

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**Scuola di ingegneria e architettura
Sede di Forlì**

Corso di Laurea Magistrale in

INGEGNERIA MECCANICA

Classe LM-33 ELABORATO FINALE DI LAUREA

in Metodi di Progetto per L'Ingegneria Industriale

**DESIGN GENERATIVO E STAMPA 3D
DI UN DISPOSITIVO HANDS-FREE
PER L'APERTURA DELLE PORTE**

CANDIDATO

Engjell Asllani

RELATORE

Prof.ssa Francesca De Crescenzo

CORRELATORE

Prof. Massimiliano Fantini

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. OBIETTIVI E PROCESSO DI LAVORO	2
1.1 COVID-19 E OBIETTIVI	2
1.2 PROCESSO DI LAVORO	6
1.2.1 Processo di digitalizzazione	8
1.2.2 Processo di progettazione generativa	9
1.2.3 Processo di produzione additiva	10
2. REVERSE ENGINEERING	12
2.1 TECNICHE DI DIGITALIZZAZIONE 3D	13
2.1.1 Digitalizzazione di tipo Tattile	13
2.1.2 Digitalizzazione di tipo non-tattile	15
2.2 SISTEMA OTTICO SENSE 3D SCANNER.....	23
2.2.1 Caratteristiche tecniche	25
2.3 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI DIGITALI	26
3. DESIGN GENERATIVO	36
3.1 DEFINIZIONE	36
3.2 PROGETTAZIONE	39
3.3 VANTAGGI DEL GD.....	40
3.4 RAPPRESENTAZIONI E METODI GENERATIVI	41
3.5 LA MODELLAZIONE PARAMETRICA.....	42
3.5.1 Features o lavorazioni.....	44
3.5.2 Le quattro operazioni fondamentali della modellazione 3D	46
3.5.3 Operazioni booleane	51
3.6 SOFTWARE GRASSHOPPER	55
3.6.1 L'interfaccia.....	56
3.6.2 Oggetti Grasshopper	59
3.6.3 Parti di un componente	60
3.7 COMPONENTI E PARAMETRI PRINCIPALI UTILIZZATI NELLA CREAZIONE DELL'ALGORITMO	61
3.8 FASE DI CREAZIONE DELL'ALGORITMO	67
4. STAMPA 3D	84
4.1 CENNI STORICI	84
4.2 PROCESSO DI PRODUZIONE	85

4.3 METODI DI STAMPA 3D	86
4.3.1 Polimerizzazione attraverso la luce	86
4.3.2 Stereolitografia (SLA)	87
4.3.3 Digital Light Processing (DLP)	88
4.3.4 PolyJet (PJ)	90
4.3.5 Drop on demand (DOP).....	91
4.3.6 Multi-Jet Modeling (MJM).....	92
4.3.7 Estrusione di filamenti.....	93
4.3.8 Fused Deposition Modeling (FDM)	94
4.3.9 Stratificazione di fogli	95
4.3.10 Laminated Object Manufacturing (LOM)	95
4.3.11 Unione di materiale in granuli	96
4.3.12 Selective Laser Sintering (SLS)	97
4.3.13 Plaster-based 3D Printing (PP).....	98
4.3.14 Selective Heat Sintering (SHS)	99
4.3.15 Selective Laser Melting (SLM)	99
4.3.16 Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	100
4.3.17 Electron Beam Melting (EBM)	100
4.3.18 3D Printing	101
4.4 MATERIALI E PROCESSATI.....	102
4.4.1 Metalli.....	103
4.4.2 Plastica.....	104
4.4.3 Cera.....	106
4.4.4 Ceramica.....	107
4.5 PROCESSO DI STAMPA.....	108
4.5.1 Parametri di processo in FDM.....	108
4.5.2 Problemi di qualità in FDM.....	109
4.5.3 Stampante Fortus 250mc	111
4.5.4 ABSplus Data Sheet	113
4.5.5 Software Insight e stampa 3D.....	114
4.5.6 Costi.....	129
5. CONCLUSIONI.....	132
BIBLIOGRAFIA	134
SITOGRAFIA	137

INTRODUZIONE

La pandemia cosiddetta “da nuovo coronavirus” (COVID-19) che ha colpito l’Italia ha obbligato la popolazione ad imparare a convivere con questo virus altamente contagioso e misterioso. Le poche evidenze che si hanno in letteratura in merito al COVID-19 sono concordi nell’affermare che una delle principali fonti di contagio siano le superfici infette come, ad esempio, le maniglie delle porte. Si provi a pensare alle maniglie di un bagno di un centro commerciale e a quante volte vengono toccate da una moltitudine di persone differenti. Se sfortunatamente un soggetto infetto tocca la maniglia e successivamente un altro individuo ne entra in contatto e si porta le mani infette alle mucose del viso, la probabilità che sia stato contagiato è molto alta.

Per tali motivi, si è pensato di creare un dispositivo in grado di adattarsi a maniglie di diverse dimensioni e che permetta di aprire le porte senza contatto diretto con le mani (hands-free).

Per la generazione di questo dispositivo sono state utilizzate delle tecnologie digitali, come Reverse Engineering (RE), Generative Design (GD) e Additive Manufacturing (AM). L’obiettivo principale del presente elaborato è quello di sviluppare e sperimentare una metodologia per la creazione semiautomatica e la produzione del dispositivo hands-free a partire da una scansione 3D delle maniglie.

Questo processo utilizza in primis la tecnologia RE che permette di generare un modello digitale della maniglia scelta. Successivamente entra in gioco il Generative Design con la creazione di un algoritmo semi-automatico, che permette di creare una versione personalizzata del dispositivo ultimato e pronto per la stampa 3D (AM).

Tale elaborato consta di diverse parti. Il primo capitolo fornisce delle spiegazioni necessarie per chiarire il rationale dell’obiettivo alla base della redazione della presente tesi. Nei tre capitoli successivi sono presentate nel dettaglio le tre tecnologie digitali precedentemente citate (RE, GD e AM) e il processo di lavoro che le ha viste protagoniste.

Infine, vengono riportate le conclusioni tratte dai risultati emerse dall’utilizzo di questa metodologia di lavoro.

1. OBIETTIVI E PROCESSO DI LAVORO

1.1 COVID-19 E OBIETTIVI

Il Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) è nuovo ceppo di coronavirus che per la prima volta è stato identificato nell'uomo; COVID-19 è invece il nome dato alla malattia associata al virus. Questo microorganismo è arrivato nelle nostre vite e si è diffuso improvvisamente a macchia d'olio cogliendo impreparati il sistema sanitario e il comitato scientifico.

Rapidamente, quella che inizialmente pareva essere un'epidemia è diventata una pandemia, così che il 30 gennaio 2020, in seguito alla segnalazione da parte della Cina (31 dicembre 2019) di un cluster di casi di polmonite ad eziologia ignota (poi identificata come un nuovo coronavirus Sars-CoV-2) nella città di Wuhan, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha dichiarato emergenza di sanità pubblica di interesse internazionale l'epidemia di coronavirus in Cina. Il giorno successivo il Governo italiano, dopo i primi provvedimenti cautelativi adottati a partire dal 22 gennaio, tenuto conto del carattere particolarmente diffusivo dell'epidemia, ha proclamato lo stato di emergenza e messo in atto le prime misure di contenimento del contagio sull'intero territorio nazionale.

Le misure si basavano su ipotesi portate avanti da scienziati che per la prima volta si sono trovati di fronte ad un virus di questo tipo. Ad oggi, nonostante gli sforzi fatti in ambito scientifico, non si conoscono ancora con assoluta certezza le vie di trasmissione del virus. Tuttavia, in letteratura si evidenziano studi che affermano che la diffusione è facilitata dal contatto personale diretto, goccioline, mani o superfici contaminate (Chan et al., 2020) ed esperimenti di laboratorio hanno dimostrato che SARS-CoV-2 può rimanere negli aerosol per ore e sulle superfici addirittura per giorni (Van Doremalen et al., 2020). In particolare, da uno studio condotto da Razzini et al., (2020) che ha valutato la contaminazione dell'aria e delle superfici, si evince che tra le aree più contaminate ci sono le maniglie delle porte (25% del totale).

Come dimostrato dallo studio di Wojgani et al., (2012), le maniglie delle porte sono punti critici da considerare in quanto vettore dell'infezione, addirittura nello studio di Wan et al., (2020) condotto in un ospedale, è emerso che la carica virulenta individuata sulla maniglia è indice della gravità dell'infezione nel reparto.

Vista l'alta contagiosità del virus e la facile trasmissibilità attraverso le superfici, emerge l'importanza dell'igiene delle mani in quanto potrebbe interrompere il ciclo derivante dal tocco di aree contaminate (Lai et al., 2020). Come affermato dall'OMS (OMS, 2020) infatti, l'igiene delle mani è una misura importante per proteggere i pazienti, gli operatori sanitari e la popolazione in generale dalla contaminazione.

A sostegno dell'importanza di questa azione, emerge uno studio di osservazione comportamentale che coinvolgeva gli studenti di medicina di un'Università nel New South Wales. La ricerca si basa sull'analisi della quantità di volte in cui questi alunni si toccano il viso con le mani. Utilizzando fogli di punteggio standardizzati, è stata calcolata e analizzata la frequenza dei contatti corpo a corpo con aree mucose o non mucose.

In media, ciascuno dei 26 studenti osservati si è toccato il viso 23 volte all'ora. Di tutti i tocchi del viso, il 44% (1.024 / 2.346) ha coinvolto il contatto con una membrana mucosa. Di questi tocchi, il 36% (372) ha coinvolto la bocca, il 31% (318) ha coinvolto il naso, il 27% (273) ha coinvolto gli occhi e il 6% (61) era una combinazione di queste regioni.

Questo studio è molto importante in quanto evidenzia la facilità con cui ci possiamo contagiare solo attraverso il contatto con superfici infette. Le infezioni possono essere infatti trasmesse per auto-inoculazione che è un tipo di trasmissione da contatto in cui una persona con le mani contaminate tocca altre aree del corpo introducendo così del materiale contaminato in quei siti. Data l'alta contagiosità del COVID-19 si può quindi affermare che l'igiene delle mani è un metodo preventivo essenziale ed economico per interrompere il ciclo di colonizzazione e trasmissione associato all'auto-inoculazione.

Questo perché, come dimostrato da diversi studi, il SARSCoV-1 può sopravvivere sulle superfici per lunghi periodi (Kampf et al., 2020; Otter et al., 2016).

In particolare, lo studio condotto da (citazione) analizza i residui di SARS-CoV-2 RNA sulle superfici degli oggetti in un ospedale, attraverso il metodo PCR a goccioline, evidenziando che la più alta concentrazione di SARS-CoV-2 proveniva dai guanti esterni dell'operatore A (37,4 copie / cm²) e dalla maniglia della porta (26,25 copie / cm²).

In conclusione, dai diversi studi presenti nella letteratura scientifica emerge come l'alta contagiosità del COVID-9 sia permessa soprattutto dal contatto diretto con superfici contaminate e in particolare le maniglie delle porte che sono aree che, soprattutto in edifici pubblici, quotidianamente vengono toccate da una moltitudine di persone e che pochi puliscono. Per questo le maniglie più critiche saranno, come sempre, quelle dei

servizi igienici, ma ancor di più rilevanti sono da considerare quelle nelle entrate, spesso dimenticate, ma che tutti per forza devono toccare per accedere all'interno di un ambiente. Per questi motivi e data la situazione di emergenza che ancora oggi il nostro Paese si trova a dover affrontare, la mia tesi ha l'obiettivo di ridurre la possibilità che il virus COVID-19 si trasmetta con così tanta facilità creando dei dispositivi che permettano a tutti noi di poter aprire e chiudere le porte senza dover direttamente toccarle con le mani. In questa situazione pandemica, i sistemi sanitari sono stati messi sotto stress e la domanda di dispositivi di protezione individuale (DPI) ha superato le capacità di consegna dei fornitori. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha stimato che per soddisfare la domanda globale dell'attuale crisi, le industrie dovrebbero aumentare i loro attuali livelli di produzione del 40%. Tuttavia, la copertura di questa maggiore domanda è ostacolata da molti fattori (come il lavoro da casa o il congedo) creando così un ampio divario tra la domanda e l'offerta. Per risolvere questo problema, la stampa 3D è stata identificata come una possibile soluzione. L'industria per la produzione additiva (AM) o stampa 3D si è evoluta rapidamente negli ultimi anni portando un numero sempre più crescente di aziende ad adottare tale tecnologia. Tutto ciò ha creato l'opportunità per la comunità AM di intensificarsi e cercare di soddisfare le richieste locali. Differenti movimenti sono nati in tutto il mondo da laboratori universitari, aziende, nonché singoli hobbisti e produttori, per fornire agli ospedali locali e ai dipartimenti di emergenza i DPI richiesti.

Nel caso della crisi COVID-19, i principali prodotti per la stampa 3D erano: fasce per la visiera, valvole per respiratori e cinturini per maschere chirurgiche. Tuttavia, grazie a questa tecnologia ogni giorno nascono nuove proposte (che vanno oltre i semplici dispositivi di protezione individuale) per far fronte alla pandemia. In accordo con questa affermazione, il principale scopo di questo elaborato è illustrare il processo e la creazione di un algoritmo in grado di produrre semi-automaticamente un dispositivo hands-free utile all'apertura di svariate tipologie di porte.



Fig. 1.1 Dispositivo Hands-free

Il virus è noto per sopravvivere 72 ore su superfici di plastica e acciaio inossidabile. Per questo motivo sono state identificate le porte come potenziali zone di contaminazione e si è deciso di procedere alla creazione di un dispositivo touch-less o hands free sulla base di studi recenti che valutano la contaminazione virale di varie superfici di maniglie in ospedali, centri commerciali, università etc. Gli apriporta hands free sono stati definiti come dispositivi fissati alle maniglie delle porte e attivati utilizzando l'avambraccio o il gomito. Il design del dispositivo deve consentire alla maniglia della porta di ruotare per rilasciare il fermo e per consentire all'utente di aprire e chiudere la porta. Questo dispositivo ha dei prerequisiti essenziali quali: la facilità d'installazione e di pulizia ma soprattutto la rapidità della produzione. Vista la grande varietà di maniglie delle porte negli ospedali, nelle scuole e negli edifici statali, il dispositivo sarà "adattivo" fin dalla fase di generazione e non è quindi legato ad una particolare geometria ma se ne possono generare istanze nuove per ogni modello di maniglia.

Diversi sono i vantaggi della tecnologia 3D, in particolare, un aspetto importante è il suo breve tempo di risposta, requisito essenziale soprattutto in questo periodo di pandemia. Grazie alla sua capacità di stampare una parte funzionale direttamente da un modello CAD (Computer Aided Design) esistente, il tempo di consegna (lead time) è breve rispetto alle tecniche di produzione tradizionali.

Il lead time è dovuto principalmente alla preparazione delle singole impostazioni di stampa e all'impostazione della stampante stessa. L'enorme varietà di materiali di stampa 3D disponibili semplifica la selezione del materiale appropriato per una specifica applicazione, inoltre la stampa può essere eseguita con uno spreco di materiale minimo o addirittura nullo, il che rende la stampa 3D un'alternativa ecologica ai metodi di produzione sottrattiva.

Un altro vantaggio della produzione additiva (AM) è la sua capacità di stampare parti complesse direttamente in un unico passaggio invece di dover assemblare le singole parti dopo la produzione. Le caratteristiche definite come la resistenza meccanica possono essere direttamente influenzate dalla scelta del materiale, dalla densità e dal modello di riempimento e da molti parametri aggiuntivi. Poiché questi possono essere modificati

dopo ogni parte prodotta, le routine di ottimizzazione sono molto più veloci rispetto alla produzione tradizionale.

Tuttavia, si segnalano anche alcuni svantaggi che limitano la diffusione di questo approccio. In primo luogo, l'investimento richiesto per i dispositivi necessari per RE e AM (scansione laser 3D e stampante 3D) potrebbe essere considerevole. Fortunatamente negli ultimi anni abbiamo assistito alla proliferazione di molti produttori di scanner laser 3D e stampanti 3D, determinando così una significativa riduzione dei costi di questi dispositivi. Anche nel caso dei processi di progettazione gli strumenti e i metodi si stanno rapidamente evolvendo da CAD (Computer Aided Design) a Generative Design (GD) che consente all'utente di ottenere risultati di progettazione complessa mediante un processo di modellazione semi-automatica e di personalizzare i modelli risultanti mediante la modifica di alcuni parametri.

Per questi motivi, questo elaborato mira a combinare l'uso di dispositivi a basso costo per la scansione laser 3D e la stampa 3D con un approccio di modellazione semiautomatica per valutare la fattibilità di una soluzione economica per il processo di progettazione-produzione di dispositivi per il distanziamento sociale. Il flusso di lavoro derivato dal Generative Design (GD) è stato sviluppato per consentire agli utenti senza sufficienti competenze CAD di progettare facilmente e personalizzare interattivamente i dispositivi per maniglie.

1.2 PROCESSO DI LAVORO

L'obiettivo di questo elaborato è quello di dimostrare i vantaggi della progettazione e produzione di dispositivi per il distanziamento sociale personalizzati mediante tecnologie digitali, come Reverse Engineering (RE), Generative Design (GD) e Additive Manufacturing (AM).

In questo lavoro viene definito il processo completo di progettazione-fabbricazione, a partire dalla scansione 3D delle maniglie fino alla produzione diretta del dispositivo personalizzato. La tipologia di maniglie scelta è quella a leva. Tale scelta è stata fatta in quanto questo tipo di maniglie è quello più comune e riconosciuto. In particolare, nelle foto sottostanti vengono mostrate le maniglie scelte per lo scopo di questo elaborato. Tali maniglie sono quelle presenti in maggior numero all'interno della facoltà di Ingegneria

di Forlì. Le due tipologie di maniglie scelte verranno nominate come: “tipologia 1” per la maniglia della porta tagliafuoco situata sul lato opposto all’apertura a spinta e “tipologia 2” per la maniglia di porte convenzionali.



Fig. 1.2 Immagini delle maniglie selezionate per il processo: “tipologia 1” a sinistra e “tipologia 2” a destra.

Questo studio metodologico cerca inoltre di combinare un approccio di modellazione semi-automatica con l'uso di dispositivi a basso costo per la scansione laser 3D e i processi di stampa 3D.

Tale approccio di progettazione e produzione è un metodo alternativo per superare certe limitazioni di tempistica, costo e personalizzazione. L'intera metodologia può essere suddivisa in tre processi principali:

- 1) Preparazione della superficie della maniglia per la scansione laser 3D e creare una nuvola di punti completa della stessa;
- 2) Elaborazione dei dati per generare il modello 3D del dispositivo desiderato adatto alla maniglia in oggetto;
- 3) Produzione del dispositivo funzionale personalizzato utilizzando una stampante 3D.

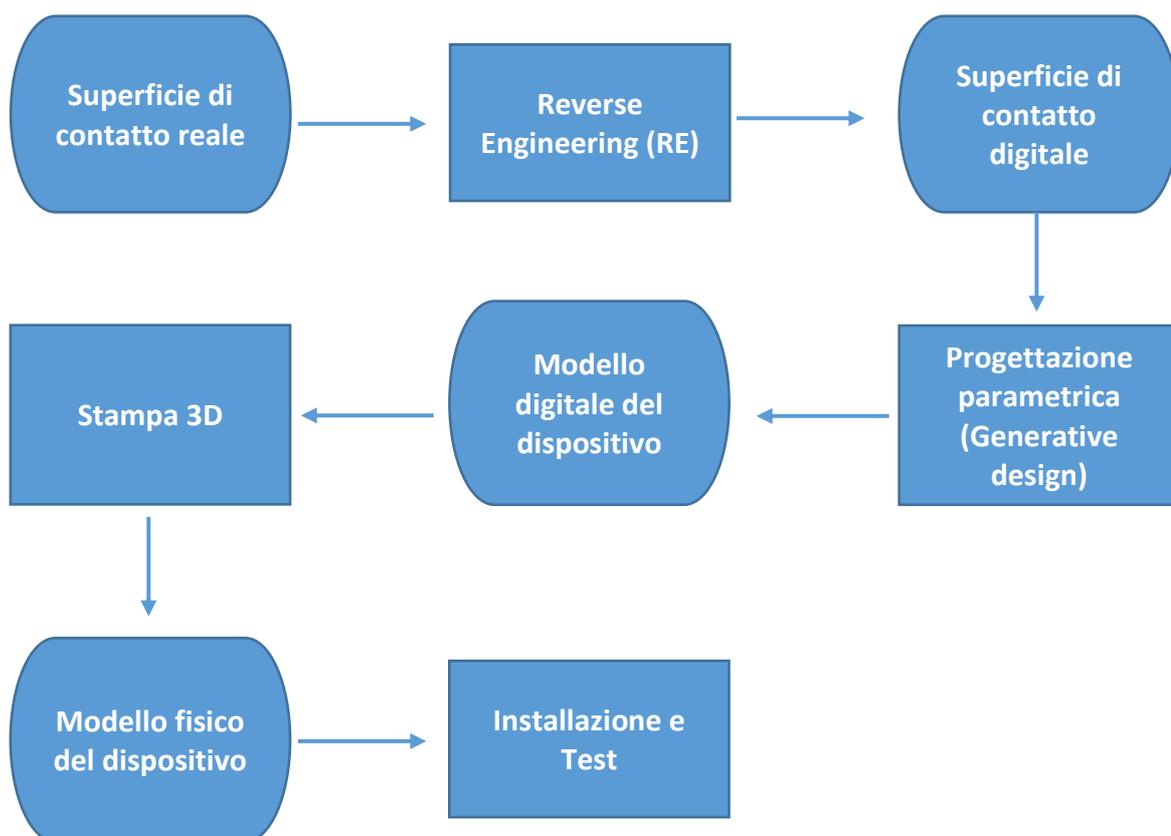


Fig. 1.3 Flowchart del processo di lavoro

1.2.1 Processo di digitalizzazione

Il processo di digitalizzazione è stato eseguito mediante un dispositivo di acquisizione laser: lo scanner 3D Sense (3D Systems, Rock Hill, South Carolina, USA). Si tratta di un dispositivo portatile a basso costo che proietta un motivo sull'ambiente circostante utilizzando un laser a infrarossi.

Il metodo di scansione permette di ottenere la nuvola di punti che successivamente viene trasformata in mesh. Essa viene elaborata e modificata all'interno del software dedicato allo scanner in modo da ottenere una scansione focalizzata solo sulla parte interessata della maniglia che viene utilizzata per il successivo processo di progettazione.

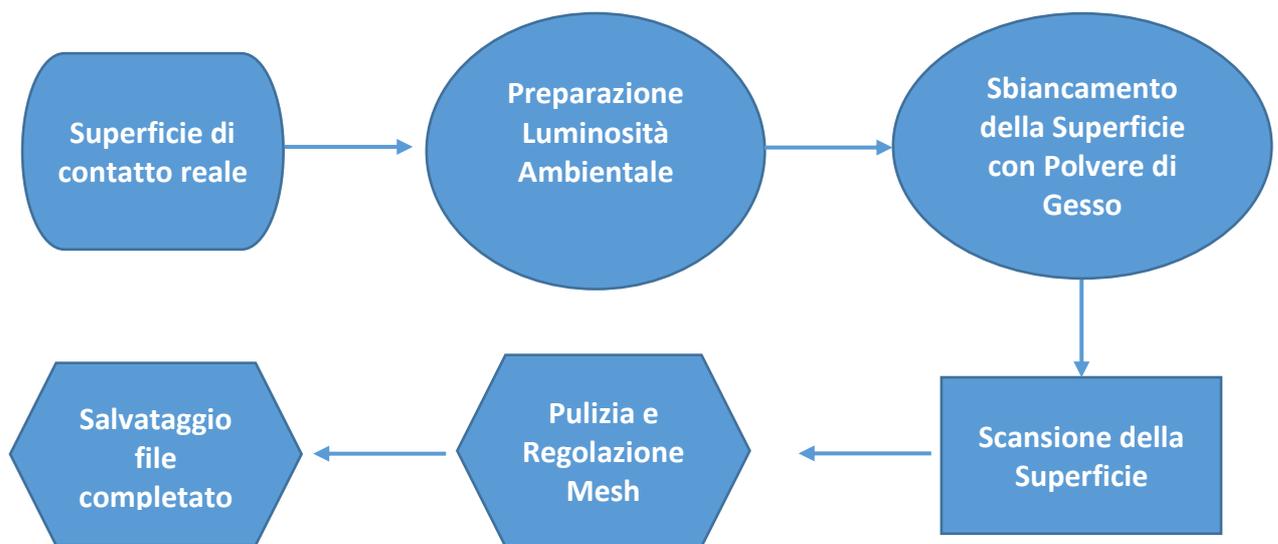


Fig. 1.4 *Flowchart* del processo di digitalizzazione

1.2.2 Processo di progettazione generativa

Il Generative Design consente la generazione di un numero infinito di forme che seguono regole specifiche, poiché GD non si tratta di progettare una forma, ma di progettare il processo che costruisce la forma. Questo approccio consente di ottenere complesse attività di progettazione mediante un processo di modellazione semiautomatico e di personalizzare i modelli geometrici risultanti modificando in modo interattivo determinati parametri.

Grasshopper è l'editor grafico dell'algoritmo, completamente integrato con Rhinoceros, il quale è concepito per creare geometrie 3D parametriche trascinando i componenti su un'interfaccia tabs-canvas e quindi visualizzare i risultati della modellazione all'interno dell'ambiente CAD 3D di Rhinoceros.

Pertanto, per quanto riguarda il processo di progettazione, invece di avere un approccio di modellazione CAD classico, abbiamo formalizzato un flusso di lavoro GD che contiene le regole per generare il dispositivo desiderato per tutte le tipologie di maniglie a leva. Inoltre, questo metodo consente di modificare interattivamente le caratteristiche geometriche spostando semplicemente i cursori del pannello di controllo, e producendo in modo semiautomatico il dispositivo pronto per la successiva Stampa 3D. Nel flusso di

lavoro GD, i dati di input sono la *mesh* della maniglia e 2 punti che devono essere contrassegnati dall'operatore sulla superficie della maniglia stessa. Questa è l'unica attività richiesta, poiché questi due punti consentono l'avvio del processo automatico di progettazione.

1.2.3 Processo di produzione additiva

Per quanto riguarda il processo AM, il dispositivo è stato realizzato mediante una stampante 3D, basata sulla tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM). Questa tecnologia consente di costruire parti riscaldando ed estrudendo un filamento termoplastico. In generale, l'intero processo è suddiviso in tre fasi:

1. Pre-elaborazione: il software di preparazione alla stampa 3D orienta e seziona la Mesh (in formato STL), definisce l'eventuale materiale di supporto necessario e calcola il percorso di estrusione del filamento termoplastico.
2. Produzione: la stampante 3D riscalda il filamento termoplastico a uno stato semi-fuso e lo deposita strato dopo strato lungo il percorso di estrusione. Dove necessario, la stampante 3D deposita anche un materiale rimovibile (solubile) che funge da supporto per la parte di supporto.
3. Post-elaborazione: l'utente rompe l'eventuale materiale di supporto o, se solubile, lo scioglie in un bagno di solvente, per ottenere il pezzo pronto all'uso.

Il dispositivo è stato prodotto in ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) mediante Fortus 250mc (Stratasys Inc., Eden Prairie, MN, USA). La pre-elaborazione è stata eseguita da Insight, il software di gestione ed elaborazione di pre-stampa di Stratasys (Stratasys Inc., Eden Prairie, MN, USA). Questo sistema (circa 40.000 €) è provvisto di due ugelli di estrusione e lavora con materiale di supporto solubile per una post-lavorazione di rimozione in SCA-1200HT (Support Cleaning Aparatus) con un solvente che scioglie il materiale di supporto e permette di ottenere facilmente il pezzo finale.

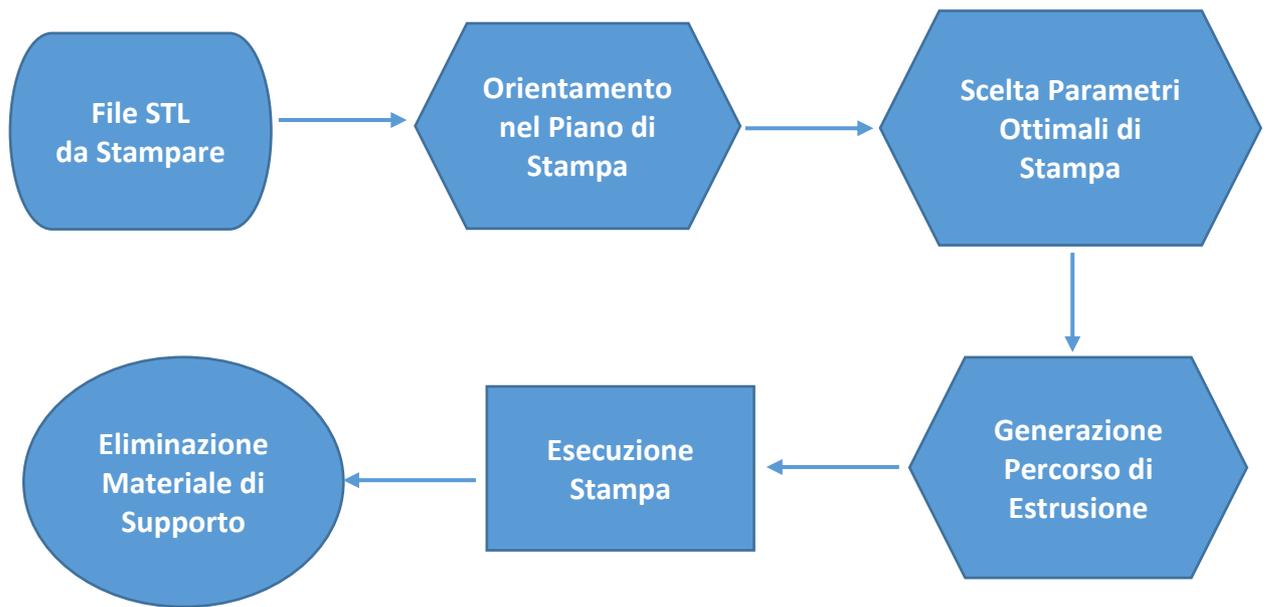


Fig. 1.5 Flow-chart del processo di Stampa 3D

2. REVERSE ENGINEERING

Le tecnologie per l'acquisizione di dati tridimensionali hanno iniziato a suscitare molto interesse grazie alla creazione dei sistemi ottici di digitalizzazione 3-D ovvero di Scanner 3-D che consentono di ricostruire digitalmente un oggetto reale rimanendo fedeli alla sua forma e alle sue caratteristiche.

La disciplina che consente di realizzare questo processo è la Reverse Engineering (R.E. Ingegneria Inversa), la quale permette di ottenere da un oggetto fisico un modello matematico tridimensionale facilmente gestibile dai moderni *softwares* CAD/CAM.

La possibilità di creare “modelli digitali 3D” di oggetti reali è di fondamentale importanza soprattutto in quei settori a forte componente progettuale oltre che nei settori della bioingegneria e del design industriale.

L'evoluzione nella metodica di creazione di modelli 3D che si è recentemente osservata ha permesso di superare alcuni obiettivi considerati ormai “arcaici” quali: la “compressione dei costi di progettazione” o il “*time-to-market*”. Proprio per questo motivo si può affermare che lo sviluppo delle tecnologie ottiche per la digitalizzazione tridimensionale, sta rivoluzionando le modalità di approccio nell'elaborazione e nella gestione dei “modelli digitali 3D”.

Infatti, attraverso queste tecnologie è possibile avere un controllo sulle variabili di progetto, nuove opportunità di testare e identificare i problemi prima e durante il ciclo stesso della progettazione (invece che alla sua conclusione) e la possibilità di ispezionare qualitativamente un prototipo prima della fase della produzione.

Il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale della facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna con sede a Forlì già da alcuni anni impegna risorse nella ricerca in merito alle varie fasi della progettazione assistita di strutture meccaniche ed in particolar modo alla Reverse Engineering (settore d'avanguardia) applicata ai sistemi ottici di digitalizzazione 3D.

Nel settore della digitalizzazione tridimensionale il panorama hi-tech offre una vasta scelta di sistemi ad alte prestazioni che utilizzano procedure di rilevazione a contatto o senza contatto. I sistemi a contatto sono caratterizzati da lunghi e complessi processi di acquisizione punto-punto delle superfici mentre le tecnologie ottiche sono più rapide e

dinamiche in quanto permettono la rilevazione digitale 3D a campo intero di una superficie con sensibile riduzione dei tempi di scansione.

L'attività svolta in questa tesi presenta l'utilizzo di un sistema a basso costo per l'acquisizione 3D senza contatto utilizzato per la creazione di modelli tridimensionali di tutte le tipologie di maniglie per permettere l'apertura senza contatto diretto delle diverse tipologie di porte facenti parte della facoltà di Ingegneria di Forlì.

2.1 TECNICHE DI DIGITALIZZAZIONE 3D

Il processo di acquisizione è il primo step del metodo di R.E. il quale risulta essere la fase più importante, poiché interessa direttamente la qualità dei dati rilevati e l'accuratezza del modello CAD ottenuto nell'ultimo step. Questo processo deve anche garantire un tempo di risposta rapido per diventare un prodotto appetibile nel mercato attuale il quale diventa sempre più esigente.

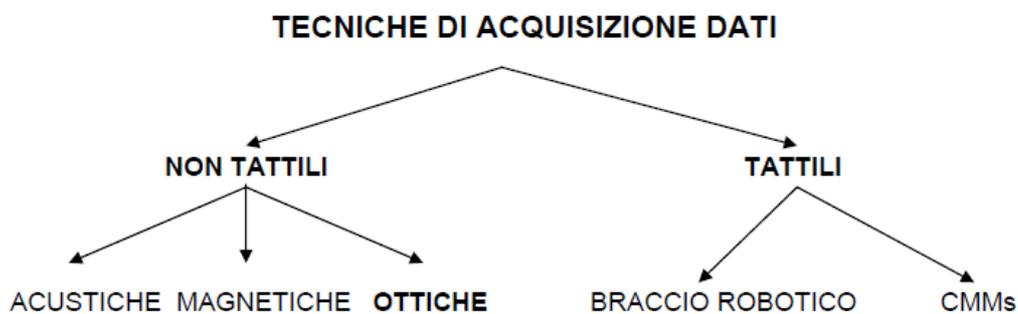


Fig. 2.1 Tecniche di acquisizione 3D

2.1.1 Digitalizzazione di tipo Tattile

Le tecniche di acquisizione digitale di forme, sulle quali la R.E. si appoggia, possono complessivamente essere suddivise in due tipologie: la tecnica tattile e la tecnica senza contatto. Nella prima, la superficie dell'oggetto viene rilevata da un tastatore meccanico montato sulla parte terminale di un braccio robotico ed utilizzato anche sulle macchine di misura a coordinate (CMMs) mentre la seconda è basata su scansioni ottiche, acustiche e magnetiche.

Queste due differenti tecniche di acquisizione hanno alcune differenze sostanziali:

In primis, i sistemi a contatto in fase di acquisizione dei dati, hanno un'accuratezza pari a $0.5\mu\text{m}$ contro i $10\mu\text{m}$ delle tecnologie ottiche; ciò dipende dal fatto che la rilevazione della superficie reale viene eseguita punto-punto, quindi secondo processi molto lunghi e complessi caratterizzati da basse velocità di digitalizzazione.

In conseguenza a ciò, la mole di dati ottenuta, a parità di tempo, risulta essere inferiore, anche se più accurata e caratterizzata da una ripetibilità di misura superiore.

Altra differenza è che il braccio robotico con palpatore permette l'acquisizione di punti su superfici a forma libera, difficilmente accessibili con l'uso della CMM.

In aggiunta, come tutte le macchine a misura di coordinate, è interfacciabile con i softwares CAD/CAM più comuni, tuttavia ha lo svantaggio di non essere automatizzabile, penalizzando sia la ripetibilità di misura che assume valori di $0.011-0.055\text{ mm}$, che la sensibilità in funzione della lunghezza dei bracci.



Fig. 2.2 Braccio robotico

Le CMM vengono, infatti, programmate a seguire delle traiettorie prestabilite sulla superficie da analizzare attraverso sistemi a controllo numerico. Ciò permette di ottenere sia un'elevata ripetibilità di misura (si attesta su valori di $3\mu\text{m}$ pressoché costante al variare della dimensione della macchina), che un'ottima accuratezza di acquisizione.

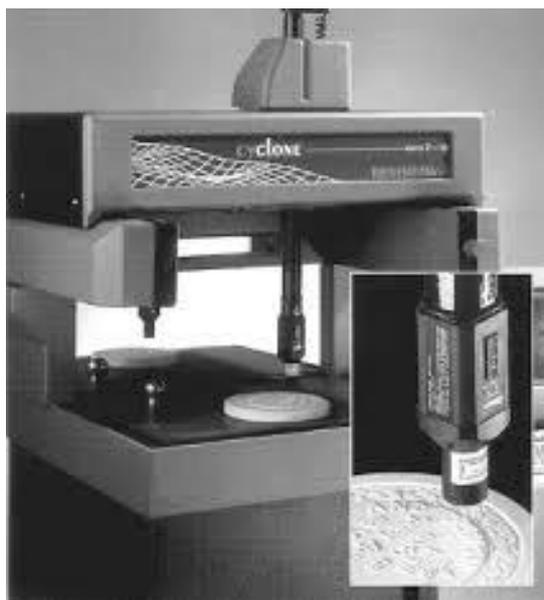


Fig. 2.3 Tastatore CyClone

In conclusione, tutte le tecniche di acquisizione per contatto non possono essere utilizzate su oggetti fisici morbidi, dovendo essere garantito tra il palpatore meccanico ed il punto da digitalizzare una forza minima di 0.1N. Vi sono anche diversi fattori esterni che possono invalidare i dati raccolti pregiudicando l'accuratezza delle misurazioni. I principali sono la temperatura, le vibrazioni e l'umidità, fattori ininfluenti nelle tecniche senza contatto.

2.1.2 Digitalizzazione di tipo non-tattile

Tra le varie tecniche non tattili di digitalizzazione per il rilievo di forme, quelle di tipo acustico e magnetico risultano essere le meno popolari perché adatte a ristretti campi d'applicazione.

In particolare, la rilevazione di tipo acustico sfrutta le proprietà possedute da un'onda sonora (es. la riflessione) per misurare le distanze. Un fattore rilevante è il "time-of-flight" (letteralmente il tempo di volo) che rappresenta la distanza percorsa dall'onda tra la sorgente d'emissione e la superficie di riflessione, nota la velocità di propagazione del suono nei fluidi.

Le tecniche di acquisizione digitale di tipo magnetico sono prevalentemente usate in campo medico, la risonanza magnetica per immagini (RMI) è una tra le applicazioni più diffuse.

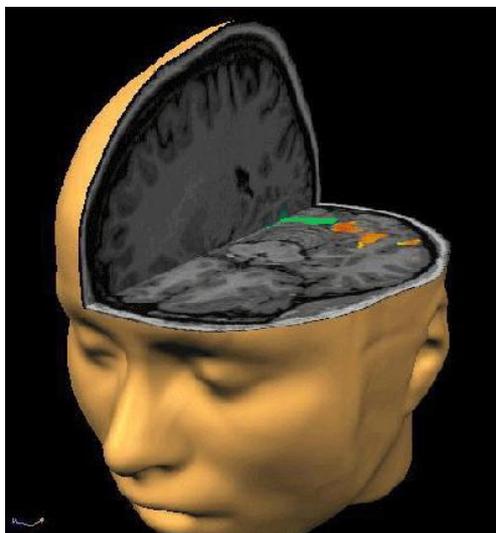


Fig. 2.4 Ricostruzione 3D di un'acquisizione digitale magnetica.

Il funzionamento della RMI è basato essenzialmente sul fatto che il corpo umano è costituito per $2/3$ da acqua, la cui quantità varia a seconda dei tessuti e della loro condizione.

Il paziente viene posto all'interno di un campo magnetico ad alta intensità che fa sì che i momenti magnetici delle molecole di idrogeno costituenti la composizione in acqua del paziente stesso si allineino alla direzione del campo esterno. Il paziente viene poi irradiato con una serie di impulsi di microonde (a basso livello di radiazione) chiamati impulsi di eccitazione che generano un'oscillazione dei momenti magnetici delle molecole precedentemente allineati. In tal modo le molecole cominciano a loro volta a riemettere microonde dopo ogni impulso. Le riemissioni vengono misurate da un rilevatore di campo che è in grado di stabilire la localizzazione spaziale delle sorgenti delle microonde riemesse, ottenendo quindi la distribuzione dell'acqua all'interno dell'organismo. L'elaborazione digitale dei dati raccolti consente successivamente di rappresentare un'immagine tridimensionale di tale distribuzione.

Per quanto riguarda i sistemi di digitalizzazione tridimensionale basati su tecnologia ottica, possiamo dire che risultano essere i più utilizzati data l'alta velocità di acquisizione

e la quantità di dati rilevabile con ottima precisione. Considerando anche la flessibilità di tali sistemi e la versatilità ad adattarsi ai vari settori d'interesse.

Le tecniche ottiche possono essere suddivise inizialmente in due tipologie (relativamente alla modalità d'interazione con la forma dell'oggetto fisico da digitalizzare ed alla tipologia di sorgente luminosa utilizzata): l'acquisizione ottica passiva e l'acquisizione ottica attiva.

