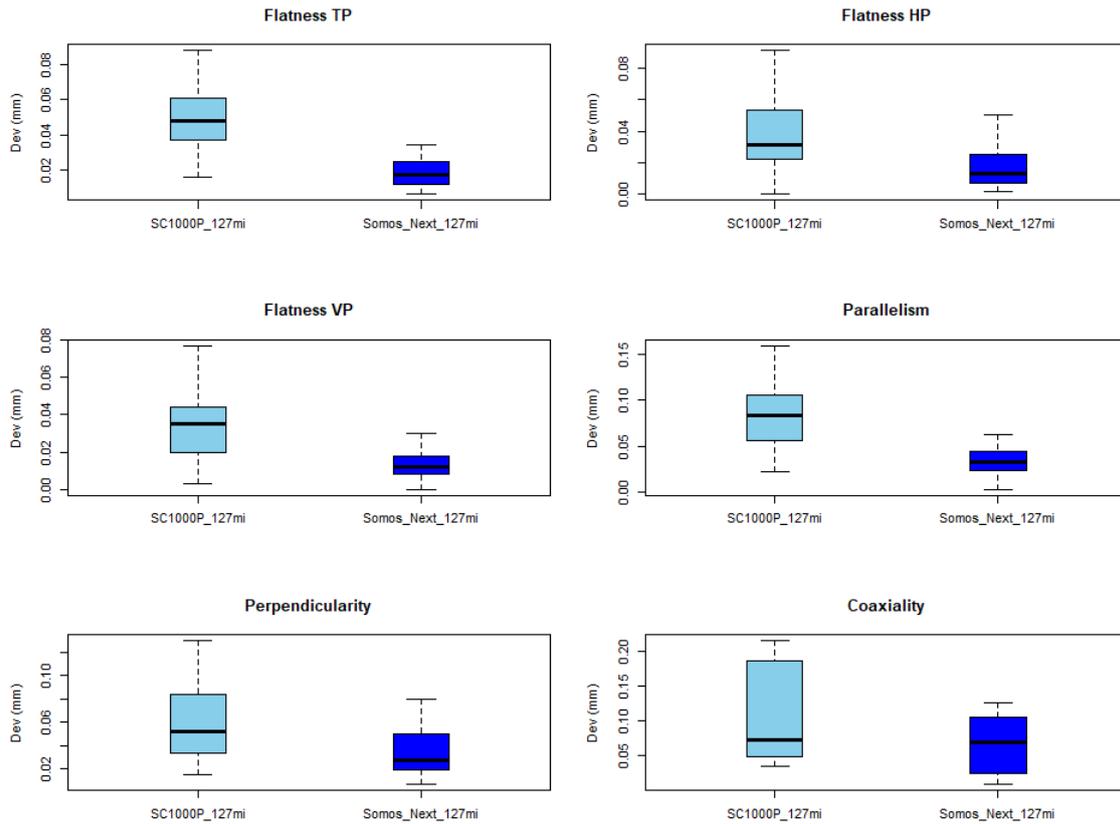


Figura 28. Comparazione dei sistemi SLA tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 1

In conclusione, per la comparazione tra tecniche del paragrafo 4.1.4, il sistema selezionato come rappresentante della Stereolitografia è il V650 Flex 3D con il materiale Somos\_Next, poiché offre migliori prestazioni sia in termini di tolleranze dimensionali che geometriche.

#### 4.1.3 Polyjet

In tabella 17 si riportano i sistemi basati sulla tecnica Polyjet impiegati per la realizzazione dei due campioni oggetto dell’analisi. In questo caso, i pezzi sono stati fabbricati presso il Politecnico di Torino.

Macchina	Spessore strato	Materiale
Objet30 Prime	28 μm	Vero_White
Objet30 Prime	16 μm	Vero_Clear

Tabella 17. Sistemi tecnica Polyjet per benchmark n° 1

In figura 29 sono illustrati i dettagli superficiali di ciascun campione oggetto del confronto.

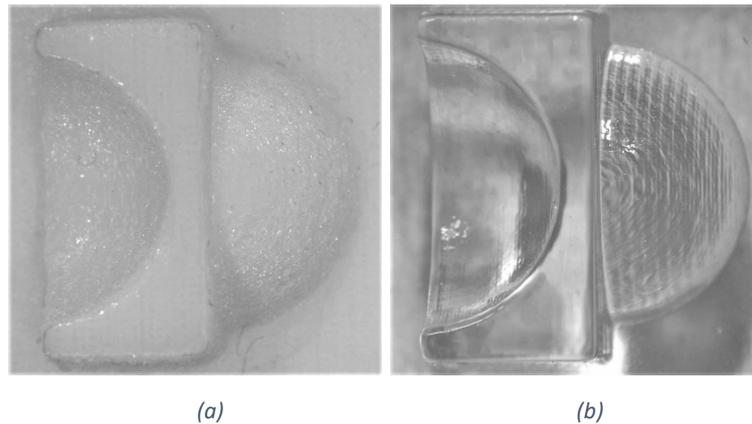


Figura 29. Dettagli superficiali campioni Polyjet di materiali (a) Vero\_White; (b) Vero\_Clear

Si osserva immediatamente una minore identificabilità degli strati che compongono i pezzi, segno che ci si può aspettare un'accuratezza migliore rispetto ai sistemi analizzati in precedenza. Un grande contributo a questo risultato è sicuramente attribuibile alla minima altezza del layer tra i sistemi finora considerati.

Per quanto riguarda l'analisi quantitativa, nelle tabelle 18 e 19 si riassumono, rispettivamente per ognuno dei campioni, i risultati delle misurazioni che permettono di valutare la precisione dimensionale dei due sistemi, definendone il grado IT di appartenenza.

**Vero\_White - Objet30 Prime**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 120
<b>Media</b>	102,061	85,240	77,908	71,228	69,513	53,655	42,147	49,688
<b>Dev.St</b>	78,801	99,559	88,139	77,327	73,329	51,926	32,722	29,658
<b>95%</b>	224,477	223,547	272,629	237,004	220,671	159,874	103,333	104,786
<b>Grado IT</b>	13	13	14	13	13	12	12	12

Tabella 18. Valutazione gradi IT Vero\_White - Objet30 Prime

**Vero\_Clear - Objet30 Prime**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 120
<b>Media</b>	36,433	34,031	26,465	27,304	28,430	30,210	36,941	48,819
<b>Dev.St</b>	26,687	35,025	27,665	22,254	22,695	16,030	18,452	13,924
<b>95%</b>	79,314	75,334	60,905	66,130	62,339	57,644	66,050	70,973
<b>Grado IT</b>	11	11	10	11	10	10	11	11

Tabella 19. Valutazione gradi IT Vero\_Clear - Objet30 Prime

Il dato più importante da evidenziare osservando questi risultati riguarda il valore dei gradi IT associati a questa tecnica, che, specialmente per il sistema Objet30 Prime - Vero\_Clear, garantiscono una precisione dimensionale decisamente migliore rispetto alle tecniche precedentemente analizzate. Inoltre, l'andamento dei gradi IT si dimostra, in questo caso, molto più lineare, indicando una buona accuratezza anche per le geometrie di dimensioni ridotte.

Un ulteriore parametro che risulta in discordanza con i risultati ottenuti nell'analisi delle precedenti tecniche è la varianza dei valori di  $n$ , anch'essa inferiore e con andamento più costante. Siccome questa influisce sul valore del 95-esimo percentile di  $n$ , ha un impatto anche sul grado IT risultante.

Seguendo il procedimento svolto per l'analisi delle precedenti tecniche, si raccolgono i valori del 95-esimo percentile di  $n$  nel grafico di figura 30 per confrontare visivamente i due sistemi Polyjet.

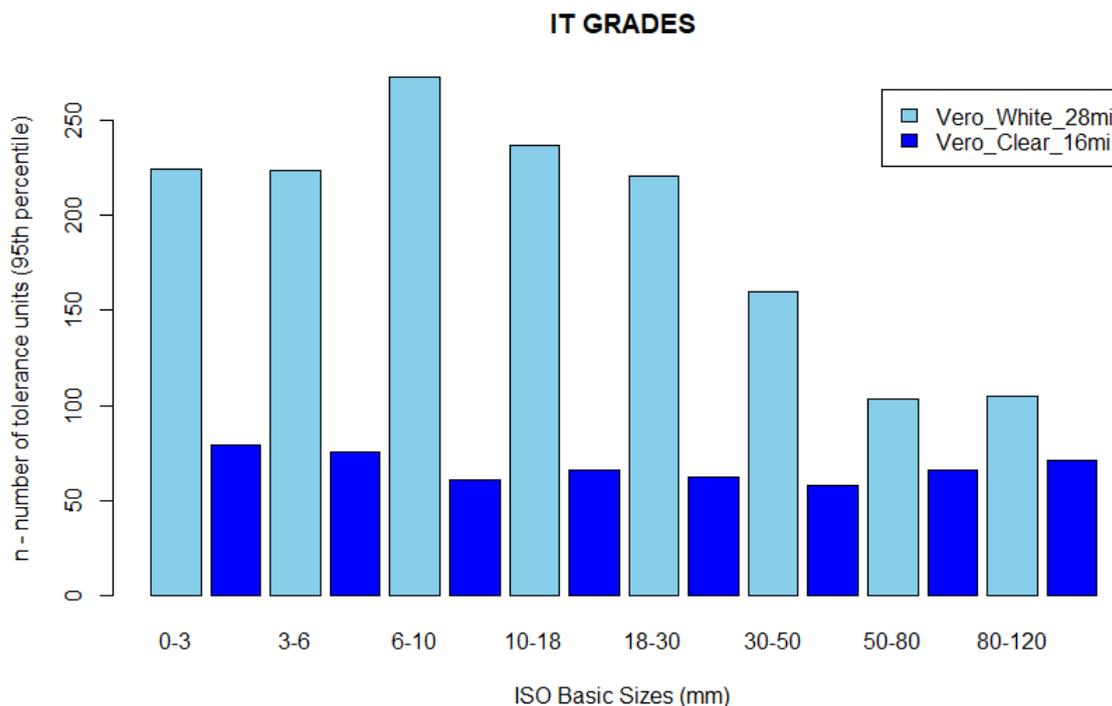


Figura 30. Comparazione dei sistemi Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di  $n$ ) per benchmark n° 1

Dal grafico si evince la netta superiorità del sistema Objet30 Prime - Vero\_Clear per quanto riguarda le tolleranze dimensionali per tutte le dimensioni considerate. Le motivazioni sono in gran parte riconducibili al minor spessore dello strato di materiale depositato e alle diverse proprietà delle due resine. Nonostante il diverso spessore del layer

utilizzato dai due sistemi, anche per quanto riguarda la tecnica Polyjet la differenza di accuratezza risulta minima per le geometrie di grandi dimensioni.

Infine, si effettua il confronto tra i due sistemi anche per quanto riguarda le tolleranze geometriche, di cui si riporta il grafico valutativo in figura 31.

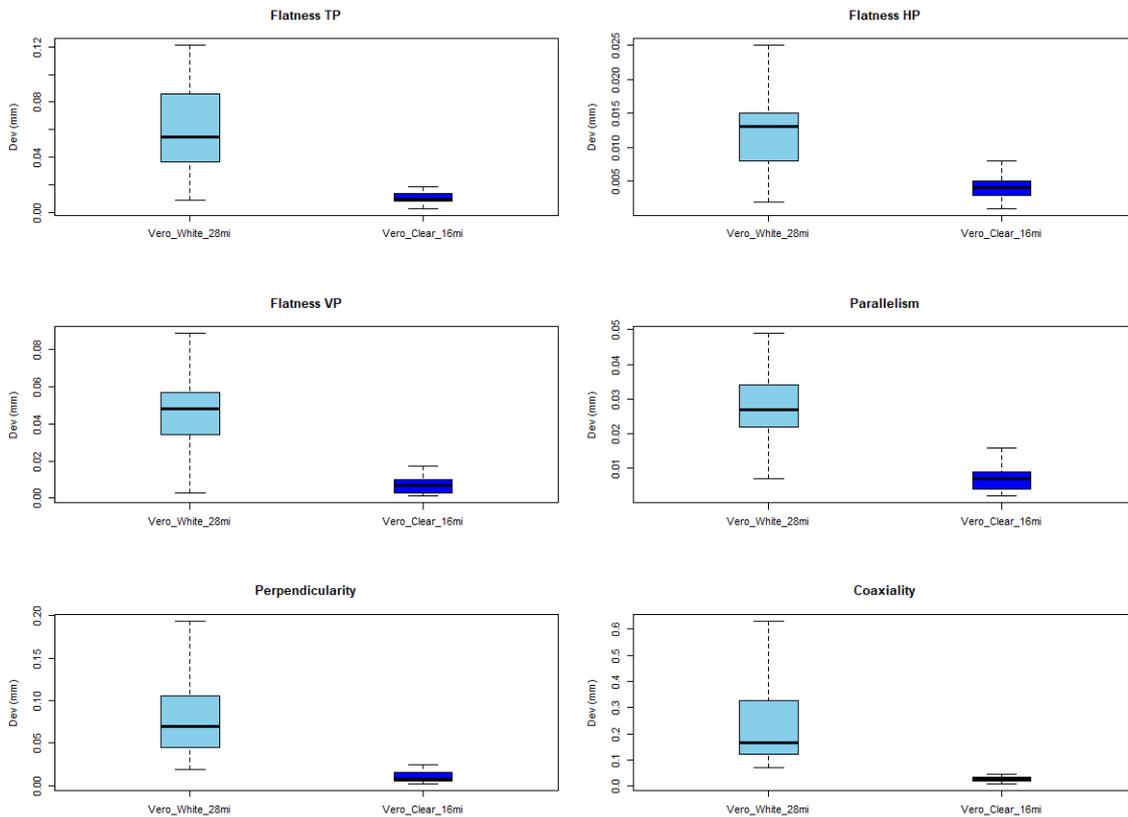


Figura 31. Comparazione dei sistemi Polyjet tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 1

Coerentemente con quanto osservato per la FDM, i valori peggiori di planarità si riscontrano per i piani inclinati, mentre i migliori per i piani orizzontali. Ciò è nuovamente attribuibile alla presenza o meno dell'effetto staircase sulla superficie valutata.

