

**IO1 – Come creare un modello 3d a scopo didattico:
guida per l'insegnante.**

- 01A1-

**Fondamenti di stampa 3D per
insegnanti.**

3D4KIDS

Formazione Secondaria su e attraverso la Stampa 3D

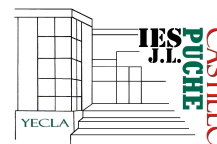
Numero di Progetto:
2017-1-UK01-KA201-036669

Concessione in Licenza secondo quanto stabilito da

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>



CON IL PATROCINIO DI:



Avvertenze:

"Il sostegno ricevuto per la produzione della seguente guida da parte della Commissione Europea non ne rappresenta un'autorizzazione in termini di contenuto che riflette esclusivamente il punto di vista dell'autore, la Commissione non può pertanto essere ritenuta responsabile per l'uso che verrà fatto delle informazioni ivi contenute."

Codice identificativo	O1
Titolo	IO1 – Come creare un modello 3d a scopo didattico: guida per l'insegnante.
Descrizione	O1 – A1. Fondamenti di stampa 3D per insegnanti.
Versione	v.1

INDICE

INDICE DEGLI SCHEMI	5
INDICE DELLE TABELLE	5
1. INTRODUZIONE ALLA PRODUZIONE ADDITVA	6
1.1 Cos' è la Produzione Additiva?	6
1.2 Come funziona la stampa 3D?.....	7
1.3 Cos'è la Prototipazione Rapida?	8
2. TECNOLOGIE	9
2.1 MODELLAZIONE A DEPOSIZIONE FUSA (FDM)	12
2.1.1 Processo, Materiali, Campi di Applicazione.	12
2.1.2 Vantaggi e Svantaggi	13
2.2 SINTERIZZAZIONE LASER SELETTIVA (SLS)	14
2.2.1 Processo, Materiali, Campi di applicazione.....	14
2.2.2 Vantaggi e Svantaggi	16
2.3 STEREOLOGRAFIA (SLA).....	17
2.3.1 Processo, Materiali, Aree di applicazione	17
2.3.2 Vantaggi e Svantaggi	19
3. IL PROCESSO PRODUTTIVO	21
3.1. Ottenere il modello digitale:	22
3.2. Esportare e modificare un file STL:.....	24
3.3.1. Analisi del modello:	25
3.3.2. Strutture di supporto:	27
3.3.3. Riempimento:.....	29
3.3.4. Posizionamento e orientamento.....	30
3.3.5. Generazione del G-Code.	31
3.4. Stampa 3D.....	33
3.5. Estrazione dei pezzi:.....	33
3.6. Post-lavorazione:	35
4. SOFTWARE NECESSARIA ALLA STAMPA	36
4.1 Software di programmazione.....	38
4.2 Software di verifica, orientamento e riparazione	41
4.3 Software per la generazione del G-Code.....	43
4.2 Processo di Stampa 3D.....	44
5. MATERIALI	45
5.1. Panoramica generale.....	45

5.2. Materiali FDM, SLS e SLA.....	48
6. LIMITI DELLA SAMPA 3D.	50
6.1. Limiti nella produzione additiva.....	50
6.2. Limiti relativi ad ogni tipo di tecnologia.....	51
6.3. Introduzione alle limitazioni della tecnologia FDM.....	53
7. ESEMPIO	61

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Stampante 3D FDM. [3].....	7
Figura 2: Stampante 3D SLA. [4].....	7
Figura 3: Stampante 3D SLS. [5].....	7
Figura 4: Processo di stampa 3D. [7].....	8
Figura 5: Prototipi di maschere da sci realizzate con FDM, SLA e SLS (partendo da sinistra) [8].....	9
Figura 6: Tabella comparativa sulle Tecnologie di Stampa 3D. [9].....	11
Figura 7: Tecnologia FDM [10].....	12
Figura 8: Vantaggi della stampa FDM [16].....	16
Figura 9: Tecnologia SLS [17].....	17
Figura 10: Sagoma di scarpa realizzata con SLS [21].....	19
Figura 11: Componenti di una stampante stereolitografica [22].....	20
Figura 12: Resine e relative proprietà [23].....	20
Figura 13: Stampe in resina. [24].....	22
Figura 14: Modello realizzato con Rhinoceros. [26].....	22
Figura 15: Processo di ingegneria inversa [27].....	23
Figura 16: Esempio di modelli scaricabili da Thingiverse.[28].....	23
Figura 17: Come funziona il file STL. [29].....	24
Figura 18: Esportare un file STL con diversi software. [30].....	25
Figura 19: Analisi dello spessore (1 mm) implementato con Meshmixer. [31].....	26
Figura 20: Analisi dell'angolo. [32].....	27
Figura 21: Strutture di supporto. [33].....	27
Figura 22: Differenti tipologie di strutture di supporto. [34].....	28
Figura 23: Differenza tra struttura di supporto ottimizzata (sinistra) e non ottimizzata (destra). È possibile visualizzare la differenza nei tempi di stampa. [35].....	28
Figura 24: Differenti percentuali di riempimento. [36].....	29
Figura 25: Differenti modelli di riempimento. [37].....	29
Figura 26: Qualità diverse di uno stesso oggetto dovute a orientamenti diversi. [38].....	30
Figura 27: Carico di tensione. [39].....	31
Figura 28: Differenti margini di spessore. [40].....	31
Figura 29: Modelli con spessori diversi. [41].....	32
Figura 30: Strati di un modello nel dettaglio[42].....	32
Figura 31: Strati e percorso. [43].....	33
Figura 32: Estrazione. [44].....	34
Figura 33: Processo di estrazione SLA. [45].....	34
Figura 34: Processo di estrazione SLS. [46].....	34
Figura 35: Processo di finitura. [47].....	35
Figura 36: Processo meccanico. [48].....	36

Figura 37: Rimozione dei supporti in materiale solubile tramite immersione. [49]	36
Figura 38: Finiture differenti [50]	38
Figura 39: Fasi di sviluppo del modello 3D [52]	42
Figura 40: Riparare un file STL [56]	42
Figura 41: Interfaccia di Netfabb Premium [57].....	42
Figura 42: Aprire un modello 3D con Slic3r [58]	43
Figura 43: G-Code con Slic3r [59]	43
Figura 44: Diagramma sui vari processi di stampa [60]	44
Figura 45: Materiali impiegati nella stampa 3D(%) [63].....	46
Figura 46: Andamento dell'utilizzo dei filamenti: Novembre 2017[66]	47
Figura 47: Mattoncini Lego in ABS [67]	48
Figura 48: Poliamide. Un materiale flessibile e resistente ad alta risoluzione. [68]	49
Figura 49: Parti di prototipo stampato con tecnologia FDM dalla superficie irregolare a seguito della rimozione del supporto. [71]	54
Figure 50: Variazione con software vs. il diametro effettivo dei fori verticali dovuti alla compressione del profilo estruso. [72].....	54
Figura 51: Effetto di un aumento dell'angolo di sbalzo (incremento di 5 gradi) sulla qualità di stampa. L'ampiezza massima raffigurata è di 70 gradi [73].....	56
Figura 5: Vista laterale di componente con effetto zampa di elefante che si verifica sullo strato di base di stampa FDM. [74]	56
Figura 53: Prototipo di perno cilindrico filettato con diametro decrescente (da 25 a 5mm) con estremità superiore troppo piccola per la stampa. [75]	57
Figura 54: Sezionare il modello per evitare l'utilizzo di strutture di supporto. [76].....	58
Figura 55: Riposizionamento del foro sull'asse orizzontale per evitare l'utilizzo di supporto. [77]	58
Figura 56: Direzione di stampa. [78]	59
Figura 57: Strati con raggio. [79]	59
Figura 58: Modello digitale, risultato della scansione 3D. [81]	61
Figura 59: Posizionamento del modello con Meshmixer. [82].....	62
Figura 60: Analisi generale con Meshmixer. [83]	63
Figura 61: Mascella riparata tramite software- [84]	64
Figura 62: Modello caricato su Cura. [85]	65
Figura 63: Configurazione e parametri del modello su Cura. [86]	65
Figura 64: Sequenza delle fasi di stampa della mascella. [87]	66
Figura 65: Processo di estrazione. [88]	66
Figura 66: Strutture di supporto and pinze. [89].....	67
Figura 67: Rimozione delle strutture di supporto. [90]	67
Figura 68: Risultato finale. [91]	68

INDICE DEGLI SCHEMI

Schema 1: Processi di produzione industriale. [2]	6
Schema 2: Fasi di produzione [25]	21
Schema 3: Il processo produttivo nella stampa 3D. [51]	37

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Breve descrizione dei software di progettazione 3D [53].....	40
---	----

Tabella 2: Software di scansione 3D [54]	41
Tabella 3: Software di Verifica, Orientamento e Riparazione di un Modello 3D [55]	41
Tabella 4: Tabella Comparativa [70].....	53

1. INTRODUZIONE ALLA PRODUZIONE ADDITVA

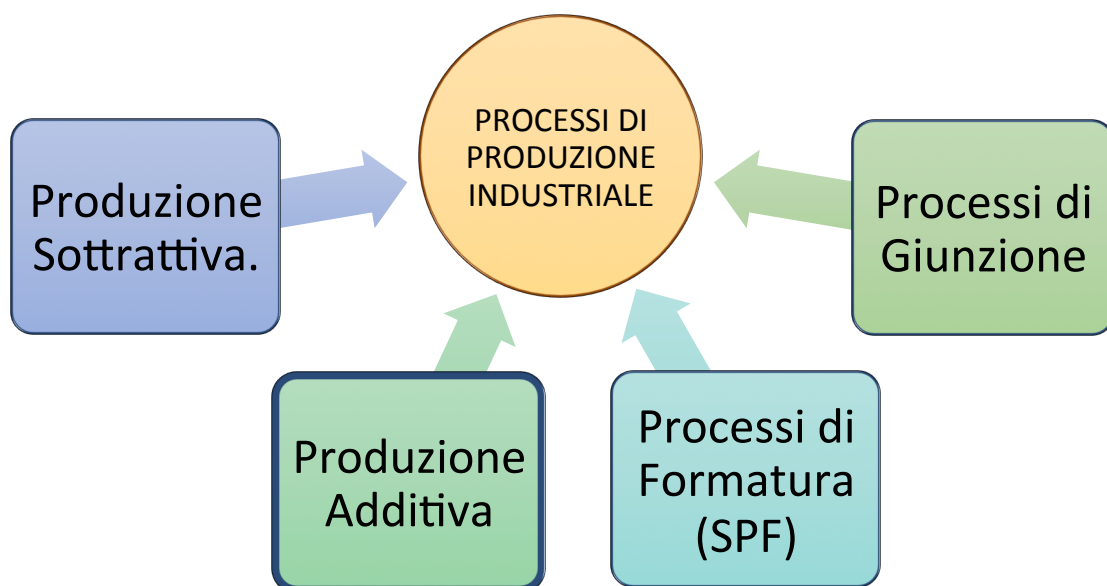
1.1. Cos' è la Produzione Additiva?

La produzione additiva, comunemente chiamata stampa 3D, è un processo di fabbricazione che consente di realizzare oggetti fisici partendo da un modello digitale. Numerose sono le tecnologie e i materiali a disposizione, ma il principio di base è lo stesso: attraverso la sovrapposizione di strati di materiale, uno dopo l'altro, un modello digitale viene trasformato in un oggetto solido tridimensionale. [1]

È importante sottolineare che la dicitura “produzione additiva” non si riferisce ad una singola tecnologia ma bensì ad un insieme di processi di produzione, molto diversi tra loro, accomunati da tre fattori:

1. Sono processi di produzione impiegati per la creazione di oggetti tridimensionali.
2. Gli oggetti in questione vengono realizzati attraverso la sovrapposizione di strati successivi di materiale.
3. I prodotti vengono realizzati partendo da un modello 3D digitale.

I processi di produzione additiva si differenziano dai processi di produzione tradizionali, e congiuntamente a questi ultimi fanno parte di una più ampia gamma di processi di fabbricazione a disposizione del settore terziario.



Schema 1: Processi di produzione industriale. [2]

Nei paragrafi seguenti verranno illustrate alcune tra le principali tecnologie di stampa additiva, che meglio si prestano alla formazione e all'insegnamento. Nello specifico tratteremo: la Modellazione a Deposizione Fusa (FDM), la Stereolitografia (SLA), e la Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS).

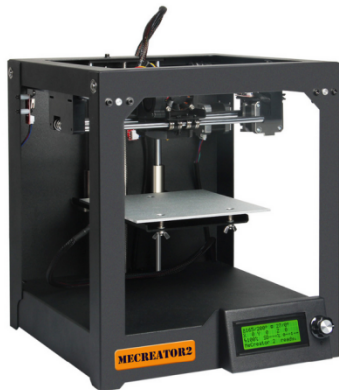


Figura 1: Stampante 3D FDM. [3]



Figura 2: Stampante 3D SLA. [4]



Figura 3: Stampante 3D SLS. [5]

1.2. Come funziona la stampa 3D?

La prima cosa da fare è ottenere un modello virtuale dell'oggetto che si desidera realizzare. Questo può essere fatto utilizzando un software di progettazione CAD (se si intende dare vita ad un oggetto nuovo) o attraverso uno scanner 3D (per la riproduzione di oggetti esistenti). Lo scanner 3D è infatti, in grado di creare una copia digitale tridimensionale di un oggetto reale. In alternativa, è possibile scaricare file 3D già pronti per l'utilizzo dalle numerose piattaforme presenti on-line, chiamate repositories.

Il modello 3D viene suddiviso in sezioni orizzontali, e una volta pronto per la stampa, il macchinario inizierà a depositare materiale uno strato dopo l'altro, procedendo dal basso verso l'alto, fino al raggiungimento del risultato finale. [6]

La spiegazione completa del processo verrà trattata al punto 3 della presente guida.

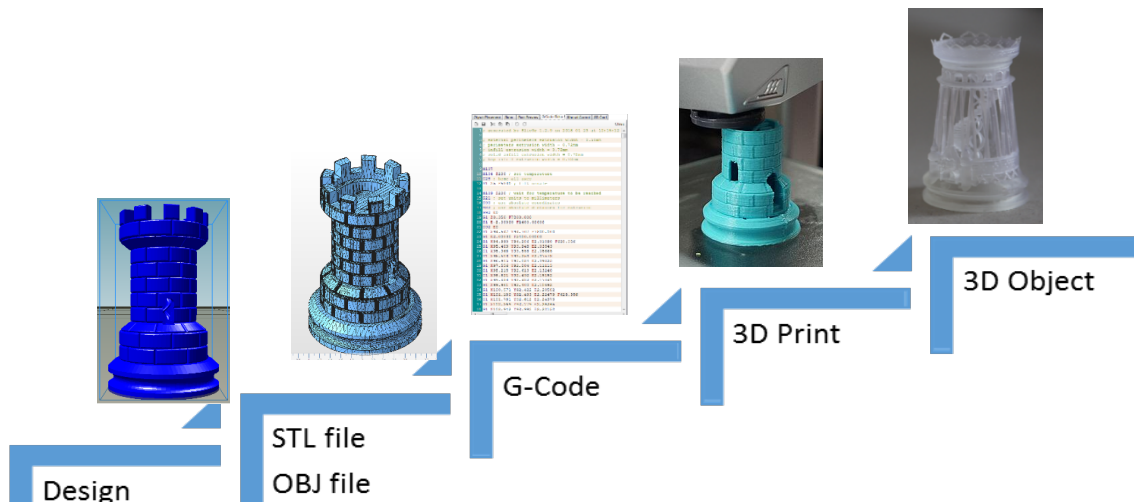


Figura 1: Processo di stampa 3D. [7]

Ecco alcuni dei vantaggi che la produzione additiva presenta rispetto ai processi di produzione tradizionali:

- Numero minore di passaggi tra il modello digitale CAD e la produzione del prototipo.
- Minore quantità di risorse umane impiegate grazie ad un alto livello di automazione.
- Ampia gamma di forme geometriche impiegabili che consentono o la produzione di parti topologicamente ottimizzate, con canali interni, ecc.
- Alta velocità nella produzione di piccole e complesse componenti.
- Spreco inferiore di materiale.
- Possibilità di ricostruire sezioni danneggiate di oggetti reali se il materiale lo consente.
- Non è richiesta nessuna strumentazione speciale.

1.3. Cos'è la Prototipazione Rapida?

La prototipazione rapida è un processo produttivo automatizzato che consente di realizzare prototipi 3D solidi in maniera veloce ed efficiente partendo da file CAD 3D. I processi di produzione possono essere classificati in sottrattivi, additivi o di formatura. Ogni processo può interamente fare parte di una di queste tre categorie o essere considerato ibrido, se presenta caratteristiche compatibili con più tipologie di processi. Nella giungla del terziario, "produttività" significa trasformare un'idea (concept) in un prodotto finito, pronto per essere immesso sul mercato, in maniera rapida e a basso costo. La prototipazione rapida favorisce tale processo. [8]

Tuttavia è necessario non confondere la prototipazione rapida con la stampa 3D, o con la produzione additiva, in quanto tali concetti sono spesso erroneamente utilizzati in maniera intercambiabile. Potremmo affermare che la produzione additiva è solo una delle tecnologie con cui è possibile realizzare un prodotto a prototipazione rapida.

È bene sottolineare che il punto di partenza di ognuna di queste tecnologie è lo stesso: la progettazione assistita da elaboratore (CAD).

Ecco alcune delle tecnologie di prototipazione rapida più diffuse.

- Scanner 3D / Reverse Engineering (o Ingegneria Inversa).
- **Produzione Additiva.**
- Lavorazione CNC.
- Fusione a Vuoto.
- Stampi Prototipo.
- Colata in Sabbia.
- Microfusione a Cera Persa

Lo scopo della prototipazione rapida è quello di testare le varie caratteristiche, idee, concetti, funzionalità, risultati e performance del modello.

2. TECNOLOGIE.

Al fine di individuare le tecniche di stampa 3D più adatte a scopo formativo, è stata stilata la seguente tabella. Essa mette a confronto le tecniche al momento più utilizzate in accordo con le ultime tendenze. L'analisi è stata eseguita sulla base di 12 parametri, considerati i più adatti a fornire una visione di insieme su ciò che la stampa tridimensionale offre. Una speciale attenzione è stata dedicata ai vantaggi e agli svantaggi che ogni tecnologia comporta, in quanto indicatori caratterizzanti.



Figura 2: Prototipi di maschere da sci realizzate con FDM, SLA e SLS (partendo da sinistra) [8]

Attraverso uno studio condotto nell'ambito del rapporto IO1/ A3, che si è occupato di identificare quali tecnologie di stampa 3D meglio si adattano all'insegnamento, il consorzio



ne ha identificate tre, che verranno descritte qui di seguito, insieme ad una lista dettagliata dei processi, dei materiali, dei campi di applicazione, dei vantaggi e degli svantaggi presentati da ogni tecnologia.

TECHNOLOGIES	Process	Materials used	Complexity	Speed	Max Part Size (cm)	Accuracy	Surface Finish	Strengths	Weaknesses	Pricing	Application Area	Application Examples
Fused Deposition Modeling (FDM)	Layers of melted plastic	ABS Filaments, Polycarbonate, Resin, Nylon	●●●●	Fair	30x30x50	Fair	Fair	Durable; ideal for conceptual models	Low resolution	€€	Aerospace, automotive, industrial, medical	Wind turbines, aircraft components
Selective Laser Sintering (SLS)	Plastic powder melted by laser	Paper, plastic, metal, glass, ceramic, composites	●●●	Fast	34x34x60	Good	Fair	Resistant, durable, flexible	Needs post-processing	€€	Automotive, consumer products, aerospace	Small production batches and prototypes
Stereolithography (SLA)	Polymerization scanned by UV laser	Liquid photopolymer, composites	●●●	Fast	30x30x50	Very good	Very good	High res; complex geometries	Only photopolymer materials	€€€	Aerospace, automotive, consumer goods	Medical models of anatomic human parts
Photopolymer Jetting (POLYJET)	Inkjet method with liquid photopolymers	Metals, plastic, wax	●●●	Fast	39x31x19	Very good	Good	More materials at the same time	Only photopolymer materials; not durable	€€€	Medical devices, multimaterial prototypes	Medical stethoscopes
Selective Laser Melting (SLM)	Metal powder melted by laser	Metals: copper, aluminium, tungsten etc.	●●	Fair	28x28x36	Fair	Fair	Manufactures high density parts	Price; needs post-processing	€€	Dental products, mechanical components	Lightweight components for aircraft
Electron Beam Melting (EBM)	Melted powder selected by electron beam	Metals: cobalt, chrome, nickel	●●●	Fast	20x20x20	Fair	Poor	Less thermal stress	Limited set of metals	€€€	Dental, medical implants, automotive	Bone tissue medical models
Electron Binder Jetting (BJ)	Powder distributed by jetting machine	Ceramic, metals, plastic, sand, composite	●	Fast	40x20x10	Fair	Fair	No support structure; multicolour prints	Fragile with limited mechanical properties	€	Architecture, mechanical structures	Pots and general home furniture
Continuous Fibre Fabrication (CFF)	Double nozzle laying/melting method	Plastic, carbon composites, nylon	●●●●	Fair	32x43x16	Fair	Fair	Robust parts, no post-process needed	Limited fibre placement	€€€	Aerospace	Lightweight components
Material Jetting (MJ)	Inkjet method with wax materials	Wax	●●	Slow	30x18x20	Very good	Good	High resolution	Limited wax-like materials; requires support structure	€€	Prototypes for form, fit testing; Casting patterns	Lost Wax Casting in Jewellery and Medical fields

LEGEND:

- = Simple;
- = Fair;
- = Complex;
- = Very complex.
- € = Cheap;
- €€ = Fair;
- €€€ = Expensive;
- €€€€ = Very expensive.

Figura 3: Tabella comparativa sulle Tecnologie di Stampa 3D. [9]

2.1. MODELLAZIONE A DEPOSIZIONE FUSA (FDM)

2.1.1. Processo, Materiali, Campi di Applicazione.

Le stampanti 3D da tavolo comportano l'utilizzo di filamenti di plastica. Questa tecnologia di stampa 3D viene chiamata Modellazione a Deposizione Fusa (FDM) ed è una tecnica di produzione additiva che, attraverso un ugello, estrude materiale polimerico termoplastico, depositandolo strato dopo strato su un piano di costruzione, per la creazione di oggetti solidi a partire da un modello digitale.

La prima cosa da fare quando si vuole realizzare un oggetto attraverso il sistema FDM, è creare un file STL (Stereolithography file format) che attraverso un calcolo matematico suddivide il modello digitale in sezioni (o slices) e lo orienta secondo necessità per la fase successiva. Talvolta il software è in grado di generare delle strutture di supporto in maniera automatica. In generale, è necessario fornire il macchinario di materiale sufficiente sia per il prototipo che per il supporto.

Un filamento di plastica viene condotto da una bobina e spinto attraverso l'ugello di estrusione, che lo fonde e lo deposita sulla piattaforma. Quando il filamento sciolto entra a contatto con il piano di costruzione si indurisce e il resto del materiale viene gradualmente rilasciato seguendo una struttura predeterminata fino al raggiungimento della forma desiderata. Quando uno strato si deposita, la piattaforma si abbassa dello spessore di uno strato per permettere all'estrusore di rilasciare lo strato successivo di materiale.