La prima è un insieme di tecniche di scansione digitale che non prevede l'utilizzo di sorgenti luminose artificiali. Ciò permette una forte riduzione di costo rispetto alle tecniche di tipo attivo ma contemporaneamente una precisione di rilevazione digitale decisamente più bassa.

Tra le diverse tecniche passive di importante rilevanza ricordiamo la Fotogrammetria (prevalentemente usata nel campo dei beni artistici e nelle rilevazioni territoriali come la fotogrammetria aerea) e la Scansione Visiva Stereoscopica.

Da un punto di vista geometrico la fotogrammetria di un certo oggetto può essere assimilata con sufficiente approssimazione ad una proiezione centrale dell'oggetto fotografato. Tale proiezione è ottenuta proiettando i punti dell'oggetto su un piano, detto piano o quadro di proiezione, da un punto esterno ad esso, detto centro di proiezione o di vista. Le rette congiungenti i punti dell'oggetto con il centro di proiezione sono dette rette proiettanti. I loro punti di intersezione con il piano di proiezione costituiscono le proiezioni od "immagini" dei punti dell'oggetto.

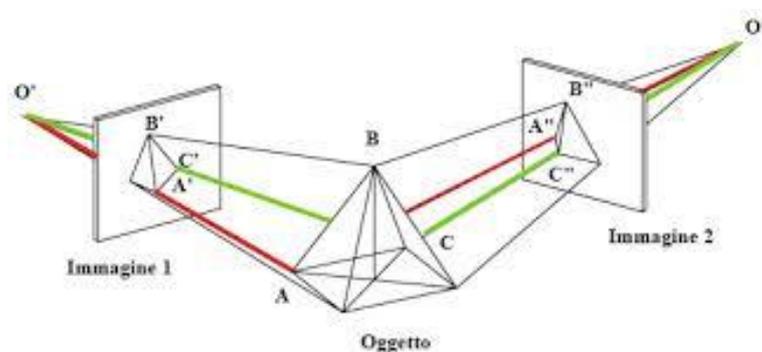


Fig. 2.5 Visione Stereo Passiva dalle proiezioni centrali di un oggetto

La Scansione Visiva Stereoscopica è una applicazione ottica di tipo passivo, basata essenzialmente sull'analisi fotogrammetrica di due immagini digitali, prelevate da posizioni note. Tale processo di analisi permette di individuare una precisa corrispondenza tra gli oggetti presenti nelle immagini stesse, fornendo una tridimensionalità dello spazio reale. Ciascun punto di vista possiede un angolo ed una distanza focale, la cui combinazione, permette di calcolare la distanza delle entità comuni alle due immagini.

Se tuttavia gli elementi comuni alle immagini sono molto lontani tra loro è necessario l'utilizzo di più camere. Spesso però sorgenti luminose estranee possono complicare notevolmente il processo di analisi perturbando il sistema e diminuendo così la qualità delle immagini acquisite.

Vengono, così, utilizzati dei proiettori luminosi che migliorano globalmente la qualità delle immagini, ma rendono il sistema più complesso e costoso.

L'acquisizione Ottica Attiva è invece un insieme di tecniche di scansione digitale per il rilievo di oggetti reali il cui funzionamento prevede la presenza di una sorgente di luce artificiale ed uno o più sensori atti a rilevare i pattern luminosi riflessi dall'oggetto.

La sorgente può emettere pattern luminosi di diverso tipo, scelti in funzione dell'accuratezza richiesta nell'acquisizione dei dati ed in base al tipo di analisi che deve essere eseguita sull'oggetto reale.

Complessivamente i sistemi di digitalizzazione ottica attivi possono essere suddivisi in due classi: Triangolazione e Time delay (tempo di percorrenza).

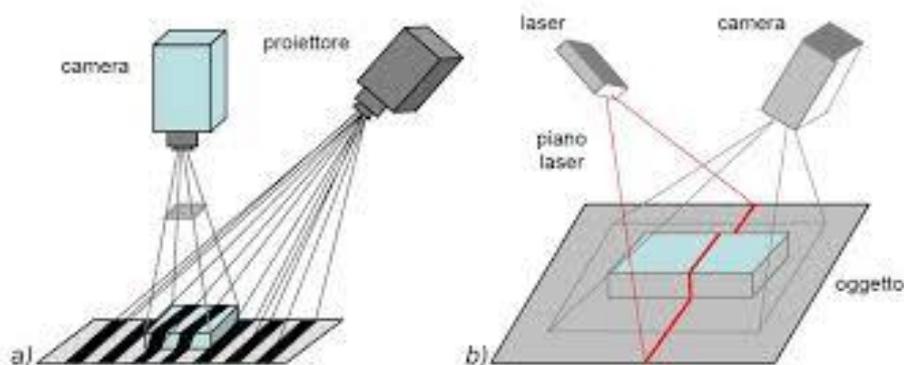


Fig. 2.6 Scansione 3D tramite patterns di luce strutturata (a) e strisce laser (b).

La Triangolazione ottica è una delle tecniche più comuni nell'acquisizione di dati tridimensionali. Può essere utilizzata con diversi tipi di luce proiettata: lo spot a laser singolo, il laser piano, i fasci di luce strutturati e i pattern di luce comune.

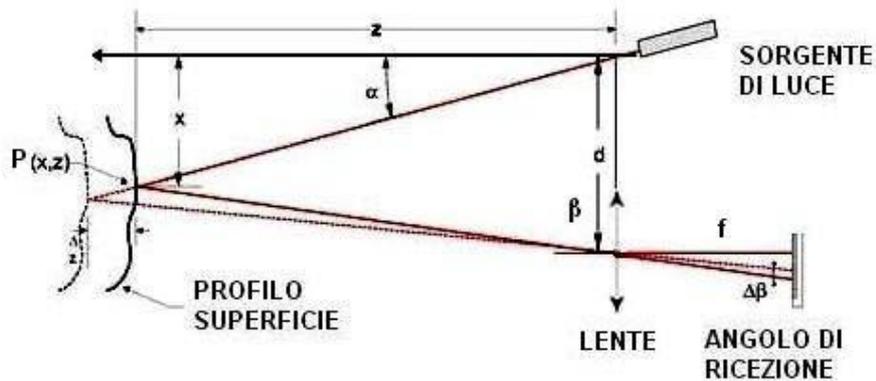


Fig. 2.7 Triangolazione Ottica di tipo attivo spot puntiforme.

Il principio di funzionamento è abbastanza semplice, un raggio laser viene proiettato sull'oggetto e la luce riflessa viene rilevata dalla telecamera CCD. La posizione della luce sul sensore CCD permette di determinare la posizione nello spazio del punto P.

Difatti essendo note la grandezza d , distanza relativa tra proiettore e sensore CCD e l'angolo α , inclinazione della sorgente, con relazioni trigonometriche si determinano le coordinate del punto P.

Se invece di utilizzare uno spot singolo proiettiamo una striscia luminosa, si ottengono più punti contemporaneamente.

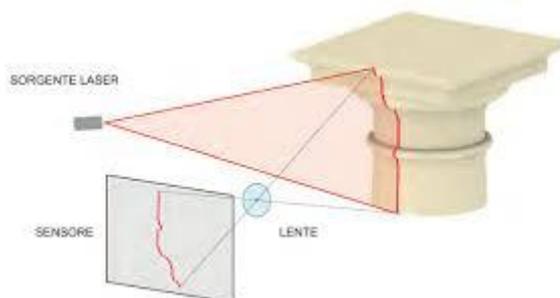


Fig. 2.8 Scansione 3D tramite strisce laser

Inoltre, proiettando più strisce di luce contemporaneamente, ovvero un volume di luce, si possono ottenere le posizioni di un numero di punti della superficie sufficienti a descriverla. In quest'ultimo caso sorge la necessità di identificare e distinguere univocamente le varie strisce per poter determinare tutti i punti appartenenti a queste. Per risolvere tale problema si usano patterns di un particolare tipo di luce detta luce codificata o strutturata (Structured Light), che investe completamente l'oggetto 3-D. Ogni pattern, caratterizzato da una propria sequenza binaria, è costituito da strisce bianche e nere e permette di dividere l'area proiettata in zone chiare e scure che vengono infittite ad ogni passaggio.

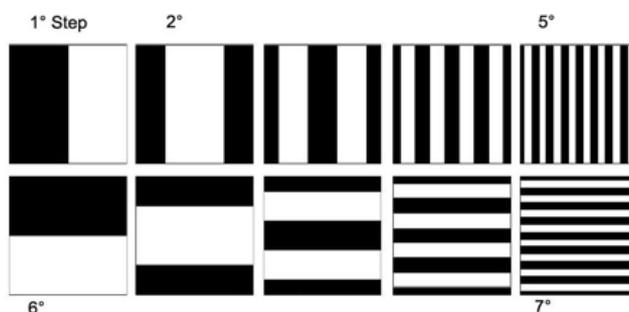


Fig. 2.9 Sequenze di patterns con steps con dimezzamento progressivo della lunghezza d'onda.

La sequenza di immagini relativa alla proiezione dei vari patterns consente di determinare univocamente la locazione dei vari pixels impressionati. Il sensore ottico CCD determina la presenza o meno della luce proiettata ad ogni step, generando una sequenza di bit, che decodificata, permette di individuare le coordinate relative alla posizione di ciascun pixel impressionato.

In particolare, la scansione dell'oggetto rappresentato in figura è basata sul metodo del Gray-Code, il quale utilizza luce strutturata caratterizzata da frange orizzontali e verticali codificate. Ciascun pattern, impiegato nella sequenza temporale, è caratterizzato da frange bianche e nere, la cui lunghezza d'onda si dimezza progressivamente ad ogni step successivo. Il vantaggio di tale tecnica riguarda l'acquisizione dei dati 3-D dall'oggetto reale situato generalmente a distanze inferiori al metro, che avviene sotto forma di densa nuvola di punti 3-D per ciascuna camera CCD.

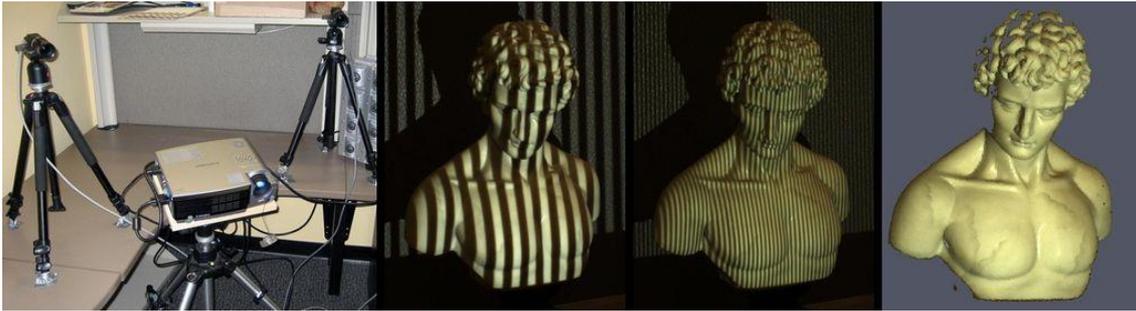


Fig. 2.10 Applicazione delle frange verticali di luce codificata.

Con questa tecnica si ottiene l'acquisizione tridimensionale dell'oggetto fisico tramite una griglia di punti. Nel caso di applicazione della luce strutturata i punti di questa griglia corrispondono ai punti sul piano immagine della camera, corrispondenti ai pixel della telecamera CCD.

Le coordinate (x, y) dei punti rappresentano la posizione degli stessi sul piano immagine mentre la coordinata z indica la profondità di questi rispetto al piano immagine.

I metodi di digitalizzazione basati sulla triangolazione sono caratterizzati da una incertezza della misura sul calcolo della profondità z . Si osserva sperimentalmente che questa incertezza è inversamente proporzionale sia alla distanza relativa tra la telecamera ed il proiettore, sia alla distanza focale della lente, ma è direttamente proporzionale alla radice quadrata della profondità z .

Durante l'acquisizione si possono presentare degli effetti indesiderati che vanno a pregiudicare la qualità dei dati rilevati, amplificando rumori e disturbi di tipo ottico.

Questo può essere determinato da fenomeni d'interferenza della luce presente nell'ambiente, da assorbimento e dispersione eccessivi della luce riflessa da superficie ruvida o da misure poco accurate su superfici molto oblique.

Inoltre, in presenza di superfici molto riflettenti, durante la digitalizzazione potrebbero essere interpretati dati provenienti da altre posizioni dell'oggetto.

Per ridurre al minimo i fenomeni di disturbo e rumore è necessario opacizzare omogeneamente l'intera superficie da scansionare, in modo tale da rendere abbastanza chiara e delimitata la direzione di riflessione della luce dopo che questa abbia impattato la superficie dell'oggetto.

In merito ai sistemi a tempi di volo sfruttano le proprietà fondamentali dell'onda luminosa monocomatica come l'unidirezionalità e la coerenza, per mezzo delle quali la velocità di

propagazione in un determinato mezzo mantiene un valore costante e finito durante tutto il percorso.

Pertanto, la misura del tempo di volo (TOF – Time of Flight) relativo al percorso che l'onda di luce compie dalla sorgente alla superficie riflettente (target) e ritorna al sensore d'emissione consente facilmente di valutare la distanza dell'oggetto.

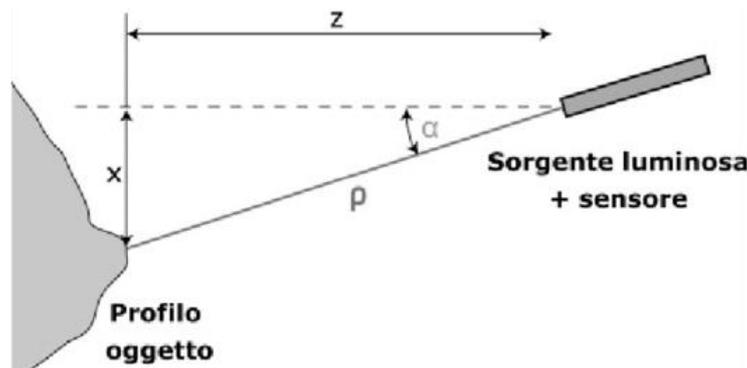


Fig. 2.11 Tecnica di acquisizione 3D basata sul Time of Flight.

Tale operazione è estremamente rapida essendo la velocità della luce pari a $3 \times 10^8 \frac{m}{sec}$, ad esempio 3.33 nanosecondi ($\frac{3.33}{10^9}$ secondi) corrispondono alla rilevazione di una distanza pari ad un metro.

L'aspetto più interessante nei sistemi di digitalizzazione 3-D basati sul time-delay (tempo trascorso) riguarda la flessibilità di cui dispongo nell'adattarsi sia a punti di vista molto piccoli ($< 10 \text{ mm}$), sia a punti di vista molto grandi ($> 10 \text{ m}$).

Altri sistemi lavorano con onde laser continue opportunamente modulate in modo tale da rilevare anche piccole oscillazioni variando l'intensità dell'onda stessa.

Quando un'onda modulata colpisce la superficie di un oggetto fisico, la luce riflessa viene raccolta ed un circuito calcola la differenza di fase tra la forma d'onda associata alla luce riflessa e quella del raggio laser incidente. In tal modo si determina il time of flight.

Un vantaggio della tecnologia TOF rispetto alla triangolazione riguarda l'accuratezza dell'acquisizione che è indipendente dalla distanza tra lo scanner e l'oggetto da rilevare.

2.2 SISTEMA OTTICO SENSE 3D SCANNER



Fig. 2.12 Scanner 3D Sense di Cubify.

Il sistema di rilevazione digitale usato per lo svolgimento di questa tesi è una tecnica di acquisizione “attiva” (a tempo di volo) che fa uso pertanto di un proiettore di laser ad infrarossi.

L’hardware Sense 3D Scanner(2° gen.) di Cubify è costituito complessivamente da un proiettore laser a infrarossi con fascio laser invisibile sull’oggetto da scansionare e da due telecamere, una ad infrarossi per acquisire il motivo e una normale RGB per acquisire informazioni sul colore. Il sensore di profondità è un SR300 di Intel e la risoluzione della fotocamera di profondità è 640 x 480 pixel e 1920 x 1080 per quella a colori.



Fig. 2.13 Composizione Scanner 3D Sense.

Lo scanner è compatto e versatile, progettato per essere tenuto in mano verticalmente utilizzando l'impugnatura, ma può essere montato anche su un treppiede utilizzando l'apposito foro di fissaggio e ha un cavo USB 3.0 lungo 2 metri per il collegamento al PC.

Le dimensioni minime dello scanner, inoltre, permettono un facile utilizzo in movimento o all'aria aperta, garantendo rapidità e immediatezza.

Tale sistema ha un costo molto contenuto (circa 400 euro).

Lo scanner ha un software integrato che utilizza comandi di ritaglio rapido e di chiusura dei fori o delle imperfezioni nella mesh poligonale. A seconda degli oggetti grandi o piccoli da scansione, lo scanner ha impostazioni automatiche e ottimizzate facili da attivare.

E' presente inoltre il riconoscimento automatico dell'oggetto focalizzando la scansione su di esso. Il software dello scanner Sense 3D è quindi intuitivo, rapido, preciso e facile da usare.

Vantaggi:

- Buona qualità di scansione
- Scansione 3D anche a colori
- Facilità d'uso
- Nessuna calibrazione o configurazione
- Rifiniture semplici
- Esporta in vari formati: OBJ, STL, PLY, WRL

2.2.1 Caratteristiche tecniche

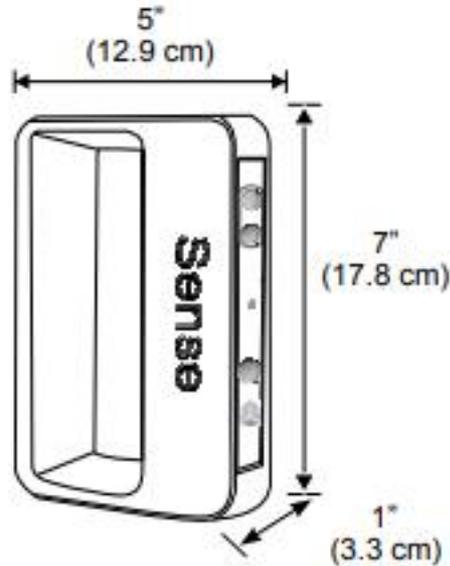


Fig. 2.14 Dimensioni Scanner 3D Sense.

Specification	Value
Supported operating systems	Windows 10® 64-bit
Maximum power consumption	5.0 VDC
Scan volume	Min: 0.2 m x 0.2 m x 0.2 m Max: 2 m x 2 m x 2 m
Dimensions	17.8 cm x 12.9 cm x 3.3 cm
Operating range	Min: 0.45 m Max: 1.6 m
Field of view	Horizontal: 45° Vertical: 57.5° Diagonal: 69°
Minimum Hardware Requirements	
<ul style="list-style-type: none"> • CPU • RAM • Screen resolution • Color • Available hard disk space 	<ul style="list-style-type: none"> • Intel Core i5 or equivalent 2GHz • 4 GB • 1280 x 1024 • 32-bit • 2 GB
Depth image size	640 px (w) x 480 px (h)
Spatial x/y resolution @ 0.5 m	0.9 mm
Depth resolution @ 0.5 m	1 mm
Operating temperature	10 °C - 40 °C
Data interface	USB 3.0
USB cable length	200 cm
Maximal image throughput	30 fps
Color image size	1920 px (w) x 1080 px (h)

Fig. 2.15 Tabella delle caratteristiche tecniche dello Scanner 3D Sense.

2.3 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI DIGITALI

Il processo di digitalizzazione 3-D prevede alcuni step di fondamentale importanza per l'accuratezza della rilevazione dei dati e le successive fasi di reverse engineering.

- Preparazione della superficie dell'oggetto
- Preparazione dell'ambiente
- Regolazione dei parametri
- Acquisizione
- Ricostruzione 3D dei dati
- Salvataggio

Prima di procedere all'acquisizione dell'oggetto reale viene eseguita una fase di preparazione della superficie da rilevare.

È necessario opacizzare, con l'ausilio della penna con polvere di gesso, la superficie dell'oggetto fisico da scansionare in funzione delle sue caratteristiche morfologiche.

Nelle foto seguenti vengono mostrate le due tipologie di maniglie scelte e il processo di opacizzazione effettuato su di esse.



Fig. 2.16 Pennello per applicazione gesso in polvere.



Fig. 2.17 Maniglia durante l'opacizzazione con gesso.



Fig. 2.18 Maniglia tipo 1 con superficie opacizzata.



Fig. 2.19 Maniglia tipo 2 con superficie opacizzata.

Lo strato di opacizzante omogeneo viene realizzato estremamente sottile, dell'ordine del micrometro, per non alterare il profilo rilevato dell'oggetto fisico. Generalmente si utilizzano polvere di gesso applicata con un apposito pennello o spray comuni, adoperati per controlli non distruttivi, facilmente rimovibili una volta effettuata la scansione.

Viene successivamente stabilita la distanza (d. ottimale 0,45 m - 2 m) alla quale effettuare la scansione in funzione delle performance considerando la precisione richiesta per i dati rilevati e le dimensioni dell'oggetto reale.

Diverse condizioni di illuminazione possono influire sulla qualità di scansione: i migliori risultati si hanno se la luce risplende con uguale intensità sull'oggetto da scansionare.

Tramite il software di gestione del sistema visivo *Sense for RealSense* dedicato, che permette la visualizzazione delle immagini acquisite su monitor, viene tarata la posizione della camera, in modo tale da ottenere un'immagine il più possibilmente centrata del provino.

Il software prevede un menù per la regolazione dei vari parametri di calibrazione del sistema mostrato di seguito.

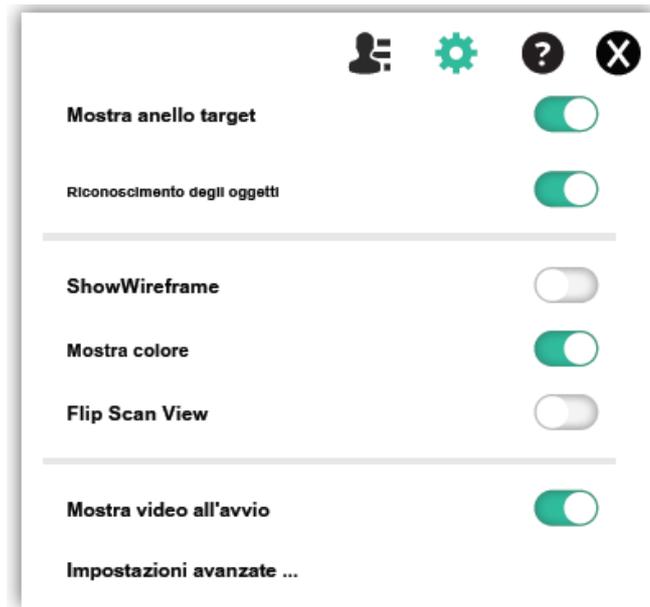


Fig. 2.20 Menù impostazione software di gestione Scanner 3D.

Dal menù impostazioni è possibile visualizzare l'anello target, il che è utile per mantenere lo scanner puntato al centro dell'oggetto da scansionare, oppure attivare il riconoscimento degli oggetti che tenta di identificare ed evidenziare automaticamente l'oggetto che si sta scansionando. I dati di scansione verranno automaticamente ritagliati per rimuovere tutto tranne l'oggetto identificato.

Le impostazioni avanzate consentono di accedere a diverse opzioni relative ai dati di scansione e all'interfaccia.

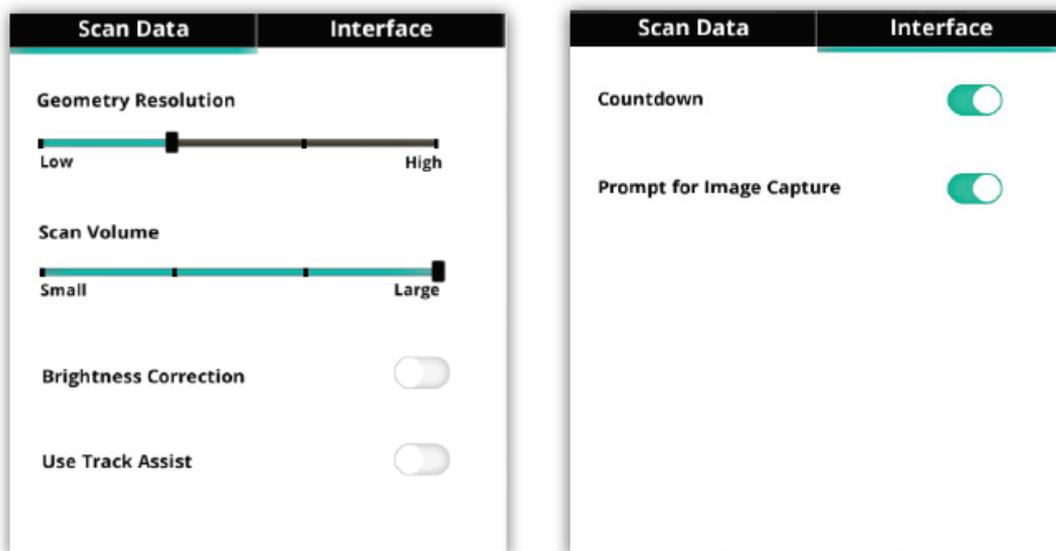


Fig. 2.21 Menù impostazione avanzata software di gestione Scanner 3D.

È possibile quindi selezionare il grado di Risoluzione della geometria desiderata, la dimensione del volume cubico che verrà scansionato in caso non venga tracciato nessun oggetto specifico o il conto alla rovescia ad inizio scansione.

Inoltre, l'applicazione fornisce le seguenti scelte per avere una scansione ottimale e adeguata al tipo di oggetto da scansionare:

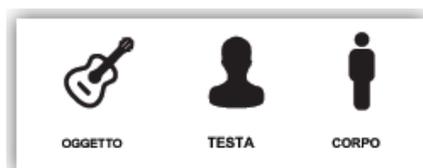


Fig. 2.22 Menù selezione tipologia di oggetto da scansionare del software di gestione Scanner 3D.

Terminata la fase di regolazione parametri del sistema si procede all'acquisizione stando alla distanza appropriata dall'oggetto.



Fig. 2.23 Modalità di utilizzo dello Scanner 3D Sense.



Fig. 2.24 Modalità di utilizzo dello Scanner 3D Sense.

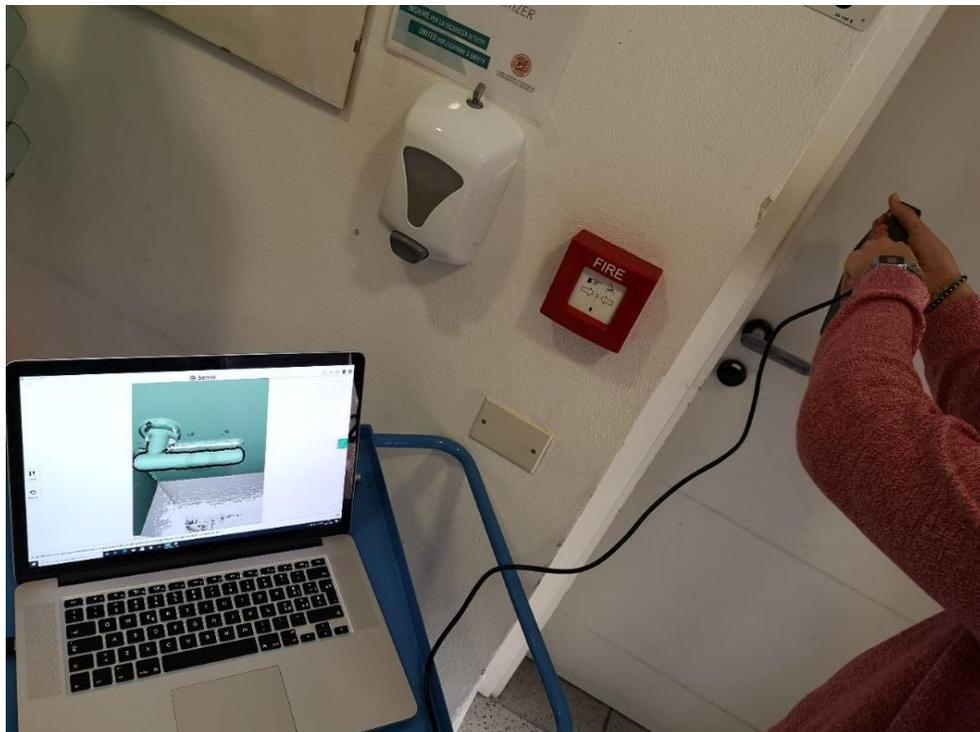


Fig. 2.25 Utilizzo dello Scanner 3D Sense e visualizzazione dell'oggetto sul software di gestione.

Una volta che l'oggetto è correttamente inquadrato sullo schermo si inizia la scansione e si sposta lentamente e costantemente lo scanner attorno all'oggetto mentre si visualizza l'immagine sullo schermo fino a quando si decide di finire la scansione. Quando un oggetto è contenuto nel volume specificato, apparirà a colori. Gli oggetti al di fuori di questo intervallo vengono visualizzati in grigio e sfumano sullo sfondo. Utilizzando l'opzione Riconoscimento oggetti, aiuta a stabilizzare il tracciamento, aumentare la qualità della mesh e impostare il piano di taglio.

Durante la scansione i dati raccolti appariranno come neve "verde" sopra l'oggetto.

Se ci si muove troppo velocemente durante la scansione, verrà visualizzata una finestra di messaggio che ti informa di muoverti più lentamente.

L'intero processo fornisce nuvola di punti di tutta la superficie acquisita e attraverso il software che genera immediatamente una mesh dalla nuvola di punti si può gestire, con estrema flessibilità e facilità, i dati digitali rilevati attraverso il sistema.

Una volta completata la scansione o aperto un file precedentemente scansionato, sono disponibili diversi strumenti per modificare la scansione nella barra degli strumenti nella parte superiore dello schermo che fornisce le seguenti opzioni quando si modifica la scansione corrente:



Fig. 2.26 Menù preparazione file scansionato nel software di gestione Scanner 3D.



Fig. 2.27 Processo di ritaglio della scansione.

Se è necessario ritagliare la scansione, si utilizza la funzione Cancella per rimuovere manualmente con il cursore le parti della scansione che si desidera eliminare.

È possibile ruotare, eseguire la panoramica e ingrandire il modello facendo clic all'esterno di esso e utilizzando il mouse o i gesti di regolazione della vista.

Per rimuovere le aree indesiderate si può utilizzare anche lo strumento Trim per posizionare una linea di sezione nel punto in cui si desidera tagliare l'oggetto per rimuovere la più piccola delle due sezioni.

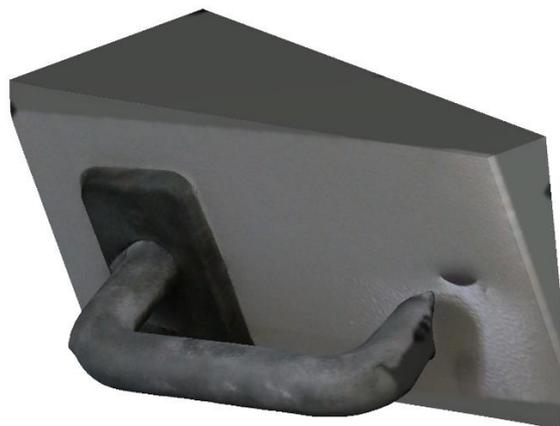


Fig. 2.28 Processo di ritaglio della scansione.

Nell'ultimo step del processo di preparazione del modello con lo strumento "Solidifica" vengono riempiti tutti i fori e viene chiuso il modello per renderlo solido, ottenendo un'anteprima finale dopo aver effettuato la regolazione.

Una volta terminata la scansione e la modifica del modello si premerà Salva per poter nominare il modello e salvarlo nella Libreria dell'applicazione stessa, esportandolo nei seguenti formati: WRL, STL, PLY o OBJ.

Di seguito sono mostrate le foto raffiguranti alcune delle scansioni effettuate prima e dopo la modifica del file delle due tipologie di maniglie scelte.



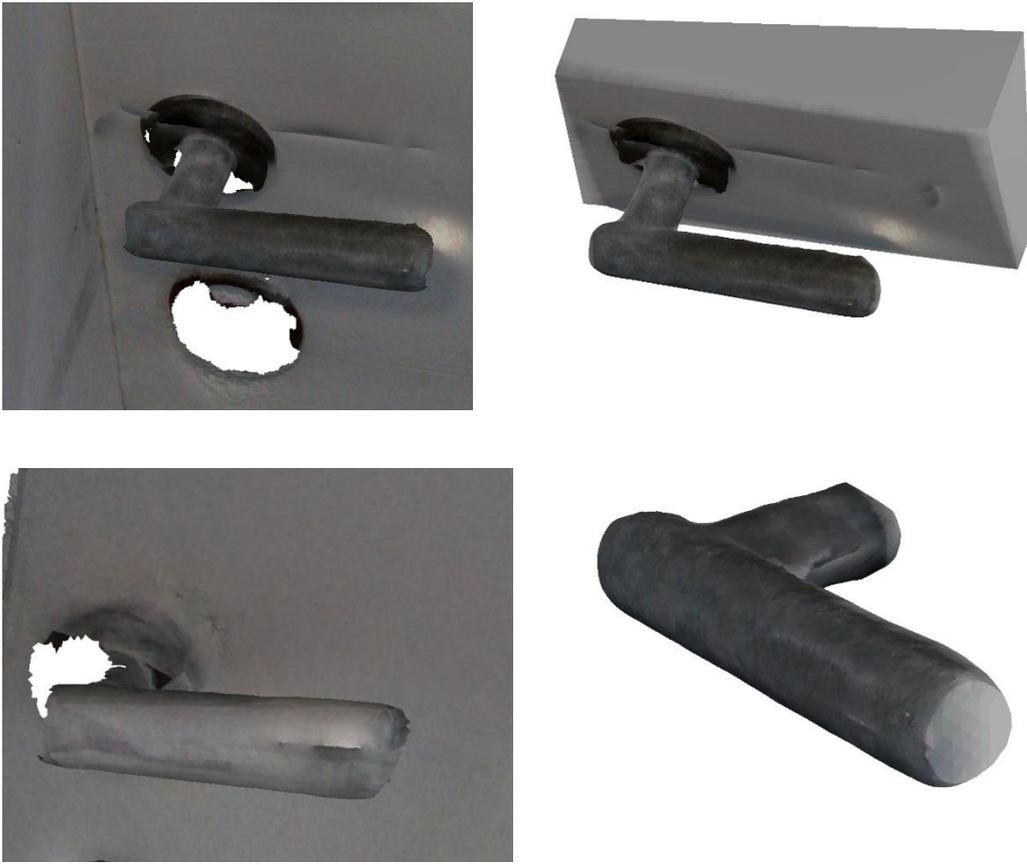


Fig. 2.29 Immagini delle scansioni prima e dopo l'elaborazione con il software.

3. DESIGN GENERATIVO

3.1 DEFINIZIONE

Il design generativo (GD) è un processo che crea un progetto o un modello basato su parametri quantitativi e qualitativi, o aggiustamenti estetici, e utilizza algoritmi inseriti dall'uomo per generare un insieme variabile di modelli finali come output, mantenendo costantemente i legami e non interrompendo le relazioni gerarchiche. Il GD è una funzionalità delle applicazioni CAD che genera autonomamente una serie di alternative di progettazione, dato un determinato numero di vincoli. Ciò può essere realizzato senza la guida o l'interazione di un professionista, che può dedicarsi ad altre attività e scegliere i progetti da esaminare in maniera più approfondita, una volta completati. Nel complesso, questo permette di accelerare il processo di progettazione. Il Generative Design si avvale di funzionalità quali l'ottimizzazione topologica, per eseguire simulazioni strutturali e rimuovere materiale non utile alla resistenza ai carichi. Tuttavia, questo è solo uno degli approcci utilizzati dal Generative Design. È in grado, infatti, di riprodurre comportamenti presenti in natura, come la crescita delle colonie di batteri o l'evoluzione delle strutture ossee per ottimizzare i rapporti resistenza-peso. Questi approcci vengono utilizzati per esplorare lo spazio di progettazione di un nuovo prodotto.

I sistemi CAD completi consentono inoltre di utilizzare l'approccio di progettazione generativa nell'industria automobilistica (ad esempio Catia, Rhinoceros e altri). In questi sistemi la progettazione utilizza il cosiddetto tree history, che facilita il processo di progettazione del modello, in quanto è possibile risalire in qualsiasi momento tramite un apposito comando. Funziona con molti sottosistemi in cui si trova il modello generativo diviso, che sono interconnessi da collegamenti geometrici e funzionali. Questa sezione consente la conversione o la sostituzione di singoli sottosistemi, con i restanti sottosistemi che subiscono modifiche direttamente nel modello e si adattano automaticamente.

Il Generative Design è un nuovo processo di progettazione iterativo che coinvolge:

- Un'intelligenza artificiale sapientemente guidata da un programmatore, la quale genera una serie di soluzioni che soddisfino dei vincoli di base, per

esempio rispetto delle leggi della fisica, normativi, etc., e dei vincoli di progetto, come per esempio specifiche esigenze del cliente;

- Un progettista, che valida le soluzioni generate, individuando quella che sulla base della propria esperienza è la migliore per il contesto analizzato.

In questo modo al progettista vengono sottoposte soluzioni impensabili e che lui stesso difficilmente sarebbe in grado di progettare in tempi ragionevoli. Al contempo l'intelligenza artificiale apprende dalle scelte del progettista. Si tratta quindi di un metodo rapido di esplorazione delle possibilità di progettazione utilizzabile in ambiti complessi: design architettonico, design di prodotto, communication design, art design, etc.

Importante è la spiegazione fatta da McCormack et al. (2016) "Nel design tradizionale, il ruolo del designer è esplorare uno spazio di soluzione... Esiste una relazione diretta tra le intenzioni del progettista e quella del manufatto progettato. Al contrario, la progettazione che utilizza metodi generativi implica la creazione e la modifica di regole o sistemi che interagiscono per generare il progetto finito in modo autonomo. Quindi, il designer non manipola direttamente il manufatto prodotto, ma piuttosto le regole e i sistemi coinvolti nella produzione del manufatto. Il processo di progettazione diventa uno di meta-design in cui un progetto finito è il risultato delle proprietà emergenti del sistema interagente. L'arte della progettazione in questa modalità consiste nel padroneggiare la relazione tra la specifica del processo, l'ambiente e l'artefatto generato. Poiché questa è un'arte, non esiste un metodo formalizzato o basato sull'istruzione che possa essere utilizzato per guidare questa relazione. Il ruolo del designer umano rimane, come nel caso del design convenzionale, centrale nel processo di progettazione".

Nel 2004, una popolazione di sistemi L per il design di un tavolo si è evoluta automaticamente utilizzando un GA (Genetic Algorithms). La funzione di adattamento utilizzata per selezionare progetti di qualità superiore era basata sulle proprietà fisiche simulate del tavolo che includevano equilibrio, altezza, area della superficie, stabilità e quantità di materiale utilizzato. Nel 2006, un approccio evolutivo simile è stato utilizzato per far evolvere automaticamente la grammatica della forma delle bottiglie di Coca Cola utilizzando un volume di prodotto target come funzione di idoneità. Questo primo lavoro può essere considerato più una prova di principio che un utile sistema Generative Product Design (GPD). Nel 2011 Krish aveva come obiettivo principale generare

automaticamente, piuttosto che interattivamente, un gran numero di differenti opzioni di progettazione. Questo avrebbe posto il progettista più nel ruolo di valutatore che di creatore. Tale lavoro ha anche segnato un cambiamento nella rappresentazione generativa e nel metodo: da Shape Grammars (SG) a modelli CAD parametrici. A differenza degli SG, lo spazio di progettazione determinato dagli intervalli di parametri del modello CAD è semplice e può quindi essere campionato in modo casuale per generare variazioni di progetto. Krish ha implementato questo semplice approccio come plug-in per i pacchetti CAD esistenti. È importante rendersi conto che, sebbene le variazioni di progettazione siano generate senza il diretto input umano, l'intero processo deve comunque essere impostato manualmente; deve essere creato un modello CAD di base e opportunamente parametrizzato. Il CAD parametrico sarà quasi certamente più familiare e accessibile ai progettisti rispetto agli SG, ma la sua facilità d'uso potrebbe venire a scapito della novità generativa: lo spazio di progettazione potrebbe essere troppo limitato quando creatività e innovazione sono requisiti chiave. Anche in questo caso, tuttavia, non è stato effettuato alcun test del sistema da parte dei progettisti o valutazione dei progetti da parte dei potenziali clienti. Krish mirava alla generazione automatizzata di progetti, ma mirava fermamente al livello concettuale, il che significa che i requisiti di ingegneria non erano esplicitamente parte del processo di generazione. Tuttavia, l'integrazione dell'esplorazione del concetto e delle informazioni ingegneristiche è disponibile solo dopo che la progettazione dettagliata ha iniziato ad attirare l'interesse. Utilizzando il design della sedia, Barros et al. progettazione concettuale integrata da SG con la progettazione dettagliata mediante conversione della sedia in modello CAD e facendo test strutturali utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM). L'intenzione era di consentire l'esplorazione interattiva e la personalizzazione dei progetti secondo criteri sia estetici che ingegneristici.

I potenziali benefici di GD sono numerosi e includono la promozione della creatività e dell'innovazione nei progettisti umani producendo forme mai viste prima, la generazione automatica di migliaia di differenti opzioni di progettazione per consentire l'esplorazione completa di spazi di progettazione troppo grandi per essere esplorati manualmente dagli esseri umani, l'integrazione dei requisiti di ingegneria oggettiva nella progettazione

concettuale finora soggettiva e la formalizzazione oggettiva di caratteristiche soggettive come l'aspetto del marchio.