In generale, analizzando i valori delle caratteristiche geometriche è possibile confermare i risultati ottenuti dalla valutazione delle tolleranze dimensionali, secondo cui il sistema Objet30 Prime - Vero\_Clear garantisce le migliori prestazioni. La precedente affermazione è valida per tutte le caratteristiche geometriche considerate. La giustificazione di questi risultati si può nuovamente trovare nella differenza di spessore dello strato depositato.

In conclusione, dati i risultati precedentemente descritti, ai fini del confronto tra tecniche che verrà trattato nel paragrafo successivo, il sistema che rappresenta la tecnica Polyjet è formato dalla macchina Objet30 Prime associata al materiale Vero\_Clear.

#### 4.1.4 Confronto fra tecniche

Per concludere l'analisi dimensionale del benchmark di dimensioni 110 x 110 x 33 mm viene eseguita una comparazione dei sistemi maggiormente rappresentativi di ogni tecnica impiegata nella produzione dei campioni. In tabella 20 si riassumono quindi i sistemi selezionati per il confronto.

<b>Tecnica</b>	<b>Macchina</b>	<b>Spessore strato</b>	<b>Materiale</b>
FDM	Fortus 450mc	254 $\mu\text{m}$	PC_White
SLA	V 650 Flex 3D	127 $\mu\text{m}$	Somos_Next
Polyjet	Objet30 Prime	16 $\mu\text{m}$	Vero_Clear

Tabella 20. Tecniche di Additive Manufacturing confrontate e relativi sistemi per benchmark n° 1

Anche in questo caso, l'analisi è effettuata comparando le prestazioni delle tecniche inizialmente in termini di tolleranze dimensionali tramite la normativa ISO relativa ai gradi IT e in seguito in termini di tolleranze geometriche secondo il sistema GD&T.

In figura 32 viene quindi riportato il grafico di confronto dei valori del 95-esimo percentile di  $n$  per le tre tecniche.

Dal grafico è possibile ricavare alcune informazioni molto interessanti e talvolta in contrasto con le previsioni. Innanzitutto, osservando globalmente l'accuratezza delle diverse tecniche, quella maggiormente affidabile e in grado di fornire le migliori prestazioni è la Polyjet. Tuttavia, contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare, ciò non è valido per tutte le dimensioni analizzate.

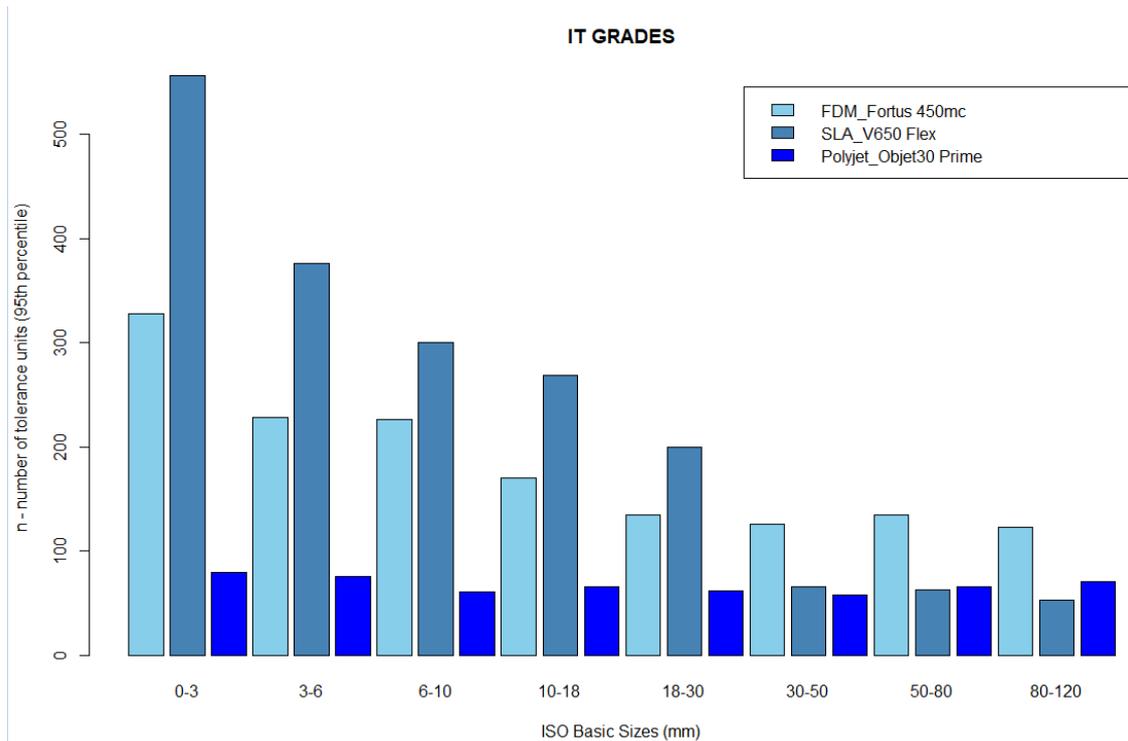


Figura 32. Comparazione tecniche FDM, SLA e Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 1

Per entrare maggiormente nel dettaglio e fornire una panoramica più precisa dei risultati si potrebbe suddividere il confronto a seconda delle classi dimensionali:

- Geometrie fino a 30 mm: è chiara la superiorità della tecnica Polyjet per tutte le classi dimensionali, mentre la stereolitografia offre le prestazioni decisamente peggiori, anche in confronto alla tecnica FDM. Considerando lo spessore dello strato associato ai diversi sistemi, questi risultati erano prevedibili per quanto riguarda la Polyjet (spessore layer di 16  $\mu\text{m}$ ), ma inaspettati in relazione alla scarsa accuratezza della stereolitografia (127  $\mu\text{m}$ ).
- Geometrie da 30 mm a 120 mm: sempre in relazione allo spessore del layer, si presenta un'imprevedibile inversione di tendenza. Infatti, le prestazioni fornite dalla tecnica SLA sono paragonabili o addirittura migliori rispetto alla Polyjet, mentre la FDM risulta la peggiore delle tre, seppure le differenze non siano elevate.

Le precedenti valutazioni indicano che non sempre il minore spessore dello strato garantisce le migliori precisioni dimensionali, di conseguenza ogni tecnica e ogni sistema presenta diverse caratteristiche che li rendono preferibili in determinate situazioni e peggiori in altre.

Effettuando un'ultima considerazione in relazione alle tolleranze dimensionali, anche per il confronto tra diverse tecniche si conferma la tendenza osservata nel confronto interno alle stesse. Infatti, all'aumentare della dimensione della geometria, la differenza di prestazioni delle diverse tecniche tende man mano ad assottigliarsi.

Passando alla valutazione delle tolleranze geometriche in base al sistema GD&T, in figura 33 si riporta il grafico comparativo dei valori delle caratteristiche geometriche per le tre tecniche considerate.

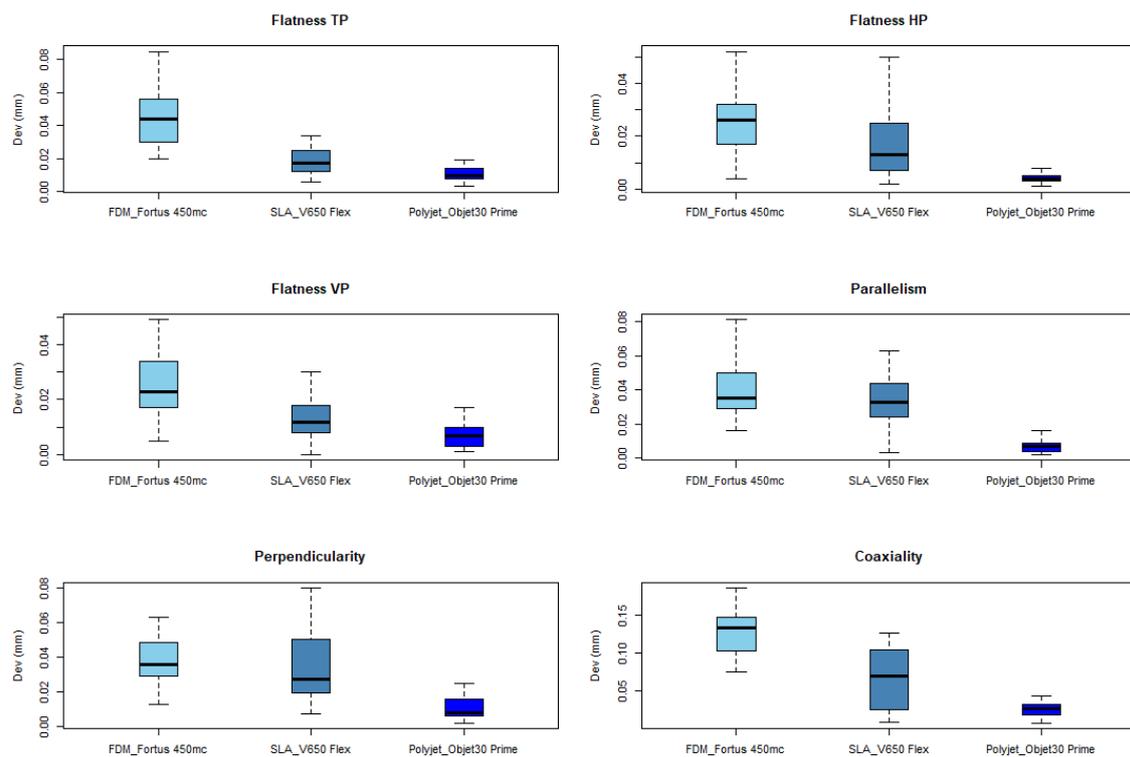


Figura 33. Comparazione tecniche FDM, SLA e Polyjet tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 1

Dal grafico si osserva che, in questo caso, si verifica una schiacciante superiorità della tecnica Polyjet, la quale prevale per ognuna delle caratteristiche geometriche analizzate. La stereolitografia si posiziona a metà classifica, poiché risulta migliore della tecnica FDM per quanto riguarda la planarità (per ogni tipo di angolazione dei piani) e la coassialità, mentre offre prestazioni paragonabili in termini di parallelismo e perpendicolarità. I risultati sono quindi in linea con le aspettative se si considera come fattore principale lo spessore dello strato di materiale depositato.

## 4.2 Analisi dimensionale benchmark n° 2

Per il benchmark di dimensioni 50 x 50 x 15 mm è stato scelto di seguire una modalità di analisi molto simile a quella applicata per il precedente benchmark, a cui però sono state apportate alcune modifiche. Ciò è dovuto al fatto che è stato utilizzato un minor numero di sistemi, ma è stata acquisita una maggiore quantità di dati su ognuno di essi. Inoltre, date le inferiori dimensioni del benchmark n° 2, nell'analisi finalizzata alla valutazione dei gradi IT verranno escluse le classi di dimensioni 50-80 mm e 80-120 mm.

In questo caso, verranno quindi eseguiti:

- Confronto tra i materiali impiegati nella tecnica DLP per due diversi spessori di strato preimpostati (50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ );
- Confronto tra le prestazioni offerte dallo stesso sistema della tecnica Polyjet al variare dell'altezza del layer (16  $\mu\text{m}$  e 28  $\mu\text{m}$ );
- Comparazione delle tecniche.

Coerentemente con quanto eseguito nell'analisi del benchmark n° 1, la comparazione delle tecniche viene effettuata confrontando i rappresentanti di ognuna di esse che forniscono le migliori prestazioni globali in termini di tolleranze dimensionali e geometriche.