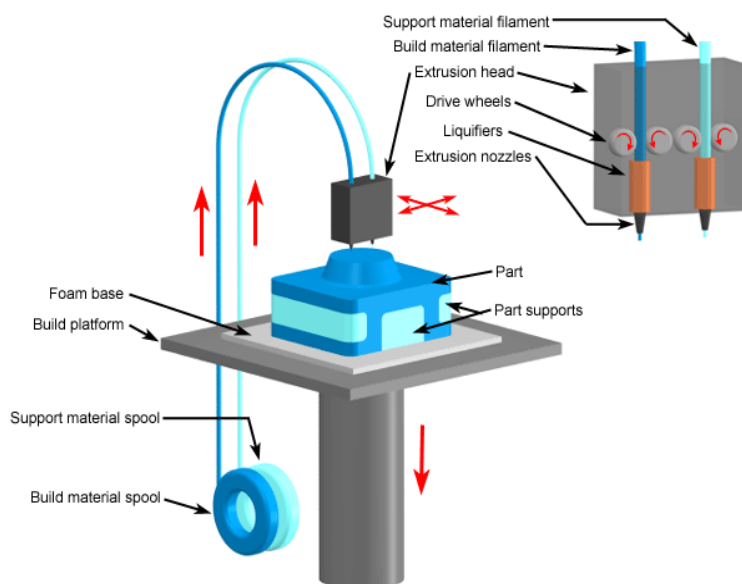


Figura 4: Tecnologia FDM[10]

Esiste una vasta gamma di materiali che possono essere impiegati nella stampa FDM. La prima distinzione è quella tra materiali industriali e materiali ad uso domestico. I più comuni

sono: ABS (Acrilnitrile-Butadiene Stirene) o Cicolac, PLA (Acido Poli lattico) e Nylon (Poliammide), ma è possibile utilizzare miscele di più materiali come plastica e legno o carbonio [11].

Grazie ai numerosi vantaggi che questa tecnologia presenta, la stampa FDM viene spesso utilizzata per la realizzazione di parti di concept, modelli funzionali, prototipi, parti complesse destinate all'uso finale, e utensili di produzione. In particolar modo, la tecnologia FDM è sfruttabile nella produzione in volumi limitati di prototipi per test di forma, idoneità e funzione.

Tra i campi d'applicazione il settore aereospaziale, per la produzione di turbine, e quello medico, per la realizzazione di modelli anatomici. La tecnologia FDM ha infatti in parte favorito la prototipazione rapida di mini-apparecchiature biomediche, utilizzate quotidianamente negli ospedali, e per questo motivo considerata di fondamentale importanza perché economica ma al contempo sicura [12].

Dal 2004 viene impiegata nella produzione di protesi, le quali, come afferma uno studio, "potrebbero favorire la riparazione della cartilagine nelle lesioni osteocondrali". [13]

2.1.2. Vantaggi e Svantaggi

Quando si parla di stampa 3D, una delle principali perplessità ad essa correlate riguarda i costi. L'utilizzo a lungo termine dei materiali può rivelarsi una spesa gravosa, tuttavia coloro che intendono fare uso della tecnologia FDM godono di un vantaggio iniziale; le stampanti FDM sono tra le più economiche e accessibili in commercio, specialmente quelle ad uso domestico. Molte case produttrici offrono modelli già pronti per l'utilizzo, come Maker Bot e Ultimaker, o possono essere costruite con un kit fai da te.

Tra gli altri vantaggi, la tecnologia FDM viene considerata una "tecnologia pulita" (o sostenibile), facile da utilizzare e "office- friendly". È anche in grado di produrre geometrie complesse e cavità altrimenti problematiche da realizzare [14].

Per quanto riguarda l'accuratezza, le stampe 3D non raggiungono lo stesso livello di accuratezza e qualità degli altri oggetti che vengono invece prodotti attraverso l'uso della stereolitografia. Detto questo, il risultato è considerato abbastanza qualitativo, a seconda del settore in cui viene applicata la tecnologia. La risoluzione dipende principalmente dalle dimensioni dell'ugello utilizzato. La precisione della macchina dipende dai movimenti dell'estrusore sull'asse X e Y, ma ci sono altri fattori da prendere in considerazione. Ad esempio, la forza di adesione tra gli strati è inferiore rispetto al processo di Stereolitografia. Di conseguenza, il peso degli strati potrebbe schiacciare gli strati inferiori, il che può quindi influenzare e persino compromettere la qualità della stampa stessa.

Contrariamente alla SLA, la tecnologia FDM presenta anche una maggiore complessità. Bisogna tener conto del peso e delle dimensioni, ma anche dei vincoli. È molto importante assicurarsi che il prototipo soddisfi le aspettative rappresentate sullo schermo dal modello

digitale. I vincoli sono determinati da diversi fattori, in primis dal materiale impiegato, attraverso il quale è possibile prevedere che dimensioni potrà avere il prototipo [15].

Un altro svantaggio è rappresentato dai tempi di stampa, più lunghi rispetto a quelli richiesti dalla Stereolitografia o dalla Sinterizzazione Laser Selettiva, che sarà analizzata successivamente. Inoltre, la finitura superficiale è considerata accettabile, ma non di qualità. Infatti, un prototipo realizzato con stampante FDM richiederà quasi sempre una fase di post-lavorazione.



Technical Specifications for FDM

Standard lead time	Minimum of 4 working days (or 48 hours for models using the Fast Lanes service), depending on part size, number of components and finishing degrees
Standard accuracy	± 0.15% (with lower limit on ± 0.2 mm)
Minimum wall thickness	1 mm
Layer thickness	0.18 – 0.25 mm (varies depending on the chosen material)
Maximum part dimensions	Dimensions are unlimited as components may be composed of several sub-parts. The maximum build envelope is 914 x 610 x 914 mm
Surface structure	Unfinished parts typically have a rough surface but all kinds of fine finishes are possible. FDM parts can be sandblasted, smoothed, colored/impregnated, painted and coated

Figura 8: Vantaggi della stampa FDM [16]

2.2. SINTERIZZAZIONE LASER SELETTIVA (SLS)

2.2.1. Processo, Materiali, Campi di applicazione

La Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) utilizza un raggio laser come fonte di energia per creare oggetti 3D solidi. Questa tecnologia è stata ideata e sviluppata negli anni '80 da uno studente della Texas University, Carl Deckard e un suo professore, Joe Beaman. In seguito hanno fondato insieme la Desk Top Manufacturing (DTM) Corp., venduta poi a 3D Systems nel 2001. La tecnologia SLS è per molti aspetti simile alla Stereolitografia (SLA). La principale differenza risiede nel materiale contenuto dalla vasca, polvere polimerica piuttosto che resina liquida.

A differenza delle tecnologie FDM e SLA, la Sinterizzazione Laser Selettiva non comporta l'uso di strutture di supporto, con conseguente riduzione della quantità di materiale.

Durante la fase di stampa, il prototipo è costantemente immerso nella polvere non ancora sinterizzata.

Un raggio laser sinterizza selettivamente particelle di polvere che si fondono fino a creare una forma solida. Alla fine del processo, l'oggetto potrebbe risultare bollente, pertanto sarà necessario lasciarlo raffreddare prima di rimuoverlo dal macchinario.

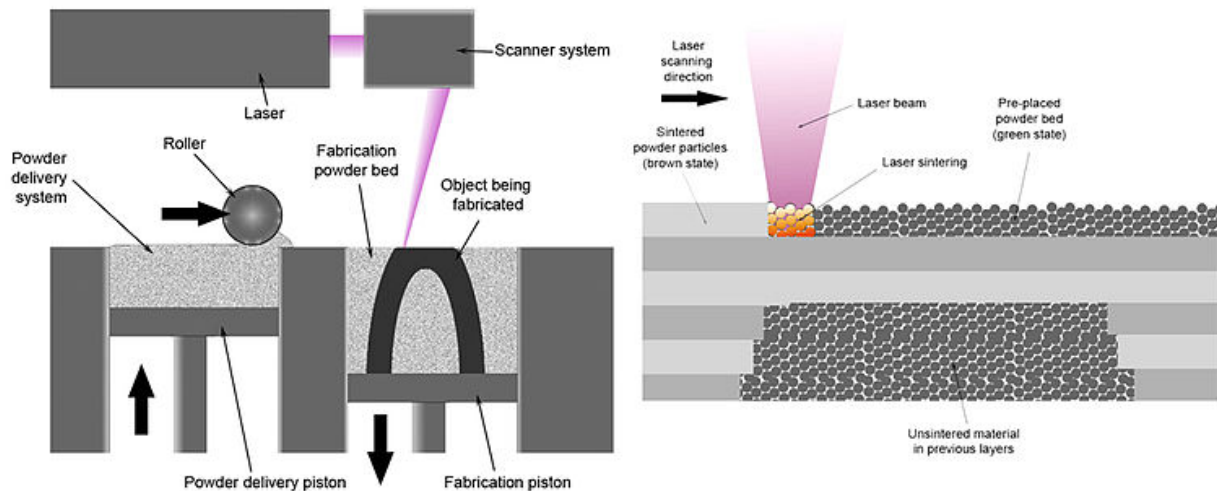


Figura 9: Tecnologia SLS [17]

La tecnologia SLS consente l'impiego di una varietà di materiali che vanno dal nylon, al vetro e alla ceramica, all'alluminio, all'argento e persino all'acciaio. Tuttavia, alcuni di essi, come la ceramica, non sono sinterizzati al laser. Un legante, in questo caso, viene utilizzato per incollare le parti. In questo caso parliamo di "Powder & Binder-based 3D printing".

In questo caso un recoater (o rullo) deposita un sottile strato di polvere su una piattaforma. Una testina di stampa speciale (in sostituzione del laser) posiziona un agente legante in punti specifici, stampando uno strato sottile del modello che è in grado di legarsi agli strati successivi. Questo processo viene quindi ripetuto più e più volte fino a quando il modello non è completo.

Dal momento che il prototipo è stato semplicemente "incollato", sarà necessaria una fase di post-lavorazione. I passaggi specifici di finitura dipendono in larga misura dal materiale impiegato: i modelli multicolore vengono immersi nella super colla, le stampe in ceramica vengono messe in un forno di essiccazione, gli oggetti in acciaio e acciaio inossidabile ad alta definizione vengono posti in un forno per la fusione e caricati con polvere di bronzo per aumentarne la resistenza [18].

I campi di applicazione della tecnologia SLS variano dal settore automobilistico a quello dei beni di consumo. Nel caso delle industrie commerciali la tecnologia SLS viene impiegata nella fase di sviluppo del prodotto e nella prototipazione rapida, nonché nella produzione a ciclo limitato di parti ad uso finale, come ad esempio la costruzione di prototipi per componenti di aeromobili. Questo rappresenta un grande vantaggio per le aziende, che produrranno in volumi limitati, in quanto le compagnie aeree utilizzano gli aeromobili per

periodi di tempo prolungati. Non è economicamente conveniente per le case di produzione costruire stampi fisici per parti di aeroplani. Questi stampi sarebbero troppo costosi da fabbricare e mantenere per lunghi periodi di tempo evitando che siano danneggiati o corrosi [19]. Pertanto, la tecnologia SLS è perfetta per la produzione di piccoli lotti.

Ancora più interessante è il fatto che la SLA sia stata lentamente introdotta nel settore dei beni di consumo, in particolare in quello della produzione di scarpe. Secondo le aziende produttrici, l'uso del nylon sinterizzato dalla SLS può produrre un modello di scarpa con un peso ridotto, e con una ridotta customizzazione, riuscendo tuttavia ad adattare la scarpa alle esigenze del cliente [20].



Figura 10: Sagoma di scarpa realizzata con SLS [21]

Se si riuscisse a fare lo stesso con il titanio si vi sarebbero un'infinità di opportunità per le industrie militari, aerospaziali, mediche e di altro tipo che sperano di sfruttare la leggerezza, forza e la resistenza alla corrosione del titanio. Gran parte dell'attività iniziale della stampa 3D ha utilizzato la plastica e il passaggio dalla plastica ai metalli di tutti i tipi è il prossimo passo.

2.2.2. Vantaggi e Svantaggi

Uno dei vantaggi più evidenti della Sinterizzazione Laser Selettiva, è la mancata necessità di fare uso di strutture di supporto, in quanto essa è completamente autoportante. Consente quindi di costruire parti all'interno di altre parti in un processo chiamato nesting. Ciò comporta due cose: una riduzione dei costi del materiale che sarebbe invece impiegato nella stampa delle strutture di supporto, come nel caso della tecnologia FDM; la possibilità di gestire con più facilità geometrie ad alta complessità. Alcuni prodotti sono così complessi che senza questa tecnologia sarebbe molto difficile produrli.

In generale, la SLS è considerata la tecnologia di stampa 3D più veloce, sia per la stampa di prototipi funzionali durevoli che di parti destinate al consumatore finale. La durabilità è, inoltre, supportata dall'uso di materiali resistenti come il nylon, che consente anche una certa libertà nella funzionalità della stampa 3D finale. Inoltre, grazie alle sue eccellenti proprietà meccaniche, il materiale utilizzato nella SLS è spesso un valido sostituto della tipica plastica per stampaggio a iniezione.

Allo stesso tempo, la tecnologia SLS produce parti considerate tra le più forti e rigide, con una buona resistenza chimica. Parti complesse con componenti interne o canali, possono essere costruite senza correre il rischio che del materiale rimanga incastrato, o che la superficie del prototipo sia danneggiata a seguito della rimozione del supporto.

La precisione è un altro importante vantaggio della tecnologia SLS. Il risultato finale è sempre ad alta precisione. Il processo di stampa è più rapido paragonato alle tecnologie già analizzate. Grazie alla scalabilità del software è possibile realizzare la stampa di un singolo oggetto o di dozzine di pezzi con facilità. Di solito i prototipi vengono spediti in un lasso di tempo che va da 1 a 4 giorni, garantendo alle aziende velocità sul mercato.

Tuttavia, i prodotti stampati tramite SLS presentano una certa porosità sulla superficie, richiedendo una fase di post lavorazione, come nel caso della Modellazione a Deposizione Fusa.

2.3. STEREOLOGRAFIA (SLA)

2.3.1. Processo, Materiali, Aree di applicazione

La stereolitografia (SLA) è un processo basato sulla fotopolimerizzazione, strato dopo strato, di una resina liquida, sensibile alla radiazione ultravioletta emessa da una sorgente laser. È una delle tecnologie di stampa 3D più datate, ma viene largamente utilizzata ancora oggi.

Il processo prevede l'uso di un macchinario chiamato "apparato stereo litografico" che converte la plastica liquida in oggetti 3D solidi. Dopo ogni strato, il serbatoio di resina si distacca dal piano di lavoro e rilascia il materiale indurito. La piattaforma di costruzione si sposta di un livello che va dai 25 ai 200 micron, secondo lo spessore del livello scelto, al fine di favorire la solidificazione dello strato successivo. Il prototipo ultimato appare a testa in giù, e per questo parliamo di stereolitografia inversa.

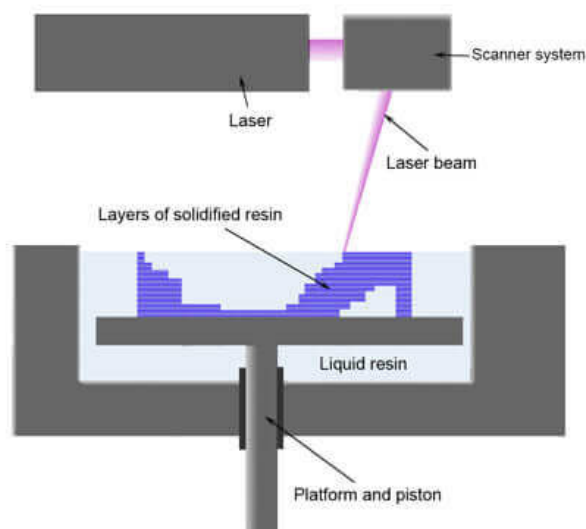


Figura 11: Componenti di una stampante stereolitografica [22]

La stereolitografia permette di scegliere tra una vasta gamma di materiali che possono essere sintetizzate in tre categorie. La prima è rappresentata dalle resine verniciabili. In questo caso, il processo si svolge all'interno di un grande serbatoio e ha inizio quando uno strato di polimero liquido viene distribuito su una piattaforma. Un laser UV computerizzato traccia il primo strato che subito si indurisce. La piattaforma si abbassa, e lo strato successivo viene tracciato su quello precedente. L'operazione si ripete fino al completamento del modello. Alla fine del processo, il modello viene sollevato dal serbatoio e il liquido in eccesso scorre via. I supporti vengono rimossi manualmente.

La seconda e la terza categoria sono rappresentate dalla resina trasparente e la resina grigia. Che si tratti di una lente di ingrandimento, di una guida d'onda, di un meccanismo trasparente o di un qualsiasi altro oggetto decorativo, la resina trasparente garantisce sempre ottimi risultati. Proprio come nel caso delle resine traslucide, aggiungendo delle luci all'oggetto realizzato non sarà difficile catturare l'attenzione.

Aggiungendo dei pigmenti di colore prima della stampa, sarà possibile ottenere degli oggetti colorati dall'aspetto molto accattivante. Il grado di trasparenza varia da traslucido a cristallino. Quest'ultimo normalmente viene realizzato solo se richiesto. La resina trasparente garantisce un'ottima qualità di superficie che si presenta liscia. L'effetto ruvido dovuto alla stampa può essere eliminato mediante carteggiatura. Ogni modello viene infine ricoperto da una vernice trasparente per prevenirne lo scolorimento.

La superficie non lavorata di un prototipo in resina trasparente viene definita finitura di base. Questa è normalmente più liscia rispetto a quella dei prototipi in polvere. Tuttavia questo tipo di materiale richiede l'utilizzo di strutture di supporto, che vengono rimosse prima della fase di rifinitura, e pertanto di materiale aggiuntivo.

Il tipo di superficie dipende in larga scala dal materiale e dalla tecnologia impiegati. Con una finitura di base il prototipo potrebbe risultare "grezzo". Di contro, mantenere la superficie naturale costituisce l'opzione più economica. Il numero di passaggi di post-lavorazione quindi, determina anche il costo e la qualità del modello.

Tuttavia, la resina trasparente non risulta limpida al 100%. I modelli con spessore superiore a 2cm presenteranno un colore tendente al blu. Per ottenere una finitura completamente trasparente, si ricorre ad una vernice incolore.

La resina grigia, invece, è quella che meglio si presta alla realizzazione di modelli visivi di qualità, ma con funzionalità limitata. Rispetto ai materiali già menzionati essa presenta una superficie di gran lunga più liscia. Di colore grigio avio, risulta "lussuosa" al tatto, ed ha una resistenza meccanica media. La libertà nella progettazione è limitata a causa delle strutture di supporto richieste dal processo di stampa.

I prototipi realizzati in resina grigia vengono generalmente utilizzati come modelli da esposizione. I reparti di progettazione e meccanica li utilizzano come prototipi visivi durante le presentazioni, ma questo materiale si è rivelato essere funzionale anche per la creazione di modellini di action figures.

La differenza tra la resina trasparente e la resina grigia risiede nel risultato che si vuole ottenere. La resina grigia, ad esempio, ha un'ottima resistenza ed un'elevata precisione nei dettagli. La resina verniciabile, invece, fornisce una maggiore libertà nella scelta dei colori, ma, necessitando di strutture di supporto, pone dei limiti nella scelta del design, contrariamente a quanto accade con le resine grigie. Di seguito una tabella riassuntiva sulle proprietà delle differenti tipologie di resina.

Name	Impact strength	Stiffness	Humidity resistance	Heat resistance	Durability	Appearance	Mould Making	Details	Description	Applications
Transparent resin	Good	Good	Excellent	Sensitive	Good	Optical clear with a light blue tinge	Excellent	Moderate	Tough Impact resistant High elongation at break Excellent surface quality	Functional prototypes Wind tunnel testing Water flow analysis High-end finished models ABS-like parts
Paintable resin	Good	Good	Good	Good	Good	White	Excellent	Good	Tough Good surface quality Good thermal properties Durable	Impellers Duct work and connectors Automotive housings Dashboard assemblies High-end finished models
Prime Gray	Excellent	Good	Good	Good	Good	Gray	Good	Excellent	Tough Impact resistant High elongation at break Excellent surface quality	Tough enclosures Snap-fit assemblies Replacing CNC machined parts High-end finished models

Figura 12: Resine e relative proprietà [23]

I campi di applicazione della stereolitografia sono molteplici. Tra quelli che più ne fanno uso i settori automobilistico, aerospaziale, medico e dei beni di consumo. È molto diffusa anche in ambito domestico: è possibile realizzare oggetti 3D partendo dal proprio modello in maniera facile e veloce. Consente di creare prototipi di parti anatomiche, molto utili in classe se si desidera fornire una panoramica adeguata sulle funzionalità del corpo umano. La stereolitografia sta quindi cambiando il modo di insegnare e può essere sfruttata per materie tecniche come la scienza e l'ingegneria, ma anche per le arti e la matematica.

2.3.2. Vantaggi e Svantaggi

La Stereolitografia è considerata una delle migliori tecnologie di stampa 3D presenti oggi sul mercato. Uno dei maggiori punti di forza riguarda l'alta risoluzione dei dettagli. Permette infatti di stampare oggetti dalle geometrie molto complesse senza comprometterne la qualità. Una delle massime prerogative è la precisione, pertanto la tecnologia SLA è la scelta più azzeccata nel caso in cui forma, adattamento e assemblaggio siano la priorità. Tale precisione è dovuta all'utilizzo delle resine, ovvero, i cosiddetti materiali fotopolimerici.

Questi ultimi, dalla consistenza liquida, vengono induriti per mezzo di un raggio laser; offrono una certa libertà in termini di colore, grado di opacità e rigidità, garantendo tuttavia un'eccellente qualità della superficie. Nonostante la presenza di tecnologie più rapide e recenti sul mercato, la stereolitografia è in grado di funzionare correttamente e in tempi ragionevoli, consentendo di risparmiare tempo anche su quelle parti che richiedono una precisione elevata. I prototipi possono pertanto essere realizzati senza troppe difficoltà rimanendo fedeli al progetto iniziale.

Un ulteriore vantaggio derivato dell'uso della stereolitografia e dei materiali in resina, è la personalizzazione, soprattutto per quanto riguarda la scelta del colore. Uno dei metodi più utilizzati è la verniciatura spray. Le varietà disponibili sono quattro: extra opaco, opaco, satinato e lucido, ognuno con un fattore di lucentezza diverso. Più alto è il fattore di lucentezza, più brillante sarà il modello. Quanto più sarà ampia la superficie su cui la vernice viene applicata tanto più sarà visibile la differenza tra i diversi gradi di lucentezza. E' possibile svolgere le operazioni di verniciatura a casa propria o affidarle a degli esperti in base alle proprie esigenze.

Uno degli svantaggi più grandi è invece rappresentato dai costi, piuttosto elevati. Nonostante le stampanti vengano considerate più o meno accessibili, i materiali fotopolimerici risultano molto costosi, rendendo l'uso di questa tecnologia poco abbordabile. Inoltre, anche se sono disponibili in diversi colori, c'è ancora una scelta limitata di fotopolimeri.

Inoltre, data l'irritabilità e la tossicità delle resine liquide, si consiglia sempre di prendere le dovute precauzioni e di fare uso delle attrezzature e degli strumenti più adeguati. Tra gli altri svantaggi, le stampe stereolitografiche richiedono normalmente una fase di pulitura, con conseguente impiego di tempo e sforzo non indifferenti. Per raggiungere un livello di qualità ottimale è necessario rifinire il prototipo in fase di post-lavorazione. Il livello di qualità desiderato e la scelta del materiale comporteranno un numero maggiore o minore di passaggi.

Contrariamente alla Sinterizzazione Laser Selettiva, tecnologia molto simile ad essa, la Stereolitografia richiede l'utilizzo di strutture di supporto, e di conseguenza una quantità maggiore di materiale, che rende tale tecnologia più costosa.

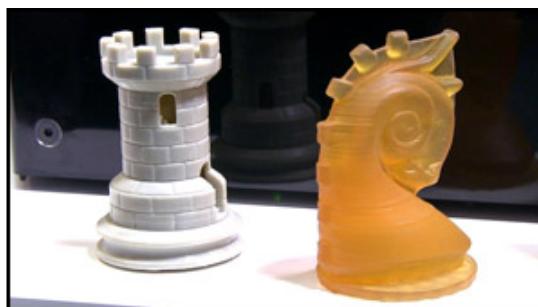


Figura 13: Stampe in resina [24]

3. IL PROCESSO PRODUTTIVO

In questo capitolo, illustreremo i passaggi salienti del processo di produzione di un prototipo in 3D, partendo dal modello digitale fino all'ottenimento di una vera e propria stampa tridimensionale.