3.2 PROGETTAZIONE

La fase di progettazione è solitamente suddivisa in fasi di progettazione concettuale e dettagliata, spesso chiamate progettazione in fase iniziale e avanzata. La fase di progettazione concettuale è dove le principali differenze del prodotto vengono formulate ed esplorate. Tradizionalmente, questo è stato fatto utilizzando schizzi disegnati a mano che sono veloci e intuitivi.

I modelli CAD completi non vengono normalmente utilizzati nella fase di progettazione per le ragioni esattamente opposte: sono lenti da produrre, meno intuitivi degli schizzi e richiedono dimensioni esatte che semplicemente non sono ancora note.

Questa distinzione in termini di rappresentazione e specificità ha delle conseguenze: i principali requisiti estetici potrebbero essere soddisfatti nella fase concettuale, ma non le specifiche della performance.

Solo nella fase di progettazione dettagliata, con la produzione di un modello CAD testate (ad esempio, analisi strutturale mediante analisi agli elementi finiti). In altre parole, per determinare se il concetto è fattibile, dati i requisiti di progettazione. I test possono determinare che i progetti concettuali richiedono una revisione significativa e più iterazioni del progetto ma, per definizione, non c'è modo di esserne sicuri nella fase concettuale stessa. Per questo motivo, un tema principale in GPD è la fusione di concetto, progettazione dettagliata e test in modo che le informazioni tradizionalmente disponibili solo in seguito possano essere utilizzate per formare i primi concetti con l'intenzione di ridurre le iterazioni sprecate. Formulazioni più estreme di GD mirano a eliminare le distinzioni tra le fasi, portando all'esplorazione solo tra le opzioni note per avere prestazioni realizzabili.

Riassumendo, possiamo così suddividere le fasi del Generative Design:

1. Il progettista imposta gli obiettivi e i vincoli legati al progetto usando un software basato sulla logica del Generative Design. Le persone inseriscono specifiche sui tipi di materiale, peso, forze e costi.

2. Il computer utilizza le sue risorse e gli algoritmi per generare migliaia di opzioni su cui vengono attuate delle analisi di performance.
3. Chi progetta valuta le opzioni e modifica gli obiettivi e i vincoli. Il computer rigenera le opzioni. Quindi l'intuito umano e l'intelligenza artificiale del computer identificano assieme la migliore soluzione generata.
4. Il progettista produce il prototipo secondo metodi tradizionali oppure attraverso la stampa 3D ed eventualmente ritorna allo step 3 se necessario.

3.3 VANTAGGI DEL GD

Diversi sono gli studi che illustrano quali sono i benefici di questo metodo di progettazione innovativo (Generative Design), tra i più importanti si annovera:

1. **Risparmio di tempo:** nel medesimo tempo in cui un umano genera pochi progetti, un computer può generarne a migliaia, unitamente ai dati per stabilire quale progetto sia il favorito in base alle performance.
2. **Incentivazione della creatività:** creando migliaia di opzioni il Generative Design apre nuove porte ai designer e agli ingegneri per esplorare nuove e inaspettate alternative.
3. **Risparmio di denaro:** la simulazione e i test avvengono nella primissima fase della progettazione, evitando, così, costose modifiche durante la produzione.
4. **Creazione di geometrie insolite:** grazie al Generative Design e alla stampa 3D è possibile ricreare e produrre geometrie estremamente complesse impossibili da generare con altre metodologie.

Sebbene l'industria stia ora iniziando a utilizzare il suo potenziale, i concetti e le tecniche di base per i sistemi di Generative Design sono stati originariamente sviluppati nella ricerca accademica decenni fa, con la prima grande analisi condotta nel contesto della progettazione architettonica.

3.4 RAPPRESENTAZIONI E METODI GENERATIVI

Nel tentativo di sviluppare un framework integrato per il Generative design, Singh ha identificato cinque principali metodi generativi:

- Shape Grammars;
- L-systems;
- Cellular Automata;
- Genetic Algorithms;
- Swarm Intelligence.

Le Shape Grammars (SG) sono sistemi di produzione costituiti da un insieme finito di forme con regole di trasformazione che vengono applicate passo dopo passo a una forma iniziale per generare disegni. A differenza della maggior parte dei sistemi di produzione, le SG sono spaziali, piuttosto che simboliche. Le regole di forma vengono applicate per generare progetti e per descriverli attraverso una “grammatica di generazione”. Per questo motivo le grammatiche delle forme vengono utilizzate sia in modo generativo che come strumenti di analisi per formalizzare i progetti esistenti.

I sistemi a L sono anche sistemi di produzione che possono essere usati per generare disegni riscrivendo ricorsivamente stringhe di simboli. Essi differiscono dalle SG in quanto operano su stringhe che rappresentano un disegno simbolicamente piuttosto che spazialmente.

Gli automi cellulari (Cellular Automata) possono essere pensati come dei sistemi dinamici astratti che giocano un ruolo nella matematica discreta comparabile a quello delle equazioni differenziali parziali nella matematica del continuo. Molti studiosi sono dell’opinione che le applicazioni più significative della teoria degli automi cellulari si avranno nella produzione di modelli in grado di simulare il comportamento intrinseco distribuito e di auto-organizzazione. Il concetto di automa cellulare fa la sua comparsa nell’ambiente scientifico nel 1947 allorché ci si propose di studiare la complessità dei fenomeni biologici e in particolare i meccanismi di funzionamento e auto-riproduzione degli esseri viventi.

Gli algoritmi genetici (GA) sono meta-euristici ispirati ai processi evolutivi presenti nella selezione naturale biologica. Impiegando operatori di ispirazione biologica come mutazione, crossover e selezione, gli GA vengono spesso utilizzati per generare soluzioni di buona qualità a problemi di ottimizzazione e ricerca.

I sistemi di Swarm Intelligence (traducibile come: intelligenza dello sciame) hanno lo scopo di risolvere i problemi senza la necessità di un controllo centralizzato o di un modello a livello globale. La *swarm intelligence* è una proprietà di un sistema che emerge quando un gran numero di agenti semplici interagiscono localmente con il loro ambiente per produrre modelli di comportamento coerenti a livelli più alti.

3.5 LA MODELLAZIONE PARAMETRICA

Oltre a questi metodi identificati da Singh, sono state utilizzate anche tecniche specificamente appropriate alla progettazione del prodotto. La più significativa è la modellazione parametrica, utilizzata nella maggior parte dei CAD moderni. La modellazione parametrica basata su feature descrive i modelli solidi simbolicamente in termini di un insieme di parametri e le loro relazioni, in modo tale che le modifiche in un parametro aggiorneranno l'intero modello. I modelli parametrici sono più familiari ai progettisti rispetto alle tecniche elencate da Singh e vengono utilizzate da molti flussi di lavoro esistenti e software, comprese la simulazione e l'analisi.

Tuttavia, le rappresentazioni parametriche non sono intrinsecamente generative e devono quindi essere adattate per servire come tali. In pratica, questo significa che devono essere sviluppati algoritmi per operare direttamente sui parametri del modello. La conversione da altre rappresentazioni generative come le grammatiche delle forme è possibile ma non sempre semplice.

La modellazione parametrica costituisce quindi un metodo di modellazione che consente la creazione di elementi solidi e di superficie, basato sull'uso di features e parametri. Essa rappresenta un approccio al mondo del CAD/CAM del tutto differente rispetto alle tradizionali forme di disegno 2D e di modellazione tridimensionale. La modellazione parametrica viene anche definita "*feature-based modeling*", perché ogni oggetto, solido

o superficie, viene creato attraverso una serie di *lavorazioni* o *features* che presentano degli attributi particolari: ognuna di queste features è infatti controllata dai *parametri*, principalmente dimensioni e relazioni tra parti. Vi sono varie tipologie di lavorazioni o features, alcuni esempi sono: le forature, i raccordi, gli smussi, ecc. Si parla di features anche nel caso delle quattro operazioni fondamentali, ovvero estrusione, rivoluzione, sweep e loft.

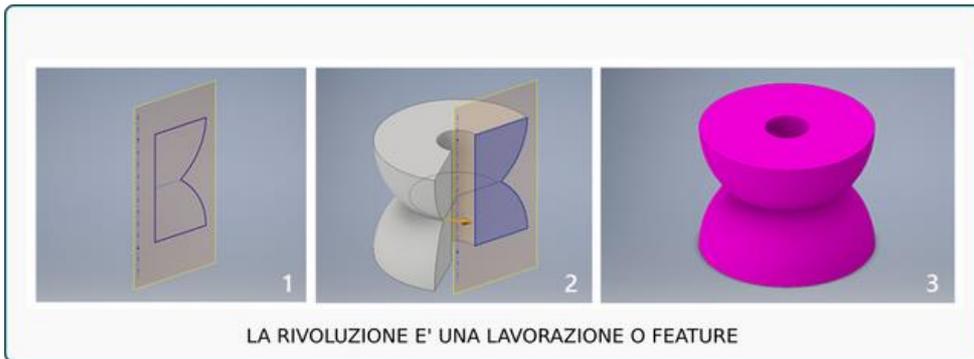


Fig. 3.1 Processo di rivoluzione di uno sketch.

Per quanto ciò che percepiamo siano le forme, i volumi, ovvero le superfici ed i solidi con cui si interagisce nello spazio di lavoro, alla base di ogni elemento c'è la matematica ovvero *un valore numerico oppure un'equazione specifica*.

La matematica è alla base di tutto e costituisce non un limite ma una preziosa risorsa. Ad esempio, quando si modella un cilindro, si deve avere a disposizione almeno due misure: un raggio o un diametro e un'altezza. Il modello tridimensionale del cilindro contiene da qualche parte queste informazioni, che costituiscono, per l'appunto, i suoi *parametri*.

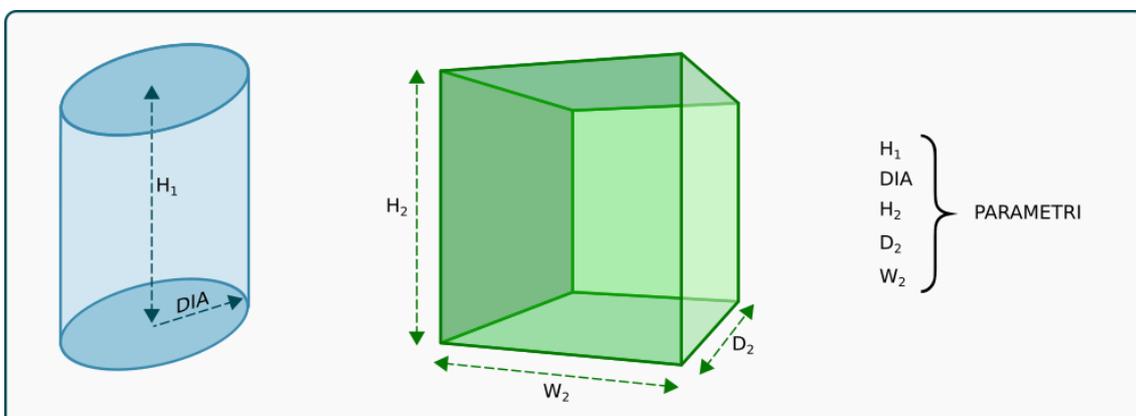


Fig. 3.2 Possibili parametri durante la creazione di solidi di rivoluzione.

Questo metodo di modellazione 3D ha costituito un grande passo in avanti nel mondo del CAD più tradizionale. È un approccio moderno, flessibile, innovativo, che permette un *costante controllo della geometria* (sia solidi che superfici) e delle regole matematiche che stanno alla base della geometria stessa.

Non costituisce, naturalmente, l'unica forma di modellazione tridimensionale, ma è il metodo di modellazione ideale per chi si occupa di ingegneria, design e architettura, garantendo un'altissima flessibilità e competitività e facendo del controllo il suo cavallo di battaglia.

3.5.1 Features o lavorazioni

Le *features* o *lavorazioni* rappresentano una sorta di *unità elementare di base* della modellazione parametrica, poiché costituiscono *tutte le operazioni che si possono svolgere nell'ambiente di lavoro*: dalle quattro operazioni fondamentali, ovvero estrusioni, rivoluzioni, loft e sweep, a lavorazioni quali forature, raccordi, smussi, svuotamenti, ecc.



Fig. 3.3 Processo di raccordo, smusso ed estrusione di una parte.

Ogni elemento dello spazio di lavoro viene realizzato a partire da una sequenza di lavorazioni (*features*) successive e ogni volta che si esegue una lavorazione, essa viene salvata dal software in una *timeline*, una sorta di narratore che permette a colpo d'occhio di leggere la sequenza di operazioni svolte dall'inizio alla fine, in ordine cronologico. Poiché le features sono a tutti gli effetti gli elementi di base della modellazione parametrica, ci si riferisce ad essa anche col nome di "*feature-based modeling*", ovvero *modellazione basata sulle features*.

Alcune features richiedono un disegno (2D o 3D) di base, altre invece sono applicate direttamente all'oggetto. Pertanto, possiamo dividerle in due categorie: *sketched-features* le prime e *applied-features* le seconde. Esempi di *sketched-features* sono le quattro operazioni di base: estrusione, rivoluzione, sweep e loft; le features che non richiedono un disegno di base sono, tra le altre, i raccordi, gli smussi, svuotamenti o ispessimenti, ecc.

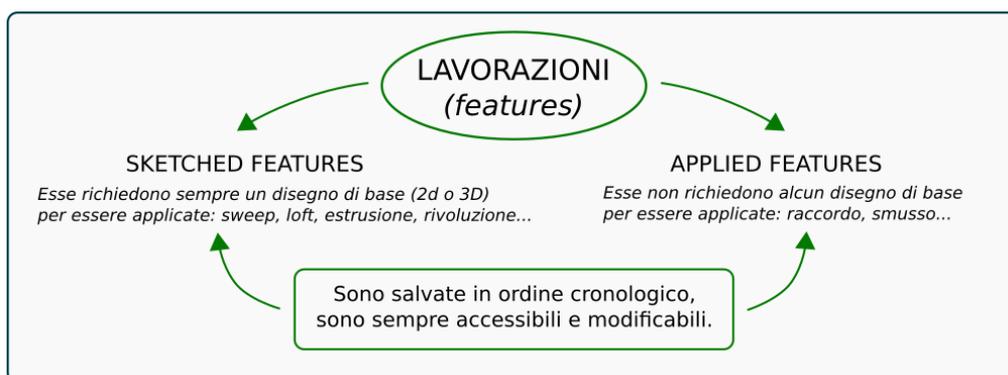


Fig. 3.4 Tipologie di lavorazioni salvate in ordine cronologico.

Le informazioni di base che definiscono le *caratteristiche delle lavorazioni* (il raggio di una circonferenza, la lunghezza di uno spigolo, l'altezza di un cilindro, l'angolo di una rivoluzione, etc.) sono dei *parametri*, che *costituiscono la base matematica e anche le unità elementari delle features*. I parametri più "ovvi" sono le *dimensioni*, che possono apparire come quote su un disegno, ma possono anche essere nascoste. Un parametro può essere un numero (una funzione matematica o una misura), un valore testuale o booleano (sì/no, vero/falso). Software come Autodesk Inventor e Fusion360 raccolgono tutti i parametri di una parte o di un assieme di parti in una lista.

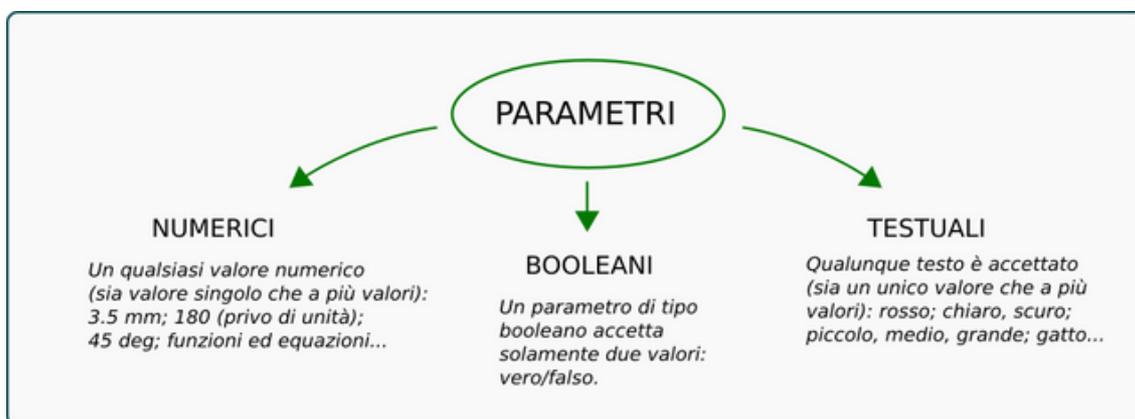


Fig. 3.5 Tipologie di parametri.

Si tratta di *informazioni che hanno un legame bidirezionale con la geometria*: i parametri dipendono dalla geometria e, al contempo, la geometria dipende dai parametri. Ciò significa che si possono modificare le caratteristiche geometriche di un solido o di una superficie non solamente attraverso la manipolazione diretta della geometria, ma anche cambiando i valori di alcuni parametri rilevanti che si trovano sulla lista o sulla tabella generata dal software. In entrambi i casi, si assiste ad una *doppia modifica contemporanea*: se si modifica un parametro si ottiene una modifica della forma, mentre se si varia la geometria dall'ambiente di modellazione si ottiene una modifica coerente del parametro correlato. Ecco perché si parla di bidirezionalità.

Questo è un grande vantaggio della modellazione parametrica, perché permette in qualunque momento di avere pieno controllo delle misure e delle caratteristiche di un corpo solido o di superficie. Basta avere l'accortezza di rinominare i parametri significativi o commentarli nella lista, in modo da riconoscerli facilmente in qualunque momento.

Quando si modella un oggetto utilizzando la modellazione 3D parametrica, il risultato della modellazione non è un oggetto ordinario ma costituisce un'intera classe di oggetti modificabili; è infatti possibile creare *infinite combinazioni di parametri per generare potenzialmente infinite variazioni dello stesso oggetto*. Ecco perché la modellazione parametrica è uno strumento considerato molto potente.

3.5.2 Le quattro operazioni fondamentali della modellazione 3D

Nel campo della modellazione, come nella matematica, esistono delle *operazioni di base*, quelle fondamentali che si trovano in tutti i software di grafica 3D.

Innanzitutto, le quattro operazioni fondamentali sono: estrusione, rivoluzione, sweep e loft.

1. ESTRUSIONE



Fig. 3.6 Processo di estrusione di uno sketch.

Il termine “estrusione” deriva dal nome dell'analogo processo di produzione industriale. Nella categoria degli oggetti estrusi rientrano parallelepipedi, cilindri, cubi ed in genere tutto ciò che ha come caratteristica una *sezione costante*.

Per realizzare un oggetto tramite estrusione, serve *un disegno 2D*, che ne costituisce la sezione e che può essere un profilo chiuso o aperto (nel primo caso otterremo di norma un solido e nel secondo una superficie), *una direzione di estrusione* (perpendicolare al piano su cui è disegnato il profilo) ed *una misura, che indica l'altezza* del corpo estruso.

Nella vita reale molti oggetti vengono realizzati per estrusione: alcune forme di pasta, i filamenti per le stampanti 3D, i tubi in PVC, etc.

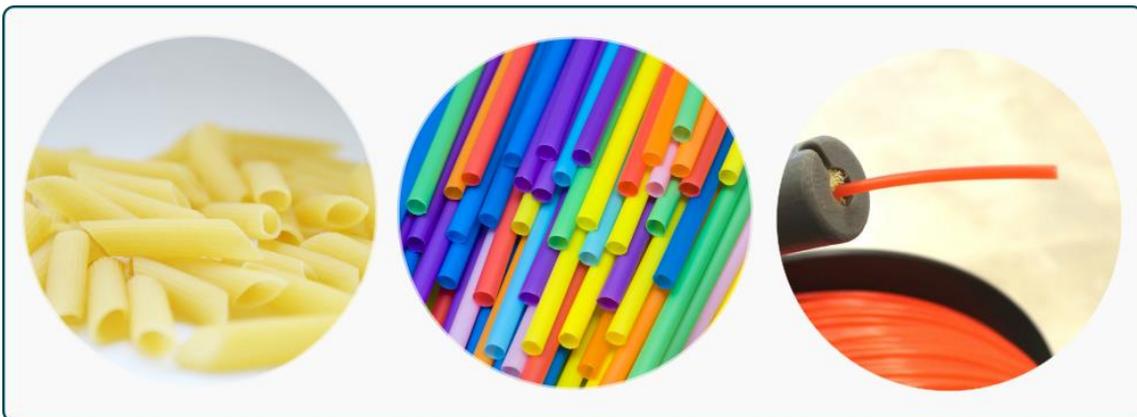


Fig. 3.7 Immagini di oggetti prodotti per estrusione.

2. RIVOLUZIONE

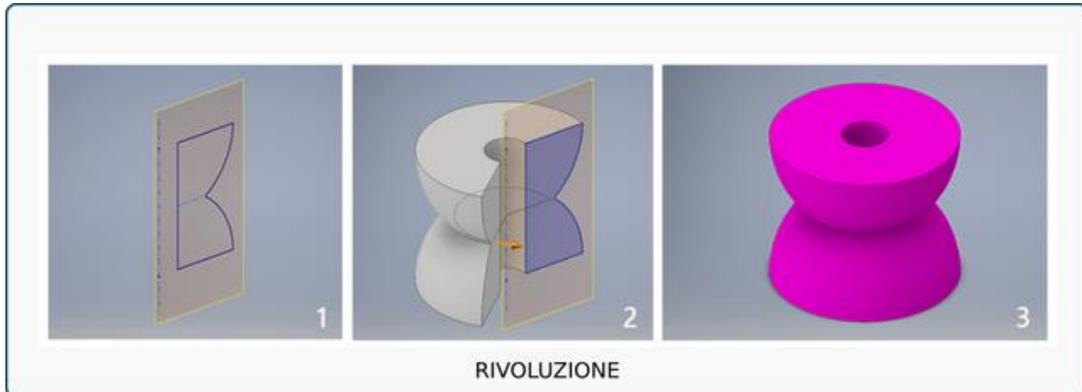


Fig. 3.8 Processo di rivoluzione di uno sketch.

In geometria *una superficie di rotazione o di rivoluzione è ottenuta ruotando una curva (detta generatrice o profilo) attorno ad una retta (l'asse di rotazione)*. L'operazione di rivoluzione nella modellazione parametrica è essenzialmente la stessa cosa. Un esempio di solido di rivoluzione è il cilindro, il quale può essere costruito tramite rivoluzione: un profilo rettangolare che ruota intorno ad un asse corrispondente ad uno dei lati del profilo stesso. Altri esempi sono, il toro, la sfera, il cono; usando questa lavorazione, si può modellare alcuni oggetti d'uso quotidiano, come una bottiglia, un bicchiere, un vaso, un piatto (piano o fondo), una ciotola, una tazza etc.

Per realizzare un oggetto tramite rivoluzione, serve *un disegno 2D* che ne costituisce la sezione e che può essere un profilo chiuso o aperto (nel primo caso si ottiene di norma un solido e nel secondo una superficie), *un asse* intorno al quale ruoterà tale sezione ed *un angolo compreso tra 0° e 360°* che definisce se la rivoluzione è parziale o totale.

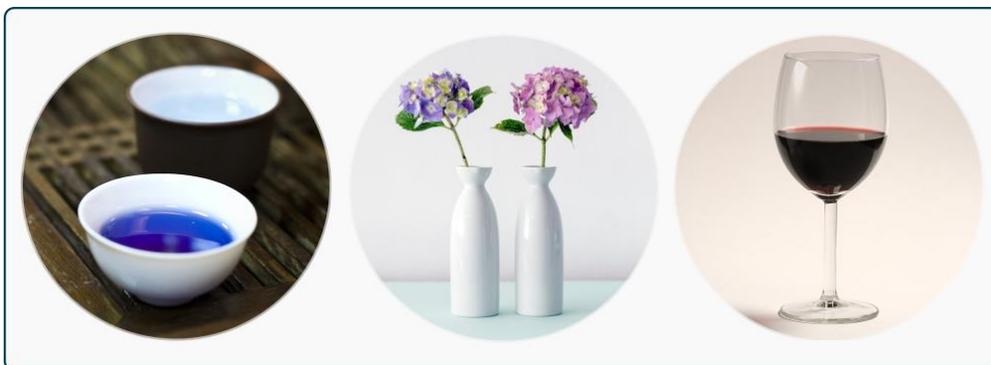


Fig. 3.9 Oggetti realizzati attraverso una rivoluzione.

3. SWEEP

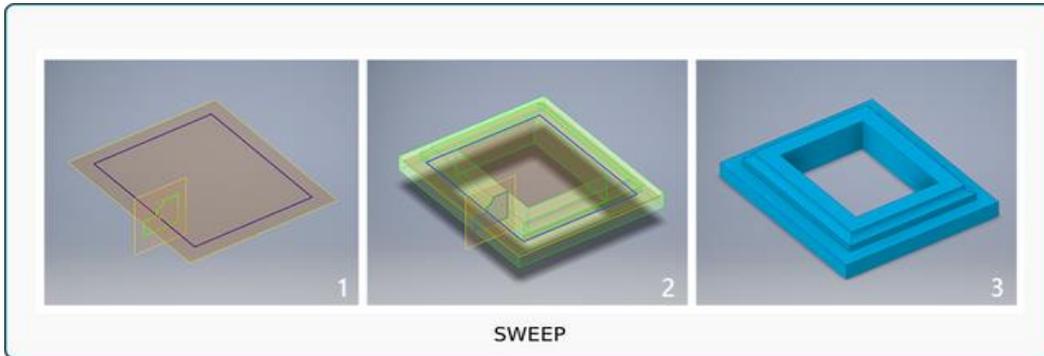


Fig. 3.10 Processo di sweep di uno sketch.

L'operazione che viene definita sweep è essenzialmente un'*estrusione lungo un percorso*. Tale percorso può essere una qualunque curva purché sia continua (un segmento di retta, una spezzata, un arco di circonferenza, una circonferenza intera, una spline ecc.).

Per realizzare un oggetto tramite sweep, serve *un disegno su un piano* che rappresenta la sezione ed *una curva nello spazio* che ne definisce il percorso di estrusione per poter ottenere poi delle superfici (se il profilo della sezione è aperto) o dei solidi (se è chiuso).

Tramite questa operazione si può modellare ad esempio, la cornice a sezione costante di un quadro, il telaio di una bicicletta, il corrimano di una scala, ecc.

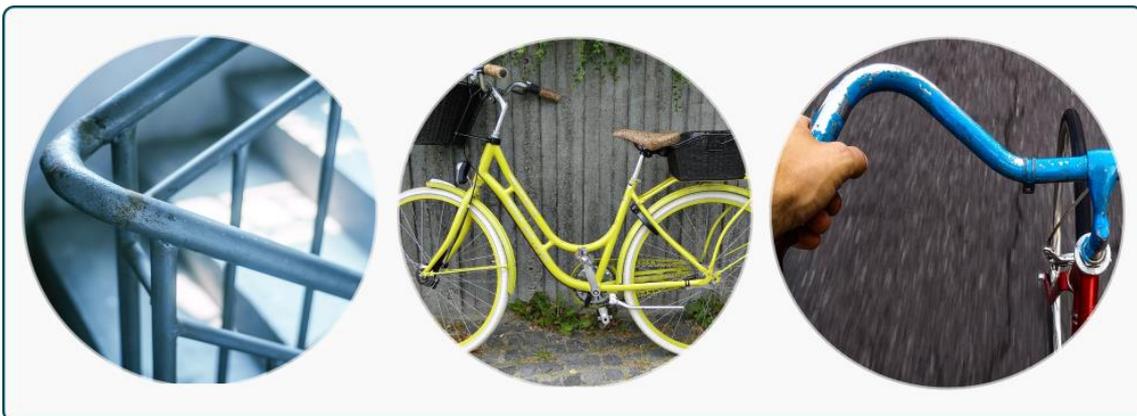


Fig. 3.11 Oggetti realizzati tramite sweep.

4. LOFT

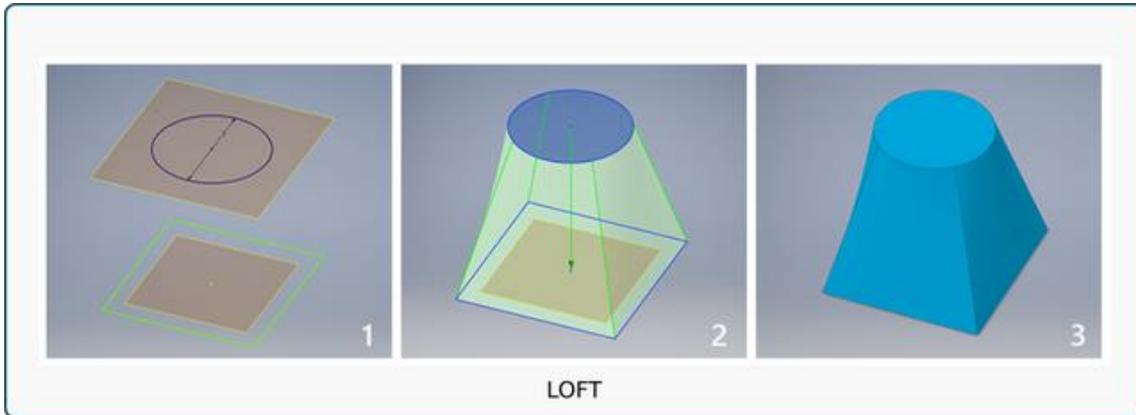


Fig. 3.12 Processo di creazione di un Loft tra 2 curve.

Trattasi di un'operazione complessa che *permette di creare un solido o una superficie di transizione tra più sezioni trasversali*. Due o più profili - chiusi o aperti - disposti in sequenza rappresentano le sezioni trasversali e vengono *interpolati* per la creazione dell'oggetto tridimensionale. L'operazione di loft deriva dall'industria navale, infatti gli scafi delle navi vengono realizzati tramite la tecnica di costruzione per sezione e fasciame. Tra gli oggetti d'uso quotidiano che possiamo creare tramite questa operazione vi sono, ad esempio, i manici di una pentola, l'impugnatura ergonomica di uno spazzolino da denti, la scocca di un asciugacapelli e perfino il corpo centrale di un aereo.

Per realizzare un oggetto tramite loft, servono *almeno due profili compatibili tra loro* che ne costituiscono le sezioni e *che non giacciono sullo stesso piano*; essi devono essere *selezionati in ordine* e, come nei casi precedenti, si possono ottenere delle superfici o dei solidi.

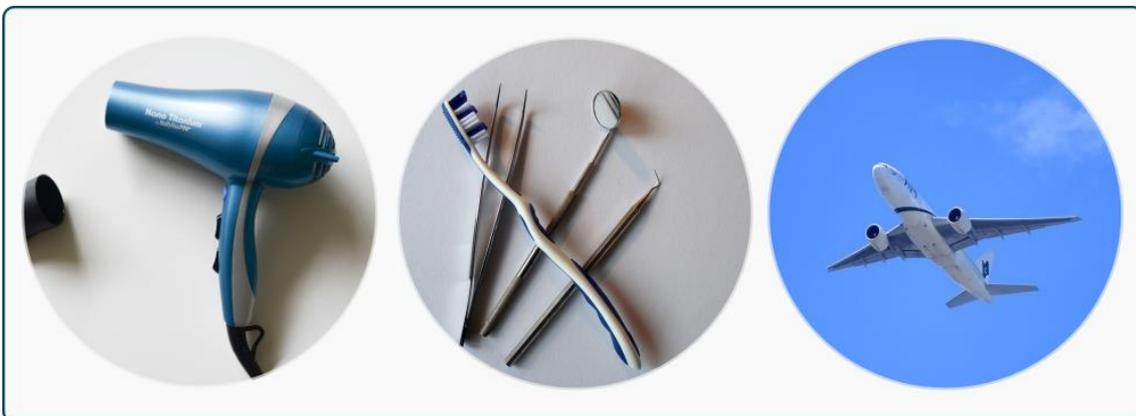


Fig. 3.13 Oggetti progettati tramite loft di curve di sezione.

Le quattro operazioni fondamentali sono tutte realizzate a partire da uno o più disegni 2D o 3D, appartengono quindi alla categoria delle “sketched features”.

Esistono, di norma, delle opzioni aggiuntive per ciascuna operazione, per esempio curve di controllo per il loft e lo sweep che controllano la forma del corpo 3D ottenuto, oppure la rastremazione per l'estrusione, che permette di ingrandire o rimpicciolire la sezione lungo il percorso di estrusione. Le operazioni sopra descritte permettono non solo di modellare nuovi oggetti ma anche di modificare quelli già esistenti, aggiungendo o sottraendo volume attraverso le *operazioni booleane*.

3.5.3 Operazioni booleane

Quando si esegue per la *prima volta* un'operazione di modellazione in un *file vuoto*, creando il primo volume solido nella scena, il software definisce automaticamente quell'operazione come "feature di base", perché nella storia del file non c'è nulla di antecedente che abbia prodotto un solido o una superficie.

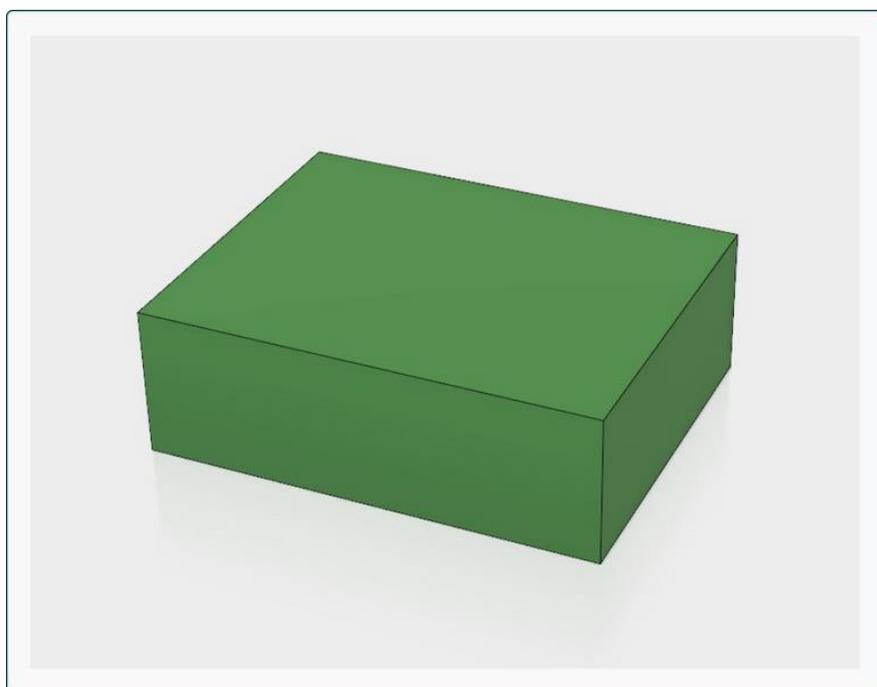


Fig. 3.14 Il solido di base.

A seguito di quella prima operazione, se ne possono eseguire delle successive e, a quel punto, il software permetterà di *scegliere* se tali operazioni debbano creare solidi nuovi, indipendenti da quel primo oggetto o se debbano provocare cambiamenti nel solido di base.

Per questa seconda opzione serviranno necessariamente le operazioni booleane.

Esse consistono in operazioni di unione, sottrazione e intersezione di *volumi solidi*. È bene precisare che non tutte le lavorazioni prevedono la scelta dell'operazione booleana, alcune infatti non lo consentono (ad esempio: raccordi, smussi e filettature). E, ancora, ovviamente le operazioni booleane valgono per le *feature* relative ad un solo oggetto solido, ma si applicano anche a corpi solidi separati da combinare a piacimento in base alle esigenze.

1. UNIONE

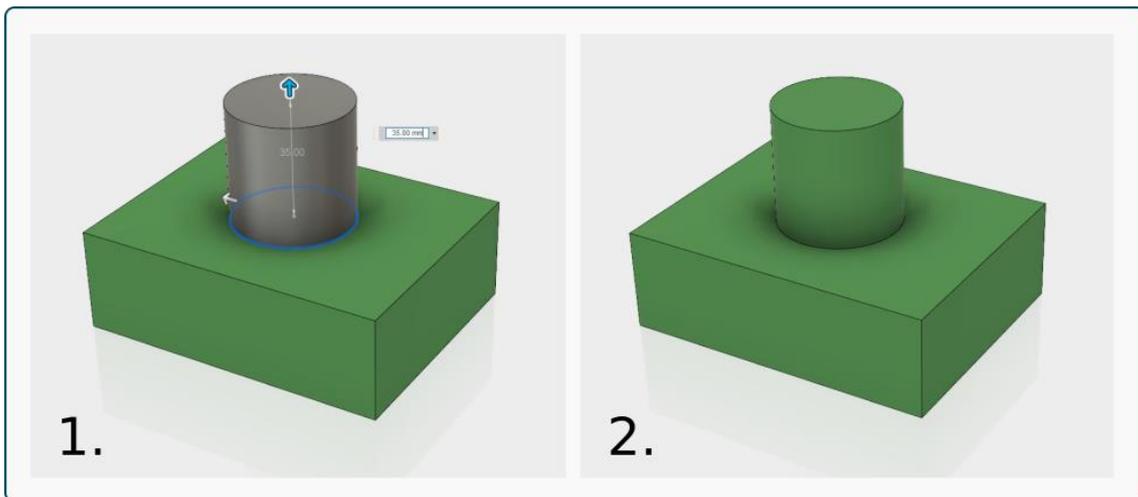


Fig. 3.15 Unione booleana (parallelepipedo + cilindro).

L'operazione booleana di *unione* permette di aggiungere volume ad un corpo solido tramite una lavorazione aggiuntiva o la combinazione con un altro solido in scena. Nell'esempio dell'immagine, un cilindro viene estruso ed aggiunto ad un parallelepipedo, selezionando l'*operatore booleano di unione* tra le opzioni di estrusione. Al termine dell'operazione, nella scena si avrà *un solo corpo solido*, risultante dalla combinazione dei due iniziali.

2. SOTTRAZIONE

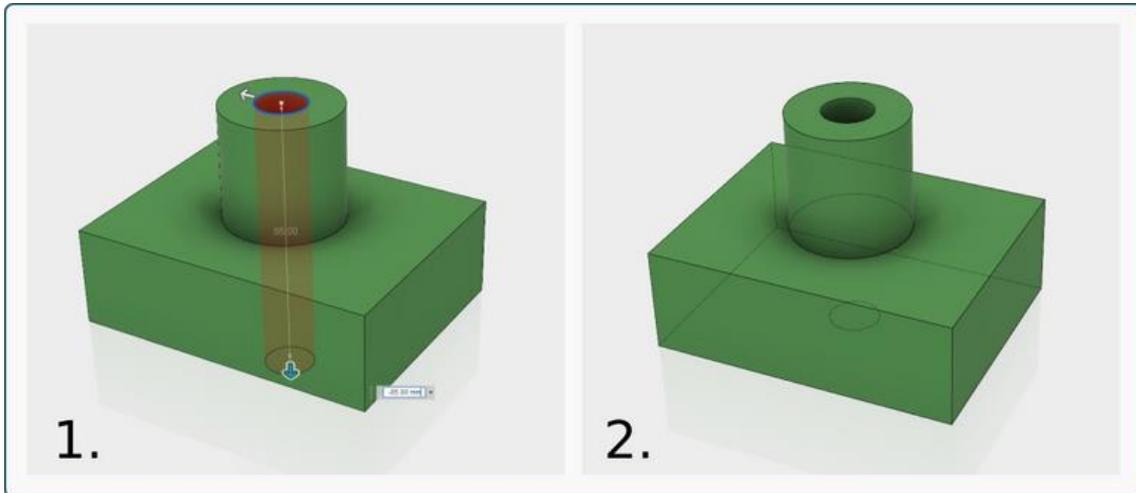


Fig. 3.16 Sottrazione booleana (solido - cilindro).

Quando si utilizza l'operatore booleano di *sottrazione*, al solido di base viene sottratto del volume tramite un altro corpo solido. Nell'esempio dell'immagine, al volume ottenuto in precedenza viene sottratto un cilindro al fine di ottenere un foro. Anche in questo caso, otterremo un *unico corpo solido* forato, anche se le estrusioni totali che ci hanno permesso di ottenere la forma finale sono tre (parallelepipedo+cilindro-cilindro)

3. INTERSEZIONE

Il solido finale è costituito dalla porzione di volume in comune tra un solido di base e un altro corpo solido. Nell'esempio, a partire dal risultato della precedente sottrazione, viene estruso un profilo a “C” giacente su un piano parallelo all'asse del corpo cilindrico e viene usata l'opzione *intersezione* come booleana: viene *mantenuto solamente il volume in comune* tra i due elementi, ottenendo in tal modo una geometria complessa e radicalmente differente da quella iniziale. Quando si realizza una *lavorazione*, si ha anche la possibilità di creare un volume totalmente separato ed indipendente dal solido di base: *un nuovo corpo solido* che si aggiunge al numero di corpi solidi in scena. In questo caso specifico *non viene applicata alcuna booleana*, anche se i due volumi si intersecano (o più precisamente si *compenetrano*) e occupano lo stesso spazio (quando si tratta di spazio virtuale, tutto è possibile!)