Si fa presente che, nella seguente analisi, per la valutazione delle caratteristiche del sistema GD&T viene comunque tracciato il grafico relativo alla planarità dei piani inclinati, nonostante le geometrie corrispondenti siano solamente tre. Considerato il numero limitato di elementi costituenti il campione, i valori corrispondenti saranno solamente indicativi e non verranno inclusi nella formulazione del giudizio finale per ciascun confronto.

Si ricorda che tutti i campioni del presente benchmark sono stati prodotti presso il Politecnico di Torino.

### 4.2.1 Direct Light Projection con strato di 50 $\mu\text{m}$

In tabella 21 si riportano le caratteristiche dei tre campioni realizzati tramite la tecnica DLP aventi uno strato di spessore pari a 50  $\mu\text{m}$ .

Macchina	Spessore strato	Materiale
Rover	50 $\mu\text{m}$	S-Clear
Rover	50 $\mu\text{m}$	S-Hard
Rover	50 $\mu\text{m}$	G-Strong

Tabella 21. Sistemi tecnica DLP con strato 50  $\mu\text{m}$  per benchmark n° 2

Le relative acquisizioni a microscopio dei dettagli maggiormente significativi sono illustrate in figura 34.

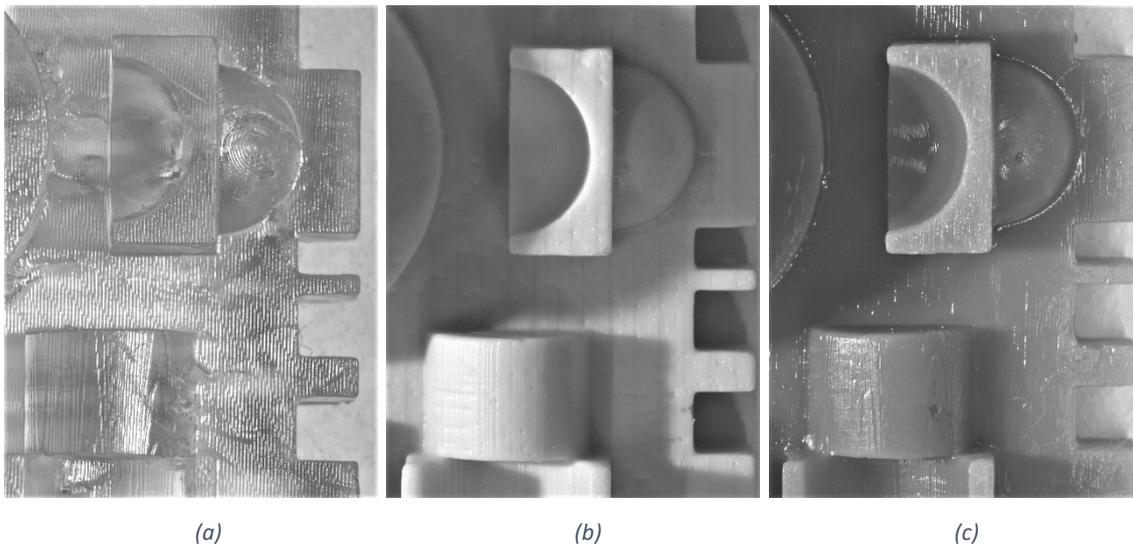


Figura 34. Dettagli superficiali campioni DLP con strato 50  $\mu\text{m}$  di materiali (a) S-Clear; (b) S-Hard; (c) G-Strong

L'angolazione di 45 gradi con cui sono stati prodotti questi campioni è diversa da quella utilizzata per quelli del benchmark n° 1. Ciò implica che la stratificazione del materiale generi un diverso impatto visivo, poiché rende l'effetto staircase più evidente su diverse tipologie di superfici, come ad esempio i piani orizzontali. La possibilità di osservare questi effetti rimane comunque un indicatore della ridotta qualità superficiale dei campioni.

I risultati delle misurazioni dei suddetti campioni sono riportati rispettivamente nelle tabelle 22, 23 e 24 per valutarne la precisione dimensionale secondo la normativa ISO relativa ai gradi IT. Come per il benchmark n° 1, per ogni classe di misura sono indicati il valore medio, la deviazione standard e il valore corrispondente al 95-esimo percentile del parametro  $n$ .

**S-Clear 50 $\mu$ m - Rover**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50
<b>Media</b>	171,889	128,042	111,724	101,495	87,729	92,562
<b>Dev.St</b>	198,550	151,725	129,638	97,838	67,934	79,526
<b>95%</b>	453,008	317,987	315,660	260,461	219,371	229,732
<b>Grado IT</b>	15	14	14	14	13	13

Tabella 22. Valutazione gradi IT S-Clear 50 $\mu$ m – Rover**S-Hard 50 $\mu$ m - Rover**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50
<b>Media</b>	157,519	138,829	111,080	97,904	91,930	86,418
<b>Dev.St</b>	116,810	106,365	83,555	73,125	68,352	59,250
<b>95%</b>	363,366	328,906	256,091	216,312	217,689	180,753
<b>Grado IT</b>	14	14	14	13	13	13

Tabella 23. Valutazione gradi IT S-Hard 50 $\mu$ m - Rover**G-Strong 50 $\mu$ m - Rover**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50
<b>Media</b>	177,109	125,967	94,483	100,050	121,926	153,066
<b>Dev.St</b>	154,963	107,983	81,747	79,849	77,998	74,887
<b>95%</b>	505,392	355,518	250,246	251,086	263,428	283,795
<b>Grado IT</b>	15	14	14	14	14	14

Tabella 24. Valutazione gradi IT G-Strong 50 $\mu$ m - Rover

Come già riscontrato nell'analisi dei campioni del precedente benchmark, i risultati delle misurazioni presentano:

- Gradi IT elevati (tra IT13 e IT15), generalmente decrescenti al crescere della dimensione considerata;
- Alti valori di deviazione standard, anch'essi decrescenti per geometrie di dimensione maggiore, che impattano negativamente sul valore del 95-esimo percentile di  $n$  e quindi del grado IT corrispondente.

Per contro, non si verifica quel netto miglioramento della precisione dimensionale tipico dei sistemi analizzati per il benchmark n° 1, ad indicare che probabilmente è il sistema stesso a porre dei limiti.

Per favorire la comparazione delle prestazioni di questi sistemi, i valori del 95-esimo percentile di  $n$  indicati nelle precedenti tabelle sono raccolti nel grafico ad istogrammi di figura 35.

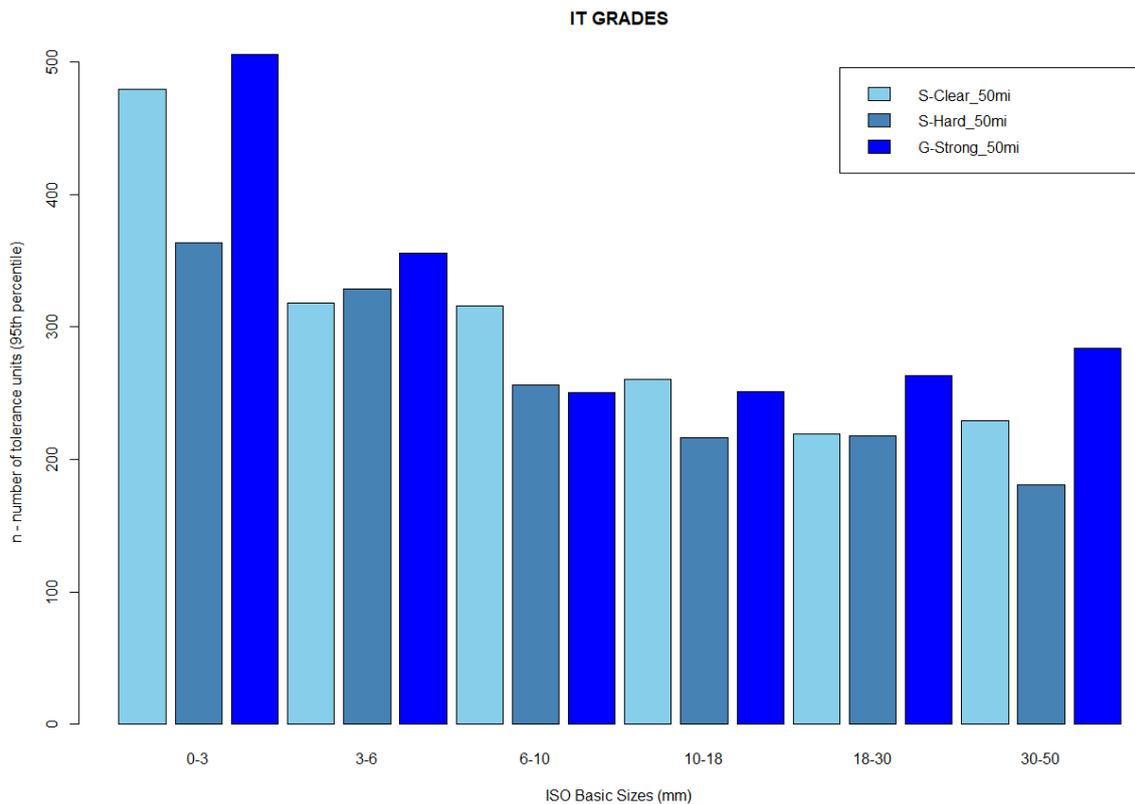


Figura 35. Comparazione dei sistemi DLP con strato 50  $\mu$ m tramite gradi IT (95-esimo percentile di  $n$ ) per benchmark n° 2

Nonostante sia la macchina utilizzata che i parametri di processo siano gli stessi, il grafico evidenzia che il diverso materiale impiegato ha un impatto sulla precisione dimensionale del campione. Ciò è giustificabile riflettendo sul processo seguito dalla tecnica DLP per la produzione dei pezzi. Infatti, la fotopolimerizzazione della resina produce un gradiente di temperatura che comporta, come conseguenza del raffreddamento, deformazioni e ritiro del materiale. Le diverse proprietà termiche di ogni materiale rendono più o meno influenti questi difetti, impattando quindi sull'accuratezza del processo produttivo.

Nel caso della presente analisi, la resina S-Hard è quella che mostra globalmente la migliore precisione, oltre ad essere quella che offre un comportamento costante per una maggiore affidabilità per qualunque classe dimensionale.

Per completare l'analisi delle prestazioni dei tre materiali impiegati è necessario effettuare il confronto anche per quanto riguarda le tolleranze geometriche, sempre basato sulle caratteristiche geometriche del sistema GD&T di planarità, parallelismo, perpendicolarità e coassialità. Si riportano quindi nel grafico in figura 36, sotto forma di box-plot, i valori d'interesse ottenuti dalle misurazioni.

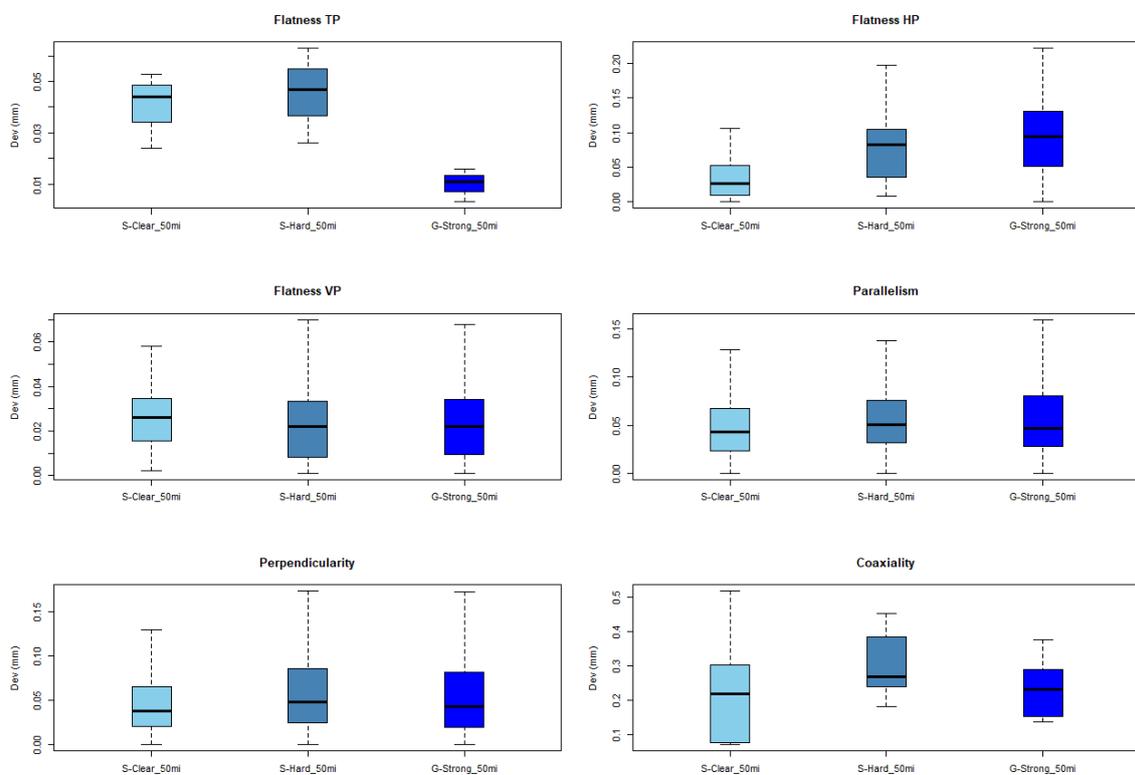


Figura 36. Comparazione dei sistemi DLP con strato 50  $\mu$ m tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 2

Dal grafico si evince che non c'è una resina che prevale sulle altre, poiché i valori misurati sono simili per tutte le caratteristiche geometriche analizzate (si ricorda che la planarità per i piani angolati non fa contesto).

