

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica



**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Studio di caratterizzazione geometrica e dimensionale dei processi di Additive Manufacturing basati su tecnologie di fotopolimerizzazione

Relatori

Ing. Flavia Calignano

Ing. Manuela Galati

Prof. Luca Iuliano

Candidato

Alessandro Bove

Anno Accademico 2020-2021

Indice

<i>Introduzione</i>	9
<i>CAPITOLO 1 – LE TECNOLOGIE DI ADDITIVE MANUFACTURING PER FOTOPOLIMERIZZAZIONE</i>	11
<i>1.1 Storia dell’Additive Manufacturing</i>	11
<i>1.2 I principi base della fotopolimerizzazione</i>	13
<i>1.3 La stereolitografia</i>	13
1.3.1 Il formato STL	16
1.3.2 Lo Slicing.....	18
1.3.3 I supporti	19
<i>1.4 I processi “bottom-up”</i>	20
<i>1.5 Stereolitografia inversa</i>	22
1.5.1 Gli stili di costruzione	24
<i>1.6 DLP</i>	27
<i>1.7 Il post-processamento</i>	28
<i>CAPITOLO 2 – LA CARATTERIZZAZIONE DEI PROCESSI: LO STATO DELL’ARTE</i>	31
<i>2.1 Caratterizzazione dei processi</i>	31
<i>2.2 Caratterizzazione geometrica: studio della rugosità</i>	32
2.2.1 Effetto staircase.....	33
2.2.2 La rugosità	34
2.2.3 Il benchmark	37
<i>2.3 Caratterizzazione geometrica e dimensionale</i>	38
2.3.1 Il grado IT	39
2.3.2 Tolleranze geometriche.....	41
<i>CAPITOLO 3 – LA CARATTERIZZAZIONE DEI PROCESSI: SPERIMENTAZIONE</i>	44

3.1 Le macchine.....	44
3.2 Produzione dei campioni.....	47
3.2.1 Preparazione del file STL: Truncheon	48
3.2.2 Produzione dei Truncheon su <i>Antares</i>	50
3.2.3 Produzione dei Truncheon su <i>Rover</i>	58
3.2.4 Produzione dei benchmark per la caratterizzazione geometrico-dimensionale su <i>Antares</i>	60
3.3 Fase di misurazione al rugosimetro: i risultati ottenuti	64
3.3.1 Misurazione al rugosimetro: <i>Antares</i>	64
3.3.2 Misurazione al rugosimetro: <i>Rover</i>	70
3.3.4 Analisi di regressione dei dati sperimentali	73
3.4 Tomografia Computerizzata.....	77
3.4.1 Misurazione di benchmark per la verifica dimensionale con tomografia computerizzata	78
CAPITOLO 4 – I MATERIALI CERAMICI PER LA STEREOLITOGRAFIA	88
4.1 I materiali ceramici e l'Additive Manufacturing	88
4.2 Le caratteristiche di una resina ceramica.....	89
4.3 Il processo produttivo.....	92
CAPITOLO 5 – CONCLUSIONI	94

Indice delle figure

Figura 1 - Classificazione delle tecniche di prototipazione rapida per resine foto-indurenti...	16
Figura 2 - Esempio di un file STL.....	18
Figura 3 - Slicing di un file STL	19
Figura 4 - Funzioni dei supporti.....	20

Figura 5 - Distinzione tra processi top-down (SLA, a sinistra) e processi bottom-up (DLP, a destra).....	21
Figura 6 - Metodi di separazione tra pezzo e vasca	22
Figura 7 – SLA inversa	23
Figura 8 - Ordine di scansione dello stile WEAVE	25
Figura 9 - Scansione in stile STAR-WEAVE lungo l'asse x.....	26
Figura 10 - A sinistra, stile WEAVE. A destra, stile STAR-WEAVE	26
Figura 11 - Digital Light Projection.....	27
Figura 12 - Digital Micromirror Device (DMD) 3x3. Le dimensioni caratteristiche degli specchi possono variare tra 50 μm e 1 mm [10].....	28
Figura 13 - Post-processamento per la stereolitografia	30
Figura 14 [12]- Effetto staircase su una superficie generica	33
Figura 15 - Andamento di rugosità in funzione dell'angolo di inclinazione della superficie e dell'angolo di inclinazione del profilo	34
Figura 16 - Andamento di rugosità in funzione dell'angolo di inclinazione della superficie e dello spessore di strato	34
Figura 17 - Truncheon, benchmark per lo studio della rugosità	37
Figura 18 - Benchmark per la caratterizzazione dimensionale e geometrica utilizzati da [22] (a sinistra) e da [23] (a destra).....	42
Figura 19 - Sharebot Antares (SLA)	44
Figura 20 - Specifiche tecniche Sharebot Antares (SLA)	45
Figura 21 - Resina PR-S Sharebot.....	45
Figura 22 - Resina PR-T Sharebot	46
Figura 23 - Sharebot Rover (DLP).....	46
Figura 24 - Proprietà resine commerciali Sharebot (Rover)	47
Figura 25 - Truncheon in 5 parti per lo studio di rugosità	49

Figura 26 - Segno identificativo del campione numero 2	50
Figura 27 - Configurazione per macchina Antares su Creation Workshop	51
Figura 28 - Configurazione Slicing Profile a spessore 0,05 mm su Ultimaker Cura.....	52
Figura 29 - Posizionamento campioni Truncheon su CW	53
Figura 30 - Esempio di layer visualizzabile dopo lo slicing	54
Figura 31 - Processo di stampa ultimato su Antares per campioni a spessore 0,1 mm.....	55
Figura 32 - Digital ultrasonic cleaner di Sharebot	56
Figura 33 - Trattamento in forno con lampada ad ampio spettro.....	57
Figura 34 - Ingrandimento dei campioni per la visualizzazione dell'effetto staircase su campioni a spessore 0,1 mm	57
Figura 35 - Posizionamento campioni truncheon su DLP Slicer	59
Figura 36 - Visualizzazione dello slicing sul DLP Slicer	59
Figura 37 - Campioni di truncheon prodotti con Rover con spessore di strato 0,1 mm	60
Figura 38 - Benchmark per lo studio del Grado IT e per la caratterizzazione geometrica	61
Figura 39 - Slicing View di Creation Workshop.....	63
Figura 40 – Campioni prodotti con Antares per la valutazione dimensionale	63
Figura 41 - Andamento teorico di rugosità, spessori di strato di 0,1 mm	66
Figura 42 - Risultati delle misurazioni sui truncheon (SLA) con spessori di strato 0,05 mm .	66
Figura 43 - Risultati delle misurazioni sui truncheon (SLA) con spessori di strato 0,1 mm ...	67
Figura 44 - Effetto staircase visto al rugosimetro	68
Figura 45 - Report sulle misurazioni effettuate sui campioni a spessore 0,1 mm.....	69
Figura 46 - Risultati delle misurazioni sui truncheon (DLP) con spessori di strato 0,05 mm .	71
Figura 47 - Risultati delle misurazioni sui truncheon (DLP) con spessori di strato 0,1 mm ...	71
Figura 48 - Sopra, report sulle misurazioni effettuate sui campioni a spessore 0,05 mm; sotto, quello relativo ai campioni a spessore 0,1 mm	72

Figura 49 - Modelli di regressione per SLA - (a) 0,05 mm - 0°/180°, (b) 0,05 mm 180°/360°, (c) 0,1 mm - 0°/180°, (d) 0,1 mm 180°/360°	74
Figura 50 - Modelli di regressione per DLP - (a) 0,05 mm – 0°/180°, (b) 0,05 mm 180°/360°, (c) 0,1 mm - 0°/180°, (d) 0,1 mm 180°/360°	75
Figura 51 - Tomografia computerizzata General Electric.....	77
Figura 52 - Procedura di riconoscimento materiale, Volume Graphics.....	79
Figura 53 - Procedura di registrazione dell’oggetto, Volume Graphics	80
Figura 54 - Cordinate system di tutti i pezzi scansionati tramite tomografia computerizzata .	81
Figura 55 - Procedura di misurazione elementi lineari, Volume Graphics.....	82
Figura 56 - Procedura di misurazione elementi circolari, Volume Graphics.....	82
Figura 57 - Grafico riepilogativo dei risultati relativi alla valutazione del grado IT su Antares	83
Figura 58 – Grafici di deviazione del pezzo scansionato rispetto al modello STL di partenza. Dall’alto al basso, serie 1, 2 e 3.....	84
Figura 59 - Grafici di deviazione del pezzo scansionato rispetto al modello STL di partenza. Dall’alto al basso, serie 5, 6 e 8.....	85
Figura 60 - Grafici di deviazione del pezzo scansionato rispetto al modello STL di partenza. Dall’alto al basso, serie 9 e 4.....	86
Figura 61 - Mappe vettoriali, deviazione dimensionale	87
Figura 62 - Effetto scattering in alto, effetto di un fascio laser su una resina grezza in basso a sinistra, su una resina ceramica in basso a destra.....	89
Figura 63 - A sinistra, Debinding; a destra, Sinterizzazione.....	93

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Valori di lunghezza di campionamenti consigliati dalla normativa [14].....	36
--	----

Tabella 2 - Fattori standard di tolleranza per i range dimensionali da 1 mm a 120 mm per gradi IT5-IT18	40
Tabella 3 - Gradi di tolleranza IT	41
Tabella 4 - Codice identificativo di ogni misura ottenuta	78

Introduzione

Nell'ambito di questo lavoro si propone uno studio di caratterizzazione dei principali processi di Additive Manufacturing per fotopolimeri, come *Stereolitografia inversa* e *Digital Light Projection*, attraverso l'utilizzo di benchmark opportunamente ideati per la verifica delle prestazioni dimensionali e geometriche dei macchinari situati all'interno del centro Interdipartimentale Integrated Additive Manufacturing, IAM@Polito, del Politecnico di Torino.

La fabbricazione additiva, o Additive Manufacturing (AM), è nata come tecnica di prototipazione rapida, in quanto permetteva di ottenere dei prototipi concettuali e funzionali in tempi piuttosto ridotti, andando a eliminare i tempi di attesa per la verifica dei prototipi che pesavano considerevolmente sul *time to market*. Il principio su cui si basa, come il nome stesso suggerisce, è caratterizzato dalla produzione di un prototipo "layer to layer", ovvero strato dopo strato.

Lo sviluppo di questa tecnica ha permesso, soprattutto in tempi recenti, di ottenere componenti con complessità geometriche notevoli, che non potrebbero essere prodotti con tecniche convenzionali.

I processi che sono stati caratterizzati in questa tesi sono basati sul principio della fotopolimerizzazione, ovvero la solidificazione di uno strato di resina costituita da monomeri a basso peso molecolare attraverso l'apporto di energia per mezzo di un laser a luce ultravioletta nel caso della Stereolitografia, di un proiettore nel caso della tecnologia di Digital Light Projection.

Dopo un'accurata descrizione dei processi riportata nel Capitolo 1, si propone nel Capitolo 2 una revisione della letteratura, così da verificare lo stato dell'arte dei processi di caratterizzazione dimensionale e geometrica che utilizzano delle procedure sperimentali. Questa revisione consente di comprendere al meglio l'importanza di alcuni parametri che influiscono in maniera preponderante, oltre che trasversale, sulla produzione. Il Capitolo 3 è adibito alla presentazione delle procedure sperimentali e dei risultati ottenuti. Successivamente, si riporta nel Capitolo 4 una trattazione relativa all'utilizzo di materiali ceramici nell'ambito delle tecnologie di stereolitografia. Ad oggi i materiali ceramici costituiscono soltanto una

nicchia del mercato mondiale sull'Additive Manufacturing; le loro particolari caratteristiche chimico-fisiche li rendono adeguati ad un gran numero di applicazioni nell'industria meccanica, biomedica, aerospaziale. Tuttavia, le lavorazioni dei materiali ceramici richiedono processi a temperature e pressioni molto elevate. L'utilizzo delle tecnologie di Additive Manufacturing come la stereolitografia, consente ad oggi di ottenere dei componenti ad elevata complessità e precisione geometrica dimensionale anche con questo tipo di materiali. Il processo produttivo e la annessa fase di post-processamento necessitano però di accortezze particolari, che verranno di seguito analizzate.

Ciò che si intende stabilire in particolar modo è la corretta metodologia che consenta di conoscere appieno le attitudini di una macchina alla produzione di componenti, di modo da avere una base di partenza per le caratterizzazioni di nuove tecnologie. L'Additive Manufacturing è in continua espansione, spetta dunque al mondo della ricerca e della sperimentazione trovare i metodi più adeguati al miglioramento di questo tipo di settore produttivo.

CAPITOLO 1 – LE TECNOLOGIE DI ADDITIVE MANUFACTURING PER FOTOPOLIMERIZZAZIONE

1.1 Storia dell'Additive Manufacturing

Una necessità che è divenuta col tempo sempre più grande, sia per l'aumento di competitività sul mercato mondiale, sia per la notevole spinta data dal progresso tecnologico, è la riduzione del *time to market*, ovvero il tempo che intercorre tra la concezione di un prodotto e il suo ingresso nel mercato. In tal senso, nella seconda metà del secolo scorso, si è cercato di levigare il più possibile tutti i tempi del processo produttivo che avevano un peso preponderante sulla produzione.

A livello globale, il tempo associato alle prototipazioni di un prodotto è sempre stato piuttosto lungo per diversi motivi; la prototipazione, di per sé, è costituita da diverse fasi: la *prototipazione concettuale* in cui si verifica in linea di massima l'aspetto di un prodotto, la *prototipazione funzionale* in cui si controlla che il prodotto rispetti delle specifiche di qualità, la *prototipazione tecnica* in cui si migliorano i processi che consentono l'ottenimento del prodotto, la *prototipazione pre-serie* in cui si verificano tutti gli aspetti relativi all'immissione sul mercato.

L'Additive Manufacturing si va ad inserire, all'inizio degli anni '80, in un contesto in cui la prototipazione funzionale e la prototipazione tecnica costituivano un peso notevole per la tempistica di produzione. Di fatti, avere una tecnologia che permette di ottenere rapidamente un pezzo di qualunque geometria senza l'utilizzo di particolari macchinari consente di migliorare non solamente l'intero processo produttivo, ma anche il prodotto stesso.

Il concetto di base su cui si fonda, è la generazione di un componente, strato per strato, a partire da un modello CAD (Computer Aided Design). Lo sviluppo di software di modellazione tridimensionale ha dato una spinta notevole allo sviluppo di questa tecnologia, in particolar

modo grazie alla nascita di diverse interfacce CAD/CAM (come ad esempio .iges, .step, etc.) il cui ruolo fondamentale è quello di “tradurre” le geometrie tridimensionali, codificandole, in un file che contenga elementi geometrici semplici a costituire l’oggetto modellato. Questo tipo di file è chiamato *STL*, ovvero Standard Triangulation Language. I file STL vengono generati attraverso l’approssimazione di superfici nello spazio in triangoli; le superfici piane, necessitano di un numero inferiore di triangoli rispetto alle superfici curve, che devono essere approssimate con un numero di triangoli più elevato. Una volta ottenuto il file STL relativo al modello CAD 3D, è possibile procedere allo *slicing* del componente, cioè alla divisione del componente in strati, che a seconda della tecnologia, verranno prodotti uno dopo l’altro.

Una delle prime tecnologie nate nell’ambito della fabbricazione additiva, è la *stereolitografia*. Essa viene commercializzata per la prima volta da **Charles W. Hull**, noto come “il padre della fabbricazione additiva”. Hull fonda pochi anni dopo una delle principali aziende dell’ambito, che ad oggi ha un fatturato di oltre mezzo milione di dollari, la **3D SYSTEM**.

La stereolitografia sfrutta la polimerizzazione di una resina monomerica, posta all’interno di una vasca di contenimento, attraverso l’utilizzo di una luce UV generata da un laser direzionato attraverso uno specchio. All’interno della vasca, una piattaforma scorre verso il basso una volta che uno strato viene solidificato, fino a termine del processo. Il primo macchinario brevettato da Hull è SLA 1.

Alla fine degli anni ’80 nasce una tecnologia chiamata *Digital Light Projection* (in letteratura si utilizza anche il nome *Digital Light processing*), che consente di proiettare luce digitale attraverso l’utilizzo di un *Digital Mirror Device*, un dispositivo costituito da micro-specchi in grado di ruotare su due assi.

Qualche anno più tardi, si sfrutterà questa tecnologia per nuove applicazioni di stereolitografia, attraverso la nascita dei processi “dal basso verso l’alto” (meglio noti in inglese con il nome di “Bottom-Up Processes”).

Dall’inizio degli anni ’90 in poi, l’Additive Manufacturing inizia a diventare principio cardine di un notevole numero di tecnologie fino a quando, all’inizio degli anni duemila, diventa oltre che una tecnica di prototipazione anche una vera e propria tecnica di produzione, grazie allo sviluppo di tecnologie non solo per materiali polimerici, ma anche metallici e ceramici. Lo sviluppo di tecniche per metalli costituisce una svolta notevole nell’ambito dell’industria meccanica in cui spesso si necessita di forme piuttosto complesse col fine di ridurre al minimo

i pesi in gioco. Le tecniche per materiali ceramici, seppur ricoprono ancora ad oggi una piccola fetta del mercato mondiale per l'Additive Manufacturing, hanno avuto un notevole impatto nell'ambito medicale per la generazione di protesi con materiale biodegradabile, oltre che nell'industria meccanica e aerospaziale grazie alle particolari caratteristiche chimico-fisiche che li rendono utili in molteplici applicazioni.

1.2 I principi base della fotopolimerizzazione

La fotopolimerizzazione è un fenomeno attraverso cui catene corte di monomeri si combinano tra loro formando lunghe catene polimeriche, attraverso un apporto esterno di energia (come ad esempio calore o fascio di elettroni)[1]. La polimerizzazione foto-indotta comporta l'unione di monomeri attraverso una reazione a catena innescata da un fotone, solitamente avviene nel campo delle lunghezze d'onda comprese tra 200-400 nm (luce UV).

A livello macroscopico, si assiste alla solidificazione di una resina liquida costituita da oligomeri (circa il 70 wt.%), monomeri (circa il 25 wt.%) che hanno il compito di ridurre la viscosità dovuta alla presenza degli oligomeri, e un foto-iniziatore (PIs, circa 5 wt.%) che è adibito all'innescamento del processo di reticolazione dovuto all'esposizione ultravioletta [2]. Le catene polimeriche nascono attraverso un meccanismo che porta alla sostituzione delle interazioni deboli di Van der Waals con legami covalenti forti tra atomi di C appartenenti a diverse molecole di monomero; il PIs tende a formare dei radicali liberi nelle resine a base acrilica attraverso l'assorbimento di luce UV, andando ad attaccare i doppi legami $C = C$, e innescando dunque la sostituzione dei legami molecolari. Quanto alle resine a base epossidica invece, il PIs è di tipo cationico e dà origine ad una reazione acida che reagisce con i legami tra monomeri, provocando la polimerizzazione.

1.3 La stereolitografia

La stereolitografia è tra le tecniche di Additive Manufacturing che permettono di avere le prestazioni geometriche e dimensionali migliori. Nonostante sia la prima tecnologia per

polimeri ad aver fatto l'ingresso sul mercato, risulta essere tuttora una delle migliori alternative per la prototipazione rapida nell'ambito dei polimeri.

La recente attitudine di alcune combinazioni di materiali, a partire dai materiali biologici fino ad arrivare ai materiali ceramici, ha scosso un notevole interesse da parte dei diversi panorami dell'industria mondiale. In particolare, lo sviluppo di materiali biologici per la stereolitografia permette di ottenere geometrie adeguate alla creazione di protesi, modellate a seconda delle specifiche necessità di un paziente.

Il processo si basa sulla fabbricazione di un componente le cui informazioni geometriche sono contenute all'interno di un file CAD, ricevuto in input. Il file CAD, in particolare, può essere frutto non solo una modellazione tridimensionale effettuata manualmente, ma anche di una scannerizzazione tridimensionale derivante da tecniche di *reverse engineering* come risonanza magnetica (MRI) o tomografia computerizzata [3].

Storicamente, uno dei principali problemi riguardanti la lettura del file di input era la “traduzione” delle informazioni geometriche e dimensionali contenute al suo interno. Si necessitava di un'interfaccia che rendesse le informazioni raccolte nel CAD utili alla costruzione dei layer di stampa; il principio su cui si basa l'Additive Manufacturing è la divisione di un componente in strati (layer), di modo che la tecnologia di stampa possa procedere alla deposizione (o alla solidificazione) degli strati predefiniti. Questo processo è chiamato **slicing**.

Ad oggi esistono diversi tipi di formati che permettono di generare un file contenente informazioni “leggibili” dalla maggior parte dei sistemi di slicing, come ad esempio *IGES*, *STEP*, *VDA-FS*. Uno dei più riconosciuti ad oggi, e anche uno dei più semplici, è il formato *STL*, il quale consente di approssimare le superfici del componente attraverso una generazione adattativa di triangoli.

La lettura del file STL risulta piuttosto agevole, in quanto le informazioni relative alla geometria sono raccolte nelle coordinate dei vertici e nell'inclinazione della normale di ogni triangolo.

Una volta ottenuto il file STL, si può orientare il componente di modo che la stratificazione dia origine ad una qualità superficiale ottimale ma che i supporti, necessari al sostegno del pezzo sulla piattaforma di costruzione, non siano in quantità troppo elevate. In stereolitografia i supporti, a differenza di altre tecniche di prototipazione, sono anch'essi costruiti in resina;

essendo una parte di scarto, che verrà eliminata in fase di finitura, devono essere minimizzati il più possibile per ridurre il costo complessivo di stampa.

Ricevute in ingresso tutte le informazioni, si può procedere alla produzione del componente.

I principali componenti di una macchina per la stereolitografia sono i seguenti:

- Sorgente laser UV;
- Sistema di riflessione per direzionare il laser;
- Vasca;
- Piattaforma di costruzione;
- Sistema per la movimentazione della piattaforma;
- Dispositivo per l'appiattimento delle oscillazioni generate sulla superficie del fluido (solo in sistemi top-down).

La principale differenziazione che è necessario evidenziare, per quanto riguarda i processi di stereolitografia, è tra i sistemi *bottom-up* e i sistemi *top-down*. I sistemi *top-down* (dall'alto verso il basso) sono contraddistinti da una piattaforma di costruzione che si muove verso il basso, e dunque la costruzione dell'oggetto avviene a partire dalle superfici inferiori; il laser è dunque posizionato al di sopra della vasca, così come il sistema di riflessione. Nei sistemi *bottom-up* (dal basso verso l'alto) la sorgente è posizionata inferiormente alla vasca, dunque il pezzo risulterà alla fine del processo capovolto. In questo caso la piattaforma si muove verso l'alto. Questo tipo di sistemi, a loro volta sono contraddistinti in due tipologie di processi:

1. SLA
2. Digital Light Projection (DLP)

Ciò che principalmente differenzia la stereolitografia classica dalla tecnologia DLP è il dispositivo adibito a sorgente energetica; se la stereolitografia utilizza un semplice specchio, che ha la funzione di orientare il laser, la tecnologia DLP utilizza un dispositivo di riflessione a semiconduttore, costituito da micro-specchi orientabili individualmente tra $\pm 12^\circ$ attraverso dei segnali elettrici. Questo dispositivo è chiamato *Digital Micromirror Device* (DMD).

La classificazione dei sistemi appena illustrata è riportata in **Figura 1**.

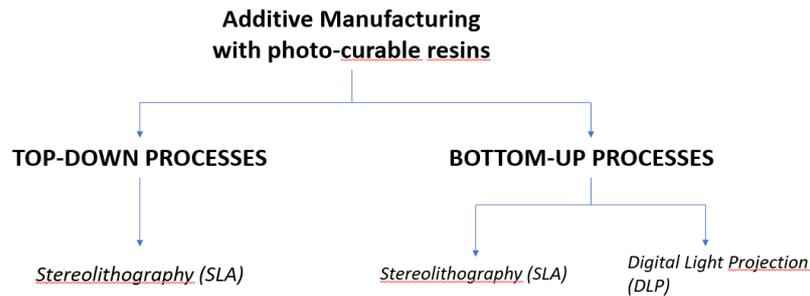


Figura 1 - Classificazione delle tecniche di prototipazione rapida per resine foto-indurenti

1.3.1 Il formato STL

Il tipo di formato STL permette di comprimere un gran numero di informazioni di carattere geometrico all'interno di un file di dimensioni irrisorie (se confrontato al corrispondente file CAD 3D). Esistono in particolare due tipi di formato STL, un formato binario e un formato ASCII.

Un file STL di tipo binario ha il grande vantaggio di avere dimensioni molto più piccole rispetto ad un file di tipo ASCII, e di conseguenza, ha una qualità di immagazzinamento delle informazioni peggiore, comporta dunque un dispendio superiore in termini di lettura [4].

Le informazioni racchiuse in un file riguardanti i triangoli con cui si può approssimare una superficie solida sono essenzialmente due, le coordinate nelle tre dimensioni dei tre vertici che costituiscono un triangolo e il vettore normale alla sua superficie (definito secondo la regola della mano destra). Un esempio di formato ASCII è qui riportato.

Solid

facet normal $n_i n_j n_k$

outer loop

vertex *Coordinata-X Coordinata-Y Coordinata-Z*

vertex *Coordinata-X Coordinata-Y Coordinata-Z*

vertex *Coordinata-X Coordinata-Y Coordinata-Z*

```
        end loop
    endfacet
    facet normal  $n_i n_j n_k$ 
        outer loop
            ...
            ...
            ...
        endfacet
    endsolid
```

Un esempio di file STL di tipo binario è:

```
UNIT8[80] - Header
UNIT32 - Numero di triangoli

foreach triangle
    REAL 32[3] - Vettore normale
    REAL32[3] - Vertice 1
    REAL32[3] - Vertice 2
    REAL32[3] - Vertice 3
    UINT16 - Conteggio byte
end
```

In **Figura 2** è riportato un risultato grafico di un file STL.

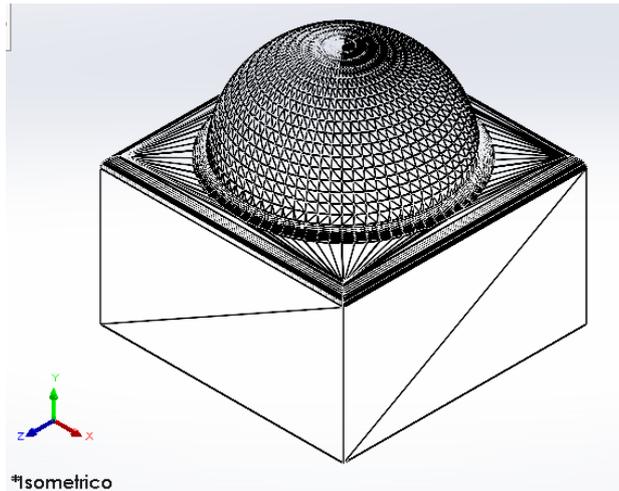


Figura 2 - Esempio di un file STL

La semplicità di ottenimento del file STL e la sua facilità di lettura hanno portato dunque a considerare questo formato uno standard per le tecnologie additive; la conoscenza delle coordinate tridimensionali dei vertici e alle inclinazioni delle normali, consente uno slicing agevole ed efficace.

