UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

EFFETTO DEI PARAMETRI DI STAMPA SULLA RESISTENZA AL TAGLIO DI COMPONENTI IN MATERIALE TERMOPLASTICO FLESSIBILE OTTENUTI MEDIANTE MANIFATTURA ADDITIVA

EFFECT OF PRINTING PARAMETERS ON THE SHEAR STRENGTH OF COMPONENTS IN FLEXIBLE THERMOPLASTIC MATERIAL OBTAINED BY MEANS OF ADDITIVE MANUFACTURING

Relatore:

Prof. Archimede Forcellese

Tesi di Laurea di:

Alessandro Amir Abu-Eideh

Correlatori:

Prof. Michela Simoncini

Dott. Ing. Tommaso Mancia

A.A. 2021 / 2022

SOMMARIO

ABSTRACT……3

INTRODUZIONE……...4

1. Stato dell'arte……....6

1.1 Additive Manufacturing…….……6

1.1.1 Linea temporale……....7

1.2 Impiego e tecniche ……..…10

1.2.1 SLA……..…….…14

1.2.2 Liquid Deposition Modelling…….…….15

1.2.3 Material Extrusion…….……..15

1.2.4 Material Jetting……..…….……20

1.2.5 SLS……..…21

1.2.6 SLM…….……..21

1.2.7 Laser Cladding……...……..23

1.2.8 DED..…….…23

1.3 Applicazioni in campo biomedico……..…24

1.3.1 Approccio dedicato…….…….……24

1.3.2 La chirurgia cardiovascolare…….…….…26

2. MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI.…….……33

2.1 Materiali…….……33

2.1.1 BioFlex Filoalfa……..33

2.1.2 Makerbot Replicator 2X……38

2.1.3 Makerbot Desktop...……..…….40

2.2 Procedure sperimentali……...…43

2.2.1 Stampa……..…….43

2.2.2 Prova di taglio……..…….48

3. Risultati…….……..52

3.1Studio dei dati……..…….52

CONCLUSIONI…….……59

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA……..60

ABSTRACT

La Shear Strength è definibile come la resistenza al taglio nei materiali solidi; in questa trattazione sono stati utilizzati dei provini in TPU, in cui il valore ultimo di questo parametro si ottiene dal valore della forza massima raggiunta per arrivare alla rottura del campione, moltiplicato per alcune costanti che caratterizzano il provino ed altre specifiche per la tipologia di prove effettuate.

Il fine di questo studio è stato quello di osservare l'andamento di tale parametro rispetto alla variazione della percentuale di riempimento e dello spessore dei provini, con la ricerca del provino a minore resistenza, ossia caratterizzato dalla minore shear strength possible per uno scopo biomedico, cioè la realizzazione di modelli tridimensionali che riproducono organi e tessuti umani.

BioFlex Filoalfa è stato il protagonista di questa ricerca, un materiale termoplastico (TPU) polimerico che è anche biocompatibile. Dalle prove effettuate si è potuto concludere che riducendo il grado di infill, il valore della resistenza al taglio diminuisce, mentre rimane circa costante al variare dello spessore dei provini.

INTRODUZIONE

La tesi in questione concentra il suo studio sull'analisi di resistenza al taglio nei materiali termoplastici, più nello specifico in quella categoria di elementi ottenuti tramite l'utilizzo di tecniche di additive manufacturing in Fused Deposition Modelling.

In uscita si hanno una serie di risultati ottenuti tramite una prova meccanica di taglio, che si attiene alla normativa ASTM D732 – 17 eseguita con una macchina di prova universale MTS 810 su provini realizzati in un materiale biocompatibile a base di TPU, il Filoalfa Bioflex. Lo stimolo principale per condurre questo tipo di ricerca nasce nel campo delle applicazioni in campo biomedico, dove negli anni sono stati condotti studi e applicazioni per quanto riguarda ad esempio le protesi o gli impianti, fornendo un valido sostituto al trapianto ove questo sia impossibile da realizzare. Non solo, l'obiettivo si trova soprattutto nella creazione di modelli tridimensionali di organi e tessuti del corpo umano più simili possibile ai casi reali, che garantiranno una perfetta base di partenza per la sperimentazione da parte dei medici e dei chirurghi di complicate operazioni da effettuare sui pazienti; non è soltanto un metodo di esercitazione, ma uno studio pre-operatorio vero e proprio su un modello identico al caso previsto, ottenuto tramite una serie di analisi (tomografie) e portato a modello con la stampa 3D. Il fattore preoccupante nella realizzazione di trapianti è sicuramente il rischio che si corre, dato che ogni paziente è diverso e soprattutto potrebbe soffrire di una serie di patologie combinate in maniera diversa, per questo risulta più sicuro dare la possibilità di avere il caso operatorio in forma modellistica ancora prima di sperimentare quello reale su un paziente in sala operatoria.

A livello tecnico lo studio si è concentrato sulla ricerca della Shear Strength, ossia un parametro che rappresenta il carico più alto richiesto per realizzare la tranciatura del provino sotto test, così che nell'attrezzatura in uso la parte mobile (punzone) sia relativamente lontana dalla parte fissa (restante parte del provino). Questo valore, detto anche resistenza al taglio, è il risultato di un calcolo dove i parametri variabili sono la forza impiegata dal punzone e lo spessore del provino impiegato in quella singola prova. Per avere un range di risultati più ampio, il caso è stato esteso all'utilizzo di provini con diversi spessori, con diverse densità di riempimento e con l'uso di strati "aggiuntivi" per avere un confronto della relazione tra forze e resistenza al variare delle caratteristiche del materiale, sottoforma di disco forato con dimensioni standard. Una delle dimensioni variate più frequentemente è stata la misura percentuale della densità interna del provino, denominata nei parametri di stampa come "Infill"; un'altra misura di interessa che è stata variata è stata quella dello spessore del provino.

Grazie a questo metodo è stato possibile osservare la costanza oppure l'andamento lineare crescente / decrescente in base alla variazione di tali parametri, avendo condotto un numero di circa 20 prove totali, tenendo in considerazione il valore ritenuto più veritiero in base alle possibili deviazioni dovute agli errori o accidentalità durante le prove, concedendo alla trattazione anche un piccolo studio di questo fenomeno.