Un risultato in contrasto con le aspettative riguarda la comparazione tra le planarità dei piani orizzontali e verticali. Infatti, la disposizione a 45 gradi dei campioni durante la loro fabbricazione implica che l'effetto staircase sia paragonabile per entrambe le tipologie di piano, tuttavia l'errore di forma misurato per i piani orizzontali è mediamente il triplo di quello per i piani verticali.

In conclusione, ai fini della comparazione tra tecniche del paragrafo 4.2.4, siccome le differenze in termini di tolleranze geometriche sono minime, la valutazione del sistema più performante si riconduce ai valori delle tolleranze dimensionali. Di conseguenza, la resina migliore risulta la S-Hard, che verrà considerata come rappresentante della tecnica DLP in caso di spessore di strato di 50  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.2 Direct Light Projection con strato di 100 $\mu\text{m}$

In tabella 25 si riportano le caratteristiche dei tre campioni realizzati tramite la tecnica DLP aventi uno strato di spessore pari a 100  $\mu\text{m}$ .

Macchina	Spessore strato	Materiale
Rover	100 $\mu\text{m}$	S-Clear
Rover	100 $\mu\text{m}$	S-Hard
Rover	100 $\mu\text{m}$	G-Strong

Tabella 25. Sistemi tecnica DLP con strato 100  $\mu\text{m}$  per benchmark n° 2

Come in precedenza, in figura 37 sono mostrate le acquisizioni dei dettagli superficiali dei tre campioni analizzati.

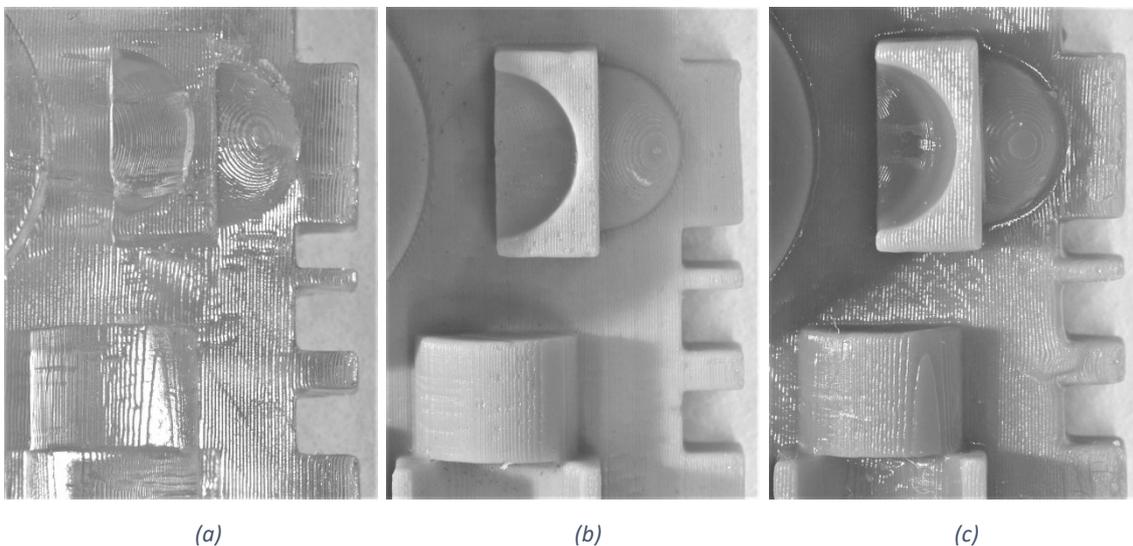


Figura 37. Dettagli superficiali campioni DLP con strato 100  $\mu\text{m}$  di materiali (a) S-Clear; (b) S-Hard; (c) G-Strong

Rispetto a quanto è stato possibile osservare per i campioni con strato di spessore pari a 50  $\mu\text{m}$ , si evidenzia un minor numero di strati a causa della maggiore altezza del layer, ma una maggiore visibilità della stratificazione, che fa presupporre una peggiore precisione dimensionale.

I risultati delle misurazioni dei campioni indicati sono riportati nelle tabelle 26, 27 e 28 per valutarne la precisione dimensionale secondo i gradi IT.

**S-Clear 100 $\mu$ m – Rover**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50
<b>Media</b>	176,330	129,032	119,095	111,849	129,592	156,832
<b>Dev.St</b>	152,996	115,096	97,342	90,896	94,052	96,352
<b>95%</b>	543,664	390,319	328,186	278,154	323,548	320,161
<b>Grado IT</b>	15	14	14	14	14	14

Tabella 26. Valutazione gradi IT S-Clear 100 $\mu$ m - Rover**S-Hard 100 $\mu$ m - Rover**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50
<b>Media</b>	169,424	149,078	120,866	104,881	102,582	107,346
<b>Dev.St</b>	139,810	132,692	105,019	85,600	78,507	70,677
<b>95%</b>	404,037	423,073	333,754	264,340	258,228	231,450
<b>Grado IT</b>	15	15	14	14	14	13

Tabella 27. Valutazione gradi IT S-Hard 100 $\mu$ m - Rover**G-Strong 100 $\mu$ m - Rover**

Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50
<b>Media</b>	326,745	221,296	153,634	125,165	120,318	124,113
<b>Dev.St</b>	298,214	229,278	160,215	122,270	89,518	99,095
<b>95%</b>	913,947	683,058	461,243	362,059	290,812	326,488
<b>Grado IT</b>	16	16	15	14	14	14

Tabella 28. Valutazione gradi IT G-Strong 100 $\mu$ m - Rover

In linea con le previsioni, il maggiore spessore dello strato comporta un peggioramento delle prestazioni del sistema, sia per i valori medi che per la dispersione dei risultati. Le geometrie che risentono maggiormente della scarsa precisione del processo sono quelle appartenenti alle classi 1-3 mm e 3-6 mm, poiché le tolleranze ammissibili sono inferiori.

Per comparare le prestazioni di questi sistemi, i valori del 95-esimo percentile di  $n$  indicati nelle precedenti tabelle sono raccolti nel grafico di figura 38.

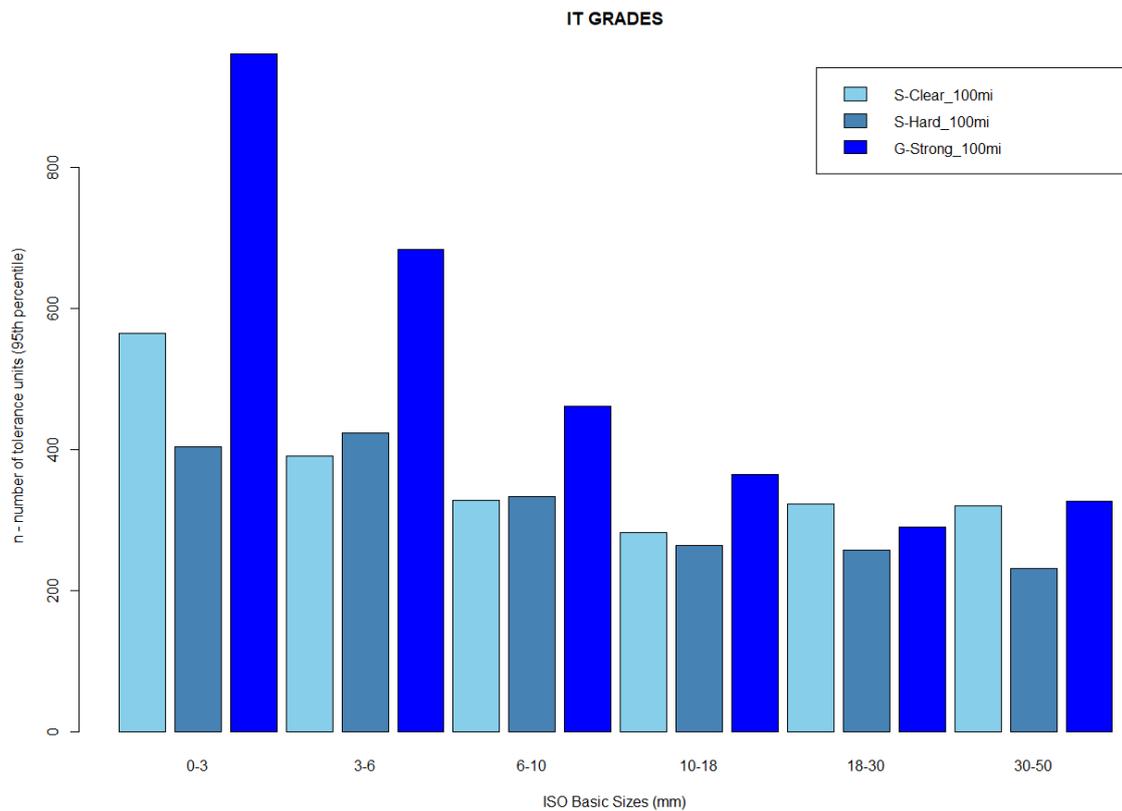


Figura 38. Comparazione dei sistemi DLP con strato 100  $\mu\text{m}$  tramite gradi IT (95-esimo percentile di  $n$ ) per benchmark n° 2

Restano valide le considerazioni fatte per l'analisi dei sistemi DLP con strato di 50  $\mu\text{m}$  in merito alle diverse proprietà termiche dei materiali.

Osservando il grafico si può concludere che la resina S-Hard si riconferma la migliore anche in caso di altezza del layer di 100  $\mu\text{m}$ , mentre si verifica un calo drastico delle prestazioni della G-Strong per dimensioni inferiori ai 10 mm, nonostante queste tendano ad uniformarsi a quelle delle altre resine per le classi successive.

Infine, si effettua il confronto dei tre materiali impiegati anche per quanto riguarda le tolleranze geometriche, sempre basato sulle caratteristiche geometriche del sistema GD&T, di cui si riportano i valori nel grafico in figura 39.

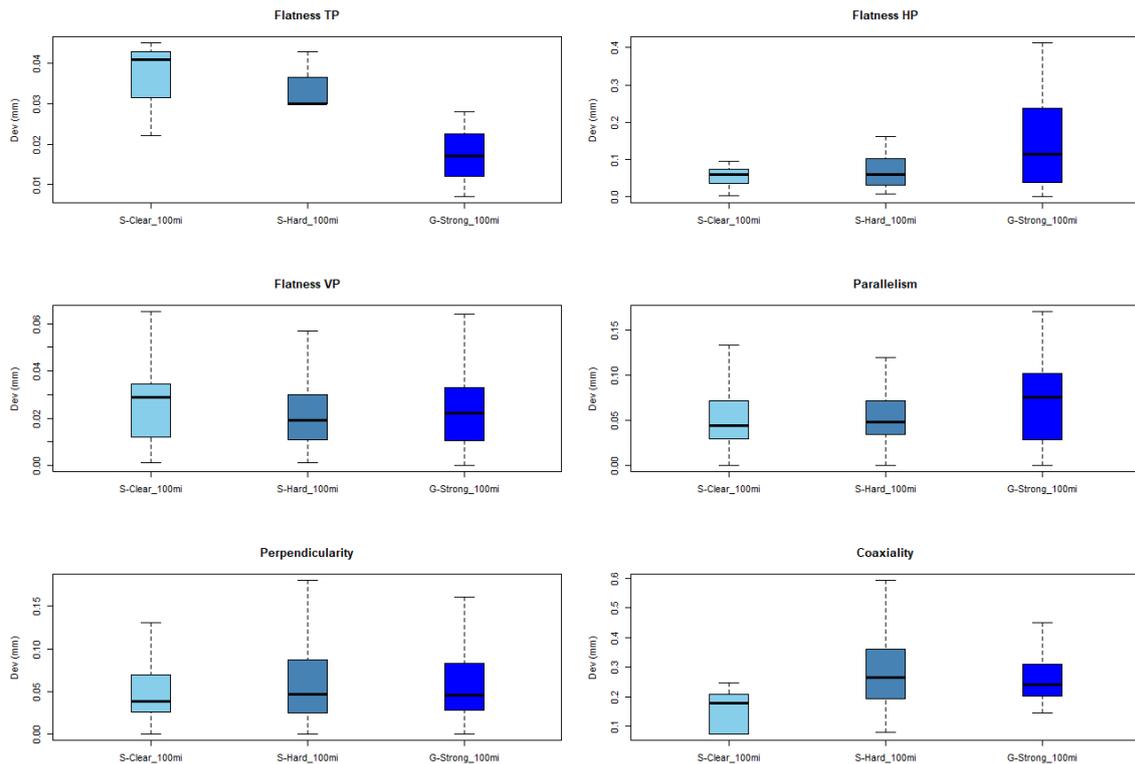


Figura 39. Comparazione dei sistemi DLP con strato 100  $\mu\text{m}$  tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 2

I valori delle caratteristiche GD&T mostrano un comportamento paragonabile ai sistemi con spessore di strato di 50  $\mu\text{m}$ , dove non si evidenzia una particolare differenza nelle prestazioni delle tre resine utilizzate. Si ripete inoltre il risultato, inizialmente inaspettato, in relazione al rapporto tra le deviazioni misurate per le planarità dei piani orizzontali e verticali.