A partire da due geometrie identiche, è quindi possibile sfruttare le operazioni booleane per ottenere risultati sorprendentemente *differenti*. Di seguito, ecco cosa accade quando si applica tutte e tre le operazioni booleane a due identici volumi e, nell'ultimo caso, quando non si applica una booleana ma si creano due differenti corpi solidi.

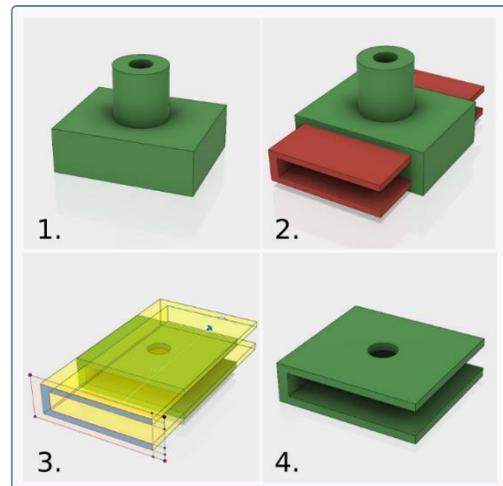


Fig. 3.17 Intersezione booleana (solido e profilo a "C").



Fig. 3.18 Applicazione delle operazioni booleane.

3.6 SOFTWARE GRASSHOPPER

Attraverso la rete è possibile avere una panoramica molto ampia per quanto riguarda i software utilizzati per la progettazione parametrica.

Sono molti, infatti i plugin ed i programmi che si possono scaricare, gratuitamente e a pagamento, dalla rete e che permettono, in affiancamento a programmi di progettazione come CAD e similari, di generare e gestire forme nuove e molto complesse.

Tra i software più utilizzati nel campo della progettazione parametrica ne vengono individuati cinque:

- Grasshopper associato a Rhinoceros;
- Dvnamo associato a Revit;
- Para 3d associato a 3d Studio Max;
- Xpresso associato a Cinema 4D;
- CATIA distribuito da Dassault Systèmes.

Nel dettaglio è stato approfondito maggiormente il plugin Grasshopper che per le sue potenzialità, flessibilità e dialogo con altri software a largo utilizzo che ne viene fatto per la progettazione parametrica. Inoltre, nel caso studio preso in esame, è stato adottato un approccio parametrico alla progettazione ingegneristica, mediante l'utilizzo della programmazione visuale di Grasshopper.

Rhinoceros è un potente software di modellazione e grafica 3D sviluppato da McNeely & Associates. Il programma è specializzato unilateralmente nella modellazione NURBS (Non Uniform Rational B-Splines), che significa modellazione di superfici a forma libera. Questo software consente la creazione, l'analisi, la modifica e l'esportazione di curve NURBS. Le curve NURBS possono essere definite come la notazione matematica della geometria di qualsiasi forma 2D (curve, linee, cerchi, archi, ecc.) Fino a forme e superfici 3D complesse. Rhinoceros fornisce i mezzi per costruire accuratamente il modello in fase di creazione e lo prepara per il calcolo dell'animazione, la creazione di disegni, la creazione di immagini, la prototipazione rapida, le prestazioni di analisi e, ultimo ma non meno importante, l'orientamento alla produzione.



Fig. 3.19 Logo Grasshopper.

Grasshopper viene definito come il software basato sul linguaggio di programmazione visuale sviluppato da David Rutten a Robert McNeel & Associates e rilasciato gratuitamente nel Settembre del 2007 inizialmente chiamato *Explicit History*.

Grasshopper funziona all'interno dell'applicazione Rhinoceros 3D CAD.

Questo plugin è diventato parte degli strumenti standard di Rhinoceros nella versione 6.0 e successive.

Grasshopper è interessante per gli utenti perché offre la possibilità di creare una struttura algoritmica complessa che consiste nel generare una serie di componenti progettati per creare geometrie 3D. Il suo utilizzo è molto intuitivo e illustrativo. L'uso principale di Grasshopper è creare modelli parametrici generativi. Viene utilizzato nella progettazione generativa, che è attualmente un campo in via di sviluppo e si basa su codici casuali e vari algoritmi. Gli strumenti di modellazione parametrica sono utilizzati nell'ingegneria strutturale, architettura e nella produzione additiva. Vengono utilizzati anche altri tipi di algoritmi, come quelli numerici, testuali e audiovisivi. La progettazione di un componente avviene utilizzando gli strumenti di progettazione generativa di Rhinoceros 6 e Grasshopper, i quali lavorano insieme per creare il componente.

3.6.1 L'interfaccia

Una volta caricato il plug-in si riuscirà a visualizzare il foglio di lavoro di Grasshopper, in questa interfaccia ci sono molti elementi, buona parte dei quali familiari all'utente che utilizza Rhinoceros:

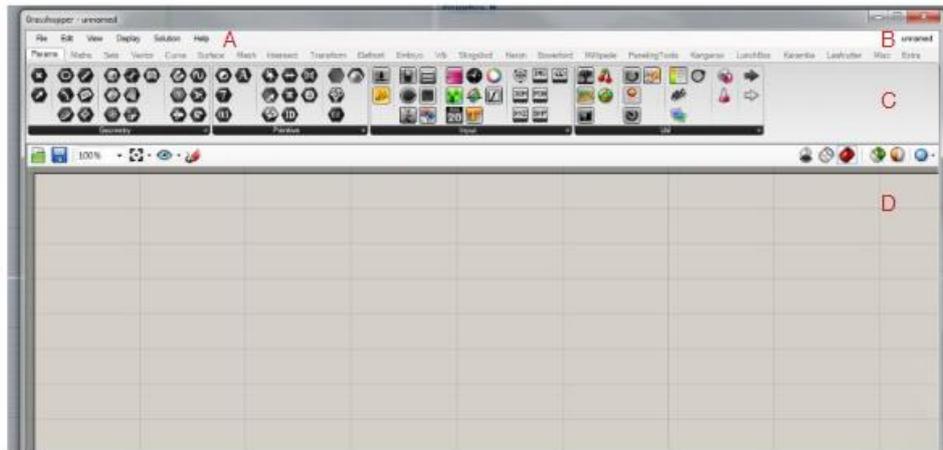


Fig. 3.20 Interfaccia Grasshopper.

A La barra principale del menu

Il menù è del tutto simile a quelli di Windows, con l'eccezione del controllo per la ricerca dei file sull'estremità destra **B**. Con questo menù a tendina si può scorrere velocemente tra i file caricati. Attenzione se si usano i comandi da tastiera (shortcuts), poiché sono gestiti dalla finestra attualmente attiva che può essere quella principale di Rhino, quella di Grasshopper o qualsiasi altra finestra di dialogo all'interno di Rhino.

B La ricerca dei file

Come già anticipato, questo menu a tendina viene usato per passare tra un file e l'altro di quelli caricati.

C Pannello dei Componenti

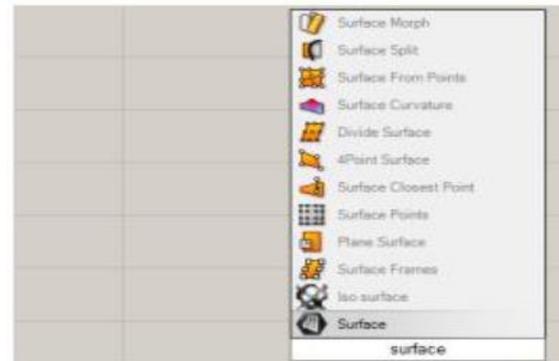
Questo pannello mostra tutte le categorie di componenti, ognuno dei quali appartiene ad una certa categoria (tipo "Param" per tutti i tipi di dati primitivi, o "Curves" per tutti gli strumenti che hanno a che fare con le curve). Ogni categoria ha il suo specifico pannello. Larghezza e lunghezza delle barre possono essere personalizzate, consentendo di tenere visibili più o meno pulsanti per categoria. I pannelli di categoria contengono tutti i componenti che appartengono a quella categoria poiché potenzialmente il loro numero può essere molto elevato, vengono mostrati solo quelli più recenti. Per visualizzare gli altri, è invece necessario premere sulla freccia nera nell'angolo in basso a sinistra della barra: si può selezionare il componente desiderato e trascinarlo sul canvas (la parte dove si compone il progetto). La sola selezione del componente lo rende disponibile nel menù chiuso, ma per usarlo è comunque necessario trascinarlo sul canvas.



Fig. 3.21 Componenti di Grasshopper.

Si possono trovare i componenti anche facendo doppio click sull'area del canvas e scrivendo il nome nella finestra che appare:

vedrai una lista di componenti che rispondono al criterio di ricerca (che contengono la parola scritta).



D Canvas

Questo è lo spazio dove definisci e disegni lo schema dell'History. Il Canvas (letteralmente la tela su cui dipinge il pittore) ospita sia gli oggetti che compongono la definizione che alcuni Widgets di interazione con l'utente G. Gli oggetti sul canvas hanno una codifica che ne indica lo stato:

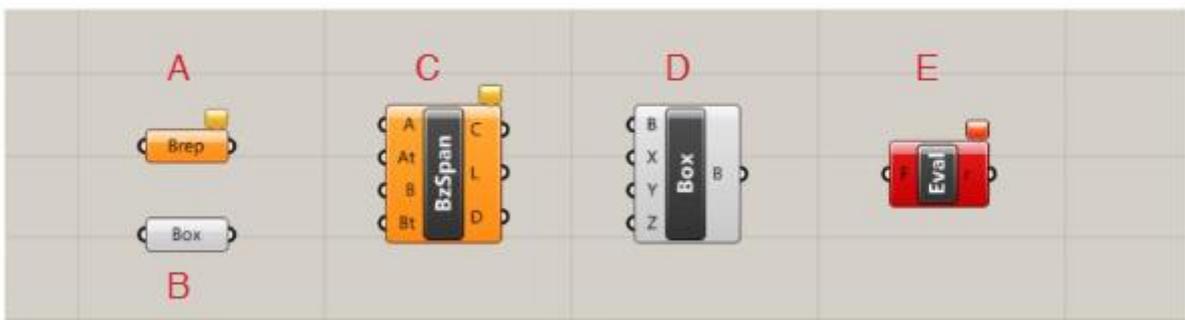


Fig. 3.22 Componenti e Parametri.

- A) Parametro. Un parametro che contiene avvisi è mostrato in arancio. La maggior parte dei parametri inizialmente appaiono di questo colore, perché non ancora connessi a dati.
- B) Parameter. Un parametro che non contiene errori né avvisi (colore nero).

- C) Componente. Un componente è sempre un oggetto più complesso, contenendo parametri di Input e di output. Questo specifico componente ha associato almeno un avviso (colore arancio). Si può individuare qual è il parametro che genera avvisi ed errori attraverso il menu contestuale degli oggetti (tasto destro su corpo o input/output dell'oggetto).
- D) Componente. Un componente che non contiene errori ne avvisi (colore nero).
- E) Componente. Un componente che contiene almeno un errore (colore rosso).
L'errore può derivare sia dal componente che da uno dei parametri di input/output.

Tutti gli oggetti selezionati vengono mostrati con un sovra-colore verde.

3.6.2 Oggetti Grasshopper

Una definizione di GH si compone di molti tipi di oggetti, ma per iniziare è necessario comprendere almeno la differenziazione tra:

- Parametri;
- Componenti.

I parametri contengono dati, nel senso che immagazzinano informazioni. I componenti contengono azioni nel senso che svolgono determinate azioni.

- A) Un parametro che contiene dati. Dal momento che non c'è alcuna connessione sul lato sinistro dell'oggetto, significa che non eredita i suoi dati da qualcos'altro. I parametri che non contengono errori o avvisi sono blocchetti di colore nero con dicitura orizzontale.
- B) Un parametro che non contiene alcun dato. Qualsiasi oggetto che non contiene dati è considerato sospetto in una definizione di History (storia di costruzione) esplicita, poiché non se ne vede l'utilità. Per conseguenza, tutti i parametri (appena aggiunti) sono di colore arancio, ad indicare che non contengono (ancora) dati e non hanno alcun effetto tangibile sul risultato della soluzione dell'History. Nel momento in cui un parametro eredita o gli viene attribuito un dato, diventa nero.
- C) Un componente selezionato. Tutti oggetti selezionati presentano una sovra-colorazione verde.
- D) Un componente regolare.

- E) Un componente che contiene avvisi/o. poiché è probabile che un componente abbia diversi input ed output, ad intuito non si può capire quale abbia generato l'avviso. Ce ne possono essere anche più di uno. Con il menù contestuale, ne si possono individuare le cause. A volte gli avvisi non devono necessariamente essere risolti. Possono essere perfettamente regolari.
- F) Un componente che contiene almeno un errore. Come per gli avvisi, non è possibile vedere a prima vista qual è l'origine dell'errore.
- G) Una connessione. Le connessioni sono sempre tra un parametro di output ed uno di input, non esiste alcun limite al numero di connessioni che un parametro può avere, ma non è possibile creare una definizione con connessioni cicliche/ricorsive.

3.6.3 Parti di un componente

Un componente normalmente richiede dati per svolgere la sua azione, che di solito produce un risultato.

Questa la ragione per cui gran parte dei componenti hanno un set di parametri annidati a cui ci si riferisce come parametri di Input e di Output. Gli Input si trovano sul lato sinistro del componente, mentre gli Output sono sul lato destro:

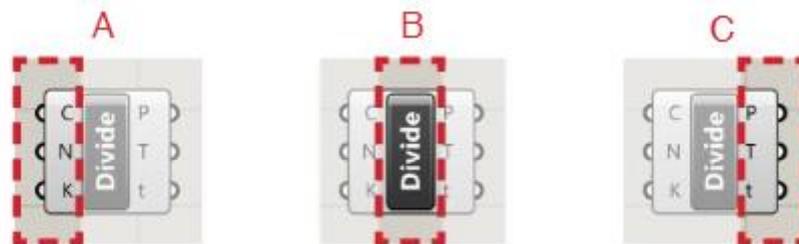
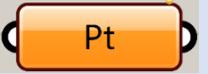
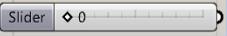
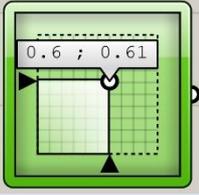
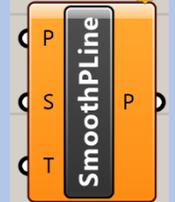


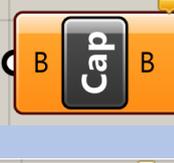
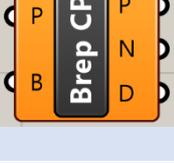
Fig. 3.23 Divisione del componente.

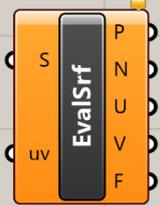
- A) I tre parametri di Input del componente *Divisione*. Di default, i nomi dei parametri sono abbreviati. Eventualmente sono anche rinominabili a discrezione;
- B) L' area del componente *Divisione* (di solito contenente il suo nome);
- C) I tre parametri di Output del componente *Divisione*.

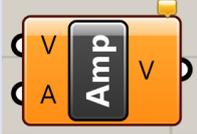
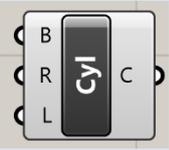
3.7 COMPONENTI E PARAMETRI PRINCIPALI UTILIZZATI NELLA CREAZIONE DELL'ALGORITMO

NOME	IMMAGINE	DESCRIZIONE
Mesh Parameter		Rappresenta una raccolta di geometria Mesh. Le mesh in Rhino sono costituite esclusivamente da triangoli e quad. Le mesh contengono sempre un array di vertici, un array normale (uno per ogni vertice) e un array di facce. Le mesh possono contenere anche i colori e le coordinate delle texture dei vertici.
Point Parameter		Rappresenta una raccolta di coordinate del punto 3D. I parametri dei punti sono in grado di memorizzare dati persistenti. È possibile impostare i record persistenti tramite il menu dei parametri.
Number Slider		Un cursore è uno speciale oggetto dell'interfaccia che consente l'impostazione rapida di singoli valori numerici. È possibile modificare i valori e le proprietà tramite il menu o facendo doppio clic su un oggetto cursore. I cursori possono essere resi più lunghi o più corti trascinando il bordo più a destra a sinistra oa destra. Notare che i cursori hanno solo grip di output. Gli slider vengono visualizzati automaticamente nel pannello Grasshopper
MD Slider		Un cursore multidimensionale
Text Panel		Un pannello è come un adesivo Post-It™. Tipicamente è un oggetto inattivo che consente di aggiungere piccole osservazioni o spiegazioni a un documento. È possibile modificare il testo tramite il menu o facendo doppio clic sulla superficie del pannello. I pannelli possono anche ricevere le loro informazioni da altrove. Se inserisci un parametro di output in un pannello, puoi vedere il contenuto di quel parametro in tempo reale. Tutti i dati in Grasshopper possono essere visualizzati in questo modo.
Construct Point		Costruisci un punto dalle coordinate {xyz}.
Line		Crea una linea tra due punti.

Fit Line		Adatta una linea a una raccolta di punti.
Divide Curve		Dividi una curva in segmenti di uguale lunghezza
List Item		Recupera un elemento specifico da un elenco.
Plane Normal		Crea un piano perpendicolare a un vettore.
Mesh / Plane		Risolve un eventuale intersezione tra una mesh e un piano (altrimenti noto come sezione).
Curve closet point		Trova il punto più vicino su una curva.
Sort List		Ordina un elenco di tasti numerici. Affinché qualcosa possa essere ordinato, deve prima essere comparabile. La maggior parte dei tipi di dati non sono confrontabili, numeri e stringhe sono praticamente le uniche eccezioni. Se desideri ordinare altri tipi di dati, come le curve, devi prima creare un elenco di chiavi.
Smooth Polyline		Leviga i vertici di una curva polilinea.

Offset Curve		Offset di una curva con una distanza specificata.
Offset Surface		Compensare una superficie di una quantità fissa.
Control Points		Estrai i punti di controllo nurbs e i nodi di una curva.
Nurbs Curve		Costruisci una curva nurbs dai punti di controllo.
Loft		Crea una superficie loft attraverso un insieme di curve di sezione.
Cap Holes		Tappare tutti i fori planari in un Brep.
Brep Closet Point		Trova il punto più vicino su un brep di un determinato punto.
Surface Closet Point		Trova il punto più vicino su una superficie di un determinato punto.

Evaluate Surface		Valuta le proprietà della superficie locale in corrispondenza di una coordinata {uv}.
Align Planes		Allinea i piani minimizzando la loro rotazione seriale.
Radians		Converti un angolo specificato in gradi in radianti.
Rotate Plane		Eseguire la rotazione del piano attorno all'asse z del piano.
Vector 2Pt		Crea un vettore tra due punti.
Move		Trasla (sposta) un oggetto lungo un vettore.
Orient		Orienta un oggetto. L'orientamento è talvolta chiamato "trasformazione ChangeBasis". Consente la rimappatura della geometria da un sistema di assi a un altro.
End Points		Estrai i punti finali di una curva.
Plane Through Shape		Crea una superficie rettangolare più grande di una data forma.

Plane Offset		Crea un Offset di un piano.
Amplitude		Imposta l'ampiezza (lunghezza) di un vettore.
Reverse		Invertire un vettore (moltiplicare per -1).
Mirror		Specchia un oggetto.
Curve Middle		Ottieni il punto nel mezzo di una curva
Cylinder		Crea una superficie cilindrica.
Fillet Edge		Filettare alcuni bordi di una brep.
Extrude		Estrudi curve e superfici lungo un vettore.
Edge Surface		Crea una superficie da due, tre o quattro curve di bordo.

Boundary Surfaces		Crea superfici planari da una raccolta di curve del bordo limite.
4Point Surface		Crea una superficie che collega tre o quattro punti d'angolo.
Brep Edges		Estrai le curve di bordo di un brep.
Flip		Capovolge le normali di una superficie in base alla geometria locale o remota
Solid Difference		Esegui una solida differenza su due set Brep.
Solid Union		Esegui una solida unione su una serie di Breps.
Mesh Brep		Crea una mesh che si avvicini alla geometria Brep.

3.8 FASE DI CREAZIONE DELL'ALGORITMO

Per la generazione del dispositivo da applicare alla maniglia si sono susseguite differenti fasi di progettazione. In primis, è stato aperto nella piattaforma di Rhinoceros il file della maniglia scansionata attraverso l'ausilio del dispositivo Sense 3D Scanner. Successivamente è stata aperta la piattaforma Grasshopper per la generazione dell'algoritmo (vedi foto sottostanti).

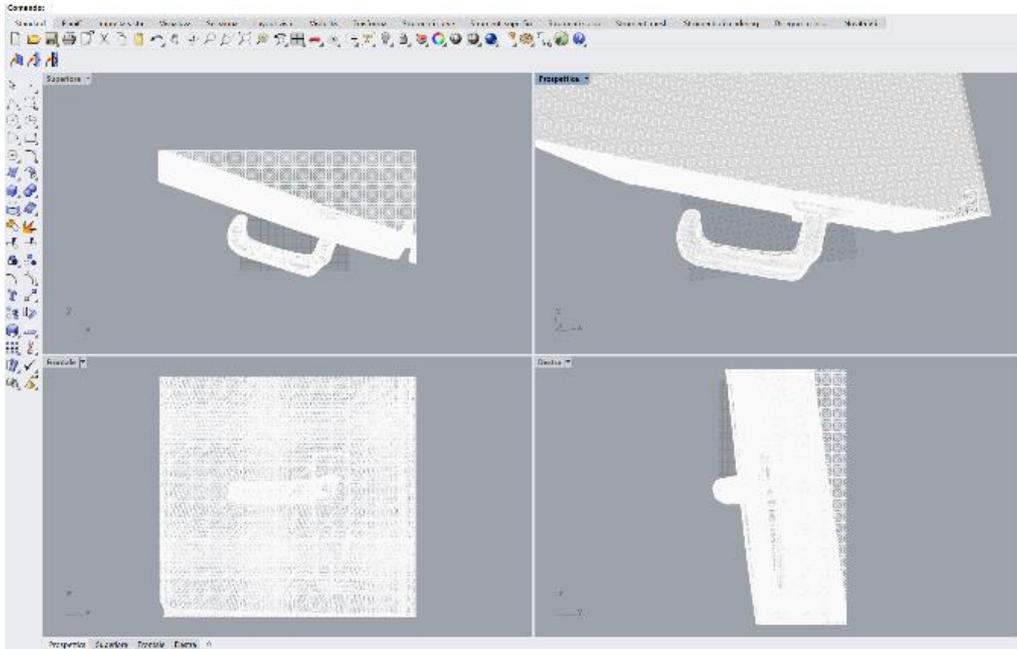


Fig. 3.24 Apertura del file di scansione maniglia all' interno di Rhinoceros.



Fig. 3.25 Mesh della Maniglia selezionata.

Nella figura 3.25 è raffigurato il prodotto finale della scansione effettuata. Quest'ultima è una Mesh della maniglia originale che è stata successivamente ritagliata e modificata attraverso l'eliminazione delle superfici non necessarie ai fini del progetto. Infine, all'interno del software dello scanner, con il comando Solidifica, è stata chiusa la mesh. Si è pensato di rendere tale algoritmo il più parametrico possibile, dando la possibilità all'utente che andrà ad utilizzarlo di personalizzare il proprio lavoro in maniera semplice e veloce, modificando gli svariati parametri utilizzati per la generazione del dispositivo.

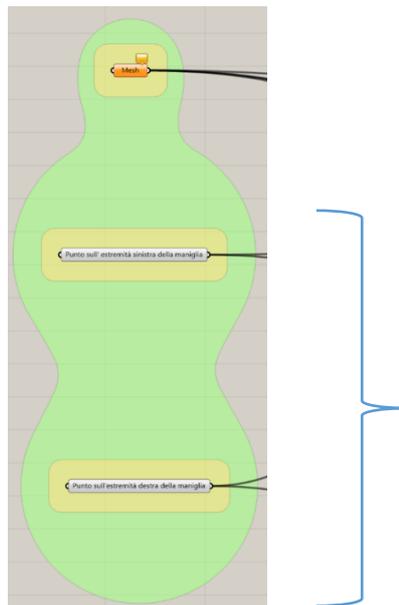


Fig. 3.26 Input dell'algoritmo generato.

Nel primo blocco dell'algoritmo sono presenti i 3 input principali. Il comando mesh (componente arancione nell'immagine) che prende come input la mesh da poter elaborare all'interno della piattaforma Grasshopper e 2 punti (racchiusi nella parentesi graffa in immagine), che l'utente dovrà selezionare sulla superficie della maniglia dove sarà generato il dispositivo. Nell'immagine sottostante viene illustrata la selezione dei due punti di input sulla maniglia.

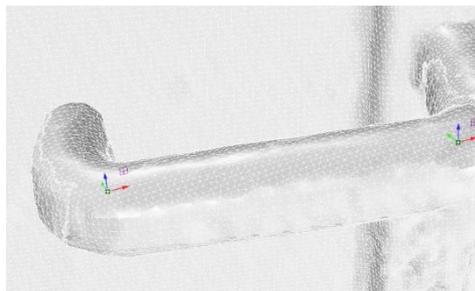


Fig. 3.27 Selezione dei due punti della maniglia.

Il secondo Blocco dell'algorithmo è dedicato alla creazione delle sezioni della maniglia.

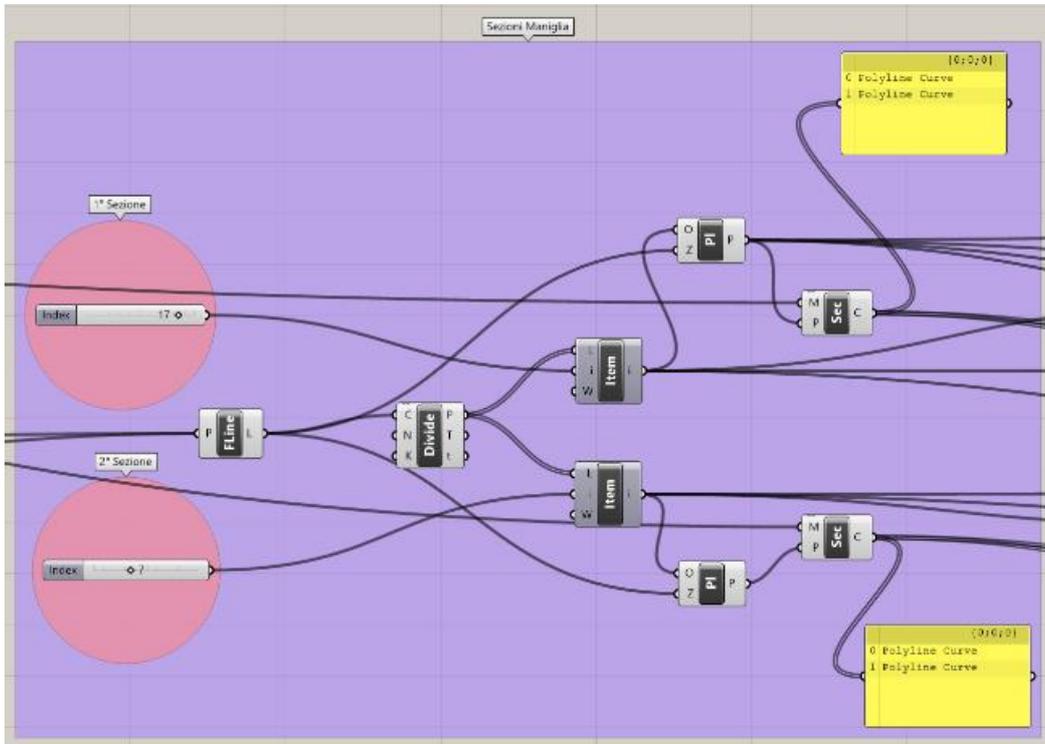


Fig. 3.28 Blocco Sezioni Maniglia dell'algorithmo.

È stato utilizzato il comando Fit Line per la generazione di una linea a partire dai due punti di input, la quale è stata suddivisa in 20 parti uguali.

Vengono poi selezionati, 2 punti dalla lista di divisione della linea, i quali avranno lo scopo di alloggiare il piano per le sezioni.

Utilizzando successivamente il comando List Item associato al Number Slider sono stati variati i punti in cui verranno costruiti i piani per la successiva sezione della mesh.

Importante evidenziare che il comando Number slider è il primo fattore che rende parametrico l'algorithmo creato.

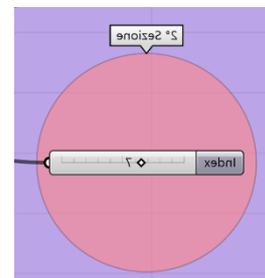


Fig. 3.29 Number Slider.

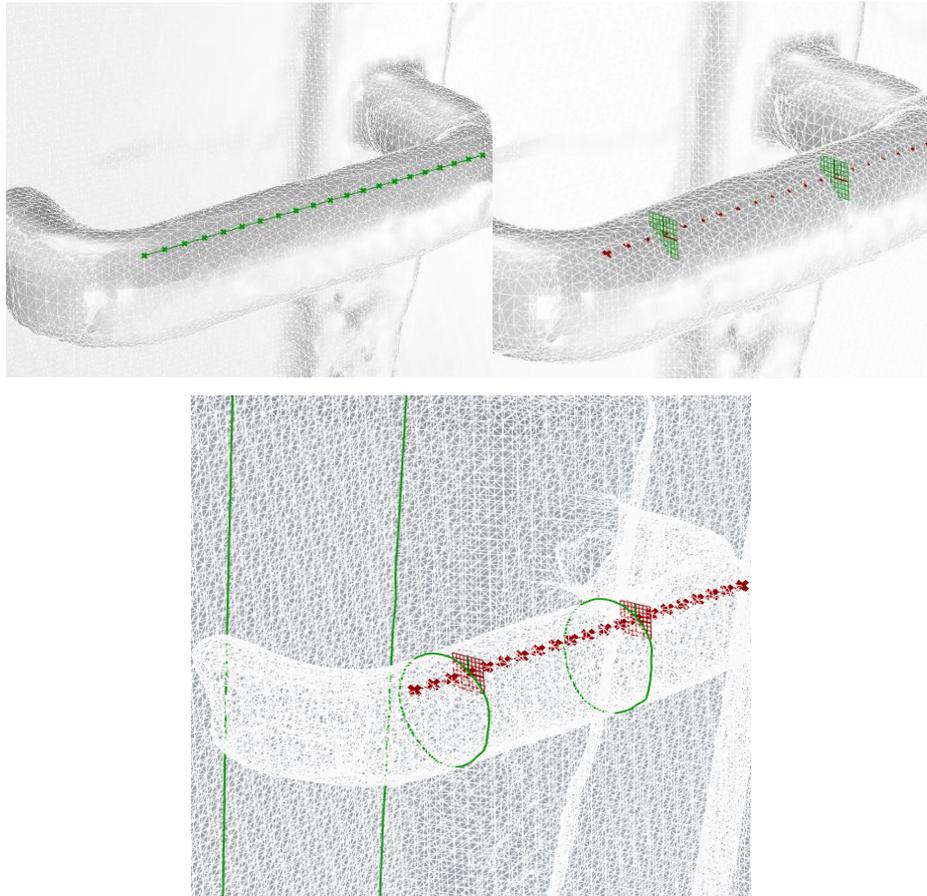


Fig. 3.30 Illustrazione del processo di generazione sezioni della maniglia.

Il risultato di ogni sezione può essere una serie di Polilinee chiuse, quindi è stato realizzato un blocco per la generazione di un criterio di selezione della polilinea associata alla sezione della maniglia. Questo è stato realizzato selezionando la Polilinea più vicina al punto precedentemente selezionato per la generazione della sezione stessa. Inoltre, viene fatta una prima approssimazione della polilinea con il comando Smooth Polyline.

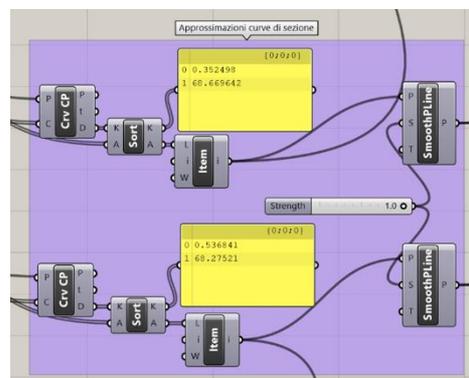


Fig. 3.31 Blocco di approssimazione delle curve di sezione dell'algoritmo.

Nel successivo blocco viene generato l'anello che andrà ad aderire alla superficie della maniglia. Per fare questo sono state generate le polilinee di offset partendo da quelle di sezione. Partendo dai punti di controllo delle polilinee di offset vengono generate delle curve chiuse che verranno utilizzate nel comando Loft per la generazione dei cilindri che circondano la maniglia.

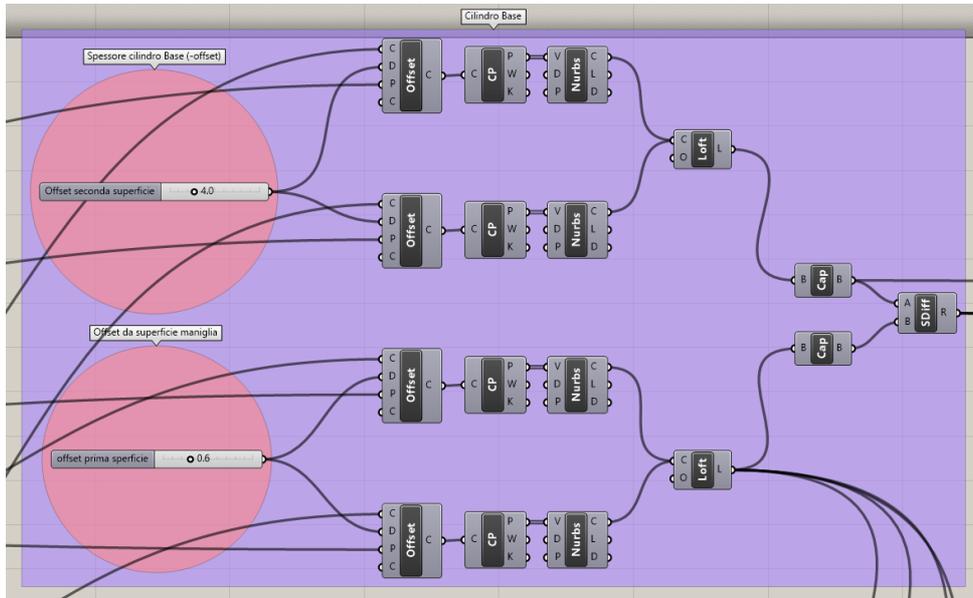


Fig. 3.32 Blocco generazione del Cilindro Base dell'algoritmo.

I cilindri vengono chiusi e successivamente viene fatta la sottrazione booleana per generare l'anello di fissaggio alla maniglia.

Grazie al comando Number Slider è stato reso parametrico l'offset delle curve. Questo input permette di impostare e variare lo spessore dell'anello di fissaggio e il gioco tra quest'ultimo e la maniglia per una corretta installazione.

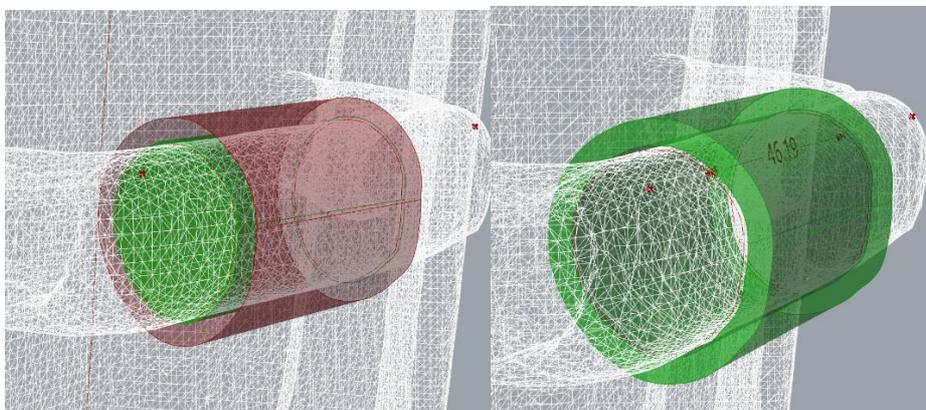


Fig. 3.33 Illustrazione del processo di generazione dell'anello base.

A questo punto si è continuato il lavoro creando la superficie base per la generazione della paletta principale.

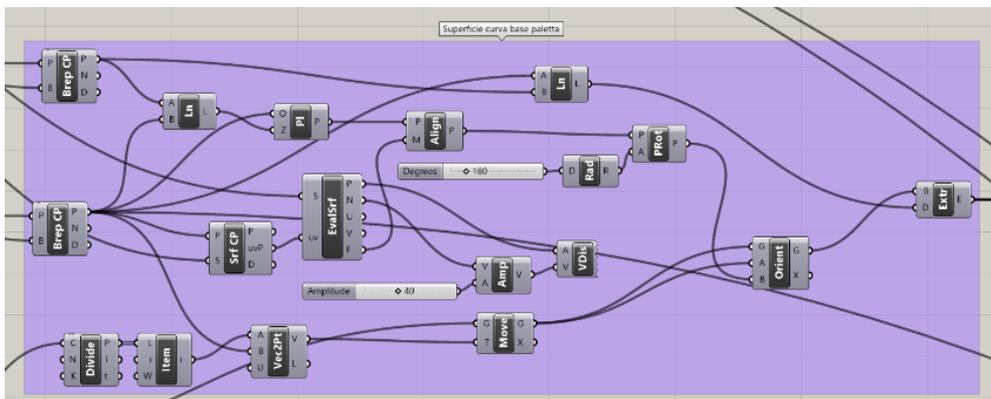


Fig. 3.34 Blocco Superficie di base della Paletta principale dell' algoritmo.

In primo luogo, a partire da 3 punti dalle coordinate parametriche è stata generata una curva nurbs.

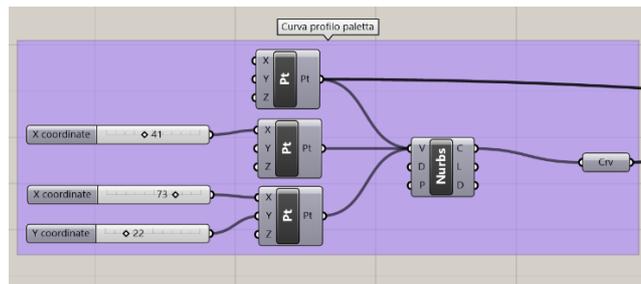


Fig. 3.35 Blocco generazione curva per profilo paletta principale dell' algoritmo.

Successivamente i punti da cui sono partite le sezioni primarie vengono proiettati nella superficie dell'anello di fissaggio. Su tale proiezione, che genera a sua volta dei punti, avrà luogo l'origine della curva nurbs che è stata creata per il profilo della paletta principale. In seguito viene effettuata una valutazione della superficie dell'anello nel punto proiettato per orientare la curva nurbs perpendicolarmente alla superficie.

Infine, con il comando Extrude è stata generata la superficie base della paletta principale.

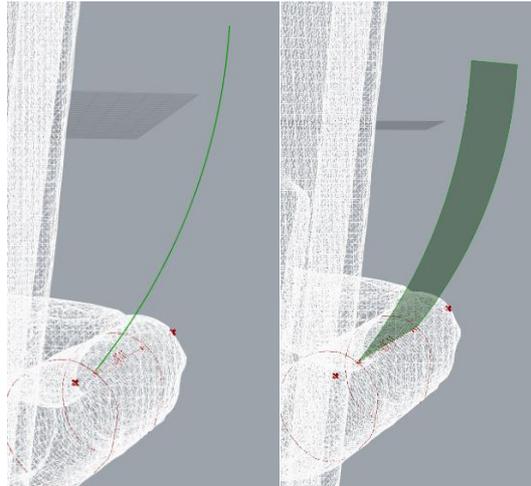


Fig. 3.36 Illustrazione del processo di generazione della curva e superficie base della paletta principale.

Dopo la generazione della superficie di base della paletta si è continuato con la progettazione della restante parte della paletta.

Tale passaggio è stato condotto creando una superficie offset identica alla precedente a una distanza anch'essa parametrica che stabilisce lo spessore della paletta. Con il comando Brep Edges sono state suddivise le superfici nelle loro linee di contorno che sono state successivamente selezionate per la generazione delle superfici di chiusura della paletta. Viene così creata con il comando Solid Union una Brep chiusa che rappresenta la paletta principale.

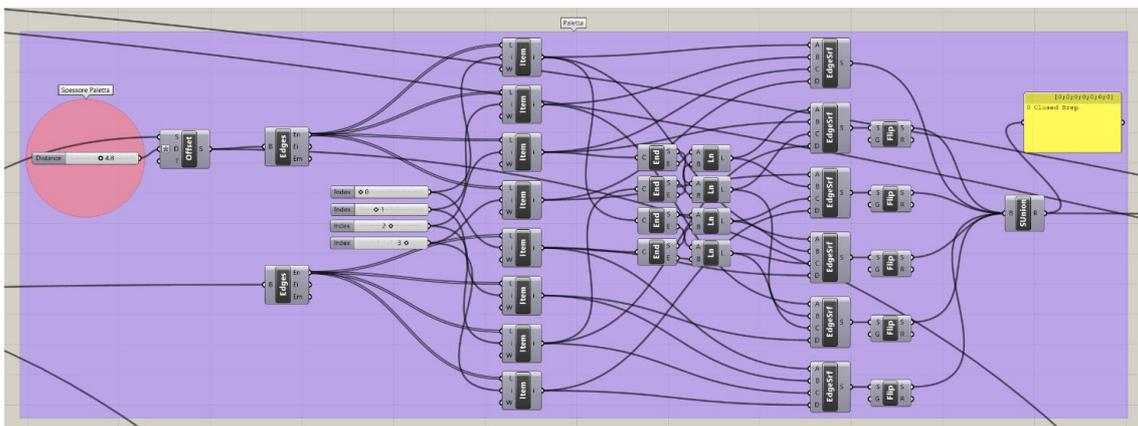


Fig. 3.37 Blocco generazione paletta principale dell' algoritmo.