Si vedrà quindi a partire dai primi capitoli un elaborato che si basa sulla presentazione dell'additive manufacturing nella storia e il suo ruolo nel mercato, fornendo motivazioni per cui tale applicazione fornisce un beneficio economico, per poi passare ad un'osservazione del ruolo di tale tecnica in campo biomedico, con diversi esempi e studi condotti.

Successivamente si dedica una parte alla presentazione dell'attrezzatura vera e propria, relativa a tutte le fasi attraversate in questo studio, per poi concludere con i risultati ottenuti, discutendone la validità e la diversificazione. In questo caso la ricerca non è stata fatta per poter paragonare i risultati con altri studi o raffinarne i risultati, bensì per determinare in maniera diretta le caratteristiche del materiale in sé, proprio per fornire una base di partenza sul concetto di analisi delle forze di taglio su tale materiale.

Tecnicamente, la fase di analisi si è basata inizialmente sulla stampa 3D tramite tecnologia FDM di una bobina filamentosa; dopo aver prodotto la serie di dischi forati (provini), si sono impostate le attrezzature adeguate alla realizzazione della prova, per poi effettuarla inserendo un "pre-impostato" supporto all'interno della pressa idraulica, seguendo la normativa illustrata precedentemente. Infine, i risultati della prova hanno mostrato un andamento crescente per quanto riguarda l'andamento della forza impiegata nella rottura in relazione all'aumento della densità interna dei dischi forati, fornendo quindi dei valori di shear strength uniformi e in generale privi di errori, segnalando un materiale quindi compatibile con gli scopi da raggiungere, che risponde alle sollecitazioni in maniera piuttosto soddisfacente.

1. STATO DELL'ARTE

1.1 Additive manufacturing

Per Additive Manufacturing si intende il processo di progettazione, stampa e produzione di un modello tridimensionale realizzato tramite software, che mira ad ottenere risultati migliori rispetto alle tradizionali tecniche di fabbricazione. Infatti, come si può interpretare dal nome stesso, l'obiettivo è quello di avviare una "fabbricazione additiva", dove non si adotta la sequenza che prevede metodi sottrattivi di materiale (ad esempio, la tornitura), bensì si ottimizzano le quantità di stampa grazie alla deposizione in strati consecutivi con il fine di ottenere l'oggetto nella sua tridimensionalità.

I file di stampa vengono creati grazie a software informatici in cui è possibile mettere a modello l'idea di partenza, con strumenti di dimensionamento che possono soddisfare qualsiasi richiesta da parte dell'utente, infatti tutti gli oggetti, se inseriti in questi programmi, possono essere mandati in stampa.

Risulta chiaro che la tecnologia tridimensionale si sta espandendo in tutti i campi industriali dove si richiede la produzione di parti, in genere di dimensioni ridotte (anche per prodotti più voluminosi come il settore nautico oppure aerospaziale). Si parte sempre da un modello virtuale, che questo possa essere usato come solamente un prototipo digitale o meno, per arrivare di conseguenza a prendere forma come un modello fisico. Quest'ultimo è il frutto dell'additive manufacturing, cioè della stampa 3D del modello digitale: questo processo permette una prototipazione intelligente che verrà trattata a seguire, con non pochi vantaggi dal punto di vista della richiesta del cliente e dalla versatilità di offerta da parte dell'industria.

Per fare uso di questa tecnologia è necessario imparare a pensare ad una produzione mirata, che possa offrire un risparmio di tempi (ancora molto lunghi) e specialmente di materiali, che in una produzione tradizionale, a causa degli scarti e delle produzioni in larga scala sono coinvolti in grandissimi volumi. Queste sono le cause principali per cui si sviluppa continuamente il settore dell'additive manufacturing, proprio perchè ci sono alcuni casi in cui non è sufficiente una richiesta standardizzata, talvolta è necessario adattare la stampa al modello richiesto, può essere ad esempio la ricostruzione di una parte danneggiata non reperibile altrimenti, o la sostituzione di un importante componente uscito di produzione: sono svariate le motivazioni che spingono la ricerca scientifica di un settore così moderno e innovativo. Tale tecnica si espande alla quasi totalità dei campi industriali, come il campo elettronico, il campo meccanico, biomedico, nautico, non necessariamente in veste di un bisogno concreto o prettamente funzionale, bensì come settore di design: grazie ai software di progettazione è possibile realizzare parti con qualsiasi richiesta in termini di estetica o di ergonomia, come ad esempio un'applicazione biomedica che ha la necessità di convogliare la richiesta tecnica ed ergonomica nella stessa realizzazione: protesi dentarie, ossee, ecc..

Ci sono diverse tecniche di stampa che verranno presentate a seguire, tecniche da esaminare scegliendo quale di queste può soddisfare la richiesta del cliente, poiché la principale idea di stratificazione non è un processo definito univocamente, ma dipende da numerosi parametri di stampa e soprattutto da diversi tipi di stampanti. Il significato dell'additive manufacturing risiede proprio in questo, progettare nel software impostando tutte le variabili possibili per ottenere un lavoro di alta precisione e di alta soddisfazione da parte di chi richiede la stampa, la cui parte laboriosa è proprio l'implementazione.

1.1.1 Linea temporale

La storia della stampa 3D nasce in maniera più corposa all'incirca negli anni '60 del '900, dove il primo approccio ad un innovativo metodo di produzione è stato rappresentato dall'utilizzo di due fasci laser impostati ad una lunghezza d'onda diversa. Questi ultimi, incrociandosi in un solo punto all'interno di un recipiente contenente materiali polimerici, (in particolare foto-polimerici, cioè capaci di compattarsi assorbendo luce), solidificavano un dato volume di materiale, portando così alle prime realizzazioni di modelli con la tecnica dell'additive manufacturing grazie alla fotopolimerizzazione, nel "Battelle Memorial Institute" di Columbus, in Ohio. Nell'ultima parte di questa decade, un brevetto chiamato "Metodo di produzione di una figura 3D mediante olografia" **[1]**, si basava su un approccio simile dovuto al raggio laser doppio. La stessa persona si occupò di sviluppare e commercializzare questa tecnologia, pur senza significativi risultati.