Seguendo le valutazioni fatte nel precedente paragrafo, la resina che verrà considerata come rappresentante della tecnica DLP per i sistemi con strato di spessore pari a 100  $\mu\text{m}$  si conferma la S-Hard.

#### 4.2.3 Polyjet

In tabella 29 si riportano i sistemi basati sulla tecnica Polyjet impiegati per la realizzazione dei due campioni oggetto dell'analisi.

Macchina	Spessore strato	Materiale
Objet30 Prime	16 $\mu\text{m}$	Vero-Clear
Objet30 Prime	28 $\mu\text{m}$	Vero-Clear

Tabella 29. Sistemi tecnica Polyjet per benchmark n° 2

In questo caso, l'unico parametro variabile è lo spessore dello strato, in modo da poterne valutare l'impatto sull'accuratezza del processo di fabbricazione.

In figura 40 sono illustrati i dettagli superficiali di ciascun campione oggetto del confronto.

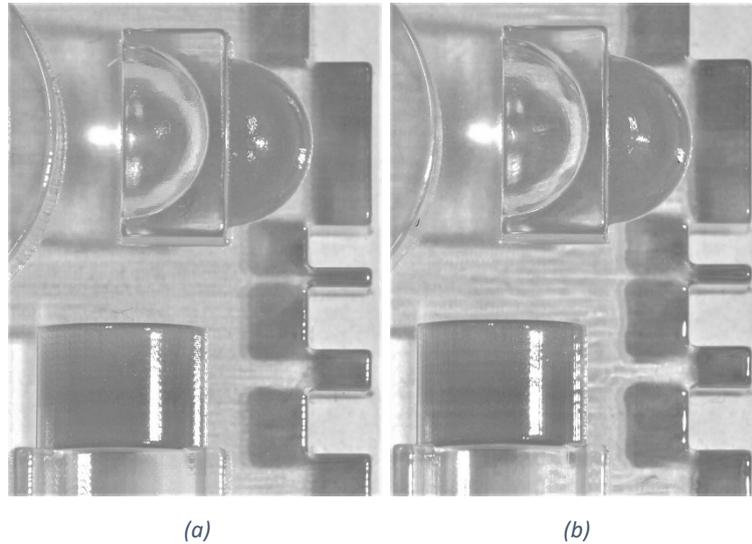


Figura 40. Dettagli superficiali campioni Polyjet per strati (a) 16 µm e (b) 28 µm

Analogamente a ciò che si è verificato per il benchmark n° 1, i campioni realizzati tramite la tecnica Polyjet presentano una precisione superficiale visibilmente migliore rispetto agli altri sistemi analizzati, al punto che è difficilmente rilevabile la stratificazione del materiale.

Nelle tabelle 30 e 31 si riassumono, rispettivamente per ognuno dei campioni, i risultati delle misurazioni che permettono di valutare la precisione dimensionale del sistema, definendone il grado IT di appartenenza.

Vero_Clear 16 µm - Objet30 Prime						
Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50
<b>Media</b>	41,471	31,328	27,012	22,237	17,151	12,428
<b>Dev.St</b>	41,944	23,195	21,666	24,652	13,651	9,303
<b>95%</b>	100,064	75,744	70,982	54,170	42,834	28,183
<b>Grado IT</b>	12	11	11	10	10	9

Tabella 30. Valutazione gradi IT Vero\_Clear 16µm – Objet30 Prime

Vero_Clear 28 $\mu$ m - Objet30 Prime						
Classe [mm]	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50
<b>Media</b>	36,829	28,181	26,990	23,883	23,566	19,478
<b>Dev.St</b>	43,365	25,702	26,025	25,971	19,293	16,361
<b>95%</b>	109,286	77,109	86,291	63,730	61,957	58,511
<b>Grado IT</b>	12	11	11	10	10	10

Tabella 31. Valutazione gradi IT Vero\_Clear 28 $\mu$ m – Objet30 Prime

Le affermazioni precedenti trovano conferma nei risultati delle misurazioni dei campioni. I valori di  $n$  sono i minimi tra quelli rilevati in questo studio e per il campione realizzato con lo strato di 16  $\mu$ m si presenta addirittura un grado IT9, inferiore al grado garantito da molte delle tecnologie manifatturiere tradizionali.

Seguendo il procedimento già adottato per l'analisi delle precedenti tecniche, si raccolgono i valori del 95-esimo percentile di  $n$  nel grafico di figura 41 per confrontare i due campioni realizzati tramite la Polyjet.

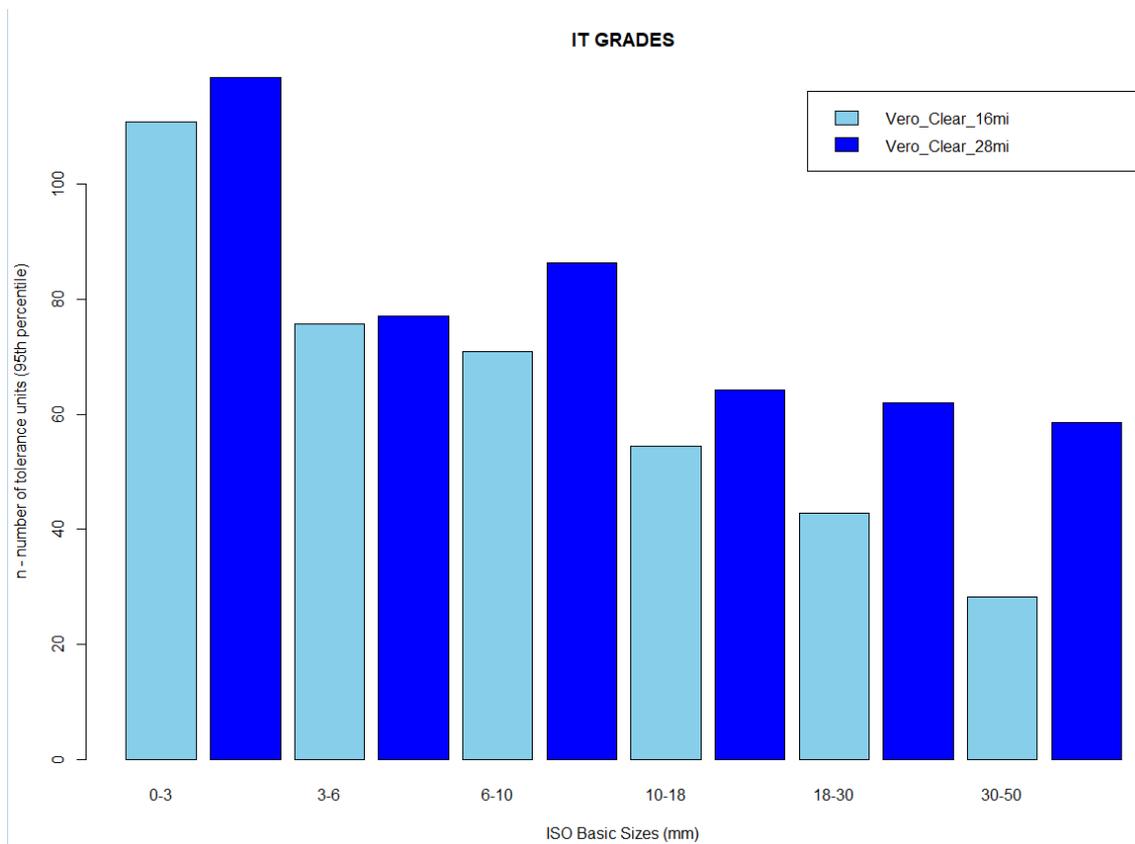


Figura 41. Comparazione dei sistemi Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di  $n$ ) per benchmark n° 2

Il grafico evidenzia la correlazione tra lo spessore dello strato e l'accuratezza del sistema, valida in maniera più o meno significativa per tutte le classi dimensionali. Un risultato inaspettato riguarda il divario tra le prestazioni dei due sistemi, che aumenta al crescere della dimensione considerata, in controtendenza con i risultati ottenuti nel corso di questo studio.

Per completare l'analisi delle prestazioni del sistema al variare dell'altezza del layer è necessario effettuare il confronto anche per quanto riguarda le tolleranze geometriche, sempre basato sulle caratteristiche geometriche del sistema GD&T. I risultati sono illustrati in figura 42.

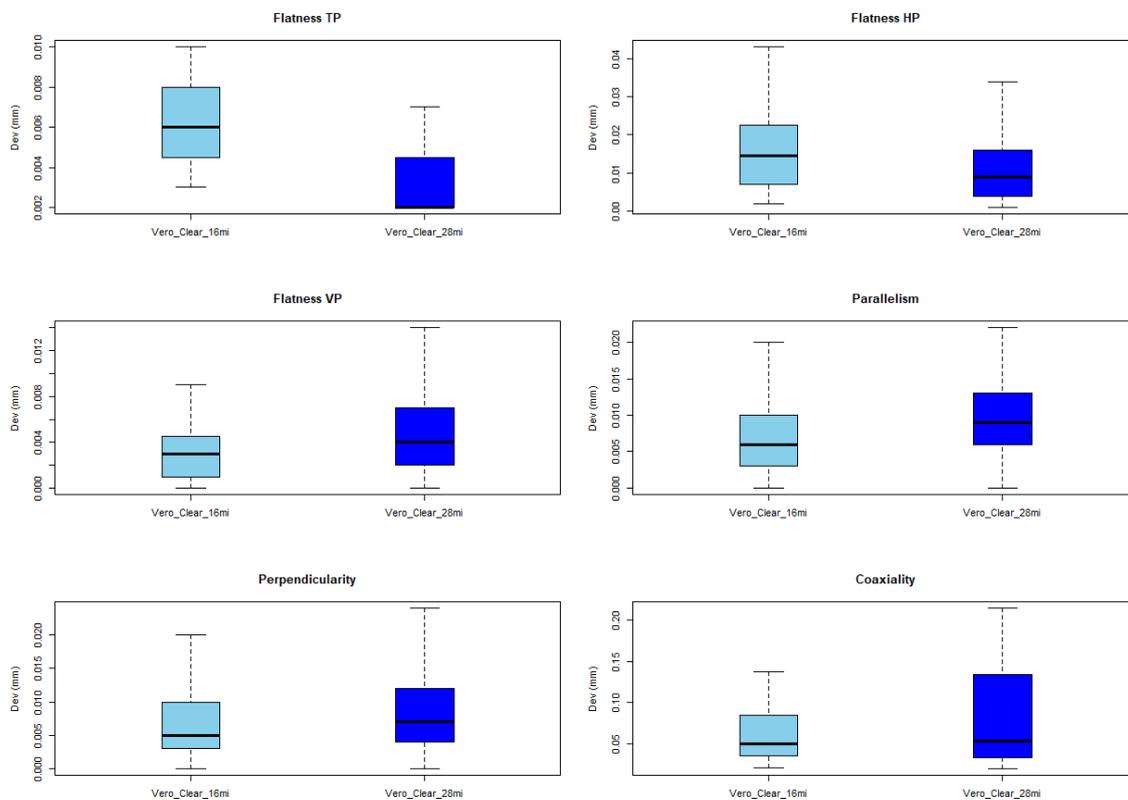


Figura 42. Comparazione dei sistemi Polyjet tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 2

I risultati illustrati sono in linea con le aspettative, poiché il ridotto spessore dello strato implica globalmente una migliore precisione per tutte le geometrie del campione. Le differenze tra le due configurazioni sono comunque minime, ad indicare che il sistema è vicino alla sua massima potenzialità.

In questo caso, si è deciso di includere entrambe le configurazioni dei sistemi Polyjet nel confronto fra tecniche del paragrafo successivo, in modo da avere sia per essa che per tecnica DLP un indicatore delle prestazioni del sistema per due diverse altezze del layer.

#### 4.2.4 Confronto fra tecniche

Per concludere l'analisi dimensionale del benchmark di dimensioni 50 x 50 x 15 mm viene eseguita una comparazione dei sistemi maggiormente rappresentativi della tecnica DLP, uno per ogni diverso spessore di strato preimpostato, e della tecnica Polyjet. In tabella 32 si riassumono quindi i sistemi selezionati per il confronto.