È importante ricordare che non esiste un solo processo di stampa 3D. Quanto spiegato in questa guida rappresenta un limitato numero di passaggi che dovranno poi essere adattati al tipo di prototipo, alla tecnologia impiegata, al tipo di stampante e al software utilizzato. Inoltre, il processo descritto qui di seguito si focalizza maggiormente sulla Modellazione a Deposizione Fusa (FDM)

Le principali fasi produttive sono le seguenti:



Schema 2: Fasi di produzione [25]

I suggerimenti forniti per ciascuna delle fasi del procedimento sono indicativi e da considerare generici, pertanto non devono essere seguiti alla lettera. L'esperienza, le caratteristiche specifiche del modello, il macchinario impiegato ecc., sono fattori incisivi. Colui che si appresta alla stampa 3D per la prima volta dovrà sicuramente effettuare più tentativi prima di raggiungere dei risultati soddisfacenti.

3.1. Ottenere il modello digitale:

Vi sono tre opzioni per ottenere un modello digitale:

- **Elaborare il modello utilizzando un software CAD:** con questa prima opzione, è possibile progettare il proprio modello digitale utilizzando un software CAD (Computer Aided Design). Ve ne sono di numerosi e non esiste un'opzione migliore. Molto dipende dall'utente e dalla sua dimestichezza con il software.

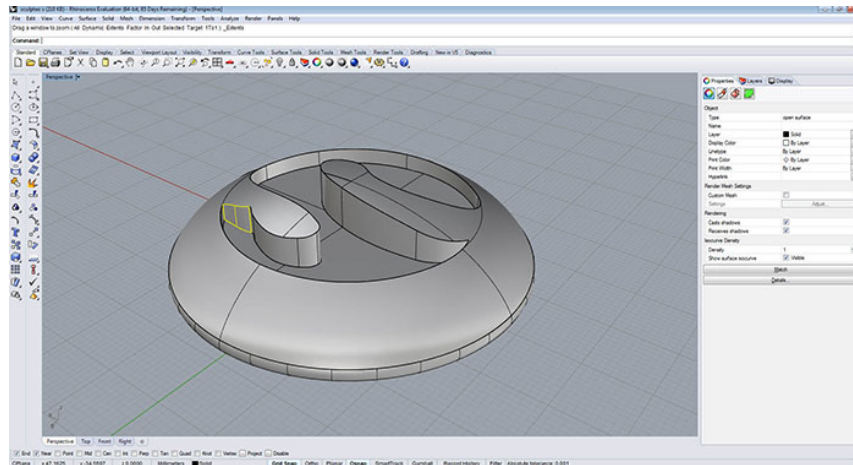


Figura 14: Modello realizzato con Rhinoceros. [26]

- **Ottenere la geometria del modello attraverso uno scanner 3D o Reverse Engineering:** Uno scanner 3D consente di ottenere una copia digitale della geometria di un oggetto reale. Per farlo è necessario avere una certa competenza ed esperienza, in quanto non si tratta di un procedimento semplice. Inoltre, esistono numerosi tipi di scanner 3D, tutti piuttosto costosi.
 Il processo di Reverse Engineering (o ingegneria inversa) viene utilizzato per la riproduzione, il perfezionamento o la customizzazione di oggetti reali e l'integrazione di superfici complesse su pezzi modellati in 3D.
 Il processo è il seguente: Per prima cosa è necessario "catturare" la geometria dell'oggetto tramite scansione. Il modello digitale ottenuto viene modificato e adattato alla stampa 3D. Vale a dire, se si ottiene una nuvola di punti dalla scansione 3D, questa deve essere "cucita su misura" e convertita in una mesh poligonale (talvolta lo scanner lo fa automaticamente) e infine esportata (o convertita) in un corpo solido. A questo punto si può procedere con la stampa.

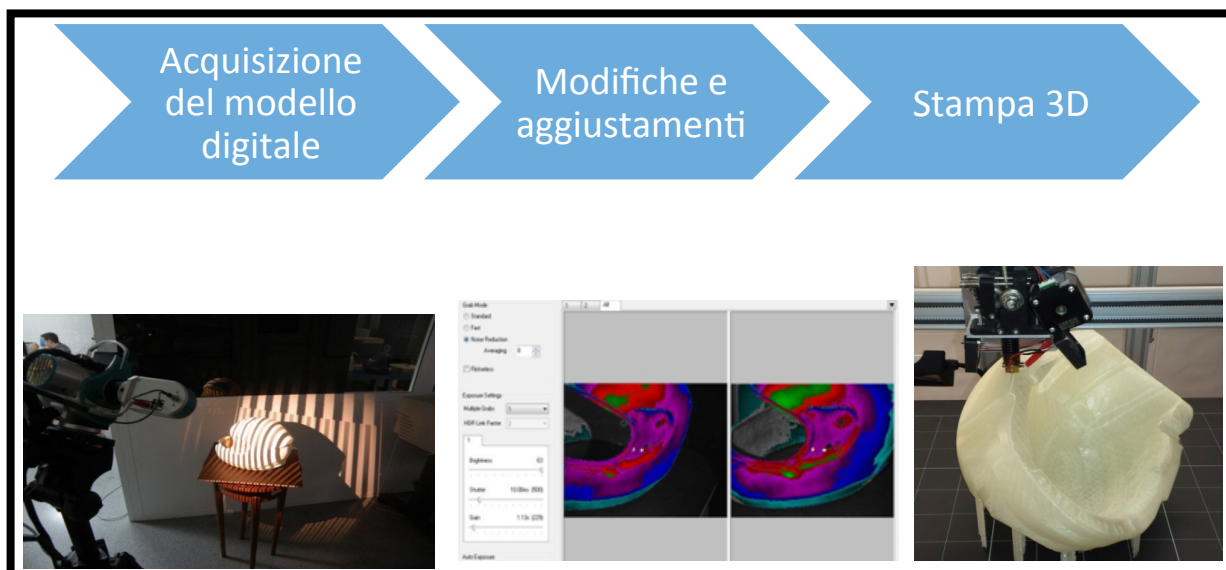


Figura 15: Processo di ingegneria inversa. [27]

- Scaricare il modello da una repository online o rivolgersi ad un esperto:** Se non si è esperti di progettazione 3D, o non si possiede la strumentazione necessaria, è possibile scaricare il modello digitale del prototipo desiderato da una repository online. In alternativa ci si può rivolgere a qualcuno in grado di farlo al posto nostro. Alcune repository (ad esempio: Thingiverse) forniscono modelli digitali in 3D già pronti per la stampa. Altri invece (ad esempio: GrabCAD), contengono modelli digitali generici che non sono subito pronti per l'uso.



Figura 16: Esempio di modelli scaricabili da Thingiverse. [28]

Indipendentemente dalla modalità con cui si ottiene il modello digitale, è importante che questo sia pensato appositamente per la stampa 3D. Non tutti i modelli, che siano stati elaborati tramite software CAD, scansionati, o scaricati da Internet, sono adatti alla stampa 3D. Vi sono infatti numerosi fattori di cui bisogna tenere conto: eventuali spazi vuoti interni, eventuali sporgenze, le dimensioni, il livello di precisione previsto, la definizione dei dettagli, se si tratta di un modello a tenuta stagna ecc.

Ecco un video tutorial che contiene una serie di suggerimenti di progettazione CAD per la stampa 3D, a seconda del materiale selezionato:

<https://www.sculpteo.com/en/Materiali/Materiali-design-guidelines/>

Al link seguente è invece possibile trovare informazioni più dettagliate e ulteriori video tutorial su come elaborare un modello digitale attraverso vari software CAD:

<https://www.sculpteo.com/en/tutorial/>

3.2. Esportare e modificare un file STL:

Vi è una vasta gamma di formati o tipologie di file a disposizione della progettazione e della stampa 3D. Alcuni di essi sono pensati per la progettazione e la scansione, altri sono associati alla stampa, come ad esempio: STL, OBJ, PLY o FBX, per citarne alcuni. Alcuni fattori quali: il modello realizzato, il software, le funzioni specifiche della stampante, ecc., determineranno il formato più adatto da utilizzare. Qui di seguito ci limiteremo a dare una spiegazione su come esportare e utilizzare un file in formato STL.

Una volta terminata la fase di progettazione, è necessario convertire il file in formato ". stl". Se il modello è stato scaricato da una repository, è probabile che la conversione avvenga automaticamente. Tuttavia, se è stato utilizzato un software CAD gratuito o commerciale, sarà necessario eseguirla manualmente.

Innanzitutto, ecco cosa è un formato STL e come funziona:

La sigla STL sta per "Standard Triangle Language". Ovvero, questo formato utilizza piccoli triangoli collegati tra loro per ricreare la superficie del modello solido. Il livello di complessità del modello determina la quantità di triangoli necessari e la loro dimensione. A sua volta, la quantità di triangoli determina la dimensione del file. Ogni triangolo è definito da un insieme di parametri, quali il vettore normale, la faccia del triangolo e le coordinate (x, y, z) di ciascun vertice.

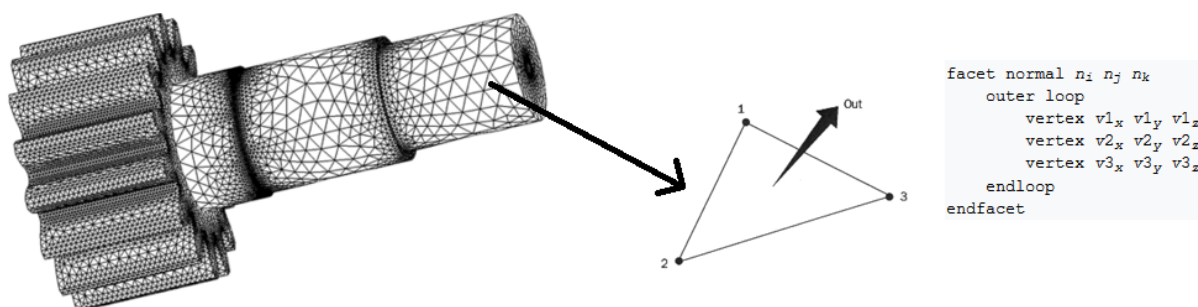


Figura 17: Come funziona il file STL. [29]

Di solito, esportare un progetto CAD in formato STL è piuttosto semplice. Basta andare sul menu del software utilizzato e fare clic su "Salva come ..." o su "Esporta" e scegliere STL. A seconda del software, è necessario selezionare alcune caratteristiche quali la precisione e la tolleranza. Di seguito vi mostriamo i passi da seguire per alcuni programmi CAD:

Software used	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Catia	1. Select STL Command	2. Maximum Sag = .0003" or .0125 mm	3. Select part(s) to be converted and Click YES	4. Select Export	5. Type filename and output the STL
Inventor	1. Select: Save Copy As	2. Select: STL	3. Select Options Menu: Set To High	4. Enter Filename	5. Save
ProEngineer	1. File / Export / Model	2. Choose STL	3. Chord Height: .0005" or .0125 mm	4. Angle Control: .5	5. Click: APPLY
Rhino	1. FILE / SAVE AS	2. Select File Type: STL	3. Enter a File Name and Save	4. Select Binary File	
SolidEdge	1. FILE / SAVE AS	2. Set Save as Type: STL then select Options	3. Set: Conversion Tolerance: .0005" or .0125mm	4. Set Surface Plane to: 45.00 (degrees)	5. Save
SolidWorks	1. FILE / SAVE AS	2. SAVE AS TYPE / Select: STL	3. Select:Options	4. Deviation Tolerance: .0004" and Angle Tolerance: 7.75 deg	5. Save
Unigraphics	1. FILE / EXPORT / Rapid Prototyping	2. Triangle Tolerance: .0005" or .0125 mm	3. Adjacency Tolerance: 0.12	4. Click: APPLY	5. Set Auto Normal Gen to: ON, Normal Display to: OFF, Triangle Display to: ON

Figura 18: Esportare un file STL con diversi software. [30]

Può capitare che si verifichino alcuni problemi durante la conversione in STL, sia perché il modello non è stato pensato per la stampa 3D, o perché non è stato realizzato correttamente in fase di elaborazione. Di conseguenza, il file esportato potrebbe contenere alcuni errori.

Questi errori possono essere di vario tipo: buchi o spazi vuoti, triangoli invertiti (ovvero con i vettori normali posizionati al contrario), facce o triangoli doppi, o che si intersecano, punti o facce singolare (che fuoriescono dal modello), ecc.

La riparazione del modello digitale verrà spiegata insieme alla fase successiva del processo produttivo, in quanto strettamente connessa all'implementazione dell'analisi del modello.

3.3. Test di verifica, orientamento, distribuzione e G-code:

Questa fase del processo di stampa 3D riguarda la preparazione dei pezzi o dei modelli digitali (precedentemente esportati in STL) per la stampa 3D e ha le seguenti fasi:

- Analisi del modello: spessore, fori, stabilità, angoli, mesh triangolare, ecc.
- Inserimento delle strutture di supporto (manuale o automatica).
- Scelta dell'infill (o riempimento), in termini di percentuale e forma.
- Posizionamento del modello sulla superficie (o letto) di stampa e selezione l'orientamento più appropriato.
- Generazione del G-code

3.3.1. Analisi del modello:

L'analisi di solito è necessaria quando i pezzi sono relativamente complessi, o quando l'origine dei pezzi non è nota, o può essere fatta solo se si desidera essere completamente sicuri che il pezzo sia adatto alla stampa 3D. Inoltre, una buona analisi può rilevare errori nella mesh triangolare sorti dalla conversione in STL.

Queste analisi possono essere implementate da alcuni software, che sono utili anche per altri scopi. Analisi implementata di:

- *Spessore*: lo spessore consigliato dipende dal tipo di stampante (e dalla tecnologia impiegata). Alcune stampanti consentono uno spessore maggiore rispetto ad altre. Cercare la stampante più adatta e informarsi sullo spessore consentito dovrebbe essere sufficiente. In generale, per le stampanti FDM, si considera appropriato uno spessore di circa 1 millimetro. Questo parametro non deve essere confuso con lo spessore dello strato. Il parametro cui ci si riferisce è lo spessore dell'oggetto stesso. È bene eseguire quest'analisi se si ritiene che il modello ne abbia bisogno.

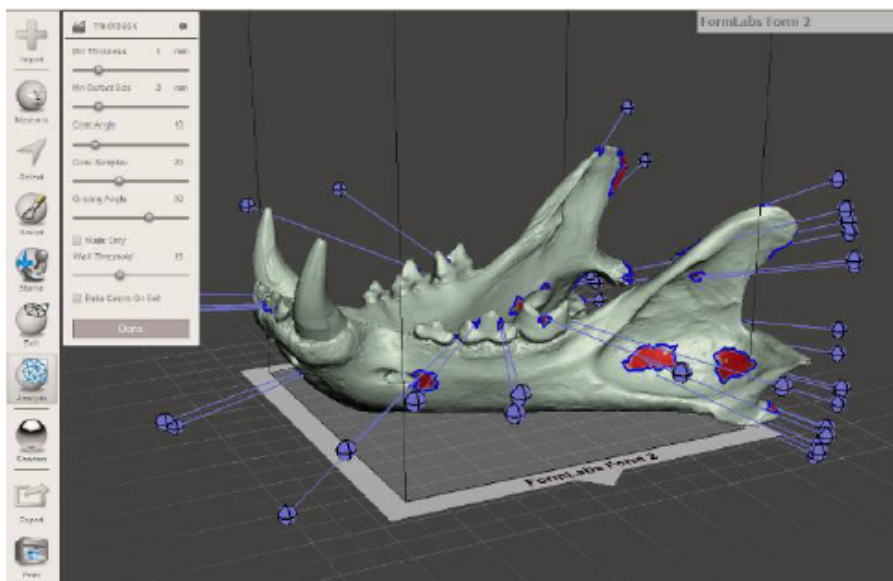


Figura 19: Analisi dello spessore (1 mm) implementato con Meshmixer. [31]

- *Fori o spazi vuoti*: il modello che si desidera stampare deve essere perfettamente chiuso o meglio detto: deve essere a tenuta stagna. Ciò significa che la mesh triangolare non deve presentare buchi o spazi vuoti, non deve avere vertici o punti triangolari disgiunti; ognuno di essi deve essere collegato ad altri triangoli. Si consiglia vivamente di eseguire sempre questo test, in quanto potrebbero esserci errori difficili da individuare.
- *Angoli e sporgenze*: con questa analisi è possibile scoprire, a seconda della tecnologia e della macchina selezionate, se il modello necessiterà di strutture di supporto. Generalmente, per le stampanti FDM l'angolo di inclinazione minimo consentito è di 45 gradi. Oltre i 45 gradi sarà necessario includere delle strutture di supporto. Questo tipo di analisi non deve sempre essere effettuata manualmente, in quanto numerosi programmi sono in grado di stabilire la quantità di strutture di supporto necessaria in fase di pre-stampa.

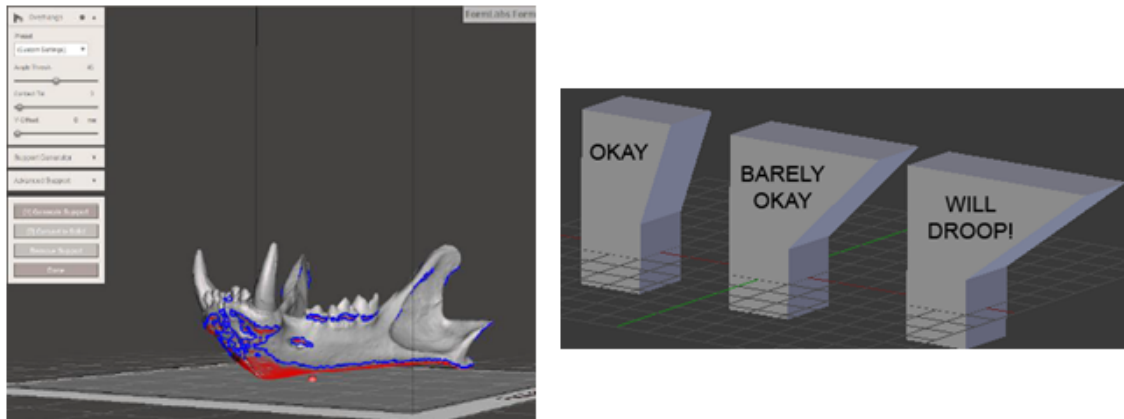


Figura 20: Analisi dell'angolo. [32]

- *Altro*: a seconda del software utilizzato, sarà possibile eseguire una quantità diversa di analisi. Inoltre, alcuni programmi sono in grado di effettuare un'analisi automatica e individuare svariati problemi.

Per concludere, molti dei programmi utilizzati per l'analisi, consentono non soltanto di rilevare errori o problemi, ma anche di riparare automaticamente il modello.

3.3.2. Strutture di supporto:

Molte delle tecnologie di stampa 3D (soprattutto quelle che si servono di filamenti di plastica) necessitano dell'uso di strutture di supporto, le quali vengono inserite laddove vi siano spazi vuoti o sporgenze.

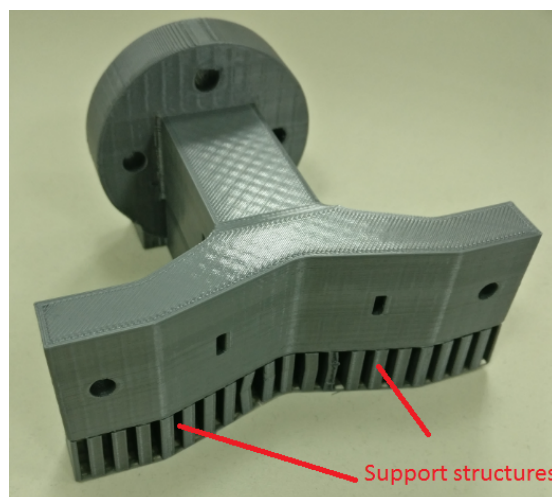


Figura 21: Strutture di supporto. [33]

Le strutture di supporto sono solitamente realizzate con lo stesso materiale del prototipo, sebbene vi siano stampanti 3D in grado di utilizzare due materiali contemporaneamente: uno per il prodotto e un altro, solitamente solubile, per le strutture di supporto.

Poiché l'unica funzione delle strutture di supporto è quella di sorreggere i primi strati "sospesi" del modello, vengono costruite con una quantità inferiore di materiale e risultano essere più leggere. Inoltre, una volta rimosse non lasceranno tracce sul pezzo.

Gran parte dei software, sia quelli di analisi che quelli propri della stampante, consentono di scegliere tra due opzioni: realizzare un progetto delle strutture di supporto manualmente, o lasciare che queste strutture vengano calcolate e inserite automaticamente dal software stesso. Se non si ha abbastanza esperienza nella stampa 3D è consigliabile scegliere la seconda opzione, anche se questo può comportare un uso non ottimale del materiale impiegato. Ad ogni modo, ogni software offre design differenti per le strutture di supporto.

Una guida utile su come calcolare, progettare ed inserire supporti si trova al link seguente: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-Panoramica-generale>. Inoltre, questa guida è adattabile alle diverse tecnologie (FDM, SLA, PolyJet, SLS ...).

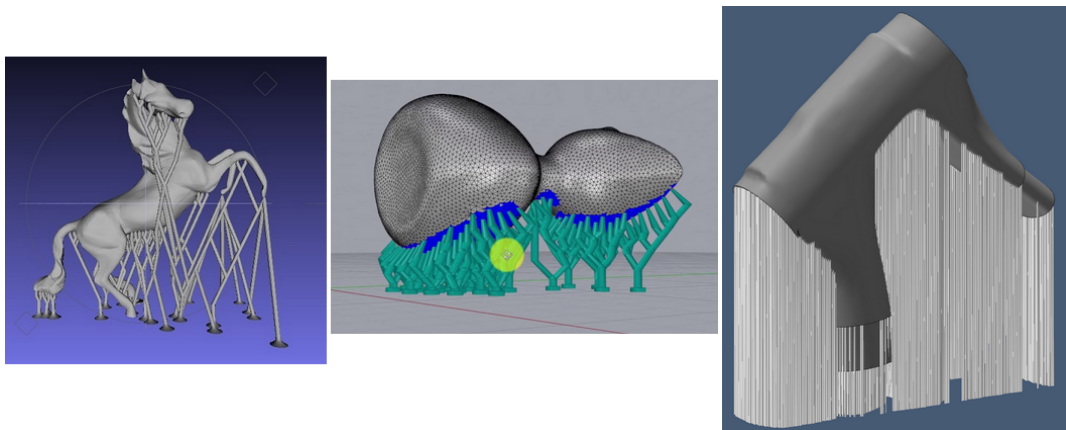


Figura 5: Differenti tipologie di strutture di supporto. [34]

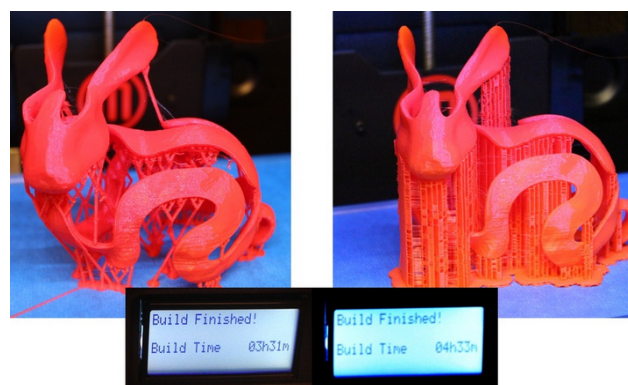


Figura 6: Differenza tra struttura di supporto ottimizzata (sinistra) e non ottimizzata (destra). È possibile visualizzare la differenza nei tempi di stampa. [35]

3.3.3. Riempimento:

Questo passaggio può essere implementato prima di inserire le strutture di supporto.