Nei successivi anni '70 invece la manifattura additiva subisce uno sviluppo per quanto riguarda la tecnica di realizzazione, che si sviluppa anche per quanto riguarda la fusione delle polveri, nel 1972. Questa tipologia di produzione è in breve una fusione a letto di polvere, che si può realizzare tramite un fascio di elettroni o tramite una fusione laser selettiva. A seguire sono state brevettate tecniche per produrre un oggetto di metallo volto a solidificarsi nella forma desiderata grazie ad un getto di inchiostro su ogni strato del modello. Il dispositivo in questione si chiamava "Liquid Metal Recorder" (figura a), un importante passo per la realizzazione dei prototipi. **[2a]**

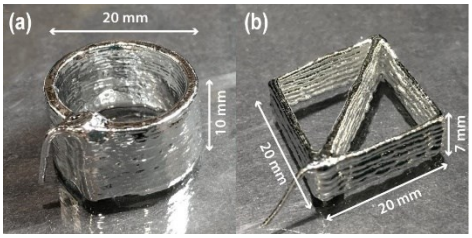

Figura a – Parti prodotte tramite L.M.R. ***[2]***

Dopodichè, alla fine di questa decade, nel 1979 è stata messa a punto una tecnica chiamata "sheet lamination", ossia laminazione dei fogli, in cui si utilizzano alcuni rulli di un materiale per costruire livello dopo livello, l'oggetto. In generale, le tecniche messe a punto in questi anni sono state realizzate grazie allo sviluppo dei software CAD negli anni del dopoguerra, più in particolare negli anni '60 del '900.

Gli anni ’80 del ‘900 rappresentano un periodo davvero decisivo per quanto riguarda lo sviluppo della stampa 3D, infatti nel 1986 si ha l’introduzione di una particolare metodologia di stampa: la stereolitiografia, pubblicata nel brevetto di Chuck Hull, che riporta questa descrizione : *"Un sistema per generare oggetti tridimensionali basato sulla creazione di un modello trasversale dell'oggetto da costituire, sulla superficie di un medium fluido capace di alterare il suo stato fisico in risposta a stimoli sinergici quali radiazione incidente, bombardamento di particelle o reazioni chimiche, in lamine adiacenti che rappresentano le sezioni trasversali adiacenti successive dell'oggetto che si integrano tra loro, provvedendo ad una progressiva crescita per apposizione dell'oggetto desiderato, per cui un oggetto è creato da una superficie sostanzialmente planare del medium fluido durante il processo di formazione"* **[3]**.

Dopo la fondazione della compagnia “3D Systems”, nella stereolitiografia di Hull si fa riferimento alla tecnica di stampa 3D in cui il fotopolimero cambia le proprietà che lo caratterizzano a seconda della luce e del calore che lo investono. In generale quindi, il lavoro di Hull è stato l’inizio di questa tecnica basata sulla stratificazione della stampa tridimensionale usando parti solide al posto di materiali liquidi come ad esempio le resine.

Anche gli anni ’90 costituiscono un’importante passo avanti verso l’evoluzione dell’Additive Manufacturing, infatti proprio in questi anni arrivavano i primi risultati di ricerca grazie a Beaman e Deckart nel 1992, che concentravano i loro lavoro nel sistema commerciale della sinterizzazione laser, ossia un processo di produzione destinato ai prototipi principalmente in nylon. All’inizio del 1993, la Denken Engineering (Giappone) e Autostrada Corporation, hanno investito quasi 8 milioni di yen in un sistema di stereolitiografia chiamato “Solid LD Plotter System 3000”. Questo sistema era in grado di utilizzare diodi luminosi rispetto a costosi laser utilizzati nei già presenti sistemi coinvolti in stereolitiografia. Anche le dimensioni del dispositivo in questione erano ridotte rispetto alle più comuni macchine dell’epoca, nonostante fossero in grado di produrre elementi di dimensioni come 200 x 400 x 300 mm, il cui scopo era essere utilizzate per i laboratori del governo giapponese. Contemporaneamente, in Germania si vendevano grazie alla Electro-Optical Systems i primi sistemi di stereolitiografia, sistemi a deposizione fusa (FDM), ed oggetti in manifattura laminata oltre ai dispositivi per la Selective Laser Sintering (SLS) e la stereolitiografia Soliform. **[4]**.

Anche in Texas, nell’University of Texas di Austin, Deckard e Beaman svilupparono la tecnologia a letto di polvere.Successivamente nell’Aprile 1994 si lanciava un sistema, ancora, per la sinterizzazione laser in Germania grazie all’EOS di Monaco, vantando numerose vendite e quindi un certo successo. Nel 1995 invece veniva commercializzato un processo chiamato “RapidTool”, che consisteva nella prototipazione rapida (“Rapid Prototyping”), una maniera di prototipare grazie alla produzione di parti sagomate mediante la creazione o l’aggiunta graduale di materiale solido. **[5]**