I limiti che da sempre hanno contraddistinto i file STL, sono dovuti al fatto che non possono essere riportate informazioni utili come la presenza di texture, il colore o la densità del materiale. Più recentemente sono nate due diverse tipologie di file a concorrere con il formato STL per l'Additive Manufacturing, che sono il formato .amf (Additive Manufacturing Format) e il .3mf (3D Manufacturing Format). Tuttavia, essendo questi formati piuttosto innovativi (il primo è stato sviluppato nel 2011), sono ancora supportati da poche macchine in commercio.

1.3.2 Lo Slicing

Le operazioni di slicing corrispondono all'apprendimento preventivo dei movimenti che verranno effettuati durante il processo. La divisione dell'oggetto in strati consente anche di ottenere una prima previsione della qualità superficiale.

Le decisioni riguardanti l'orientamento dell'oggetto sulla piattaforma di lavoro passano in primis da questo tipo di analisi; lo slicing porterà le superfici inclinate o quelle con una curvatura ad avere una forma a gradino (un fenomeno che, come si vedrà più avanti, verrà

denominato *effetto staircase*), dunque è preferibile prediligere un orientamento che minimizzi il numero di questo tipo di superfici. I sistemi più moderni sono capaci di ridurre lo spessore di strato in corrispondenza degli strati che caratterizzano superfici curve o inclinate, in modo da ridurre al minimo l'errore superficiale in quei punti. Questa particolare caratteristica è detta *slicing adattativo*.

In **Figura 3** [5] si riporta la visualizzazione dello slicing su un file STL.



Figura 3 - Slicing di un file STL

1.3.3 I supporti

Uno dei limiti di molte tecniche di fabbricazione additiva è costituito dalla necessità di supporti. Queste strutture hanno la funzione di ancorare il componente alla piattaforma (ancor più nei processi Bottom-Up), e di sorreggere le parti a sbalzo che altrimenti, a causa del proprio peso, sarebbero caratterizzate da una freccia. Si prenda come esempio quello della **Figura 3** [5]; il componente non potrebbe essere prodotto, a meno di un cambio di orientamento, senza la presenza dei supporti in corrispondenza delle due linguette a sbalzo. In particolar modo in tecniche che sfruttano la fotopolimerizzazione, come la stereolitografia, si assiste spesso alla formazione di tensioni interne o riscaldamenti che comportano una scarsa resistenza al peso proprio, oltre alla non completa polimerizzazione delle parti interne (di solito si necessita infatti di un post-processamento in forno UV).

Ciò che rende particolarmente svantaggiosi i supporti in stereolitografia è il fatto che, a differenza di altre tecniche, come ad esempio la FDM (*Fused Deposition Modelling*), questi sono costituiti dallo stesso materiale dell'oggetto: l'immersione nella resina liquida non lascia

alternative. In FDM invece, essendo un processo basato sull'estrusione di materiale attraverso le testine di stampa, è possibile alternare il flusso di materiale primario e di materiale di supporto, che risulta anche più agevole da rimuovere in fase di finitura (sono solitamente idrosolubili).

I supporti della stereolitografia, in quanto costruiti con lo stesso materiale del pezzo, possono essere rimossi solo meccanicamente, causando una minima perdita nella qualità superficiale in corrispondenza dell'area di taglio; non è da trascurare il fatto che un'importante quantità di supporti comporta anche un aumento in termini di costi.

Per questo motivo, il secondo fattore che va a influire sull'orientazione del pezzo sulla piattaforma (dopo l'analisi relativa allo slicing) è la presenza dei supporti.

Le funzioni dei supporti possono essere riassunte in tre punti fondamentali, come illustra la **Figura 4** [6]:

- Permettono di ancorare il componente alla piattaforma di lavoro
- Sorreggono le parti a sbalzo
- Consentono la costruzione di “isole”, parti che devono essere in sospensione e non collegate ad altri corpi

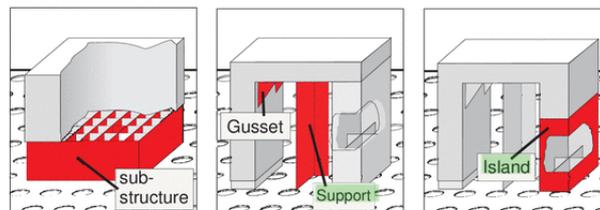


Figura 4 - Funzioni dei supporti

1.4 I processi “bottom-up”

La distinzione tra processi *bottom-up* e processi *top-down* arriva con il sopraggiungere delle nuove tecnologie che portano alla nascita del processo di Digital Light Projection (DLP). Il processo DLP sfrutta un Digital Micromirror Device (DMD) per riflettere un'immagine digitale

su uno strato di resina; questo dispositivo, a differenza dello specchio utilizzato nella classica SLA, viene posto al di sotto della vasca contenente la resina. L'inversione del processo di polimerizzazione porta con se un gran numero di vantaggi:

- La resina che subisce il processo di polimerizzazione non è a contatto con l'atmosfera
- Il dispositivo di smorzamento delle onde generate dal moto della piattaforma non è più necessario
- La quantità di resina liquida, e quindi la dimensione della vasca, non devono più avere dimensioni eccessive

I vantaggi di questo tipo di applicazioni hanno pian piano influenzato anche il processo classico di stereolitografia, portando alla nascita di nuovi processi operanti attraverso un processo di *Stereolitografia Bottom-Up*. I processi a stereolitografia inversa, lavorano analogamente ai processi DLP, tuttavia non utilizzano un DMD per la polimerizzazione dello strato ma un semplice specchio posto al di sotto della vasca.

Una distinzione qualitativa dei due tipi di processi, è visibile in **Figura 5** [3].

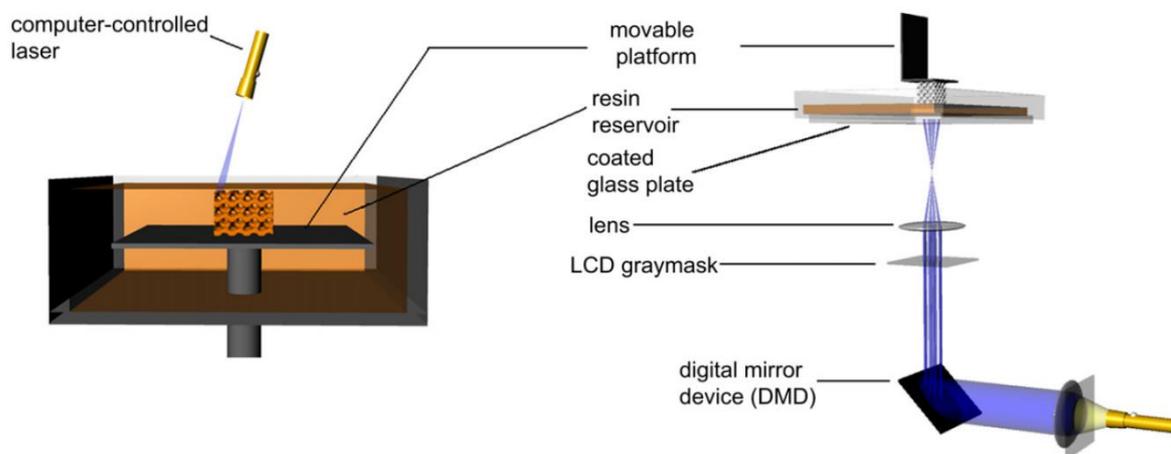


Figura 5 - Distinzione tra processi top-down (SLA, a sinistra) e processi bottom-up (DLP, a destra)

Il principale svantaggio caratteristico dei processi bottom-up riguarda la forza di separazione tra il pezzo e la vasca durante il sollevamento della piattaforma di costruzione. Infatti, la polimerizzazione comporta un indurimento della resina, e dunque un'adesione dello strato alle superfici solide che lo circondano. Tuttavia, l'adesione dello strato al fondo della vasca

costituisce un problema di processo non banale, in quanto risulta necessario determinare con attenzione la forza attraverso cui la piattaforma effettua la manovra di ascensione; una forza di separazione non adeguata potrebbe comportare seri problemi al corretto funzionamento del processo produttivo.

X. Wu et al. [7] hanno utilizzato un modello di coesione per la previsione della relazione esistente tra la forza di separazione tra pezzo e vasca e la velocità di risalita della piattaforma, è stato poi verificato il modello attraverso delle prove sperimentali, in cui si sono utilizzati tre metodi di separazione differenti, riportati in **Figura 6** [7].

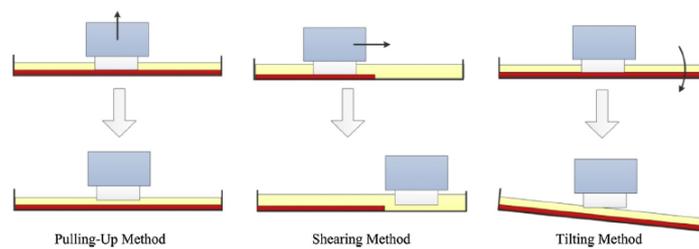


Figura 6 - Metodi di separazione tra pezzo e vasca

La determinazione della velocità di separazione ottimale permette di preservare il processo, facendo sì che non avvengano rotture in fase di costruzione.

1.5 Stereolitografia inversa

È un processo di stereolitografia di tipo *bottom-up*, sfrutta la proiezione di un fascio laser ultravioletto opportunamente direzionato attraverso uno specchio. In **Figura 7** si riporta una schematizzazione del processo.

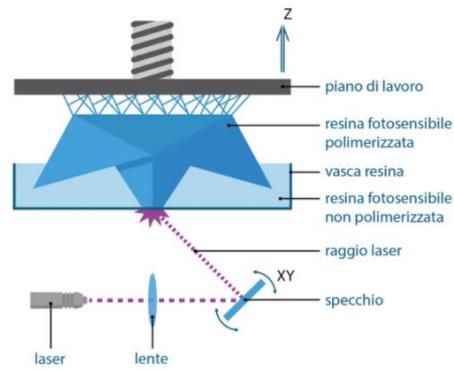


Figura 7 – SLA inversa

I componenti principali sono:

- Una sorgente laser ultravioletta
- Una lente
- Uno specchio direzionabile
- Una vasca contenente la resina liquida
- Una piattaforma di costruzione
- Un meccanismo per la trasmissione del moto di traslazione verticale della piattaforma

I principali parametri di processo, quelli che influiscono maggiormente sulla qualità finale dell'oggetto, sono essenzialmente tre: spessore di strato, velocità di scansione e strategia di scansione. Se i primi due parametri sono condivisi tra *Stereolitografia inversa* e *DLP*, l'ultimo parametro riguarda esclusivamente i processi di *Stereolitografia inversa*. Questo perché i processi *DLP* non sfruttano il movimento di un fascio laser, ma imprimono un'immagine digitale istantaneamente sullo strato di resina, dunque non necessitano di una strategia per l'ottimizzazione del "percorso utensile".

Lo spessore di strato è il parametro che principalmente influisce sulla qualità superficiale del pezzo e sui tempi del processo. Il tempo di scansione è strettamente correlato all'adesione degli strati a quelli precedentemente polimerizzati: aumentando il tempo di scansione, è più elevata la dimensione dello strato polimerizzato, e questo fa sì che eventuali parti di resina non polimerizzate in corrispondenza dello strato precedentemente processato possano essere corrette.

Ogni macchina ha poi delle strategie di scansione (anche dette *stili di costruzione*) predefinite, che consentono di avere caratteristiche finali del componente differenti, a favore o a discapito del tempo di processo.

Al fine di comprendere le differenze esistenti tra i vari stili di costruzione è utile indagare il modello matematico alla base del processo di stereolitografia. L'equazione di Beer-Lambert consente di avere una previsione dello strato polimerizzato, in ragione di tre parametri: la profondità di penetrazione D_p (μm), la densità di energia critica E_c (mJ/cm^2) e la densità di energia irradiata E (mJ/cm^2) [3]. L'equazione che descrive la relazione tra questi parametri e lo spessore polimerizzabile (C_d espresso in μm) è la seguente.

$$C_d = D_p \cdot \ln \left(\frac{E}{E_c} \right)$$

Come è evidente, lo spessore polimerizzabile aumenta in maniera logaritmica con il tempo di esposizione, parametro racchiuso all'interno dell'espressione della densità di energia irradiata E (mJ/cm^2). La densità di energia critica E_c (mJ/cm^2) è un valore caratteristico per una determinata resina, è il valore energetico in corrispondenza del quale la resina raggiunge il *gel point* e inizia a polimerizzare; quando il valore della frazione all'interno del logaritmo raggiunge valori superiori a 1, lo strato di resina inizia a formarsi.

1.5.1 Gli stili di costruzione

Il fascio laser che lambisce lo strato di resina viene per la maggior parte assorbito, e in relazione al grado di assorbimento del materiale, si avrà una determinata distribuzione geometrica del laser all'interno del mezzo; nella maggior parte delle resine si assiste ad una distribuzione di tipo parabolico. Quest'informazione è piuttosto importante in quanto influenza notevolmente la quantità di resina non polimerizzata per ogni strato, portando ad avere un componente con una buona dose di errori costruttivi. A tal proposito, **3D Sysyem** ha indagato sui possibili stili di costruzione che consentono di avere, a seconda delle necessità e in funzione del tipo di resina, una qualità del processo superiore o un tempo di processo rapido.

Lo stile di costruzione definisce il tipo di percorso che il laser deve effettuare sulla piattaforma (lungo gli assi x e y). Gli stili di costruzione tipici per un processo di SLA sono [8]:

- *Tri-Hatch*
- *WEAVE*
- *STAR-WEAVE*
- *ACES/QuickCast*

Il *Tri-Hatch* è caratterizzato da un tratteggio con una sezione triangolare con spaziature intorno ai $50\ \mu\text{m}$, è uno stile che dà origine a una discreta quantità di punti in cui la resina non viene polimerizzata, inoltre sulle pareti verticali ha una scarsa finitura superficiale per *effetto staircase*.

Gli stili *WEAVE* e *STAR-WEAVE* utilizzano un profilo del laser parabolico, sono tipici di un processo con qualità più elevata (in confronto al *Tri-Hatch*) e una quantità di resina polimerizzata superiore. In particolare, il laser, nello stile *WEAVE*, si muove effettuando delle corse lungo x e successivamente delle corse lungo y ; le “linee di costruzione” sono distanziate di circa $1\ \mu\text{m}$ lungo entrambi gli assi. Strato per strato, le linee vengono sovrapposte. In **Figura 8** [8] viene rappresentato uno schema di funzionamento dello stile *WEAVE*.

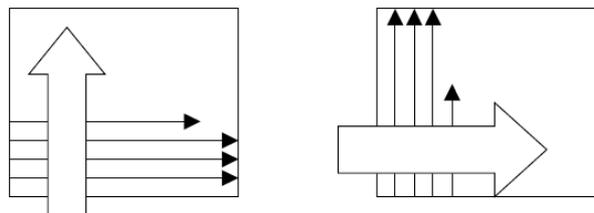


Figura 8 - Ordine di scansione dello stile *WEAVE*

Quanto allo stile *STAR-WEAVE*, si può descrivere attraverso un'analisi dell'acronimo preposto “STAR” [8]:

- STaggered Hatch
- Alternate sequencing
- Retracted Hatch

La differenza sostanziale con lo stile *WEAVE* è nell'alternanza delle linee di costruzione tra strato e strato, che non sono più sovrapposte. Inoltre, è più complessa la strategia di scansione lungo i due assi della piattaforma, anch'essa viene alternata tra strato e strato. In **Figura 9** [8] è rappresentato uno schema di scansione per lo stile *STAR-WEAVE* lungo l'asse *x*.

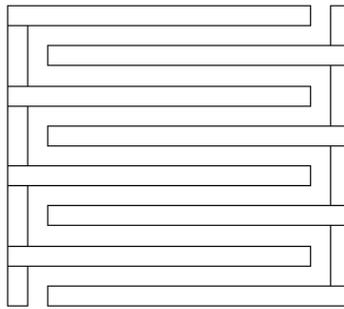


Figura 9 - Scansione in stile *STAR-WEAVE* lungo l'asse *x*

In **Figura 10** [8] si riportano le due differenti configurazioni (lungo *z*) dei due stili.

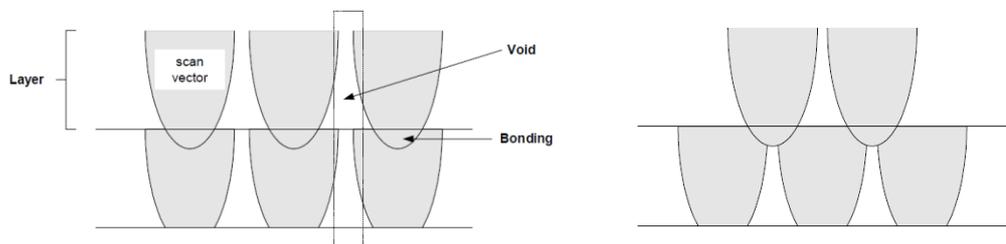


Figura 10 - A sinistra, stile *WEAVE*. A destra, stile *STAR-WEAVE*

L'ultimo stile di costruzione, lo stile *ACES*, è quello che contraddistingue la migliore qualità del processo; a differenza degli altri però, può essere utilizzato solo su delle resine Epossidiche. È costituito da una polimerizzazione completa e uniforme, senza la creazione di "vuoti". Le resine epossidiche, sono note per l'ottima stabilità dimensionale e meccanica in questo tipo di processi.

1.6DLP

Il processo di Digital Light Projection è stato sviluppato diversi anni dopo la nascita della stereolitografia classica, cavalcando l'onda della crescita tecnologica nell'ambito della produzione dei micro-componenti ha coniugato le necessità di riduzione dei tempi di processo tipico della stereolitografia con la nascita di un dispositivo, il Digital Micromirror Device, costituito da un cospicuo numero di micro-specchi in grado di ruotare su due assi di quantità angolari di $\pm 12^\circ$ (la rotazione degli specchi consente di avere una capacità di switch del singolo pixel, dunque l'accensione o lo spegnimento a seconda del tipo di immagine digitale) [3], rendendo possibile la generazione di un'immagine digitale bidimensionale a partire da una sorgente unica; per il resto, i macchinari a DLP condividono la maggior parte dei componenti con la SLA.

In **Figura 11** [9] si riporta un esempio di macchinario per la DLP.

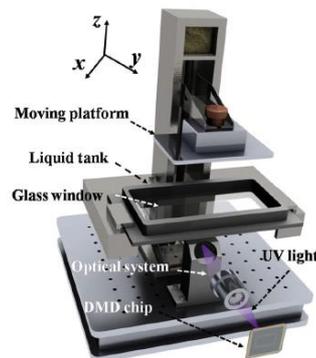


Figura 11 - Digital Light Projection

Ciò che ancora oggi distingue principalmente i processi DLP da quelli di SLA Bottom-Up, oltre alla presenza del DMD, è la dimensione dei volumi di costruzione. La classica SLA può avere dimensioni piuttosto notevoli del volume di costruzione, non vi sono particolari limiti; quanto ai processi di tipo bottom-up, come detto in precedenza, si tende a lavorare con quantitativi di resina ridotti, sono infatti processi destinati ad applicazioni in cui sono coinvolti volumi piccoli.

In particolare, i processi DLP, se da un lato sono forti della presenza del DMD, che consente di ridurre i tempi di costruzione, dall'altro sono vincolati ai limiti stessi di tale dispositivo.

Il DMD (un esempio di immagine ingrandita è riportata in **Figura 12** [10]) permette di imprimere l'immagine digitale attraverso la vasca trasparente contenente la resina, attraverso un comando di ON/OFF su ogni singolo micro-specchio. Il segnale che giunge al basamento del dispositivo, consente dunque di ruotare un singolo specchio, che quindi costituisce il singolo pixel dell'immagine, permettendo alla sorgente laser di essere riflessa o di essere deviata. La definizione dell'immagine è funzione della dimensione dei micro-specchi, ed è notevolmente influenzata dalla distanza tra dispositivo e vasca. Infatti, la principale problematica derivante dall'applicazione di un DMD riguarda il fenomeno di dispersione luminosa. Ponendo un DMD eccessivamente lontano dalla vasca (col fine di avere un'immagine digitale proiettata più estesa) innesca dei fenomeni che comportano una perdita nella qualità di riflessione. Inoltre, si assiste molto spesso a perdite di qualità in corrispondenza delle parti più esterne della piattaforma a causa dell'accentuarsi di fenomeni rifrattivi.

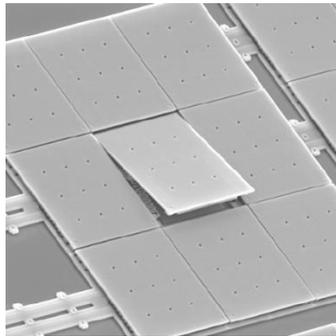


Figura 12 - Digital Micromirror Device (DMD) 3x3. Le dimensioni caratteristiche degli specchi possono variare tra 50 μm e 1 mm [10]

1.7 Il post-processamento

Il post-processamento è una fase piuttosto critica dei processi di fotopolimerizzazione. Le caratteristiche di uno specifico macchinario, unite ai veri limiti fisici del processo, portano ad avere un componente con delle zone in cui si trova della resina residua non polimerizzata. Di

per sé la rimozione dei supporti costituisce un limite a livello pratico, ma non è l'unica ragione del post-processamento.

La presenza di zone in cui il laser non ha avuto effetto può essere dovuta diversi fattori. Una possibile causa potrebbe essere una perdita di intensità del laser dovuta ad una zona che ha assorbito una quantità di energia superiore alle aspettative, oppure una generazione di fenomeni di rifrazione che compromettono la completa riuscita del processo. Ogni resina presenta poi specifiche caratteristiche chimico-fisiche, essendo composta da diversi elementi legati tra di loro. La fotopolimerizzazione, nella maggior parte dei casi, necessita di avvenire su determinati range di lunghezza d'onda; un valore tipico per la stereolitografia è 405 nm, che è all'interno del campo ultravioletto. La presenza dunque di zone in cui l'assorbimento energetico, dovrebbe avvenire su livelli differenti di lunghezza d'onda, non può essere escluso a priori, e ciò comporta la necessità di un post-processamento.

Una tipica tendenza nell'ambito di queste tecnologie è quella di utilizzare le strategie di scansione del laser per fare in modo che possano essere induriti i bordi dell'oggetto lasciando la resina liquida all'interno, così da sottoporre l'oggetto ad un trattamento successivo in un forno ad ampio spettro. Questo tipo di scelta consente infatti di avere un notevole risparmio in termini energetici, in quanto si utilizza il laser ad alta potenza solo per "il necessario".

Le fasi di un tipico post-processamento per le tecniche di SLA e DLP sono [6]:

- Rimozione del pezzo dalla piattaforma
- Rimozione meccanica dei supporti attraverso opportuna strumentazione
- Lavaggio attraverso etere monometilico tripropilenglicole (TMP), che consente di disciogliere la resina residua non polimerizzata all'esterno del componente¹
- Rimozione del solvente attraverso un ulteriore lavaggio in alcol isopropilico
- Trattamento in forno ad ampio spettro (con lunghezze d'onda tra 200-405 nm)

La sequenza di operazioni è illustrata in **Figura 13** [6]. Gli effetti del post-processamento portano ad una resa della polimerizzazione intorno ad un valore del 96% [6].

¹ In realtà il TMP è un solvente adeguato solo per le resine acriliche, per le resine epossidiche non è altrettanto efficace

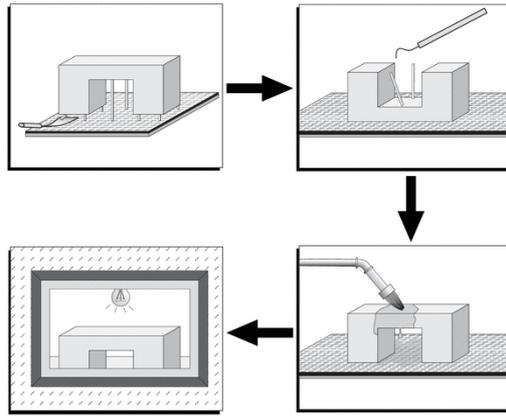


Figura 13 - Post-processamento per la stereolitografia

CAPITOLO 2 – LA CARATTERIZZAZIONE DEI PROCESSI: LO STATO DELL'ARTE

2.1 Caratterizzazione dei processi

La caratterizzazione dei processi è un metodo che consente la descrizione delle peculiarità proprie di una tecnica di produzione, permette di ottenere un approfondimento di quelle che sono le caratteristiche che consentono di avere un determinato risultato. Questa porta a quantificare la bontà del processo stesso, al cospetto di necessità in termini di accuratezza e ripetibilità.

In particolare, l'accuratezza è definita come la differenza tra un valore misurato e il valore presunto di una grandezza, dunque consente di stabilire quanto un risultato sia conforme alla idealità per un determinato parametro. La ripetibilità stabilisce invece quanto una determinata grandezza possa essere espressa più volte con il più basso valore di deviazione possibile.

Un processo di produzione, come la stereolitografia, si basa su una combinazione di parametri di processo che, a seconda dello specifico macchinario, possono avere dei limiti più o meno elevati, ma che concorrono a generare un certo grado di accuratezza e ripetibilità. La fase di caratterizzazione consente di fornire un "documento di identità", e costituisce uno strumento utile ed efficace in fase di progettazione, in quanto permette di conoscere a priori i limiti propri di una determinata macchina.

La caratterizzazione dei processi passa dalla definizione di un campione che viene ideato e prodotto ai fini di verificare specifiche caratteristiche e peculiarità dei macchinari; questo campione viene chiamato **benchmark**. I benchmark per lo studio delle caratteristiche possono essere di tre tipi [11]:

- *Benchmark geometrici*: mirano alla determinazione dei limiti di accuratezza geometrica e dimensionale.

- *Benchmark meccanici*: vengono utilizzati per verificare specifiche caratteristiche di resistenza che vengono conferite al materiale utilizzato nel processo (come resistenza allo snervamento, durezza superficiale, etc.).
- *Benchmark di processo*: studiano nel dettaglio tutte le caratteristiche del processo che modificano la realizzazione di un componente (orientamento del pezzo, spessore di strato, etc.).