<b>Tecnica</b>	<b>Macchina</b>	<b>Spessore strato</b>	<b>Materiale</b>
DLP	Rover	50 $\mu\text{m}$	S-Hard
DLP	Rover	100 $\mu\text{m}$	S-Hard
Polyjet	Objet30 Prime	16 $\mu\text{m}$	Vero-Clear
Polyjet	Objet30 Prime	28 $\mu\text{m}$	Vero-Clear

Tabella 32. Tecniche di Additive Manufacturing confrontate e relativi sistemi per benchmark n° 2

Coerentemente con il procedimento seguito finora, l'analisi è effettuata comparando le prestazioni delle tecniche inizialmente in termini di tolleranze dimensionali tramite la normativa ISO relativa ai gradi IT e in seguito in termini di tolleranze geometriche secondo il sistema GD&T.

Il primo passo consiste quindi nel confrontare i valori del 95-esimo percentile di  $n$  per i tre sistemi, come illustrato nel grafico in figura 43.

Come per quanto si è verificato nell'analisi del benchmark n° 1, la tecnica Polyjet offre prestazioni indubbiamente superiori in termini di tolleranze dimensionali per tutte le classi dimensionali oggetto dell'analisi, qualunque sia lo spessore di strato impiegato nelle due tecniche. Si proverà a fornire le giustificazioni di queste differenze a seguito del confronto in termini di tolleranze geometriche.

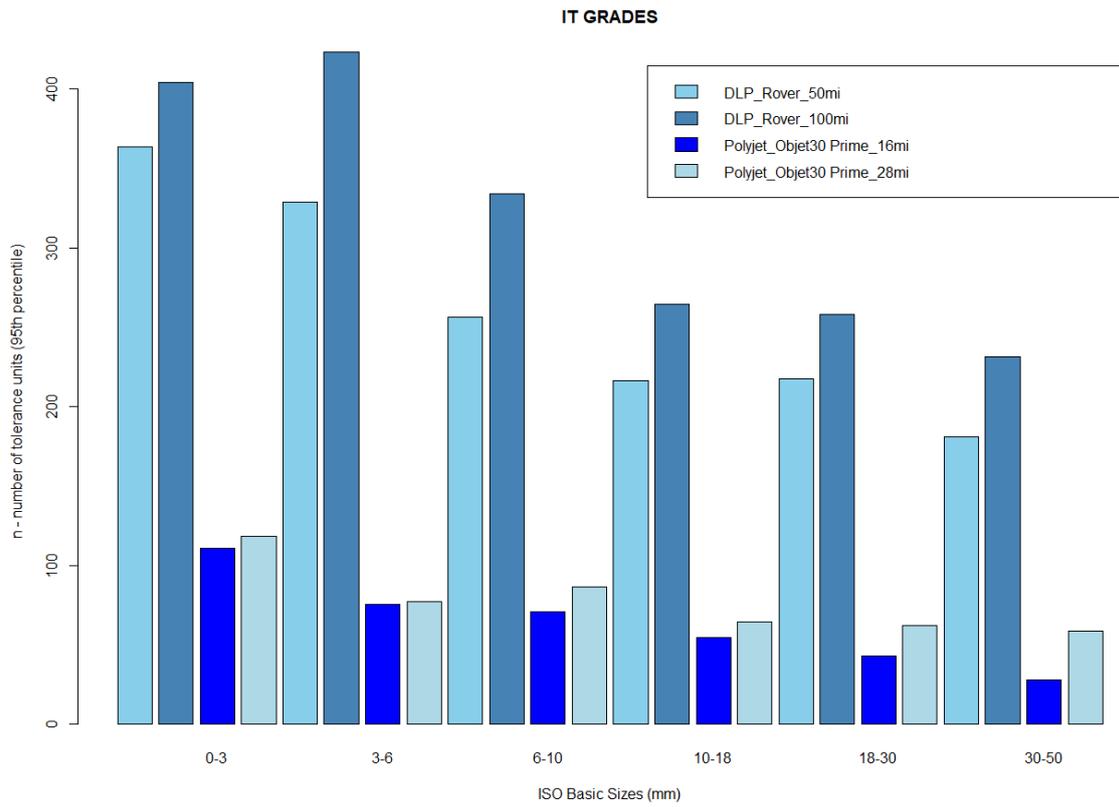


Figura 43. Comparazione tecniche DLP e Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 2

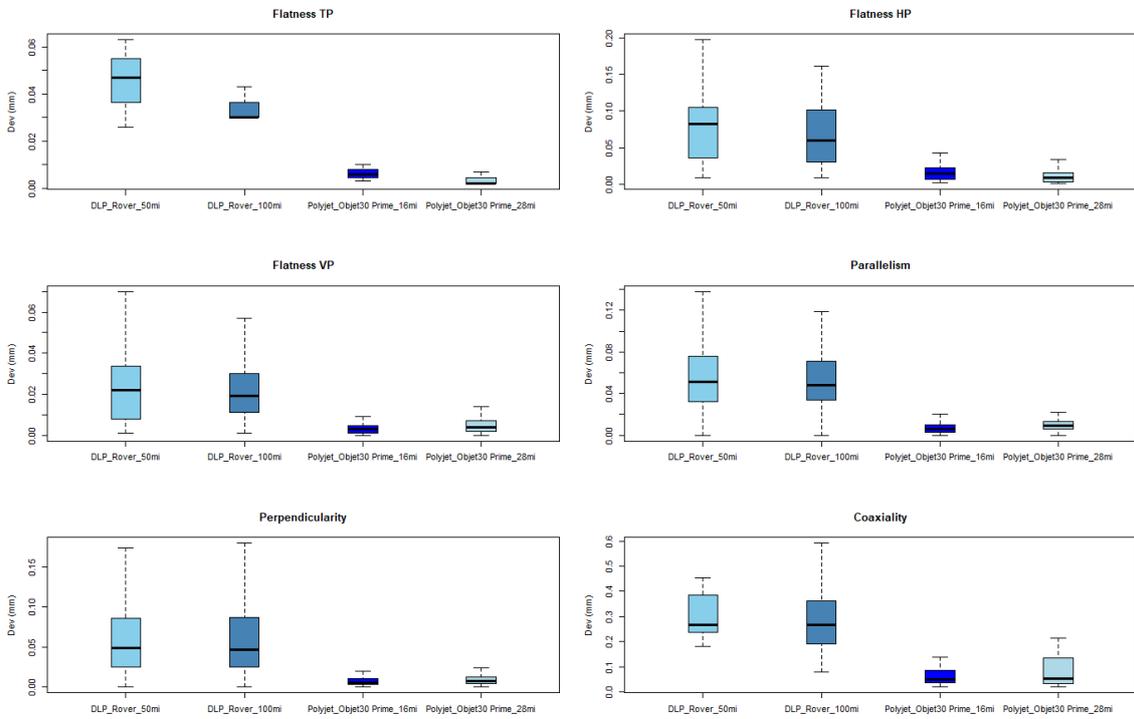


Figura 44. Comparazione tecniche DLP e Polyjet tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 2

L'ultimo passo consiste nel comparare le tolleranze geometriche dei tre sistemi in base al sistema GD&T. In figura 44 si riporta quindi il grafico dei valori delle caratteristiche geometriche per le tre tecniche considerate.

Da esso si può ottenere conferma della superiorità della tecnica Polyjet, che prevale per ognuna delle caratteristiche geometriche analizzate. In merito al confronto tra le prestazioni della tecnica DLP per diverso spessore dello strato, è interessante osservare che i valori di tolleranze geometriche risultano abbastanza vicini, pur se con un modesto migliore risultato per quello con spessore più ridotto.

Per concludere, la differenza tra le prestazioni delle tecniche Polyjet e DLP è notevole, nonostante non sussista una grande diversità nell'altezza del layer. Evidentemente, i diversi processi di fabbricazione impiegati dalle due tecniche generano delle differenze nella precisione risultante, suggerendo che la tecnica DLP è caratterizzata da limiti tecnici più evidenti rispetto alla Polyjet. In secondo luogo, entrano in gioco anche i costi per la produzione dei singoli campioni, di cui verrà effettuata una comparazione nel paragrafo 4.4.

### ***4.3 Confronto tra le tecniche di AM utilizzate nello studio***

Le modalità analoghe con cui è stata valutata la precisione in termini di tolleranze dimensionali e geometriche di tutti i campioni, riferiti ad entrambi i benchmark, consentono di effettuare un confronto riassuntivo delle prestazioni fornite dalle quattro tecniche analizzate nel presente studio: Fused Deposition Modeling, Stereolitografia, Direct Light Projection e Polyjet. L'unica accortezza riguarda l'esclusione dei risultati del benchmark n° 1 relativi alle classi dimensionali oltre i 50 mm, in quanto non avrebbero termini di paragone con nessuna geometria del benchmark n° 2.

Per la comparazione, si parte quindi dalla valutazione delle tolleranze dimensionali considerando il valore del 95-esimo percentile del parametro  $n$ , utilizzato per il calcolo dei gradi IT secondo la normativa ISO 286-1:2010. I risultati sono esposti nel grafico in figura 45.

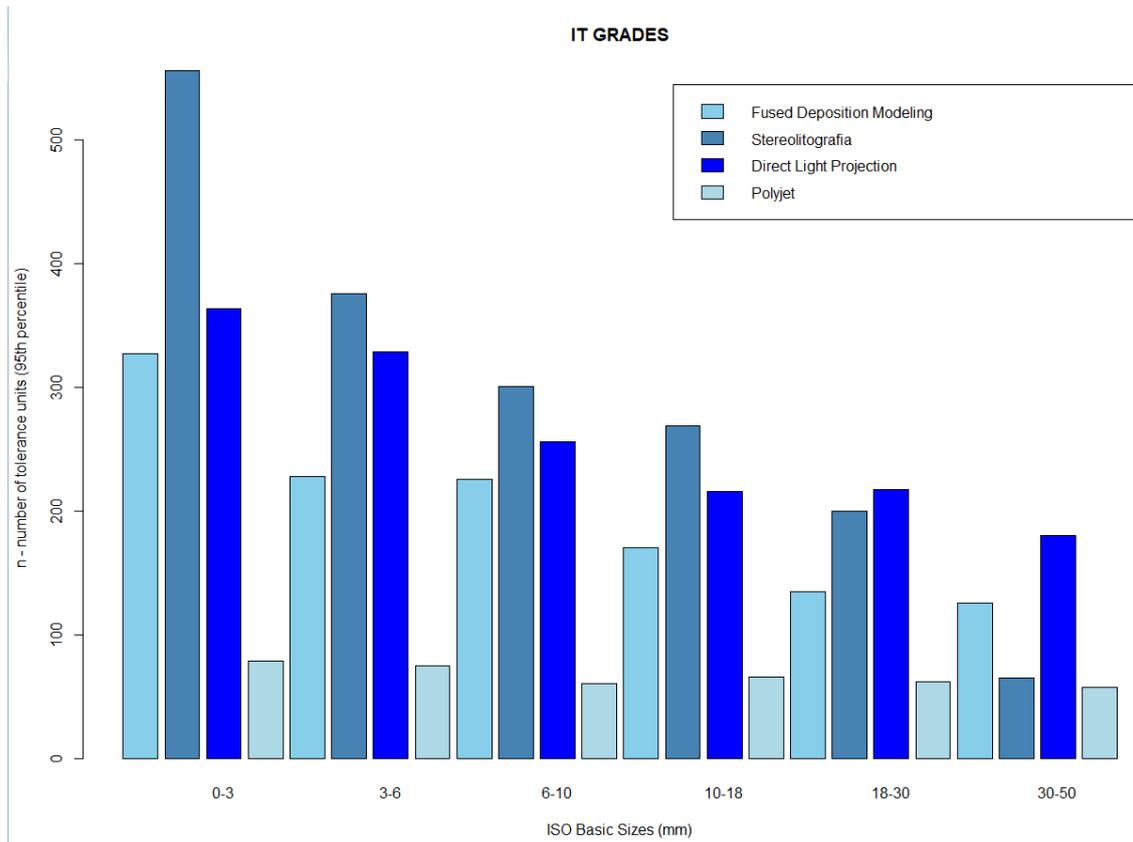


Figura 45. Comparazione delle tecniche FDM, SLA, DLP e Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di n)

Ovviamente la tecnica Polyjet rimane quella che offre le migliori prestazioni, come già descritto nelle precedenti analisi, tuttavia è possibile effettuare il confronto tra le tecniche FDM, SLA e DLP.

La scarsa precisione offerta dalla stereolitografia per le geometrie inferiori ai 30 mm la rende la tecnica meno preferibile anche in confronto alla DLP. Tuttavia, a causa della sua grande variabilità di prestazioni a seconda della dimensione considerata, essa risulta molto competitiva per le geometrie oltre i 30 mm.