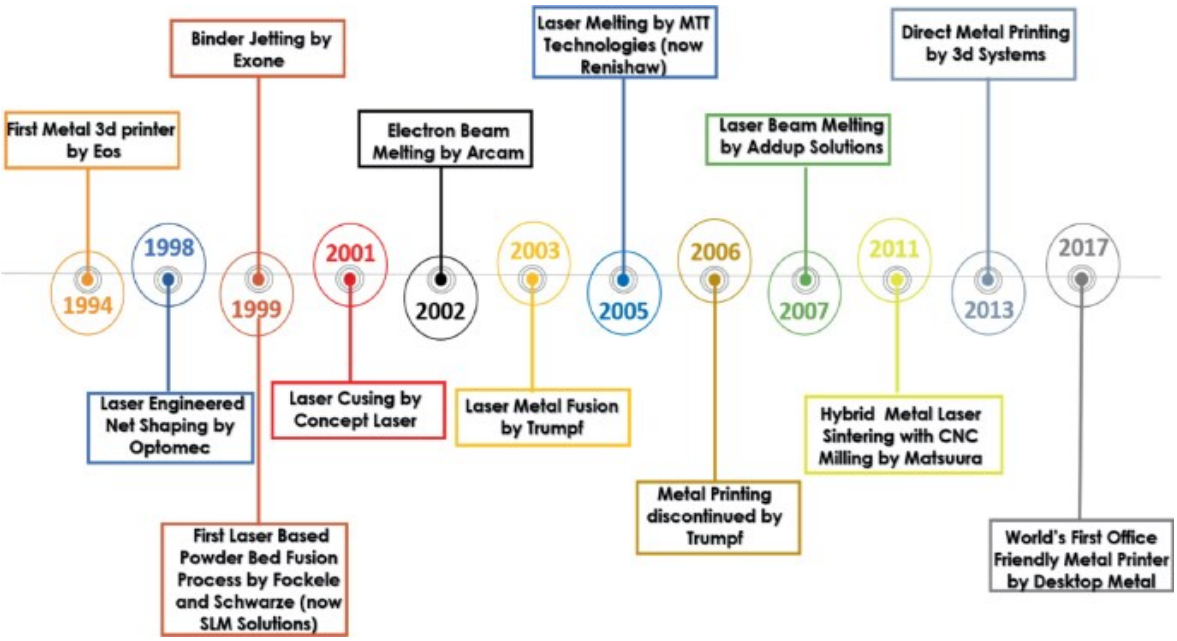

Figura b: Sviluppo temporale dell'additive manufacturing ***[5a]***

Gli anni 2000 rappresentano un ulteriore sviluppo per quanto riguarda l'Additive Manufacturing, infatti proprio in questi anni, oltre allo sviluppo in termini di tecnica e metodi di stampa, anche la parte software ha subito una grande messa a punto, sia per quanto riguarda i sistemi CAD che nello specifico i formati dei file riguardanti i modelli da stampare. Contemporaneamente si concentravano gli studi su un tipo di stampa, l'Electron Beam Melting, dove sono coinvolti i fasci di elettroni. Fino ad oggi sostanzialmente si sono viste le commercializzazioni dei progetti e delle ricerche sugli sviluppi dell'additive manufacturing durante la fine del '900, e soprattutto il coinvolgimento dei metalli (prettamente in forma polverosa) nella stampa 3D, con non poche partecipazioni con approcci hobbistici, come d'altronde accade anche al giorno d'oggi.

In questi tempi l'additive manufacturing ha subito uno sviluppo sostanzioso per quanto riguarda la stampa 3D, in termini di dispositivi stampanti, come ad esempio la fondazione nel 2008 della Makerbot Industries, creatrice della stampante utilizzata per realizzare provini necessari in questa stessa trattazione. I dispositivi resi disponibili dalla Makerbot consistono in piccole unità capaci di essere acquistate grazie alle loro capacità di trasporto date dalle ridotte dimensioni e dalla versatilità d'uso che le caratterizza. Nel 2010 iniziano le prime collaborazioni tra la NASA ed il mondo dell'additive manufacturing, chiamate Contour Crafting, cioè l'impiego di cemento come materiale di stampa, ad esempio nelle costruzioni di grandi dimensioni, tanto è vero che un simile impiego del cemento in stampa 3d è stato reso possibile nel 2019 in Cina per costruire un ponte lungo all'incirca 10 metri.

1.2 Impiego e tecniche

Lo sviluppo di una tecnologia come l'Additive Manufacturing è perciò una frontiera di produzione che permette alle industrie e ai clienti stessi di raggiungere un facile e veloce compromesso per quanto riguarda il rapporto richiesta/soddisfazione del cliente. Infatti, la caratteristica principale che offre questo tipo di lavorazione è la flessibilità, grazie alla quale si possono concepire modelli e parti di qualsiasi tipo e forma, senza dover necessariamente ricorrere a standard e adeguarsi a questi vincoli. La filosofia di produzione in Stampa 3D funziona proprio su questo aspetto: è il mercato che si adatta al cliente e non il cliente che lo fa sul mercato, concetto che ancora regna sovrano per la quasi totalità della produzione annua in tutte le aziende di ogni genere. E' molto rischiosa invece la fase in cui avviene la progettazione software: quando si arriva ad avere una larghissima produzione basata su un modello univoco il pericolo è quello di commettere errori all'interno del modello, come tolleranze, normative, difetti; tali errori portano ad una ingente perdita di denaro che danneggiano seriamente il mercato e rallentano i processi produttivi alla base di partenza, dove d esempio ritirare un lotto non sarebbe un'operazione facile da effettuare per correggere il prodotto. Come punto a favore e anche di "prevenzione" c'è la possibilità di prototipare prima di immettere sul mercato una realizzazione, per poter correggere tramite software le incongruenze che si rilevano durante l'uso del modello reso fisicamente presente. Naturalmente oltre alla flessibilità rispetto al cliente, anche le analisi di mercato forniscono una sostanziale base di partenza nelle scelte di processo, perché si è in costante ricerca di idee oltre alle modernizzazioni dei prodotti già esistenti, dato che è sempre fondamentale immettere sul mercato un prodotto innovativo; dal punto di vista del cliente, se qualcosa è stato realizzato con una tecnologia differente non ha una rilevante importanza, ma ove necessario si possono fondere questi due concetti e portarli a realizzazione. E' perciò possibile osservare tre tecniche principali all'interno di un modo di pensare, di produrre e di soddisfare, che caratterizzano la flessibilità nel mercato (Figura 1 **[6]**).