Nell'ambito di questo lavoro, si effettueranno delle procedure di caratterizzazione, mirate alla determinazione delle prestazioni geometriche e dimensionali di due tipi di processi distinti, Reverse SLA e DLP.

Ai fini della pianificazione sperimentale, è utile verificare lo stato dell'arte andando a studiare le procedure più utilizzate in letteratura scientifica per determinare i livelli di accuratezza che identificano i processi di fabbricazione additiva per fotopolimerizzazione.

2.2 Caratterizzazione geometrica: studio della rugosità

Ogni superficie di un componente ottenuto attraverso una qualunque tecnica di produzione, sarà costituita da una precisione del profilo più o meno pronunciata. In stereolitografia, e in generale in tutti i processi di Additive Manufacturing, la principale causa di generazione di imprecisione a livello superficiale è proprio la presenza di strati sovrapposti. In particolare modo, la deposizione di strati comporta un incremento della rugosità delle superfici inclinate, che saranno soggette al cosiddetto **effetto staircase**. Lo studio di questo fenomeno deve passare dalla definizione di un modello geometrico, che consenta di ottenere una previsione del risultato finale, in funzione di quei parametri di processo che più lo influenzano; il modello geometrico costituisce un riferimento basilare, che quantifica il predominio dei parametri principali che determinano l'effetto staircase.

Risulta necessario, ai fini della caratterizzazione, ideare un benchmark che permetta di effettuare questo confronto previsione-realtà. Una volta definito il tipo di benchmark, è possibile procedere alle operazioni di misurazione che permettano di ottenere dei risultati confrontabili.

2.2.1 Effetto staircase

L'effetto staircase (“effetto gradino”) viene generato dalla sovrapposizione di strati; è tipico visualizzare le conseguenze di questo fenomeno sulle superfici inclinate. La sovrapposizione degli strati genera dunque una superficie non liscia, con dei gradini la cui forma è influenzata dal profilo del fascio di luce ultravioletta. Un'analisi più accurata di questo fenomeno può essere effettuata analizzando tutti i vari dettagli geometrici che lo caratterizzano.

Ahn et al. [12] hanno utilizzato il seguente modello di previsione della rugosità media:

$$R_a = \frac{A}{w} = \frac{L}{2} \cdot \left| \frac{\cos(\theta - \phi)}{\cos \phi} \right| \quad \text{con } 0^\circ < \theta < 180^\circ$$

Dove:

- R_a è il valore di rugosità media, [μm];
- L è lo spessore di strato, [μm];
- θ è l'angolo di inclinazione della superficie, [deg];
- ϕ è l'angolo di inclinazione del profilo, [deg].

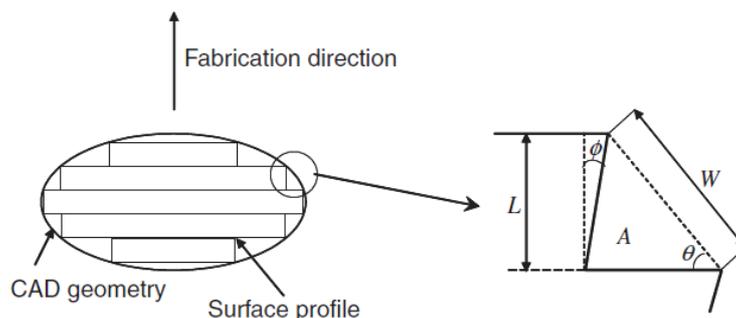


Figura 14 [12]- Effetto staircase su una superficie generica

La rugosità media, è quindi funzione di soli tre parametri, nell'ipotesi che l'unico effetto di generazione di difettosità sia quello appena descritto. L'andamento teorico della rugosità è riportato nei seguenti grafici (**Figura 15 - Figura 16**)

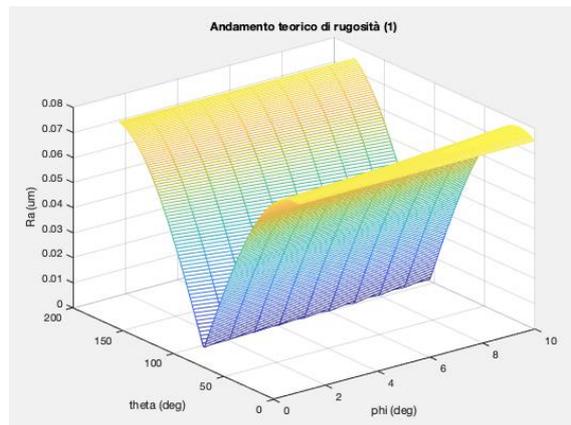


Figura 15 - Andamento di rugosità in funzione dell'angolo di inclinazione della superficie e dell'angolo di inclinazione del profilo

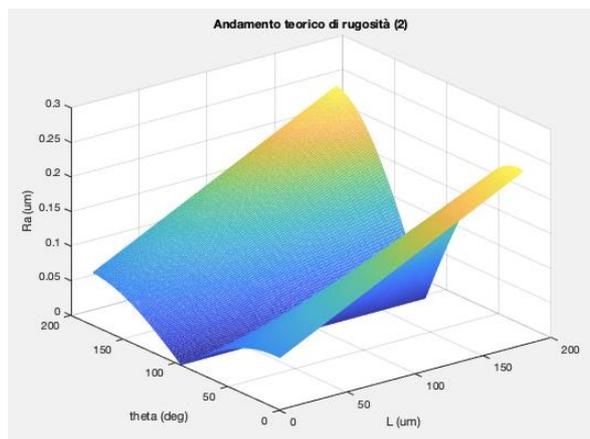


Figura 16 - Andamento di rugosità in funzione dell'angolo di inclinazione della superficie e dello spessore di strato

2.2.2 La rugosità

Una delle principali caratteristiche geometriche che definiscono la qualità di un componente è la rugosità, che contraddistingue la presenza di una serie di imprecisioni, più o meno pronunciate, nel profilo di una superficie planare. La normativa ISO 468 – 1982 [13] definisce i parametri che definiscono le caratteristiche di rugosità di una superficie; i parametri più utilizzati in questo lavoro sono essenzialmente tre:

- *Rugosità media R_a* – è la media aritmetica delle deviazioni del profilo rispetto alla linea media.
- *Spazio medio S_m* – è lo spazio medio delle irregolarità del profilo; più precisamente è una lunghezza che definisce un periodo delle irregolarità (valido per i profili di rugosità periodici).
- *Lunghezza di campionamento l* – anche detta *lunghezza di cut-off* è la lunghezza di suddivisione del profilo che consente di ottenere un numero statisticamente sufficiente di dati per la valutazione accurata della rugosità.

Le procedure sperimentali che mirano alla misurazione della rugosità di un componente, necessitano di seguire accuratamente le indicazioni delle normative. In particolare, la norma ISO 4288 – 1998 [14] stabilisce una metodologia sperimentale per la valutazione dei profili di rugosità.

Le tecnologie di produzione convenzionali, presentano dei livelli tipici di rugosità (ad esempio, la tornitura di finitura porta dei valori tipici di rugosità compresi tra $1,6 \mu m$ e $3,2 \mu m$) a cui si può fare riferimento in fase di controllo qualità; il disegno tecnico fornisce solitamente dei valori di progetto devono essere soddisfatti. La previsione di un valore di rugosità consente di conoscere a priori la lunghezza di campionamento che possa contenere un numero di dati sufficiente.

Nel caso delle procedure sperimentali, il valore di rugosità non può essere previsto a priori, dunque risulta necessario seguire le procedure indicate sulla normativa.

Per i profili di rugosità periodici, come quelli generati da effetto staircase, la procedura è la seguente:

- Si effettua una stima approssimativa, basata su un'analisi visiva, del parametro S_m sulla superficie che si vuole analizzare
- Si sceglie una lunghezza di campionamento consigliata dalla normativa [14] per il valore stimato di S_m
- Si misura il valore reale di S_m utilizzando la lunghezza di campionamento selezionata
- Se il valore trovato di S_m coincide approssimativamente con il valore stimato, allora la lunghezza di campionamento è corretta, altrimenti si procede scegliendo un nuovo valore di S_m e di l iterativamente fin quando non si giunge al risultato cercato
- Si effettua la misurazione utilizzando la lunghezza corretta

I valori tabellati che vengono consigliati dalla normativa sono riportati in **Tabella 1**.

Tabella 1 - Valori di lunghezza di campionamenti consigliati dalla normativa [14]

Sm [μm]	l [mm]
0,013 ÷ 0,04	0,08
0,04 ÷ 0,13	0,25
0,13 ÷ 0,4	0,8
0,4 ÷ 1,3	2,5
1,3 ÷ 4	8

La stima della lunghezza di campionamento risulta un passaggio cruciale per questo tipo di sperimentazione. Come detto la caratterizzazione dei processi avviene attraverso l'ideazione di un benchmark, un campione che deve avere particolari caratteristiche che consentano l'analisi sperimentale. In questo caso, il benchmark adibito allo studio della rugosità deve presentare una serie di superfici, con diverse inclinazioni, che abbiano a disposizione uno spazio di misurazione che contenga un certo numero di lunghezze di campionamento. La normativa ISO 4287 – 1997 [15] definisce un altro parametro importante ai fini della misurazione della rugosità, che è la *lunghezza di valutazione* l_v . La lunghezza di valutazione contiene un certo numero di lunghezze di campionamento, ed è la lunghezza complessiva che lo strumento di misura deve percorrere per ottenere un valore caratteristico di rugosità. Il numero di lunghezze di campionamento che solitamente deve contenere una lunghezza di valutazione è pari a 5. Queste informazioni andranno tenute in considerazione in fase di ideazione del benchmark.

2.2.3 Il benchmark

L'analisi di rugosità passa dal concepimento di un benchmark che presenti delle caratteristiche che permettano di mettere in primo piano il problema dell'effetto staircase.

Diversi studi analoghi fatti in letteratura [16]–[18] sfruttano un tipo di benchmark che presenta una serie di superfici con inclinazioni che vanno da 0° a 360° con intervalli di 2° o 3° estruse a elica. Questo benchmark viene denominato **Truncheon** [16] ed è una soluzione piuttosto performante che si presta facilmente alla caratterizzazione dell'effetto staircase. La presenza di superfici con diverse inclinazioni permettono la misurazione della rugosità in funzione dei parametri di spessore di strato e di angolo di inclinazione superficiale.

Quanto all'angolo di inclinazione del profilo, vengono utilizzati diversi approcci, in quanto a differenza degli altri non è un parametro regolabile. Reeves [16] utilizza un test-geometry che presenta superfici con poche diverse inclinazioni per misurare attraverso opportuna strumentazione l'angolo di inclinazione del profilo; il test-geometry può avere anche un'altra funzione, ovvero quella di effettuare una previsione di quale sarà la superficie che fornirà la maggiore dispersione nei dati di misura. Mostafa et al. [19] hanno invece utilizzato un modello matematico per la previsione dell'angolo di inclinazione del profilo, salvo poi verificare tale modello con delle prove sperimentali. In **Figura 17** si riporta il benchmark di tipo “Truncheon” utilizzato da Campbell et al. [17] e Reeves [16].

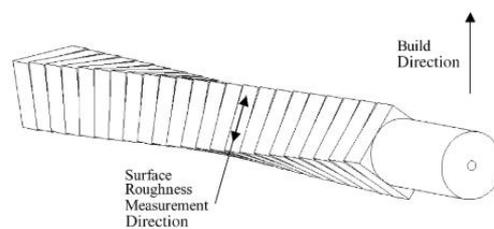


Figura 17 - Truncheon, benchmark per lo studio della rugosità

Ciò che un benchmark di questo tipo consente di fare è lo sviluppo di un modello di previsione per la rugosità, che una volta sviluppato attraverso un software di calcolo, consente di ottenere una visualizzazione della previsione di rugosità su tutte le superfici di un qualunque file STL

[17], [18]. I dati di misurazione estrapolati dal Truncheon, diagrammati in maniera discreta, possono essere utilizzati in un algoritmo di interpolazione per far sì che ad ogni angolo di inclinazione superficiale venga associato un valore di rugosità; così facendo, è possibile analizzare l'inclinazione di ogni singolo triangolo definito in un file STL e associare un valore di rugosità relazionato ai dati empirici. Questo risulta essere un ottimo strumento di assistenza alla progettazione.

Nei processi di Reverse SLA e DLP si necessita però di studiare accuratamente il posizionamento dei supporti, in quanto è piuttosto cruciale la presenza di una certa quota di superficie che resti il più possibile inalterata (in relazione a quanto detto in precedenza sulla lunghezza di valutazione). Reeves [16], per processi di stereolitografia classica, ha utilizzato una lunghezza di campionamento pari a 2,5 mm, non conoscendo a priori il livello di rugosità atteso, posizionando i supporti in corrispondenza dei bordi di ogni faccia. Nei processi bottom-up il peso del componente risulta essere un problema rilevante, dunque è necessario provvedere ad una modifica del Truncheon così come è stato pensato.

2.3 Caratterizzazione geometrica e dimensionale

Se i parametri di rugosità possono essere espressi da un parametro reale, che è associato ad un reale dato di misura, i parametri per la caratterizzazione dimensionale necessitano di definire un termine fittizio che possa valutare allo stesso modo le tolleranze associate a diverse forme geometriche e su diversi livelli dimensionali. Questo termine, deve quindi poter confrontare i gradi di precisione anche tra due diverse forme geometriche su diversa scala, come ad esempio la dimensione della circonferenza di un cilindro e il lato maggiore di un prisma rettangolare. La normativa ISO 286-2010 [20] definisce il *grado di tolleranza IT* che permette, su diversi range dimensionali, di caratterizzare l'accuratezza di una misura rispetto alla dimensione nominale. Il benchmark adibito a questo tipo di caratterizzazione, dovrà avere un certo numero di forme geometriche con dimensioni caratteristiche che coprano i principali range dimensionali di utilizzo in stereolitografia. I volumi di costruzione per i processi bottom-up difficilmente eccedono i 350x350x350 mm.

La caratterizzazione delle tolleranze geometriche, passa dalla definizione di planarità (orizzontale, inclinata, verticale), coassialità e parallelismo, che sono alcune delle principali tolleranze geometriche che vengono indicate sui disegni tecnici. Le stesse forme geometriche utilizzate per la caratterizzazione dimensionali, dovranno quindi essere predisposte anche alla verifica delle tolleranze di forma.

I risultati di questa analisi, forniranno un'indicazione relativa alla precisione dimensionale che la macchina può fornire su tutti i range dimensionali, dai 3 mm ai 120 mm, e una panoramica sui gradi di errore caratteristici per determinate peculiarità geometriche.

2.3.1 Il grado IT

La normativa ISO 286-2010 [20] introduce la seguente terminologia:

- *Dimensione nominale*: dimensione di una caratteristica o di una forma perfetta così come definita dalle specifiche del disegno
- *Deviazione*: valore meno il suo valore di riferimento
- *Tolleranza*: differenza tra il valore limite superiore e il valore limite inferiore della dimensione nominale
- *Tolleranza standard IT*: valore di tolleranza appartenente al sistema di codici ISO per tolleranze su dimensioni lineari

La normativa introduce poi il fattore di *tolleranza standard* i , in funzione del quale vengono espresse le dimensioni base per i gradi compresi tra IT5 e IT8. Il fattore i rappresenta una sorta di “unità di misura” per il grado IT. I gradi IT crescono nella direzione in cui peggiora l'accuratezza dimensionale.

Questo fattore viene calcolato in funzione della media geometrica delle dimensioni estreme costituenti un range dimensionale ISO, come segue:

$$i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0,001 \cdot D$$

Dove D è la media geometrica:

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

In **Tabella 2** sono riportati i range dimensionali ISO con i corrispettivi fattori standard di tolleranza.

Tabella 2 - Fattori standard di tolleranza per i range dimensionali da 1 mm a 120 mm per gradi IT5-IT18

Dimensioni base ISO [mm]		Media geometrica [mm]	Fattore di tolleranza standard [μm]
<i>D</i> ₁	<i>D</i> ₂	<i>D</i>	<i>i</i>
1	3	1,73	0,542
3	6	4,24	0,733
6	10	7,75	0,898
10	18	13,42	1,083
18	30	23,24	1,307
30	50	38,73	1,561
50	80	63,25	1,856
80	120	97,98	2,173

Il grado IT può essere a questo punto espresso attraverso un certo numero di ripetizioni dell'unità standard definita dal fattore di tolleranza. Il numero di volte in cui il fattore di tolleranza è ripetuto a costituire un range di validità di uno specifico grado IT è calcolato come:

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

Dove:

- D_{jn} è la dimensione generica j-esima nominale, [mm];
- D_{jm} è la dimensione generica j-esima misurata, [mm].

Calcolando dunque il numero n_j è possibile stabilire il grado di tolleranza IT in funzione del fattore standard, che quindi tiene conto di un “effetto scala” della tolleranza, generato dalle differenze sostanziali nei range dimensionali a cui fa riferimento. Il valore calcolato di n_j permette di intersecare il valore del grado IT da **Tabella 3** [21].

Tabella 3 - Gradi di tolleranza IT

Dimensione base [mm]		Gradi standard di tolleranza IT													
		IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Sopra	Fino a (incluso)	Formule per tolleranze standard (risultati in micrometri)													
-	500	7i	10i	16i	25i	40i	64i	100i	160i	250i	400i	640i	1000i	1600i	2500i

2.3.2 Tolleranze geometriche

La variazione dei parametri di processo spesso porta con sé delle problematiche notevoli per quanto riguarda il rispetto delle tolleranze geometriche, in particolare le due tecnologie di SLA e DLP, per la diversa fisica dei processi, sono più o meno sensibili alla variazione di determinati parametri. Rebaioli et al. [11] hanno utilizzato un particolare tipo di benchmark per verificare l’impatto dei principali parametri di processo sulla riuscita di diverse caratteristiche (positive e negative).

Le tolleranze geometriche che si possono studiare, nell'ambito della caratterizzazione dei processi, sono racchiuse in quattro categorie principali:

- *Tolleranze di forma*: Rettilineità, Planarità, Circolarità, Cilindricità;
- *Tolleranze di orientamento*: Parallelismo, Perpendicolarità, Inclinazione;
- *Tolleranze di posizione*: Localizzazione, Concentricità, Simmetria;
- *Tolleranze di oscillazione*: Oscillazione circolare, Oscillazione totale.

Mahesh et al. [22] hanno costruito un benchmark che permettesse di verificare la precisione di costruzione di diverse tecnologie di fabbricazione additiva, in relazione a particolari forme geometriche; i risultati che sono stati ottenuti, confermano l'ottima attitudine dei processi di SLA all'accuratezza dimensionale e geometrica rispetto alle altre tecnologie.

Un benchmark di più semplice concezione è quello utilizzato da Minetola et al. [23], mirato oltre che alla caratterizzazione dimensionale attraverso l'utilizzo del grado IT, alla verifica di alcune tolleranze geometriche in particolare: Planarità (orizzontale, verticale, inclinata), Concentricità e Parallelismo.

In **Figura 18** si riporta i benchmark utilizzati negli studi citati [23], [24].

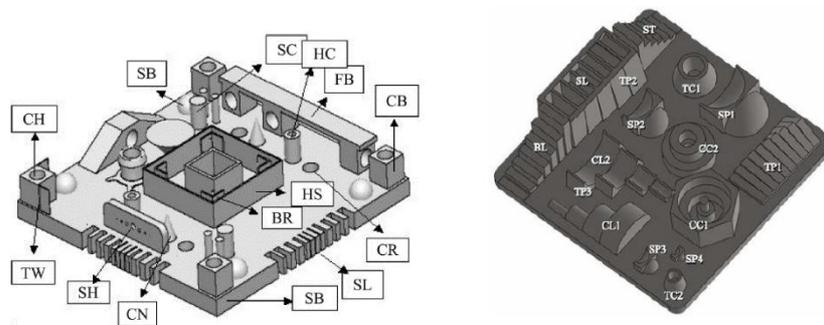


Figura 18 - Benchmark per la caratterizzazione dimensionale e geometrica utilizzati da [22] (a sinistra) e da [23] (a destra)

Riepilogando brevemente il significato delle tolleranze geometriche di **planarità**, **concentricità** e **parallelismo**: La **planarità** è la tolleranza di forma che definisce una zona nello spazio tridimensionale racchiusa tra due piani paralleli che distano tra di loro di una quantità specificata dalla tolleranza stessa, la **concentricità** definisce un volume cilindrico il

cui diametro è specificato dal valore della tolleranza in cui sono racchiusi i punti centrali di tutti gli elementi circolari di una figura di rivoluzione, il **parallelismo** (in particolare, il parallelismo di una superficie rispetto ad un piano) è una tolleranza di orientamento che identifica lo spazio racchiuso tra due piani paralleli ad un piano di riferimento.

CAPITOLO 3 – LA CARATTERIZZAZIONE DEI PROCESSI: SPERIMENTAZIONE

3.1 Le macchine

I pezzi prodotti ai fini dello studio di caratterizzazione del processo di SLA sono realizzati con una macchina della serie *Antares* di **Sharebot** (**Figura 19**), le cui caratteristiche (fornite dal costruttore) sono riportate in **Figura 20**. La *Sharebot Antares* è una stampante 3D a grande formato, con un volume di lavoro alla massima risoluzione possibile che si attesta intorno ai 15 cm³.



Figura 19 - Sharebot Antares (SLA)

AREA DI STAMPA	250 X 250 X 250 mm
LUNGHEZZA D'ONDA	405 nm
LASER POWER	150 mW
SHAREBOX3D	Integrato
RISOLUZIONE Z	maggiore 0,05 mm
RISOLUZIONE XY	± 0,1 mm

Figura 20 - Specifiche tecniche Sharebot Antares (SLA)

Le resine compatibili per l'utilizzo su questa macchina devono essenzialmente avere una base polimerizzabile sulla lunghezza d'onda di 405 nm. Quello della lunghezza d'onda è solitamente il principale vincolo per l'applicazione di una resina in un processo. Esistono altre tipologie di vincoli, come la densità e la viscosità, che però risultano essere secondari rispetto alla compatibilità con la sorgente laser.

Sharebot ha ottimizzato in particolare due tipi di resine per *Antares*, che sono **PR-S** (che è la resina che verrà utilizzata in questo lavoro) e **PR-T**. Entrambe le resine consentono di ottenere una risoluzione piuttosto elevata (che si attesta intorno ai 50 µm), la prima consente di ottenere componenti ad elevata durezza, la seconda è particolarmente indicata per componenti resistenti alla compressione.

Le caratteristiche delle resine, indicate dal produttore, sono riportate in **Figura 21** e **Figura 22**.

MECHANICAL PROPERTIES	ASTM	RESIN: PR-S
TENSILE STENGTH AT BREAK	D638-10/03	66 ± 10 MPA
YOUNG'S MODULUS	D638-10	2403 ± 350 MPA
ELONGATION AT FAILURE	D630-05	3,5 ± 0,5 %
FLEXURAL STRESS AT BREAK	D790	90 ± 13 MPA
FLEXURAL MODULUS	D790	2808 ± 275 MPA
IZOD IMPACT TEST	D256	15 ± 4 J/M
SHORE HARDNESS	SCALE D	85 D

Figura 21 - Resina PR-S Sharebot

MECHANICAL PROPERTIES	ASTM	RESIN: PR-T
TENSILE STRENGTH AT BREAK	D638-10/03	40 MPA
YOUNG'S MODULUS	D638-10	1570 MPA
ELONGATION AT FAILURE	D630-05	35,50 %
FLEXURAL STRESS AT BREAK	D790	24 MPA
FLEXURAL MODULUS	D790	650 MPA
IZOD IMPACT TEST	D256	40 J/M
SHORE HARDNESS	SCALE D	82 D

Figura 22 - Resina PR-T Sharebot

La seconda macchina utilizzata per la produzione dei campioni, ai fini dello studio del processo DLP, è anch'essa prodotta da *Sharebot* ed è della serie *Rover* (**Figura 23**). La *Sharebot Rover* è una stampante 3D piuttosto compatta e di rapido utilizzo. Le resine compatibili con questa macchina sono molteplici, a differenza della *Sharebot Antares*. Lo stesso produttore ha un listino di resine piuttosto ampio, con dei materiali adeguati a diversi tipi di applicazioni. Una tabella riepilogativa sulle resine prodotte da *Sharebot* è riportata in **Figura 24**.



Figura 23 - Sharebot Rover (DLP)

PROPRIETÀ	ASTM	G-STRONG	G-MODEL	S-CLEAR	S-HARD	S-TOUGH	S-WAX
CARICO DI ROTTURA A TRAZIONE	D-638-10/03	30 MPa	30 Mpa	47,3 MPa	49 MPa	40,5 +/- 5 MPa	25 MPa
MODULO DI YOUNG	D-638-10	1750 MPa	1750 MPa	2310 MPa	2560 MPa	15720+/- 220 MPa	1030 MPa
ALLUNGAMENTO A ROTTURA	D-638-05	4%	4%	4,60%	3,8%	35,5 +/- 15%	2,1%
CARICO DI ROTTURA A FLESSIONE	D-790	35 MPa	35 MPa	71,04 MPa	71,08 MPa	24 +/- 4 MPa	27,3 MPa
MODULO DI FLESSIONE	D-790	2060 MPa	2060 MPa	2590 MPa	2790 MPa	651 +/- 150 MPa	1130 MPa
PROVA D'URTO IZOD	D-256	22 J/m	22 J/m	27,6 J/m	17,7 J/m	-	-

Figura 24 - Proprietà resine commerciali Sharebot (Rover)

La resina utilizzata per produrre i componenti di *Rover* è la **S-Clear**.

3.2 Produzione dei campioni

La produzione dei campioni può essere riassunta in due fasi principali distinte: la produzione dei file di stampa, adeguati al tipo di macchinario che viene utilizzato, e la produzione e post-processamento dei componenti reali.

La preparazione dei file di stampa consiste nelle seguenti sottofasi:

- Progettazione dei componenti al CAD 3D (*Solidworks*);
- Salvataggio del file CAD come file STL;
- Correzione di eventuali errori nella generazione delle superfici (overlaps, edges, normals, holes, etc.), che possono verificarsi durante il salvataggio del file CAD;
- Generazione dei supporti, se necessari, e posizionamento sulla piattaforma di stampa;
- Configurazione macchina e slicing profile;
- Generazione del *GCode*, ovvero il codice letto e tradotto dalla macchina.