Quando parliamo di riempimento ci riferiamo alla struttura interna dell'oggetto. Ad esempio, se pensiamo ad un cubo, le sei facce esterne verranno stampate integralmente e con un certo spessore, la parte interna, però, non verrà riempita per intero; sarà necessario scegliere la percentuale di riempimento e persino la forma geometrica dello stesso. Ecco alcuni esempi:

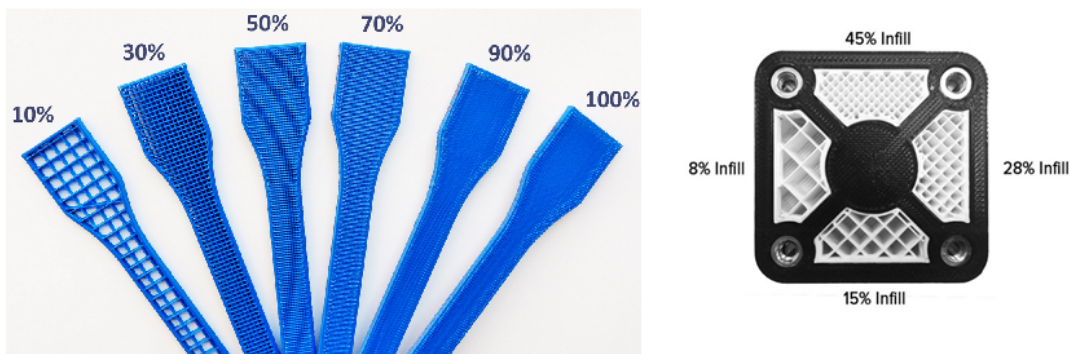


Figura 7: Differenti percentuali di riempimento. [36]

Nella figura qui sopra vediamo due modelli con diverse percentuali di riempimento. La percentuale verrà scelta (nel software di pre-stampa) in base al peso e al livello di resistenza previsti per il prodotto finale.

Si può anche scegliere il motivo geometrico del riempimento. Alcuni di questi sono più resistenti di altri, ma generalmente è possibile selezionare il modello di default del software.

La percentuale e la forma del riempimento saranno scelte in base a diversi aspetti: peso totale del pezzo, materiale utilizzato, resistenza da raggiungere, tempo di stampa e decorazioni (ove previste). In generale, maggiore è la percentuale di riempimento, maggiore sarà la resistenza, ma più lunghi saranno i tempi di stampa. In linea di massima è sufficiente un riempimento di circa il 10-15-20%.

Ecco alcuni esempi sia su software che sul prototipo concreto:

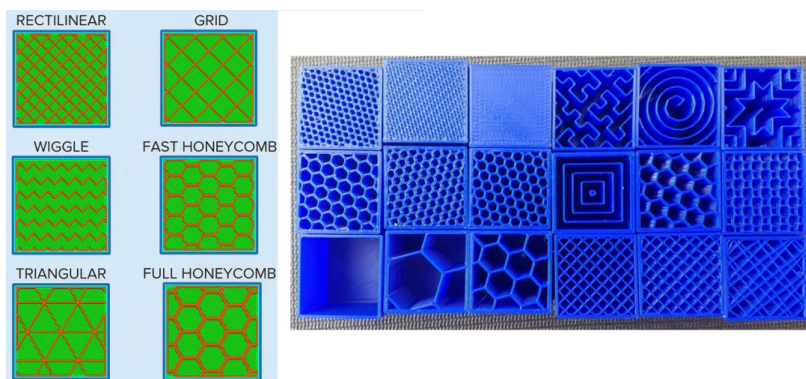


Figura 8: Differenti modelli di riempimento. [37]

3.3.4. Posizionamento e orientamento

Decidere la posizione e l'orientamento del prototipo sulla superficie di stampa è una delle fasi più critiche dell'intero processo. Tale decisione avrà un grande impatto sia sulla qualità che sulle proprietà del pezzo finito.

Ogni tecnologia di stampa (FDM, SLA, ecc.) comporterà un diverso posizionamento. Qui di seguito illustreremo come posizionare un prototipo utilizzando la tecnologia FDM.

Utilizzare la quantità minima di materiale (nel più breve tempo possibile) è un criteri che maggiormente influenza la scelta dell'orientamento. Ciò si ottiene riducendo al minimo le parti sporgenti. Di conseguenza, verrà stampato una quantità minore di strutture di supporto in un lasso di tempo inferiore. Tuttavia, quando la qualità costituisce il fattore prioritario è consigliabile scegliere determinati orientamenti, anche se risultano essere non ottimali in termini di materiale e tempo di stampa.

Alcuni suggerimenti, in generale, sono:

- Posizionare il modello al centro. Ciò ridurrà il raggio dei movimenti della testina di stampa (e di conseguenza i tempi). Inoltre, comporterà un incremento nella qualità e nella precisione, in quanto, le piattaforme di stampa sono solitamente più livellate e calibrate nella parte centrale, da cui scaturisce maggiore calore.
- Se si desidera stampare più pezzi contemporaneamente, è necessario lasciare uno spazio compreso tra i 5 - 15 mm.
- In caso di superfici curve o inclinate, se si desidera evitare l'effetto "scalino" e garantire un buon risultato in termini di qualità, sarà necessario posizionarle parallelamente al piano XY (piano orizzontale).



Figura 9: Qualità diverse di uno stesso oggetto dovute a orientamenti diversi. [38]

- Osservando l'immagine qui sopra, vediamo che, nel caso in cui il modello includa fori interni o passanti, è sufficiente posizionare il foro con l'asse perpendicolare al piano di stampa, soprattutto nei casi in cui è richiesta un'elevata qualità.
- Sezioni molto lunghe e piane, se stampate sul piano orizzontale possono subire delle deformazioni, ovvero, i bordi esterni tendono a raffreddarsi e si restringersi molto

rapidamente, arricciandosi verso l'alto. In questo caso quindi, si consiglia di posizionare la sezione più lunga in modo perpendicolare alla superficie di stampa.

- In linea di massima, la superficie superiore possiede una finitura migliore.
- I prototipi funzionali, concepiti per sopportare forze e carichi, tenderanno a scollarsi o rompersi più facilmente se le forze o i carichi seguono un orientamento perpendicolare agli strati. Qui di seguito una dimostrazione grafica:

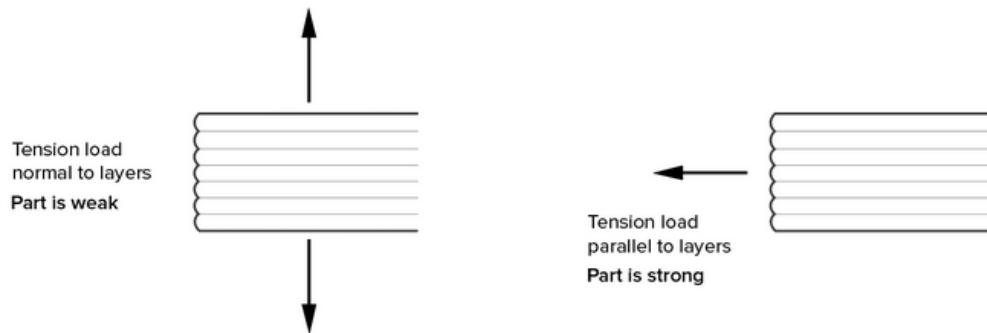


Figura 10: Carico di tensione. [39]

3.3.5. Generazione del G-Code.

Una volta completata la fase di orientamento e posizionamento, è tempo di generare ciò che è noto come G-code. Questo codice costituisce la traduzione del modello (e di tutti i parametri precedentemente impostati) in istruzioni che la macchina è in grado di comprendere e interpretare.

Prima di fare questo però, è necessario determinare **l'altezza o lo spessore dello strato**, in base al software utilizzato. Questo è un parametro molto importante, poiché avrà un grande impatto sulla qualità finale della superficie del prototipo. Un'altezza maggiore si tradurrà in una più elevata risoluzione o qualità, ma comporterà tempi di stampa più lunghi.

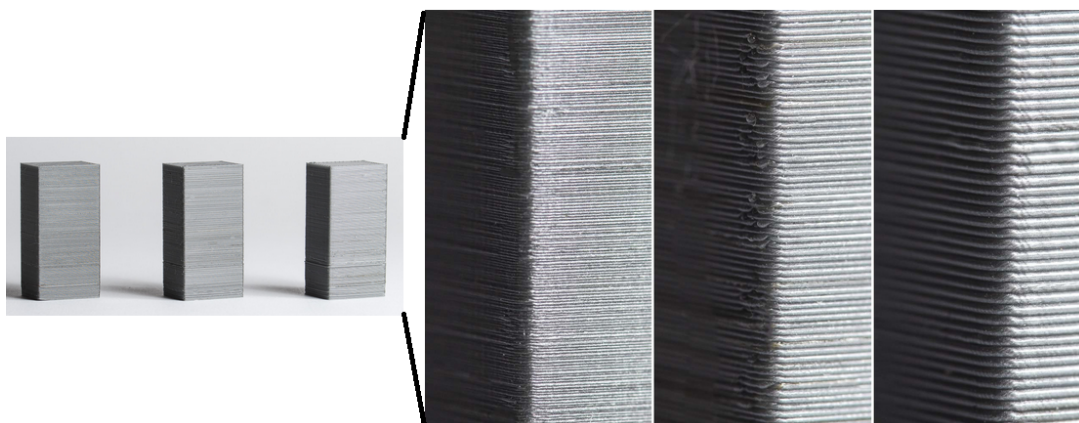


Figura 11: Differenti margini di spessore. [40]

È essenziale stabilire cosa è più importante: se il lato estetico o la rapidità e l'economicità della stampa. Talvolta, è difficile accorgersi delle differenze tra un pezzo stampato con uno spessore di 100 micron e uno con spessore di 200. Tuttavia un prototipo con spessore 100 richiederà il doppio del tempo e costi più elevati. Per questo motivo, è molto importante sapere quale sia l'uso finale di un pezzo. È anche fondamentale conoscere la quantità di curve e angoli previsti, poiché in questo caso lo spessore è più visibile.



Figura 12: Modelli con spessori diversi. [41]

In sintesi, è importante ricordare che ogni tecnologia di stampa 3D, dispone di una gamma di valori applicabili allo spessore ben specifica. Per quanto riguarda la tecnologia FDM, ad esempio, lo spessore consigliato varia tra i 50 e i 300 micron (0,05- 0,3 millimetri).

A questo è possibile generare il G-Code. Vi sono numerosi software che consentono di farlo. Alcuni di essi vengono anche utilizzati durante le fasi precedenti. In sostanza, il software suddivide il modello in sezioni orizzontali, o strati, e genera il percorso che il corpo macchina dovrà seguire, calcolando la quantità di materiale (peso e metri) e il tempo di stampa previsto.

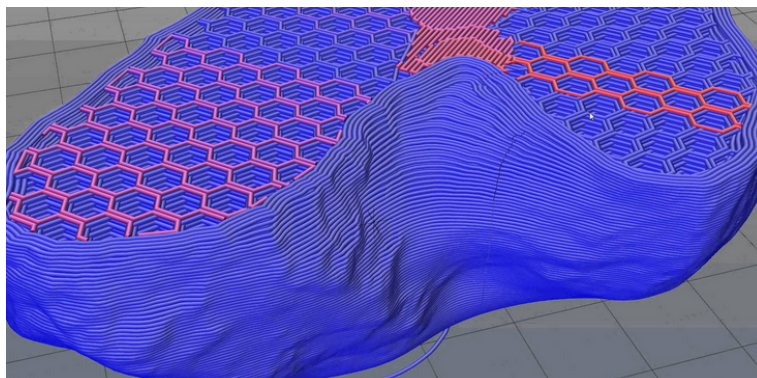


Figura 30: Strati di un modello nel dettaglio[42]

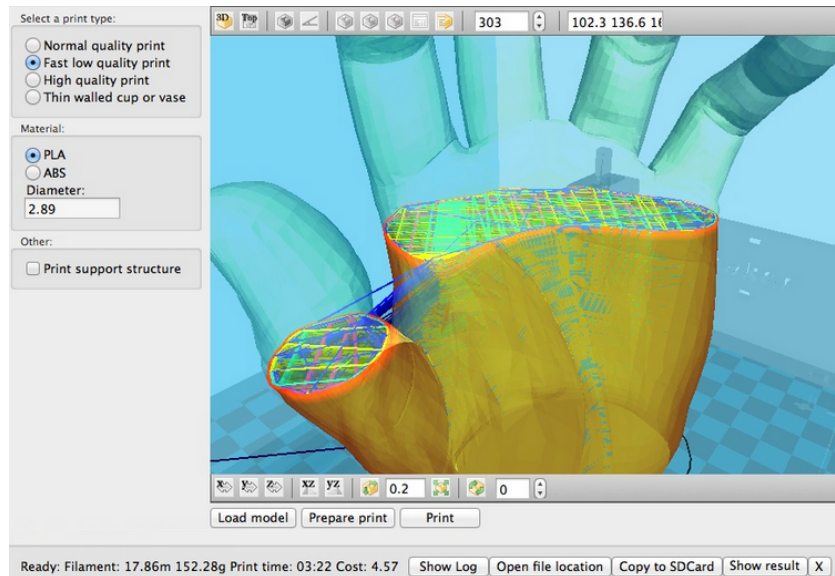


Figura 31: Strati e percorso. [43]

Una volta generato, il G-Code deve essere esportato e salvato su una scheda SD o su una pen drive. In alternativa, se il software lo consente, è possibile inviarlo direttamente alla stampante.

Per riassumere, bisogna tenere presente che molti sono i parametri suscettibili di modifica: lo spessore della parete, la velocità di stampa, la temperatura di stampa e del letto, il flusso, ecc. Ma per modificare questi parametri manualmente è necessario possedere una certa esperienza. In caso contrario si consiglia di applicare i parametri di default previsti dal software.

3.4. Stampa 3D:

Una volta ottenuto il G-Code è possibile avviare il processo di stampa. Prima di farlo però, è importante verificare alcuni parametri.

Nel caso delle stampanti FDM, è necessario verificare la temperatura del letto di stampa o della piattaforma, e quella dell'estrusore (il software o la stampante lo faranno automaticamente all'avvio della stampa). Si consiglia inoltre di utilizzare della vernice per facilitare l'estrazione del pezzo e di consultare attentamente le istruzioni per sapere come caricare il filamento sulla stampante, e conoscere altre informazioni utili.

A questo punto il G-Code viene inviato alla stampante che si metterà in funzione.

3.5. Estrazione dei pezzi:

Una volta concluso il processo di stampa, è possibile estrarre il/i pezzo/i finito/i. Ancora una volta, le modalità di estrazione variano a seconda della stampante e, in primis, della tecnologia e dei materiali impiegati.

Per quanto riguarda le stampanti FDM, i pezzi vengono spesso rimossi a mano o con l'ausilio di una spatola. Si può in alternativa fare uso di piattaforme flessibili che facilitano di molto l'estrazione. Altri metodi includono l'uso di un solvente o di filo interdentale.

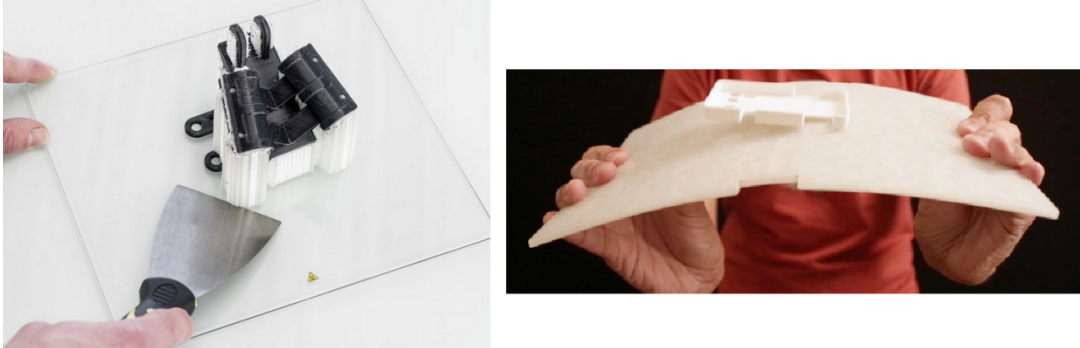


Figura 13: Estrazione. [44]

Per ulteriori informazioni sui processi di estrazione da stampante 3D FDM, consultare il seguente link: <https://all3dp.com/1/remove-3d-print-from-bed-stuck-glass/>

Per quanto riguarda le altre tecnologie di stampa 3D vi sono processi di estrazione diversi. Quelle tecnologie che si servono di vasche contenenti plastica liquida o di raggi laser (ad esempio), o quelle che usano materiali in polvere, comportano un diverso processo di estrazione:

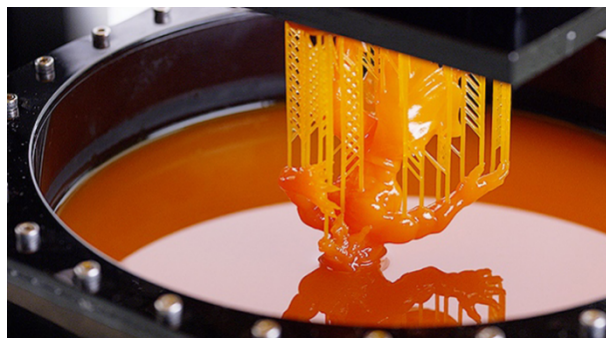


Figura 14: Processo di estrazione SLA. [45]



Figura 15: Processo di estrazione SLS. [46]

3.6. Post-lavorazione:

Molti pezzi finiti richiedono delle operazioni di rifinitura, che varia ancora una volta in base alla tecnologia impiegata e al tipo di stampante. Per alcune di esse questo passaggio è sempre necessario.

Poiché vi sono numerose tecnologie e tipologie di macchinario, procederemo alla spiegazione dei processi più comuni, e quelli più utilizzati nel caso delle stampanti FDM.

Innanzitutto, è importante sottolineare che alcuni dei pezzi stampati potrebbero non necessitare di post-lavorazione. Tutt' al più, quelli più complessi richiederanno la rimozione meccanica delle strutture di supporto.

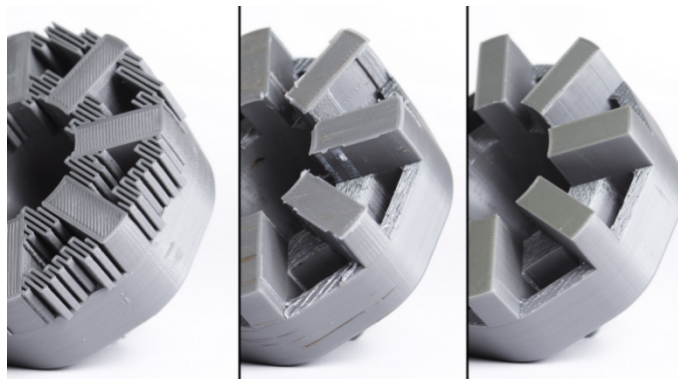


Figura 16: Processo di finitura. [47]

Vi sono numerosi processi di rifinitura e di post-lavorazione:

- *Rimozione delle strutture di supporto:* Questo può essere fatto meccanicamente, come è stato detto, o attraverso l'immersione in un solvente (anche acqua), se il materiale di stampa lo consente.



17: Processo meccanico. [48]



Figura 18: Rimozione dei supporti in materiale solubile tramite immersione. [49]

- *Sabbatura*: Viene eseguita quando le strutture di supporto sono già state rimosse. È possibile scegliere diversi gradi di levigatura.
- *Verniciatura*: per ottenere un effetto "specchio" sulla superficie è necessario lucidare il modello, che dovrà essere stato precedentemente levigato con carta abrasiva grana 2000. Una volta rimossi i residui di polvere il pezzo dovrebbe essere lucidato con un panno in microfibra e uno smalto speciale che conferirà una lucentezza duratura. Esistono anche delle levigatrici e delle lucidatrici rotorbitali.
- *Coating*: su ogni pezzo è possibile applicare una copertura o un rivestimento al fine di livellarne la superficie. In caso di verniciatura si consiglia di applicare prima uno strato di rivestimento e poi di dipingere con vernici spray, acrilici o con aerografo. Sono disponibili anche gel epossidici, coating in metallo, ecc.



Figura 19: Tipologie differenti di finitura. [50]

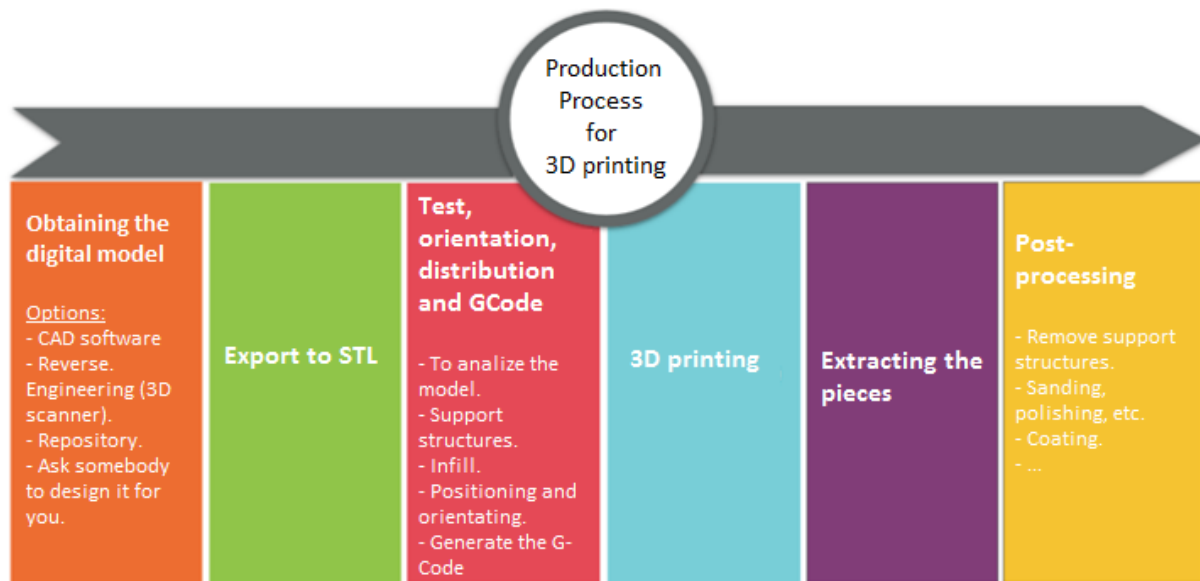
Vi sono numerosi processi di finitura, tra questi: granigliatura, levigatura con vapore di acetone ecc. Per saperne di più riguardo alle differenti procedure di post-lavorazione applicabili alla tecnologia FDM consultare il sito: [https://www.3dhubs.com/knowledge-base/Post lavorazione-fdm-printed-parts](https://www.3dhubs.com/knowledge-base/Post%20lavorazione-fdm-printed-parts)

- *Polimerizzazione in forno*: per altre tecnologie, come la stereolitografia, si può rivelare necessaria una fase di polimerizzazione in un forno a raggi ultravioletti. Questo processo è implementato al fine di migliorare le proprietà del materiale del prototipo.