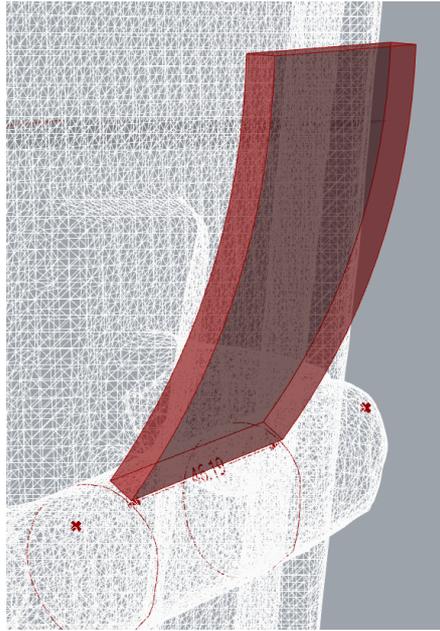


Fig. 3.38 Illustrazione della paletta principale dell'algoritmo.

Una volta generata la paletta principale si è pensato di suddividere l'anello di fissaggio in due parti per il successivo montaggio sulla maniglia stessa.

Questo è stato fatto generando due piani per eseguire la sezione dell'anello di fissaggio. Con il comando *Plane Through Shape* si è creato un rettangolo più grande del perimetro della sezione che successivamente è stato estruso per generare il solido. Quest'ultimo è stato utilizzato per la sottrazione booleana all'anello di fissaggio. Lo spessore del solido di separazione, al fine di poter cambiare l'entità del taglio di quest'ultima, è stato reso parametrico con il comando *Slide Number*.

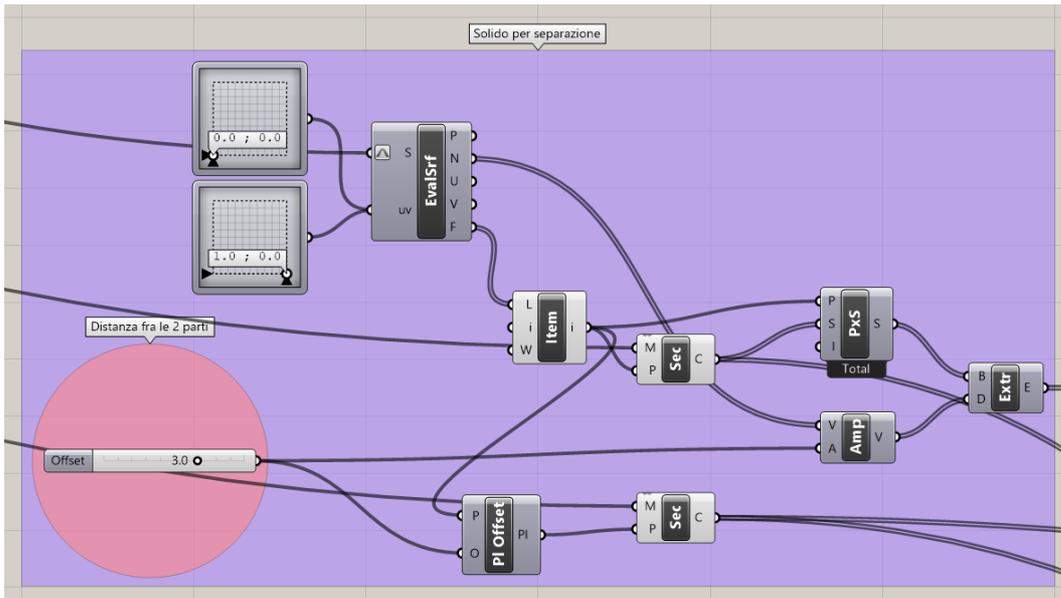


Fig. 3.39 Blocco Solido di separazione dell'algorithm.

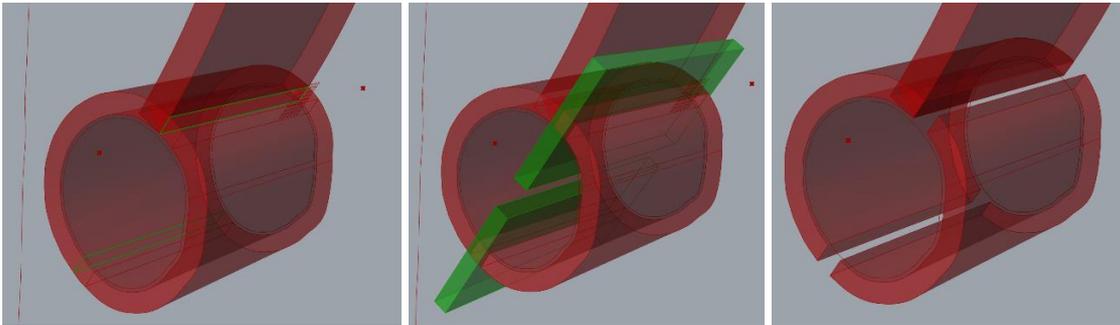


Fig. 3.40 Illustrazione della generazione del solido di separazione e dell'operazione booleana di sottrazione.

Il blocco rappresentato nell'immagine sottostante rappresenta la generazione delle ulteriori palette di fissaggio per il montaggio del dispositivo sulla maniglia.

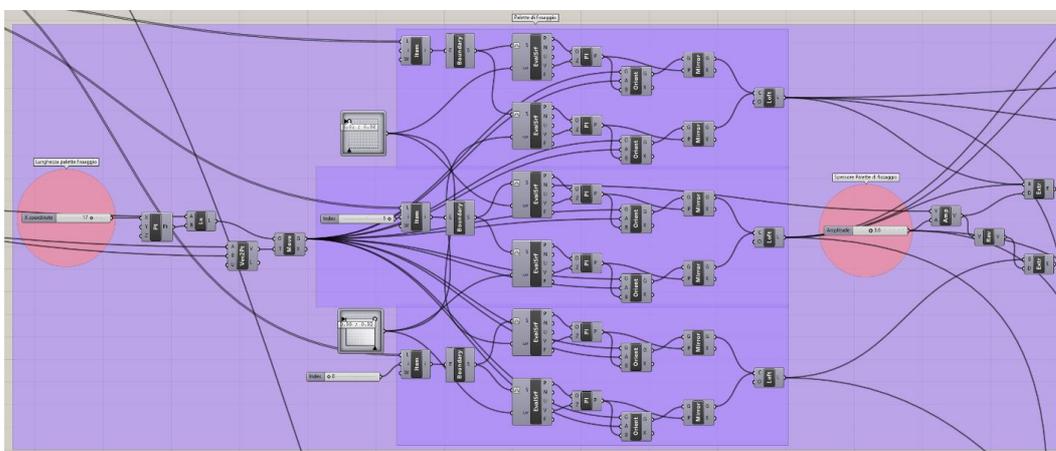


Fig. 3.41 Blocco Palette di Fissaggio dell'algorithm.

In primo luogo, si è creata una linea con lunghezza parametrica per poter variare la lunghezza delle palette di fissaggio. Successivamente, con il comando Evaluate Surface e l'annesso parametro MD Slider sono stati selezionati i punti d'origine della curva che andrà a generare la palette di fissaggio. Una volta posizionate ed orientate le linee, con il Comando Loft sono state generate le superfici di base e successivamente estruse per la creazione del solido delle palette di fissaggio. Lo spessore delle palette è stato reso parametrico.

Con il comando Fillet Edge sono stati raccordati gli spigoli delle palette.

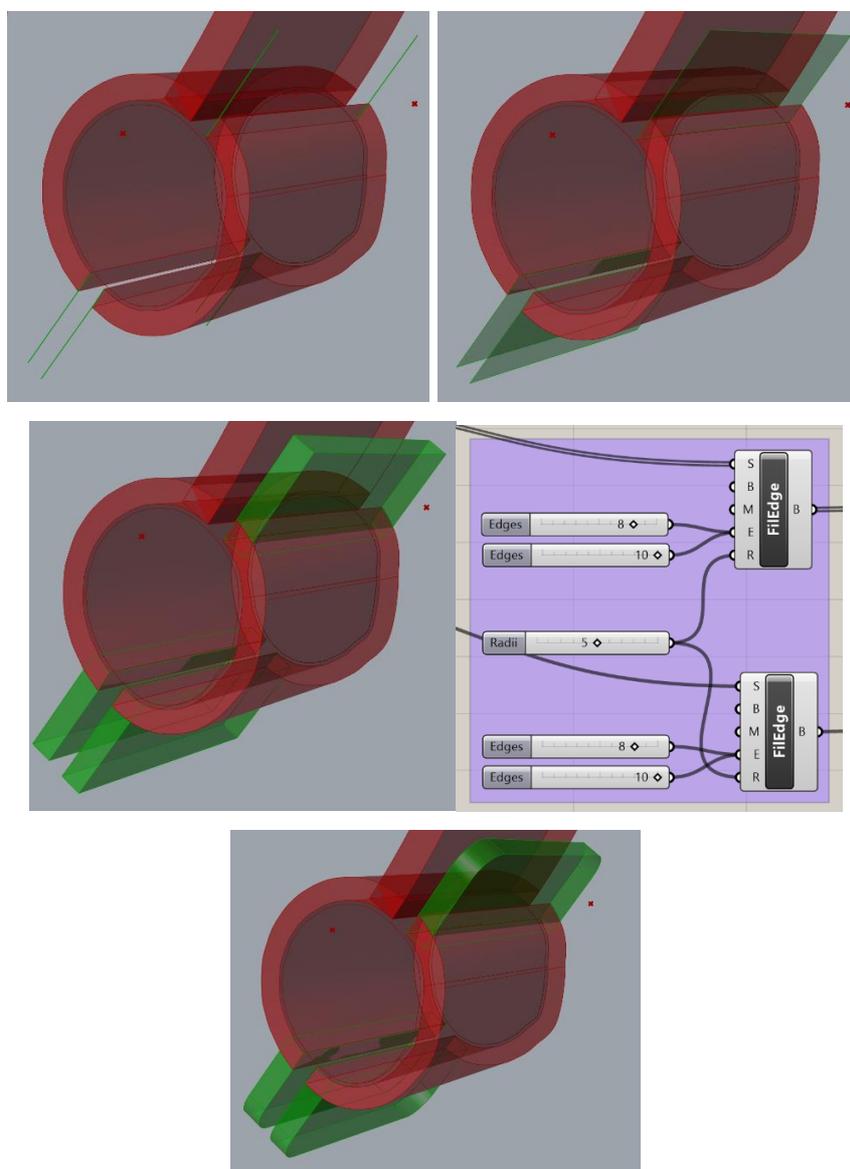


Fig.3.42 Illustrazione del processo di generazione delle palette di fissaggio e dei raccordi.

A questo punto un altro passaggio importante è quello della creazione dei fori passanti per l'alloggiamento delle viti per il fissaggio.

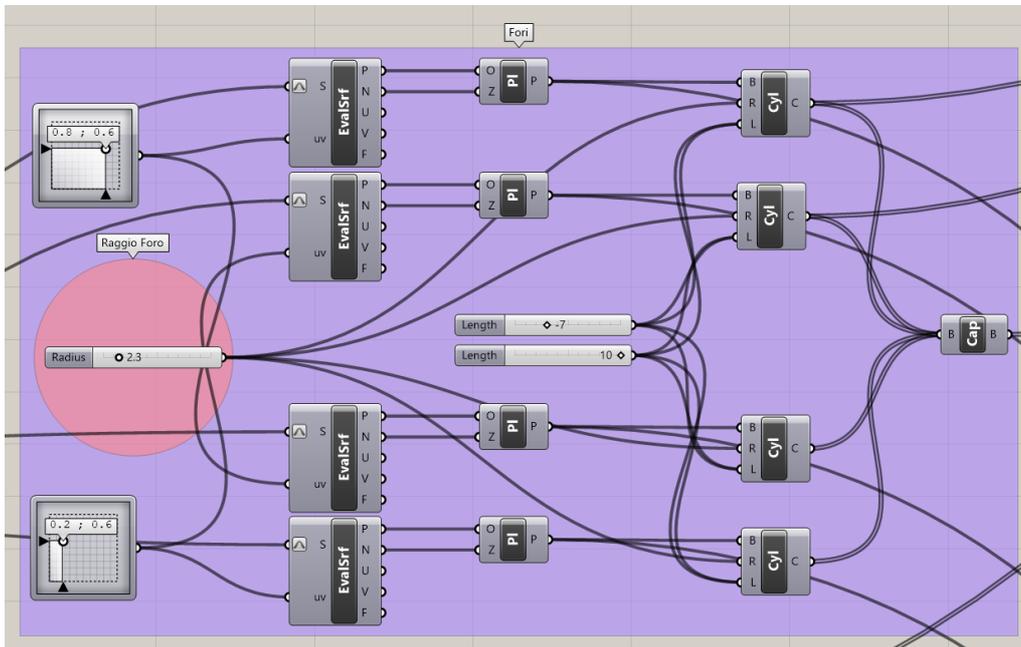


Fig. 3.43 Blocco Fori passanti dell'algoritmo.

Per fare ciò con il comando Evaluate Surface e l'annesso parametro MD Slider sono stati selezionati i punti d'origine dei fori sulla superficie delle palette. In tali punti sono stati successivamente generati cilindri di raggio parametrico che in seguito sono stati chiusi alle estremità.

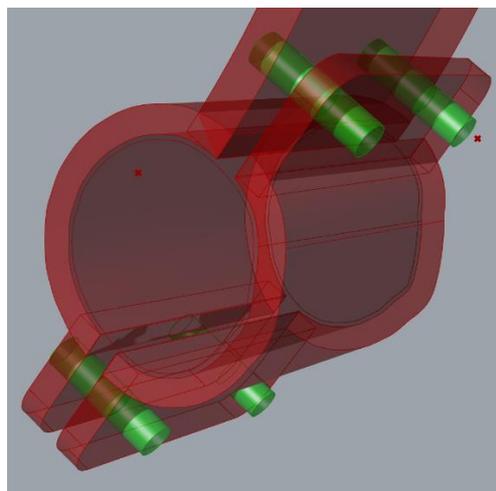


Fig. 3.44 Illustrazione del processo di generazione solidi per fori passanti.

Per rendere il dispositivo più resistente a sforzi meccanici sono stati progettati dei raccordi tra le giunzioni dei vari componenti solidi del dispositivo. Questo è stato fatto generando dei solidi a partire da punti appartenenti alle superfici delle palette e dell'anello

di fissaggio. Infine, è stata operata una sottrazione booleana tra tali solidi e dei cilindri di raggio elevato per permettere l'alloggiamento delle viti per il fissaggio alla maniglia.

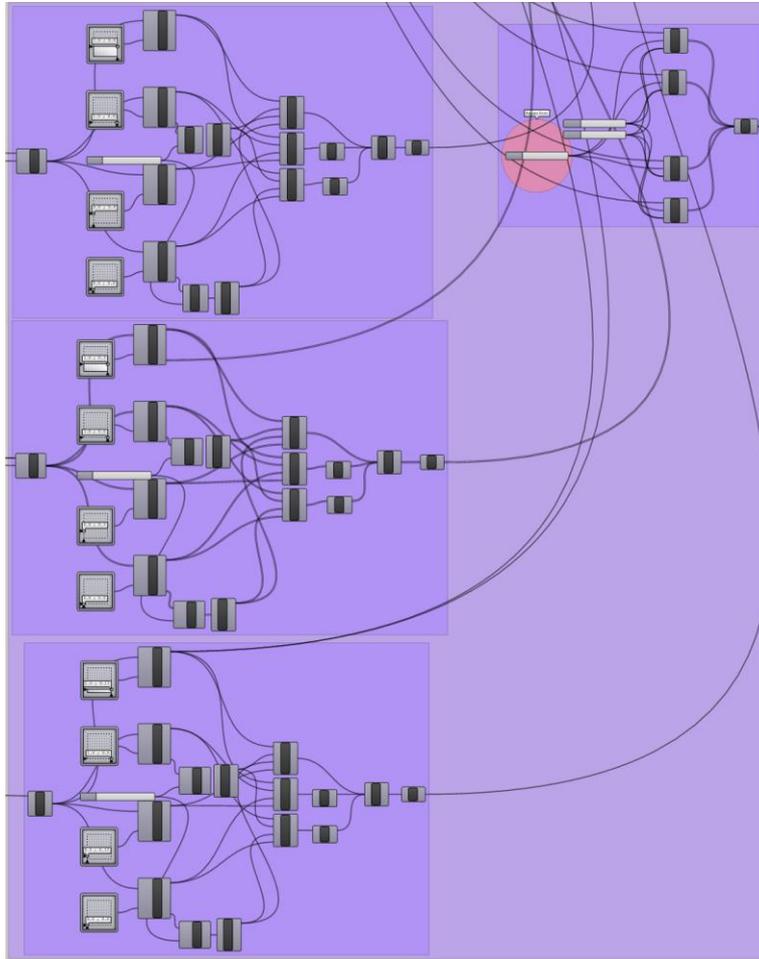


Fig. 3.45 Blocco Solidi di raccordo dell'algoritmo.

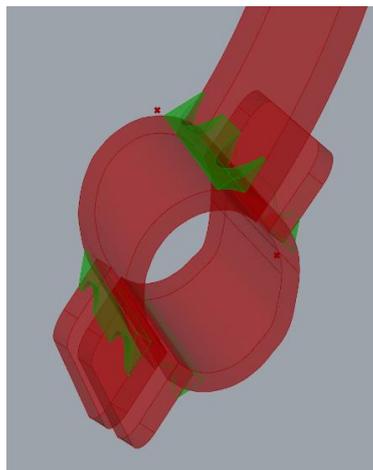


Fig. 3.46 Illustrazione del processo di generazione dei solidi per il raccordo.

L'ultimo passaggio importante dell'algoritmo è stato attuare le varie intersezioni ed unioni dei vari solidi che compongono il dispositivo per generarne uno unico.

Questo solido è stato trasformato con il comando Mesh Brep in una mesh che si avvicina il più possibile al solido generato.

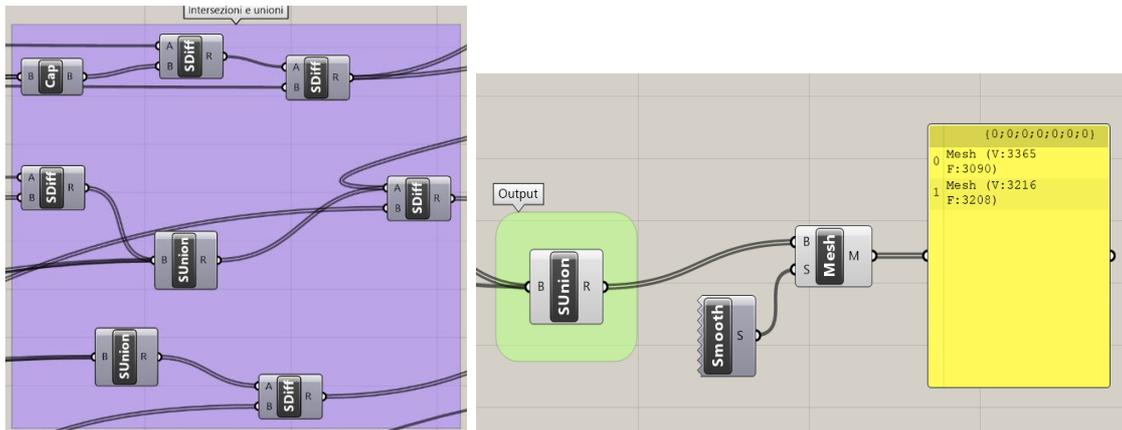


Fig. 3.47 Ultimi componenti di operazioni booleane e di generazione mesh finale.

Per la creazione di questo algoritmo è stata compiuta una riflessione mirata ad ogni singolo componente di quest'ultimo per rendere ciò il più parametrico possibile e di facile utilizzo.

In particolare, nel flusso delle informazioni e trasformazioni si possono interpretare facilmente:

- I 3 input iniziali, indispensabili per il funzionamento dell'algoritmo;
- I blocchi che caratterizzano le varie generazioni;
- I parametri evidenziati in rosso con cui si possono modificare i valori delle varie funzioni;
- Un unico output finale che fornisce il dispositivo ultimato.

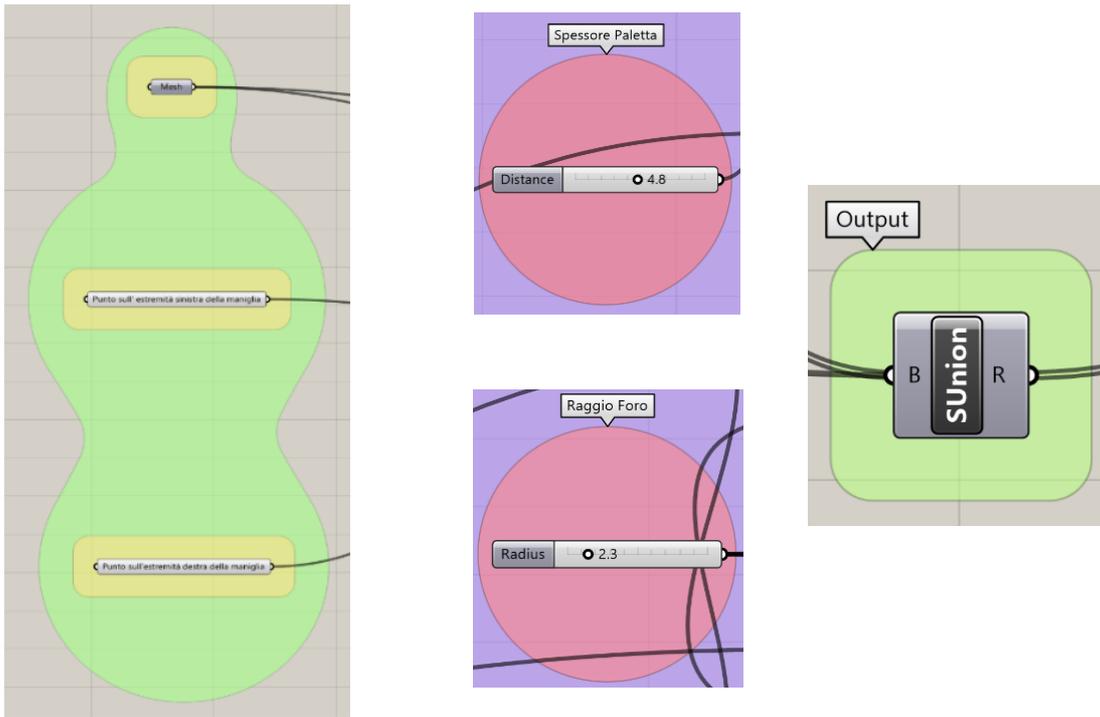


Fig. 3.48 Input – parametri di regolazione algoritmo – output.

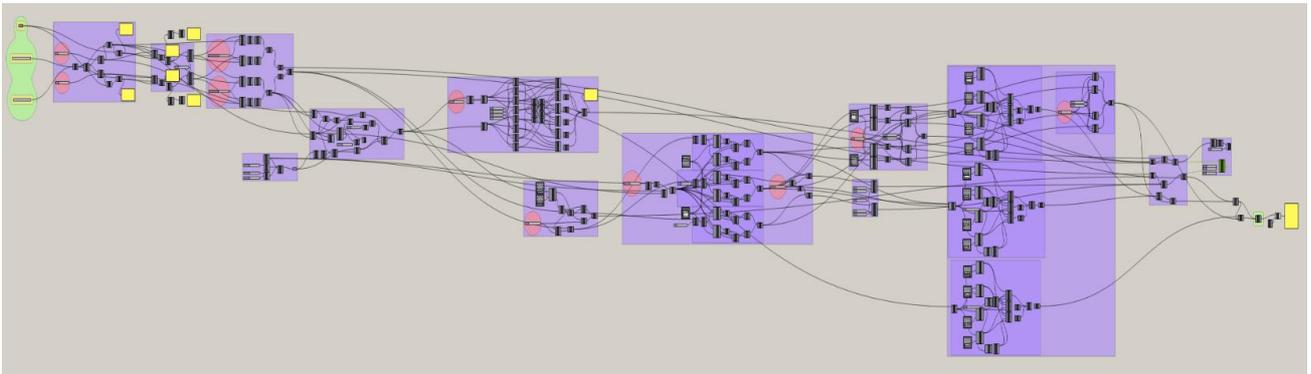


Fig. 3.49 Algoritmo completo.

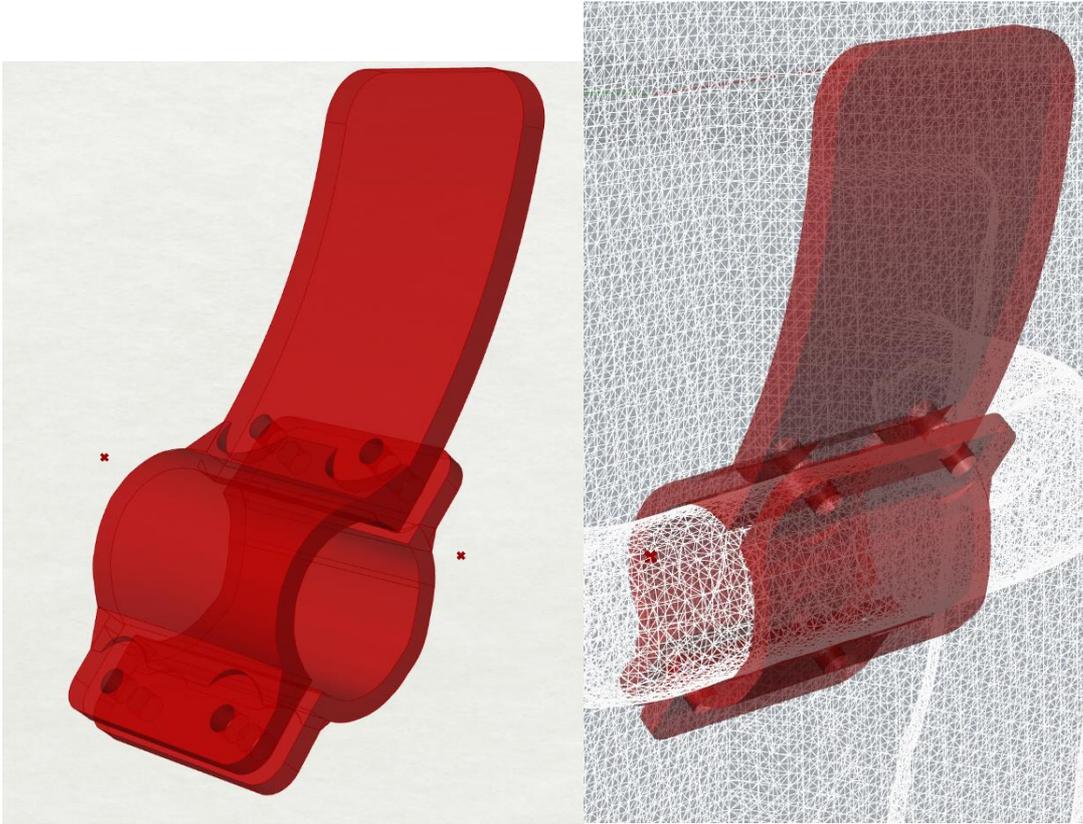


Fig. 3.50 Dispositivo completato della tipologia 1 di maniglia.

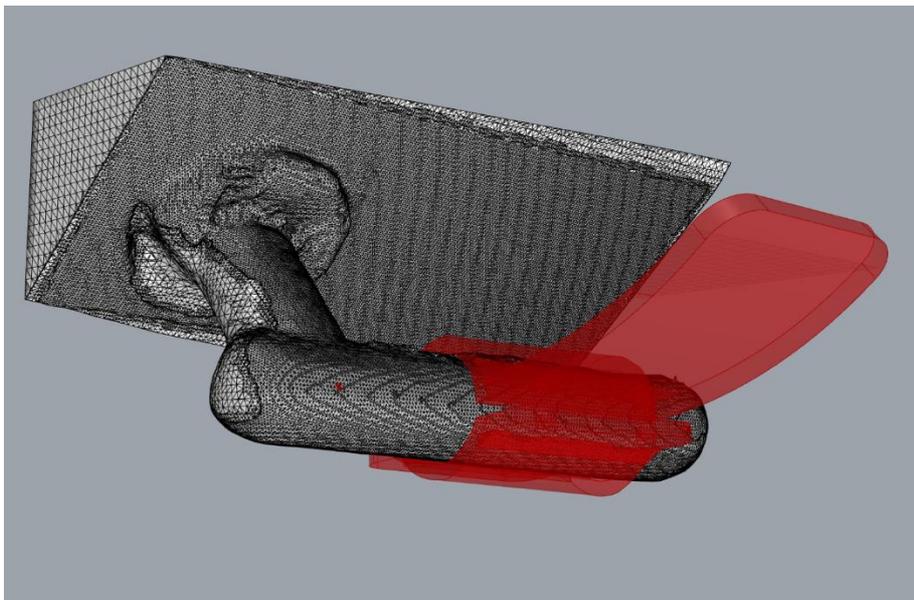


Fig. 3.51 Dispositivo completato della tipologia 2 di maniglia.

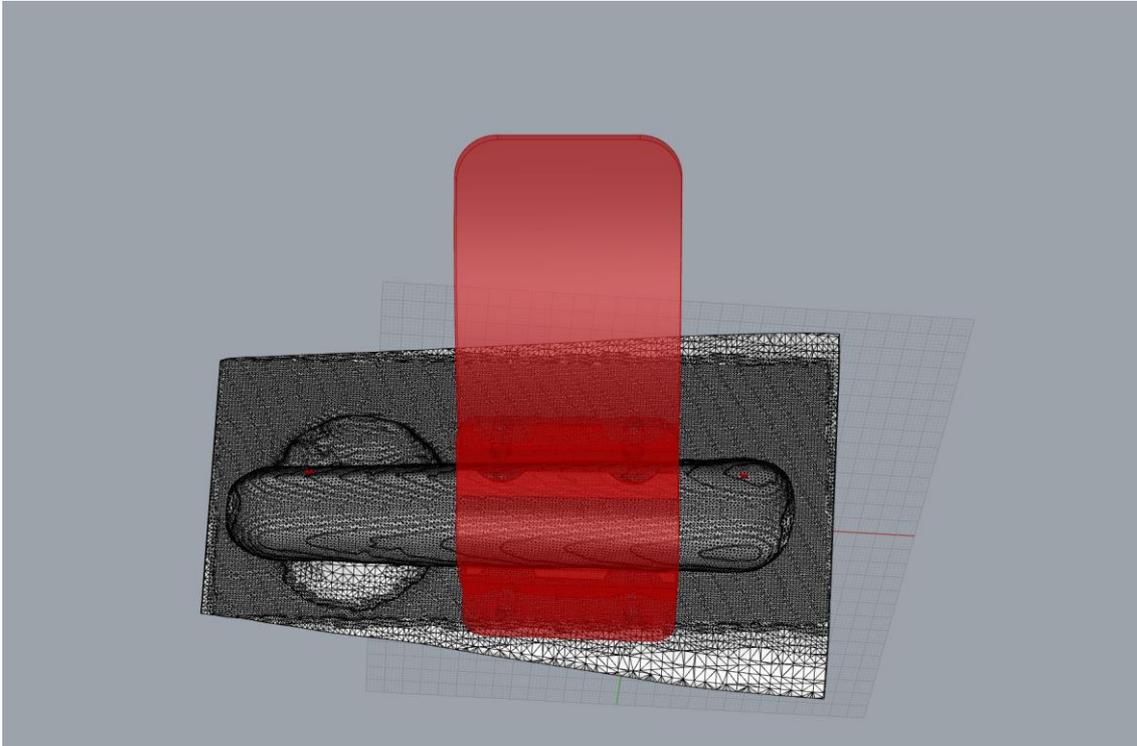
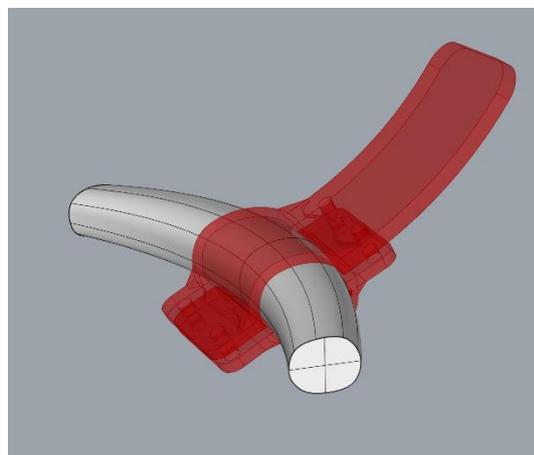
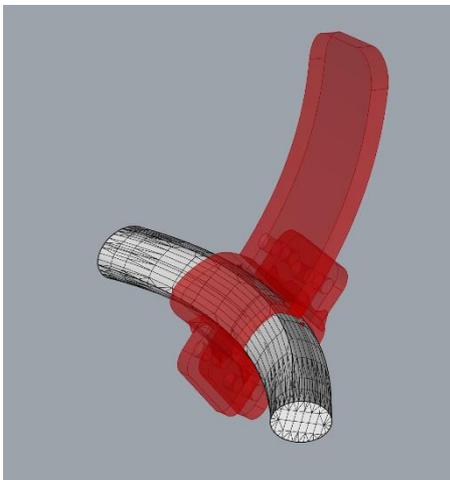


Fig. 3.52 Dispositivo completato della tipologia 2 di maniglia.

Di seguito vengono inserite delle immagini che mostrano il funzionamento dell'algoritmo elaborato su tipologie di maniglie a leva con sezioni e forme differenti.



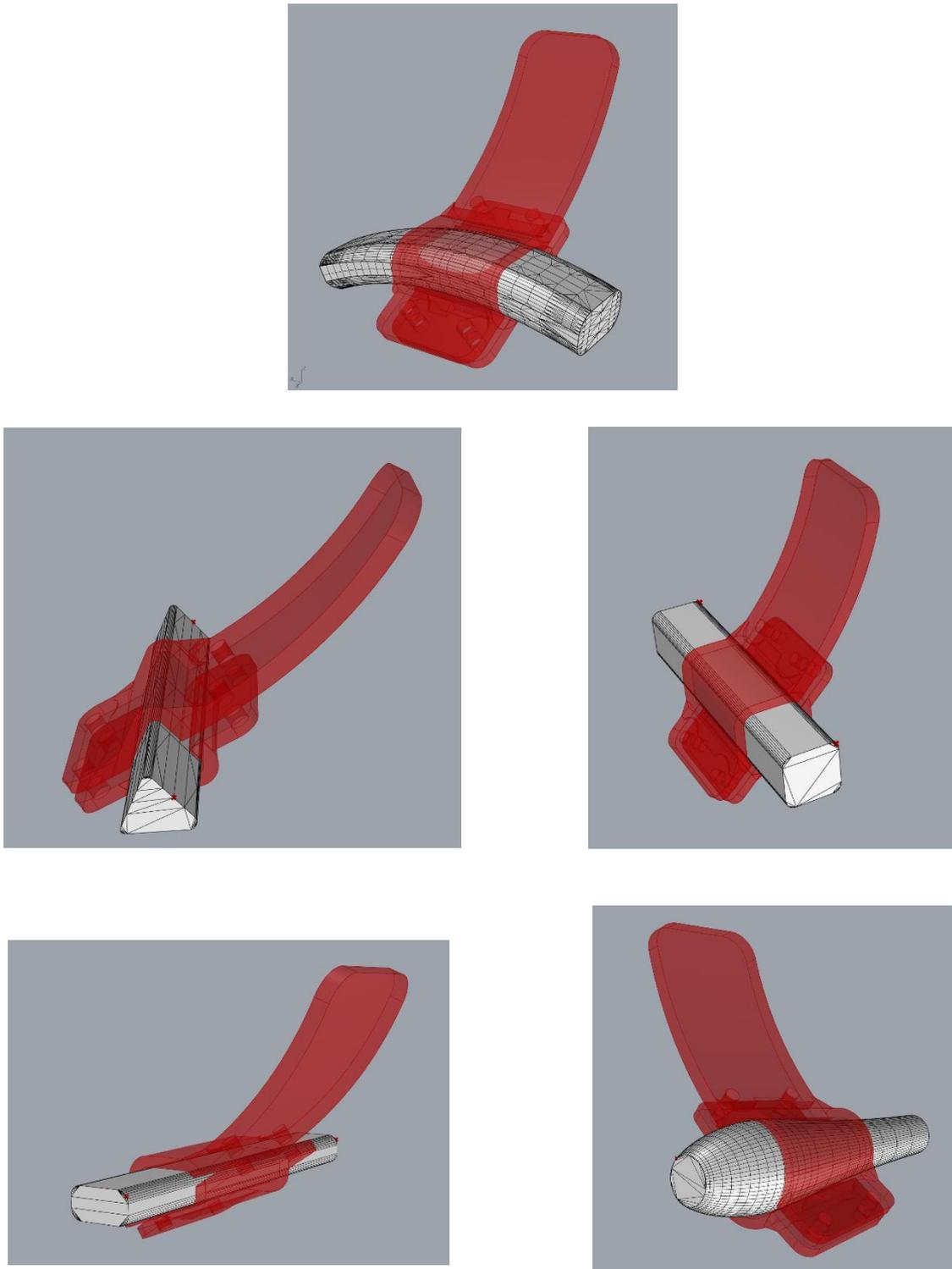


Fig. 3.53 Immagini dell'applicazione dell'algorithmo a maniglie di differenti sezioni.

4. STAMPA 3D

4.1 CENNI STORICI

La maggior parte delle persone ritiene che la stampa 3D e la manifattura additiva rappresentino un fenomeno relativamente recente. In realtà non è proprio così in quanto gli albori di questa tecnica di produzione si possono far risalire addirittura alla fine degli anni Settanta quando fu inventata e lanciata sul mercato la prima stampante a getto d'inchiostro. Il primo passo verso la nuova tecnologia viene effettuato nel 1981 quando Hideo Kodama registra il brevetto della prototipazione rapida cui segue nel 1984 l'invenzione della stereolitografia (SLA) da parte di Charles Hull. Questa tecnica si basa sull'utilizzo di una sorgente di luce all'interno di una vasca di resina. L'azione della luce porta all'indurimento della resina, generando in tal modo l'oggetto in 3D, strato dopo strato. Nel 1989, si arriva ad un nuovo brevetto da parte di Carl Deckard che registra la SLS (Selective Laser Sintering), un processo a sinterizzazione selettiva che usa un fascio di luce laser, tra 200 e 400 KW, in una polvere di metalli, strato per strato. L'evoluzione di questa tecnica è rappresentata dalla DMLS (Direct Metal Laser Sintering), che rappresenta la migliore espressione dell'additive manufacturing di metalli, e SLM (Selective Laser Melting), con quest'ultima che essendo estremamente precisa e accurata trova larga applicazione in ambito medico.

Nel frattempo, viene realizzata nel 1992 la prima stampante SLA e Scott Crump inventa una rivoluzionaria tecnica di stampa 3D, la FDM (Fused Deposition Modeling). Questa si basa sull'utilizzo di un filamento, costituito da polimeri che viene riscaldato da una resistenza, e fatto passare attraverso un ugello. A questo punto avviene la solidificazione strato dopo strato dando forma all'oggetto.

In realtà lo sviluppo dell'additive manufacturing si può far risalire al 2005 quando Adrian Bowyer ha inventato la prima stampante 3D auto-replicante. La stampa 3D è ad oggi la tecnologia digitale più dirompente, in grado (potenzialmente) di stravolgere i tradizionali paradigmi produttivi. Si tratta di una vera e propria rivoluzione, visto che la produzione non avviene più per *asportazione di materiale dal pieno*, bensì si parte da un modello 3D (virtuale) e poi si “stampa” strato dopo strato, esattamente (o quasi) come accade nelle comunissime stampanti ad inchiostro.

Per queste ragioni, si parla (più propriamente) di Manifattura Additiva. Il processo di produzione additiva ha come input la realizzazione del modello 3D dell'oggetto (progettazione CAD), a cui segue un processo semi-automatico (svolto oramai da tutti i più diffusi software di progettazione) di conversione del file in formato STL, che prevede la scomposizione dell'oggetto in strati (layer) stampabili dalle stampanti 3D.

Quando si parla di additive manufacturing o manifattura additiva si intende quindi una tecnica di produzione che, utilizzando delle tecnologie differenti, permette di ottenere prodotti e manufatti dalla generazione e successiva addizione di successivi strati di materiale. Si tratta di una netta inversione di tendenza rispetto alle tecnologie di produzione tradizionali che partono dalla tecnica della sottrazione dal pieno, come avviene ad esempio con la fresatura o la tornitura. Grazie a questo strumento di produzione si è compiuta una digitalizzazione dell'attività manifatturiera realizzata grazie al dialogo continuo tra computer e impianti produttivi, ottenuto anche grazie allo sviluppo di internet.

4.2 PROCESSO DI PRODUZIONE

Il processo di produzione basato sull'additive manufacturing parte da un modello CAD 3D che viene controllato da un software di gestione della macchina che suddivide il modello stesso in più strati. Questi ultimi poi guiderà una stampante nel deposito o nella sintetizzazione del materiale.