Una volta ottenuti i file leggibili dalle macchine, può partire la fase produttiva vera e propria, che consiste nelle seguenti fasi principali:

- Pulizia preliminare delle macchine, facendo sì che le vaschette che conterranno la resina liquida abbiano una superficie sufficientemente trasparente e limpida;
- Calibrazione della piattaforma di lavoro (solo su *Rover*, *Antares* ha un differente sistema di ancoraggio della piattaforma, che avviene attraverso un giunto a coda di rondine e un perno di fissaggio);
- Inserimento della resina liquida fino a circa metà dell'altezza totale della vasca;
- Selezione del profilo di resina liquida utilizzata;
- Avviamento del processo produttivo;
- Rimozione dei pezzi dalla piattaforma e trattamento a ultrasuoni in immersione di alcol isopropilico;
- Rimozione dei supporti;
- Trattamento in forno UV con lampada ad ampio spettro.

3.2.1 Preparazione del file STL: Truncheon

Sono stati innanzitutto modellati i benchmark utili alla caratterizzazione dei processi analizzati nel *Capitolo 2*.

Il benchmark per lo studio di rugosità, chiamato precedentemente *Truncheon*, è stato modificato e diviso in cinque parti differenti, per i seguenti motivi:

- Il peso del benchmark in un'unica parte, sarebbe stato più pesante e più difficile da ancorare alla piattaforma attraverso i supporti;
- La divisione in pezzi, consente una sistemazione degli stessi sulle piattaforme delle due macchine più agevole, in particolar modo per quanto riguarda la *Rover* che presenta un volume di lavoro decisamente inferiore;
- In fase di misurazione al rugosimetro, l'ingombro di un'unica parte sarebbe stato più complesso da gestire.

Inoltre, si sono applicati dei fori passanti per l'alleggerimento del campione.

L'incremento angolare delle superfici è di 3° (dunque le superfici presentano inclinazioni da 0° a 357° con incremento di 3°), e le dimensioni di ogni superficie sono di 4×20 mm. I 20 mm del lato maggiore contengono una lunghezza sufficiente per lo studio di rugosità, ciò consente non solo di avere il numero di lunghezze di campionamento richieste per questo tipo di analisi, ma anche di sopperire ad eventuali difettosità generate dai post-processamenti che non consentirebbero di avere lunghezze sufficientemente rappresentative per l'effetto *staircase*.

In **Figura 25** si riporta un'immagine del modello CAD dei benchmark di rugosità.

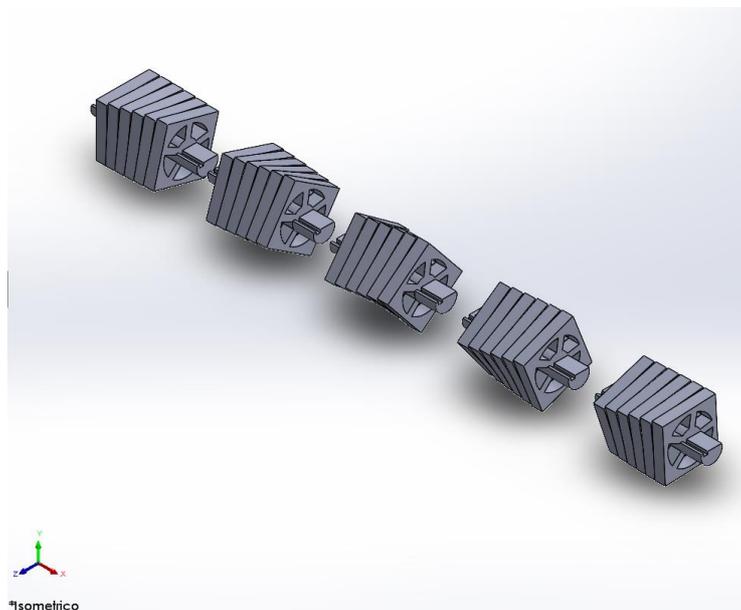


Figura 25 - Truncheon in 5 parti per lo studio di rugosità

Per praticità, sono stati impressi sui sostegni di ogni parte dei numeri identificativi del campione, di modo da riconoscere agevolmente le inclinazioni di ogni superficie in fase di misurazione, un esempio è riportato in **Figura 26**.

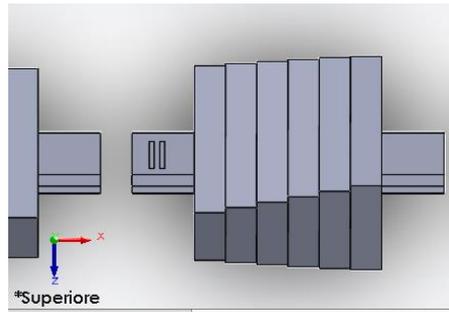


Figura 26 - Segno identificativo del campione numero 2

Durante la modellazione al CAD, talvolta può capitare che si generino degli errori nell'esecuzione di alcune funzioni elementari, ciò è tanto più frequente quanto più aumenta la complessità tridimensionale dell'oggetto. Tali errori, come compenetrazione di parti o divisione di parti che dovrebbero essere congiunte, si riflettono poi così come sono sul file STL. Ad esempio, delle zone in compenetrazione possono presentare dei triangoli sovrapposti tra loro, delle zone non perfettamente congiunte possono dar luogo a dei fori indesiderati, e così via. Prima di procedere dunque alle operazioni che condurranno all'ottenimento del *GCode* o del file *.cws*, che sono i formati di file che vengono letti, convertiti, e tradotti dalle macchine (rispettivamente da *Antares* e da *Rover*), si necessita dunque di una serie di correzioni del file STL, così da essere sicuri che non possano generarsi dei difetti nel componente finale dovuti a errori nella modellazione.

Attraverso l'aiuto di un software, **Materialise Magics**, si possono effettuare delle operazioni di *fixing* in cui vengono corretti gli errori del file STL che darebbero origine alle difettosità sopra elencate nel componente finale.

3.2.2 Produzione dei Truncheon su *Antares*

Il primo software che si utilizza una volta che il file STL è corretto, è **Creation Workshop**, un software sviluppato dal produttore *Sharebot*.

La funzione principale di questo software è quella di consentire il posizionamento sulla piattaforma di costruzione i componenti che si desiderano produrre, e di generare in maniera semi-automatica i supporti. Il software consente anche di generare un *GCode*, verranno di

seguito elencate le operazioni che consentono questa procedura, tuttavia si sfrutterà un altro software per generare il file macchina.

Le operazioni preliminari che il software consente di effettuare riguardano il setting del profilo macchina, attraverso cui si stabilisce il volume di lavoro, il tipo di resina utilizzata e altri diversi parametri, e il setting del profilo di slicing, che permette di definire i parametri di processo principali, come tempo di esposizione e spessore di strato.

In **Figura 27** si riporta la schermata relativa alle impostazioni macchina, utilizzata per la produzione di tutti i benchmark.

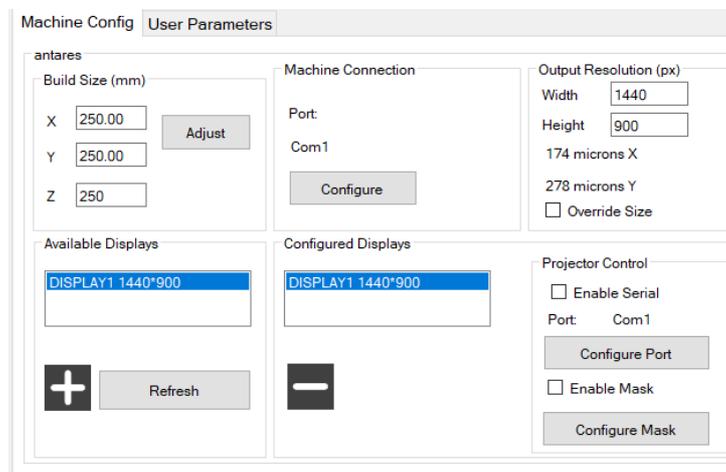


Figura 27 - Configurazione per macchina Antares su Creation Workshop

La **Figura 28** riporta invece la configurazione impostata per il profilo di slicing nel caso di spessore di strato 0,05 mm sul software **Cura**, dove è possibile generare il GCode a partire dal file STL contenente i pezzi con relativi supporti. Su *Antares*, così come su *Rover* verranno prodotti i pezzi con entrambi gli spessori di strato disponibili (0,1 mm e 0,05 mm) così da effettuare un'analisi comparativa sull'influenza dell'*effetto staircase*.

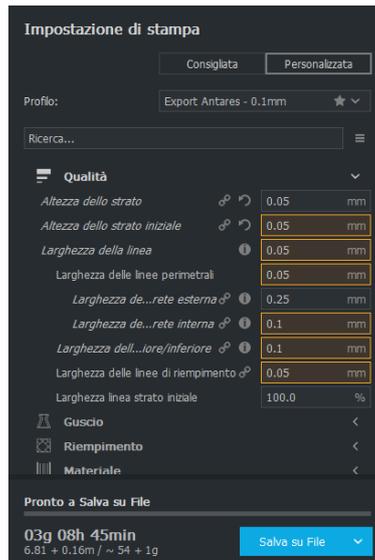


Figura 28 - Configurazione Slicing Profile a spessore 0,05 mm su Ultimaker Cura

L'influenza dello spessore di strato sul tempo di produzione è piuttosto preponderante. Questo aspetto risulta piuttosto importante, in quanto consente di valutare il vantaggio in termini di tempo che si può ottenere selezionando uno spessore di strato più elevato, accettando una perdita (da valutare) in termini di precisione dimensionale e geometrica. Di fatto, aumentare lo spessore di strato potrebbe aumentare l'impatto sulla finitura superficiale dovuta ad effetto staircase, tuttavia questo aspetto necessita di un'accurata valutazione in termini di costi-benefici.

Configurati tutti i vari parametri che potranno essere utilizzati, si è potuto procedere al posizionamento dei componenti sulla piattaforma di lavoro e successivamente all'inserimento dei supporti, che è una fase piuttosto delicata per il tipo di studio che si intende fare.

Su *Antares* il volume di lavoro è piuttosto grande, lo si nota subito importando i file STL su Creation Workshop, la fila di campioni non necessita di essere manipolata; il posizionamento di questi componenti è quindi piuttosto agevole.

Quanto ai supporti, una funzione del software consente di inserire manualmente i supporti che risultano necessari al sostentamento del pezzo, oppure di generare una serie di strutture in maniera automatica. L'altra alternativa è di generare i supporti in maniera automatica, cioè come consigliato dal software, e poi intervenire manualmente con aggiunte di supporti in zone in cui si vuole avere la certezza che il pezzo non si separi inaspettatamente dalla piattaforma,

generalmente queste zone sono quelle meno inclinate e più “piatte” (il software riconosce le zone più “a rischio” e le identifica con un colore rosso via via più acceso).

La principale criticità per il Truncheon è a questo punto controllare che i supporti generati in maniera automatica non interferiscano con le superfici che dovranno essere sottoposte ad analisi con rugosimetro. La rimozione dei supporti comporterebbe un difetto che non si intende analizzare in questo studio, in quanto conflittuale con l’effetto staircase.

Il software posiziona automaticamente i supporti in corrispondenza delle giunture tra le piattaforme, dunque in posizioni piuttosto “comode” per il sostegno del pezzo e non interferenti con il piano soggetto a studio. Si sceglie poi di aggiungere alcuni supporti di dimensione ridotta (“small support”) in corrispondenza dei bracci di sostegno di ogni campione e in alcune zone in cui la colorazione automatica del software diventa più accesa. Per il Truncheon il risultato è visibile in **Figura 29**. È da notare che essendo i sistemi di tipo *Bottom-Up* i componenti saranno prodotti “a testa in giù” rispetto a come sono riportati in **Figura 29**.

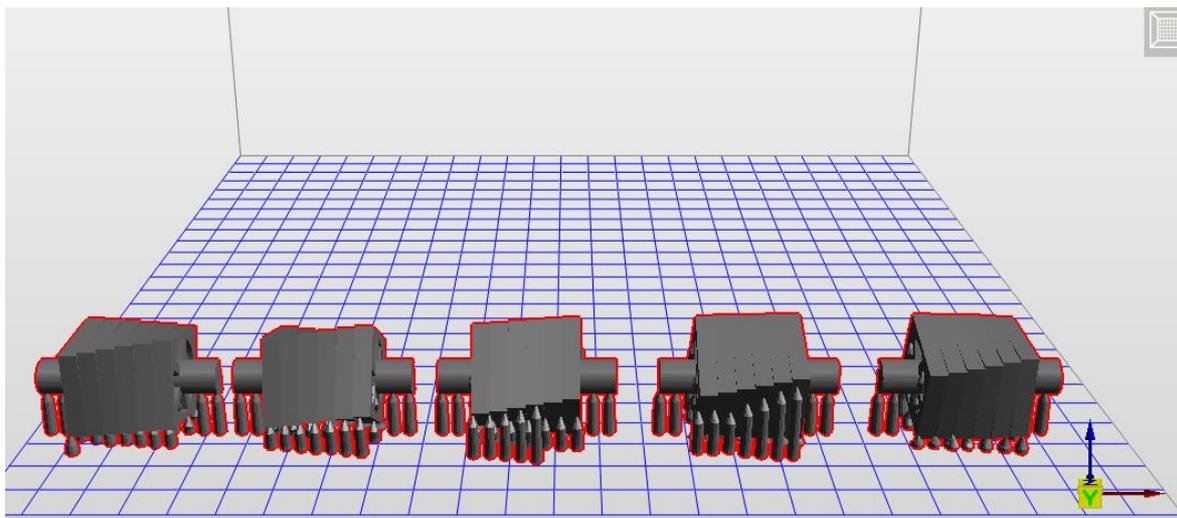


Figura 29 - Posizionamento campioni Truncheon su CW

Si può procedere a questo punto con l’esecuzione automatica dello slicing così da visualizzare tutti i vari layer, attraverso un profilo analogo a quello designato in precedenza per il software Cura. L’esecuzione dello slicing consentirà di conoscere il numero effettivo di layer che dovranno essere processati. È possibile verificare ogni singolo layer attraverso la funzione di

visualizzazione dello slicing, questo consente di identificare tutte le parti di superficie che verranno processate dal laser. Un esempio di layer generato è riportato in **Figura 30**.

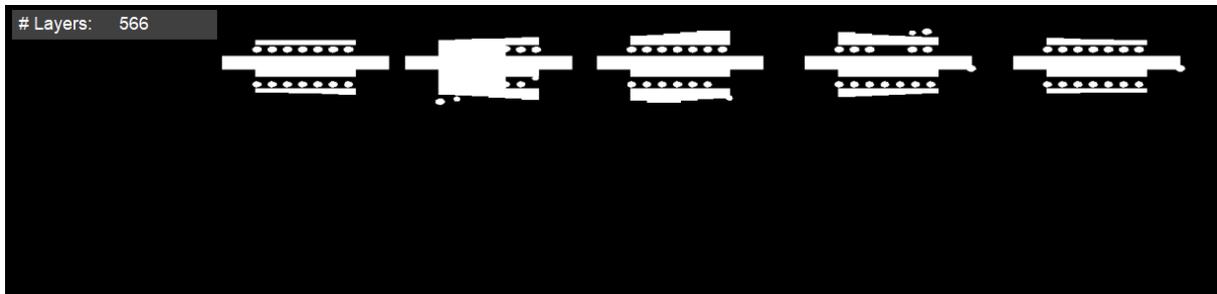


Figura 30 - Esempio di layer visualizzabile dopo lo slicing

L'ultima operazione da effettuare prima di procedere alla produzione vera e propria, è la generazione del **GCode**. Il **GCode** è un codice contenente una serie di istruzioni sulle operazioni che la macchina dovrà eseguire. Un'analogia interessante può essere fatta tra GCode, per l'Additive Manufacturing, e il **Linguaggio ISO** che consente di programmare il controllo numerico su un tornio o una fresa automatica.

Il GCode contiene dunque funzioni che vengono tradotte attraverso un codice alfanumerico. In realtà questo tipo di linguaggio è utilizzato prevalentemente sulle tecnologie FDM, tuttavia si sposa bene con le necessità tipiche di tecnologie a fotopolimerizzazione basate sulla movimentazione di un laser. Si riporta qui sotto un esempio di GCode per una stampante FDM.

```
G28 X0 Y0 Z0 – Autohome
```

```
M107 – Spegnimento ventola
```

```
G1 F200 E3 – Estrusione piccola quantità di filamento
```

Il software adibito alla generazione del GCode è **Ultimaker Cura**, software che riceve in ingresso il file STL proveniente dall'ambiente di Creation Workshop e ne effettua la trasformazione in GCode attraverso il preventivo caricamento dei profili relativi alla macchina e alla resina.

Il GCode viene poi inserito nella memoria locale di *Antares* attraverso collegamento browser con indirizzo IP. È sufficiente a questo punto selezionare il profilo resina sul tastierino di comando della macchina e avviare il processo selezionando il file memorizzato nel driver locale.

In **Figura 31** è visibile la piattaforma di stampa a processo ultimato, che può a questo punto essere rimossa per effettuare le operazioni di post-processamento.



Figura 31 - Processo di stampa ultimato su Antares per campioni a spessore 0,1 mm

La prima operazione che si effettua in post-processamento è la rimozione dei pezzi e i relativi supporti dalla piattaforma di costruzione, avendo cura di eliminare la resina in eccesso attraverso una leggera pulizia della zona circostante il punto di stampa con carta e alcol isopropilico. I supporti, per proprie caratteristiche di sezione, hanno la tendenza a rompersi agevolmente in corrispondenza del pezzo, è sufficiente avere cura che non vengano rimosse

parti del componente, dunque è sempre consigliato effettuare questo tipo di operazioni con estrema delicatezza.

Il primo processo che subiscono i campioni rimossi dalla piattaforma è un trattamento a ultrasuoni in immersione di alcol isopropilico a temperatura di 20 °C e per circa 20 minuti. Per questo trattamento si è utilizzato il dispositivo fornito da Sharebot (**Figura 32**).



Figura 32 - Digital ultrasonic cleaner di Sharebot

Il processo di pulizia a ultrasuoni consentirà una perfetta rimozione della resina in eccesso, sarà quindi possibile rimuovere i supporti residui e far poi asciugare tutto in aria per qualche minuto (l'alcol isopropilico è molto volatile).

L'ultimo passaggio che necessita di essere effettuato è il trattamento in forno con lampada ad ampio spettro. Le resine utilizzate tendono a polimerizzare, come detto in precedenza, quando sono sottoposte ad un raggio laser su una lunghezza d'onda di 405 nm. Ogni resina però non polimerizza al 100 % su quella lunghezza d'onda, complessivamente si raggiungono percentuali piuttosto elevate, ma una polimerizzazione che si attesti intorno al 94-96 % può essere raggiunta solo attraverso una lampada ad ampio spettro, che emette una radiazione variabile tra 200 nm e 405 nm circa; ciò consente ai componenti di avere una perfetta polimerizzazione, uniforme in tutto il volume. In **Figura 33** è riportata un'immagine di alcuni

campioni in trattamento in forno con lampada ad ampio spettro. I campioni sono stati trattati per un tempo di 20 minuti.

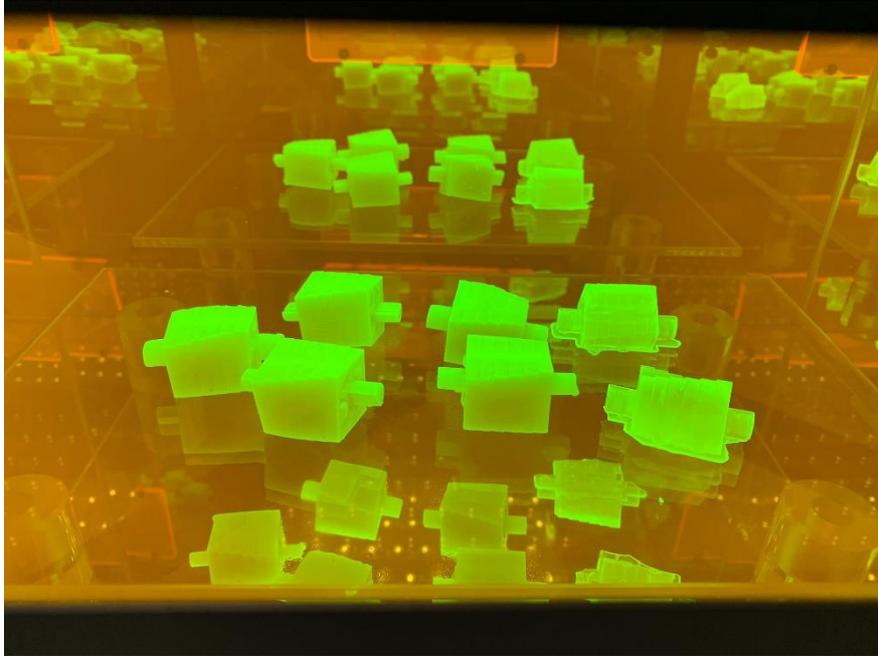


Figura 33 - Trattamento in forno con lampada ad ampio spettro

Ultimato il post-processamento è possibile procedere alle operazioni di misura.

Infine è stato sottoposto un singolo campione ad un'analisi visiva allo stereomicroscopio col fine di visualizzare più da vicino l'effetto staircase. La **Figura 34** riporta due ingrandimenti di superfici casuali.



Figura 34 - Ingrandimento dei campioni per la visualizzazione dell'effetto staircase su campioni a spessore 0,1 mm

3.2.3 Produzione dei Truncheon su *Rover*

Le procedure software che precedono il processo produttivo vero e proprio risultano essere più agevoli per quanto riguarda *Rover*. Il file che viene caricato in macchina non è più un GCode, in quanto la tecnologia che caratterizza il processo di DLP non si basa su una serie di istruzioni per la movimentazione di un laser.

Le macchine che sfruttano il processo di DLP, come detto in precedenza, sfruttano la proiezione di un'immagine digitale strato per strato, dunque ogni punto appartenente ad uno stesso layer viene polimerizzato simultaneamente.

Di conseguenza, il file che viene caricato in macchina è un semplice file di slicing, con formato **.cws** (Creation Workshop), contenente le immagini relative ad ogni singolo layer, che la macchina sfrutterà per eseguire le proiezioni su ogni strato.

In questo caso, si sfruttano i file STL corretti attraverso le operazioni di fixing che sono stati utilizzati per la produzione su *Antares*. Il punto di partenza, è dunque l'ottenimento di una configurazione di stampa, attraverso il corretto posizionamento dei pezzi sulla piattaforma.

Queste operazioni avvengono attraverso un *DLP Slicer*, un software sviluppato dal produttore Sharebot appositamente per *Rover*. Questo software consente di importare una configurazione macchina (come avveniva su Creation Workshop per *Antares*) così da avere delle caratterizzazioni relative al volume di stampa, selezionabili in fase preliminare.

La configurazione del profilo di slicing è circa analogo a quello illustrato in precedenza. Si utilizzeranno anche in questo caso due spessori di strato differenti, col fine di valutare la variazione di prestazioni in termini di qualità superficiale, dovuta ad *effetto staricase*.

Si può procedere al posizionamento dei campioni sulla piattaforma; in questo caso, essendo la superficie disponibile piuttosto ristretta rispetto a quella visualizzata su *Antares* si deve fare in modo che tutti i campioni vengano adeguatamente disposti, così da fare in modo che siano perfettamente in piano. È indifferente l'allineamento dei campioni, che possono essere disposti lungo l'asse x o lungo l'asse y, in quanto il produttore dichiara una risoluzione di stampa analoga lungo le due direzioni. Si può procedere a questo punto al posizionamento dei supporti. Come illustrato in precedenza, si posizionano automaticamente i supporti (consigliati dal

software) per poi effettuare aggiunte manualmente nei punti in cui si ritiene che si necessiti di maggiore tenuta.

Il posizionamento sulla piattaforma è visualizzabile in **Figura 35**.

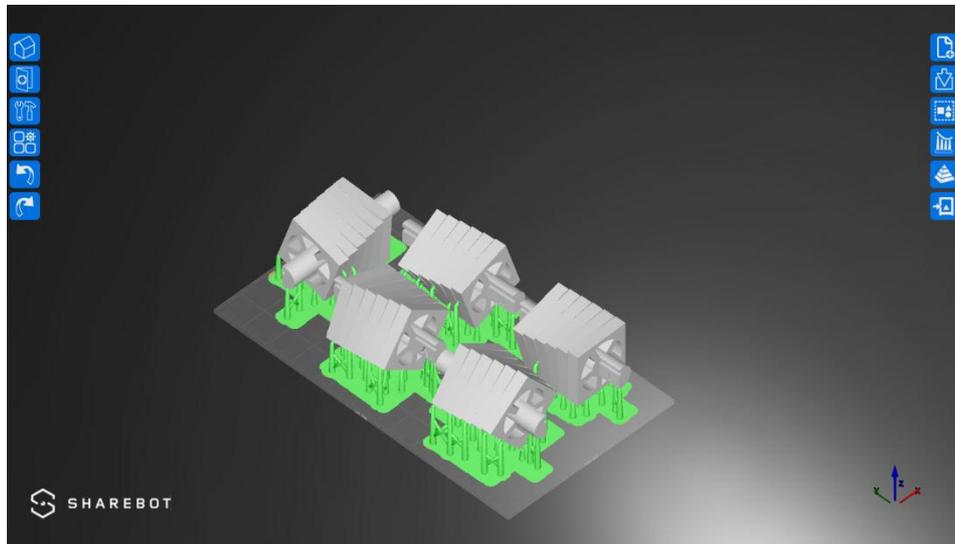


Figura 35 - Posizionamento campioni truncheon su DLP Slicer

È possibile infine effettuare lo slicing, salvando su supporto removibile il file **.cws**. In **Figura 36** si riporta una cattura di un layer casuale.

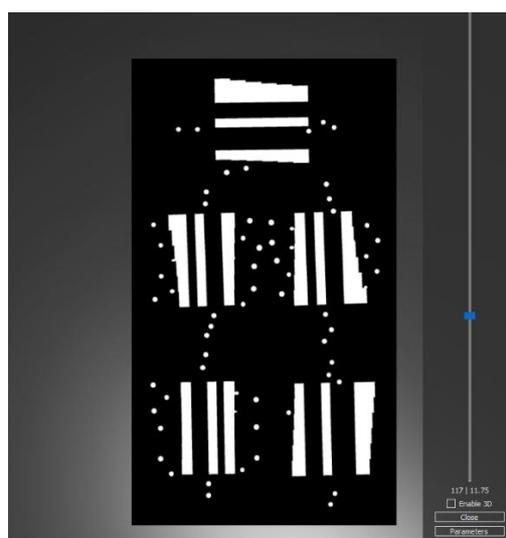


Figura 36 - Visualizzazione dello slicing sul DLP Slicer

Le operazioni di post-processamento, non variano rispetto a quanto raccontato in precedenza, si procede ad un lavaggio a ultrasuoni, un'asciugatura in aria e infine ad un trattamento in forno ad ampio spettro.