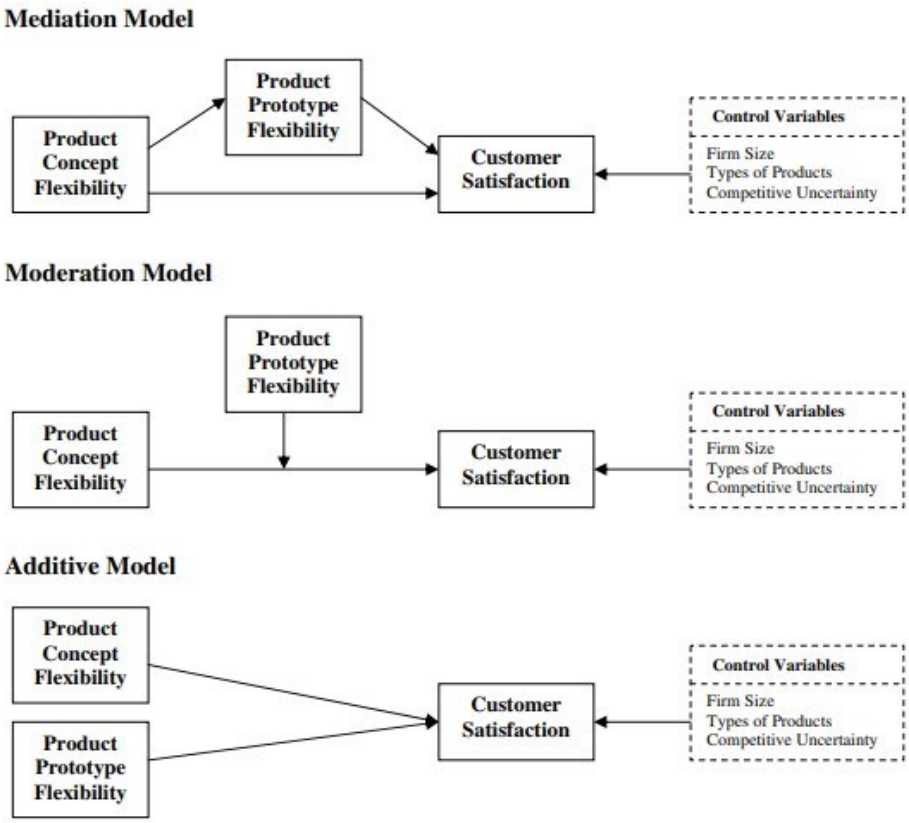

Figura 1 - tre modelli sugli effetti del concetto di prodotto e sulla flessibilità dei prototipi nella soddisfazione del cliente

In figura 1 si riassumono tre modelli che si sviluppano attorno a 3 variabili principali: flessibilità concettuale, flessibilità del prototipo e soddisfazione del cliente.

Il primo modello è di **mediazione**: la flessibilità del progetto ha un effetto sulla soddisfazione del cliente in una maniera non diretta dovuta alla flessibilità del prototipo in se, che dipende in larga parte dalla rapidità con cui si realizza quest'ultimo, ma anche dalla capacità di risoluzione dei problemi dovuti a questa fase e dalle tecnologie evolutive: ecco perché la flessibilità del prototipo gioca un ruolo importante tra il cliente e lo sviluppo del progetto.

Il secondo modello è di **moderazione**: la flessibilità del prototipo ha un'influenza sulla forza del rapporto tra la flessibilità concettuale e la soddisfazione del cliente. Un approccio simile in considera, nel caso in cui sia alta la flessibilità del prototipo , una maggiore disponibilità delle aziende al voler testare numerosi prodotti e vari, potendo comunicare e condividere idee con i clienti stessi, punto di forza del modello appena descritto, basato sul feedback in termini di esigenze dei clienti e quindi con la giusta interazione anche con la flessibilità concettuale.

Il terzo modello in questione è invece un modello **additivo**: si considera la flessibilità progettuale come un parametro di successo, ossia, se alto, le aziende hanno occasione di allargare i propri successi grazie al fatto che si possono sviluppare in termini di prototipazione, così da poter testare tutte le idee disponibili sui prodotti. Questo modello ha quindi due prospettive, la prima investe sull'anticipazione del cambiamento clientela e quindi si concentra sulla flessibilità del prodotto, mentre la seconda si basa sul feedback del cliente, reagendo conseguentemente nell'uso dei prototipi. **[6]**

La filosofia di mercato viene di conseguenza combinata ai tempi di produzione, un altro fattore determinante nella vendita di un prodotto realizzato per additive manufacturing: un beneficio significativo è quello della riduzione in uso di macchinari impiegati, ciò comporta una produzione più continua data dalla minore necessità di eseguire manutenzioni mirate su diverse categorie di attrezzature industriali, ma non per quanto riguarda i costi di produzione in sé, infatti nonostante sia possibile ottenere una operatività maggiore delle macchine in stampa tridimensionale, i costi totali di produzione non sono competitivi rispetto a quelli sostenuti impiegando tecniche di produzione tradizionale; infatti un altro beneficio nell'implementare l'uso dell'Additive Manufacturing dipende dalla non necessità di un lotto minimo da produrre per entrare nel mercato, ma come già spiegato in precedenza è sufficiente produrre sulla richiesta del cliente aumentando al massimo la probabilità di risparmiare in questa scelta, senza il bisogno di raggiungere un volume minimo di lotti per avviare una strategia commerciale. Nelle produzioni di piccoli volumi si ha di conseguenza un notevole risparmio ed un costo nettamente inferiore, eliminando il rischio di accumulare grandi quantità o piccole, comunque significative, di merce invenduta, mentre proseguendo con l'aumento del volume di produzione si può notare una sconvenienza economica crescente rispetto ad esempio alla tradizionale forgiatura, come analizzato nella Figura 2.

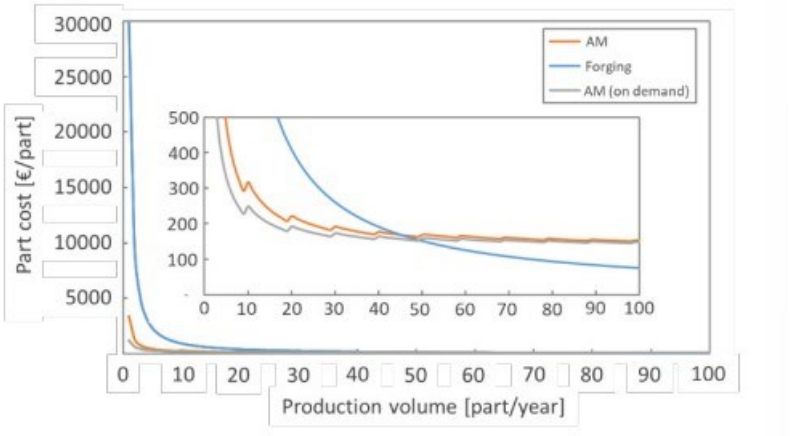

Figura 2 – Variazione dei costi manifatturieri [euro / parti] in funzione dei volumi produttivi [parti / anno] **[7]**

Come anticipato in precedenza, è possibile fare uso di diverse tecniche nel mondo della stampa tridimensionale, a seconda dei materiali da impiegare e dal principio di funzionamento delle macchine in uso. Non solo, anche a seconda della destinazione di mercato è necessario suddividere le categorie di prodotto oltre alla considerazione della qualità richiesta per quanto riguarda il punto di vista del cliente. Dal punto di vista della realizzazione in se, invece, si suddividono le categorie di produzione in base alla forma del materiale che si usa, o meglio, in base allo stato fisico in cui si trova. Quest'ultimo può essere in polvere, cioè polvere metallica nel caso di stampanti per metalli, liquido, o solido come ad esempio un filamento che costituisce la bobina di stampa, che verrà fuso per essere portato allo stato semi-solido. E' necessario inoltre considerare queste proprietà nella scelta di tutti i tipi di materiali, che possono essere invece di varia natura: i materiali metallici, i materiali termoplastici, ceramici. Si possono prendere in considerazione le differenze sulla base delle proprietà tra i materiali polimerici e quelli metallici: i primi garantiscono flessibilità e morbidezza mentre i secondi hanno elevate proprietà meccaniche di durezza e resistenza a temperature altissime, che con un materiale polimerico non è possibile raggiungere.