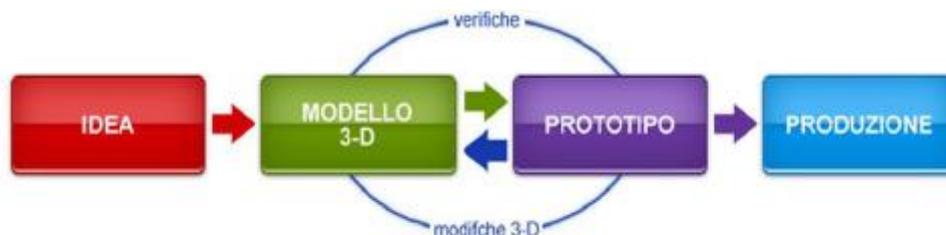


Fig. 4.1 Schema processo produttivo.

Nell'immagine sopra rappresentata sono descritti i passaggi che caratterizzano la realizzazione di un prodotto. In questo processo le tecnologie convenzionali fino ad ora utilizzate, hanno tempi di avviamento del processo di produzione molto lunghi, basti solo pensare alla creazione e assemblaggio degli stampi. La tecnologia additiva offre tecniche di Rapid Prototyping (RP), che sono in grado di iniziare la creazione del modello CAD appena effettuata la richiesta terminandola in qualche ora di lavoro. Elaborato il file

digitale, il processo di creazione del prototipo può iniziare il giorno stesso, abbreviando in questo modo anche i tempi che portano alla creazione del prodotto finito. Iniziamo a conoscere meglio le potenzialità delle tecniche additive in commercio, andando ad elencare quelle di maggior utilizzo e un consolidato valore produttivo.

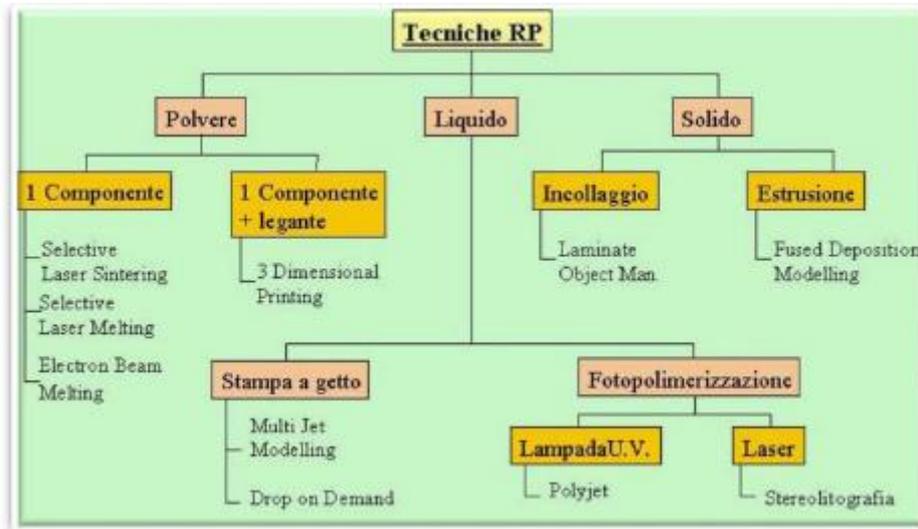


Fig. 4.2 Schema tecniche Prototipazione Rapida.

4.3 METODI DI STAMPA 3D

Le macchine attualmente disponibili utilizzano tecniche e tecnologie differenti: dalle più affermate, impiegate da anni dalle industrie, alle più recenti, utilizzate soprattutto per applicazioni specifiche. I vari metodi si differenziano in base alle esigenze di velocità di stampa e al livello di risoluzione, fattori che variano a seconda di come sono depositati gli strati del modello e in base al materiale utilizzato. Verranno ora analizzate le tecnologie più rilevanti, in modo da evidenziare le caratteristiche di funzionamento, le potenzialità e i limiti di ognuna.

4.3.1 Polimerizzazione attraverso la luce

A seconda del tipo di luce impiegata per solidificare il materiale, si parla di *Stereolitografia* (SLA), che utilizza una sorgente laser, o di *Digital Light Processing* (DLP), che impiega proiettori LED o LCD, per polimerizzare un fotopolimero allo stato liquido. Queste tecnologie utilizzano infatti in genere resine polimeriche foto-induribili che vanno a formare,

strato dopo strato, l'oggetto da creare. La precisione nei pezzi prodotti con tali tecniche è elevata, tuttavia, i polimeri fotoinduribili hanno scarse proprietà meccaniche, che possono peggiorare nel tempo.

4.3.2 Stereolitografia (SLA)

La Stereolitographic Apparatus (SLA), sviluppata e brevettata da Charles Hull nel 1986, fu la prima tecnica di prototipazione rapida disponibile in commercio, ed è il metodo più conosciuto tra quelli che usano il principio della fotopolimerizzazione.

L'esecuzione della SLA avviene nel seguente modo: un fascio di luce ultravioletta (in forma di laser) orientato da un sistema di specchi, colpisce il fotopolimero liquido (resina liquida) contenuto nell'apposita vasca sottostante facendolo indurire; terminata la polimerizzazione del primo strato, una piattaforma che sostiene l'oggetto in costruzione si sposta progressivamente verso il basso, in modo che la resina crei una nuova superficie liquida, pronta per essere indurita. Il nuovo strato che si forma andrà a sormontare il precedente. Il processo si ripete fino a completare l'oggetto.

Al termine della fabbricazione, il solido viene estratto dalla resina liquida e posto in un forno a luce UV per completare la polimerizzazione. Successivamente è possibile eseguire trattamenti di rifinitura della superficie.

Questa tecnica di stampa ha la possibilità di raggiungere con tempi di lavorazione molto rapidi un'alta risoluzione, dell'ordine di pochi mm, determinata dalla dimensione dello spot ottico del generatore radiogeno, può utilizzare resine che, una volta polimerizzate, presentano caratteristiche diverse.

I limiti, invece, sono rappresentati dalla eventuale necessità di utilizzare supporti atti a sostenere le parti dell'oggetto durante la costruzione, dall'alto costo del sistema di controllo e delle resine polimerizzanti, e dal fatto che durante il processo di stampa può essere utilizzata solo una resina alla volta, limitando così il disegno complessivo dell'oggetto.

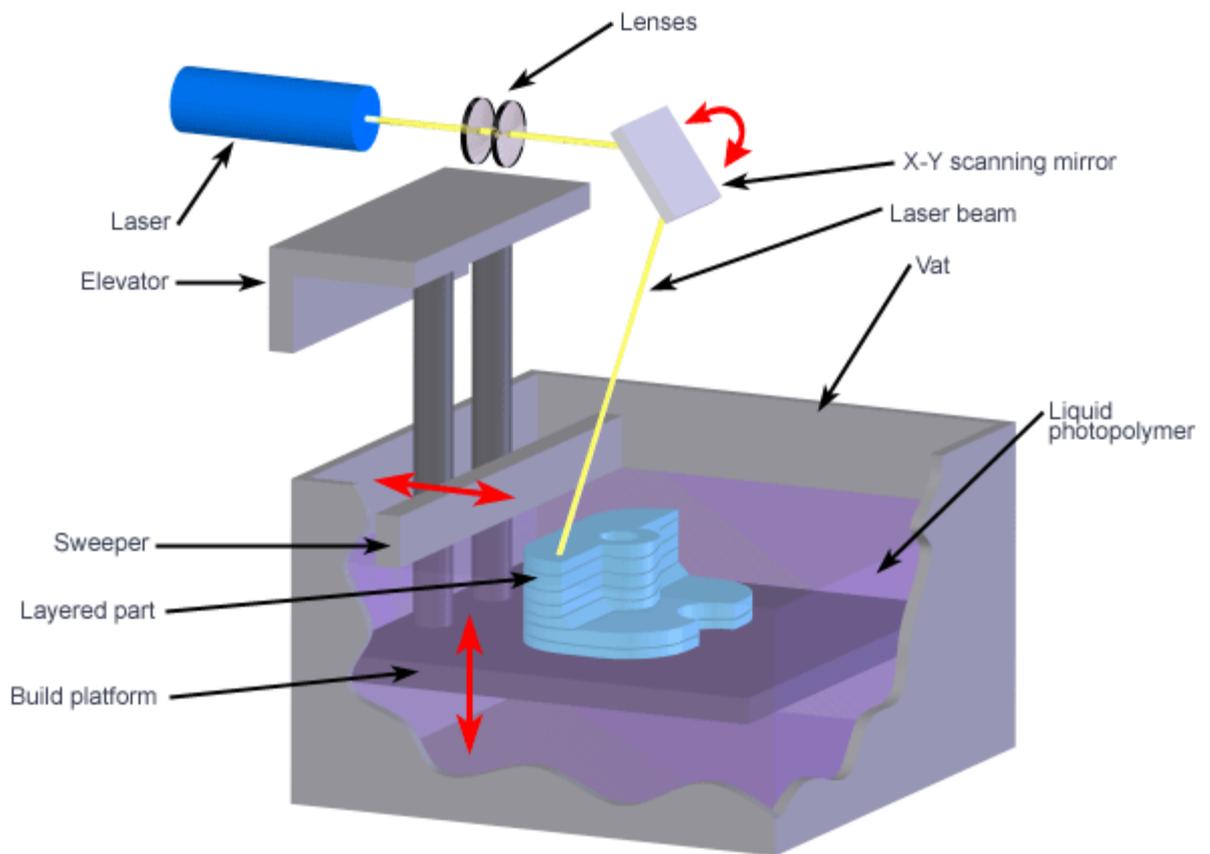


Fig. 4.3 Schema di una stampante SLA.

Questo procedimento offre la possibilità di riprodurre geometrie complesse comune a questa tecnologia, con finiture superficiali migliori rispetto a molte altre tecniche. Per contro comporta però un problema nella creazione di parti che necessitano di un sostegno, in tal caso risulta necessario modificare il disegno prevedendo opportuni sostegni che dovranno essere apportati nel file CAD insieme al prototipo complicando così anche il processo di pulitura. Anche questi sostegni, infatti, saranno creati con lo stesso materiale e procedimento, a differenza di altre tecniche dove il materiale di supporto si distingue da quello di creazione e viene elaborato autonomamente dal software.

4.3.3 Digital Light Processing (DLP)

Come la precedente tecnologia, la DLP sfrutta la proprietà di alcune resine di polimerizzare se esposte alla luce e al calore. La differenza principale è che, al posto di un raggio laser, viene usato un semplice proiettore LED o LCD con tecnologia DLP, che basano il loro funzionamento sul principio di riflessione della luce realizzato da un

microchip DMD (Digital Micromirror Device) ricoperto di milioni di microspecchi capaci di muoversi indipendentemente seguendo la dinamica di ciascun pixel dell'immagine. Il polimero è esposto alla luce del proiettore DLP, generalmente proveniente dal basso, quindi il liquido esposto si indurisce, la piattaforma di costruzione si muove in alto di pochi decimi di millimetro e il polimero liquido è di nuovo esposto alla luce. Il processo si ripete finchè il modello non è finito.

La DLP condivide tutti i pregi e i difetti della SLA a eccezione della velocità di stampa: la polimerizzazione di ogni singolo strato avviene contemporaneamente su tutto il perimetro, mentre precedentemente bisognava attendere l'intero percorso del laser. Un altro vantaggio è il costo inferiore del sistema di controllo, data l'assenza del laser.

SLA e DLP vengono impiegate soprattutto per la fabbricazione di prototipi, di oggetti di design, di articoli di gioielleria e in ambito medico.

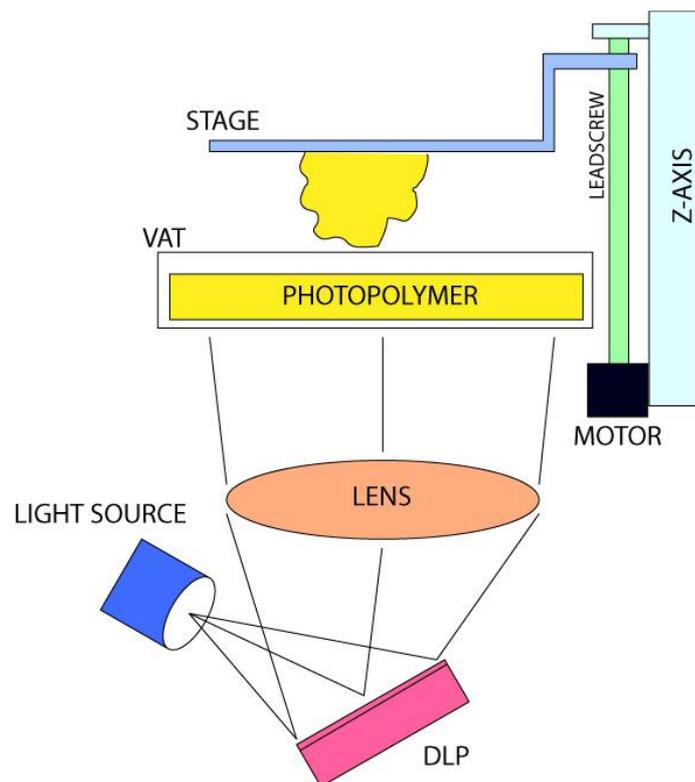


Fig. 4.4 Schema di una stampante DLP.

4.3.4 PolyJet (PJ)

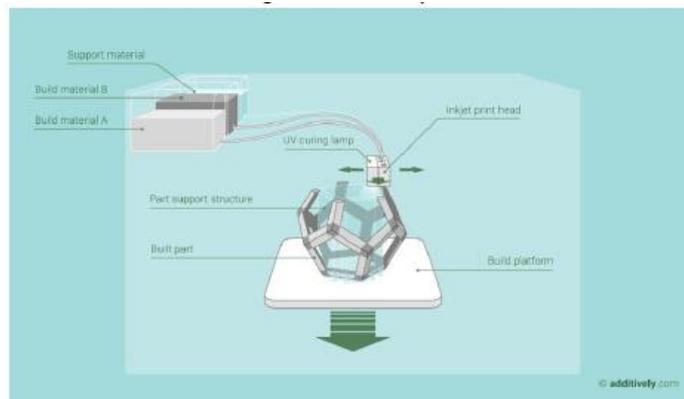


Fig. 4.5 Processo PJ.

Nell'immagine sopra proposta viene rappresentata la produzione con metodo Polyjet che può essere vista come un'evoluzione della comune stampa ad inchiostro. In questo caso però, invece che gettare inchiostro, vengono depositate gocce di materiale liquido tramite una testina che contiene un gran numero di ugelli che spruzzano gocce finissime di fotopolimeri. Questi, subito dopo la deposizione vengono trattati da una lampada UV per la solidificazione. Con questa tecnica si riescono ad ottenere forme con una risoluzione di 20 micron, con precisione fino a 0.1 mm, grazie all'azione della luce UV che tratta il materiale liquido appena depositato. Il processo pre-stampa è molto semplice tramite il file STL dell'oggetto il software della stampante calcola il posizionamento dei fotopolimeri e del materiale di supporto gelatinoso, utile per costruzioni complesse e di facile rimozione. Elaborato il prototipo, inizia il deposito dei fotopolimeri strato per strato con relativa polimerizzazione, in questo modo strati sottilissimi vengono ad accumularsi sul vassoio, assieme al materiale di supporto che viene posto in punti precisi per evitare il collasso o la deformazione. Terminato il processo il materiale di supporto viene rimosso facilmente con le mani o dell'acqua e l'oggetto è pronto per l'uso.

- Resistenza: 49.6 - 60.3Mpa;
- Finitura: 0.015 - 0.030mm;
- Materiale: Fotopolimeri acrilici ed elastomerici;

- **Punti di forza:** Realizza prototipi in costampato, ha elevata precisione di stampa ($\pm 0.1\text{mm}$ ogni dieci centimetri), rapidità di creazione, supporta un'ampia gamma di materiali con proprietà diverse: dalla gomma ai materiali rigidi, dai materiali opachi a quelli trasparenti.
- **Punti deboli:** Resistenza dei particolari prodotti simile alla SLA (fragile). Non permette di fare considerazioni sull'effettiva realizzabilità del pezzo.

4.3.5 Drop on demand (DOP)

Uno dei processi additivi più particolari è quello chiamato Drop on demand, nel quale la deposizione è operata da una testa composta da due ugelli capaci di produrre singole gocce di materiale tramite un vaporizzatore. La caratteristica che distingue questa da tutte le altre tecniche additive, è quella dell'integrare al processo additivo un processo sottrattivo, compiuto da una fresa che spiana gli strati depositati ed esporta il materiale in eccesso. Grazie a questa particolarità si possono produrre prototipi molto precisi e con una ottima finitura superficiale. Come si può osservare nella figura sottostante, il prototipo viene costruito strato per strato attraverso la deposizione di materiale termoplastico (verde) e di una cera adibita al sostegno (rosso), da due differenti ugelli presenti in una testina che muove sul un piano (assi X-Y). La terza dimensione "asse Z", come in altre tecniche è creata dalla discesa della piastra di supporto dove si deposita il materiale, al termine di ogni strato. Una volta terminato il processo il materiale di supporto non asportato in precedenza dalla fresa può essere eliminato con bagni in solventi.

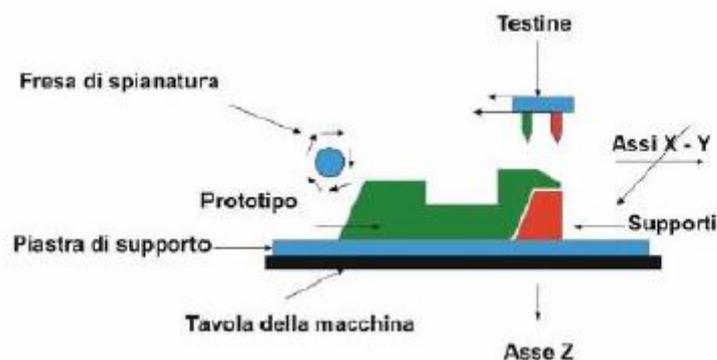


Fig. 4.6 Processo DOP.

- Punti di forza: Estrema precisione (13 micron su 23 cm Asse Z; 25 micron su 15 cm sugli assi X ed Y), affidabilità e semplicità di utilizzo.
- Punti deboli: Limitata scelta dei materiali, la maggior parte sono cere, applicabile solo a modelli per stampi in silicone o per fusione (gioielleria);

4.3.6 Multi-Jet Modeling (MJM)

Questa metodologia assomiglia molto alla comune stampa a getto d'inchiostro 2D, ma anziché far cadere gocce di inchiostro su un foglio di carta, si spruzzano fotopolimeri liquidi (materiali termoplastici e cera allo stato fuso) tramite una testina che si muove nel piano orizzontale gettando minuscole goccioline nei punti richiesti per formare uno strato. Si creano così strati sottilissimi (tra i 16 e i 30 μm) di materiale che, sottoposti a un fascio di raggi UV, si asciugano velocemente e consentono all'oggetto di essere immediatamente pronto all'uso, senza bisogno di ulteriori lavorazioni. Eventuali supporti usati nella costruzione di parti complesse vengono rimossi al termine della stampa. Alcune varianti di questo metodo utilizzano una testina per il materiale di costruzione (termoplastico) e un'altra testina per il materiale di supporto (cera). La tecnologia MJM è in grado di mettere a punto prototipi molto vicini alla realtà. Grazie ai sottilissimi strati si possono creare forme complesse, piccoli dettagli e superfici molto lisce. Tuttavia, le caratteristiche di superficie e le proprietà dei materiali non sono buone come nella SLA. Questa tecnologia trova generalmente spazio nei settori che ricorrono alle microfusioni a cera persa o per modelli per stampi (settore medicale, articoli di gioielleria, prodotti di consumo...).

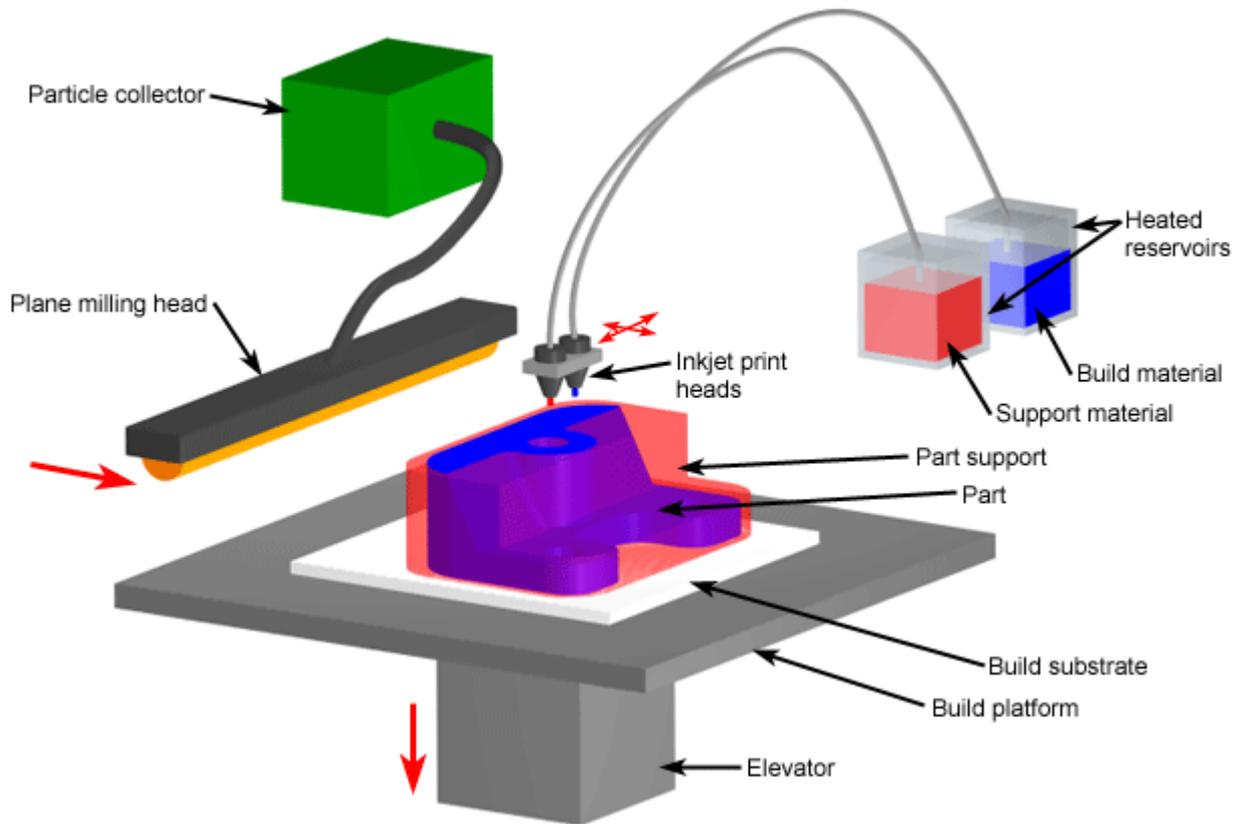


Fig. 4.7 Schema di una stampante MJM.

- Punti di forza: Rapidità della costruzione del modello, impiegabile in ambienti d'ufficio, utilizzabile in processi di design grazie alla buona finitura del prototipo data dalla cera.
- Punti deboli: Necessita di passaggi post produzione per ottenere pezzi funzionali, limitate applicazioni data la debolezza strutturale e piccole dimensioni del prototipo.

4.3.7 Estrusione di filamenti

Sia le tecniche di questo tipo sia la produzione per stratificazioni di fogli, che sarà esaminata nel prossimo paragrafo, utilizzano processi a base di solidi (non in polvere). Nelle prime, si utilizzano fili solidi che vengono estrusi e depositati fino a formare l'oggetto finale.

4.3.8 Fused Deposition Modeling (FDM)

Questo metodo fu inventato nel 1988 da Scott Crump, fondatore della nota casa produttrice di stampanti 3D Stratasys. A seguito della scadenza dei brevetti depositati, è nata una comunità di sviluppo *opensource* che ha messo a punto delle varianti più economiche di stampanti e ha denominato questa tecnica di stampa *Fused Filament Fabrication (FFF)*, dato che il termine FDM faceva esclusivamente riferimento al brevetto Stratasys: ciò ha portato a una grande diffusione di questa tecnologia.

Questo processo funziona per estrusione: in origine il materiale termoplastico da estrudere era sotto forma di sferette o *pellet*, con la FFF è stato sostituito da bobine di filo che, convogliato verso un ugello opportunamente riscaldato, viene depositato per formare gli strati dell'oggetto. L'ugello contiene dei riscaldatori resistivi che mantengono la plastica a una temperatura appena superiore al suo punto di fusione: in questo modo essa può fuoriuscire e costruire lo strato facilmente. La piattaforma invece, ha una temperatura più bassa così da favorire l'indurimento della plastica appena viene depositata. Una volta completato uno strato, la piattaforma si abbassa di un *layer* e la testina di estrusione deposita un altro strato di materiale, fino alla realizzazione completa dell'oggetto.

Lo spessore di ciascuno strato e l'accuratezza della dimensione verticale sono determinate dal diametro del punzone di estrusione. Attualmente è il sistema additivo più utilizzato per vari motivi: costi contenuti per la costruzione del macchinario e del materiale termoplastico (il quale è anche facilmente reperibile), sistemi di controllo semplici, velocità di stampa e scarso ingombro. La FFF presenta limitazioni quanto alle forme che possono essere fabbricate: le strutture che presentano delle parti cave si devono evitare o si devono usare dei supporti che verranno rimossi manualmente una volta ultimato il processo. Inoltre, data la particolare metodologia di lavorazione, la superficie finale del pezzo può presentare un aspetto a gradini, soprattutto nelle superfici curve.

La tecnologia FFF può essere usata per produrre prototipi, strutture di montaggio, attrezzature e parti di aerei, nel settore architettonico, automobilistico e per prodotti di consumo.

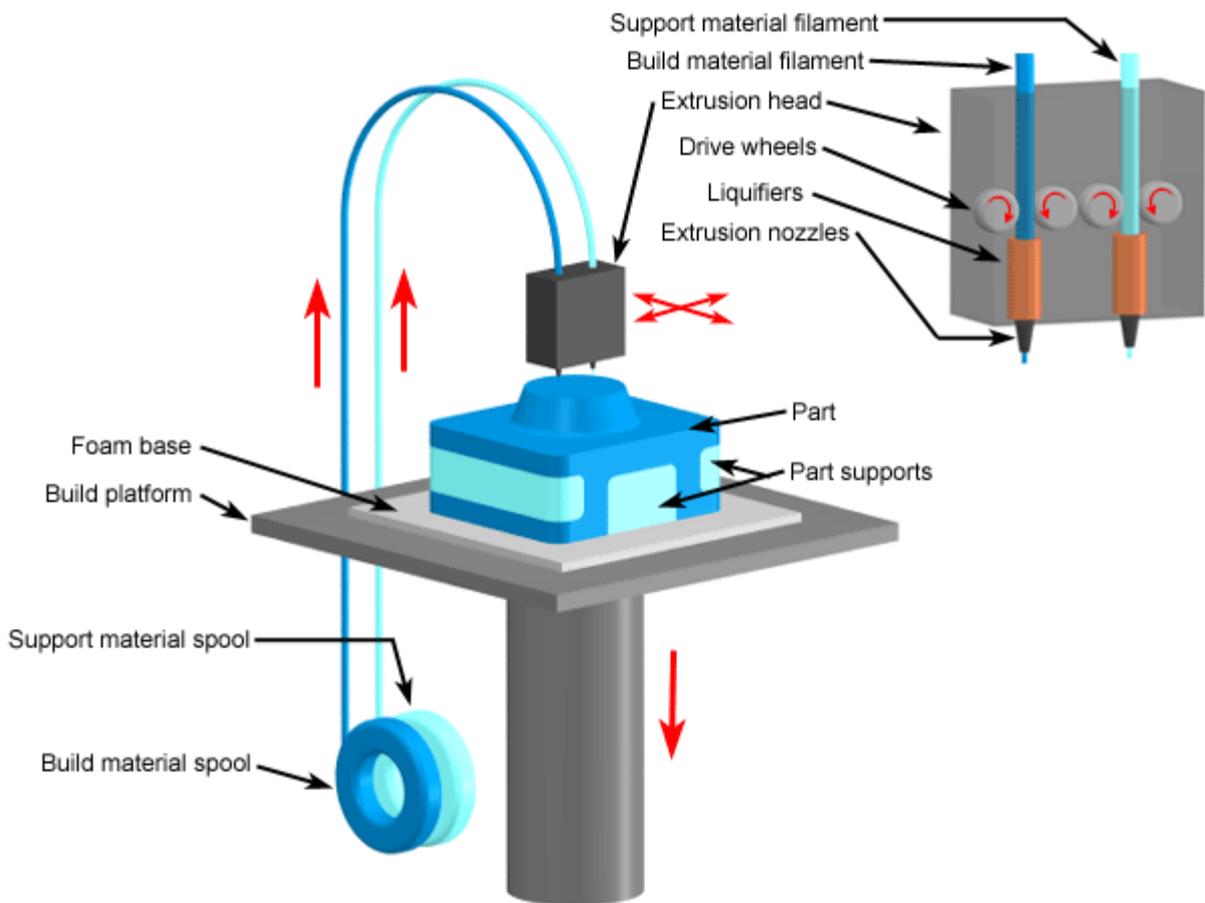


Fig. 4.8 Schema di una stampante FDM.

4.3.9 Stratificazione di fogli

Questi processi utilizzano metodi per impilare fogli molto sottili, i quali vengono stratificati uno sopra l'altro per poi tagliare la forma dell'oggetto in ogni strato.

4.3.10 Laminated Object Manufacturing (LOM)

La tecnica consiste generare l'oggetto 3D grazie all'impilamento di fogli di carta, plastica o metallo, che vengono saldati (in caso di fogli metallici) oppure incollati l'uno sull'altro impiegando un adesivo.

Un meccanismo di alimentazione trascina un foglio su una piattaforma di lavoro, un apposito rullo riscaldato incolla il foglio sul livello sottostante, e un laser taglia i contorni della sezione desiderata in ogni strato. La piattaforma quindi si abbassa di una profondità pari allo spessore dei fogli (tipicamente 50-500 mm) e un altro foglio viene fatto avanzare sulla sommità degli strati depositati in precedenza.

La temperatura del rullo deve essere ben controllata, in quanto, se troppo elevata, può arrecare danni strutturali all'oggetto in fase di realizzazione.

Dopo il taglio di ogni strato tramite un fascio laser o una lama, il materiale extra costituisce un valido materiale di supporto, che verrà rimosso a stampa finita. Il processo continua fino a terminare l'oggetto.

Nonostante i difetti di fabbricazione siano minimi rispetto ad altre tecniche, possono essere necessari dei trattamenti post-produzione come la finitura con carta abrasiva, oltre al trattamento di impermeabilizzazione per prevenire ed evitare il distacco degli strati. Un altro limite di questa tecnica è che i materiali utilizzati devono avere una discreta malleabilità. Con questo metodo di produzione è possibile creare prototipi o stampi.

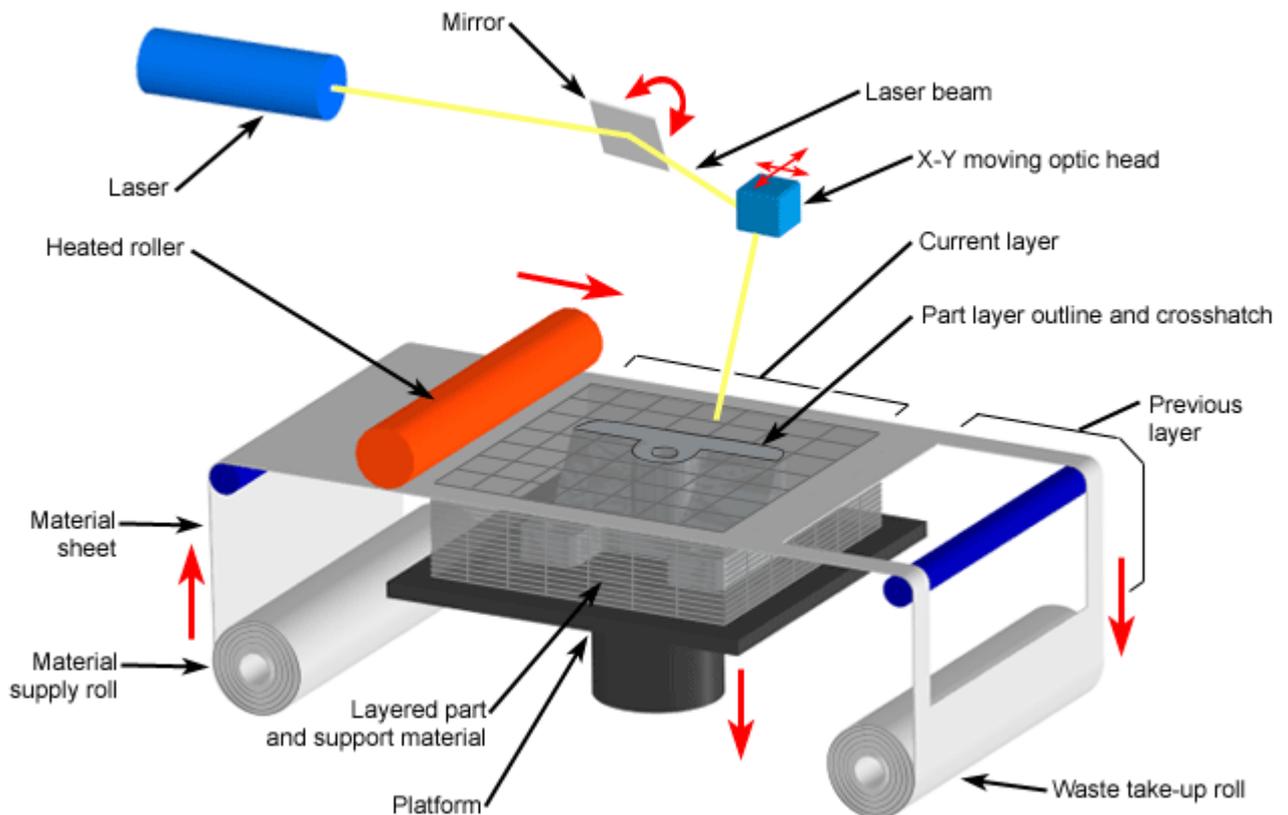


Fig. 4.9 Schema di una stampante LOM.

4.3.11 Unione di materiale in granuli

Un diverso approccio di stampa 3D è costituito dalla fusione selettiva di materiali originariamente costituiti da un letto granulare, in polvere. Con questo metodo vengono

selettivamente fuse o sinterizzate alcune zone del livello attuale, quindi l'area di lavoro viene spostata verso il basso, viene aggiunto un altro strato di granuli e si ripete il processo fino al completamento della costruzione del modello. L'impiego di materiale in polvere consente ai modelli di essere realizzati con polimeri, metalli o ceramiche. Inoltre, le proprietà meccaniche di tali pezzi sono molto buone.

4.3.12 Selective Laser Sintering (SLS)

Il processo di SLS prevede che un sottile strato di materiale da costruzione in granuli ("polvere") venga steso su di una piattaforma e venga livellato uniformemente con un rullo: a questo punto, un fascio laser scandisce selettivamente una sezione bidimensionale aumentando la temperatura locale e fondendo le particelle di polvere insieme, favorendo quindi il processo di sinterizzazione. Dopo il completamento di ogni strato, un apposito pistone si muoverà verso il basso e abbasserà anche lo strato appena realizzato. Nuovo materiale in polvere viene quindi fatto uscire da una cartuccia all'interno del quale è contenuto e inviato alla piattaforma di costruzione, dove viene livellato mentre la nuova sezione viene sinterizzata nelle zone desiderate. Questo procedimento continua fino al completamento del modello. La polvere, che avvolge il pezzo fino al completamento del ciclo, viene mantenuta a una temperatura appena al di sotto del suo punto di fusione, in modo che fonda facilmente in seguito all'esposizione al laser.

Una volta pronto, il modello viene rimosso dalla camera di costruzione e viene terminato rimuovendo il materiale di scarto e lisciando le superfici visibili.

Il procedimento di SLS ha il vantaggio di non necessitare di strutture di supporto, come è il caso della SLA e del FDM, poiché il materiale granulare non sinterizzato, quindi in eccesso, funge appunto da sostegno per la parte in costruzione. Inoltre, può essere utilizzato con una vasta gamma di materiali, che possono essere polimeri, metalli e ceramiche in polvere, che tuttavia sono di scarsa reperibilità.

Il SLS è una tecnologia molto più raffinata del FDM, con un livello di precisione quasi dieci volte superiore, tuttavia un limite di questa tecnica è che i modelli stampati soffrono di strozzature o deformazioni dovute al riscaldamento causato dal laser e al successivo raffreddamento. Il SLS è ideale per la creazione di parti durature e funzionali con una varietà di applicazioni. Esso si presta all'utilizzo non solo in campo automobilistico e aeronautico, ma anche in campo medico per la sua facile operatività in ambiente sterile.

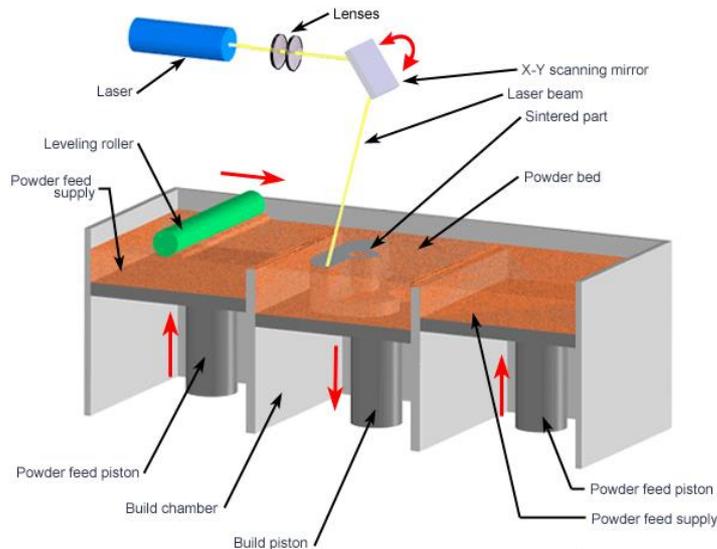


Fig. 4.10 Schema di una stampante SLS.

4.3.13 Plaster-based 3D Printing (PP)

Questa tecnica è simile alla SLS ma, a differenza di quest'ultima, il materiale granulare non viene sinterizzato tramite un fascio laser, bensì legato con un liquido adesivo (legante) erogato da un'apposita testina simile a quelle presenti nelle stampanti a getto d'inchiostro. Come si è visto con la SLS, lo strato appena realizzato viene abbassato e il procedimento si ripete finché l'oggetto è completo. La polvere non raggiunta dal legante fa da supporto al modello, così da creare praticamente qualsiasi sottosquadro. Ultimata la stampa, l'oggetto necessita di un trattamento termico per consolidare la polvere.

Questo metodo sta riscontrando un discreto successo nel panorama delle stampanti 3D grazie ai vantaggi in termini di tempo, costo e facilità d'uso che presenta. Offre infatti il vantaggio di una velocità di compilazione veloce (in genere 2-4 strati al minuto), di utilizzare sistemi di controllo e materiali meno costosi rispetto ad altri processi additivi, e di avere la possibilità di miscelare del colore al legante, creando oggetti con colori reali. Tuttavia, la bassa precisione, la scarsa resistenza meccanica e l'aspetto poroso delle superfici dei modelli creati rappresentano purtroppo i limiti di questa tecnica. L'estetica e la funzionalità dei modelli può essere migliorata con trattamenti successivi con cere e polimeri tramite impregnazione. Queste stampanti sono usate soprattutto da designer, ingegneri e architetti.

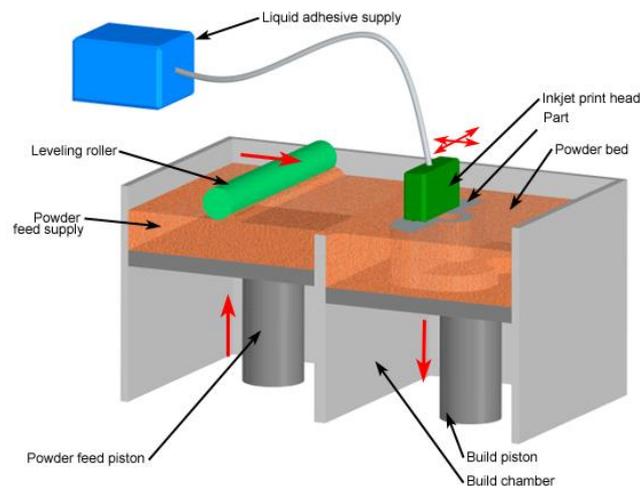


Fig. 4.11 Schema di una stampante PP.

4.3.14 Selective Heat Sintering (SHS)

Una soluzione all'ingente consumo di energia nel metodo SLS può essere la soluzione messa a punto dalla danese Blueprinter. In questa tecnologia viene impiegata una testina termica, che applica ulteriore calore su strati di polvere mantenuti a temperatura elevata, così da poterli fondere con un laser di potenza inferiore e aver minor consumi rispetto alla totale fusione affidata al laser.

- Punti di forza: Tecnologia meno costosa rispetto alla SLS, non servono supporti o post trattamenti, impiega polimero atossico e riciclabile.
- Punti deboli: Elevata rugosità superficiale, richiesta di ampi spazi.