I componenti prodotti con spessore di strato di 0,1 mm, sono riportati in **Figura 37**. Il tempo di produzione è stato di circa 8 ore e 33 minuti, mentre i componenti prodotti con spessore di strato pari a 0,05 mm sono stati prodotti in 13 ore e 7 minuti.

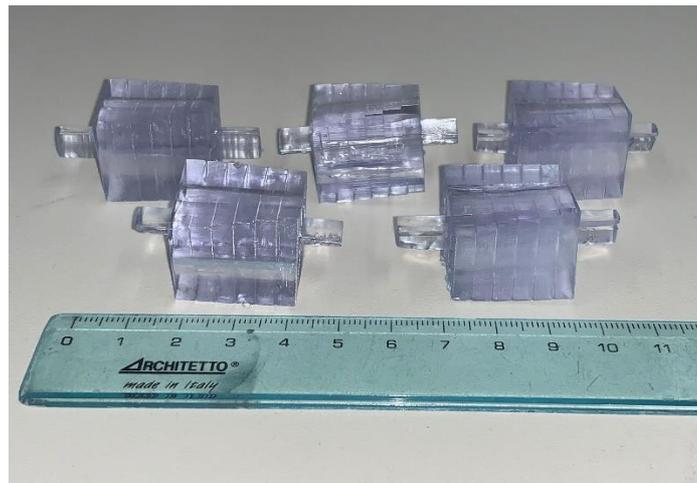


Figura 37 - Campioni di truncheon prodotti con Rover con spessore di strato 0,1 mm

3.2.4 Produzione dei benchmark per la caratterizzazione geometrico-dimensionale su *Antares*

Il benchmark di riferimento utilizzato in questa fase è quello di Minetola et al. [23], molto utile per lo studio del grado IT per l'analisi dimensionale e per la caratterizzazione di alcune tolleranze geometriche. Il benchmark di partenza è stato modificato e diviso in nove parti per due ragioni principali:

- Il benchmark necessita di almeno 5 misurazioni (numero che consenta di effettuare un'analisi statisticamente accettabile) per ogni range di misurazione per il grado IT, quelli indicati dalla normativa ISO 286-1988 [20];

- La divisione del benchmark in nove parti differenti consente di utilizzare i file CAD su entrambe le macchine, *Rover* consente di stampare su una superficie molto più limitata rispetto ad *Antares*. Inoltre dei benchmark più piccoli risultano essere più gestibili anche per il post-processamento;

Il nuovo benchmark che sarà prodotto è quindi rappresentato in **Figura 38**.

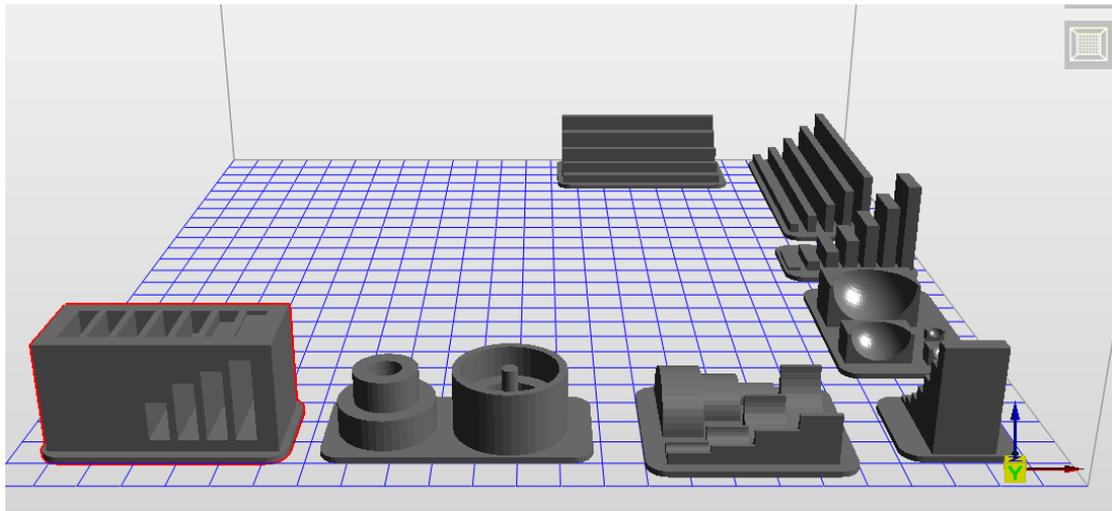


Figura 38 - Benchmark per lo studio del Grado IT e per la caratterizzazione geometrica

Col fine di ben identificare ogni misura sono state contraddistinte tutte le serie di features attraverso un numero. Si riporta qui di seguito l'elenco delle features con le relative dimensioni:

- Alla prima serie appartengono sette piani rettangolari di con sezione di 4x15 mm e altezze di 3 mm, 6 mm, 10 mm, 15 mm, 21 mm, 28 mm, distanziati di 3 mm l'uno dall'altro;
- Alla seconda serie appartengono le scanalature di sezione e altezze analoghe ai piani rettangolari della prima serie, presenti in un blocco estruso di altezza 28 mm;
- Alla terza serie appartengono i gradini che presentano le stesse dimensioni delle features delle serie precedenti;
- Alla quarta serie appartengono le sfere concave e convesse con di diametri 24 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm;
- Alla quinta serie appartengono i cilindri concavi e convessi, che hanno una diametro di 24 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm e sono estrusi per una lunghezza di 10 mm ciascuno;

- Alla sesta serie appartengono i cilindri verticali interni ed esterni uscenti dalla piattaforma, che presentano gli stessi diametri delle due serie precedenti, e un'altezza di 8 mm ciascuno;
- Alla settima serie appartengono i cilindri "complementari" a quelli descritti nella sesta serie, ricavati in una forma cilindrica più grande di diametro 28 mm, le dimensioni degli altri cilindri sono analoghe a quelle descritte nelle serie precedenti;
- All'ottava serie appartengono i piani con massima lunghezza distanziati di 3 mm gli uni dagli altri, hanno una sezione di 3x82 mm, con altezze di 3 mm, 6 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm;
- Alla nona serie appartengono i piani con sezione di 3x35 mm e altezze e distanziamenti analoghi a quelli dell'ottava serie;
- Alla decima serie appartengono i piani con sezione 3x60 mm e altezze e distanziamenti analoghi a quelli dell'ottava serie, con l'unica differenza che in questa serie sono presenti solo quattro piani, fino all'altezza di 15 mm.

La scelta di queste features, come detto, consente di avere un certo numero di misurazioni disponibili per la valutazione sul grado di tolleranza, che devono essere non meno di cinque per ogni range dimensionale.

Le procedure software che precedono la disposizione del job in macchina, sono analoghe a quelle descritte nel paragrafo precedente per la produzione dei campioni di Truncheon, così come anche le configurazioni della macchina e del profilo di slicing (anche in questo caso si è utilizzato un solo spessore di strato, pari a 0,1).

La **Figura 39** riporta una schermata relativa allo Slicing View di *Creation Workshop* per il benchmark appena descritto.

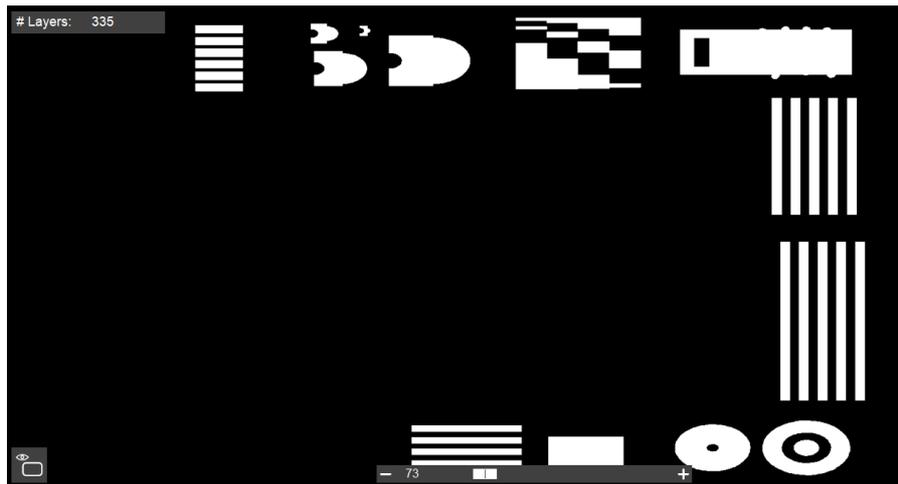


Figura 39 - Slicing View di Creation Workshop

Anche le operazioni di post-processamento sono state analoghe a quelle descritte in precedenza, in quanto sono operazioni che vanno effettuate a prescindere dal tipo di geometria che si intende produrre.

In **Figura 40** si riporta un'immagine dei campioni prodotti. Il tempo di produzione è stato pari a 10 ore e 36 minuti.

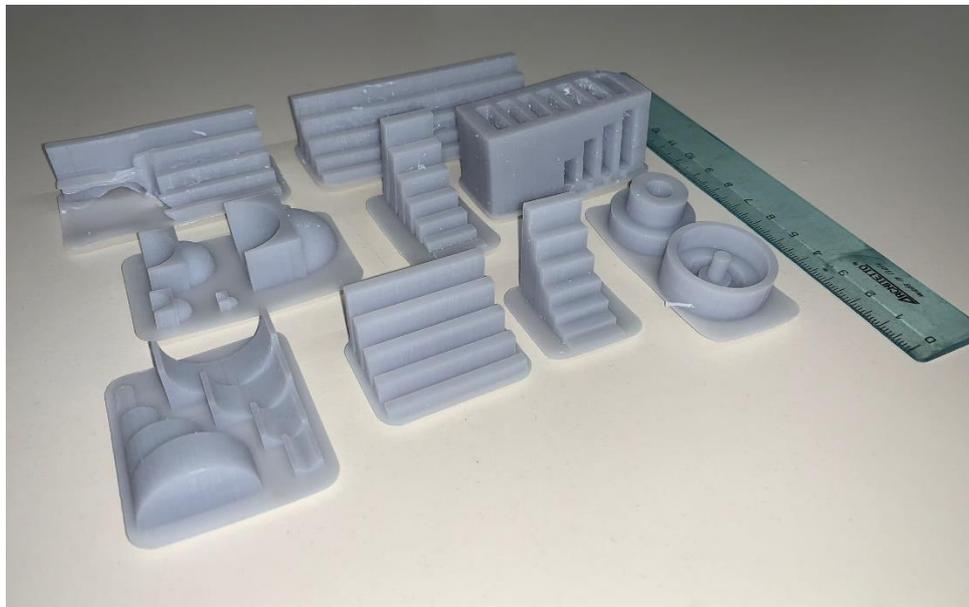


Figura 40 – Campioni prodotti con Antares per la valutazione dimensionale

3.3 Fase di misurazione al rugosimetro: i risultati ottenuti

La fase di misurazione riguarda la verifica delle specifiche geometriche e dimensionali relative ai benchmark prodotti sulle due macchine che sono oggetto di studio. Sono stati misurati i benchmark per la verifica della finitura superficiale prodotti su *Antares*. Successivamente sono stati misurati i campioni prodotti con *Rover*, di questi ultimi sono poi stati confrontati i risultati con quelli ottenuti nella prima fase.

Lo strumento di misurazione utilizzato in questa fase è un rugosimetro, situato nel laboratorio di *Reverse Engineering* all'interno del Politecnico di Torino. Essendo entrambe le macchine caratterizzate da buone prestazioni in termini di spessori di strato, si è scelto di prediligere una *lunghezza di campionamento* pari a 0,8 mm, ripetuta per 5 volte, così da ottenere una *lunghezza di valutazione* pari a 4 mm. Di norma, il rugosimetro aggiunge due *lunghezze di campionamento* a quelle selezionate, una all'inizio e una alla fine, di modo che la *lunghezza di valutazione* diventi 5,6 mm. La fase di post-produzione risulta essere piuttosto critica in quanto le procedure che precedono il trattamento in forno ad ampio spettro, causano inevitabilmente delle asperità superficiali che inficiano il processo di studio dell'effetto staircase; ciò è dovuto al fatto che la resina, seppur polimerizzata, non è ancora perfettamente solida, e dunque risulta esternamente poco rigida. La scelta di una lunghezza di valutazione di 4 mm consente di individuare, su ogni campione, una superficie quanto più intaccata possibile da ogni danneggiamento esterno, in virtù del fatto che si è scelto di produrre un campione con una lunghezza di sezione pari a 20 mm. Tale scelta, è comunque stata verificata, e confermata, dai risultati di rugosità ottenuti.

3.3.1 Misurazione al rugosimetro: *Antares*

Le misurazioni sono state effettuate su ogni superficie inclinata, dunque su inclinazioni comprese tra 0° e 355° con intervalli di 3°. Scelta la lunghezza di campionamento adeguata, si posiziona il campione in modo che la superficie di misura sia perpendicolare alla puntina del rugosimetro. Si posiziona poi la puntina in corrispondenza di un punto sulla superficie in cui non vi siano difettosità generate dal post-processamento, si seleziona la funzione di auto-centramento del rugosimetro, e si inizia la misura. Il campione misurato deve essere

necessariamente bloccato attraverso una morsa, è importantissimo che il sistema non si muova durante la misura e che il tastatore non eserciti una spinta verticale sul campione.

Per avere una maggiore accuratezza di misura sono state effettuate tre misurazioni per ogni superficie, se n'è poi fatta la media aritmetica.

Risulta utile effettuare un confronto con il modello geometrico descritto nel **Capitolo 2 (Figura 15)**, per comprendere al meglio l'affidabilità di tale modello. La formula che descrive l'andamento teorico di rugosità in funzione dell'inclinazione superficiale è la seguente [12]:

$$R_a = \frac{L}{2} \cdot \left| \frac{\cos(\theta - \phi)}{\cos \phi} \right| \quad \text{con } 0^\circ < \theta < 180^\circ$$

La validità di questo modello matematico è dunque ristretta alle superfici con inclinazione compresa tra 0° e 180° . A livello teorico, è possibile utilizzare la stessa previsione sulle superfici con inclinazione compresa tra 180° e 360° .

Ciò che risulta necessario, è a questo punto valutare l'angolo di inclinazione del profilo. Questo angolo è solitamente compreso tra 5° e 15° . L'influenza di quest'angolo, negli intervalli appena descritti, è praticamente trascurabile, in quanto fornisce scostamenti dei risultati nell'ordine dei decimi di micrometro. Si sceglie dunque di fissarlo arbitrariamente su un valore di 10° .

L'andamento teorico di rugosità per spessori di strato pari 0,1 mm, e per inclinazioni superficiali comprese tra 0° e 180° è mostrato in **Figura 41**. Lo spessore di strato influisce in maniera lineare sul modello matematico, dunque l'andamento per spessori di 0,05 mm sarà analogo, ma con un massimo in corrispondenza di valori di rugosità di circa 25 μm .

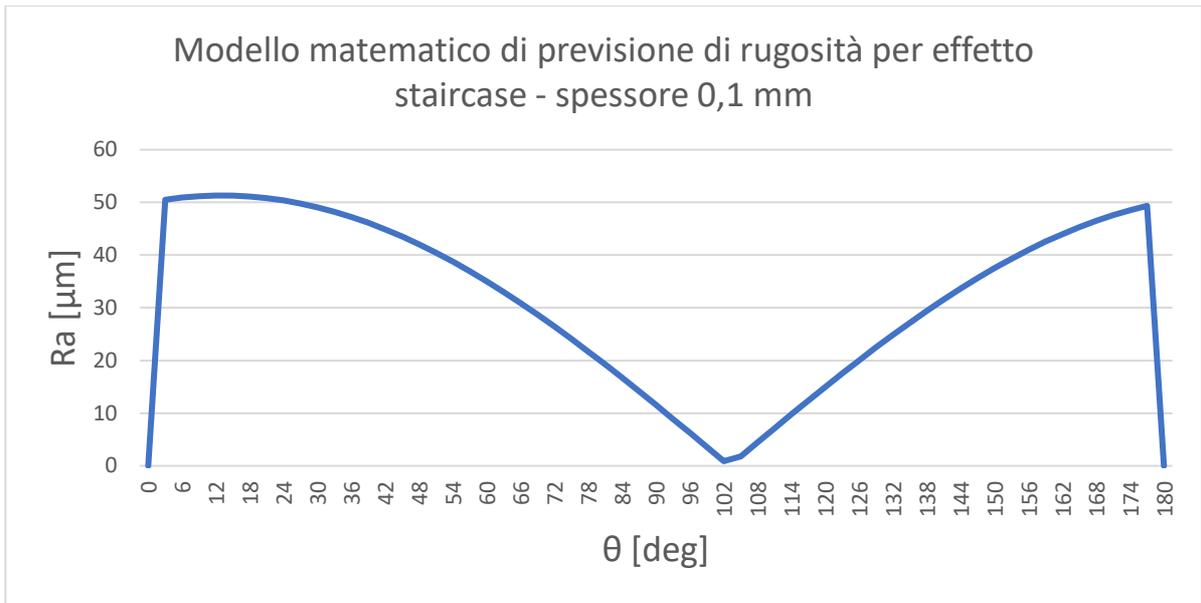


Figura 41 - Andamento teorico di rugosità, spessori di strato di 0,1 mm

Le **Figure 42 e 43** riportano i risultati ottenuti attraverso la procedura di misurazione su tutti i campioni prodotti, dunque su tutto lo spettro di inclinazioni superficiali (comprese tra 0° e 360°) e per entrambi gli spessori di strato.

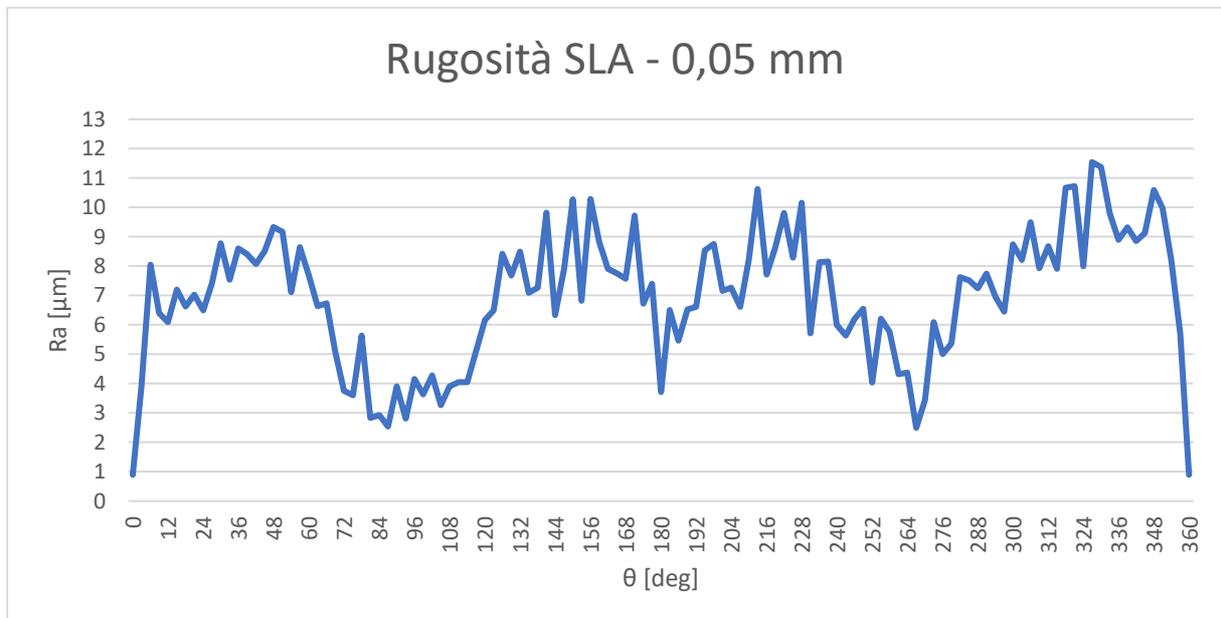


Figura 42 - Risultati delle misurazioni sui truncheon (SLA) con spessori di strato 0,05 mm

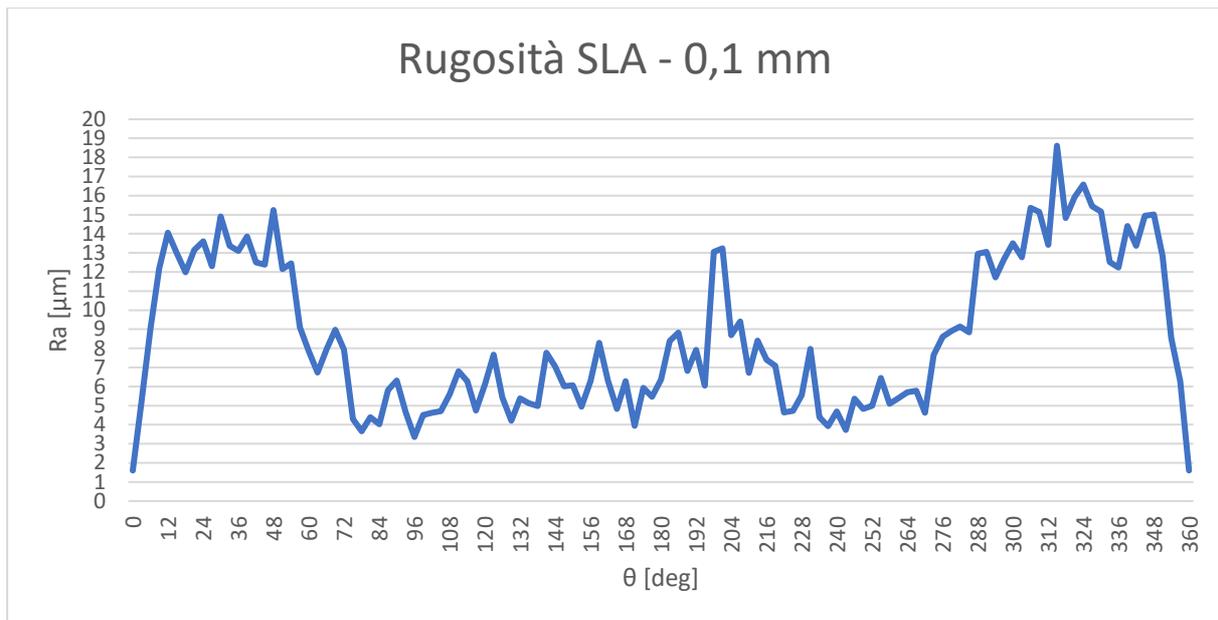


Figura 43 - Risultati delle misurazioni sui truncheon (SLA) con spessori di strato 0,1 mm

Prima di analizzare i dati è importante effettuare alcune precisazioni; il modello geometrico presuppone che l'effetto staircase sia la causa esclusiva di generazione di difettosità superficiali, che vanno ad incrementare il profilo di rugosità delle superfici. Non viene dunque tenuto in conto un aspetto che l'evidenza sperimentale ha mostrato essere piuttosto importante, ossia la distinzione tra superfici superiori e inferiori. Le superfici superiori sono quelle con inclinazioni comprese tra 90° e 270° , le restanti inclinazioni superficiali identificano invece una faccia esposta verso il basso. È da notare che i componenti risultano capovolti rispetto alla configurazione vista nei software di slicing, dunque le superfici superiori sono effettivamente quelle che affacciano sulla piattaforma (sulle quali quindi si posizionano i supporti).

L'andamento dei risultati esposti mostra come la rugosità sulle superfici superiori sia decisamente più bassa, rispetto a quella che si riscontra sulle superfici inferiori, per spessori di strato pari a 0,1 mm. I pezzi prodotti con spessori di 0,05 mm mostrano invece un impatto diverso dell'effetto staircase, che non varia in maniera preponderante tra superfici superiori e inferiori. Complessivamente, le superfici inferiori risultano avere valori che si assestano su livelli comparabili per entrambi gli spessori di strato. La variabilità dei dati mostra inoltre che l'effetto staircase, non è così preponderante nella perdita di qualità superficiale, esistono altri fattori dovuti al processo stesso o al post-processamento che tendono a compensare tale

fenomeno. Dal punto di vista prettamente visivo, è possibile notare che l'effetto staircase interviene più facilmente su determinate inclinazioni superficiali.

Ciò che in particolar modo si evince dai grafici, è che la precisione in termini di rugosità di *Antares* è ottima, si raggiungono dei livelli più elevati su determinate inclinazioni superficiali, ciò è evidentemente causato da effetto staircase. In **Figura 44** si riporta un risultato grafico ottenuto al rugosimetro, dove si vede chiaramente la presenza di effetto staircase.



Figura 44 - Effetto staircase visto al rugosimetro

Un'importantissima evidenza, può essere tratta dai dati riassuntivi delle misurazioni, come la media, il valore minimo e il valore massimo.

La **Figura 45** mostra i report relativi ai valori riscontrati nelle misurazioni.

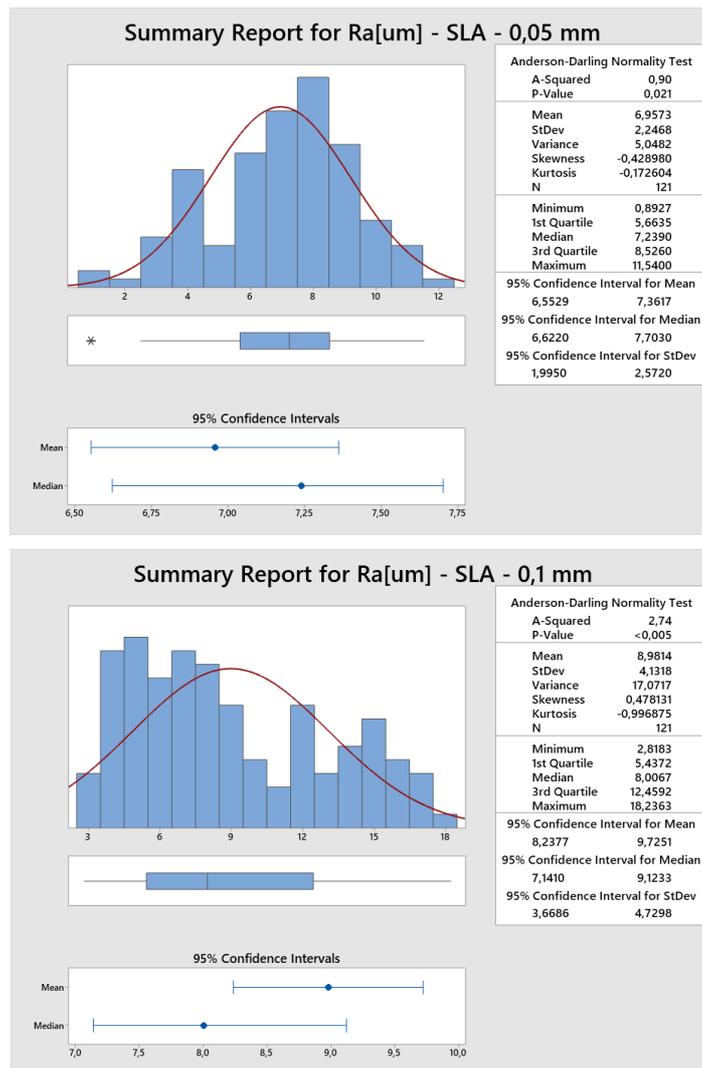


Figura 45 - Report sulle misurazioni effettuate sui campioni a spessore 0,1 mm e 0,05 mm

Come si evince da questi risultati, l'effetto staircase interviene solitamente in maniera poco preponderante sulla generazione di rugosità superficiale rispetto a quanto predetto dal modello geometrico di riferimento.