Interessante è esaminare il caso delle applicazioni in campo biomedico, ad esempio, relativamente a protesi dentarie nello specifico, i materiali metallici come il Titanio o compositi in Cromo-Cobalto si utilizza un tipo di stampa chiamata EBM, perché riesce a garantire benefici nelle alte proprietà meccaniche, biocompatibilità e conducibilità termica o magnetica. Naturalmente non è soltanto il campo biomedico a prendere in considerazione queste valutazioni, ma tutti quei settori in cui si hanno simili esigenze meccaniche, primo fra tutti quello delle componentistiche funzionali di dispositivi e macchine.

Un altro campo di applicazione dove l'additive manufacturing sta prendendo piede è quello della produzione delle parti di ricambio. Tradizionalmente si ha una filiera molto lunga prima della messa in produzione e della replicabilità delle parti di ricambio, che allungano il ciclo di trasporto di questo prodotto fino al cliente, non garantendo così una spedizione e un arrivo dei pezzi al cliente del tutto conveniente. Con l'utilizzo della stampa 3D invece si possono avere delle realizzazioni molto più veloci che possano facilitare il ciclo del mercato, senza creare inconvenienti dovuti l tempo con modelli perfettamente compatibili per quanto riguarda l'intercambiabilità dei pezzi. Un a caratteristica di questa applicazione risiede però nella mista componentistica tra metalli e plastiche: ogni pezzo di ricambio potrebbe essere reso tale grazie all'unione di due materiali, in tal caso è necessario separare inizialmente la produzione dei due o più elementi per essere poi uniti nella parte finale destinata alla vendita. Anche in questo caso però il ricorrente inconveniente è dovuto non ai tempi logistici che invece potrebbero essere migliori delle tradizionali tecniche, ma al tempo di realizzazione durante la stampa.

Una volta progettata la parte l'unica mole grande di tempo coinvolta in questo processo riguarda la realizzazione in sé nella messa a "dimora" del progetto tramite il macchinario destinato. Di seguito si riportano le principali tecnologie di utilizzo dell'A.M.

1.2.1 SLA

La Stereolitiografia presenta simile principio di realizzazione rispetto alla SLS ed alla SLM, ma anche notevoli differenze. La prima risiede nella consistenza e tipologia del materiale impiegato, ossia la resina liquida. Quest'ultima è termoindurente e fotosensibile, perciò il fascio laser non va a fondere una polvere, ma interviene su un liquido che all'assorbimento di questa radiazione, solidifica. Il procedimento inizia in una vasca contenente la resina liquida, successivamente il fascio laser in maniera selettiva inizia a trasformare il liquido in maniera stratificata tramite ad esempio la luce UV, così da dare inizio alla polimerizzazione della resina. Lo strato creato in generale ha uno spessore di 10-50 μm. I materiali non sono necessariamente resine pure, ma alcuni contengono addirittura parti ceramiche, prendendo il nome di resine "caricate".

Alcune tecnologie all'interno dell'SLA fanno uso di luci diverse dai laser, come ad esempio i LED. In questo modo la tecnica prende il nome di MSLA, che non produce strati in maniera continua, ma lo fa istantaneamente: lo strato viene creato per intero nello stesso istante, con la forma conferita da uno schermo LCD che isola i pixel non necessari alla realizzazione dello strato, per cui la risoluzione della stampa dipende esclusivamente dallo schermo LCD impiegato nell'MSLA. Anche le stampanti DLP ossia Digital Light Processing hanno lo stesso principio di funzionamento, quello che, con un solo lampo di luce stratificano il materiale a differenza del laser che invece ha un punto di inizio dello strato e un punto di fine, che quindi segue un percorso chiuso. Si hanno particolari benefici in campo biomedico, infatti nella creazione delle protesi dentarie questa metodologia di produzione riesce a soddisfare le esigenze in termini di praticità e perfetta adattabilità per ogni caso del paziente. Un altro campo medico in cui l'SLA trova perfetta applicazione è quello delle protesi ossee, per riprodurre al meglio grazie alle resine la qualità superficiale e le caratteristiche meccaniche dell'ossatura che ha subito rottura o fratturazione.

1.2.2 Liquid Deposition Modelling

Il modello LDM è una tecnica di estrusione messa a punto dalla WASP, un'azienda italiana che ha un ruolo attivo nella progettazione dell'additive manufacturing, tanto da proporre questa tecnologia in grado di controllare ed interrompere il flusso di estrusione in maniera continua. L'estrusore è formato da un ago che dimensiona, in uscita, il materiale. Naturalmente, quest'ultimo ha un ruolo importante per quanto riguarda il dimensionamento dell'estrusore, dato che il materiale dovrà avere al massimo una dimensione di un paio di volte circa minore rispetto al diametro d'uscita dell'ago. **[8]** La camera d'estrusione ha un funzionamento ad aria compressa, con una pressione costante e regolata da un riduttore di pressione appositamente. Per quanto riguarda invece il materiale, non si hanno particolari limiti di utilizzo dato che è possibile toccare campi come quello della ceramica e della porcellana, dei metalli, della plastica, e di tutti quei materiali che possono essere trattati con fluidità e quindi passare attraverso un ago grazie alla compressione pregressa. Si possono produrre pezzi di medie dimensioni, ma si consiglia di non andare oltre i 40 cm, per avere una buona qualità.

1.2.3 Material extrusion

La Material extrusion è un macrosettore dell'additive manifacturing che utilizza come materiale dei filamenti di stampa, solitamente avvolti in bobine, che successivamente subiscono una fusione grazie al riscaldamento prima di attraversare l'ugello di stampa. Questa tecnologia nasce negli anni '90 del '900 grazie agli sviluppi della Stratasys Inc., negli Stati Uniti. Brevemente, il processo consiste nell'attivazione di un motore di richiamo che permette lo scorrimento del filamento, successivamente riscaldato da un riscaldatore posto in maniera immediatamente precedente all'ugello, quest'ultimo con il compito di depositare il filamento ormai fuso sul piatto di stampa. I motori e quindi gli ugelli, ed il piatto, sono in grado di muoversi per andare a creare la geometria inserita, stratificando quindi il pezzo da realizzare (figura 3).