Ulteriori informazioni in merito alle procedure di post lavorazione e finitura riguardanti altre tecnologie consultare i link seguenti.:

- Per SLS: [https://www.3dhubs.com/knowledge-base/Post lavorazione-sls-printed-parts](https://www.3dhubs.com/knowledge-base/Post%20lavorazione-sls-printed-parts)
- Per SLA: [https://www.3dhubs.com/knowledge-base/Post lavorazione-sla-printed-parts](https://www.3dhubs.com/knowledge-base/Post%20lavorazione-sla-printed-parts)
- Per FDM e PolyJet: <https://www.stratasysdirect.com/wp-content/uploads/2016/10/finishing-for-fdm-and-polyjet-Rebrandeds-2.pdf>

L'intero processo di produzione può essere sintetizzato nel seguente schema:



Schema 3: Processo produttivo nella stampa 3D . [51]

4. SOFTWARE NECESSARI ALLA STAMPA 3D

Esistono diversi software per ogni forma di realizzazione dell'oggetto 3D, nonché per ogni fase del processo. Per sapere qual è il software che più è compatibile con le tue esigenze, è necessario studiare e valutare quale sia il più appropriato per il tuo flusso di lavoro e il tuo livello di competenza tecnica.

Le fasi di sviluppo di un oggetto 3D sono 3: progettazione dell'oggetto 3D, riparazione / generazione del G-Code e stampa.

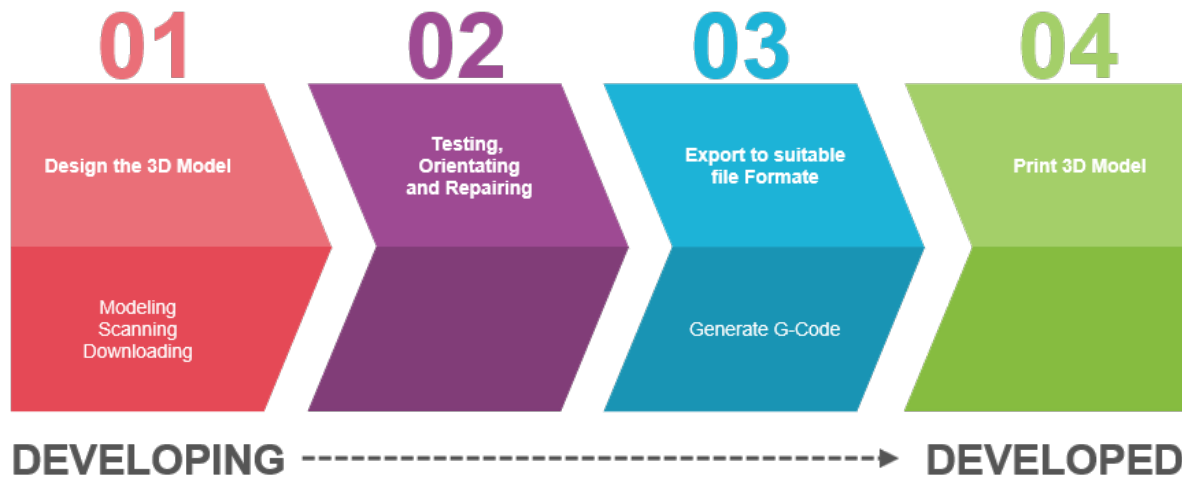


Figura 20: Fasi di sviluppo del modello 3D [52]

Alcuni software sono in grado di eseguire il processo per intero, il che significa che dispongono di strumenti per la progettazione del modello digitale, la verifica e la riparazione, e la generazione di G-Code.

Qui di seguito ci apprestiamo a spiegare quali sono le diverse tipologie di software disponibili per la creazione di oggetti 3D; Si suddividono in tre gruppi.




4.1. Software di programmazione

Vi sono 3 modi per creare un oggetto 3D: la modellazione, la scansione e il download.




Modellazione

I software di progettazione e modellazione 3D sono molteplici. Comportano diversi livelli di complessità e richiedono licenze diverse. Per capire quali di essi meglio si adattano al tipo di lavoro e alle tue capacità, abbiamo predisposto una tabella riassuntiva che ne descrive le caratteristiche più salienti.

Software gratuiti

 SketchUp	Un'interfaccia potente ma allo stesso tempo facile da usare. Ideale per chi è alle prime armi.	https://www.youtube.com/watch?v=pv7TrGnZ17w
 blender	Software gratuito e open source. Usato anche per l'animazione, il rendering e il video editing.	https://www.blender.org/support/tutorials/
 FreeCAD <small>An Open Source parametric 3D CAD modeler</small>	Modellatore 3D parametrico. Per modificare un progetto basta consultare la cronologia e cambiare alcuni parametri. E' uno strumento multiplatforma (Windows, Mac OS e Linux), in grado di leggere e scrivere in vari formati aperti.	https://www.freecadweb.org/wiki/Draft_tutorial#Tutorial
 WINGS 3D	È un software di modellazione poligonale avanzato, potente e facile da usare. Open source e completamente gratuito.	http://www.wings3d.com/?page_id=252

Software commerciali – Versione per studenti

 AUTOCAD	Software CAD e di disegno per la progettazione 2D e 3D	https://knowledge.autodesk.com/support/t/autocad/getting-started?sort=score
 AUTODESK® INVENTOR®	Software CAD 3D professionale, offre una serie di strumenti di facile utilizzo per la progettazione meccanica 3D, la documentazione e la simulazione dei prodotti e la prototipazione digitale	https://www.youtube.com/watch?v=IEheFEer5Is
 AUTODESK® REVIT®	Revit è specificamente progettato per il Building Information Modeling (BIM), e consente ai professionisti del design e dell'edilizia di portare	https://www.youtube.com/watch?v=v=PR08VU9tSNo&list=PLzAQZFR7Ss

	un'idea dal concept alla costruzione, con un approccio coordinato e coerente basato sul modello.	SsdgX_v1enjJiesCkMkMeMo8CON
--	---	---

Software commerciali

	È indicato nella creazione rapida di parti, assiemi e disegni 2D. Specifico per la lavorazione di lamiera, saldature, riporti e stampi. Consente di distribuire facilmente i migliori design della categoria.	https://www.youtube.com/watch?v=LAadn7k8W0g&list=PLROUP1bV8REQiuL7RSxcQkK_Mq-pW_KMa
	Uno dei software di maggiore spicco utilizzato per la progettazione, la simulazione, l'analisi e la fabbricazione di prodotti in una varietà di settori.	https://www.youtube.com/watch?v=gGqbim8U7k
	Applicazione di modellazione 3D, animazione, motion graphics, rendering, modellazione procedurale e poligonale, illuminazione, e texturing, comprensivo di tutte le funzionalità presenti nelle applicazioni di modellazione 3D più comuni.	https://www.youtube.com/watch?v=iLQzBfp2xxw&list=PLTZhwSINdiMz3aivqQJzufifoCPEIai_c

Tabella 1: Breve descrizione dei software di progettazione 3D [53]

Scansione:

Utilizzando la scansione 3D sarete in grado di acquisire una copia digitale di un oggetto fisico dal mondo reale. Vi sono diverse tecnologie di scansione 3D, ad esempio: scanning a tempo di volo, a luce strutturata / modulata, a triangolazione, ecc. Ecco alcuni scanner:

	https://structure.io/
	https://www.3dsystems.com/3d-scanners/sense-scanner

	http://eu.xyzprinting.com/eu_en/Product/da-Vinci-1.0-AiO#view
	https://developer.microsoft.com/en-us/windows/hardware/3d-print/scanning-with-kinect

Tabella 2: Software di scansione 3D [54]

Download

La terza opzione per ottenere un modello digitale è scaricarlo da una repository online, già pronto per la stampa, o che richieda piccole modifiche.

4.2. Software di verifica, orientamento e riparazione

Prima di stampare il modello 3D, è necessario effettuare un'analisi, che consentirà di eventuali errori. Se questo dovesse essere il caso, è possibile ridurre o aumentare la quantità di triangoli che formano la superficie che verrà stampata e, se necessario, suddividere il modello in sezioni.

Ci sono alcuni software disponibili per fare questo, qui di seguito presentiamo una lista con i software più utilizzati:




	https://knowledge.autodesk.com/support/netfabb?p=NETF&skill=Beginner&sort=score&page=1&v=2017
	http://www.meshlab.net/#support
	https://www.mmmanual.com/

Tabella 3: Software di Verifica, Orientamento e Riparazione di un Modello 3D [55]

Nella fattispecie abbiamo preso ad esempio il software Nettfabb, al fine di spiegare come preparare il modello 3D e generare il file STL.

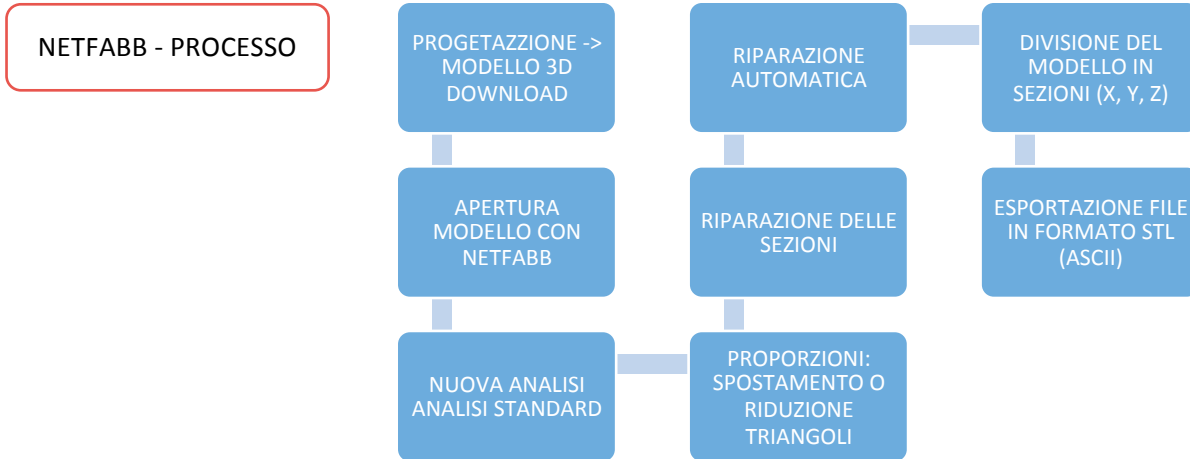


Figura 40: Riparare un file STL [56]

Al link qui sotto troverai una spiegazione completa su eseguire tutte le fasi del processo, nonché una rappresentazione grafica dell'interfaccia del software:

Come riparare un file in meno di 3 minuti con Neftabb:

<https://www.netfabb.com/blog/repair-it-netfabb-under-3-minutes>

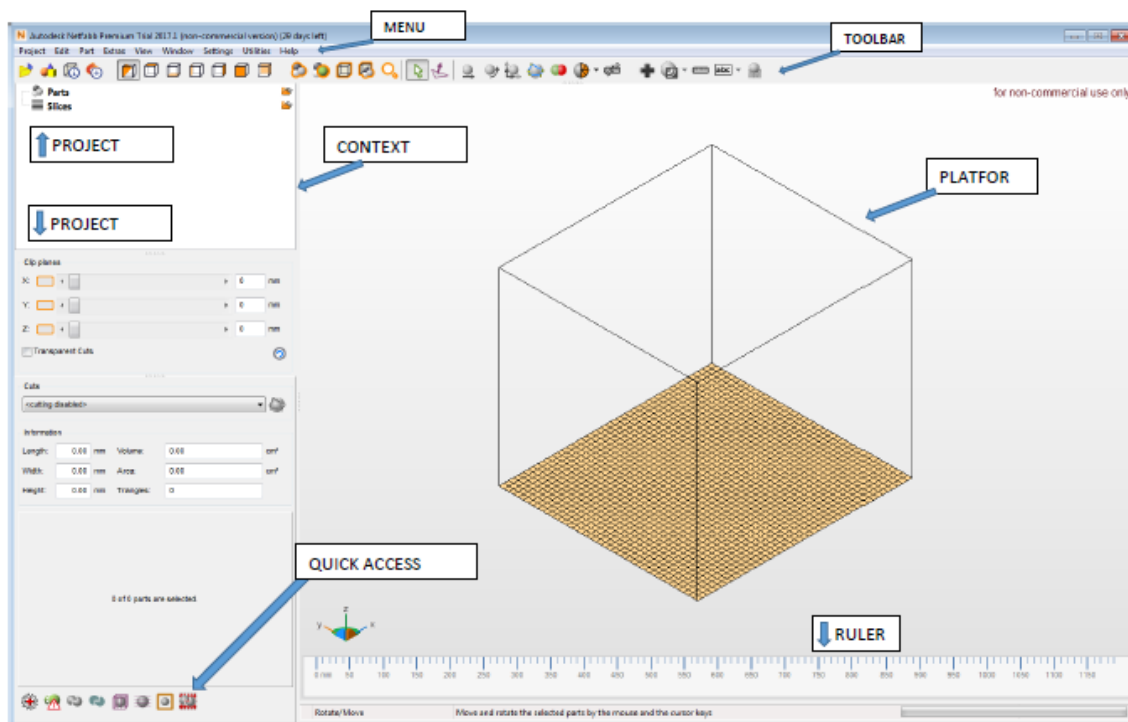


Figura 41: Interfaccia di Netfabb Premium [57]

4.3. Software per la generazione del G-Code

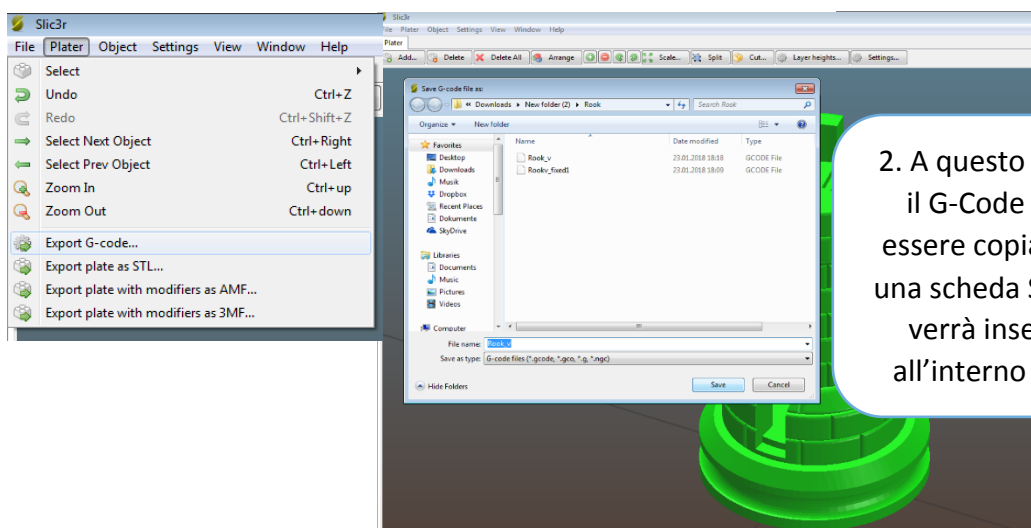
Il G-Code è un linguaggio attraverso il quale una persona dice ad una macchina computerizzata cosa fare e come farlo. Il "come" è definito dalle istruzioni su dove muoversi, quanto velocemente muoversi e quale percorso seguire. Il G-Code può essere generato attraverso differenti software come Skeinforge, Cura, Slic3r ... Uno dei software più utilizzati è Slic3r. È uno strumento necessario alla conversione di un modello 3D in istruzioni (G-Code) per la stampante. Suddivide il modello in sezioni orizzontali (strati), genera i percorsi per l'ugello e calcola la quantità di materiale da estrudere. È possibile ridimensionare, ruotare, dividere o sezionare l'oggetto e aggiungere le strutture di supporto.

Generare il G-Code con Slic3r:



1. Una volta aperto il programma, cliccare sul pulsante “Add”, selezionare il modello e aprirlo. Slic3r permette di modificare, ruotare, ridimensionare e sezionare il modello, ma se questo è già pronto per la stampa, il passo successivo è la generazione del G-Code. Per farlo cliccare su “Export G-Code” e salvare.

Figura 42: Aprire un modello 3D con Slic3r [58]



2. A questo punto il G-Code può essere copiato su una scheda SD che verrà inserita all'interno della

Figura 43: G-Code con Slic3r [59]

4.4. Processo di Stampa 3D.

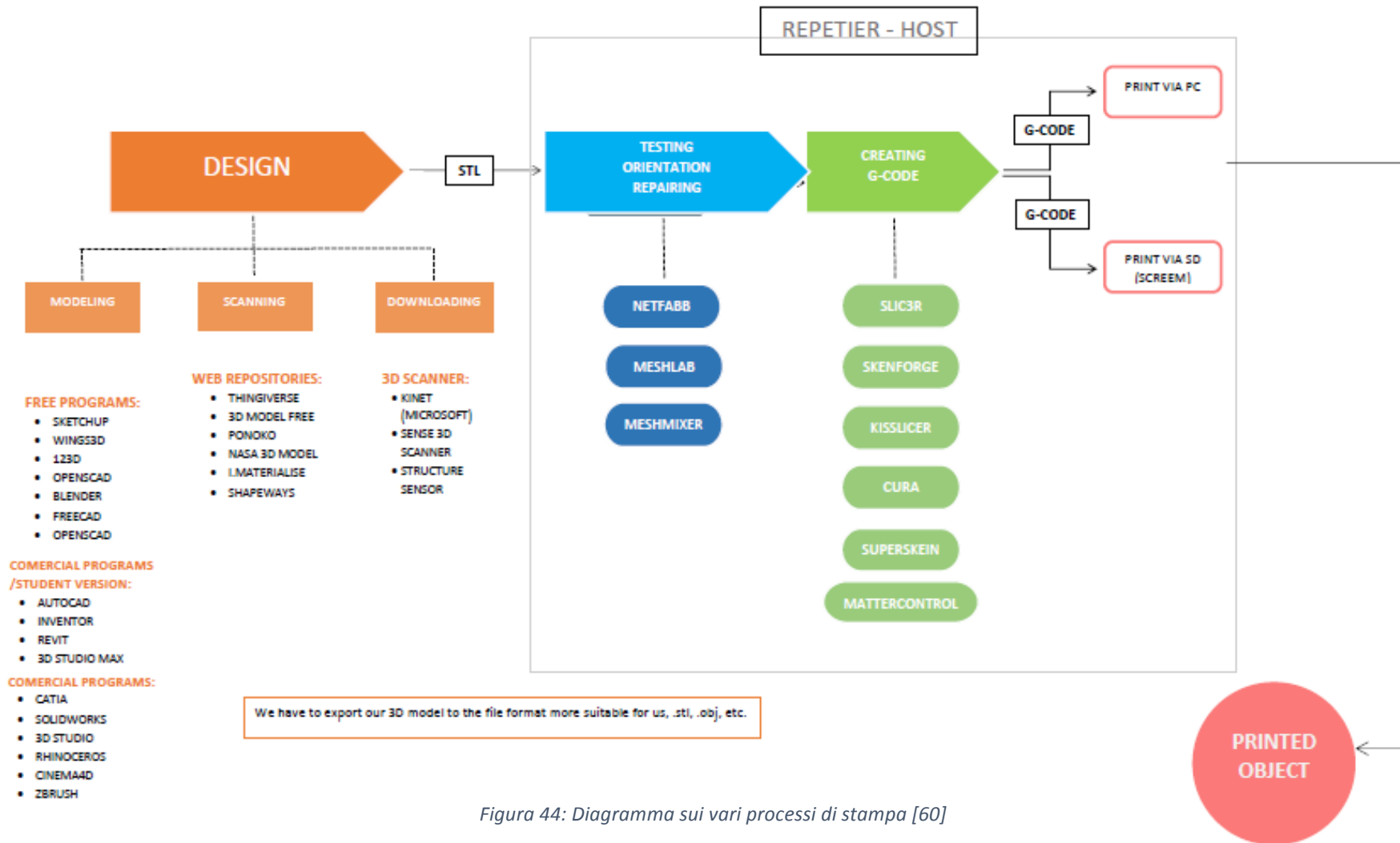


Figura 44: Diagramma sui vari processi di stampa [60]

5. Materiali

5.1. Panoramica generale

Quando si parla di Stampa 3D, la scelta dei materiali è di cruciale importanza. In passato, i materiali impiegati risultavano essere poco resistenti e si deterioravano facilmente. Oggi, invece, con il diffondersi delle tecniche di produzione additiva in tutto il mondo, c'è un interesse sempre crescente nei riguardi della stampa 3D. Molte sono le ricerche dedicate a questo nuovo campo della tecnologia, grazie anche all'idea generalmente diffusa che quest'ultima abbia il potenziale di suscitare modalità innovative di produzione. Dalle ricerche condotte e dalle ulteriori analisi effettuate è stato possibile dare vita a nuovi materiali.

Oggi il mercato offre una grande varietà nella scelta dei materiali. Dai polimeri e i metalli, passando per le ceramiche e i materiali compositi, molti sono quelli di nuova generazione, ognuno di essi con vantaggi e svantaggi. Alcuni esempi sono visibili su 3dhubs.com, un portale che fornisce servizi di stampa 3D a livello globale [61]:

- **Prototyping Plastic**, adatto ad una prototipazione rapida ed economica;
- **Resina ad alto dettaglio**, adatta alla stampa di disegni complessi e sculture;
- **SLS Nylon**, per prototipi funzionali e parti di uso finale;
- **Nylon rinforzato con fibre**, per la progettazione di parti forti;
- **Rigid Opaque Plastic**, per prototipi ad alta precisione;
- **Plastica in simil-gomma**, che produce un effetto simile a quello della gomma;
- **Plastica trasparente**, per creare parti trasparenti e prototipi;
- **ABS simulato**, con stampi ad alta precisione e funzionali;
- **Arenaria di colore pieno**, per modelli fotorealistici;
- **Metalli industriali**, per prototipi e parti di uso finale.

L'offerta è ovviamente molto più ampia di quanto riportato qui. Per quanto riguarda invece la domanda, l'uso di un determinato materiale piuttosto che un altro è fortemente influenzato non solo dal tipo di tecnologia adottata, ma anche dalla popolarità della stampante 3D.

Secondo un report globale sulla stampa 3D condotto nel 2016, che ha raccolto informazioni da parte di aziende che fanno uso di più tecnologie, il metallo sarebbe in testa alla classifica. I metalli sono attualmente impiegati in diversi settori, quali quello aerospaziale e quello automobilistico, per numerose ragioni. Tralasciando l'elevata quantità di materiale necessaria, i metalli consentono di creare componenti leggere. Il peso è infatti, di fondamentale importanza per quelle aziende che, per esempio, sono impegnate nella produzione di componenti di aeromobili. Esso incide grandemente sulla quantità di carburante necessario al funzionamento del velivolo, e comporta una riduzione dei costi a favore delle compagnie aeree non indifferente. [62].

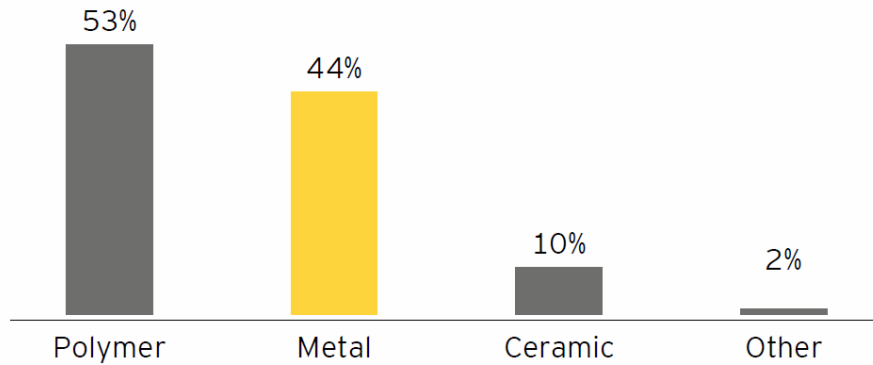


Figura 45: Materiali impiegati nella stampa 3D(%) [63]

Nel grafico sopraindicato vediamo la percentuale di domanda per ogni tipologia di materiale, per l'anno 2016. In testa troviamo i materiali polimerici seguiti dai metalli. Ciò è dovuto al livello di esperienza connesso ad ogni categoria. La dimestichezza nell'uso della ceramica è di gran lunga inferiore se paragonata all'uso di metalli e materiali polimerici. Solo il 10% delle aziende ne fa uso, e questo è probabilmente dovuto alla sua durabilità e alla poca flessibilità. Contrariamente alla plastica o ai filamenti, le ceramiche non consentono di realizzare determinati articoli. Di contro, tra i metalli sono inclusi tutti quei materiali come il titanio, l'acciaio e l'alluminio, caratterizzati da un'ottima resistenza [64].