Limitando il confronto alle tecniche FDM e DLP, le loro prestazioni seguono un andamento molto simile tra loro, dove la prima risulta leggermente migliore rispetto alla seconda per ogni classe dimensionale. Questo risultato indica chiaramente che lo spessore dello strato ( $50\ \mu\text{m}$  per la DLP e  $178\ \mu\text{m}$  per la FDM) non è l'unico parametro che impatta sulla precisione dimensionale, anche se rimane un fattore generalmente decisivo in caso di confronto interno alla stessa tecnica di Additive Manufacturing.

Infine, per concludere la comparazione tra le quattro tecniche, vengono anche raffigurati i box-plot relativi alle caratteristiche geometriche del sistema GD&T di planarità, parallelismo, perpendicolarità e coassialità, riportate in figura 46.

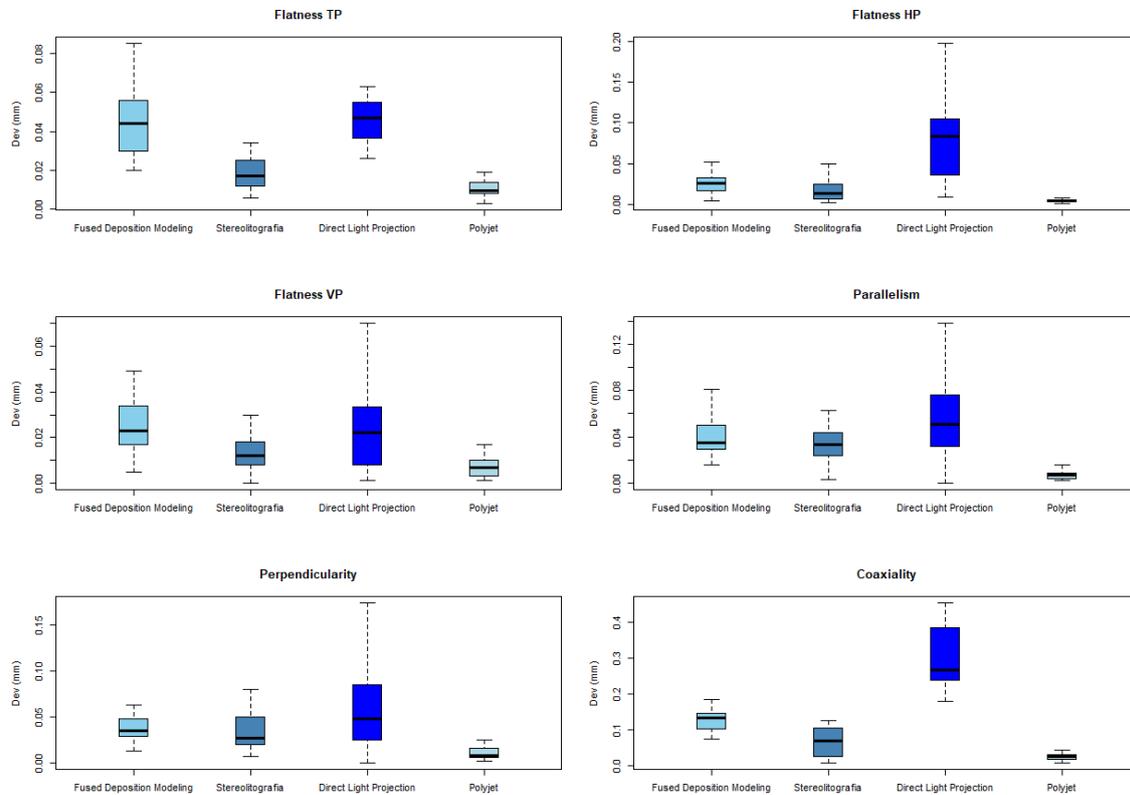


Figura 46. Comparazione delle tecniche FDM, SLA, DLP e Polyjet tramite caratteristiche GD&T

Anche per quanto riguarda le tolleranze geometriche, la tecnica Polyjet è sempre quella che garantisce la migliore qualità dei prodotti. Considerando le tecniche restanti, in questo caso è evidente che le prestazioni peggiori siano fornite dalla tecnica DLP. Ciò è valido specialmente per le tolleranze di forma di planarità dei piani orizzontali e per le tolleranze di localizzazione di coassialità. Per il confronto tra le tecniche FDM e SLA si rimanda all'analisi effettuata nel paragrafo 4.1.4.

Esaminando nel dettaglio le planarità dei piani orizzontali, queste differenze sono in linea con le previsioni, poiché per la realizzazione dei campioni tramite i sistemi DLP è stato impostato un angolo di lavorazione di 45 gradi, che impatta negativamente sulla precisione superficiale dei piani orizzontali a causa dell'effetto staircase. Questo fattore è invece assente per i campioni realizzati tramite i sistemi delle tecniche FDM e SLA, che possiedono un angolo di lavorazione nullo.

In conclusione, i risultati delle misurazioni dei campioni prodotti dai diversi sistemi valutati in questo studio evidenziano che le prestazioni fornite dalle singole tecniche sono influenzate da una molteplicità di fattori, tra cui lo spessore dello strato, i processi di fabbricazione e le proprietà dei materiali impiegati. La scelta della tecnica più opportuna va quindi condotta di volta in volta in base alle caratteristiche che dovrà avere il prodotto finito, in relazione ai costi, ai tempi di produzione ed alla qualità dimensionale richiesta, tenendo anche conto della dimensione del pezzo da produrre, che può portare ad escludere a priori tecniche che parrebbero maggiormente di più elevata qualità.

#### ***4.4 Trade-off Qualità, Costi, Tempi***

Nei paragrafi precedenti sono state analizzate le prestazioni di quattro delle tecniche di Additive Manufacturing maggiormente consolidate tramite la comparazione di alcuni dei sistemi più rappresentativi di ognuna. La valutazione della loro qualità è stata effettuata utilizzando i risultati delle misurazioni per calcolarne le deviazioni dai valori nominali e definire così in che intervalli di tolleranze dimensionali e geometriche si sono posizionati i singoli campioni. Tuttavia, la qualità è solamente uno dei fattori da tenere in considerazione nella selezione della tecnica e del sistema da impiegare. Infatti, per completare la comparazione e renderla maggiormente realistica, si rende necessario definire i tempi e i costi di produzione per ogni singolo campione. Inoltre, va anche specificato che ciascuna tecnica di Additive Manufacturing possiede delle peculiarità nel processo produttivo che le permettono di offrire funzionalità del prodotto leggermente diverse dalle altre, nonostante, nell'ambito del presente studio, l'obiettivo finale per tutte sia la prototipazione.

Di seguito, verrà esposta l'analisi di trade-off di qualità, costi e tempi per la produzione dei campioni aventi come modello di riferimento il benchmark n° 2. Si è deciso di non includere nel confronto i campioni relativi al primo benchmark, poiché la produzione della maggior parte di essi è stata commissionata ad un'azienda esterna. Ciò implica che non si abbiano a disposizione una grande quantità di dati per il calcolo dei costi e, inoltre, il prezzo finale di acquisto sia soggetto a mark-up e quindi non comparabile con i restanti campioni prodotti presso il Politecnico di Torino. Si fa presente che nel calcolo dei costi di produzione non sono stati inclusi i costi relativi al consumo di energia e all'affitto dei locali.

In tabella 33 si riportano quindi i costi e i tempi di produzione relativi a ciascun campione del benchmark n° 2.

<b>Tecnica</b>	<b>Sistema</b>	<b>Materiale</b>	<b>Costi produzione</b>	<b>Tempi produzione</b>
Polyjet	Objet30 Prime - 16 $\mu\text{m}$	Vero-Clear	€ 49,55	3h 30min
	Objet30 Prime - 28 $\mu\text{m}$	Vero-Clear	€ 44,97	2h 40min
DLP	Rover - 50 $\mu\text{m}$	S-Clear	€ 42,58	13h 50min
	Rover - 50 $\mu\text{m}$	S-Hard	€ 39,68	9h 45min
	Rover - 50 $\mu\text{m}$	G-Strong	€ 38,20	11h 30min
	Rover - 100 $\mu\text{m}$	S-Clear	€ 39,00	10h 20min
	Rover - 100 $\mu\text{m}$	S-Hard	€ 36,54	6h 43min
	Rover - 100 $\mu\text{m}$	G-Strong	€ 34,86	8h 3min

Tabella 33. Costi e tempi di produzione per campioni del benchmark n° 2

In base ai dati forniti in tabella e alle valutazioni della qualità dei campioni effettuate nei paragrafi precedenti è possibile effettuare una comparazione più accurata delle tecniche Polyjet e DLP e dei relativi sistemi. Per comprendere al meglio quali sono i fattori che contribuiscono alle differenti prestazioni è possibile evidenziare tre livelli di confronto: tecnica di produzione, spessore dello strato e materiale impiegato.

- **Tecnica di produzione:** la Polyjet garantisce tempi di produzione molto più rapidi rispetto alla tecnica DLP, a fronte però di costi maggiori. Tuttavia, come evidenziato nelle precedenti analisi, la Polyjet offre una qualità dei campioni nettamente superiore rispetto a quelli prodotti tramite DLP, sia in termini di tolleranze dimensionali che geometriche.
- **Spessore dello strato:** come prevedibile, impostando un maggiore spessore di strato si riduce il numero totale di strati necessari per realizzare il pezzo e quindi si riducono i tempi di produzione, nonostante il tempo richiesto per la lavorazione del singolo strato aumenti leggermente a causa della maggiore quantità di materiale da solidificare. Ciò però implica un leggero aumento dei costi. Per quanto riguarda la qualità, nel corso di questo studio è stato ampiamente dimostrato che la riduzione dello spessore dello strato è uno dei fattori che contribuiscono maggiormente al miglioramento delle prestazioni del sistema.

- Materiale impiegato: tutti i materiali, seppur appartenenti alla stessa famiglia, sono caratterizzati da proprietà uniche. Queste risultano fondamentali nelle lavorazioni che sfruttano i gradienti di temperatura per modellare e solidificare il materiale, come si verifica nei processi di fotopolimerizzazione impiegati dalle tecniche analizzate nel presente studio. Le differenti proprietà comportano quindi una diversa velocità di polimerizzazione del materiale, impattando sui tempi di produzione. Ovviamente, il costo dei materiali varia in base alle prestazioni e alle funzionalità fornite. Infatti, considerando la tecnica DLP, il campione prodotto in resina G-Strong è quello che offre le peggiori prestazioni, ma è anche quello che costa meno. Il campione in S-Clear presenta un costo superiore a quello realizzato in S-Hard nonostante quest'ultimo sia qualitativamente superiore, tuttavia la trasparenza che caratterizza la resina S-Clear la rende preferibile per quanto riguarda l'aspetto estetico.

Dall'analisi si evince che non esiste una tecnica migliore delle altre sotto tutti i punti di vista e si rende quindi necessario valutare il trade-off tra qualità, costi e tempi di produzione. La decisione finale sulla tecnica da utilizzare si rimanda alle caratteristiche richieste dal prodotto in termini di qualità dimensionale, alle funzionalità che questi deve ricoprire e, infine, al budget e ai tempi di produzione disponibili.

## Conclusioni

L'Additive Manufacturing è una tecnologia di produzione innovativa che nel corso degli ultimi anni si sta ritagliando un ruolo sempre più importante nell'industria manifatturiera, senza mirare esclusivamente a rimpiazzare le tecnologie convenzionali, ma piuttosto ad affiancarsi ad esse offrendo nuove funzionalità.

Il presente studio di benchmarking si è posto l'obiettivo di comparare una selezione di sistemi in rappresentanza di alcune delle più comuni tecniche di fabbricazione additiva, evidenziandone le prestazioni fornite in termini di accuratezza dimensionale e geometrica.

Dalle analisi svolte sono emerse delle sostanziali differenze tra le tecniche esaminate in merito alla precisione garantita. Ciò implica che sia piuttosto difficile assegnare alla tecnologia di Additive Manufacturing dei valori prestazionali globali, in quanto sono presenti un gran numero di variabili che impattano su di esse, tra cui la tecnica utilizzata, il sistema produttivo, i parametri di processo e il materiale impiegato. Particolare attenzione va posta sullo spessore dello strato, un parametro di lavorazione che se ridotto, come dimostrato per tutti i campioni analizzati, influisce positivamente sulla precisione delle singole geometrie, a scapito però dei costi e dei tempi di produzione.

In questo studio si è rilevata una maggiore qualità della tecnica Polyjet, che, nell'ambito delle classi dimensionali oggetto di analisi, dimostra la sua superiorità in merito sia alle caratteristiche geometriche del sistema GD&T sia all'accuratezza dimensionale, valutata in un intervallo tra i gradi IT9 e IT12, a fronte però di costi di sistemi e materiali impiegati più elevati. È altresì importante sottolineare che, per tutte le tecniche analizzate, i gradi IT risultanti sono stati ricavati considerando il 95% delle misurazioni effettuate al di sotto di questi limiti, ad indicare che sono state valutate le peggiori prestazioni garantite, ad esclusione di eventuali outlier. Data l'elevata dispersione dei risultati delle misurazioni, il grado IT risultante sarebbe decisamente inferiore nel caso si fosse considerato, ad esempio, il valore mediano.