I valori di rugosità più bassi rispecchiano perfettamente l'essenza di queste tecnologie, in quanto permettono di comprendere come sia possibile ottenere prestazioni decisamente ottimali sulle superfici piane. Dal canto loro, anche i valori massimi sono piuttosto importanti in questo senso. Valori che si attestano su livelli di rugosità al di sotto dei 20 μm rappresentano un'ottima attitudine di questa macchina; di fatto, in Additive Manufacturing, nell'ambito dei polimeri, è piuttosto difficile ottenere prestazioni di questo genere. Le stesse tecnologie di FDM, sono

contraddistinte da valori piuttosto elevati di rugosità, a causa della fisica del processo, che è basato sull'estrusione di un filamento.

Il basso impatto dell'effetto staircase sui risultati di rugosità può essere dovuto non solo a fattori che scaturiscono dalle operazioni di post-processamento, ma anche a caratteristiche proprie del processo. Sarebbe utile investigare questo aspetto attraverso l'utilizzo di resine differenti e con benchmark di diverse tipologie.

Una possibile causa di questa deviazione dei risultati sperimentali da quelli analitici può essere trovata nell'impatto dell'angolo di inclinazione del profilo ϕ . L'angolo in questione caratterizza la "cuspidine del gradino" che si genera per effetto staircase sulle superfici inclinate. L'analisi allo stereomicroscopio ha evidenziato che i gradini che si formano durante il processo, non possiedono una geometria "a cuspidine", risultano invece piuttosto smussati, e ciò può essere dovuto, come detto, non solo alle fasi di post-processamento che tendono per loro natura a smussare una geometria spigolosa, ma anche alle fasi di processo stesse.

Un dato importante visualizzabile dal report, è la media aritmetica di tutti i valori. In generale, la rugosità media delle superfici è piuttosto bassa. È invece piuttosto elevato il valore della varianza, ma di fatto ciò è giustificato dal fatto che questa non si riferisce a una distribuzione normale di dati sperimentali, i valori derivanti dalle misurazioni fanno riferimento a differenti inclinazioni superficiali, è dunque prevedibile che non si evidenzino un andamento gaussiano. Esiste una differenza importante, come detto, tra superfici superiori e inferiori; questo genera uno scarto importante tra valori massimi e minimi.

3.3.2 Misurazione al rugosimetro: *Rover*

I risultati delle misurazioni dei campioni di Truncheon prodotti attraverso *Rover* hanno mostrato una tendenza analoga a quelli esposti nel paragrafo precedente, relativi ai campioni prodotti con *Antares*. Ciò che in prima battuta si può notare visivamente è l'ottima qualità ottenuta su determinate superfici, che risultano estremamente lisce.

I benchmark prodotti con questa tecnologia sono stati processati con spessori di strato pari a 0,05 mm e 0,1 mm.

I risultati relativi alle rugosità superficiali sono stati raccolti e opportunamente ordinati attraverso un foglio di calcolo. I grafici rappresentativi sono riportati nelle **Figure 46 e 47**.

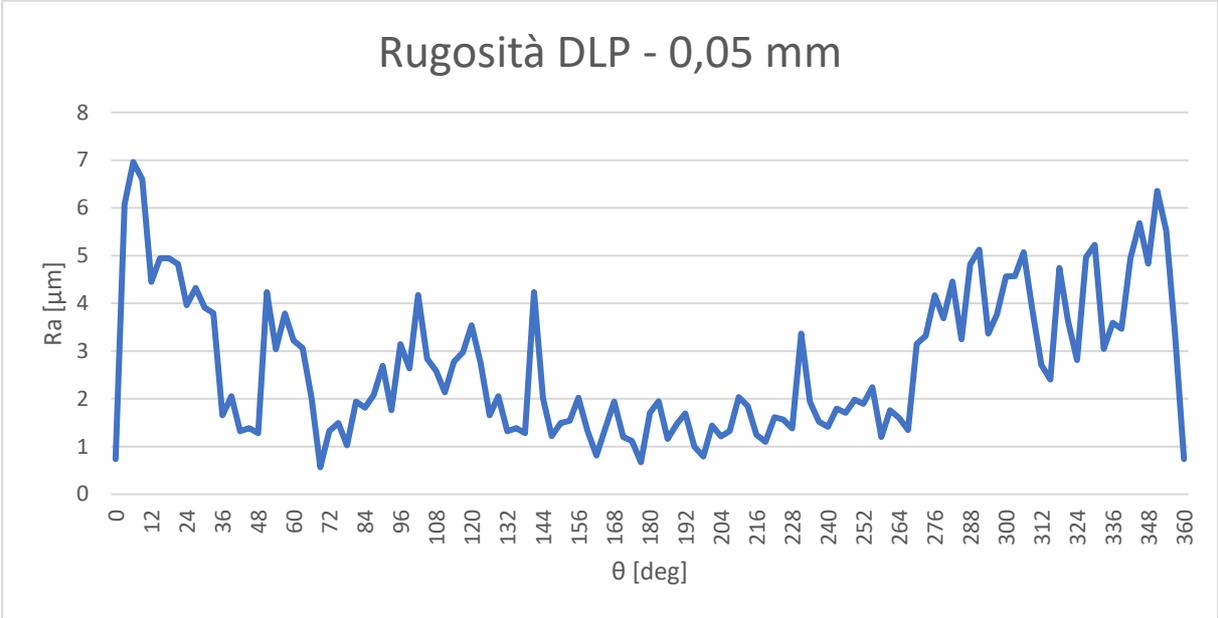


Figura 46 - Risultati delle misurazioni sui truncheon (DLP) con spessori di strato 0,05 mm

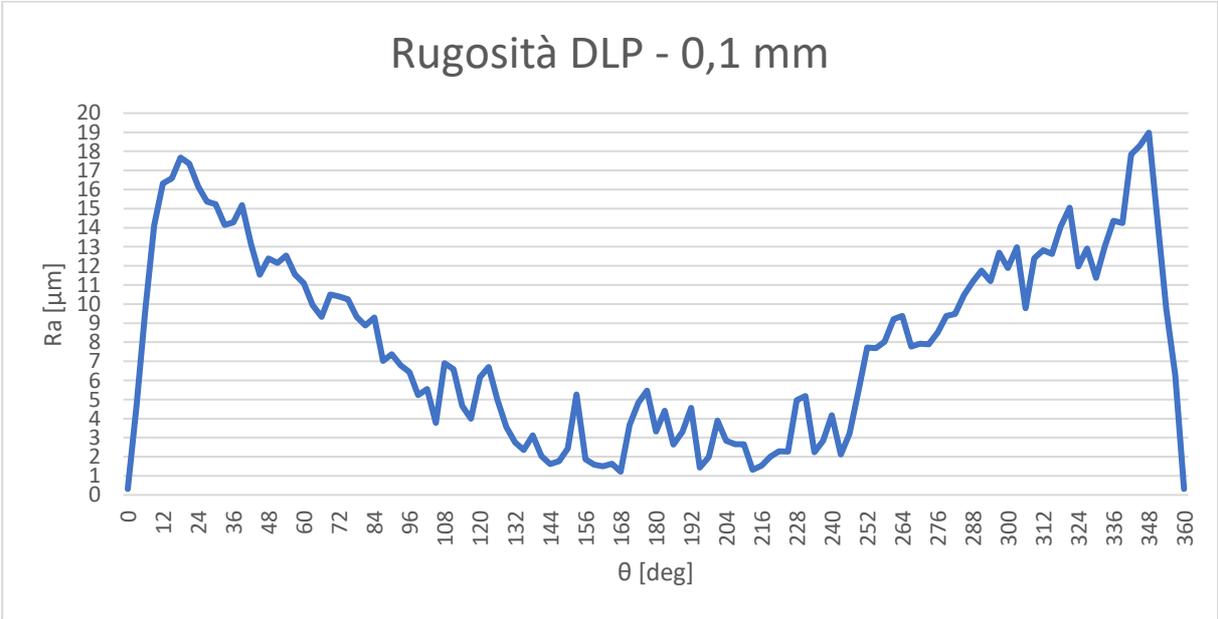


Figura 47 - Risultati delle misurazioni sui truncheon (DLP) con spessori di strato 0,1 mm

L'andamento dei valori di rugosità misurati rispecchia essenzialmente quelli della **Figura 42**; anche in questo caso esiste una differenza tra significativa tra superfici superiori e inferiori.

Il modello geometrico di previsione della rugosità generata per effetto staircase risulta poco affidabile, in particolar modo su spessori di strato piccoli. La tecnologia DLP mostra valori di rugosità estremamente bassi, la scelta dello spessore di strato impatta in maniera preponderante su questo aspetto.

In ragione di quanto detto, è utile evidenziare i valori più caratteristici di questa serie di dati, a titolo di confronto con quanto trovato in precedenza, nei report riportati in **Figura 48**.

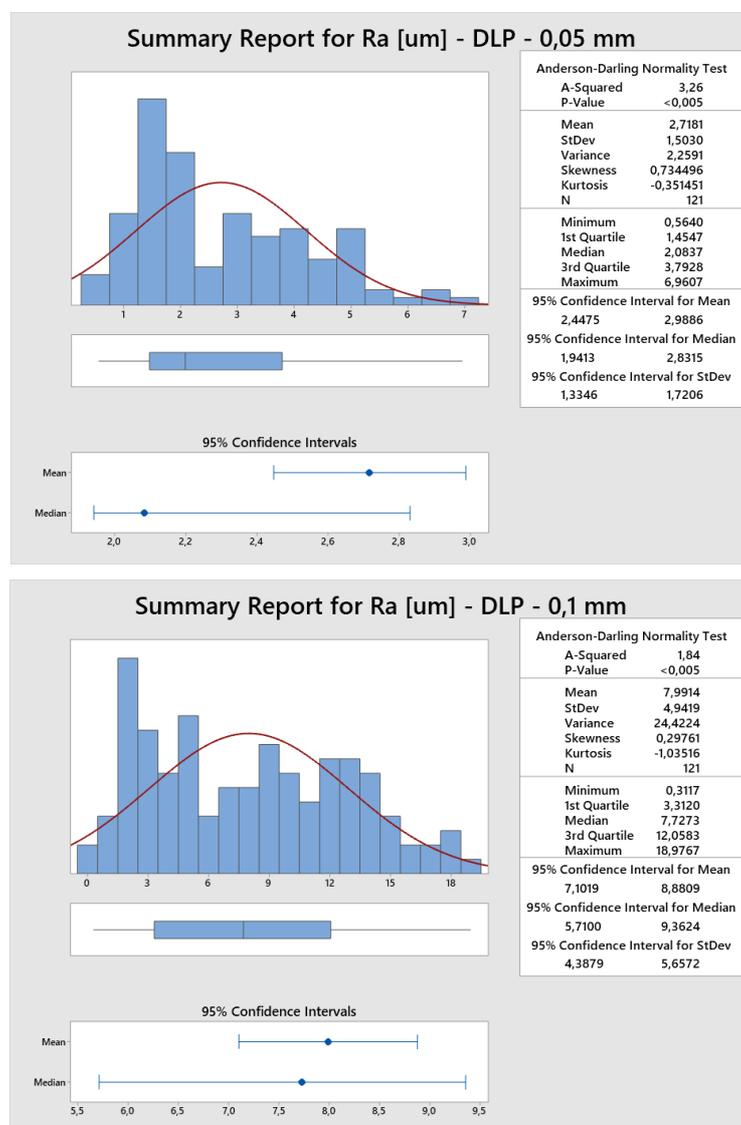


Figura 48 - Sopra, report sulle misurazioni effettuate sui campioni a spessore 0,05 mm; sotto, quello relativo ai campioni a spessore 0,1 mm

Le prestazioni generali della macchina in termini di rugosità sono ottimi, in particolar modo le superfici orizzontali e verticali presentano valori estremamente bassi, anche migliori rispetto a quelli riscontrati con *Antares*; i valori massimi dipendono fortemente, dallo spessore di strato utilizzato. Ciò è reso evidente dall'importante scarto presente tra le due medie aritmetiche dei valori ottenuti.

3.3.4 Analisi di regressione dei dati sperimentali

Come visto, il modello geometrico di riferimento risulta piuttosto inaffidabile ai fini della previsione di rugosità superficiale; esso non tiene conto di molteplici fattori piuttosto importanti.

Una pratica molto utile in letteratura, è la costruzione di un modello predittivo della rugosità [17], [18] che mira alla determinazione dei valori di rugosità anche sulle inclinazioni superficiali che non sono state studiate in fase di caratterizzazione (di fatto, si usano solitamente benchmark con intervalli angolari di 2° o 3°). Nella maggior parte dei modelli riscontrati, si utilizzava un algoritmo di previsione basato su una semplice interpolazione lineare tra due valori noti derivanti dalle misurazioni, per ottenere il valore previsto di rugosità su una qualsiasi inclinazione superficiale. La previsione di questo valore consentiva la scrittura di un **algoritmo di visualizzazione** che prendeva in input un qualunque file STL, attraverso poi i dati derivanti dalle misurazioni e il modello di interpolazione era possibile determinare una previsione di rugosità su ogni triangolo del file STL (è nota la normale di ogni triangolo).

Questa metodologia risulta piuttosto utile ai fini della progettazione, in quanto consente di prevedere la rugosità su determinate superfici, di modo da prendere specifiche decisioni riguardanti l'orientazione del pezzo.

I dati raccolti nei precedenti paragrafi, mostrano però in alcuni punti un andamento piuttosto stocastico, ciò è dovuto come detto ad alcuni fattori che causano una variabilità incontrollabile per queste tecnologie.

Sorge a questo punto la necessità di determinazione di un modello che si avvicini il più possibile ad una descrizione del processo, così da fornire strumenti utili alla progettazione su *Antares* e *Rover*.

I modelli di regressione sono basati sulla costruzione di una funzione matematica, di tipo lineare o polinomiale (e non solo), che possa descrivere al meglio l'andamento dei dati sperimentali. La bontà di questo tipo di modelli è solitamente descritta dal **coefficiente di determinazione**, un parametro che esprime la relazione esistente tra la dispersione dei dati sperimentali e il modello statistico utilizzato (che esso sia di tipo lineare o polinomiale). Anche noto come R^2 , è il principale indicatore dell'efficacia di un modello di regressione; quanto più questo valore tende all'unità, il modello utilizzato descrive bene i dati sperimentali.

Applicando dei modelli di regressione polinomiale (di ordini differenti, sono stati cercati gli andamenti che più si avvicinassero ai valori derivanti dalle misurazioni) ad ogni serie di dati relativi all'andamento di rugosità, si sono raggiunti i seguenti risultati, evidenziati in **Figura 49** e **Figura 50**.

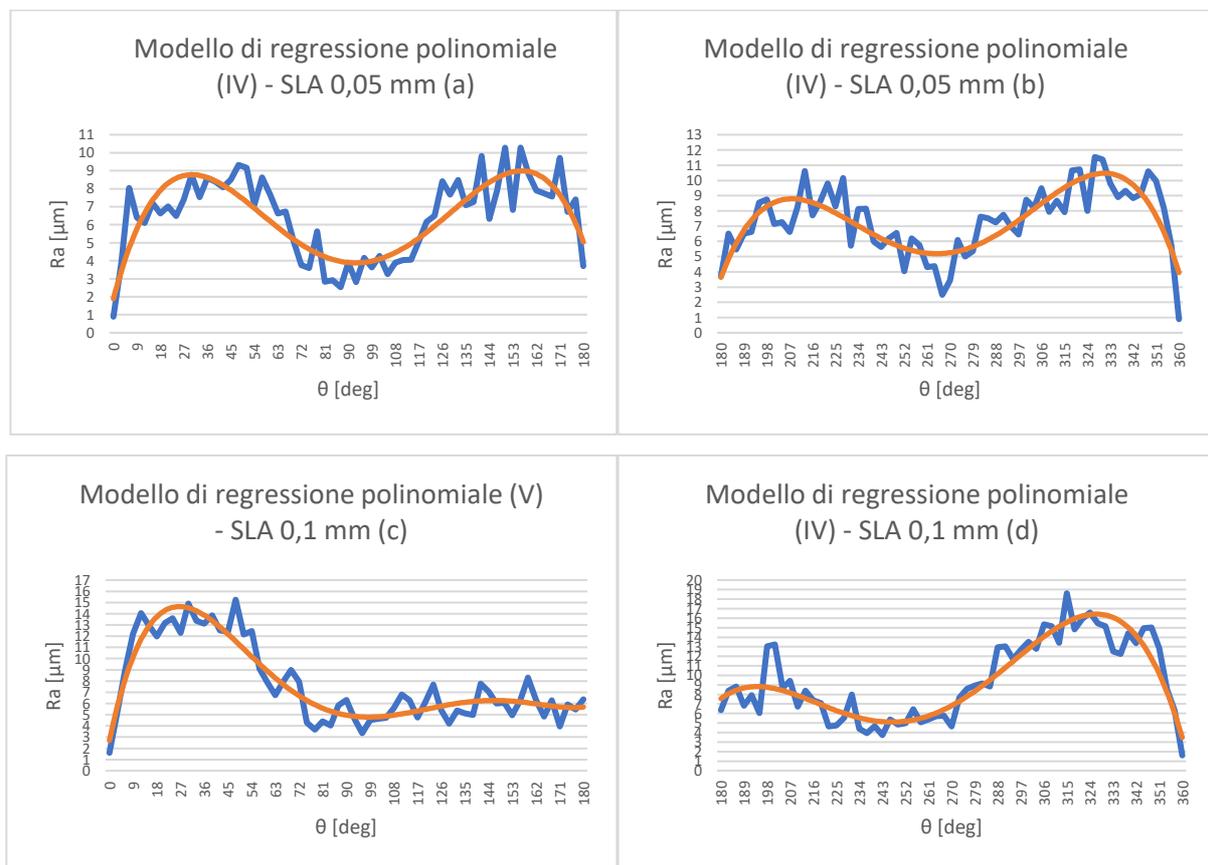


Figura 49 - Modelli di regressione per SLA - (a) 0,05 mm - 0°/180°, (b) 0,05 mm 180°/360°, (c) 0,1 mm - 0°/180°, (d) 0,1 mm 180°/360°

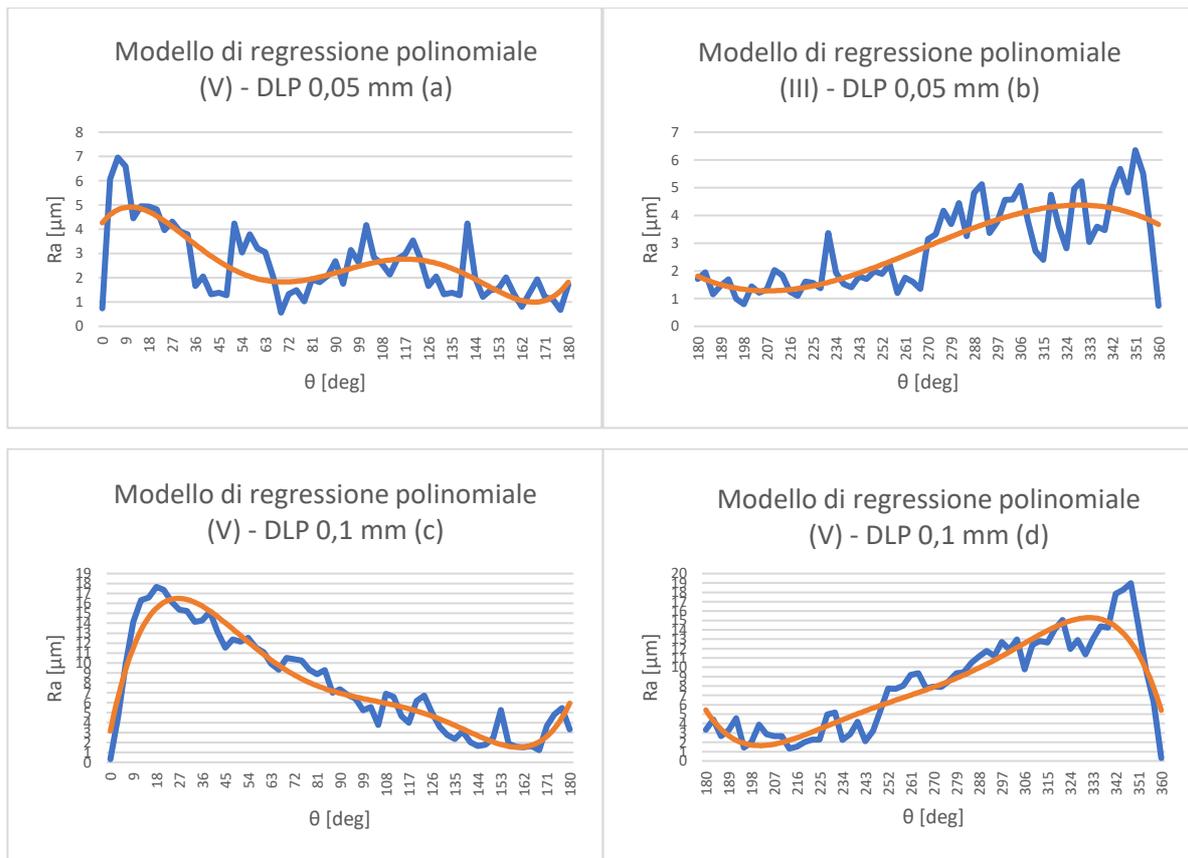


Figura 50 - Modelli di regressione per DLP - (a) 0,05 mm - 0°/180°, (b) 0,05 mm 180°/360°, (c) 0,1 mm - 0°/180°, (d) 0,1 mm 180°/360°

Come si evince dai grafici, i valori del coefficiente di determinazione sono globalmente abbastanza elevati, salvo per alcune serie di dati (come ad esempio DLP a spessore 0,05 mm), la migliore predizione attraverso la regressione polinomiale si attesta su DLP nell'ultima casistica. Anche i valori relativi a SLA mostrano che esiste una dispersione dei dati non eccessiva rispetto al modello utilizzato. Quanto a DLP si assiste ad una grossa differenza nella dispersione dei dati derivanti dalle misurazioni nei due casi con differenti spessori di strato, segno che su bassi spessori i dati di rugosità potrebbero avere un andamento piuttosto stocastico.

I modelli di regressione polinomiale sono stati suddivisi in relazione alle inclinazioni superficiali (tra 0° e 180° e tra 180° e 360°) in virtù del fatto che i risultati ottenuti mostrano globalmente un comportamento quasi speculare su tutto lo spettro di inclinazioni superficiali. Ciò è dovuto come detto alla differenza sostanziale che si attesta tra superfici inferiori e superiori.

Attraverso questi modelli, si giunge ad una formula matematica (polinomiale del terzo, quarto o quinto ordine), che consente di prevedere, con precisione più o meno elevata, i valori di rugosità su tutto il panorama delle inclinazioni superficiali:

- **SLA – 0,05 mm:**

$$R_a [\mu m] = 0,117 + 1,8998 \cdot \theta [deg] - 0,1338 \cdot \theta^2 [deg^2] + 0,0033 \cdot \theta^3 [deg^3] - 0,00003 \cdot \theta^4 [deg^4]$$

$$\text{Con } 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \text{ e } R^2 = 70,57 \%$$

$$R_a [\mu m] = 2,2022 + 1,548 \cdot \theta [deg] - 0,1168 \cdot \theta^2 [deg^2] + 0,003 \cdot \theta^3 [deg^3] - 0,00003 \cdot \theta^4 [deg^4]$$

$$\text{Con } 180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \text{ e } R^2 = 66,51 \%$$

- **SLA – 0,1 mm:**

$$R_a [\mu m] = -0,9086 + 3,9243 \cdot \theta [deg] - 0,3295 \cdot \theta^2 [deg^2] + 0,0107 \cdot \theta^3 [deg^3] - 0,0002 \cdot \theta^4 [deg^4] + 0,0000008 \cdot \theta^5 [deg^5]$$

$$\text{Con } 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \text{ e } R^2 = 86,86 \%$$

$$R_a [\mu m] = 6,8844 + 0,7705 \cdot \theta [deg] - 0,0921 \cdot \theta^2 [deg^2] + 0,0031 \cdot \theta^3 [deg^3] - 0,000003 \cdot \theta^4 [deg^4]$$

$$\text{Con } 180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \text{ e } R^2 = 84,12 \%$$

- **DLP – 0,05 mm:**

$$R_a [\mu m] = 3,7857 + 0,5595 \cdot \theta [deg] - 0,0843 \cdot \theta^2 [deg^2] + 0,0038 \cdot \theta^3 [deg^3] - 0,0007 \cdot \theta^4 [deg^4] + 0,0000004 \cdot \theta^5 [deg^5]$$

$$\text{Con } 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \text{ e } R^2 = 53,39 \%$$

$$R_a [\mu m] = 1,9387 - 0,141 \cdot \theta [deg] + 0,0084 \cdot \theta^2 [deg^2] - 0,00009 \cdot \theta^3 [deg^3]$$

$$\text{Con } 180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \text{ e } R^2 = 61,74 \%$$

- **DLP – 0,1 mm:**

$$R_a [\mu m] = -0,9624 + 4,4956 \cdot \theta [deg] - 0,3924 \cdot \theta^2 [deg^2] + 0,0138 \cdot \theta^3 [deg^3] - 0,0002 \cdot \theta^4 [deg^4] + 0,000001 \cdot \theta^5 [deg^5]$$

$$\text{Con } 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \text{ e } R^2 = 92,04 \%$$

$$R_a [\mu m] = 6,895 - 1,6054 \cdot \theta [deg] + 0,1635 \cdot \theta^2 [deg^2] - 0,0065 \cdot \theta^3 [deg^3] + 0,0001 \cdot \theta^4 [deg^4] - 0,0000008 \cdot \theta^5 [deg^5]$$

$$\text{Con } 180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \text{ e } R^2 = 84,28 \%$$

3.4 Tomografia Computerizzata

La misurazione dei benchmark realizzati per lo studio del grado IT e di alcune delle caratteristiche di tolleranza geometrica della macchina può essere effettuata attraverso un sistema di *Reverse Engineering*, che impiega degli strumenti piuttosto performanti col fine di ottenere delle immagini di un oggetto reale per poi utilizzare dei software di rendering per estrapolarne un modello CAD tridimensionale.