Tendenze più recenti confermano il percorso già intrapreso. Alla fine del 2017, è stato stimato che i materiali PLA sono attualmente in cima alla classifica con un 32% dell'ammontare complessivo. Seguiti con un lieve distacco dai filamenti ABS (14%). Al terzo posto troviamo le resine standard (8%). Allo stesso tempo, stiamo assistendo ad un incremento nell'utilizzo di alcuni materiali legati all'uso di una particolare tipologia di stampante, e di conseguenza, di una tecnologia specifica. Il materiale PA 12, ad esempio, ha recentemente acquisito popolarità grazie alle nuove stampanti SLS che il mercato offre attualmente, insieme alla tecnologia Multi Jet Fusion di HP [65].

Di seguito sono riportati alcuni degli indicatori relativi all'attuale offerta di materiali, tra cui la quantità di materiali a **base biologica** utilizzati, la varietà **colori** e i **diametri** disponibili.

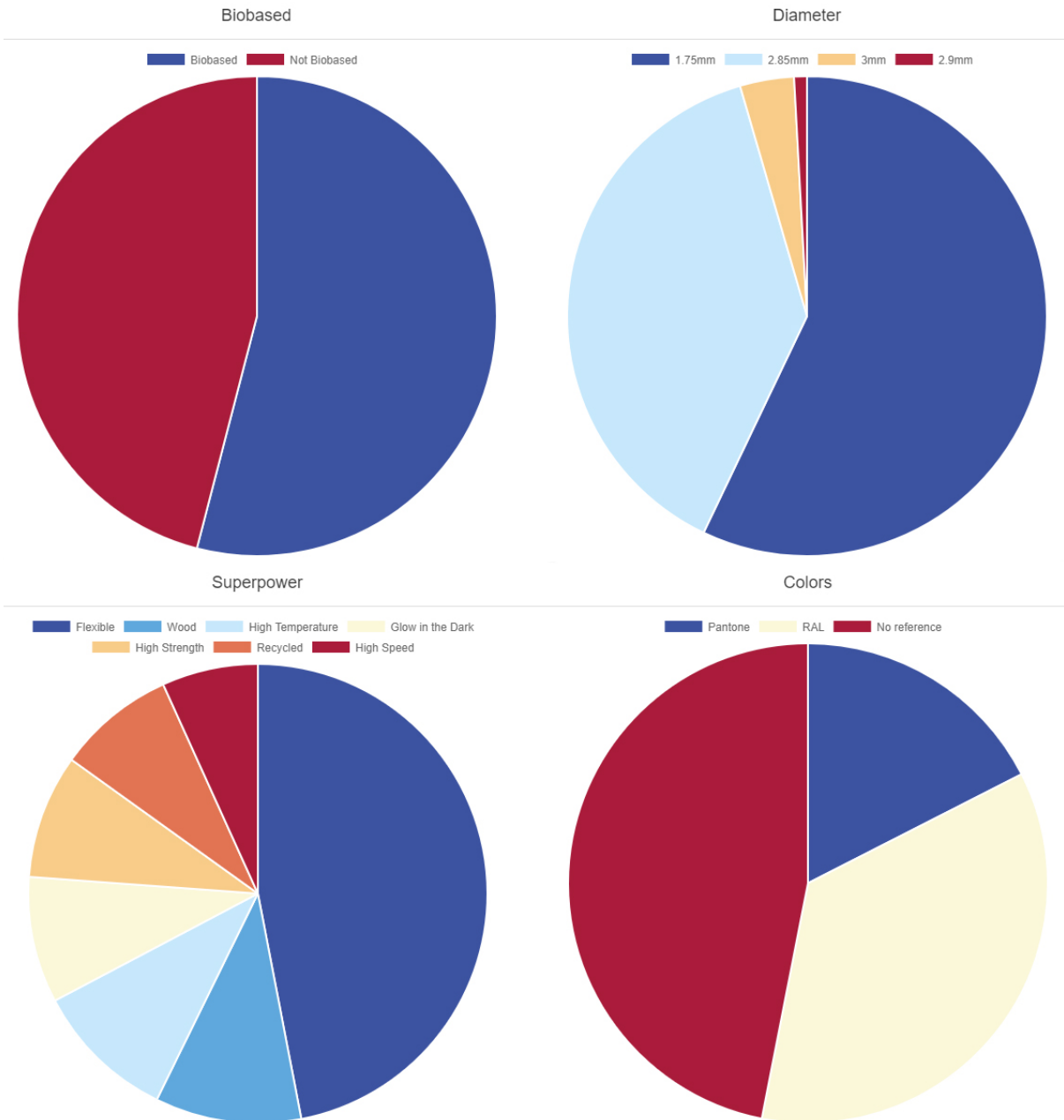


Figura 46: Andamento dell'utilizzo dei filamenti: Novembre 2017[66]

5.2. Materiali FDM, SLS e SLA

Secondo quanto riportato a fine novembre 2017 e sulla base degli studi condotti nel capitolo 2, le tecnologie di stampa 3D più utilizzate attualmente sono 3:

1. Modellazione a Deposizione Fusa (FDM);
2. Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS);
3. Stereolitografia (SLA).

Per quanto riguarda la **Modellazione a Deposizione Fusa (FDM)**, i materiali più diffusi sono i seguenti:

- Filamento Termoplastico.
- PLA: facile da stampare, molto preciso, a basso punto di fusione, rigido. Adatto a quasi tutti i tipo di prototipo. Non adatto alle zone calde / bollenti.
- ABS: tende a deformarsi, resistente e leggermente flessibile. Impiegato nella realizzazione di parti meccaniche.
- PETG: facile da stampare e preciso, tende a restringersi, buona adesione.
- TPU: polimero flessibile; sufficientemente adatto alla stampa, simile alla gomma rigida. Ideale per stampanti ad azionamento diretto.
- Nylon: forte e flessibile; esiste un filamento specifico per le stampanti. Policarbonato: Odore forte e sgradevole, alto livello di deformazione, temperature elevate, esalazioni nocive. [Paul Chase, Stampa 3D 101. 2016.]

Per quanto riguarda i materiali ABS e PLA, non vi è limite all'utilizzo che se ne può fare, poiché possono anche essere combinati tra loro. Rappresentano una soluzione più adeguata rispetto al materiale plastico puro; quest'ultimo, infatti, è relativamente costoso, e presenta sia una bassa resistenza che una scarsa durata. I prodotti finali tendono a deformarsi con facilità, rivelandosi non adatto alla produzione in larga scala. Rende l'utilizzo della tecnologia FDM poco conveniente da un punto di vista economico, e non adeguata alla produzione di applicazioni portanti o funzionali.

I filamenti in ABS, invece, possono assumere una varietà di forme e proprietà. Sono resistenti, ma anche molto flessibili; possono essere levigati e lavorati, e lucidati con dell'acetone, sia con spazzolatura che per immersione. Un primo confronto tra ABS e PLA rivela che i primi sono molto più facili da riciclare, ragion per cui gli utenti tendono a privilegiare questo tipo di materiale.

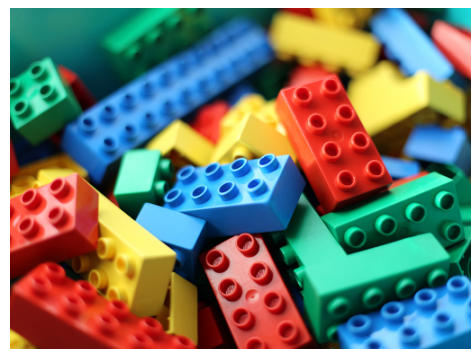


Figura 47: Mattoncini Lego in ABS [67]

Per quanto riguarda la **Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS)**, i materiali più diffusi sono rappresentati dalla categoria delle poliammidi. Ne è un esempio il Nylon.

Gli oggetti, in questo caso, vengono realizzati attraverso l'estrusione di un filamento o attraverso la sinterizzazione di una polvere sottile. Il materiale è infatti rigido e resistente, e capace di flettersi anche sotto carichi elevati. Anche le poliammidi sono considerate piuttosto economiche.

In fase di post-lavorazione, questo tipo di materiale consente può essere soggetto a svariate modalità di lucidatura, tintura o pittura, lasciando quindi ampia libertà. Purtroppo le poliammidi assorbono rapidamente l'umidità e devono essere conservate in modo appropriato.



Figura 21: Poliamide. Un materiale flessibile e resistente ad alta risoluzione. [68]

La **Stereolitografia** fa ampio uso di materiali plastici e resine, di cui il mercato offre una vasta gamma: monomeri lunghi e corti, oligomeri, fotoiniziatori e additivi. Ciò consente di creare un'infinità di combinazioni e conferire al prototipo una varietà di proprietà ottiche (trasparente, opaco, colorato), meccaniche (rigido o flessibile) e termiche (più o meno resistente al calore).

Le resine si presentano sotto forma di materiale fotopolimerico liquido, trattato e indurito attraverso l'energia ultravioletta (UV). Sono considerate molto versatili, e per questo, tutte le tecnologie sviluppatesi attorno all'uso delle resine sono quelle che offrono la qualità più elevata. Ciò le rende l'opzione più appropriata per la realizzazione di prototipi fruibili in campo professionale, come prototipi da esibizione, nella realizzazione di piccoli oggetti, e così via.

Tra i numerosi vantaggi che l'uso delle resine comporta troviamo: alta risoluzione, superficie liscia, anche senza rifinitura, un'ampia varietà di colori e proprietà, tra cui la trasparenza e la traslucidità.

Uno dei più grandi svantaggi è rappresentato dal livello di irritabilità e tossicità delle resine. Per evitare di correre dei rischi è necessario trattarle correttamente utilizzando l'attrezzatura adeguata. È inoltre necessaria la pulitura. Sebbene questo tipo di materiale offra molta libertà, richiede l'utilizzo di strutture di supporto. Questo comporta un aumento nell'acquisto di materiale, e di conseguenza, dei costi. Questi ultimi sono anche determinati dalla quantità di passaggi di post lavorazione previsti.

6. LIMITI DELLA SAMPA 3D.

In questo capitolo offriremo una panoramica generale sui limiti presentati dalla produzione additiva e la stampa 3D in generale, e dalla tecnologia FDM in particolare.

6.1. Limiti nella produzione additiva.

Nonostante l'evidente contributo che tali tecnologie possono apportare al progresso dell'industria grazie ai loro numerosi vantaggi, è un dato di fatto che alcune delle limitazioni da esse incorporate, rendono le tecnologie di produzione additiva non ampiamente implementate in molti settori.

Tali limitazioni sono connesse alla natura stessa dei processi di produzione additiva, i quali possono ancora essere perfezionati, e a tutte quelle fasi collaterali (pre-lavorazione del materiale, post lavorazione, controllo di qualità ...) che in molti casi ne condizionano l'attuabilità. Una mancata conoscenza sulle modalità di progettazione e l'incapacità di integrazione delle tecnologie da parte delle aziende sono fattori che incidono ulteriormente. [69].

Indubbiamente, nonostante costituiscano una grande sfida per la ricerca, lo sviluppo tecnologico e l'innovazione, tali limitazioni possono ancora essere superate. Attualmente numerosi team di ricercatori e aziende in tutto il mondo, sono all'opera in questo senso. Alcune di queste limitazioni sono le seguenti:

Tecnologie in via di sviluppo: molte delle tecnologie sono in continuo sviluppo. Alcune di esse sono ancora nelle prime fasi. In pochi anni, un macchinario rischia di diventare obsoleto o già superato.

Reperibilità e costo delle materie prime: Ottenere la fornitura di materiali può col tempo diventare complicato. Inoltre, se si stanno cercando delle proprietà specifiche, alcuni materiali possono risultare piuttosto costosi. Il materiale più economico e più semplice da reperire è la plastica.

Quota d'investimento iniziale: Solitamente una stampante da tavolo FDM è piuttosto economica. Per quanto riguarda le altre tecnologie però, la quota di investimento iniziale può essere molto elevata, specialmente se si è alla ricerca di macchinari dalle dimensioni più grandi.

Dimensione dei modelli la dimensione dei modelli da produrre dipende dalla grandezza del piano di stampa. E' altresì vero che i modelli di grandi dimensioni possono essere sezionati e assemblati in un secondo momento.

Produzione di massa non redditizia: La produzione additiva e la stampa 3D sono concepite per la realizzazione di serie molto limitate (circa 1 - 10 unità). Una produzione in larga scala con queste tecnologie non è redditizia.

Finitura e precisione: in generale, ottenere una buona finitura e precisione di dettagli comporterà costi molto elevati. Vale a dire, sarà necessario ricorrere a tecnologie e macchinari più costosi. Inoltre, le parti possono richiedere operazioni di post-lavorazione, l'utilizzo di macchinari aggiuntivi e sotto processi specifici.

Ottenere i file digitali: Ottenere modelli specifici e altamente personalizzati, richiede un'elevata competenza nell'uso dei software CAD. Il più delle volte, le repository online di file CAD non bastano. Lo stesso vale per gli scanner 3D; sono costosi e l'utilizzo richiede una certa conoscenza.

6.2. Limiti relativi ad ogni tipo di tecnologia

Ora verranno specificate alcune limitazioni, raggruppate in base a ciascun tipo di tecnologia:

• Limitazioni della tecnologia FDM

Scarsa finitura della superficie e bassa velocità di stampa rispetto ad altre tecnologie. Le dimensioni di stampa per le stampanti da tavolo corrispondono a 20x20x20 cm. Sono necessarie le strutture di supporto per la realizzazione di angoli inferiori ai 45 gradi. Le pareti devono avere uno spessore minimo di 0,8 mm. I dettagli incisi o in rilievo possono raggiungere una precisione di non oltre 0,6 mm in larghezza e 2 mm in altezza. I "ponti" orizzontali superiori ai 10 mm necessitano di supporto. In generale, non è possibile stampare fori di diametro inferiore a 2 mm. Per garantire il successo del tentativo di stampa è necessario che il modello non abbia dimensioni inferiori ai 2 mm. Per quanto riguarda i connettori, il diametro minimo consigliato è di 3 mm. La tolleranza (precisione dimensionale) prevista è $\pm 0,5\%$ ($\pm 0,5$ mm circa).

• Limitazioni della Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS)




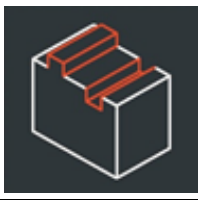

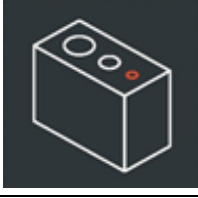

Il volume medio di costruzione è di circa 30x30x30 cm. La finitura è leggermente ruvida al tatto e opaca, se si desidera una finitura lucida e liscia, si consiglia di ultimare il prodotto in fase di post lavorazione. Le pareti devono avere uno spessore minimo di 0,7 mm. I dettagli in rilievo o incisi devono avere una larghezza e un'altezza non inferiore a 1 mm. In generale, non è possibile stampare fori di diametro inferiore a 1,5 mm. Per rimuovere il materiale di supporto (polvere non sinterizzata), è necessaria la presenza di fori nelle parti. Queste devono avere un diametro minimo di 5 mm. La dimensione minima stampabile di una sezione è di circa 0,8 mm, lo stesso vale per i connettori. La tolleranza prevista è di $\pm 0,3\%$ ($\pm 0,3$ mm).

• Limitazioni della Stereolitografia (SLA)

Le stampanti SLA hanno generalmente un volume di costruzione molto più piccolo rispetto alla maggior parte delle stampanti, ad eccezione di quelle industriali, che possono avere una dimensione di stampa di 14,5 x 14,5 x 14,5 cm. Quando il pezzo è più grande, è meglio suddividerlo in sezioni più piccole e assemblarle in seguito. Le resine hanno un costo molto elevato (da € 150 / litro). La maggior parte delle parti stampate attraverso questo tipo di tecnologia richiede un processo di post-polimerizzazione all'interno di un forno UV. La larghezza minima consigliata delle pareti è di 0,5 mm (se la parete in questione è collegata ad un altro elemento) o di 1 mm (se non lo è). Le strutture di supporto sono sempre richieste per gli elementi a sbalzo (con conseguente aumento dei costi). Le incisioni e i rilievi devono avere una larghezza e un'altezza non inferiore ai 0,4 mm. I fori possono avere un diametro minimo di circa 0,5 mm. Per consentire al materiale in eccesso di fuoriuscire in, è necessario prevedere dei fori di fuga, che dovrebbero avere un diametro di circa 4 mm. Al fine di

garantire una buona riuscita nella stampa, la dimensione minima di ogni sezione dovrà essere di 0,2 mm. Per i connettori, si consiglia un diametro di 0,5 mm. La tolleranza prevista o la precisione dimensionale è di circa $\pm 0,5\%$ ($\pm 0,15$ mm).

Tabella Comparativa

LIMITAZIONI			TECNOLOGIE		
NOME	DESCRIZIONE	MODELLO	FDM	SLA	SLS
Pareti con Supporto	Pareti collegate al resto della stampa su almeno due lati.		0.8 mm	0.5 mm	0.7 mm
Pareti senza Supporto	Pareti non supportate collegate al resto della stampa su meno di due lati.		0.8 mm	1 mm	
Ssupporti e Sporgenze	Ampiezza massima di stampa di un angolo senza bisogno di supporto.		45°	Supporto sempre necessario	
Incisioni e Rilievi	Elementi al di sopra o al di sotto della superficie del prototipo.		Larghezza 0.6 mm, spessore 200	Larghezza e spessore 0.4 mm	Larghezza e spessore 1 mm
Ponti Orizzontali	Ampiezza massima stampabile senza l'ausilio di un supporto.		10 mm		
Fori	Diametro minimo di un foro		Æ 2 mm	Æ 5 mm	Æ 1.5 mm
Parti di Giunzione e Movibili	Spazio minimo consigliato tra due parti mobili o di giunzione.		0.5 mm	0.5 mm	0.3 mm per le parti mobili e 0.1 mm per le giunzioni

Fori di rilascio	Diametro minimo del foro di rilascio per permettere la rimozione del materiale di supporto.			4 mm	5 mm
Funzioni Minime	Dimensioni minime consigliate per favorire la buona riuscita della stampa.		2 mm	0.2 mm	0.8 mm
Diametro del Perno	Diametro minimo di un perno		3 mm	0.5 mm	0.8 mm
Tolleranza	Livello di tolleranza previsto (accuratezza del diametro) di una specifica tecnologia.		$\pm 0.5\%$ (limite minimo ± 0.5 mm)	$\pm 0.5\%$ (limite minimo ± 0.15 mm)	$\pm 0.3\%$ (limite minimo ± 0.3 mm)

Tabella 4: Tabella Comparativa [70]

6.3. Introduzione alle limitazioni della tecnologia FDM.

Andando un po' 'più a fondo nella tecnologia FDM, mostriamo alcuni dei suoi limiti nel dettaglio e proponiamo alcuni metodi che possono essere implementati in fase di progettazione per minimizzare l'impatto di queste limitazioni durante la fase di stampa.

BRIDGING

Il bridging si verifica quando la macchina si ritrova a stampare un "ponte" tra un supporto e l'altro. In assenza di un supporto per la stampa dello strato iniziale (non c'è nulla su cui costruire) e poiché è necessario "colmare" un vuoto, il materiale tenderà ad abbassarsi. I ponti (o bridge) sono solitamente necessari per la stampa dei fori degli assi orizzontali che si trovano nelle pareti degli oggetti o nello strato superiore (o tetto) di parti vuote.

Una soluzione per minimizzare l'impatto del bridging è ridurre la distanza del ponte, ma ciò dipenderà dai vincoli di progettazione della parte. Un'altra soluzione per evitare cedimenti è includere il supporto. Il supporto offre una piattaforma temporanea di creazione per lo strato di bridging su cui costruire. Il materiale di supporto viene quindi rimosso una volta completata la stampa.

Ciò può lasciare segni o danneggiare la superficie nel punto in cui il supporto era attaccato.

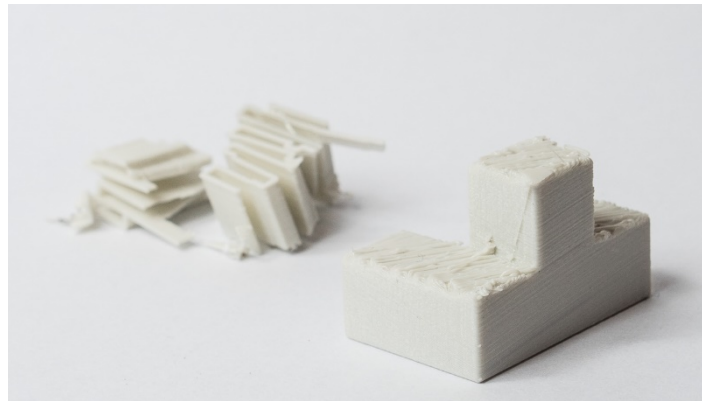


Figura 49: Parti di prototipo stampato con tecnologia FDM dalla superficie irregolare a seguito della rimozione del supporto. [71]

Considerazioni chiave sulla progettazione: a causa della natura stessa della tecnologia FDM, i segni di cedimento e quelli del materiale di supporto saranno sempre presenti in una certa misura, a meno che il ponte non sia inferiore a 5 mm.

Un'altra soluzione potrebbe essere quella di suddividere il modello in sezioni o sottoporlo ad una fase di post-lavorazione nel caso in cui venga richiesta una superficie particolarmente liscia.

FORI SUGLI ASSI VERTICALI

Le stampanti FDM tendono a stampare i fori sull'asse verticale con un diametro inferiore a quello previsto. Il motivo per cui ciò si verifica può essere spiegato attraverso le seguenti fasi:

1. Quando l'ugello stampa il perimetro di un foro sull'asse verticale, comprime il nuovo strato su quelli precedentemente estrusi al fine di migliorare l'adesione.
2. La forza di compressione dall'ugello causa un allungamento della circonferenza, deformandola, che da tonda risulterà leggermente ovale (vedi immagine sotto).
3. Questo fa sì che l'area di contatto tra gli strati sia maggiore (migliorandone l'adesione), ma aumenta la larghezza del segmento già estruso.
4. Come risultato si avrà una riduzione del diametro del foro.

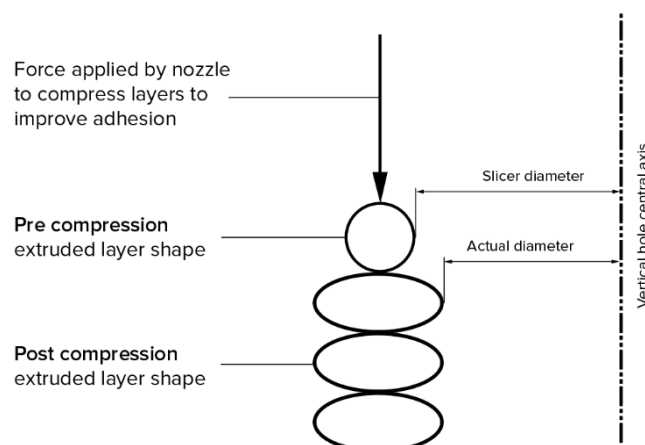


Figure 50: Variazione con software vs. il diametro effettivo dei fori verticali dovuti alla compressione del profilo estruso [72]

Questo può costituire un problema quando si stampano fori dal diametro molto ridotto, dove l'effetto risulterà più visibile a causa del rapporto tra diametro del foro e diametro dell'ugello. Il volume di riduzione dipenderà dalla stampante, dal software di slicing, dalla dimensione del foro e dal materiale impiegato. Di solito, i programmi di slicing sono in grado di prevedere il grado di riduzione del diametro, tuttavia potrebbe rivelarsi necessario effettuare più tentativi prima di ottenere la precisione desiderata. Se è richiesto un alto livello di precisione, è consigliabile praticare il foro manualmente dopo la stampa.