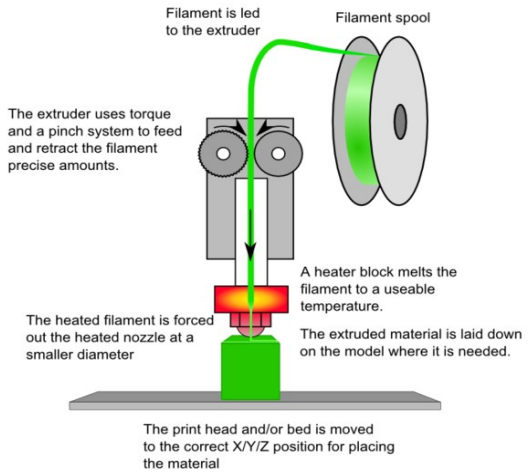

*Figura 3 – Schema grafico di rappresentazione sulla stampa FDM **[8a]***

Una delle tecniche di material extrusion è la stampa FDM. Quest'ultima si compone di più fasi consecutive o contemporanee destinate alla creazione del pezzo progettato, il tutto a partire dall'idea del progetto. La prima fase è quella di progettazione, ossia la trasformazione dell'idea in linguaggio digitale, appunto, tramite un software CAD. In questo momento si studiano tutte le caratteristiche possibili da considerare nella creazione digitale, il design, la funzionalità, le norme e le qualità del pezzo destinato ad essere stampato.

Ci sono numerosissimi programmi in grado di accogliere un disegno CAD, come ad esempio Rhinoceros, AutoCAD, Solid Edge, e tutti quei programmi che offrono completa libertà e supporto durante la prototipazione di parti. Il formato del file digitale solitamente è un STL, cioè un formato di file che descrive la superfice geometrica di un oggetto **[8]** che si ottiene dopo la creazione a livello CAD del prototipo da stampare. Il formato ha un principio di funzionamento dovuto allo sfruttamento di triangoli che si estendono nelle 3 direzioni degli assi principali ortogonali X-Y-Z nello spazio, che si ripetono grazie ad un vettore per dare un'orientazione all'oggetto da stampare. I vantaggi che si hanno nell'uso di un file STL risiedono nella semplicità di processazione, soprattutto in quella di generazione delle superfici. Si ha bisogno però di strumenti informatici appositi per poter leggere un formato così specifico come quello in questione, con lo svantaggio che potrebbe verificarsi un'eccessiva approssimazione sulla struttura dei dati nel caso dei triangoli con vertici che si sovrappongono.

Anche il formato dei file CAD è opera di Chuck Hall, che nel 1987 fondò la 3D Systems, con l'unico aggiornamento verificatosi nel 2009 dopo ben 22 anni.

Durante la progettazione digitale del cosiddetto file di stampa, è necessario prestare particolare attenzione all'insieme di tolleranze coinvolte nella prototipazione, dato che sono responsabili della geometria finale, colonna portante della funzionalità e della precisione. Infatti, una conseguenza non desiderata ma inevitabile è lo scostamento delle dimensioni del pezzo di progetto da quelle reali a produzione finita, che deve rientrare nelle tolleranze ammissibili prestabilite, per non compromettere nessun tipo di funzionalità a cui la parte potrebbe essere soggetta. Le tolleranze sono influenzate da una serie di cause, la principale è il ritiro del materiale impiegato, dovuto alla variazione di temperatura nel passaggio di stato liquido-solido, oltre a quello precedente solido-liquido; ogni materiale possiede un coefficiente di ritiro, fattore di rischio specialmente nelle stampe composite tra più materiali, una situazione che potrebbe creare una vera e proprio fuoriuscita delle dimensioni dalle tolleranze richieste. Altra conseguenza dovuta alle temperature è il diverso grado di raffreddamento, problematica legata alla geometria del pezzo ed all'ubicazione dello strato, portando a probabili ondulazioni e modifiche della struttura non desiderate specialmente in situazioni in cui si hanno porzioni di materiale che si estendono in certe direzioni per una misura più estesa rispetto alle altre (superfici piatte e sottili, barre sottili e molto lunghe ad esempio).

Un'altra causa delle imprecisioni di stampa è la questione delle dimensioni di lavorazione, parametri dipendenti unicamente dal diametro dell'ugello, che è l'ultima componente attraverso la quale il materiale fluisce prima di depositarsi sul piatto di stampa o sullo strato precedente, determinandone lo spessore dello strato. In questo momento è la risoluzione a risentirne, dato che più grande è lo stampato e più aumenta la risoluzione a pari dimensioni di estrusione, mentre per i pezzi molto piccoli la risoluzione va a risentire degli effetti del diametro di stampa; dettagli e curvature sono le prime caratteristiche soggette a questo tipo di variazione. Per ovviare a questo problema è possibile sostituire gli ugelli per le diverse stampe, nel momento in cui si ha bisogno di massima precisione e buona risoluzione si inseriscono nella stampante degli ugelli con diametro molto piccolo, nell'ordine dei decimi di millimetro, altrimenti per i pezzi che non hanno richieste particolari di risoluzione si possono usare ugelli con diametri maggiori che permettono alla stampa di completarsi molto più velocemente. Il tempo di stampa è una caratteristica da non sottovalutare, specialmente nelle parti di grandi dimensioni: se si combinano alte richieste di precisione in parti molto voluminose si rischia di avere un effetto controproducente nel mercato, eccetto nei casi in cui si hanno specifiche richieste (protesi, riparazioni non ottenibili altrimenti) e soprattutto nella qualità del prodotto, dato che con un lungo tempo di stampa alcune porzioni di parte stampata subiscono un raffreddamento non uniforme in tutto il corpo e questo, come trattato in precedenza, può far nascere imprecisioni e piccole deformazioni localizzate che se sommate creano un vero e proprio difetto di stampa, rischiando di rendere inutilizzabile la parte prodotta. Non è soltanto la parte in sé a risentire degli effetti deformativi della stampa, perché è spesso necessario progettare dei veri e propri supporti di stampa nel progetto, da rimuovere a stampa terminata, che sosterranno il pezzo nel caso di geometrie particolarmente complesse e instabili: perciò anche in questo caso si avrebbe una sovrapposizione di effetti deformativi non indifferente.