La **Tomografia Computerizzata (Figura 51)** è un sistema all'avanguardia che consente di ottenere il modello tridimensionale di un oggetto attraverso un complesso sistema di scansione basato sulla penetrazione degli oggetti tramite Raggi-X. Il principio di funzionamento si basa sull'emissione di un fascio di Raggi-X da parte di una sorgente; un oggetto interposto tra sorgente e schermo, attraversato dal fascio, tende ad attenuarne l'intensità in relazione alla sua densità. I parametri di settaggio principali sono la Tensione di alimentazione (V) e Corrente (μA). L'incremento di tensione fa sì che un oggetto sia attraversato più agevolmente dai Raggi-X (il parametro va settato in relazione alla densità del materiale da scansionare), l'incremento di corrente rende più nitide le immagini in output. Questa tecnica consente non solo di ottenere un rendering delle superfici, ma consente di visualizzare anche le parti interne al materiale; è una diffusa tecnologia di controlli non distruttivi, in quanto permette di visualizzare difettosità o porosità all'interno dei materiali. È basata sullo stesso principio la Tomografia Assiale Computerizzata, il cui utilizzo è piuttosto diffuso in ambito medico.



Figura 51 - Tomografia computerizzata General Electric

3.4.1 Misurazione di benchmark per la verifica dimensionale con tomografia computerizzata

La misurazione dei benchmark geometrico-dimensionali ha come scopo quello di definire i gradi di precisione dimensionale secondo la caratterizzazione del grado di tolleranza IT, e l'efficienza dal punto di vista geometrico della macchina.

Ai fini della valutazione del grado IT, è stato necessario in prima battuta prevedere un piano di misurazione, di modo da raccogliere il numero necessario di lunghezze per ogni range di misurazione. Ogni lunghezza presa in esame, è stata contrassegnata con un codice, così da avere un agevole riconoscimento di ogni misura trovata. Il codice è costituito da una lettera che identifica l'asse di orientamento della lunghezza misurata, un numero che identifica le serie di features prodotte, e un altro numero che identifica l'ordine di successione di ogni misura. Di seguito si riporta un esempio:

Tabella 4 - Codice identificativo di ogni misura ottenuta

a	9	1
Direzione x	Serie 9: Piani verticali da 35 mm	Lunghezza numero 1

In riferimento alla lettera iniziale:

- La lettera **a** identifica una direzione lungo l'asse x
- La lettera **b** identifica una direzione lungo l'asse y
- La lettera **h** identifica una direzione lungo l'asse z
- La lettera **d** identifica un diametro
- La lettera **R** identifica un raggio di un elemento convesso
- La lettera **r** identifica un raggio di un elemento concavo

Quanto alle serie di features, identificate dal secondo numero del codice, sono state elencate in fase di presentazione del benchmark.

L'ordinamento di tutte le varie misure, consente di raccogliere le dimensioni nominali in un foglio di calcolo, così da dividerle per tutte le varie classi indicate dalla normativa ISO 286 [20] (**Tabella 2**). Questa procedura consente di calcolare agevolmente il fattore n_j per ogni misurazione, e infine calcolare il 95' percentile associato ad ogni range di misura. In ambito sperimentale, il 95' percentile è spesso utilizzato nell'ambito di tali valutazioni; solitamente, si preferisce non fare riferimento al valore massimo riscontrato in una serie di dati, il quale potrebbe non essere sufficientemente significativo ai fini della caratterizzazione, e quindi estremamente cautelativo.

La valutazione di n_j per ogni range, permette di conoscere il grado IT corrispondente; ogni valore di n_j viene approssimato per eccesso. Si intersecano i valori riportati in **Tabella 3** per determinare il risultato finale.

Il software utilizzato per le operazioni che riguardano lo studio dei benchmark è **Volume Graphics**; esso consente di visualizzare i rendering tridimensionali dei componenti processati su tomografia computerizzata. Questo software permette di effettuare molteplici valutazioni, di carattere meccanico o geometrico, in particolare verrà utilizzato per visualizzare i componenti così da effettuare analisi comparative con i file originali (STL).

Una volta ottenuti i rendering dei componenti, sull'ambiente di lavoro di Volume Graphics è necessario configurare la visualizzazione dei modelli regolando alcuni parametri (in particolare si indica al software a che distanza il pezzo è disposto rispetto al fondo spostando l'indicatore rosso in corrispondenza di un minimo, **Figura 52**).

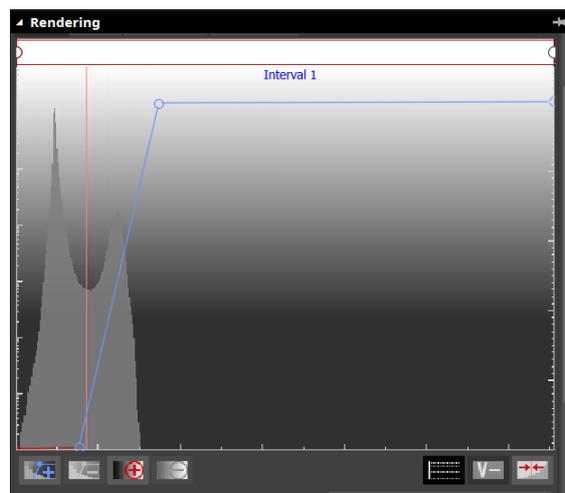


Figura 52 - Procedura di riconoscimento materiale, Volume Graphics

Una volta visualizzato il componente si procede alla *registrazione del pezzo* indicando al software l'orientamento spaziale, così da procedere poi al riconoscimento delle superfici di delimitazione (**Figura 53**).

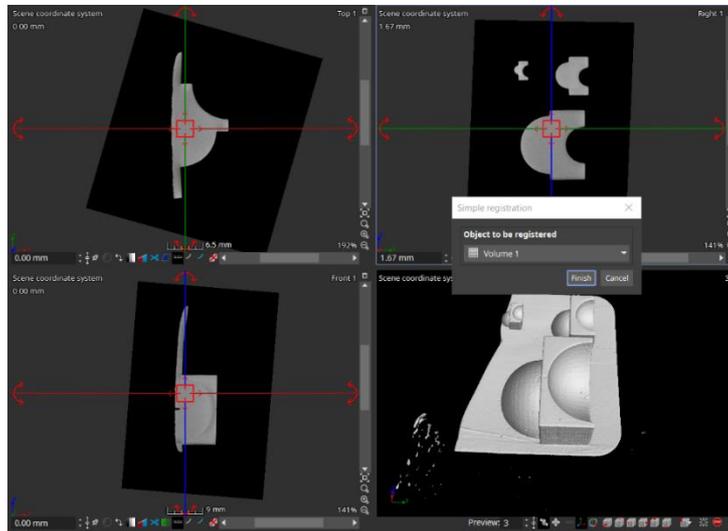


Figura 53 - Procedura di registrazione dell'oggetto, Volume Graphics

Si ottengono così le principali configurazioni tridimensionali di tutti gli oggetti sottoposti a studio, con le relative viste su cui sarà possibile effettuare determinate analisi. Tutti gli oggetti scansionati sono riportati in **Figura 54**. È da notare che in alcune scansioni potrebbe essere presente un effetto di *noise* (rumore), tuttavia all'atto pratico ciò non comporta nessun tipo di impedimento ai fini delle misurazioni o delle comparazioni.

Una volta che le superfici sono state riconosciute dal software, si può procedere alla misurazione delle caratteristiche di ogni serie. Per avere una maggiore sensibilità dei dati vengono prese dalle tre alle cinque misurazioni per ogni determinata dimensione, ripetendo, ove possibile, le misure su sezioni differenti del pezzo. Se ne effettuerà poi una media aritmetica.

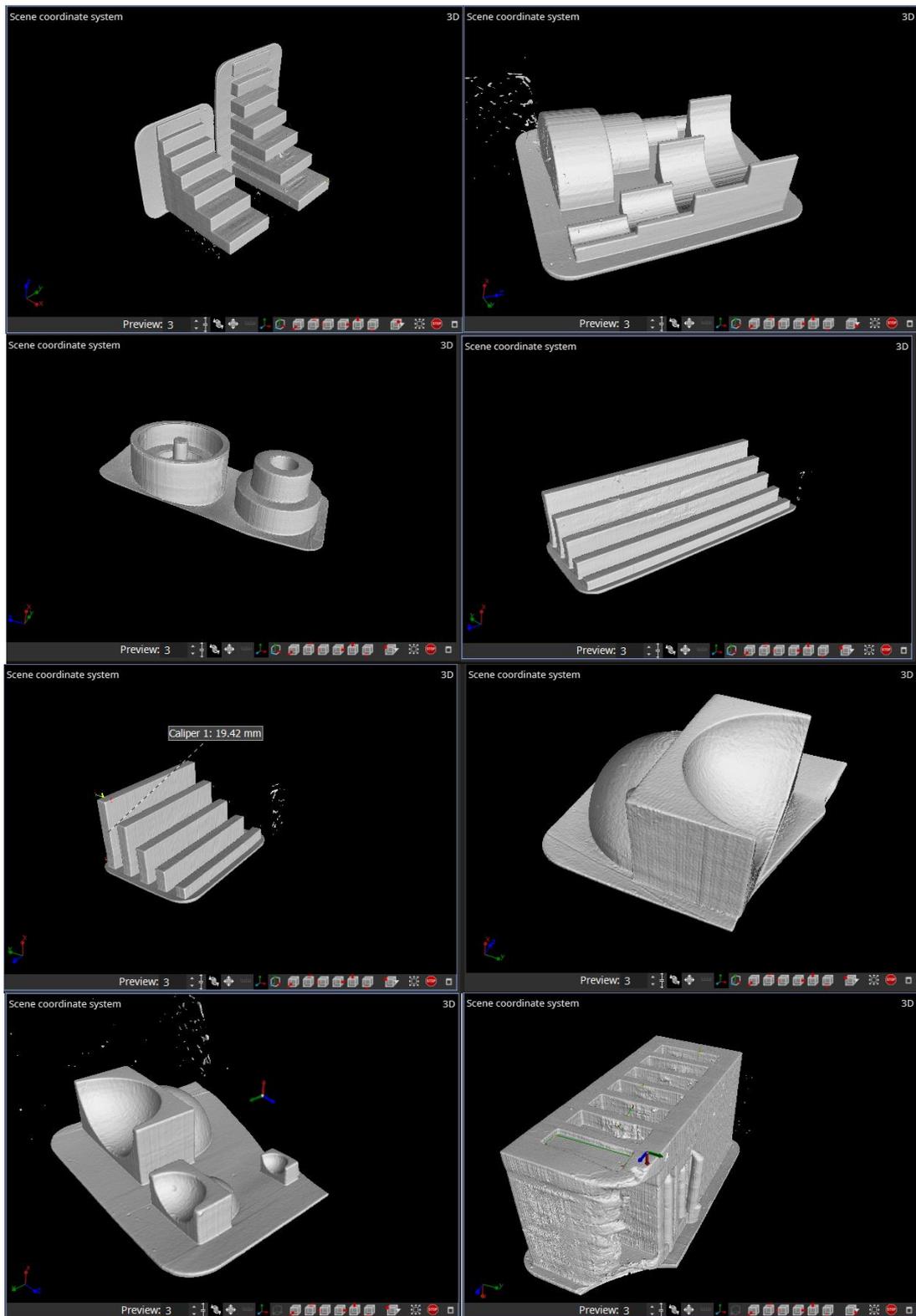


Figura 54 - Coordinate system di tutti i pezzi scansionati tramite tomografia computerizzata

Un esempio di procedura di misurazione per una dimensione caratteristica di un benchmark è riportato in **Figura 55**. Per la misurazione di elementi circolari, invece si effettua una procedura differente; è necessario selezionare tre punti per definire un cerchio che verrà evidenziato dal software, che restituirà un valore di misura (**Figura 56**).

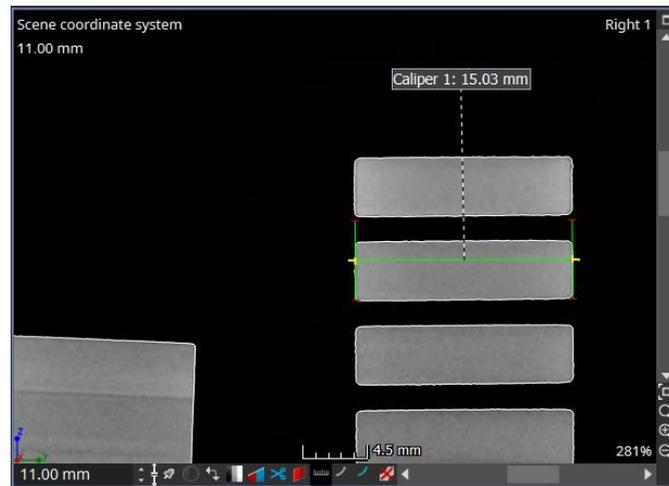


Figura 55 - Procedura di misurazione elementi lineari, Volume Graphics

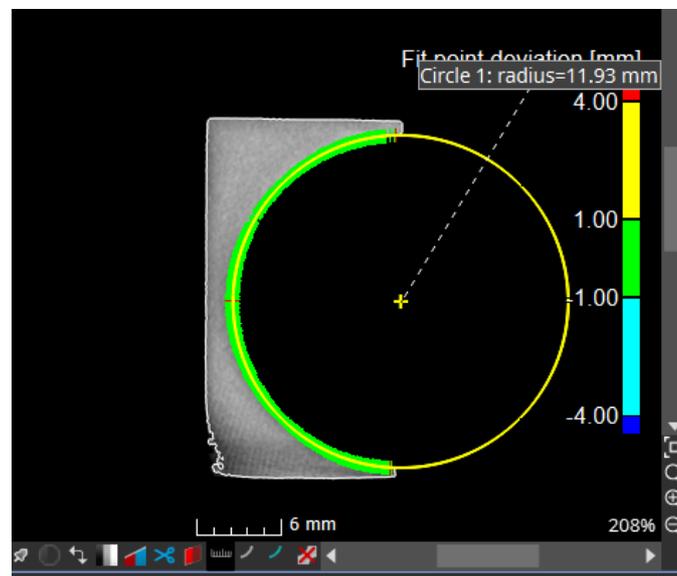


Figura 56 - Procedura di misurazione elementi circolari, Volume Graphics

Una volta raccolti tutti i dati derivanti dalle misurazioni è possibile ottenere il seguente grafico (**Figura 57**) che evidenzia il grado di tolleranza sui range dimensionali per *Antares*.



Figura 57 - Grafico riepilogativo dei risultati relativi alla valutazione del grado IT su Antares

Ciò che si nota immediatamente è che la precisione dimensionale per questa tecnologia risulta piuttosto bassa, contrariamente a quanto ci si sarebbe aspettato. Il grado di tolleranza migliore (IT 14) si attesta solo su alcuni range dimensionali. Se le prestazioni in termini di rugosità superficiali sono circa in linea con le attese, per quanto riguarda le prestazioni dimensionali si assiste ad una evidenza della bassa qualità del processo. Alcuni risultati su determinati range dimensionali sono sicuramente influenzati da alcuni elementi che per caratteristiche, o per posizionamento sulla piattaforma, possono aver subito delle deviazioni inaspettate imputabili a fattori non sistematici. Tuttavia, questo tipo di prestazioni si attestano su tutti i range dimensionali, ciò evidenzia come le prestazioni qui valutate sono globalmente non ottimali.

Ai fini della visualizzazione, è possibile ottenere delle mappe cromatiche su ogni benchmark che permettano di evidenziare eventuali tendenze al ritiro di materiale o errori di eccedenza in determinate caratteristiche. Questa procedura può avvenire attraverso il confronto diretto con il file STL. Le mappe cromatiche sono riportate in **Figure 58, 59, 60**.

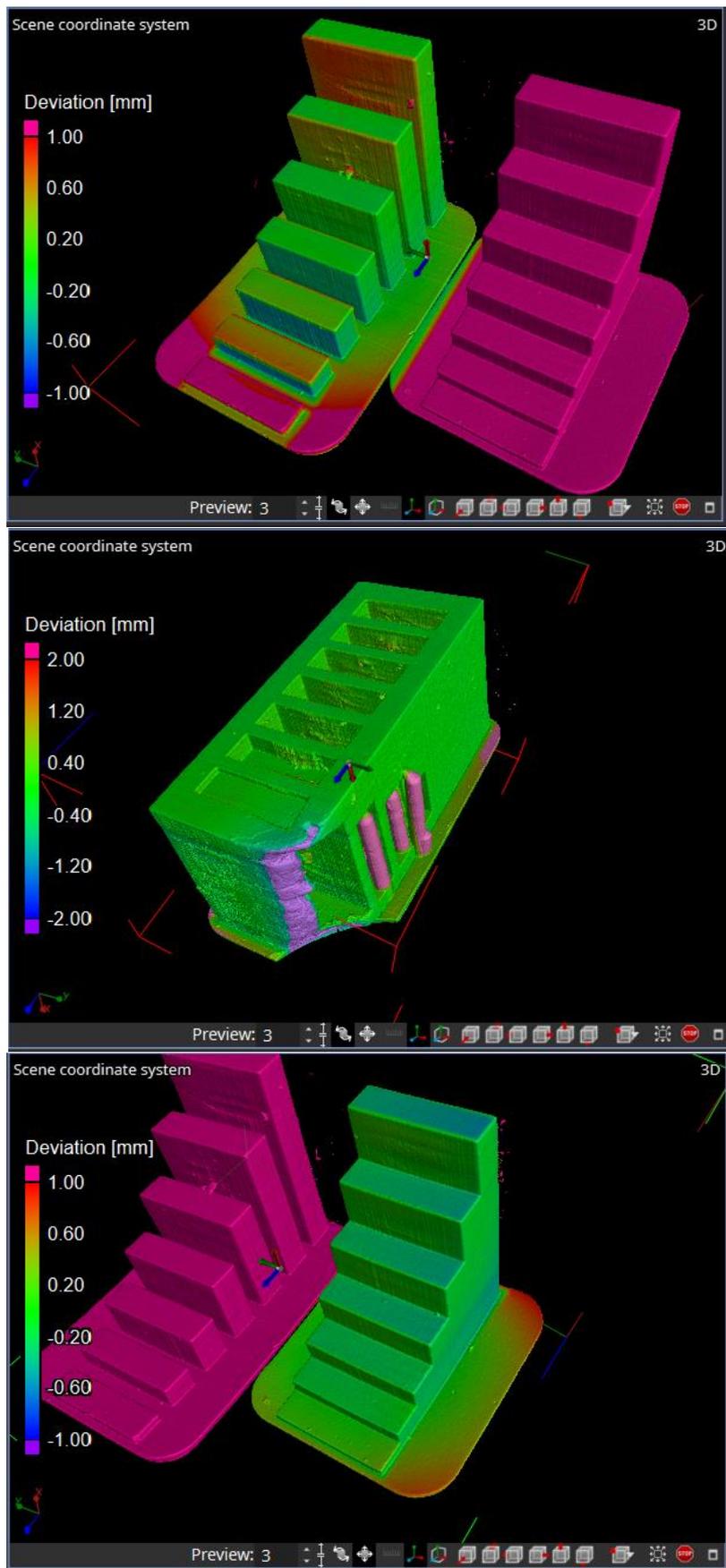


Figura 58 – Grafici di deviazione del pezzo scansionato rispetto al modello STL di partenza. Dall'alto al basso, serie 1, 2 e 3

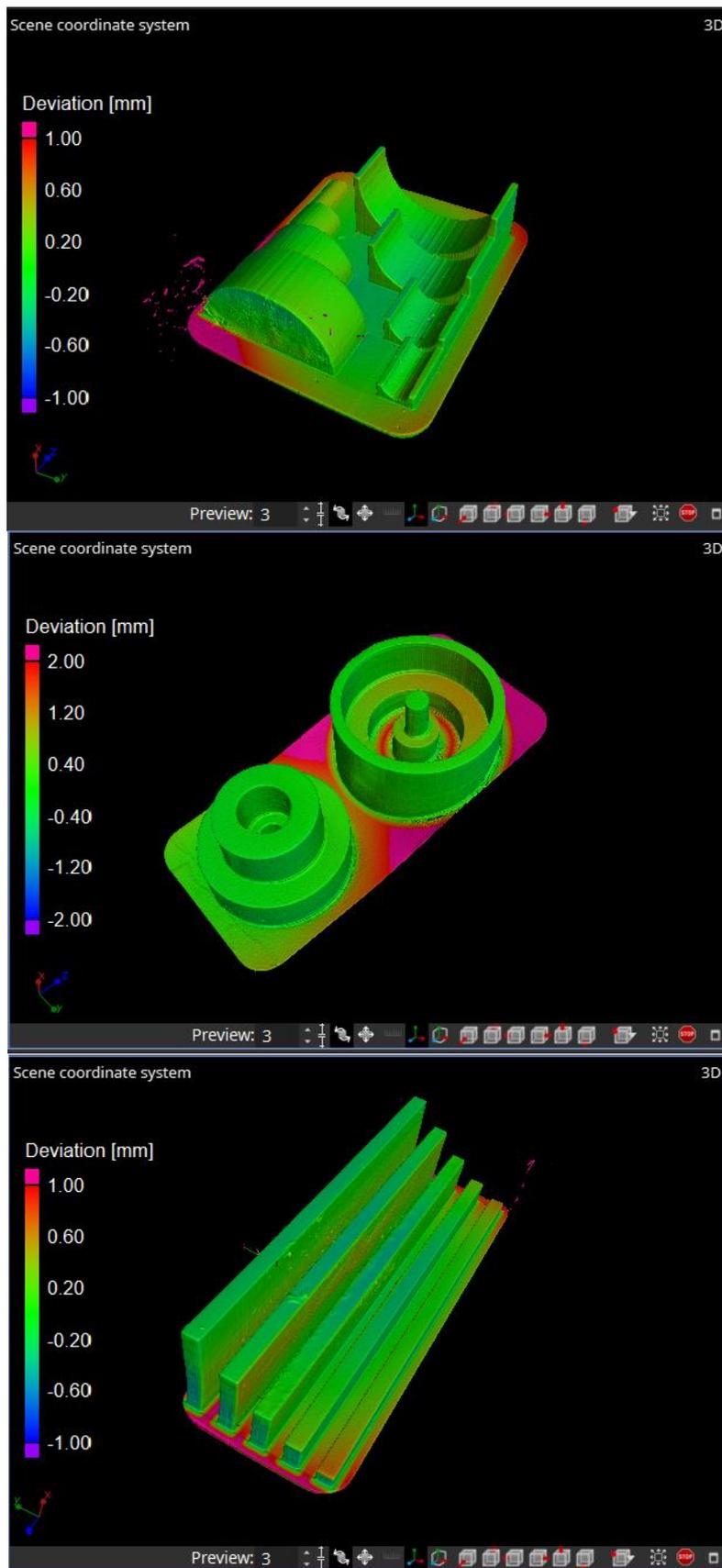


Figura 59 - Grafici di deviazione del pezzo scansionato rispetto al modello STL di partenza. Dall'alto al basso, serie 5, 6 e 8

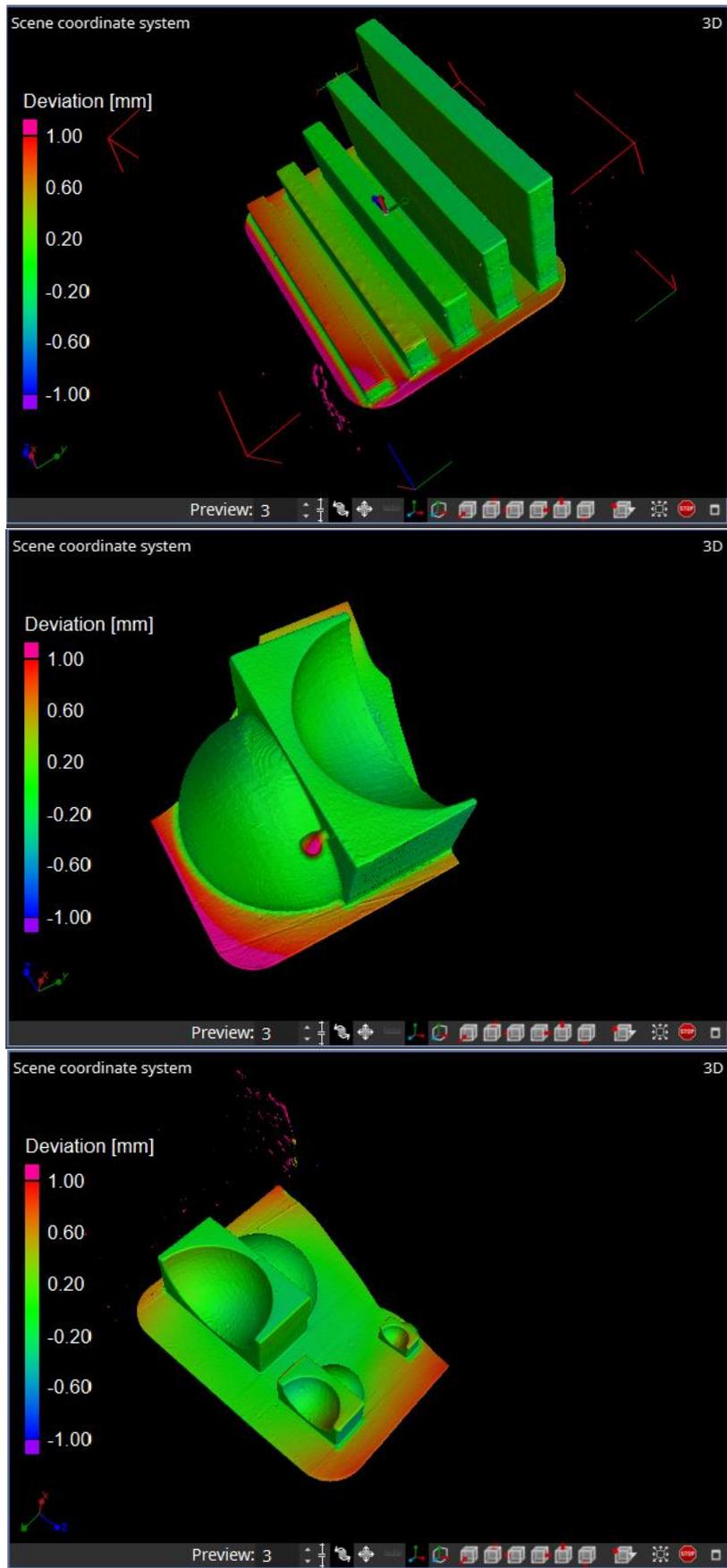


Figura 60 - Grafici di deviazione del pezzo scansionato rispetto al modello STL di partenza. Dall'alto al basso, serie 9 e 4

Le mappe cromatiche possono essere visualizzate anche sulle differenti viste bidimensionali, come **mappe vettoriali**, che presentano cioè l'indicazione della deviazione dimensionale in ogni punto attraverso un vettore colorato, il cui colore dipende dalla sua lunghezza.