Considerazioni chiave sulla progettazione: se il diametro del foro è determinante, si consiglia di ridurre le dimensioni in fase di stampa e conferire il diametro corretto successivamente.

SBALZI

Le sporgenze in aggetto (o sbalzi) rappresentano uno dei problemi relativi alla qualità di stampa, più comunemente legati alla tecnologia FDM. Gli sbalzi si verificano quando lo strato di materiale stampato è solo parzialmente supportato dal livello sottostante. Similmente al bridging, un supporto inadeguato fornito dalla superficie al di sotto dello strato di costruzione può causare scarsa aderenza, rigonfiamento o arricciamento.



Figure 51: Effetto di un aumento dell'angolo di sbalzo (incremento di 5 gradi) sulla qualità di stampa. L'ampiezza massima raffigurata è di 70 gradi [73]

Un angolo a sbalzo può essere stampato senza subire effetti sulla qualità entro i 45 gradi, e a seconda del materiale. A 45 gradi, il nuovo strato ha un supporto del 50% da parte del livello inferiore. Ciò conferisce un sostegno e un'adesione sufficienti alla prosecuzione della stampa. Oltre i 45 gradi, è necessario provvedere ad un supporto che permetta allo strato successivo di non sporgere verso il basso, lontano dall'ugello.

Un altro problema che si verifica durante la stampa delle sporgenze è il curling. Lo strato appena stampato diventa sempre più sottile sul bordo. Ciò lo fa raffreddare più velocemente e lo fa deformare verso l'alto (vedi l'immagine sopra).

Considerazioni chiave sulla progettazione: Le limitazioni relative agli sbalzi possono essere eliminate con l'uso di supporti per angoli di parete superiori a 45 gradi. Le sporgenze più pronunciate che necessitano di supporto, presenteranno dei segni in superficie causate dalla rimozione delle strutture di supporto e dovranno essere levigate durante la post-lavorazione.

ANGOLI

Poiché l'ugello delle stampanti FDM è circolare, gli angoli e i bordi avranno un raggio uguale alla dimensione dell'ugello. Ciò significa che tali elementi non saranno mai perfettamente quadrati.

Per i bordi e gli angoli, i primi strati di una stampa sono particolarmente importanti. Proprio come nel caso dei fori verticali discussi in precedenza, durante la stampa l'ugello comprime il materiale già estruso verso il basso per migliorare l'adesione. Così facendo il primo strato assumerà la cosiddetta forma a "zampa di elefante". Ciò può influire sull'assemblaggio delle parti, poiché lo strato alla base andrà oltre le dimensioni specificate.

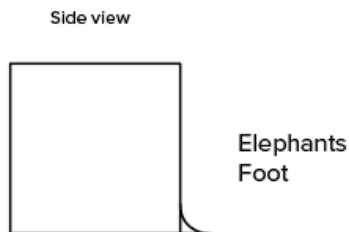


Figura 52: Vista laterale di componente con effetto zampa di elefante che si verifica sullo strato di base di stampa FDM. [74]

Un altro problema legato al primo strato di una stampa FDM è la deformazione. A causa delle temperature elevate, l'ABS è più vulnerabile alla deformazione rispetto al PLA. Lo strato iniziale si raffredda mentre gli altri stampati successivamente sono ancora caldi. Ciò causa un raffreddamento a più fasi con conseguente arricciamento dello strato di base, che tenderà a restringersi e contrarsi fino a distaccarsi dal piano di lavorazione.

Effettuando uno smusso o aggiungendo un raggio lungo i bordi della parte a contatto con il piano di lavorazione sarà possibile ridurre gli effetti di questo fenomeno. Ciò faciliterà inoltre la rimozione delle componenti dalla piastra di costruzione una volta completato il processo di stampa.

Considerazioni chiave sulla progettazione: se le dimensioni complessive o di montaggio sono considerate cruciali per il buon funzionamento dell'oggetto in questione, si consiglia di praticare uno smusso o includere un raggio di 45 gradi su tutti i bordi che toccano la piastra di costruzione. Per test di forma e adattamento ad alta precisione, si consiglia di ricorrere all'uso di altre tecnologie come SLA o Polyjet.

PERNI CILINDRICI

I perni cilindrici vengono solitamente stampati per favorire il montaggio o l'allineamento di alcune parti. Considerando la natura funzionale di questo tipo di componente, è necessario individuare le dimensioni entro le quali la tecnologia FDM garantirà un certo grado di precisione.

Per i perni di grandi dimensioni (con un diametro superiore a 5 mm) viene tracciato un perimetro e poi riempito, favorendo una buona congiunzione al resto della stampa. I perni di diametro più piccolo (meno di 5 mm di diametro) possono essere costituiti unicamente dal perimetro. Ciò crea discontinuità tra il resto della stampa e il perno, causando una congiunzione fragile con alte probabilità di rottura. Nel peggiore dei casi, se i perni sono eccessivamente piccoli, non potranno essere stampati perché lo strato iniziale non è grande abbastanza da garantire aderenza agli strati successivi.

Una corretta calibrazione della stampante (spessore ottimale, velocità di stampa, temperatura dell'ugello, ecc.) può ridurre le probabilità di impossibilità di stampa dei perni piccoli. L'aggiunta di un raggio alla base del perno alleggerirà la concentrazione di tensione aumentando la resistenza. Per i perni con diametro inferiore a 5 mm, inserire un semplice perno presente in commercio all'interno del foro in questione potrebbe rappresentare una soluzione più funzionale.

Considerazioni chiave sulla progettazione: se si necessita di perni dal diametro inferiore a 5 mm, si consiglia di aggiungere un piccolo raccordo alla base del perno. In alternativa, suggeriamo di posizionare un foro all'altezza del perno, praticare il foro della misura corretta e inserire un perno già presente in commercio manualmente.



Figura 53: Prototipo di perno cilindrico filettato con diametro decrescente (da 25 a 5mm) con estremità superiore troppo piccola per la stampa. [75]

DESIGN AVANZATO

Alcuni degli aspetti da prendere in considerazione quando si utilizza la tecnologia FDM sono: come ottimizzare l'uso delle strutture di supporto, quale orientamento attribuire al modello e quale direzione assumere in relazione al piano di costruzione.

Sezionare il modello

Spesso, sezionare un modello può ridurre la complessità nella stampa, e favorire un risparmio nei costi e nei tempi. Gli sbalzi che richiedono un'elevata quantità di strutture di supporto possono essere rimossi semplicemente suddividendo una forma complessa in

sezioni che vengono poi stampate singolarmente. Se lo si desidera, le sezioni possono essere assemblate una volta completata la stampa.

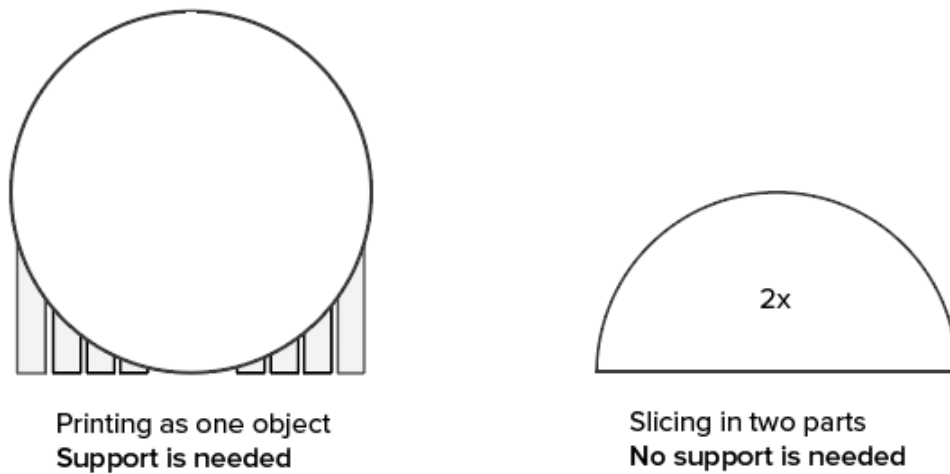


Figura 54: Sezionare il modello per evitare l'utilizzo di strutture di supporto. [76]

ORIENTAMENTO DEI FORI

Per eliminare l'utilizzo di strutture di supporto in caso di fori è sufficiente modificare l'orientamento del modello. La rimozione del supporto per i fori degli assi orizzontali può essere spesso difficile, ma ruotando l'orientamento di 90 gradi, si elimina la necessità di strutture di supporto. Per gli elementi che includono più fori in diverse direzioni, è consigliabile dare precedenza ai fori ciechi, successivamente a quelli con il più piccolo, fino ad arrivare a quelli più grandi.

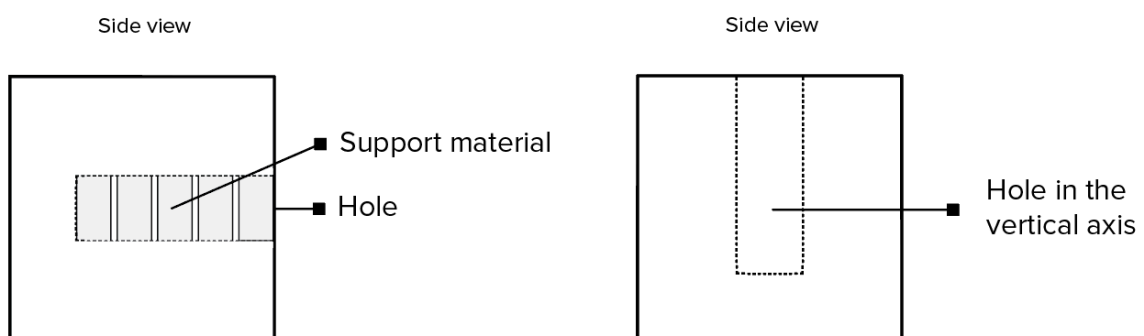


Figura 55: Riposizionamento del foro sull'asse orizzontale per evitare l'utilizzo di supporto. [77]

DIREZIONE DI STAMPA

A causa della natura anisotropa della stampa FDM, conoscere l'applicazione di una componente e le relative modalità di costruzione è indispensabile per la buona riuscita di un progetto. Gli elementi stampati tramite FDM sono intrinsecamente più deboli in una direzione piuttosto che un'altra a causa dell'orientamento dei livelli.

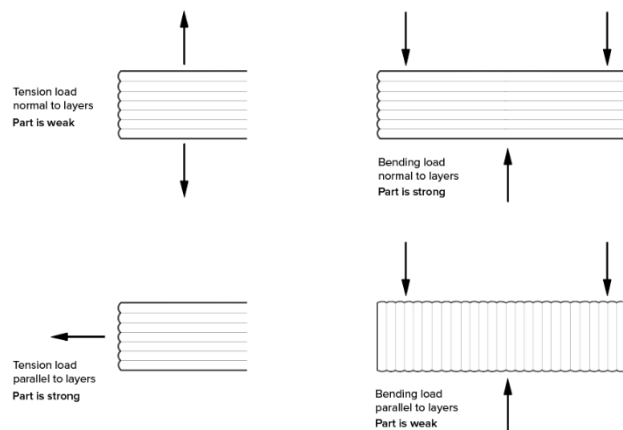


Figura 56: Direzione di stampa. [78]

La mancanza di percorsi materiali continui e la concentrazione di tensione creata dalla congiunzione tra gli strati contribuiscono a tale fragilità. Poiché le estremità hanno una forma arrotondata, le giunture tra uno strato e l'altro sono in realtà piccole valli. Questo crea una concentrazione di pressione che con molta probabilità causerà il formarsi di crepe.

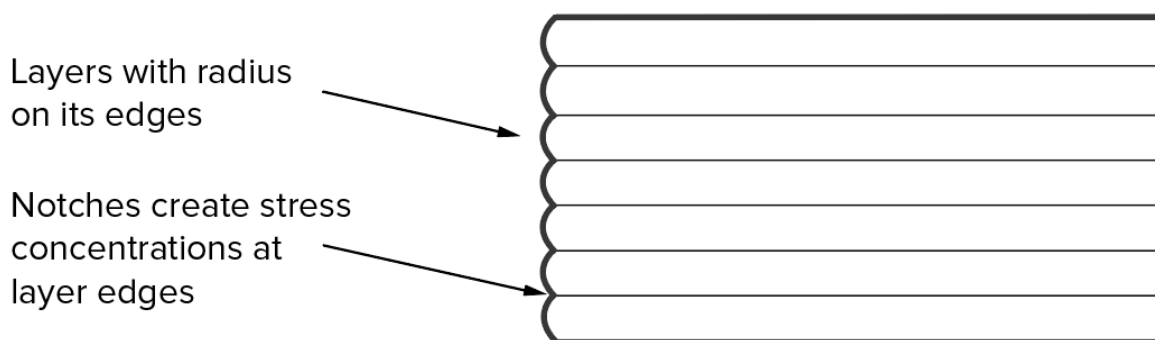


Figura 57: Strati con raggio. [79]

REGOLE GENERALI:

- Se un ponte supera i 5 mm, può presentare segni in superficie dovuti alla rimozione delle strutture di supporto oppure essere soggetto a cedimenti. La suddivisione del modello in sezioni può contribuire a risolvere il problema.
- In caso di fori verticali dalle dimensioni eccessivamente ridotte, al fine di garantire la massima precisione si consiglia di eseguire la foratura al termine della stampa.

- L'utilizzo di strutture di supporto consentirà di stampare angoli di parete superiori a 45 gradi.
- Praticare uno smusso o inserire un raggio di 45 gradi su tutti i bordi di un prototipo a contatto con il piano di costruzione.
- Per le applicazioni che necessitano di perni dalle dimensioni ridotte, aggiungere un piccolo raccordo alla base o praticare un foro in posizione del perno ed inserirne uno già presente in commercio.
- Suddividere il modello in sezioni, riposizionare l'orientamento degli spazi vuoti (o fori) e specificare il direzionamento di stampa, può ridurre i costi, accelerare il processo di stampa e migliorare la resistenza e la qualità di un prototipo. [80]

7. ESEMPIO

In questo capitolo illustreremo, attraverso un esempio concreto, tutti i passaggi da seguire dalla progettazione del modello digitale fino alla realizzazione del prototipo vero e proprio.

L'esempio illustrato di seguito riguarda la riproduzione di un reperto storico. Nasce dalla necessità di rendere accessibili alcuni reperti del Museo di Storia Naturale di Valencia alle persone non vedenti. Nello specifico, il progetto riguarda la parte inferiore della mascella di una tigre. Per ottenere il modello digitale è stato necessario effettuare una scansione 3D della mascella. La nostra spiegazione del processo comincia da qui.

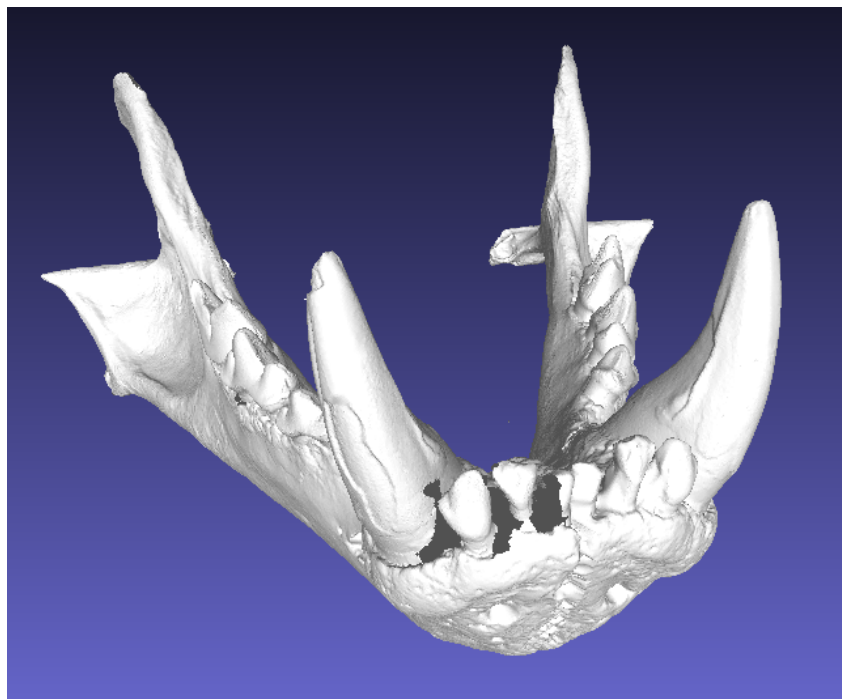


Figura 58: Modello digitale, risultato della scansione 3D. [81]

Qualunque sia il formato del file, deve essere esportato in STL, come è stato specificato in altri capitoli di questa guida.

Osservando bene la figura 34, appare chiaro che il modello presenta svariati errori che devono essere riparati, come ad esempio una parte dei denti.

Per fare questo, è possibile utilizzare diversi software. Qui di seguito eseguiremo il processo di analisi e riparazione attraverso l'uso di software gratuiti come Meshmixer e Autodesk.

Prima di affrontare il processo di analisi, va specificato che il modello in esame è stato elaborato da un software (Meshlab, in particolare) che ha ridotto le dimensioni del file. La mesh presentava un numero eccessivo di triangoli molto, pertanto è stato necessario ridurre la quantità e di conseguenza le dimensioni del file. Non è sempre necessario effettuare questo passaggio, verrà quindi semplicemente menzionato. Per ulteriori informazioni su come ridurre il numero di triangoli di una mesh e quindi le dimensioni del file, vi forniamo il seguente link:

https://www.shapeways.com/tutorials/polygon_reduction_with_meshlab

Come è stato detto prima, il modello STL verrà aperto con Meshmixer, facendo clic su “Importa”. Notiamo subito che l'orientamento del modello potrebbe non essere quello più appropriato. Ciò non costituisce un problema. Meshmixer ti consente di cambiarlo facendo clic su Modifica> Trasforma. Inoltre, Meshmixer non verrà utilizzato per la stampa, l'orientamento è stato pertanto modificato solo approssimativamente, come si può vedere dall'immagine qui sotto.

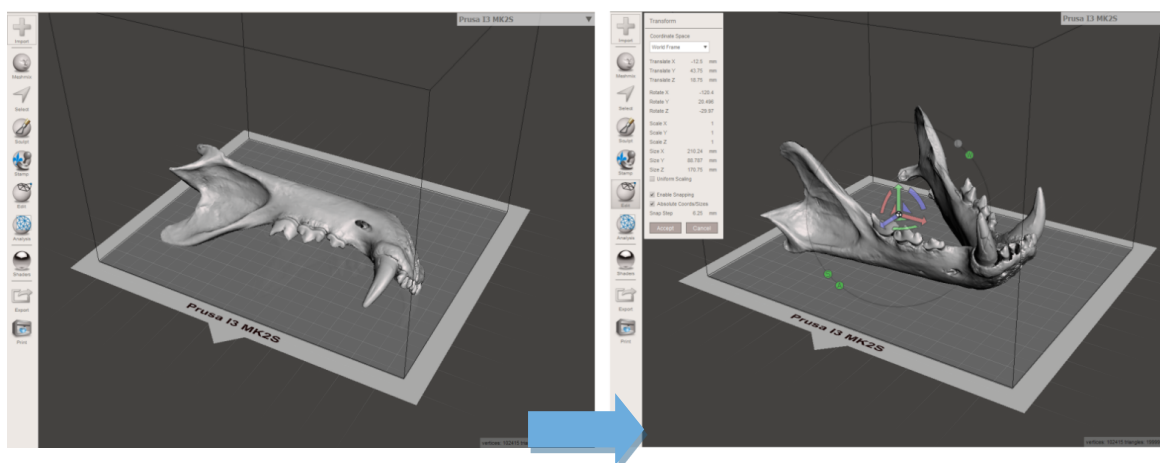


Figura 59: Posizionamento del modello con Meshmixer. [82]

A questo punto viene effettuata un'analisi generale dei difetti del modello. Utilizziamo l'opzione “Ispeziona”, nella sezione “Analisi”. Meshmixer rileva e mostra tutti gli errori nel modello o nel file. Gli errori vengono identificati in diversi colori, e indicati attraverso dei pallini e delle frecce. I fori nella mesh vengono visualizzati in blu, i punti o gli spigoli non manifold sono segnalati in rosso, mentre i componenti o gli elementi sconnessi con un'area molto piccola vengono rappresentati in magenta. Abbiamo due opzioni: riparare gli errori uno per uno cliccando sui “pallini”, o facendo clic su “Ripara automaticamente” e riparando tutto in una volta.

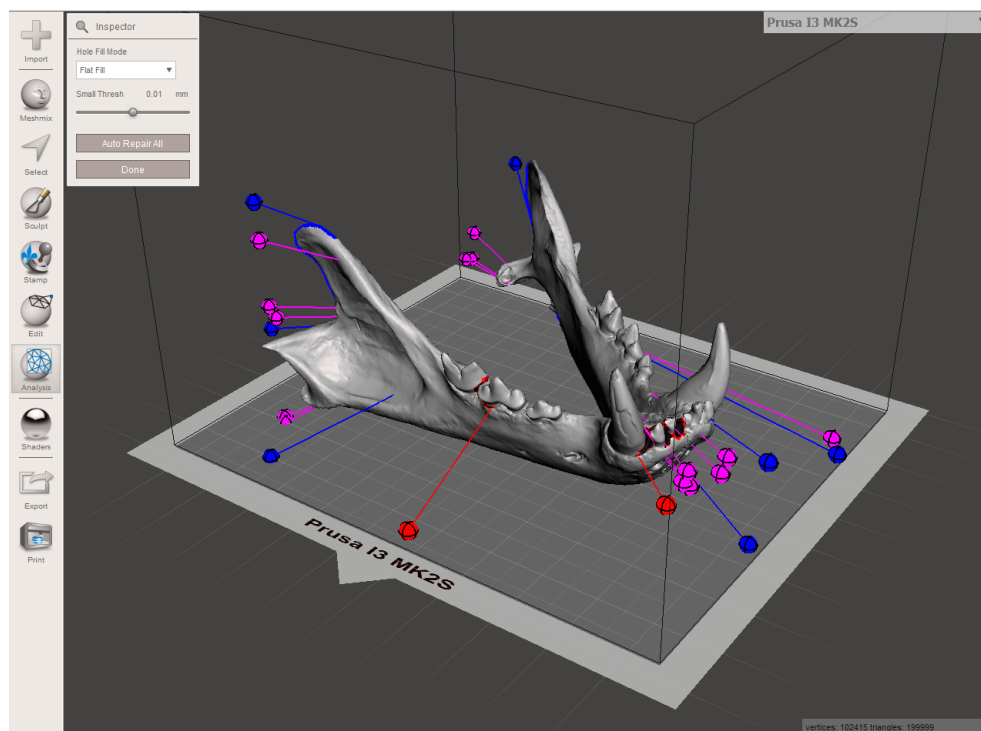


Figura 60: Analisi generale con Meshmixer. [83]

In questo caso, il software ripara automaticamente tutti i difetti rilevati. In caso contrario, è possibile utilizzare altri software e implementare ulteriori processi di analisi e riparazione.

Con Meshmixer è anche possibile eseguire altri tipi di analisi relativi a: spessore, stabilità, orientamento e posizionamento sulla base di stampa, ecc.

Una volta completata questa fase, il modello STL è completamente riparato ed è pronto per la fase successiva. Come si può vedere, il programma ha chiuso tutti i buchi presenti nella mesh e ha riparato tutti i difetti. Si noti che il software esegue automaticamente queste riparazioni, cercando di avvicinarsi il più possibile alla geometria attorno al difetto. Se i buchi o gli spazi vuoti nella mesh devono essere riparati con una determinata geometria, è necessario utilizzare un software di modellazione 3D. È vero che Meshmixer ha un'opzione di modellazioni digitale, ma non verrà spiegato in queste circostanze.