Per quanto riguarda le altre tecniche oggetto del confronto, i risultati evidenziano un comportamento altalenante nelle prestazioni fornite a seconda della classe dimensionale considerata. La stereolitografia offre le peggiori prestazioni in termini di precisione

dimensionale per le geometrie di dimensioni ridotte, per poi eccellere per le geometrie oltre i 30 mm, mentre si dimostra generalmente molto competitiva per quanto riguarda le tolleranze geometriche. La tecnica Direct Light Projection risulta globalmente la peggiore per entrambe le tipologie di tolleranze considerate, nonostante lo spessore dello strato impostato per la realizzazione dei campioni sia inferiore rispetto alle tecniche SLA e FDM, ad indicare una minore accuratezza del sistema utilizzato. Infine, La Fused Deposition Modeling è la tecnica che presenta il comportamento più stabile tra quelle analizzate.

In merito ai possibili sviluppi futuri, si potrebbe agire sui sistemi analizzati, ampliandone il numero e assicurandosi che appartengano alla stessa fascia di prezzo, in modo da ottenere dei risultati maggiormente rappresentativi delle prestazioni delle singole tecniche. In aggiunta, si potrebbe migliorare la precisione della misurazione utilizzando una macchina di misura a coordinate (CMM) più aggiornata rispetto a quella impiegata nel presente studio, assicurando così la riduzione degli errori durante il processo di misurazione.

## Indice delle figure

Figura 1. Confronto tra costi unitari in funzione delle quantità prodotte per le diverse tecnologie [2].....	8
Figura 2. Evoluzione dell'Additive Manufacturing .....	11
Figura 3. Fatturato generato dalla vendita di materiali per AM [6] .....	12
Figura 4. Storico delle vendite di sistemi di AM per componenti metallici [6] .....	13
Figura 5. Campi di applicazione della AM [6].....	13
Figura 6. Esempio di transizione da modello CAD a formato STL [8].....	14
Figura 7. Relazione tra costi e complessità geometrica per AM e manifattura tradizionale [1] .....	17
Figura 8. Tecniche di Additive Manufacturing per polimeri .....	19
Figura 9. Tecniche di Additive Manufacturing per metalli.....	20
Figura 10. Schema di funzionamento stereolitografia [1] .....	21
Figura 11. Schema di funzionamento tecnica Polyjet [10].....	22
Figura 12. Schema di funzionamento DLP [11].....	24
Figura 13. Schema di funzionamento tecnica Fused Deposition Modeling [12] .....	26
Figura 14. Modello benchmark n° 1 .....	29
Figura 15. Modello benchmark n° 2 con vista (a) e vista (b).....	30
Figura 16. Sistema Sharebot Rover [21] .....	36
Figura 17. Stampante 3D Stratasys Objet30 Prime [22] .....	38
Figura 18. Classificazione sistemi di rilevamento dei punti.....	40
Figura 19. Sistema CMM a contatto [26] .....	42
Figura 20. Macchina di misura a coordinate DEA Iota 0101 .....	43
Figura 21. Interfaccia software PC-DMIS.....	45
Figura 22. Misurazione delle geometrie del campione.....	46
Figura 23. Dettagli superficiali campioni FDM di materiali (a) Antero800NA; (b) PC_White; (c) PPSF.....	50
Figura 24. Comparazione dei sistemi FDM tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 1 .....	52
Figura 25. Comparazione dei sistemi FDM tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 1 .....	53
Figura 26. Dettagli superficiali campioni SLA di materiali (a) SC1000P; (b) Somos_Next .....	54
Figura 27. Comparazione dei sistemi SLA tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 1 .....	56
Figura 28. Comparazione dei sistemi SLA tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 1 .....	57

Figura 29. Dettagli superficiali campioni Polyjet di materiali (a) Vero_White; (b) Vero_Clear .....	58
Figura 30. Comparazione dei sistemi Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 1 .....	59
Figura 31. Comparazione dei sistemi Polyjet tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 1 .....	60
Figura 32. Comparazione tecniche FDM, SLA e Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 1 .....	62
Figura 33. Comparazione tecniche FDM, SLA e Polyjet tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 1 .....	63
Figura 34. Dettagli superficiali campioni DLP con strato 50 $\mu\text{m}$ di materiali (a) S-Clear; (b) S-Hard; (c) G-Strong .....	65
Figura 35. Comparazione dei sistemi DLP con strato 50 $\mu\text{m}$ tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 2 .....	67
Figura 36. Comparazione dei sistemi DLP con strato 50 $\mu\text{m}$ tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 2 .....	68
Figura 37. Dettagli superficiali campioni DLP con strato 100 $\mu\text{m}$ di materiali (a) S-Clear; (b) S-Hard; (c) G-Strong .....	69
Figura 38. Comparazione dei sistemi DLP con strato 100 $\mu\text{m}$ tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 2 .....	71
Figura 39. Comparazione dei sistemi DLP con strato 100 $\mu\text{m}$ tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 2 .....	72
Figura 40. Dettagli superficiali campioni Polyjet per strati (a) 16 $\mu\text{m}$ e (b) 28 $\mu\text{m}$ .....	73
Figura 41. Comparazione dei sistemi Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 2 .....	74
Figura 42. Comparazione dei sistemi Polyjet tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 2 .....	75
Figura 43. Comparazione tecniche DLP e Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) per benchmark n° 2 .....	77
Figura 44. Comparazione tecniche DLP e Polyjet tramite caratteristiche GD&T per benchmark n° 2 .....	77
Figura 45. Comparazione delle tecniche FDM, SLA, DLP e Polyjet tramite gradi IT (95-esimo percentile di n) .....	79
Figura 46. Comparazione delle tecniche FDM, SLA, DLP e Polyjet tramite caratteristiche GD&T .....	80

## *Indice delle tabelle*

Tabella 1. Classificazione dei gradi IT secondo la normativa ISO 286-1:2010 [17] .....	32
Tabella 2. Specifiche tecniche sistema Sharebot Rover [21] .....	36
Tabella 3. Specifiche tecniche stampante Objet30 Prime [22].....	37
Tabella 4. Specifiche tecniche Stratasys Fortus 450mc [23].....	39
Tabella 5. Specifiche tecniche Stratasys Fortus 400mc [24].....	39
Tabella 6. Specifiche tecniche Stratasys V650 Flex 3D [25].....	39
Tabella 7. Specifiche tecniche CMM DEA Iota 0101 .....	42
Tabella 8. Gradi IT per dimensioni da 1 mm a 500 mm [17].....	48
Tabella 9. Fattore di tolleranza $i$ per diverse classi dimensionali [28].....	49
Tabella 10. Sistemi tecnica FDM per benchmark n° 1 .....	50
Tabella 11. Valutazione gradi IT Antero800NA - Fortus 450mc.....	51
Tabella 12. Valutazione gradi IT PC_White - Fortus 450mc.....	51
Tabella 13. Valutazione gradi IT PPSF – Fortus 400mc.....	51
Tabella 14. Sistemi tecnica SLA per benchmark n° 1 .....	54
Tabella 15. Valutazione gradi IT SC1000P.....	55
Tabella 16. Valutazione gradi IT Somos_Next - V650 Flex 3D.....	55
Tabella 17. Sistemi tecnica Polyjet per benchmark n° 1 .....	57
Tabella 18. Valutazione gradi IT Vero_White - Objet30 Prime .....	58
Tabella 19. Valutazione gradi IT Vero_Clear - Objet30 Prime .....	58
Tabella 20. Tecniche di Additive Manufacturing confrontate e relativi sistemi per benchmark n° 1 .....	61
Tabella 21. Sistemi tecnica DLP con strato 50 $\mu\text{m}$ per benchmark n° 2.....	65
Tabella 22. Valutazione gradi IT S-Clear 50 $\mu\text{m}$ – Rover .....	66
Tabella 23. Valutazione gradi IT S-Hard 50 $\mu\text{m}$ - Rover.....	66
Tabella 24. Valutazione gradi IT G-Strong 50 $\mu\text{m}$ - Rover .....	66
Tabella 25. Sistemi tecnica DLP con strato 100 $\mu\text{m}$ per benchmark n° 2.....	69
Tabella 26. Valutazione gradi IT S-Clear 100 $\mu\text{m}$ - Rover .....	70
Tabella 27. Valutazione gradi IT S-Hard 100 $\mu\text{m}$ - Rover.....	70
Tabella 28. Valutazione gradi IT G-Strong 100 $\mu\text{m}$ - Rover .....	70
Tabella 29. Sistemi tecnica Polyjet per benchmark n° 2 .....	72
Tabella 30. Valutazione gradi IT Vero_Clear 16 $\mu\text{m}$ – Objet30 Prime .....	73
Tabella 31. Valutazione gradi IT Vero_Clear 28 $\mu\text{m}$ – Objet30 Prime .....	74
Tabella 32. Tecniche di Additive Manufacturing confrontate e relativi sistemi per benchmark n° 2 .....	76
Tabella 33. Costi e tempi di produzione per campioni del benchmark n° 2 .....	82

## *Bibliografia*

- [1] Iuliano, Materiale didattico del corso di “Produzione assistita dal calcolatore”, Politecnico di Torino, Anno Accademico 2019/2020.
- [2] Handal, “An Implementation Framework for Additive Manufacturing in Supply Chains”, *Journal of Operations and Supply Chain Management*, Novembre 2017.
- [3] Kocovic, “3D Printing and Its Impact on the Production of Fully Functional Components”, Vol. 1, IGI Global, 2017.
- [4] Shapeways Blog, “A Brief History of Additive Manufacturing”, 2020.
- [5] Sculpteo Blog, “The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication”, Marzo 2020.
- [6] Wohlers Associates, “Wohlers Report 2018 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report”, 2018.
- [7] Smartech Analysis, “2019 Additive Manufacturing Market Outlook and Summary of Opportunities”, 2019.
- [8] Gibson, Rosen, Stucker, “Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to digital manufacturing”, Springer, 2010.
- [9] Puzello, “Additive Manufacturing e stampa 3d: definizione ed esempi”, 3D4Growth Blog, 2018.
- [10] Udrioiu, Braga, “Polyjet technology applications for rapid tooling”, MATEC Web of Conferences, 2017.
- [11] Manufactur3D Magazine, “The Difference between DLP and SLA”, Gennaio 2018.
- [12] Garg, Singh, “A framework for development of pattern for dies using FDM”, *International Journal of Advanced Mechatronics and Robotics*, 3(2): 53-60, 2011.
- [13] Garg, Singh, “Fused Deposition Modeling – A State of Art Review and Future Applications”, Elsevier, 2016.
- [14] Ahn, Montero, Odell, Roundy, Wright, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”, *Rapid Prototyping* Vol. 8 Number 4 pp. 248–257, Emerald, 2002.
- [15] Moylan, Slotwinski, Cooke, Jurrens, Donmez, “Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes”, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2012.

- [16] Minetola, Iuliano, Marchiandi, “Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades”, *Procedia CIRP* 41 (2016) 1027 – 1032.
- [17] ISO 286-1:2010 Geometrical product specifications (GPS) - ISO code system for tolerances on linear sizes, Part 1.
- [18] Mechanical Tolerance Standards Menu, Engineers Edge [Online], [https://www.engineersedge.com/international\\_tol.htm](https://www.engineersedge.com/international_tol.htm)
- [19] Formlabs Blog, “GD&T: The Basics of Geometric Dimensioning and Tolerancing”.
- [20] GD&T 101: An Introduction to Geometric Dimensioning and Tolerancing, Fictiv [Online], <https://www.fictiv.com/articles/gdt-101-an-introduction-to-geometric-dimensioning-and-tolerancing>
- [21] Scheda tecnica Sharebot Rover, Sharebot [Online], <https://www.sharebot.it/sharebot-rover/>
- [22] Scheda tecnica Objet30 Prime, Stratasys [Online], <https://www.stratasys.com/it/3d-printers/objet30-prime>
- [23] Scheda tecnica Fortus 450mc, Stratasys [Online], <https://www.stratasys.com/it/3d-printers/fortus-450mc>
- [24] Scheda tecnica Fortus 400mc, [Online], <https://www.rnd-tech.com/media/fdm-pdfs/fortus-ss-400mc.pdf>
- [25] Scheda tecnica V650 Flex 3D, Stratasys [Online], scaricabile dal sito <https://www.stratasys.com>
- [26] Coordinate Measuring Machines, Keyence [Online], <https://www.keyence.com/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/3d.jsp>
- [27] PC-DMIS for bridge and gantry CMMs, Hexagon [Online], <https://www.hexagonmi.com/products/software/pc-dmis/pcdmis-cmm-388>
- [28] Minetola, Calignano, Galati, “Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers”, *Additive Manufacturing* Vol. 32, 101103, 2020, Elsevier.