Un esempio di mappa vettoriale è riportato in **Figura 61**.

È importante notare che i risultati qui esposti dipendono fortemente dalla registrazione del file STL rispetto al componente scansionato. Sebbene sia possibile procedere ad una registrazione “consigliata dal software” (*best fit registration*), è sempre importante verificare che l'oggetto ideale sia nella posizione ottimale per verificare lo scarto dimensionale in ogni punto. A tal fine è necessario identificare, su determinate features, dei punti di riferimento che siano comuni sia all'oggetto ideale che a quello reale.

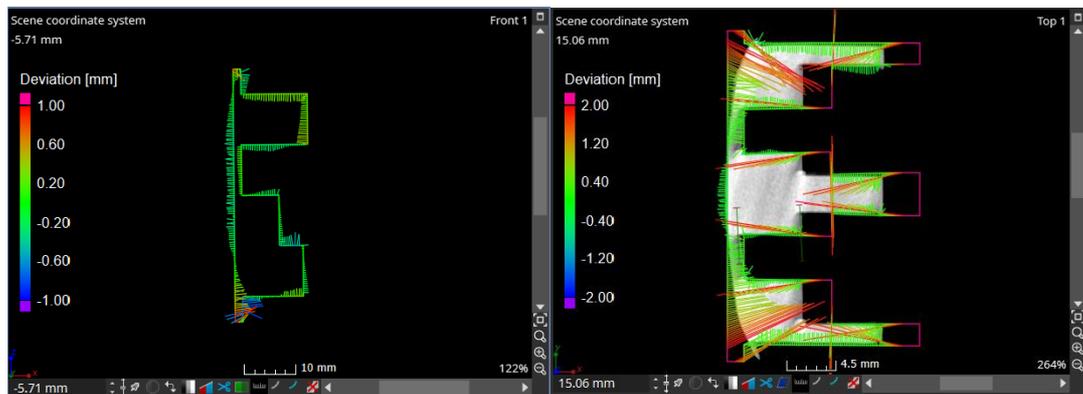


Figura 61 - Mappe vettoriali, deviazione dimensionale

CAPITOLO 4 – I MATERIALI CERAMICI PER LA STEREOLITOGRAFIA

4.1 I materiali ceramici e l'Additive Manufacturing

Il mercato globale per la fabbricazione additiva è da sempre stato caratterizzato da un predominio delle tecnologie per polimeri, solo negli ultimi anni ha iniziato ad essere preponderante lo sviluppo delle tecniche per metallo. I materiali ceramici sono dei materiali piuttosto complessi da trattare, a causa delle loro particolari caratteristiche, che li hanno resi difficilmente adattabili alle tecniche di produzione additiva.

La loro alta temperatura di fusione, la grande resistenza alla corrosione, le caratteristiche di stabilità chimica e la grande inerzia termica di questi materiali, fanno sì che i materiali ceramici siano piuttosto appetibili per molte applicazioni dell'industria meccanica, biomedica, chimica e non solo; i vantaggi che li caratterizzano vanno però a costituire anche un limite dal punto di vista produttivo.

Le tecniche convenzionali per la produzione di componenti in materiali ceramici sfruttano dei processi di sinterizzazione, che consistono nell'applicazione di elevate pressioni e temperature per la formatura negli stampi. In ambito di prototipazione rapida, questo tipo di tecniche sono inapplicabili, e solo negli ultimi anni sono state sviluppate delle soluzioni alla produzione di componenti in materiali ceramici.

La tecnologia di principale interesse al momento è la *Ceramic Stereolithography (CSL)* che coniuga l'utilizzo di resine monomeriche a sospensione di materiale ceramico con le tecnologie di SLA e DLP. L'ottenimento delle resine risulta essere però piuttosto complesso per i motivi che verranno più avanti descritti, e i componenti prodotti necessiteranno di trattamenti termici ad elevate temperature.

4.2 Le caratteristiche di una resina ceramica

Nel Capitolo 2 si sono evidenziati i principi basilari della fotopolimerizzazione, introducendo ai principi fisici che caratterizzano i processi di stereolitografia. A tal fine, è stata introdotta la *Legge di Beer-Lambert* che descrive la relazione esistente tra uno strato polimerizzabile e l'energia introdotta dal fascio laser. Come detto, il laser che impatta su uno strato di resina tende ad avere un profilo parabolico (meglio ancora, gaussiano) che varia in funzione delle proprietà della resina.

Le resine ceramiche presentano delle attenuazioni piuttosto notevoli nello strato polimerizzabile, a causa di un effetto di deviazione della radiazione luminosa generato dalla non-uniformità delle particelle di materiale ceramico disperse nella resina, che viene denominato **effetto scattering**. Questo effetto ottico si intensifica tanto più quanto l'indice di rifrazione del materiale ceramico si discosta da quello della resina grezza. In **Figura 62** [1] si riporta un'immagine qualitativa che descrive l'effetto scattering (in alto), e la differenza tra i profili gaussiani generati dal laser nel caso della resina grezza (in basso a sinistra) e quelli della resina ceramica (in basso a destra).

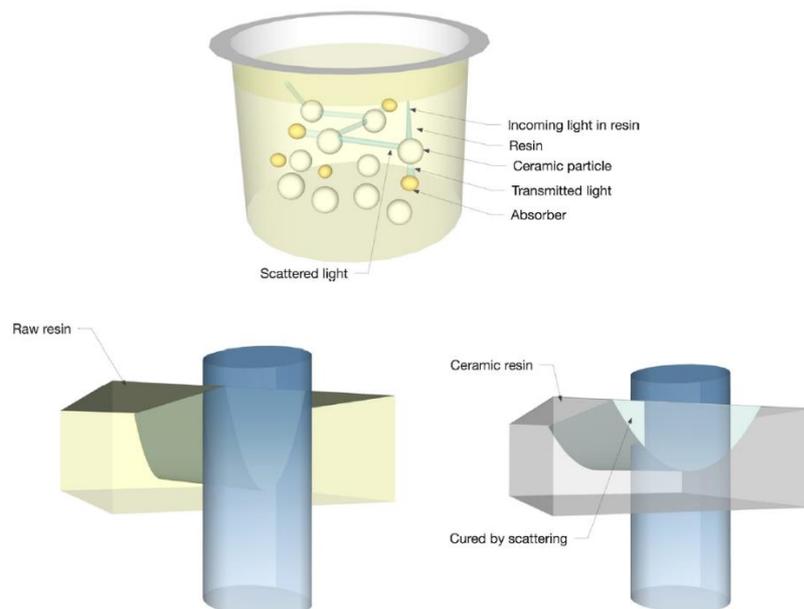


Figura 62 - Effetto scattering in alto, effetto di un fascio laser su una resina grezza in basso a sinistra, su una resina ceramica in basso a destra

Le resine grezze sono costituite essenzialmente da [1]:

- *Foto-iniziatori (PIs)*: wt. 5%. Monomeri e oligomeri non sempre generano spontaneamente delle specie reattive funzionali all'inizio della fotopolimerizzazione; i PIs sono adibiti all'agevolazione di questo processo. Sono distinguibili in due categorie principali:
 - **Free-radical PIs**: dopo l'assorbimento di raggi UV formano dei radicali liberi che attaccano i doppi legami C=C di specifici monomeri;
 - **Cationic PIs**: producono acidi quando esposti alla radiazione luminosa che reagiscono con i legami di specifici monomeri.
- *Monomeri*: wt. 20%. Sono essenzialmente dei diluenti reattivi, servono a ridurre la viscosità conferita dagli oligomeri, sono di due tipi:
 - Monomeri basati su reazione a radicali liberi (*Acrilati e Metacrilati*)
 - Monomeri basati su reazione cationica (*Vinili e Epossidici*)
- *Oligomeri*: wt. 70%. Hanno una struttura a catena larga con poche unità monomeriche. Sono il componente principale di una resina, in quanto conferiscono le proprietà fisico-chimiche.

Ogni specifica resina è caratterizzata da un valore di *Refractive Index* (RI) che solitamente si attesta nelle resine grezze intorno a 1,5. I materiali ceramici utilizzati in resine grezze devono dunque avere essenzialmente tre caratteristiche principali:

1. Devono avere un RI non troppo diverso da quello della resina base. I principali materiali ceramici utilizzati hanno valori di RI compresi tra 1,56 e 2,6.
2. Non devono essere assorbenti nel campo delle lunghezze d'onde tipiche degli ultravioletti (200-400 nm).
3. Devono avere una dimensione delle particelle d_{50} minore dello spessore di strato polimerizzato.

Le resine ceramiche si suddividono quindi in due categorie principali:

- **Resine acquose**: sono resine a base di acrilammide, che si basano quindi principalmente su reazioni a radicali liberi per la fotopolimerizzazione. Sono le resine più utilizzate in quanto hanno una bassa viscosità, nonostante abbiano un RI piuttosto basso e quindi poco compatibile con la maggior parte dei materiali ceramici, e i componenti prodotti

non presentino ottime qualità meccaniche nella forma di green body (il green body è il componente che ha appena terminato il processo di produzione e che necessita di trattamenti termici)

- **Resine non-acquose:** Hanno base acrilica o epossidica. Gli indici di rifrazione sono più elevati (tra 1,47 e 1,55) dunque presentano uno scarto minore rispetto alle resine acquose con la maggior parte dei materiali ceramici. Uno scarto minore tra gli indici di rifrazione di resina grezza e ceramico disperso si traduce in una più semplice polimerizzazione dello strato (si necessita di meno energia). Il limite principale è costituito dalle alte viscosità che caratterizzano questi tipi di resine.

Nell'utilizzo di una resina ceramica, i parametri che più devono essere tenuti sotto controllo sono essenzialmente due: il carico solido e la viscosità.

Il carico solido è la percentuale in volume di ceramico disperso all'interno della resina base; si vorrebbe avere solitamente un carico solido superiore al vol. 50%, così da conferire buone caratteristiche al componente finale. Quanto alla viscosità, in questo ambito risulta essere un problema piuttosto complesso da trattare.

Le resine ceramiche sono dei fluidi Non-Newtoniani, ovvero non presentano un valore ben determinato di viscosità, ma la relazione esistente tra componenti inerziali e componenti viscosose non è di tipo lineare. La viscosità per i fluidi Non-Newtoniani è in realtà una **viscosità apparente** e viene espressa in funzione dello **shear rate** (velocità di deformazione angolare). In particolare, il limite di viscosità apparente che non dovrebbe essere superata nell'ambito delle resine ceramiche è di circa 3 Pa·s ad uno shear rate di 10 s^{-1} .

Una volta individuato il tipo di resina che più si adatta al tipo di applicazione industriale, i procedimenti che caratterizzano l'ottenimento della resina ceramica sono i seguenti:

- Si disperde la polvere di materiale ceramico in etanolo (o acqua, a seconda del tipo di resina) e disperdenti (i più usati sono l'acido oleico OA, l'acido stearico SA e il Poliacrilato di Ammonio) in percentuali che si aggirano intorno al wt. 2% (rispetto alla polvere);
- Si effettua un'operazione di asciugatura a temperature superiori a 50 °C per far sì che l'etanolo evapori completamente;
- Si setaccia il composto ottenuto in modo da ottenere una dimensione delle particelle adeguato;

- Si disperde la polvere nella resina base e si aggiunge un fotoiniziatore (solitamente si utilizza il TPO) in percentuali maggiori di wt. 1% (rispetto alla resina).

4.3 Il processo produttivo

Una volta note le caratteristiche della resina desiderate, in termini di viscosità, percentuale in volume di ceramico e tipo di materiale, è possibile procedere al processo produttivo vero e proprio, un processo che si differenzia da quelli analizzati nei capitoli precedenti per diversi aspetti.

Ogni macchinario presenta solitamente delle specifiche procedure software che conducono al processo di produzione, il punto di partenza è sempre la generazione di un file STL, con conseguente posizionamento in piattaforma per la generazione di slicing e GCode.

Una procedura piuttosto importante in quest'ambito, nella fase di pre-processamento software, è l'aumento del volume di ogni componente. I software macchina, consentono solitamente di aumentare il volume di un componente di un valore che si aggira tra il 10 % e il 15 %. Questa procedura consente di sopperire alle perdite di volume a cui si assisterà in fase di post-processamento.

Se in stereolitografia classica, il componente uscente dalle macchine pronto per la fase di post-processamento viene denominato **green part**, in stereolitografia ceramica prende il nome di **green body**, in virtù della differenza dei processi che vengono eseguiti nei post-trattamenti.

Il **green body** ha una peculiarità particolare rispetto alla **green part**, in quanto non necessita di un trattamento in forno ad ampio spettro (che consente alla **green part** di diventare **red part**); si deve al contrario assolutamente evitare una perfetta polimerizzazione della resina, in quanto successivamente dovrà essere rimossa.

I trattamenti che il **green body** dovrà subire sono essenzialmente due, e sono anche quelli che generano la notevole perdita di volume.

Un trattamento di **debinding** avviene solitamente a temperature superiori a 500 °C, in opportuni forni che consentano l'evacuazione della resina polimerica. La finalità di questo trattamento è la rimozione dello strato superficiale di resina polimerica così da "liberare" la

polvere ceramica. La temperatura esatta di debinding è solitamente definita nei cicli di *firing* che vengono indicati dai produttori di resine in commercio; essa dipende ovviamente dalle temperature di fusione delle basi monomeriche utilizzate in una resina.

Ultimato il processo di debinding, la polvere ceramica avrà un aspetto piuttosto fragile e poco coeso, dunque è necessario procedere ad un secondo trattamento di **sinterizzazione** a temperature superiori ai 1000 °C, che anche in questo caso dipendono dal materiale utilizzato; anche la temperatura di sinterizzazione viene solitamente indicata nei cicli di *firing*. Questo trattamento consente al componente di acquisire buone caratteristiche meccaniche.

In **Figura 63** [1] si riporta un'immagine qualitativa che descrive i due trattamenti.

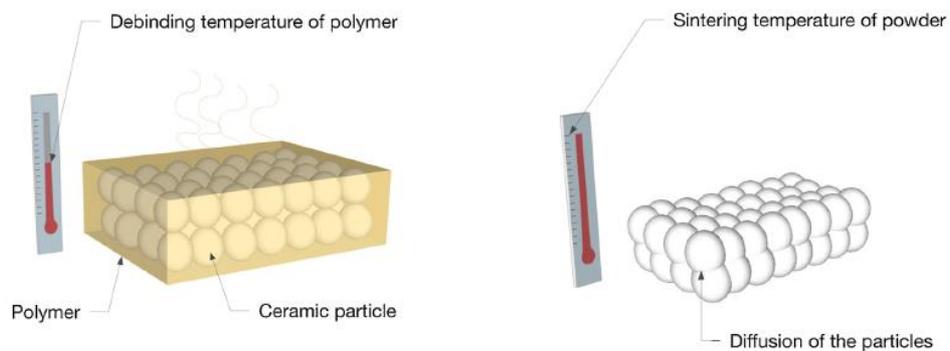


Figura 63 - A sinistra, Debinding; a destra, Sinterizzazione

Processi di debinding e sinterizzazione vengono utilizzati anche nell'ambito della pressofusione di resine a sospensione ceramica.

CAPITOLO 5 – CONCLUSIONI

Le attività svolte in questo lavoro di tesi possono essere riassunte nei seguenti punti:

- In prima battuta si è proceduto ad un'accurata analisi della letteratura scientifica, col fine di comprendere innanzitutto i principi che sono alla base del funzionamento di queste tecnologie, e gli aspetti che le rendono essenzialmente diverse dalle altre. La comprensione della fisica del processo, la scelta dei parametri e di una buona dose nozionistica riguardante i fondamenti software che precedono ogni operazione di stampa, hanno permesso di individuare non solo gli aspetti più caratterizzanti di queste tecnologie, ma anche le loro più grandi criticità. La comprensione dei limiti e dei problemi legati a questo ambito dell'Additive Manufacturing necessitano di essere accuratamente studiati, verificati, e portati alla conoscenza più dettagliata possibile; ciò consente di fornire informazioni utili ai fini della progettazione (oltre che della produzione stessa).
- Note tutte le sfaccettature che caratterizzano queste tecnologie, è stato necessario procedere alla ricerca di diverse metodologie che consentissero la verifica e la caratterizzazione di questi limiti. La verifica e il confronto di queste metodologie sperimentali, hanno consentito di portare alla luce diverse nozioni che messe insieme hanno poi condotto alla definizione di un "metodo ibrido" che prendesse il meglio di tutte le informazioni raccolte. La metodologia sperimentale che utilizza dei benchmark è solitamente quella che permette di studiare specifiche caratteristiche dei processi; in questo lavoro, si sono utilizzati dei benchmark che potessero analizzare al meglio le prestazioni geometriche e dimensionali, tuttavia questi strumenti consentono di verificare anche prestazioni meccaniche o di processo. La review della letteratura ha evidenziato che l'utilizzo di un modello matematico-geometrico di riferimento in alcune circostanze consente di prevedere un andamento dei dati sperimentali, non sempre viene rispettato, tuttavia costituisce un'ottima base di partenza per la previsione di alcuni parametri che possono dare origine a prestazioni differenti. Inoltre, è stato piuttosto importante fare riferimento a specifiche normative che stabiliscono in maniera chiara e inequivocabile le metodologie che consentono la determinazione di alcuni fattori.

Complessivamente, la review della letteratura scientifica ha costituito una base fondamentale per questo lavoro, e per i lavori futuri.

- La conoscenza più approfondita delle macchine, dei metodi analizzati, e dei materiali impiegati, ha consentito l'applicazione di alcune delle procedure sperimentali analizzate nel Capitolo 2. Sono stati ideati dei benchmark per lo studio della rugosità superficiale e della precisione dimensionale, prendendo spunto da diverse fonti; si sono poi prese delle scelte specifiche che consentissero non solo di studiare al meglio le due macchine, ma anche di confrontare, per quanto possibile, tutte le sfaccettature che le caratterizzavano. Quanto allo studio relativo alla rugosità superficiale, sono stati prodotti gli stessi benchmark su entrambe le macchine, nonostante la sostanziale differenza nei volumi di lavoro, col fine di percepire le sensibilità di entrambe per poi effettuare un confronto. L'applicazione poi, dei modelli di regressione polinomiale, ha permesso di generare un modello matematico non assoluto, tuttavia efficace nella previsione a grandi linee dei livelli di rugosità attesi su superfici che presentano determinate inclinazioni e per determinati spessori di strato selezionati. Relativamente allo studio della precisione dimensionale del processo, si è potuto procedere alla produzione dei campioni esclusivamente su una delle due macchine; tuttavia ciò ha permesso di verificare la bontà del metodo di misurazione proposto.
- Nel complesso, queste operazioni hanno delineato tutte le sfaccettature che costituiscono un processo di produzione con queste tecnologie, permettendo di comprendere la sequenza delle procedure da effettuare nel pre-processo, processo e post-processo. L'analisi dell'intero processo produttivo ha come fine quello di fornire una base utile alla progettazione su queste macchine, oltre che favorire la nascita di lavori sperimentali futuri mirati alla definizione di nuove caratteristiche o al miglioramento di quello appena proposto.
- Al termine di questo lavoro, si è proceduto ad un'ulteriore review letteraria, col fine di conoscere uno degli aspetti più innovativi che riguardano l'ambito delle tecnologie di fotopolimerizzazione e dell'Additive Manufacturing in generale. L'utilizzo dei materiali ceramici nell'industria moderna diventa sempre più frequente, a causa del miglioramento tecnologico che consente di giungere più agevolmente a determinate condizioni di processo. Le particolari caratteristiche chimico-fisiche che sono proprie dei materiali ceramici, li rendono piuttosto appetibili in numerosissime applicazioni. Si

pensi al settore aerospaziale; i materiali ceramici (come Zirconia, Allumina) sono in grado di sopportare temperature proibitive per gli acciai, sono inoltre stabili dal punto di vista chimico (non sono propensi all'ossidazione superficiale, sono essi stessi ossidi), non sono conduttori elettrici o termici, forniscono ottime prestazioni in termini di durezza superficiale. Il settore medicale sfrutta i materiali ceramici per la creazione di protesi ossee che possano avere caratteristiche più simili possibile ai tessuti umani. La necessità di specifiche caratteristiche come quelle appena descritte, devono però essere coniugate con una base tecnologica che consenta l'ottenimento di forme specifiche, soprattutto in ambiti dell'industria in cui sono estremamente importanti fattori come il peso di un componente, la sua forma, il suo costo. Le nuove tecnologie di Additive Manufacturing per i materiali ceramici coniugano tutte le necessità descritte ad un processo semplice, tuttavia ancora da conoscere al meglio. Le metodologie proposte nell'ambito di questa tesi, hanno lo scopo di fornire una base utilizzabile e modificabile, per la verifica delle prestazioni di tecnologie che sfruttino la fotopolimerizzazione. La conoscenza di base delle caratteristiche generali delle nuove resine ceramiche e del processo produttivo possono fornire una solida base per un lavoro futuro di caratterizzazione geometrica e dimensionale.

Bibliografia

- [1] S. Zakeri, M. Vippola, and E. Levänen, “A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography,” *Addit. Manuf.*, vol. 35, no. October 2019, p. 101177, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101177.
- [2] I. V. Khudyakov, “Fast photopolymerization of acrylate coatings: Achievements and problems,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 121, pp. 151–159, 2018, doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.04.030.
- [3] F. P. W. Melchels, J. Feijen, and D. W. Grijpma, “A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering,” *Biomaterials*, vol. 31, no. 24, pp. 6121–6130, 2010, doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.
- [4] A. Manmadhachary, Y. Ravi Kumar, and L. Krishnanand, “Improve the accuracy, surface smoothing and material adaption in STL file for RP medical models,” *J. Manuf. Process.*, vol. 21, pp. 46–55, 2016, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.11.006.
- [5] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, and S. van Duin, “Advanced Design for Additive Manufacturing: 3D Slicing and 2D Path Planning,” *Intech*, no. 3D Slicing, p. 22, 2016, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5772/63042%0AAbstract>.
- [6] A. Gebhardt, J.-S. Hötter, A. Gebhardt, and J.-S. Hötter, “Machines for Rapid Prototyping, Direct Tooling, and Direct Manufacturing,” *Addit. Manuf.*, pp. 93–290, 2016, doi: 10.3139/9781569905838.003.
- [7] X. Wu, Q. Lian, D. Li, and Z. Jin, “Tilting separation analysis of bottom-up mask projection stereolithography based on cohesive zone model,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 243, pp. 184–196, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.016.
- [8] B. E. Davis, “Characterization and Calibration of Stereolithography Products and Processes,” *Mech. Eng.*, no. September, 2001.
- [9] Y. Li *et al.*, “High-fidelity and high-efficiency additive manufacturing using tunable pre-curing digital light processing,” *Addit. Manuf.*, vol. 30, no. September, p. 100889, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100889.
- [10] J. A. Walraven, “Future Challenges for MEMS Failure Analysis,” *IEEE Int. Test Conf.*,

- pp. 850–855, 2003, doi: 10.1109/test.2003.1271070.
- [11] L. Rebaioli and I. Fassi, “A benchmark artifact to evaluate the manufacturing of microfeatures by digital light processing stereolithography,” *J. Micro Nano-Manufacturing*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1115/1.4046042.
- [12] D. Ahn, H. Kim, and S. Lee, “Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 3–4, pp. 593–606, 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004.
- [13] “ISO 468-1982--[2020-12-15--02-25-14 PM].pdf.” .
- [14] ISO, “BN EN ISO 4288:1998. Geometrical Product Specifications (GPS)- Surface texture: Profile method- Rules and procedures for the assessment of surface texture,” no. 1, pp. 1–8, 1998, [Online]. Available: <https://bsol-bsigroup-com.sheffield.idm.oclc.org/Bibliographic/BibliographicInfoData/000000000001345614>.
- [15] ISO 4287:1997, “Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters,” *Int. Organ. Stand.*, 1997.
- [16] P. E. Reeves, “Reducing the surface deviation of Stereolithography components,” *Thesis*, vol. 3, no. November, pp. 20–31, 1998.
- [17] R. I. Campbell, M. Martorelli, and H. S. Lee, “Surface roughness visualisation for rapid prototyping models,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 34, no. 10, pp. 717–725, 2002, doi: 10.1016/S0010-4485(01)00201-9.
- [18] D. Ahn, H. Kim, and S. Lee, “Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 2, pp. 664–671, 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.050.
- [19] K. G. Mostafa, D. S. Nobes, and A. J. Qureshi, “Investigation of Light-Induced Surface Roughness in Projection Micro-Stereolithography Additive Manufacturing (P μ SLA),” *Procedia CIRP*, vol. 92, no. ii, pp. 187–193, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.177.
- [20] DS/EN ISO, “Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits (DS/EN ISO 286-1),” 2013.

- [21] B. S. En, “ISO system of limits and fits —,” vol. 3, 1993.
- [22] M. Mahesh, Y. S. Wong, J. Y. H. Fuh, and H. T. Loh, “Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–135, 2004, doi: 10.1108/13552540410526999.
- [23] P. Minetola, L. Iuliano, and G. Marchiandi, “Benchmarking of FDM Machines through Part Quality Using IT Grades,” *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 1027–1032, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2015.12.075.
- [24] M. M., W. Y.S., F. J.Y.H., and L. H.T., “Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–135, Jan. 2004, doi: 10.1108/13552540410526999.

Ringraziamenti

Ringrazio l'Ing. Calignano e l'Ing. Galati per la gentilezza e la professionalità dimostrata nell'arco di tutto il percorso svolto, per avermi dato la possibilità di conoscere più approfonditamente il mondo dell'Additive Manufacturing e della ricerca. Il supporto fornito ha un valore ancor più grande, in ragione del particolare momento storico che stiamo vivendo.

Ringrazio il Prof. Iuliano, che mi ha dato l'opportunità di intraprendere questo percorso e che ha fatto sì che nascesse, già tra i banchi di un'aula, l'interesse per questo ambito dell'ingegneria.

Infine vorrei ringraziare Giovanni Marchiandi, che mi ha supportato in tutte le procedure sperimentali, e accompagnato nella conoscenza di tutti gli aspetti pratici che si affiancano ad un lavoro di ricerca.