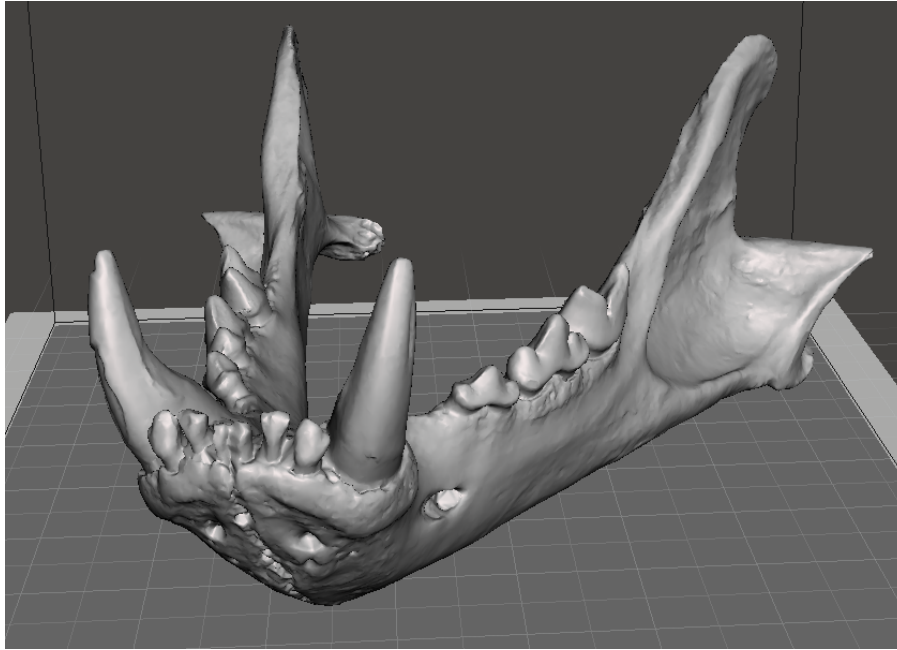


Figura 61: Mascella riparata tramite software [84]

Il modello riparato con Meshmixer deve a questo punto essere esportato nuovamente in formato STL.

Il prossimo successivo è caricare il file in un software che permetta quantomeno di:

- Scegliere l'orientamento nel piano di stampa. Ruotare e spostare il modello
- Modificare le dimensioni del modello.
- Scegliere la qualità o lo spessore dello strato.
- Scegliere il riempimento e l'intensità.
- Generare le necessarie strutture di supporto.

In aggiunta, attraverso questo software verrà generato anche il G-code. Esistono diversi software gratuiti per farlo. Ad esempio, Ultimaker Cura o Slic3r. In questo esempio utilizzeremo Cura.

Il modello viene importato su Cura. A questo punto è consigliato configurare il software per mostrare il letto di stampa della stampante. Cura possiede un database che comprende un grande numero di stampanti 3D commerciali. Se la stampante utilizzata non dovesse essere tra quelle, è possibile crearla da zero.

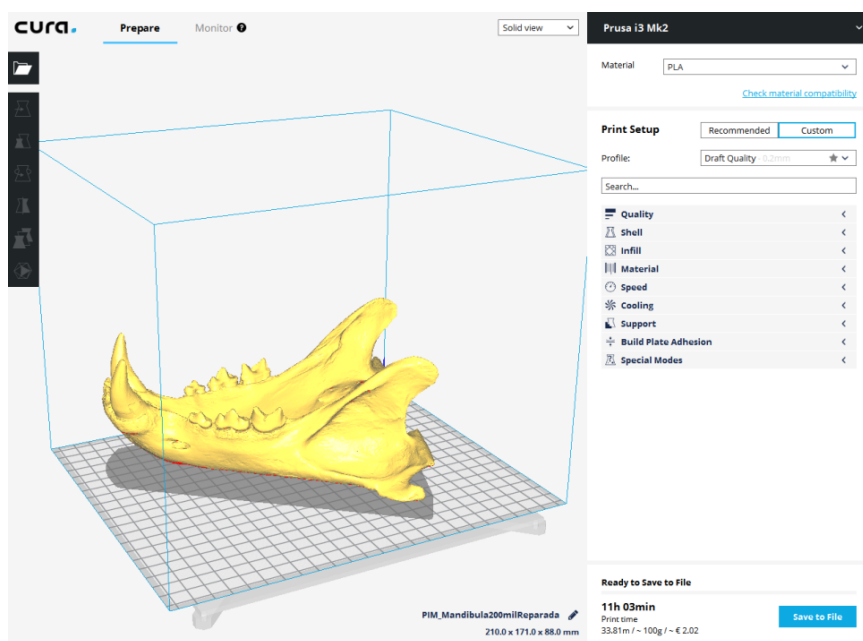


Figura 62: Modello caricato su Cura. [85]

Questo modello è stato ridotto al 60%. 0,2 mm. è la qualità scelta per lo strato. È stato anche selezionato un riempimento della griglia del 15%. Le strutture di supporto sono state generate automaticamente, e per ottenere una buona adesione al primo strato, la "velocità iniziale" è stata impostata su 20 mm / s. Il materiale di stampa scelto è il PLA. Infine, il G-Code è stato salvato sul dispositivo da inserire nella stampante (scheda SD o pendrive) facendo clic su "Salva file"

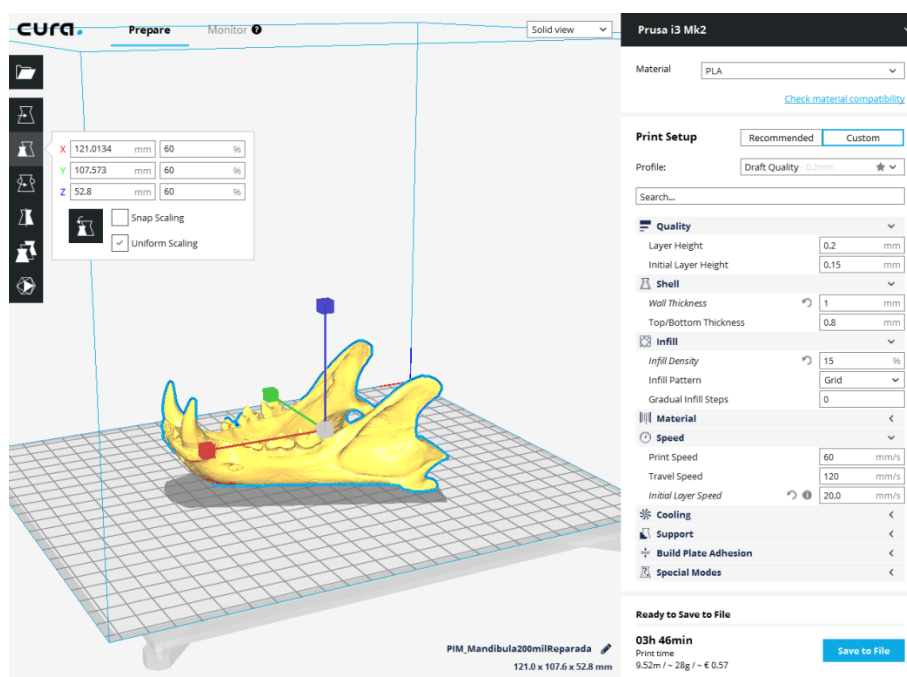


Figura 22: Configurazione e parametri del modello su Cura. [86]

A questo punto, è possibile passare alla fase successiva del processo: La stampa 3D vera e propria. È necessario avvicinarsi alla stampante e dare avvio alla stampa. La macchina verrà lasciata funzionante e si consiglia di controllare di volta in volta, per accertarsi che tutto funzioni correttamente. È fortemente raccomandato controllare che il primo strato abbia aderito correttamente al letto di stampa. In caso contrario vi rimandiamo al link seguente: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#print-not-sticking-to-the-bed>

Ecco la sequenza delle fasi di stampa del nostro prototipo:



Figura 23: Sequenza delle fasi di stampa della mascella. [87]

Il passo successivo è, ovviamente, estrarre il prototipo stampato. Viene utilizzata una spatola con bordi arrotondati, per non graffiare e non danneggiare la piattaforma di stampa.



Figura 24: Processo di estrazione. [88]

Una volta che il pezzo è stato estratto dalla piattaforma, è il momento della fase di post lavorazione, che consiste nel rimuovere manualmente e meccanicamente le strutture di supporto e levigare quelle parti che presentano segni rilasciati dalle strutture di supporto. Il letto di stampa deve essere ripulito correttamente per la stampa successiva.

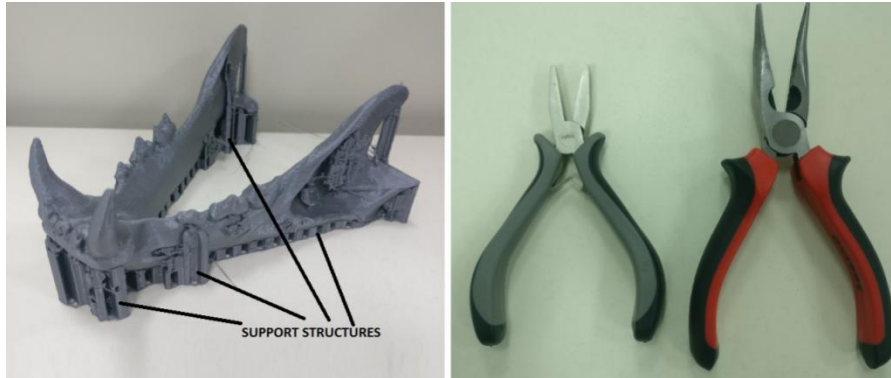


Figura 25: Strutture di supporto and pinze. [89]

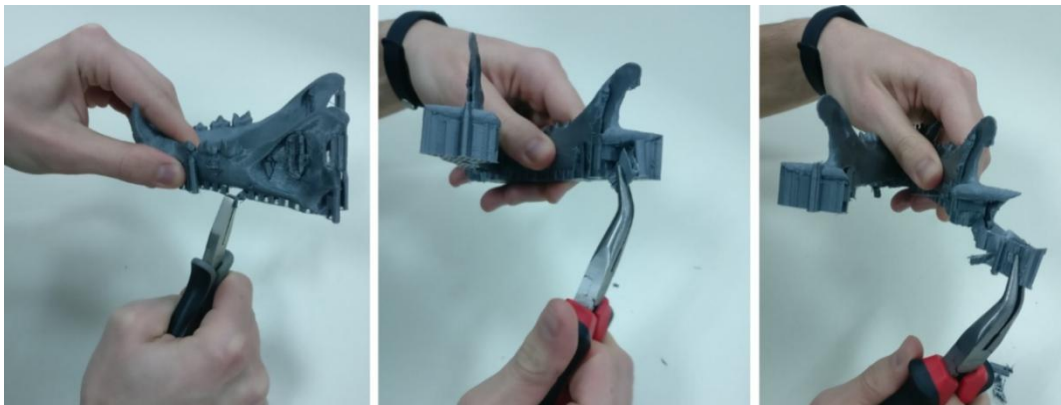


Figura 26: Rimozione delle strutture di supporto. [90]

Come accennato, è opportuno levigare le tracce lasciate dalle strutture di supporto.

Alla fine, il risultato finale del pezzo è il seguente:



Figura 27: Risultato finale. [91]

Se a qualsiasi punto del processo, o a conclusione dello stesso, il risultato non dovesse essere soddisfacente o presentare degli errori, vi consigliamo di consultare il seguente link che vi aiuterà a configurare i parametri di stampa più adeguati.

<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>

Fonti

- [1] Cos'è la Produzione Additiva? *Fonte:* <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>
- [2] Schema 1: processi di produzione industriale. *Fonte:* KIT
- [3] Figura 1: Stampante 3D FDM. *Fonte:* <https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1QzAHNpXXXXXQXXXq6xXFXXb/Geetech-3D-Desktop-Printer-MeCreator-2-DIY-Assembly-Machine-Kit-with-LED-110V-220V-Optional-High.jpg>
- [4] Figura 2: Stampante 3D SLS. *Fonte:* https://www.3dsystems.com/sites/default/files/styles/thumbnail_twothirds_size/public/2017-02/sPro_140_Angle_940px_tn.png?itok=KOJ3Xo_w
- [5] Figura 3: Stampante 3D SLA. *Fonte:* <http://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/images/5630ebfd9a5c4cd48a521dba0ab5c436Formlabs%20Double%20Image.png>
- [6] Come funziona la stampa 3D? *Fonte:* <https://www.createeducation.com/about-us/introduction/>
- [7] Figura 4: Processo di stampa 3D. *Fonte:* KIT
- [8] Figura 5: Prototipi di maschere da sci realizzate con FDM, SLA e SLS (partendo da sinistra). *Fonte:* <https://formlabs.com/de/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>
- [9] Figura 6: Tabella comparativa sulle Tecnologie di Stampa 3D. *Fonte:* STP
- [10] Figura 7: FDM Technology. *Fonte:* <http://todo-3d.com/wp-content/uploads/2017/01/FDM-processo.jpg>
- [11] F. Kunz, A. A. Jorg, L. Chaabane: Innovation Infrastructure & Services. Switzerland Innovation Park Biel. 2017.
- [12] Stampe FDM. 2017. *Fonte:* <https://www.sculpteo.com/en/glossary/fdm-fused-deposition-modeling-definition/>
- [13] Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices. 2013. *Fonte:* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401361300006X>
- [14] Scaffold Design and in Vitro Study of Osteochondral Coculture in a Three-Dimensional Porous Polycaprolactone Scaffold Fabricated by Fused Deposition Modeling. 2004. *Fonte:* <http://online.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/10763270360697012>
- [15] FDM Technology 3D print durable parts with real thermoplastic. 2017. *Fonte:* <http://www.stratasys.com/3d-printers/tecnologie/fdm-technology>
- [16] Units and Size: Understand your 3D Printing Dimensions. 2016. *Fonte:* <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/06/units-and-size-understand-your-3d-printing-dimensions/>
- [17] MODELLAZIONE A DEPOSIZIONE FUSA. 2016. *Fonte:* <http://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/fused-deposition-modeling>
- [18] SINTERIZZAZIONE LASER SELETTIVA. 2017. *Fonte:* https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering#Technology
- [19] How Does Powder-Based 3D Printing Work? 2016. *Fonte:* <https://imaterialise.helpjuice.com/design-printing/powder-based-3d-printing>

- [20] Tecnologia di Stampa 3D/Tipi di stampante 3D: SLS. 2016. Fonte: <https://all3dp.com/types-of-3d-printer-technology-explained/#SLM>
- [21] 3.5 Prototipazione rapida – SINTERIZZAZIONE LASER SELETTIVA (SLS). 2015. Fonte: <http://ibdesigntech.com/3-5-rapid-prototyping-selective-laser-sintering-sls-5/>
- [22] How do Resin (DLP/SLA) 3D Printers Work? 2016. Fonte: <https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/>
- [23] How do Resin (DLP/SLA) 3D Printers Work? 2016. Fonte: <https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/>
- [24] I. Materialise: Advanced Material Properties. 2011.
- [25] Schema 2: IL PROCESSO PRODUTTIVO. Fonte: CETEM
- [26] Figura 14: Modello realizzato con Rhinoceros. Fonte: <https://www.sculpteo.com/es/tutoriales/preparar-su-modelo-para-la-impresion-3d-con-rhinoceros/>
- [27] Figura 15: Processo di ingegneria inversa. Fonte: CETEM
- [28] Figura 16: Esempi di modelli scaricabili da Thingiverse. Fonte: <https://www.thingiverse.com/>
- [29] Figura 17: Come funziona il file STL. Fonte: <https://createc3d.com/wp-content/uploads/2014/12/emendo.png>
- [30] Figura 18: Esportare un file STL con diversi software. Fonte: <https://www.sculpteo.com/en/tools/transferring-3d-file/>
- [31] Figura 19: Analisi dello spessore (1 mm) implementato con Meshmixer. Fonte: CETEM
- [32] Figura 20: Analisi dell'angolo. Fonte: CETEM
- [33] Figura 21: Strutture di supporto. Fonte: CETEM
- [34] Figura 22: Differenti tipologie di strutture di supporto. Fonte: http://www.reppersdelight.spacymen.com/public/RD_images/MeshMixer_support3.jpg
<https://i.ytimg.com/vi/GThbJZZvRFY/maxresdefault.jpg>
https://www.simufact.com/files/Medien/_2Produkte/2.3_Simufact_Additive/Support-settings_more_support.png
- [35] Figura 23: Differenza tra struttura di supporto ottimizzata (sinistra) e non ottimizzata (destra). E' possibile visualizzare la differenza nei tempi di stampa. Fonte: <https://www.3ders.org/images/skin-frame-structure-3d-printing-material-6.png>
- [36] Figura 24: Differenti percentuali di riempimento. Fonte: <http://my3dmatter.com/wp-content/uploads/2015/03/infillpercentimage.png>
<https://3dplatform.com/wp-content/uploads/2015/08/3DP-Infill-Percentage-1024x745.jpg>
- [37] Figura 25: Differenti modelli di riempimento. Fonte: <https://i.ytimg.com/vi/BMWTK2ZgJCM/maxresdefault.jpg>
https://assets.pinshape.com/uploads/image/file/98145/container_display-tray-for-infill-pattern-and-infill-density-3d-printing-98145.jpg
- [38] Figura 26: Qualità diverse di uno stesso oggetto dovute a orientamenti diversi. Fonte: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/print-orientation/photo2.jpg>

- [39] Figura 27: Carico di tensione. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/print-orientation/visual2.png>
- [40] Figura 28: Differenti margini di spessore. *Fonte:* <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/impact-layer-height-3d-print>
- [41] Figura 29: Modelli con spessori diversi. *Fonte:* http://wiki.ikaslab.org/images/thumb/8/8c/Altura_de_capa.jpg/700px-Altura_de_capa.jpg
- [42] Figura 30: Strati di un modello nel dettaglio. *Fonte:* https://i.ytimg.com/vi/KS_6P8tHZ4/maxresdefault.jpg
- [43] Figura 31: Strati e percorso. *Fonte:* <http://domoticx.com/wp-content/uploads/cura-screen.jpg>
- [44] Figura 32: Estrazione. *Fonte:* <https://i.ytimg.com/vi/1T5BdRFICd8/maxresdefault.jpg>
https://d3v5bfco3dani2.cloudfront.net/photo/image/1300x0/58ee1eb0f407c/SDB2017-04-11_0001-61.JPG
- [45] Figura 33: Processo di estrazione SLA. *Fonte:* https://www.3dnatives.com/es/wp-content/uploads/sites/4/SLA_Technology.jpg
- [46] Figura 34: Processo di estrazione SLS. *Fonte:* <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2016/04/Untitled48.png>
<http://www.oceanz.eu/files/original/640/sls-professional-3d-printing-oceanz.jpg>
- [47] Figura 35: Processo di finitura. *Fonte:* https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/fdm_post_processing/photo2.png
- [48] Figura 36: Processo meccanico. *Fonte:* https://formlabs.com/media/upload/_thumbs/Removing_Supports_copy.jpg.895x0_q80_crop-smart.jpg
- [49] Figura 37: Rimozione dei supporti in materiale solubile tramite immersione. *Fonte:* <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/07/rinse3.png>
- [50] Figura 38: Tipologie differenti di finitura. *Fonte:* <https://hackadaycom.files.wordpress.com/2013/02/rap.jpg?w=580>
- [51] Schema 3: IL PROCESSO PRODUTTIVO. *Fonte:* [CETEM](#)
- [52] Figura 39: Fasi di sviluppo del modello 3D. *Fonte:* [KIT](#)
- [53] Tabella 1: Breve descrizione dei software di progettazione 3D. *Fonte:* [KIT](#)
- [54] Tabella 2: Software di scansione 3D. *Fonte:* [KIT](#)
- [55] Tabella 3: Software di Verifica, Orientamento e Riparazione di un Modello 3D. *Fonte:* [KIT](#)
- [56] Figura 40: Repairing a STL file. *Fonte:* [KIT](#).
- [57] Figura 41: G-Code con Slic3r. *Fonte:* [KIT](#).
- [58] Figura 42: Aprire un modello 3D con Slic3r. *Fonte:* [KIT](#).
- [59] Figura 43: Interfaccia di Netfabb Premium. *Fonte:* [KIT](#).
- [60] Figura 44: Diagramma Processo di Stampa 3D *Fonte:* [KIT](#).
- [61] Print Materials. 2017. *Fonte:* <https://www.3dhubs.com/Materiali>

- [62] How will 3D printing make your company the strongest in the value chain?. 2006. *Fonte:* [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-fullreport/\\$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-fullreport/$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf)
- [63] Figura 45: Materiali impiegati nella stampa 3D (%). *Fonte:* [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-fullreport/\\$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-fullreport/$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf)
- [64] Spiegazione del grafico. *Fonte:* [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-fullreport/\\$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-fullreport/$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf)
- [65] Stampa 3D Trends Q4/2017. 2017. *Fonte:* <https://f.3dhubs.com/yZgXoWzB88BhMHwG9fo3mV.pdf>
- [66] Trends sui filamenti per stampare in 3D: Novembre 2017. *Fonte:* <https://www.filaments.directory/en/trends>
- [67] Mattoncini Lego in ABS. I Successi della stampa in ABS 2017. *Fonte:* <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-with-abs>
- [68] Resina verniciabile. 2016. *Fonte:* <http://3dprintedinstruments.wikidot.com/Materiali#toc24>
- [69] Limiti della stampa 3D. *Fonte:* http://informecotec.es/media/N30_Fabric_Aditiva.pdf
- [70] Tabella 4: Tabella Comparativa. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-for-3d-printing/3d-printing-design-rules.jpg>
- [71] Figura 49: Parti di prototipo stampato con tecnologia FDM dalla superficie irregolare a seguito della rimozione del supporto. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/photo14.jpg>
- [72] Figura 50: Variazione con software vs. il diametro effettivo dei fori verticali dovuti alla compressione del profilo estruso. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual20.png>
- [73] Figura 51: Effetto di un aumento dell'angolo di sbalzo (incremento di 5 gradi) sulla qualità di stampa. L'ampiezza massima raffigurata è di 70 gradi. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/photo13.jpg>
- [74] Figura 52: Vista laterale di componente con effetto zampa di elefante che si verifica sullo strato di base di stampa FDM. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual6.png>
- [75] Figura 53: Prototipo di perno cilindrico filettato con diametro decrescente (da 25 a 5mm) con estremità superiore troppo piccola per la stampa. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/photo15.jpg>
- [76] Figura 54: Sezionare il modello per evitare l'utilizzo di strutture di supporto. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual10.png>
- [77] Figura 55: Riposizionamento del foro sull'asse orizzontale per evitare l'utilizzo di supporto. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual18.png>
- [78] Figura 56: Direzione di stampa. *Fonte:* <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual13.png>

- [79] Figura 57: Strati con raggio. *Fonte: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual9.png>*
- [80] How to design parts for FDM 3D Printing. *Fonte: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing>*
- [81] Figura 58: Modello digitale, risultato della scansione 3D. *Fonte: CETEM*
- [82] Figura 59: Posizionamento del modello con Meshmixer. *Fonte: CETEM*
- [83] Figura 60 Analisi generale con Meshmixer. *Fonte: CETEM*
- [84] Figura 61: Mascella riparata tramite software. *Fonte: CETEM*
- [85] Figura 62: Modello caricato su Cura. *Fonte: CETEM*
- [86] Figura 63: Configurazione e parametri del modello su Cura. *Fonte: CETEM*
- [87] Figura 64: Sequenza delle fasi di stampa della mascella. *Fonte: CETEM*
- [88] Figura 65: Processo di estrazione. *Fonte: CETEM*
- [89] Figura 66: Strutture di supporto e pinze. *Fonte: CETEM*
- [90] Figura 67: Rimozione delle strutture di supporto. *Fonte: CETEM*
- [91] *Figura 68: Risultato finale. Fonte: CETEM*