4.3.15 Selective Laser Melting (SLM)

La *fusione laser selettiva* non utilizza la sinterizzazione per la solidificazione dei granuli di polvere, ma fonde totalmente il materiale in modo selettivo, utilizzando un laser più potente e ad alta energia, senza l'ausilio di leganti polimerici o bassi fondenti.

Una delle qualità migliori di questa tecnica di stampa è che le proprietà meccaniche e del modello sono praticamente identiche a quelle di un oggetto ottenuto per fusione tradizionale, senza le criticità (es. fragilità) tipiche dei materiali sinterizzati.

4.3.16 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Il DMLS si avvale della stessa tecnica di costruzione del SLM, ma a differenza di questo, utilizza come materiali di costruzione delle polveri metalliche (20µm di diametro). Al termine della lavorazione, si ottiene un oggetto simile a quelli che si ottengono con la produzione in serie, senza bisogno di finiture superficiali e che può essere sottoposto tranquillamente ad altre lavorazioni tradizionali.

Per prevenire l'ossidazione dei metalli nella camera di lavoro si utilizza un'atmosfera inerte. Un vantaggio del processo DMLS è la più elevata risoluzione dei dettagli a causa dell'uso di strati sottili, generati da un diametro più piccolo della polvere metallica. Ciò consente la realizzazione di forme più complesse.

Oltre alla produzione di prototipi, il DMLS viene spesso utilizzato per produrre utensili, protesi mediche e componenti aerospaziali per applicazioni utilizzabili ad alte temperature.

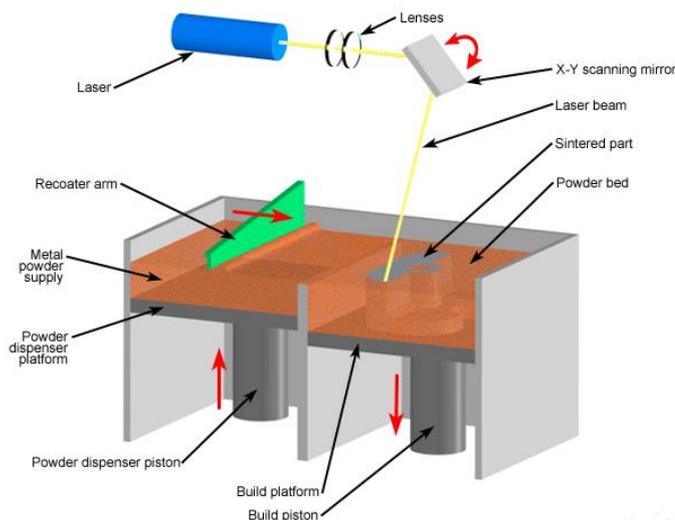


Fig. 4.12 Schema di una stampante DMLS.

4.3.17 Electron Beam Melting (EBM)

La *fusione con fascio di elettroni* si avvale di una sorgente di elevata energia, composta da un fascio opportunamente concentrato e accelerato di elettroni, per mezzo del quale vengono fusi i vari strati di polvere metallica.

È molto simile al SLM, ma diversamente da questo, il processo di produzione è completamente sottovuoto per permettere una corretta focalizzazione del fascio sul piano di lavoro. Ciò consente anche di evitare la formazione di ossidi metallici nelle polveri. Inoltre, il processo di fusione dei materiali avviene a temperature comprese tra i 700 e i

1000°C così da ottenere parti sostanzialmente prive di tensioni residue, che non necessitano di trattamenti post-produzione.

Questo processo permette di realizzare modelli con proprietà meccaniche pressoché identiche a quelle del materiale originale, ma è tra i più costosi.

L'EBM è diffuso soprattutto nel settore aerospaziale, aeronautico e biomedicale. In particolare, questa tecnica è usata per la costruzione di protesi biomediche in titanio (che ha alta compatibilità biologica).

4.3.18 3D Printing

Questa tecnica ha una metodologia di creazione simile a quella della sinterizzazione laser, ma si caratterizza per l'uso di un collante che viene spruzzato per unire le particelle di materiale e completare lo strato. Il collante deve avere una consistenza né troppo viscosa poiché non raggiungerebbe la quantità di polvere richiesta, né troppo liquida, altrimenti si avrebbe l'effetto opposto, creando l'unione di strati anche al di sotto di quelli interessati, creando ugualmente un problema. E' considerata una delle più veloci in assoluto nel mondo della stampa tridimensionale in quanto permette di ottenere tipicamente dai 2 ai 4 strati al minuto (e relativi modelli fisici ricreati in meno di un'ora), inoltre è il sistema più semplice ed economico per la realizzazione di prototipi. Al posto di ugelli o teste multi-spruzzo si compone di normali testine per la stampa inkjet che spruzzano un liquido a base di colla, su materiale in polvere che può essere composto da amido, gesso o polvere ceramica, procedendo strato per strato.

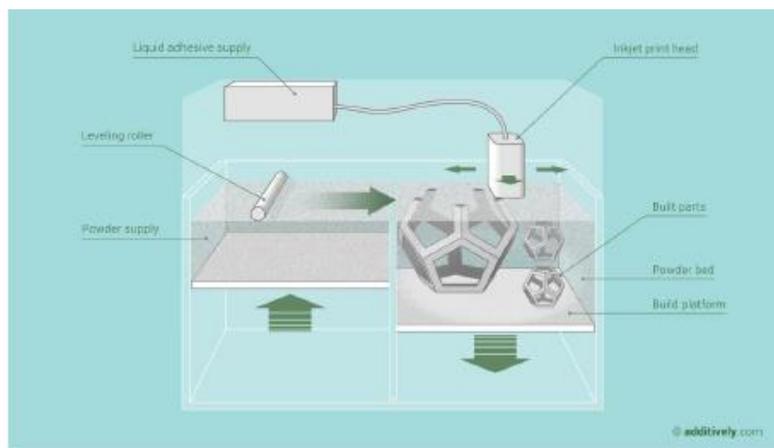


Fig. 4.13 Processo 3D printing.

Terminato il processo è necessaria una fase post--trattamento sia termico che chimico per evitare che il pezzo subisca disgregazioni e per migliorarne le caratteristiche meccaniche. In particolare, vengono effettuati trattamenti di infiltrazione per garantirne la compattezza. La precisione, la finitura superficiale e la compattezza del pezzo non riescono ad arrivare a quelle dei pezzi realizzati con altri processi additivi perciò questa tecnologia non è adatta per realizzare prototipi soggetti a test funzionali a causa della debolezza intrinseca dei pezzi stessi.

- Resistenza: Bassa;
- Finitura: 0.089mm;
- Materiale: Polvere di gesso e liquido;
- Punti di forza: Alta velocità di produzione, semplice ed economico.
- Punti deboli: Scarsa finitura superficiale, fragilità del pezzo che necessita di fasi post creazione.

4.4 MATERIALI E PROCESSATI

Per quanto riguarda il campo dei materiali processati la tecnologia additiva riesce, tramite le sue molteplici tecnologie, a ricoprire la gamma di materiali che solitamente vengono utilizzati nelle consolidate tecniche produttive, arrivando in alcuni casi a proporre di nuovi. La novità rispetto alle classiche tecnologie, oltre che per il procedimento “Additivo” rispetto al solito “Sottrattivo” e “Formativo”, sta nel fatto che il materiale di produzione viene processato in diversi stati (solido in polvere o lastre, liquido) con risultati talvolta migliori di quelli ottenuti precedentemente.

I materiali processati sono:

1. Metalli
2. Materie Plastiche
3. Fotopolimeri
4. Cere
5. Ceramiche

4.4.1 Metalli

Il campo dei metalli vede nella maggior parte dei casi, l'utilizzo degli stessi che vengono processati nelle tradizionali tecniche produttive, talvolta però questa tecnologia da la possibilità di utilizzare metalli diversi da quelli usuali. Anche se i materiali sono gli stessi, con queste nuove tecniche si possono ottenere comunque buoni risultati e talvolta migliori, come nel caso di studio della RENISHAW, che ha creato in un'unica stampa, un telaio funzionale per mountain bike riuscendo ad alleggerirlo del 33% rispetto ai 2.1kg iniziali utilizzando lo stesso titanio con cui veniva già prodotto.



Fig. 4.14 Telaio di una bici creato tramite tecnica additiva.

Altro campo di applicazione della tecnologia additiva per Renishaw è stato quello della FORMULA STUDENT. La Formula Student è una competizione automobilistica internazionale tra studenti universitari organizzata per la prima volta nel 1981 dalla SAE (Society of Automotive Engineers) in America che dal 1988 si svolge anche in Europa. Con l'utilizzo della tecnologia additiva Renishaw è riuscita a sviluppare un progetto di un componente per una vettura partecipante a questo evento senza il vincolo delle geometrie, che spesso rende i processi molto costosi.



Fig. 4.15 Mozzo di ruota creato con tecnica additiva.

In particolare, tramite la tecnologia AM 250, Renishaw è riuscita a produrre mozzi ruote per la competizione, riducendo il peso della vettura di 1.5 kg che è risultata così la più leggera della competizione. Questo è un esempio di come, anche con l'utilizzo degli stessi materiali utilizzati per la "classica" produzione, con questa tecnologia si possano ottenere dei vantaggi tangibili. La possibilità di utilizzare metalli che con le tradizionali tecniche non avremmo potuto lavorare o processarli in maniera differente alle solite può portare, come in questo caso alla riduzione del peso, ma anche a quella dei costi. Se prima il costo di produzione era dato anche dalla complessità dell'elaborazione ora questo concetto sparisce e l'unico costo che avremo sarà quello del materiale utilizzato.

4.4.2 Plastica

Il mondo plastica è un campo su cui si concentrano molti studi e ricerche in fatto di sviluppo, questo perché tale materiale non esiste in natura, ma viene creato tramite l'unione di molte molecole e per questo il nome di polimero. La trasformazione della materia prima avviene attraverso la polimerizzazione che permette di trasformare le materie prime in materie plastiche, create sotto forma di granuli, pastiglie, polveri o liquidi. Le plastiche sono state create nei primi anni del 900 ed oggi grazie anche alla tecnologia additiva hanno avuto un ulteriore sviluppo. Tutt'ora vengono creati nuovi polimeri aventi caratteristiche di volta in volta migliori che non hanno niente da invidiare rispetto ai materiali dei quali provano a riprodurre le caratteristiche. Inizialmente create tramite la manipolazione di catene di molecole (strutture macromolecolari) di resine di origine vegetale, come la cellulosa (dal cotone), i derivati dell'amido (vegetale), oli (dai semi di alcune piante), il carbone e tra i materiali non vegetali la caseina ricavata dal latte.

Ad oggi la produzione è derivata dalla lavorazione di prodotti petrolchimici che risultano facilmente manipolabili e a basso costo. I vantaggi che possiamo ottenere dall'uso di materie plastiche rispetto ad altri materiali, sono innanzitutto la grande facilità con cui le possiamo lavorare, il loro basso costo, l'isolamento acustico, termico, elettrico, meccanico (vibrazioni), la resistenza agli agenti chimici, l'idrorepellenza ed anche la resistenza per quel che riguarda muffe, funghi e batteri. Sono 3 le principali tipologie di plastiche che possiamo trovare in commercio Termoplastici, Termoindurenti ed Elastomeri.

➤ Termoplastici

Le termoplastiche hanno la caratteristica di rammollire sotto l'azione del calore, acquistando malleabilità. Per questo possono essere modellate sino ad ottenere oggetti finiti, dopo di che vengono raffreddate ritornando ad essere rigide. Teoricamente questo tipo di plastica può anche essere rimodellato più volte. I materiali termoplastici sono quelli più utilizzati nel campo delle plastiche da parte delle tecnologie additive per via della loro facile lavorazione e per le caratteristiche che offrono. I materiali più comunemente usati di questa categoria sono:

- Il Polietilene Tereftalato (PET), dotato di grande resistenza al calore (fino a 250 C°).
- Il Polipropilene (PP), anch'esso molto resistente al calore ma soprattutto agli agenti chimici.
- Il Poliammide (PA o nylon) molto usato poiché non infiammabile può essere miscelato con altri materiali quali vetro (aumenta la resistenza termica) carbonio, alluminio (parti simili al metallo, resistenti ad alte temperature e alle macchine utensili), Acido Polilattico (PLA) derivato dal mais attraverso un processo biotecnologico, viene utilizzato per la sua natura biodegradabile.
- L' ABS (Acrilonitrile-Butadiene-Stirene) è un copolimero di largo uso nella tecnologia additiva, ha caratteristiche ottime per la creazione di oggetti funzionali in quanto presenta elevata resistenza agli urti alle fratture ed elevata resistenza termica.

➤ Termoindurenti

Sono materie plastiche o resine che dopo una fase di rammollimento dovuto al riscaldamento, induriscono per un effetto chiamato reticolazione tridimensionale. Dopo l'indurimento i prodotti realizzati con questo materiale hanno una resistenza pari a quell'acciaio, ma non possono essere riscaldati nuovamente poiché si decompongono carbonizzandosi. Per questo non vengono utilizzati nel campo della Direct Manufacturing ad eccezione del Policarbonato che è utilizzato per la sua leggerezza ed infrangibilità, unita ad un periodo di utilizzazione praticamente illimitato. Le resine Fenoliche, come la bachelite, generalmente sono utilizzate come collanti o impregnanti per rivestire i componenti a termine della creazione, hanno lo scopo di rivestire, indurire e proteggere le superfici che ricoprono. Anche le resine Epossidiche sono molto resistenti ad agenti chimici ed ai solventi, garantiscono ottime caratteristiche meccaniche ed elettriche per questo sono utilizzate per incollare e proteggere da agenti corrosivi. Nella produzione additiva le resine termoindurenti vengono impiegate ma non garantiscono una elevata resistenza al calore. Per questo subiscono trattamenti specifici al fine di ottenere risultati migliori, aumentandone anche i costi, inoltre alcune di queste resine sono potenzialmente tossiche e quindi difficili da trattare. Fanno parte di questa categoria anche le resine fotosensibili che non sono caratterizzate da una lunga vita poiché la luce del sole le degrada modificandone anche le caratteristiche meccaniche (e quindi la durata). Per ovviare a questo problema e poter essere utilizzate, devono anch'esse subire dei trattamenti che finiscono per aumentarne il prezzo.

➤ Elastomeri

Possono essere di natura sintetica o naturale e la loro caratteristica principale è quella di potersi allungare sotto sforzo da 1 a 10 volte rispetto alle dimensioni iniziali. Questo avviene perché le macromolecole di cui sono composti a riposo tendono ad aggrovigliarsi e quindi, una volta messe sotto sforzo, si allungano distendendosi. Non vengono utilizzati per la produzione diretta ma nella produzione additiva svolgono il ruolo di additivi solitamente dei termoplastici.

4.4.3 Cera

Materiale comunemente utilizzato nelle tecniche di produzione tradizionali la cera trova utilizzo anche nella produzione additiva con la stessa funzionalità, cioè quella di produrre

non il prodotto finito o funzionale, ma attrezzi “tool” per la produzione del pezzo finito, come nel processo MultiJet Modeling, dove viene utilizzata per creare master da utilizzare in produzioni per fusioni a cera persa. Grazie a questo materiale possiamo ottenere ottimi risultati per quel che riguarda le finiture superficiali, ottenute dalla particolare consistenza della cera che tende ad inglobare particelle di materiale limitando eventuali imperfezioni superficiali. Queste caratteristiche sono fondamentali per creare forme nelle quali verrà colato metallo fuso con il quale verrà realizzato l’oggetto finale.

4.4.4 Ceramica

La ceramica viene utilizzata per la produzione di prodotti finiti, ma data la sua estrema rigidità trova utilizzo nella produzione additiva in particolari e limitate applicazioni. Con questo materiale otteniamo ottime finiture superficiali, alta definizione di particolari e ottimo grado di densità. Viene utilizzato nelle tecnologie laser poiché necessità di un apporto di calore importante per fondere le microparticelle di polvere del materiale adibito alla creazione del prodotto finale. Trova impiego in ambito aerospaziale, produzione di motori e componenti annessi, ma soprattutto nel campo medico e nel raffreddamento conforme in inserti per utensili.

4.5 PROCESSO DI STAMPA

4.5.1 Parametri di processo in FDM

Per la creazione del dispositivo, obiettivo dell'elaborato, si è deciso di utilizzare la modellazione a deposizione fusa (FDM). Tale tecnica è influenzata da vari parametri come riassunto in Fig. 4.16. Come mostrato, i parametri sono stati classificati in due grandi categorie, vale a dire i parametri macchina e materiale. I parametri della macchina sono quelli che l'utente della stampante 3D specificherà sul software di slicing durante la generazione dei file G-code, mentre i parametri del materiale sono le proprietà del materiale del filamento o dei materiali che vengono estrusi attraverso l'ugello. Alcuni dei parametri della macchina, come mostrato, includono la velocità di stampa, l'angolo raster, la velocità del flusso di fusione attraverso l'ugello, il traferro, lo spessore dello strato, la densità di riempimento, l'orientamento della struttura e la temperatura.

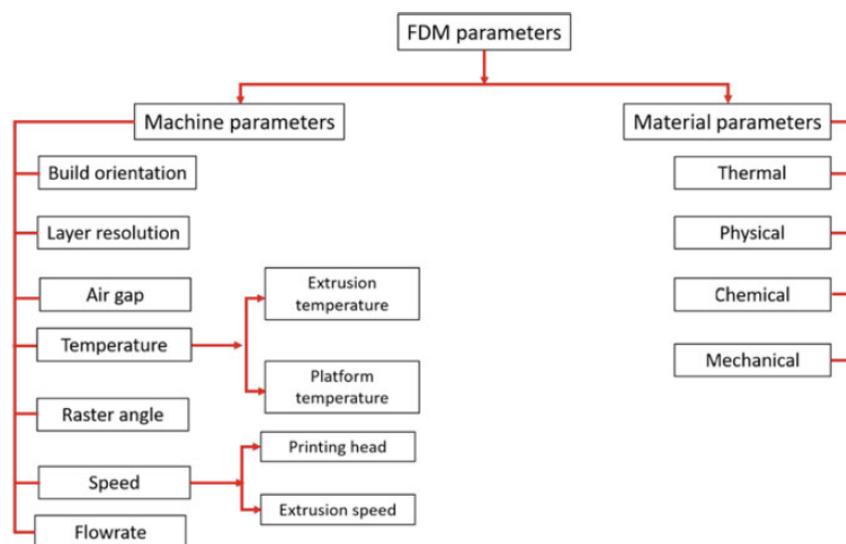


Fig. 4.16 Parametri di stampa della tecnologia FDM.

La qualità e le prestazioni delle parti stampate dipendono dalla scelta di questi parametri. L'orientamento della costruzione indica fondamentalmente l'angolo al quale la lunghezza più lunga è inclinata rispetto alla base della piastra di costruzione. I componenti stampati possono essere inclinati a 0°, 45°, 90°, etc. a seconda della scelta dell'utente. La risoluzione dello strato indica lo spessore minimo di ogni strato in una corsa della testina di stampa e può variare da pochi micrometri a millimetri a seconda dell'accuratezza e

dell'applicazione della stampante 3D. La temperatura di estrusione misura la temperatura fornita dalla sorgente esterna agli elementi riscaldanti della stampante per fondere il materiale in filamento per una facile estrusione, mentre la temperatura della piattaforma è la temperatura applicata sulla piastra di costruzione per migliorare l'adesione delle stampe sulla piattaforma ed evitare errori di stampa. Si noti che non tutte le stampanti hanno un piano riscaldato e, ad eccezione del PLA, tutti gli altri materiali richiedono il riscaldamento affinché si attacchino alla piattaforma. Il blocco del passaggio dell'ugello può portare a un grave guasto della stampante 3D e alla sostituzione di alcune parti. Durante la stampa, la temperatura di estrusione deve essere impostata entro il punto di fusione del materiale in filamento. Le proprietà termiche del materiale influenzeranno le condizioni di fusione e fluiranno attraverso l'ugello della stampante 3D. Le proprietà chimiche del materiale in filamento determinano la regione di transizione vetrosa e quindi la qualità della parte stampata. Proprietà meccaniche come resistenza e l'attrito allo stato fuso, determinano la rigidità della parte stampata, la scorrevolezza del materiale e se il materiale bloccherà o meno l'ugello.

4.5.2 Problemi di qualità in FDM

Come accennato, FDM prevede la stratificazione di materiale in filato fuso per creare il prodotto desiderato. L'adesione e la fusione tra strati adiacenti sono molto critiche per stampe di qualità. Inoltre, le condizioni di estrusione del materiale in filato durante il processo di stampa influiscono sulle caratteristiche di accuratezza, qualità e prestazioni del prodotto stampato.

La rugosità superficiale dei prodotti FDM è uno dei principali svantaggi della qualità di questo processo. A causa della natura del processo, le superfici del prodotto mostrano principalmente le tracce “avanti e indietro” dell'ugello di stampa noto come effetto gradino (mostrato in Fig. 4.17). Questi binari creano terrazzi sulla superficie, portando quindi a valori di rugosità media (R_a) relativamente alti dell'ordine dei micrometri. Livelli così elevati di intervalli di rugosità impediscono l'applicazione dei prodotti fabbricati FDM in alcuni campi come l'odontoiatria, la biomedicina, il rilevamento e molte altre aree di applicazione. La presenza di terrazze e profondità sulla superficie delle stampe può portare alla penetrazione di umidità e altri elettroliti ambientali negli strati interni del prodotto provocando un ulteriore degrado delle sue proprietà.

Ad esempio, tali componenti (con elevata rugosità) sarebbero molto dannosi per l'uso come protesi o impianti dentali poiché reagirebbero con i fluidi corporei, causando un guasto prematuro degli impianti.

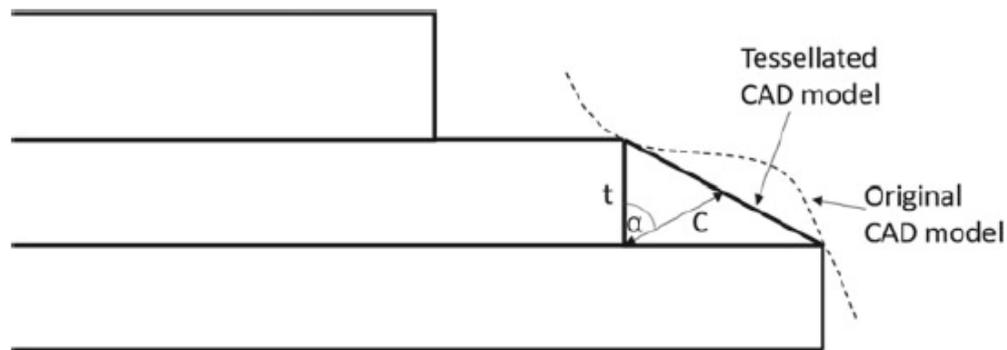


Fig. 4.17 Illustrare l'effetto scala delle parti FDM. In questo caso, C è nota come altezza della cuspidi, t è lo spessore dello strato e α è l'angolo tra l'altezza della cuspidi e l'altezza dello strato.

La mancanza di adesione che porta a difetti strutturali influisce notevolmente sulla precisione dimensionale e sull'integrità meccanica dei componenti stampati FDM. È ovvio che i componenti costituiti da una densità di difetti molto elevata subirebbero errori dimensionali e proprietà basse come durezza, resistenza alla flessione, tensilità, compressione e resistenza agli urti. Se non c'è abbastanza adesione tra gli strati, il materiale degli strati adiacenti sarà costretto a fluire tra gli spazi vuoti. Ciò può portare al restringimento del componente causando errori dimensionali tra il progetto CAD e la stampa effettiva. Inoltre, la presenza di pori e crepe all'interno della struttura aumenta gli stress raiser all'interno del materiale in modo tale che il componente non può assorbire l'energia richiesta durante la sua prestazione senza cedimenti. Questi difetti aumentano ulteriormente la propagazione delle crepe e i componenti potrebbero non offrire una stabilità meccanica adeguata e sufficiente per varie applicazioni.

Anche la velocità di flusso del materiale in filamento durante l'estrusione e la deposizione gioca un ruolo importante sulla qualità delle parti stampate in 3D. La scelta dell'estrusione e delle temperature del letto riscaldato sono basate sulle caratteristiche di flusso del materiale del filato. Un flusso insufficiente del materiale fuso tra gli strati provoca spazi o adesione incompleta; questi indeboliscono il componente e il guasto può facilmente

verificarsi a causa della delaminazione. L'angolo raster è anche correlato al flusso del materiale durante il processo FDM. Lo studio di Galeja et al. ha dimostrato che per una gamma di angoli raster 45° - 90° , l'angolo raster di 55° ha fornito il flusso ottimale di ABS fuso durante la stampa e a quell'angolo, i campioni di ABS stampati hanno mostrato eccellenti risposte statiche e dinamiche ai carichi meccanici.

Come illustrato precedente, le interazioni tra questi parametri in un processo FDM sono complesse e richiedono approcci multi-obiettivo per comprendere e migliorare la qualità della produzione. L'approccio generale in ogni processo di produzione, incluso FDM, consiste nel comprendere l'influenza dei singoli parametri seguita dalla valutazione del più significativo di quei fattori e infine dalla determinazione degli effetti combinati (multi-obiettivo) dei parametri.

4.5.3 Stampante Fortus 250mc



Fig. 4.18 Immagine della stampante 3D Fortus 250mc.

Il sistema Fortus 250mc è una combinazione innovativa di hardware, software e tecnologia dei materiali che permette di costruire modelli da file CAD STL. Il sistema Fortus 250mc è costituito da due componenti principali: il sistema Fortus 250mc e Insight. Insight è il software di preelaborazione che viene eseguito su una piattaforma Windows Vista o Windows 7.10. La stampante Fortus è molto performante e adatta a diversi

impieghi. Infatti, avendo tre impostazioni di risoluzione dei livelli, permette di costruire rapidamente una parte per la verifica del progetto oppure di stampare un prodotto con dettagli di superficie di qualità superiore.

Questo stampante è provvista di due ugelli di estrusione e lavora con materiale di supporto solubile per una post-lavorazione di rimozione. Il primo ugello si occupa dell'estrusione di un filamento di plastica (ABSplus P430) necessario per la costruzione del prodotto finale mentre il secondo si occupa dell'estrusione del materiale di supporto (ABS SR30) che viene utilizzato per sostenere il modello durante il processo di costruzione.

SYSTEM SPECIFICATIONS														
SYSTEM CONFIGURATION														
Build Envelope (XYZ)	10 x 10 x 12 inches (254 x 254 x 305 mm)													
Material Delivery	One build material cartridge: 56.3 in3 (923 cc) One support material cartridge: 56.3 in3 (923 cc)													
MATERIAL OPTIONS														
Layer Thickness:	ABSplus													
0.013 inch (0.330 mm)	X													
0.010 inch (0.254 mm)	X													
0.007 inch (0.178 mm)	X													
Support Structure:	Soluble													
Available Colors:	<table border="0"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Ivory</td> <td><input type="checkbox"/> Red</td> <td><input type="checkbox"/> Fluorescent Yellow</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> White</td> <td><input type="checkbox"/> Blue</td> <td><input type="checkbox"/> Custom Colors</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Black</td> <td><input type="checkbox"/> Olive Green</td> <td></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Dark Grey</td> <td><input type="checkbox"/> Nectarine</td> <td></td> </tr> </table>		<input type="checkbox"/> Ivory	<input type="checkbox"/> Red	<input type="checkbox"/> Fluorescent Yellow	<input type="checkbox"/> White	<input type="checkbox"/> Blue	<input type="checkbox"/> Custom Colors	<input type="checkbox"/> Black	<input type="checkbox"/> Olive Green		<input type="checkbox"/> Dark Grey	<input type="checkbox"/> Nectarine	
<input type="checkbox"/> Ivory	<input type="checkbox"/> Red	<input type="checkbox"/> Fluorescent Yellow												
<input type="checkbox"/> White	<input type="checkbox"/> Blue	<input type="checkbox"/> Custom Colors												
<input type="checkbox"/> Black	<input type="checkbox"/> Olive Green													
<input type="checkbox"/> Dark Grey	<input type="checkbox"/> Nectarine													
OTHER SPECIFICATIONS														
System Size/Weight	33 x 29 x 45 inches (838 x 737 x 1143 mm)	With crate: 409 lbs. (186 kg) Without crate: 326 lbs. (148 kg)												
Achievable Accuracy	Parts are produced within an accuracy of $\pm .0095$ inch ($\pm .241$ mm)* <i>*Note: Accuracy is geometry-dependent. Achievable accuracy specification derived from statistical data at 95% dimensional yield.</i>													
Network Communication	10/100 base T connection. Ethernet protocol.													
Operator Attendance	Limited attendance for job start and stop required.													
Operating Environment	Maximum room temperature of 86°F (30°C). Relative humidity range: 30 to 70 percent, non condensing													
Power Requirements	110–120 VAC, 60 Hz, minimum 15A dedicated circuit; or 220–240 VAC 50/60 Hz, minimum 7A dedicated circuit.													
Regulatory Compliance	CE / ETL / RoHS / WEEE													
Software	All Fortus systems include Insight and Control Center™ job processing and management software.													

Workstation specifications

Operating System	Microsoft Windows Vista or Microsoft Windows 7
Processor	Minimum: 2.4 GHz Faster processors will shorten job processing times
RAM	Minimum: 1GB (2GB for Windows Vista or Windows 7) Recommended: 2GB (3GB for Windows Vista or Windows 7)
Hard Disk	Installation: 90MB
Monitor graphics resolution	Minimum: 1024x768 Recommended: 1280x1024 (wide screen acceptable)
Video Card	Required: OpenGL compliant accelerated graphics card Recommended: Hardware support for OpenGL Recommended 128MB graphics card memory

Fig. 4.19 Tabelle delle caratteristiche tecniche della stampante 3D Fortus 250mc.

4.5.4 ABSplus Data Sheet

Tra i materiali creati appositamente da *Stratasys* per essere utilizzati con la tecnica FDM, l'ABSplus-P430 rappresenta un primo esempio di materiale valido per la creazione di prototipi funzionali. Con questo materiale i prodotti ottenuti risultano robusti e stabili nel tempo ed è possibile avere buone finiture superficiali. Riportiamo la tabella riguardante le proprietà del materiale reperibile sul sito dell'azienda.

ABSplus™ -P430

Mechanical Properties	Test Method	English	Metric
		XZ Axis	XZ Axis
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,700 psi	33 MPa
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,500 psi	8 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	2,200 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6%	6%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	2%
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m

Mechanical Properties	Test Method	English		Metric	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,450 psi	5,050 psi	58 MPa	35 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	240,000 psi	2,100 MPa	1,650 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	4%	2%	2%

Thermal Properties ²	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	180°F	82°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DSC (SSYS)	226°F	108°C
Melt Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	4.90E-05 in/in/°F	8.82E-05 mm/mm/°C

Electrical Properties ⁴	Test Method	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	2.6E15 - 5.0E16 ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	2.3 - 2.85
Dissipation Factor	ASTM D150-98	0.0046 - 0.0053
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A, XZ Orientation	130 V/mil
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A, ZX Orientation	290 V/mil

Fig. 4.20 Tabelle delle caratteristiche tecniche del materiale ABSplus P430.

La figura 4.20 mostra schematicamente le caratteristiche del materiale, quali ad esempio: la resistenza alla trazione (*Tensile Strength Ultimate/Yield*) a rottura o snervamento, la resistenza alla flessione (*Flexural Strength*) ed i relativi moduli, la prova d’impatto (*IZOD Impact* o prova Charpy) utilizzata per valutare la resistenza agli urti, la temperatura di deviazione del calore (*Heat Deflection Temperature*).

4.5.5 Software Insight e stampa 3D

Data la possibilità di poter sfruttare la tecnologia FDM presente nel laboratorio di realtà virtuale della Facoltà di Ingegneria di Forlì, si è deciso di creare i dispositivi utilizzando la stampante *Stratasys Fortus 250mc* che processa l’*ABSplus*. Quest’ultimo viene utilizzato per la creazione di prodotti funzionali grazie alle sue peculiari caratteristiche. Per la realizzazione del prototipo si è processato il file STL dei dispositivi attraverso il *software Insight 8.1* che guida la stampante nel processo di creazione.

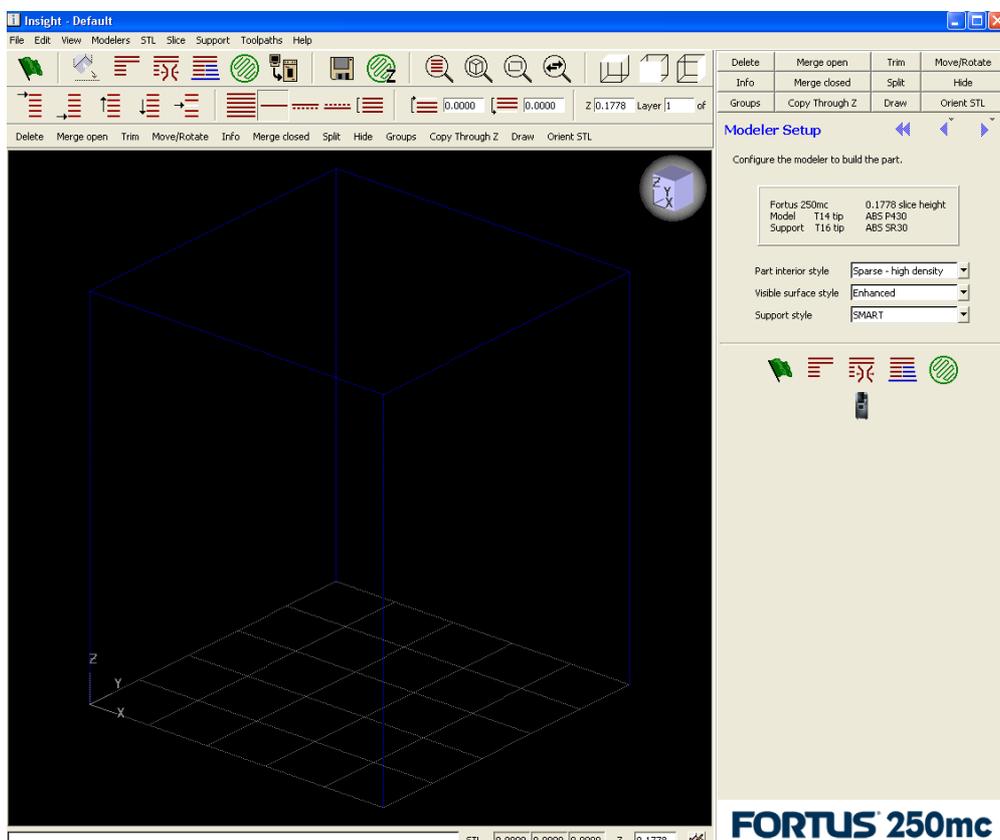


Fig. 4.21 Piattaforma del software Insight.

Il software di stampa 3D Insight prepara l'output tagliando e generando automaticamente strutture di supporto e percorsi di estrusione del materiale. Per il massimo controllo, si può modificare manualmente i parametri che determinano l'aspetto, la resistenza e la precisione delle parti, nonché la velocità e l'uso dei materiali del processo FDM.

In aggiunta, questo software permette di:

- Ottimizzare l'orientamento della costruzione per la massima resistenza e la finitura superficiale più liscia;
- Personalizzare i supporti per una rimozione facile e veloce e il miglior utilizzo dei materiali;
- Manipolare i percorsi degli utensili per un controllo avanzato sulle proprietà delle parti

Incluso con Insight è Control Center. Questa sofisticata applicazione software comunica con le workstation degli utenti e i sistemi Fortus, per gestire i lavori e monitorare lo stato della produzione.

Prima di avviare la stampa sono stati configurati sul *software* la stampante utilizzata e le tipologie di materiale caricato.

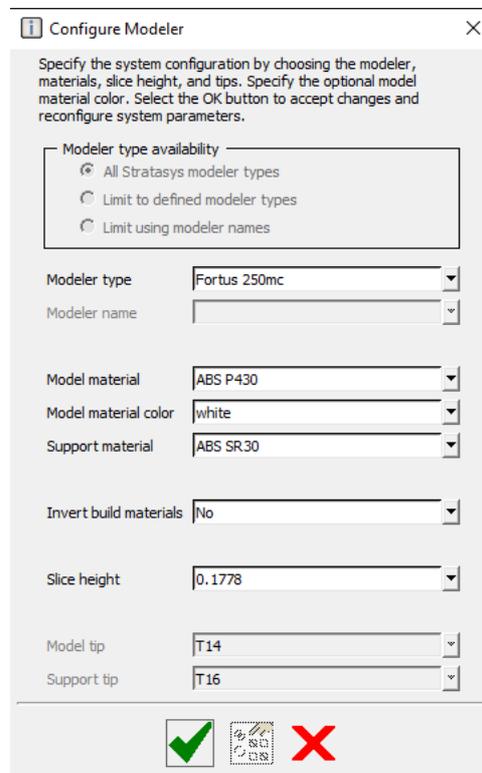


Fig. 4.22 Impostazioni di configurazione stampante e materiali.

La prima stampa che verrà processata è quella relativa alla maniglia di tipologia 1, effettuata per svolgere una prima analisi della corretta selezione dei parametri scelti per la generazione del dispositivo.

Per fare questo, il dispositivo è stato posizionato ed orientato su Insight.

Procedimento importante, in quanto l'orientamento influisce sulla velocità di costruzione, sulla resistenza delle parti, sulla finitura superficiale e sul consumo di materiale. L'orientamento può anche influire sulla capacità di Insight di riparare eventuali problemi con il file STL.

Considerazioni sull'orientamento:

- **Velocità di costruzione:** strettamente correlata all'uso dei materiali. Una quantità minore di supporti consentirà una maggiore velocità di costruzione;
- **Resistenza meccanica:** un modello è più resistente all'interno di un layer di quanto non lo sia tra diversi layer.
- **Finitura superficiale:** proprio come l'orientamento per la resistenza, il modo in cui la parte è orientata determinerà come la finitura superficiale apparirà e consentirà al sistema di fornire la finitura più liscia per una zona specifica.

Per quanto riguarda l'orientamento del dispositivo creato, si è deciso di mantenere la direzione di accrescimento lungo l'asse della maniglia. Questo permette di ottenere una migliore resistenza meccanica, una migliore finitura superficiale sulla faccia della paletta e un minor consumo di materiale di supporto.

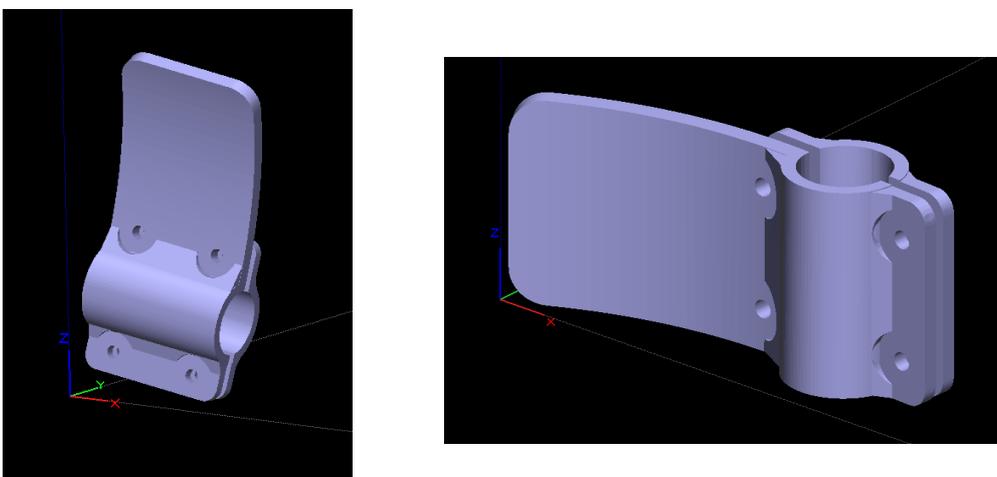


Fig. 4.23 Orientamento del dispositivo associato alla maniglia tipo 1

Successivamente sono stati impostati i parametri del “percorso macchina” riguardanti lo stile di riempimento e lo stile del supporto.

La selezione dello stile di riempimento interno del modello stabilisce il tipo di riempimento utilizzato per le aree interne del pezzo.

Per il riempimento esistono quattro tipi di modello interno che si possono scegliere:

- **Solido:** utilizzato quando si desidera una parte più resistente e durevole. I tempi di costruzione saranno più lunghi e verrà utilizzato più materiale;
- **Alta densità sparsa:** è lo stile interno del modello predefinito ed è altamente consigliato. I tempi di costruzione saranno più brevi, verrà utilizzato meno materiale e la possibilità di arricciare le parti delle geometrie con massa elevata saranno notevolmente ridotte;
- **Bassa densità sparsa:** l'interno sarà "a nido d'ape" o "tratteggiato". Questo stile consente tempi di costruzione più brevi e il minor utilizzo di materiale, ma diminuirà la resistenza della parte;
- **Sparse Double Dense:** riduce al minimo la quantità di materiale del modello utilizzato, ma utilizza un motivo raster a tratteggio incrociato (anziché unidirezionale) per una maggiore resistenza.

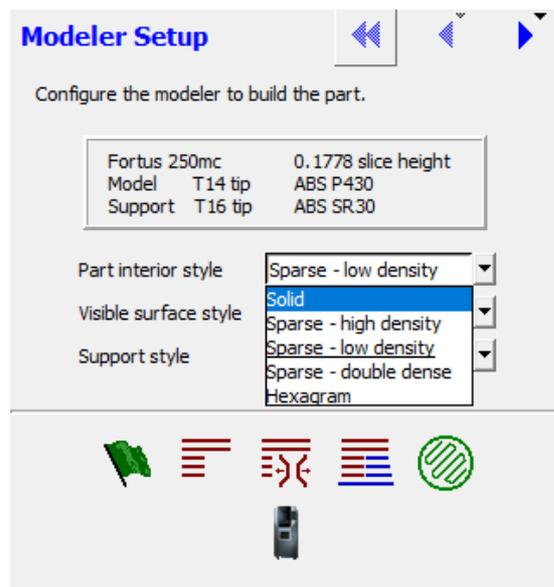


Fig. 4.24 Impostazione dello stile di riempimento.

Selezione dello stile di supporto:

Gli stili di supporto sono cinque e la loro scelta influenzerà la forza del supporto e il tempo di costruzione della stampa.

- **Base:** può essere utilizzato per la maggior parte delle parti. Il supporto di base utilizza una spaziatura costante tra i percorsi del supporto;
- **SMART:** riduce al minimo la quantità di materiale di supporto utilizzato, riduce il tempo di costruzione e migliora la rimozione del supporto;
- **Surround:** L'intero modello è circondato da materiale di supporto;
- **Sparso:** I supporti sparsi creeranno supporti che utilizzano meno materiale rispetto ai supporti di base;
- **Box:** I supporti separabili sono simili ai supporti sparsi ma sono costituiti da scatole invece che da un raster continuo.

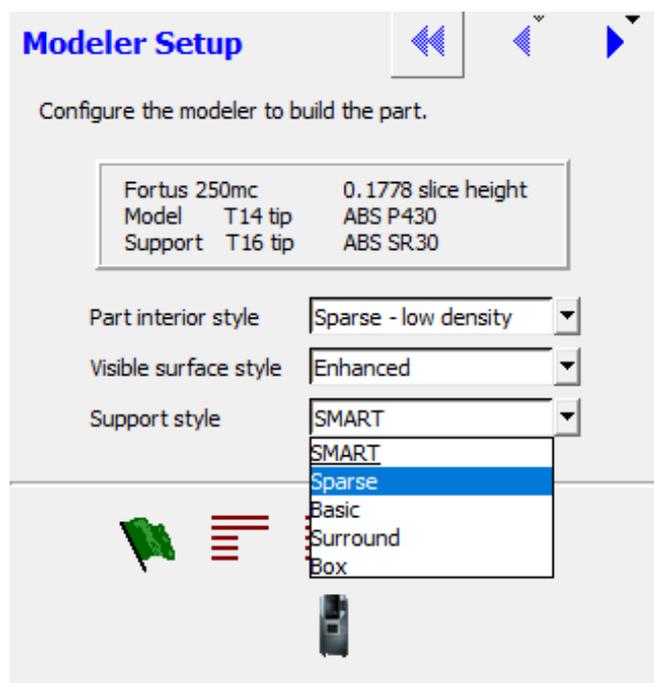


Fig. 4.25 Impostazione dello stile di supporto.

Una volta selezionati i parametri, per terminare la pre-elaborazione del file STL con le preimpostazioni predefinite è stato cliccato il pulsante  (fine) per creare il file CMB.

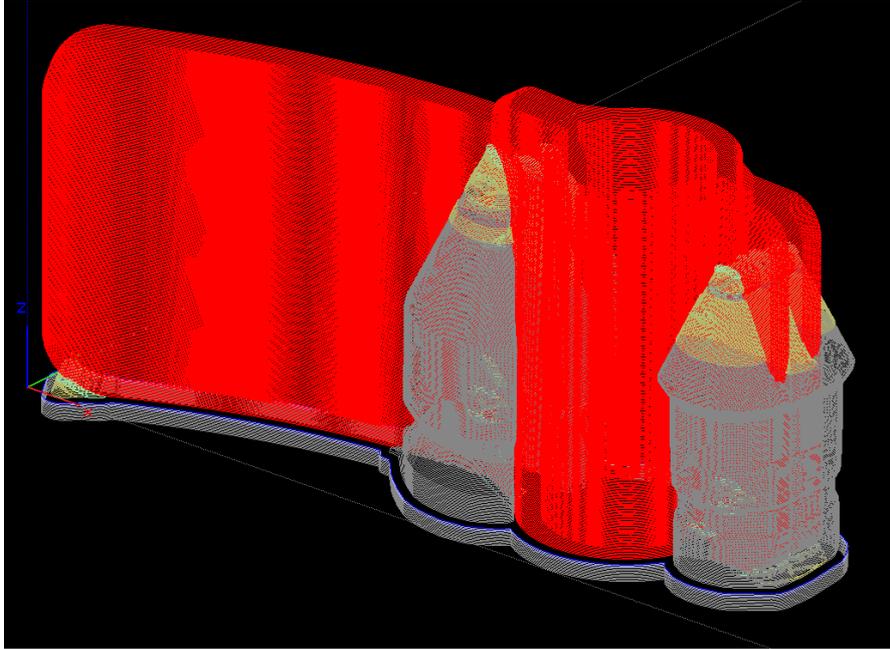


Fig. 4.26 Dispositivo associato alla prima tipologia di maniglia 1, elaborato per la stampa.

Per comprendere quale tipologia di riempimento fosse più idonea per il dispositivo, si è deciso di procedere alla stampa di due diversi prototipi per le due varietà di maniglia. Il primo a densità solida e il secondo a bassa densità sparsa. Lo stile di riempimento del materiale di supporto SMART è stato scelto per tutte le stampe dei diversi prototipi.

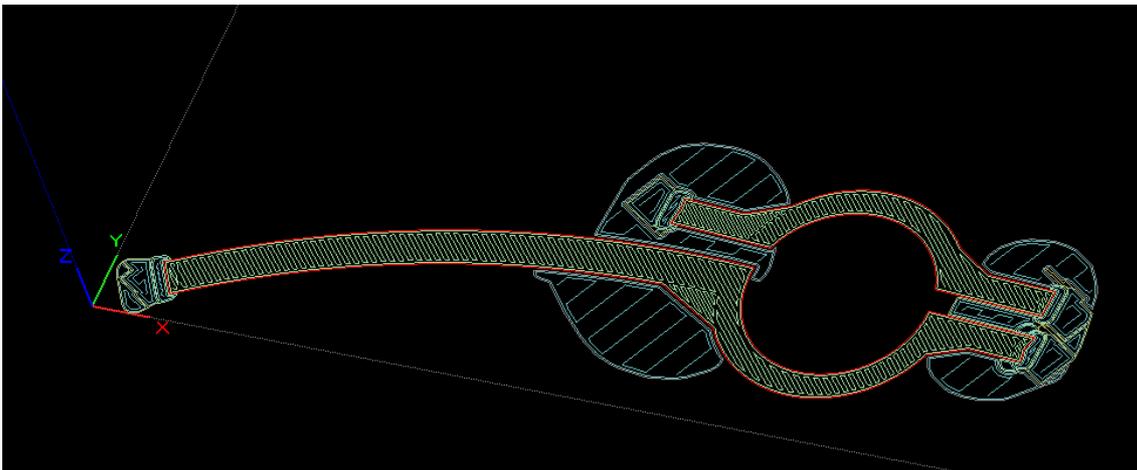


Fig. 4.27 Sezione del dispositivo con riempimento solid per una migliore resistenza meccanica.

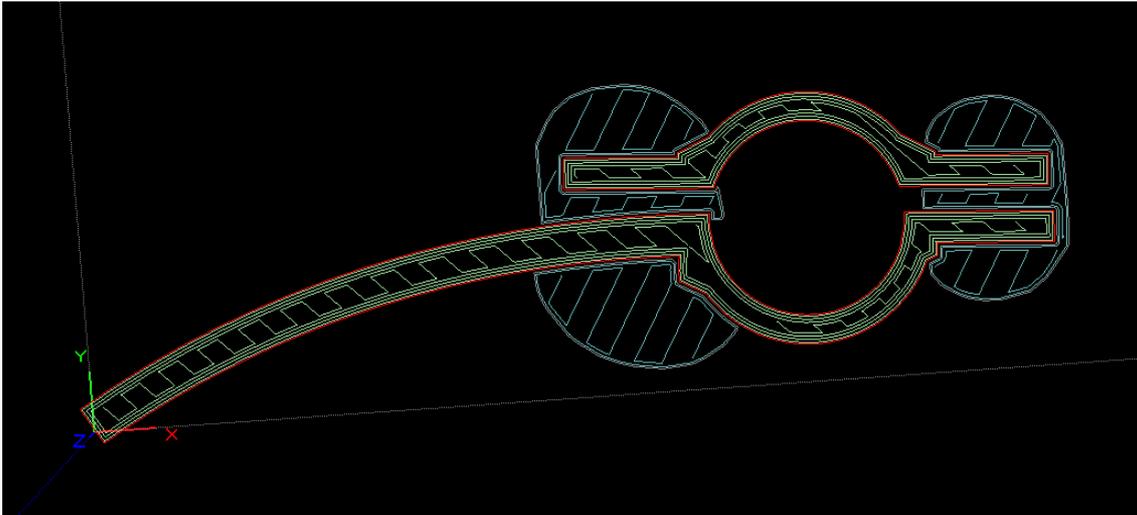


Fig. 4.28 Sezione del dispositivo con riempimento a bassa densità.

In Figura 4.29 sono riportati i dati relativi al tempo di stampa, al volume del materiale utilizzato per la realizzazione del modello e del supporto del primo dispositivo stampato con stile di riempimento a bassa densità e stile di supporto SMART.

Estimate Build Time ◀ ▶

Click the OK button to calculate the approximate time to build the current part.

Estimated build time

Model volume

Support volume

Fortus 250mc	0.1778 slice height
Model T14 tip	ABS P430
Support T16 tip	ABS SR30

Part interior style

Support style

Fig. 4.29 Dati relativi alla stampa del dispositivo

A seguito del processo di elaborazione, i file di stampa vengono esportati in formato CMB per poter essere processati dal software *ControlCenter* che dialoga con la stampante.

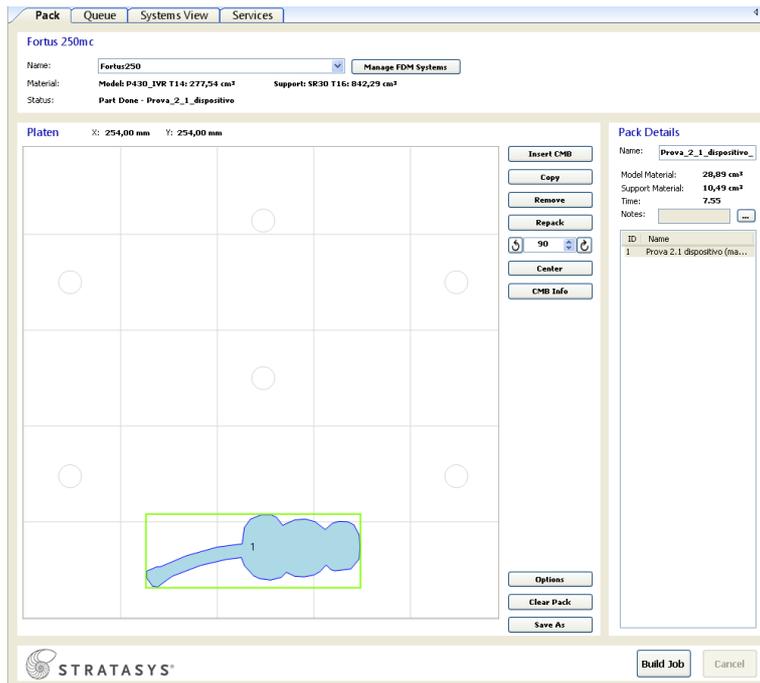


Fig. 4.30 posizionamento dispositivo nel piano di stampa attraverso il software Control Center.

I pezzi sono posizionati sul piano di stampa cercando di:

- Ottimizzare al meglio lo spazio;
- Evitare interferenze tra i pezzi anche durante l'accrescimento;
- Non coprire e quindi danneggiare i punti di riferimento della stampante, in modo tale che la tavola portapezzi possa essere riutilizzata.

A questo punto è possibile avviare il processo di prototipazione.

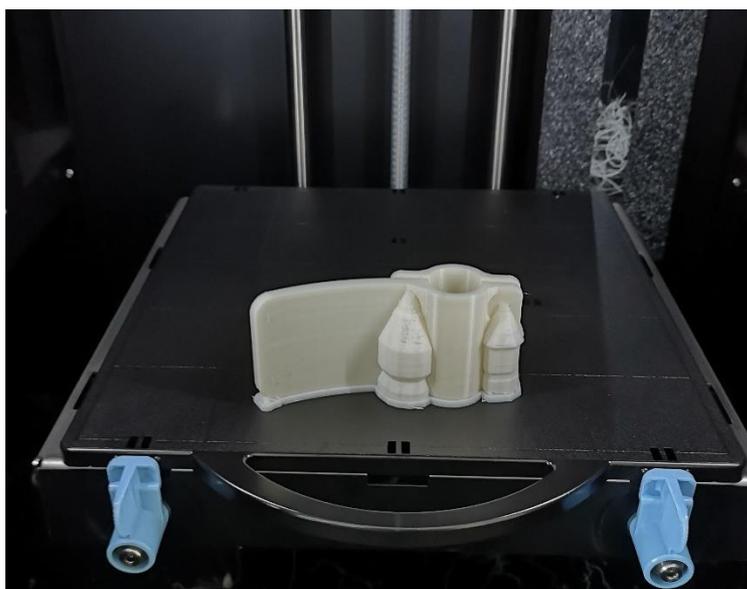


Fig. 4.31 Il prototipo prima dell'estrazione dalla camera di stampa.

Una volta terminato tale processo il dispositivo viene estratto dalla camera di stampa e pulito dal materiale di sostegno, in tal modo sarà pronto per essere testato.



Fig. 4.32 dispositivo con e senza materiale di sostegno.

Successivamente avviene il montaggio del dispositivo creato. Le viti selezionate per le due tipologie di maniglie scelte sono delle M4 x 16mm a testa bombata comprensive di dado esagonale compatibile e rondelle. Il montaggio è stato effettuato con un semplice cacciavite a croce.



Fig. 4.33 Immagini del dispositivo montato e test per verificarne il corretto funzionamento.

Dai test effettuati è emerso che il dispositivo permette una corretta e comoda apertura della porta e ha una buona resistenza allo sforzo meccanico.

Dopo la stampa e il montaggio del primo dispositivo prototipo vengono eseguite le altre

3. Di seguito viene mostrato il processo di creazione dei 3 dispositivi prefissati:

1. Tipologia 1 di maniglia con riempimento solid;
2. Tipologia 2 di maniglia con riempimento bassa densità;
3. Tipologia 2 di maniglia con riempimento solid.

Nella figura 4.34 sono riportati i dati relativi al tempo di stampa, al volume del materiale utilizzato per la realizzazione del modello e del supporto del dispositivo della maniglia tipologia 1 con riempimento Solid.

Estimate Build Time

Click the OK button to calculate the approximate time to build the current part.

Estimated build time	9 hr 16 min
Model volume	40.863 cm ³
Support volume	10.491 cm ³

Fortus 250mc	0.1778 slice height
Model T14 tip	ABS P430
Support T16 tip	ABS SR30

Part interior style	Solid - normal
Support style	SMART

Fig. 4.34 tempo di stampa maniglia 1 riempimento solid.

È stato generato successivamente il file CMB della maniglia di tipologia 1 e si è passati alla elaborazione del file del dispositivo della maniglia di tipologia 2.

Come primo step figura 4.35 è stato orientato il dispositivo in modo da mantenere la direzione di accrescimento lungo l'asse della maniglia, come per il dispositivo relativo alla maniglia di tipologia 1.

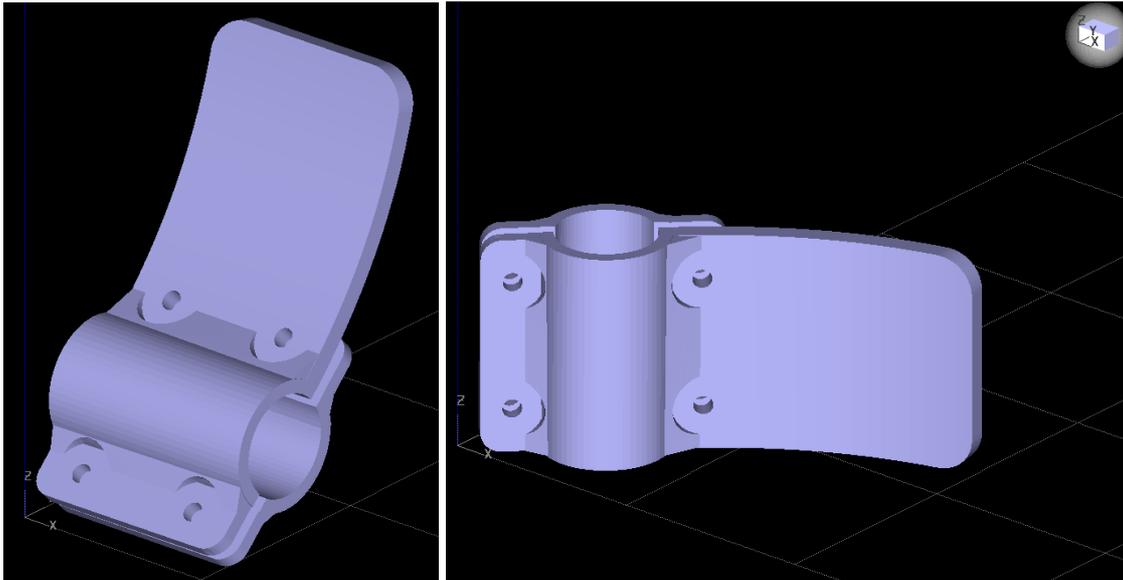


Fig. 4.35 Orientamento del dispositivo associato alla maniglia tipo 2.

Una volta orientato, il dispositivo viene elaborato con i due diversi stili di riempimento (riempimento a bassa densità e Solid figura 4.36).

Estimate Build Time		Estimate Build Time													
Click the OK button to calculate the approximate time to build the current part.		Click the OK button to calculate the approximate time to build the current part.													
Estimated build time	8 hr 6 min	Estimated build time	9 hr 11 min												
Model volume	30.575 cm ³	Model volume	43.083 cm ³												
Support volume	11.381 cm ³	Support volume	11.379 cm ³												
<table border="1"> <tr> <td>Fortus 250mc</td> <td>0.1778 slice height</td> </tr> <tr> <td>Model T14 tip</td> <td>ABS P430</td> </tr> <tr> <td>Support T16 tip</td> <td>ABS SR30</td> </tr> </table>		Fortus 250mc	0.1778 slice height	Model T14 tip	ABS P430	Support T16 tip	ABS SR30	<table border="1"> <tr> <td>Fortus 250mc</td> <td>0.1778 slice height</td> </tr> <tr> <td>Model T14 tip</td> <td>ABS P430</td> </tr> <tr> <td>Support T16 tip</td> <td>ABS SR30</td> </tr> </table>		Fortus 250mc	0.1778 slice height	Model T14 tip	ABS P430	Support T16 tip	ABS SR30
Fortus 250mc	0.1778 slice height														
Model T14 tip	ABS P430														
Support T16 tip	ABS SR30														
Fortus 250mc	0.1778 slice height														
Model T14 tip	ABS P430														
Support T16 tip	ABS SR30														
Part interior style	Sparse - low density	Part interior style	Solid - normal												
Support style	SMART	Support style	SMART												

Fig. 4.36 tabella relativa ai tempi di stampa, materiale utilizzato e stili di riempimento nelle due configurazioni.

A seguito del processo di elaborazione, i file di stampa vengono esportati in formato CMB e processati dal software *ControlCenter*.

Grazie a questo *software*, come è possibile vedere nella figura 4.37, si ottengono informazioni in merito alla quantità di materiale di costruzione e di supporto rimanenti nelle cartucce di stampa, alla quantità di materiale necessario per i 3 dispositivi, ed alla durata del processo totale di creazione.

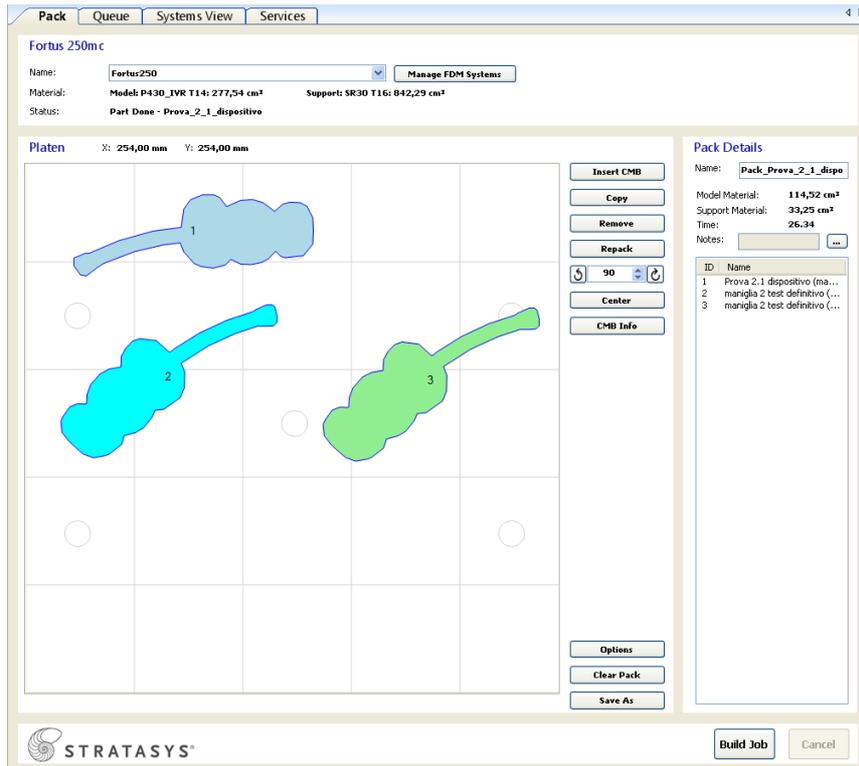


Fig. 4.37 Posizionamento dei pezzi nel piano di stampa tramite il software Control Center.

Successivamente al corretto posizionamento dei dispositivi sul piano di stampa viene dato il via alla prototipazione. Per tale processo è stato utilizzato lo stesso piano del dispositivo precedentemente creato ed illustrato.



Fig. 4.38 Dispositivi prima dell'estrazione dalla camera di stampa.

Una volta terminato tale processo i dispositivi vengono estratti dalla camera di stampa e puliti dal materiale di supporto, per essere pronti al montaggio e al test.



Fig. 4.39 Pulizia dal materiale di supporto.

Successivamente avviene il montaggio dei dispositivi creati. Le viti selezionate per le due tipologie di maniglie scelte sono delle M4 x 16mm a testa bombata comprensive di dado esagonale compatibile e rondelle. Il montaggio è stato effettuato con un semplice cacciavite a croce come per il primo prototipo testato.

Di seguito vengono riportate delle immagini che raffigurano il dispositivo montato sulla maniglia di tipologia 1 (fig. 4.40) e i successivi due dispositivi montati su maniglie di tipologia 2 con relativi test.



Fig. 4.40 Dispositivo con riempimento Solid della maniglia tipo 1 (foto a sinistra) e test (foto a destra).



Fig. 4.41 Dispositivo con riempimento a bassa densità della maniglia tipo 2 con verso di rotazione orario (foto a sinistra) e dispositivo con riempimento Solid della maniglia tipo 2 con verso di rotazione antiorario (foto a destra).



Fig. 4.42 Test del dispositivo con riempimento Solid della maniglia tipo 2 con verso di rotazione antiorario.

Dispositivo	Stile di riempimento	Materiale (cm ³)	Supporto (cm ³)	Tempo di stampa	Test funzionale
Tipologia 1	Low density	28,885	10,491	07:55	Superato
Tipologia 1	Solid	40,863	10,491	09:16	Superato
Tipologia 2	Low density	30,575	11,381	08:06	Superato
Tipologia 2	Solid	43,083	11,379	09:11	Superato

Tabella 4.1 Parametro di stampa, materiale utilizzato, tempo di stampa e risultato test funzionale dei 4 dispositivi realizzati.

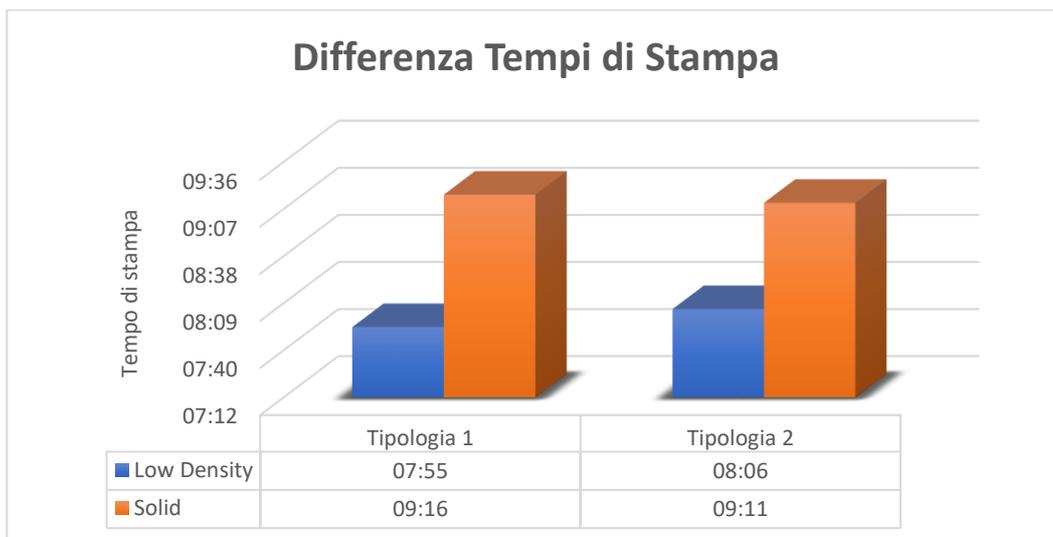
Sono stati effettuati svariati test sul dispositivo per accertarne la qualità. In aggiunta, si è deciso, durante i test di valutare la resistenza del prodotto, applicando una forza superiore a quella richiesta per una normale apertura della porta. Da questa prova è emerso che il dispositivo ha una buona resistenza alle sovra-sollecitazioni. Questo vale non solo per i dispositivi stampati con densità di riempimento solido ma anche per quelli con densità di riempimento bassa-sparsa.

Si evidenzia comunque che i risultati emersi dai test effettuati non sono generalizzabili a qualsiasi configurazione di parametri utili alla generazione di tale dispositivo. Pertanto, si consiglia di procedere alla stampa e al test di un prototipo prima di eseguire ulteriori stampe del dispositivo creato.

4.5.6 Costi

Durante il processo di creazione dei dispositivi è stato possibile monitorare i costi e le tempistiche della stampa del dispositivo. È utile valutare i costi relativi alla stampa e agli elementi utilizzati nel montaggio al fine di quantificare il costo totale dei dispositivi creati.

I 4 dispositivi sono stati stampati in 34 ore e 29 minuti. Di seguito viene mostrato un istogramma che mostra la differenza del tempo di stampa delle due tipologie di maniglie in base allo stile di riempimento.

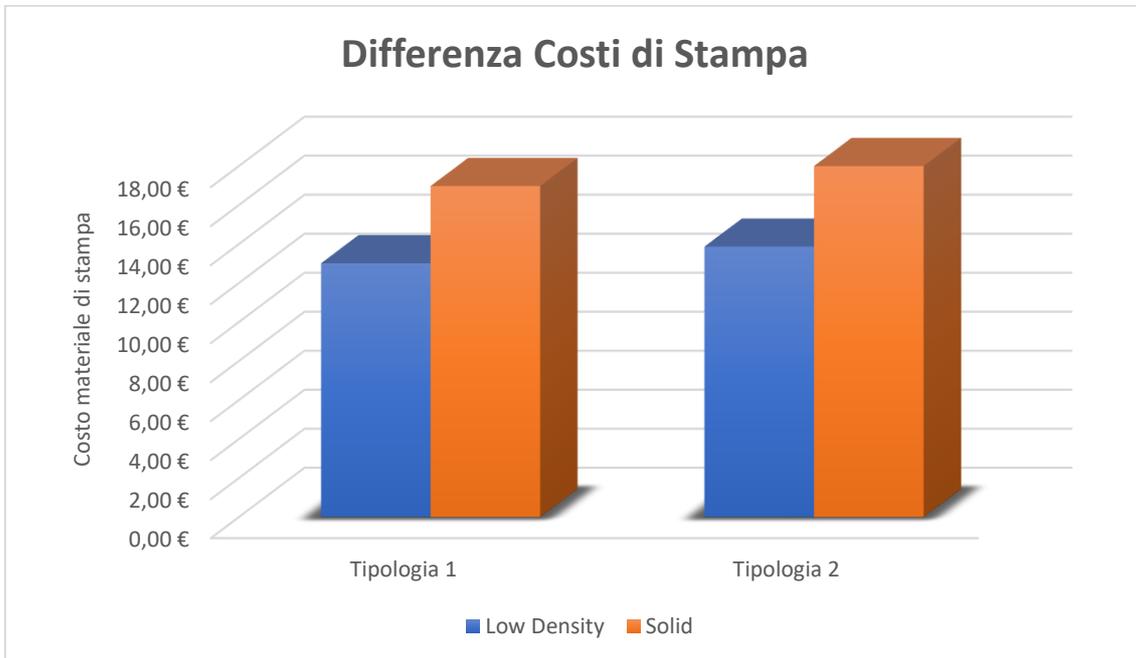


Istogramma 4.1 Differenza dei tempi di stampa relativo ai 4 dispositivi realizzati.

Dal diagramma precedente si evidenzia che la stampa 3D impiega poco tempo per la prototipazione, in particolare scegliendo lo stile di riempimento a bassa densità si risparmia circa 1 ora di tempo rispetto a quello ad alta densità per singola prototipazione. Per il calcolo del costo del volume di materiale per la costruzione delle parti che compongono i dispositivi e del materiale per la costruzione del supporto è stato considerato il costo delle cartucce (305 € per 923 cm³) di ognuna delle due tipologie di materiale. Va inoltre considerato il costo riguardante i materiali per l'assemblaggio (viti, dadi e rondelle) delle componenti dei dispositivi (0,19 € totali per ciascun dispositivo). Il costo del dispositivo sarà quindi dato dal costo del materiale utilizzato per la stampa e da quello dei componenti acquistati per il montaggio.

Dispositivo	Stile di riempimento	Materiale (cm ³)	Supporto (cm ³)	€/Quantità	Totale
Tipologia 1	Low density	28,885	10,491	0,3304442	13,01 €
Tipologia 1	Solid	40,863	10,491	0,3304442	16,97 €
Tipologia 2	Low density	30,575	11,381	0,3304442	13,86 €
Tipologia 2	Solid	43,083	11,379	0,3304442	18,00 €

Tabella 4.2 Costi del materiale di stampa relativo ai 4 dispositivi realizzati.



Istogramma 4.2 Differenza dei costi del materiale di stampa relativo ai 4 dispositivi realizzati.

Come si può notare dal diagramma il costo del materiale necessario alla generazione dei dispositivi risulta basso. Sommando i costi della stampa di tutti e 4 i dispositivi, il costo totale ammonta a 62,59 € (comprensivo dei componenti per il montaggio).

Infatti, uno dei vantaggi principali riportati dall'integrazione della tecnica FDM è stato proprio il costo.

5. CONCLUSIONI

L'obiettivo principale del presente elaborato è quello di mostrare la metodologia del processo di modellazione e produzione sviluppata per la creazione di un dispositivo hand-free utile all'apertura delle porte. Per la generazione di questo dispositivo sono state utilizzate delle tecnologie digitali, come Reverse Engineering (RE), Generative Design (GD) e Additive Manufacturing (AM).

Dal processo di lavoro svolto, si evince che l'utilizzo della tecnologia RE è utile in quanto permette di avere istantaneamente e con un ottimo rapporto costo/benefici, il modello digitale della maniglia.

In merito al Design generativo (GD), come mostrato anche nel capitolo 3, si evidenzia l'immediatezza e la facilità di personalizzazione del dispositivo grazie agli svariati parametri che ne permettono la modifica. Altro aspetto importante è la capacità dell'algoritmo di generare dispositivi per maniglie di diverse forme. Questa caratteristica rende l'algoritmo "universale" per le diverse maniglie a leva esistenti sul mercato.

Per quanto riguarda la produzione additiva (AM), la stampa risulta efficace per la produzione di un piccolo lotto di prodotti personalizzati. In aggiunta, le tempistiche e i costi per la produzione risultano discretamente contenuti confrontandole con una tipologia di produzione tradizionale ad iniezione. Quest'ultima richiede infatti dei costi di ammortamento elevati per la produzione di un piccolo lotto in quanto necessita della creazione di uno stampo adatto all'iniezione. Le maniglie possono essere stampate dalle aziende che già posseggono sistemi di stampa 3D secondo un principio di riconversione degli obiettivi di produzione. Altra caratteristica importante della AM, che la differenzia dalle altre tipologie di tecniche produttive, è la possibilità di modificare il prototipo da stampare in breve tempo e con facilità. In definitiva, il lavoro svolto in questa tesi ha mostrato come la tecnologia additiva possa offrire valide alternative ai processi usuali, capaci di produrre pezzi finiti già utilizzabili. Infatti, da questo studio appare chiaro come la prototipazione rapida permetta di ottenere risultati migliori, sia in termini di costo che di risparmio di tempo, soprattutto nell'ambito della produzione di un limitato numero di pezzi (40 – 100 pezzi circa).

In conclusione, si auspica che in futuro vengano condotti ulteriori studi con lo scopo di realizzare un algoritmo in grado di generare dispositivi hand-free per diverse tipologie di maniglie (es. pomelli, maniglioni antipánico etc.). Questo in quanto la possibilità di aprire delle porte senza il contatto diretto con la maniglia può portare solo che dei benefici vista la situazione di pandemia attuale. Infatti, come spiegato nei capitoli precedenti, la superficie delle maniglie è uno dei veicoli di infezione virale più pericolosi.

BIBLIOGRAFIA

Bin Wan, Xinlian Zhang, Dongxia Luo, Tong Zhang, Xi Chen, Yuhan Yao, Xia Zhao, Limei Lei, Chunmei Liu, Wang Zhao, Lin Zhou, Yuqing Ge, Hongju Mao, Sixiu Liu, Jianmin Chen, Xunjia Cheng, Jianlong Zhao, Guodong Sui, (2020), *On-site analysis of COVID-19 on the surfaces in wards.*

Cem C. Tutum, Supawit Chockchowwat, Etienne Vouga, Risto Miikkulainen, (2018), *Functional Generative Design: An Evolutionary Approach to 3D-Printing.*

Constantinos Mavroidis, Richard G Ranky, Mark L Sivak, Benjamin L Patrilli, Joseph DiPisa, Alyssa Caddle, Kara Gilhooly, Lauren Govoni, Seth Sivak, Michael Lancia, Robert Drillio, Paolo Bonato, (2011), *Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping.*

D. Prati, G. Zuppella, G. Mochi, L. Guardigli, R. Gulli, (2019), *Wooden trusses reconstruction and analysis through parametric 3d modeling.*

F. M. Mwema and E. T. Akinlabi, (2020), *Fused Deposition Modeling, Manufacturing and Surface Engineering.*

Fantini M., De Crescenzo F., Brognara L. and Baldini N., (2016), *Design and Rapid Manufacturing of a customized foot orthosis: a first methodological study.*

Francesco Di Paola, Tommaso Ingrassia, Mauro Lo Brutto and Antonio Mancuso, (2017), *A reverse engineering approach to measure the deformations of a sailing yacht.*

H. Bikas¹ & P. Stavropoulos & G. Chryssolouris, (2015), *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review.*

James Mountstephens and Jason Teo, (2020), *Progress and Challenges in Generative Product Design: A Review of Systems.*

John Scott Frazer, Amelia Shard & James Herdman, (2020), *Involvement of the open-source community in combating the worldwide COVID-19 pandemic: a review.*

Jun Lv, Jin Yang, Juan Xue, Ping Zhu, Lanfang Liu, Shan Li, (2020), *Detection of SARS-CoV-2 RNA residue on object surfaces in nucleic acid testing laboratory using droplet digital PCR.*

Katia Razzini, Marta Castrica, Laura Menchetti, Lorenzo Maggi, Lucia Negroni, Nicola V. Orfeo, Alice Pizzoccheri, Matteo Stocco, Stefano Muttini, Claudia M. Balzaretto, (2020), *SARS-CoV-2 RNA detection in the air and on surfaces in the COVID-19 ward of a hospital in Milan, Italy.*

Margaret Glancey, Patience Osei, William Alexander Patterson, Matthew Petney, a Laura Scavo, Chandrakant Ruparelia, Soumyadipta Acharya, Youseph Yazdi, (2017), *Design Improvements for Personal Protective Equipment Used in Ebola and Other Epidemic Outbreaks.*

Martin Pollák, Monika Töröková, Marek Kočiško, (2020), *Utilization of Generative Design Tools in Designing Components Necessary for 3D Printing Done by a Robot.*

Matteo Sanchi, Tesi di laurea (2014), *Analisi dell'introduzione di tecniche additive nel processo produttivo di airbox per il settore automotive.*

P.-M. François, X. Bonnet, J. Kosior, J. Adam, R.H. Khonsari, (2020), *3D-printed contact-free devices designed and dispatched against the COVID-19 pandemic: The 3D COVID initiative.*

Ricotta, Vito, Ian Campbell, Tommaso Ingrassia, and Vincenzo Nigrelli, (2019), *Additively manufactured textiles and parametric modelling by generative algorithms in orthopaedic applications.*

Rodrigo Munhoz, Cícero André da Costa Moraes, Harki Tanaka, Maria Elizete Kunkel, (2016), *A digital approach for design and fabrication by rapid prototyping of orthosis for developmental dysplasia of the hip.*

Sangeun Oh , Yongsu Jung, Seongsin Kim, Ikjin Lee, Namwoo Kang, (2018), *Deep Generative Design: Integration of Topology Optimization and Generative Models.*

Sivam Krish, (2011), *A practical generative design method.*

Tobias Mueller, Ahmed Elkaseer, Amal Charles, Janin Fauth, Dominik Rabsch, Amon Scholz, Clarissa Marquardt, Katja Nau and Steffen G. Scholz, (2020), *Eight Weeks Later—The Unprecedented Rise of 3D Printing during the COVID-19 Pandemic—A Case Study, Lessons Learned, and Implications on the Future of Global Decentralized Manufacturing.*

Tristan Briard, Frédéric Segonds, Nicolo Zamariola, (2020), *G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry.*

Yen Lee Angela Kwok MBBS, MPH, MHM, PhD, Jan Gralton BSc (Hons), PhD, Mary-Louise McLaws DipTropPubHlth, MPHlth, PhD, (2015), *Face touching: A frequent habit that has implications for hand hygiene.*

SITOGRAFIA

<https://www.malpensanews.it/2020/10/scanner-e-superfici-in-rame-contro-il-coronavirus-laeroporto-diventa-touchless/855264/>

<https://www.eleganttech.eu/it/hands-free-door-opener/>

<https://www.dezeen.com/2020/04/27/handle-hacks-hands-free-door-opening/>

<https://www.materialise.com/en/hands-free-door-opener/technical-information>

<https://www.dezeen.com/2020/03/25/hands-free-door-handle-coronavirus-ivo-tedbury-freddie-hong/>

<https://www.materialise.com/en/hands-free-door-opener>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Maniglia_\(porta\)#Caratteristiche](https://it.wikipedia.org/wiki/Maniglia_(porta)#Caratteristiche)

<https://3dscanexpert.com/3d-systems-cubify-sense-3d-scanner-review/>

<https://3dscanexpert.com/3d-systems-sense-2-realsense-sr300-review/>

<https://3dscanexpert.com/3dsystems-sense-for-realsense-review/>

<https://issuu.com/pabloherrera/docs/algorithmigenerativi>

<https://www.01building.it/strumenti/generative-design-collaborare-algoritmo/>

https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=CnKjBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP15&dq=sense+scanner+3d+portatile&ots=P4ZGWrJnNd&sig=__GQKYXMbysAZTCfmMS7xSyhwdg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

RINGRAZIAMENTI

Giunto alla fine di quello che era uno degli obiettivi più importanti che mi ero prefissato, non posso fare a meno che pensare a tutti i momenti di emozioni forti, difficoltà e di sfide che hanno accompagnato questo percorso.

Prima di tutto vorrei ringraziare la Professoressa Francesca De Crescenzo per avermi dato la possibilità di sviluppare questa tesi e per la professionalità, precisione e disponibilità dimostratami.

Il ringraziamento più grande va ai miei genitori e mio fratello che hanno sempre creduto in me, mi sono stati vicini e mi hanno sostenuto in tutti i momenti importanti di questo percorso.

Un grandissimo ringraziamento va a Serena, che è stata presente in questi anni della mia vita rallegrando le mie giornate e rendendo più facile il raggiungimento dei miei obiettivi. Ringrazio i familiari che hanno creduto nell'obiettivo che mi sono prefissato, in particolar modo i miei nonni che mi hanno sempre spinto a credere in me e a puntare sempre al massimo.

Ringrazio anche gli amici che hanno permesso qualche momento di distrazione e svago in questi anni di studio.

Infine, ringrazio il signor Balducci Gabriele che a suo modo mi ha sostenuto in questi anni di università.

Grazie mille a tutti.