Per entrare nei dettagli della presentazione di stampa FDM, è necessario far riferimento a tutti i parametri determinanti nella messa in atto di una produzione tramite questa metodologia, che si concentrano principalmente negli istanti di estrusione. Ci sono diverse dimensioni di accessori che possono contribuire a molteplici effetti.

Una quantità che viene considerata in maniera primaria durante la produzione è il diametro di estrusione. Il diametro di estrusione è responsabile della larghezza di filamento nell'istante di uscita, cioè la sezione di uscita del materiale che si deposita sul piatto di stampa. Solitamente il range di valori , nell'ordine dei decimi di mm / oppure mm ,non si considera in maniera esatta per quanto riguarda la sezione d'uscita, dato che il diametro d'ugello non va a determinare necessariamente lo spessore del layer, ossia dello strato depositato durante la stampa. Quando si considera questa dimensione, ne risente anche la qualità percepita, è infatti possibile avere un range che varia, grazie ai parametri variabili, anche a partire dai 100 micron, fino a non superare generalmente il millimetro.

Nel processo di produzione non è possibile sostituire l'ugello, per cui è necessario utilizzare sempre lo stesso per tutta la durata della creazione, per questioni di temperatura, precisione e praticità, ma in genere è possibile sfruttare altri parametri per regolare comunque un'erogazione non continua, o sostituire l'ugello tra una stampa e l'altra.

Prima di passare tramite l'ugello, il materiale deve essere sicuramente riscaldato tramite una resistenza: il passaggio di stato da plastico a fuso richiede energia, e questo processo avviene prima di passare tramite l'ugello intercambiabile. Dato che tutti i materiali utilizzati nella stampa FDM sono termoplastici, è necessario conoscere il punto di fusione di ogni materiale, ma soprattutto il range entro il quale compiere tale riscaldamento, per non portare a bruciatura il filamento oppure per non richiedere la stratificazione di un materiale ancora non sufficientemente riscaldato, che comporterebbe la rottura o l'esplosione del motore. Solitamente per i materiali plastici questa temperatura oscilla intorno ai 200 °C e oltre.

A monte dell'ugello risiedono invece i motori del filamento, che si occupano di far procedere il materiale nella zona di riscaldamento. E' grazie a questi dispositivi che il materiale fluisce all'interno del circuito di stampa, e soprattutto è grazie ai motori che i parametri secondari come velocità di stampa, quantità volumetrica secondo il tempo, e tutti quei parametri che non dipendono dalla temperatura e dell'ugello, vengono messi in atto grazie alle condizioni di progetto.

La velocità di stampa si aggira intorno ai 40 mm/s fino ad espandersi agli 80 mm/s nei casi più eccezionali, dove però si innescano automaticamente molte più vibrazioni al momento del deposito di stratificazione, comportando probabili danneggiamenti o inceppamenti del filamento termoplastico che da un piccolo difetto di stampa può dare vita ad un problema che costituisce inutilizzo forzato. E' sconsigliato utilizzare velocità di stampa alte, ossia dai 60 mm/s in su, poiché se la parte da realizzare dovesse essere ricca di particolari e di minimi cambi di direzione, la stampa potrebbe addirittura bypassare involontariamente alcune parti da stratificare, chiamato problema di ghosting.

Nel momento della deposizione si pone invece un altro tipo di problema, che non dipende dai parametri di stampa, ma dal materiale e dal tipo di piatto che si ha. Solitamente il piatto di stampa è anch'esso riscaldato da una resistenza, ma a temperature decisamente inferiori rispetto a quelle dell'ugello, la motivazione è che in questa maniera si otterrebbe una stratificazione di fuso su uno strato ancora fuso, mentre invece è necessario avere un raffreddamento seppur questo sia limitato: ecco come è possibile garantire aderenza al piatto dello strato che esce direttamente dall'estrusore.

Quando non si hanno condizioni di aderenza sufficienti, esiste un metodo di impostazione di stampa che porta un miglioramento: l'utilizzo del Raft.

Il Raft è una sorta di sostegno che si comporta come struttura di base, destinato a migliorare l'aderenza del pezzo sulla superficie mobile, che richiede quindi caratteristiche diverse rispetto a quelle della parte da creare, con una qualità superficiale diversa. Purtroppo è una soluzione in grado di aiutare questa prospettiva, con un difetto in termini di tempi: è molto dispendioso realizzarlo, dato che sono necessari tempi maggiori. Ci sono metodi alternativi anche all'utilizzo del Raft, ossia il Brim, che è un'estensione del primo strato di layer che viene realizzato dall'estrusore sul piatto di stampa, da rimuovere successivamente. Per il Raft vale lo stesso.

Altra considerazione da fare durante la stampa degli oggetti in 3D, riguarda il parametro "Infill", cioè il riempimento della parte interna di stampa, una caratteristica determinante, dato che a seconda della sua percentuale di inserimento si hanno variazioni in termini di resistenza, poiché ad esempio, alcuni materiali stampati con Infill al 100% sono considerati pieni, mentre quelli stampati con percentuali minori sono meno densi.

E' possibile scegliere la tipologia di riempimento tramite i programmi delle stampanti, con strutture reticolari molto diverse tra loro: esagonale, quadrata, a diamante sono 3 esempi di strutture. Tutto questo viene reso tendenzialmente non visibile grazie all'inserimento di strati di chiusura intorno allo stampato, di cui si possono scegliere il numero e lo spessore, oppure si può evitare l'inserimento di questi strati lasciando perciò visibile il tipo di riempimento con la relativa struttura reticolare.

La scelta dei materiali di stampa dipende da tutte le esigenze del cliente, ossia dalla destinazione d'uso delle parti prodotte, considerando che in genere le stampanti che sfruttano la tecnica FDM utilizzano materiali termoplastici come PLA, ABS, TPU e tutti quei filamenti che possono essere facilmente fusi e velocemente solidificati per facilitare la stratificazione dei provini in stampa: è necessario perciò anche valutare la velocità di spostamento delle testine di stampa in modo tale da non avere un miscelamento dei filamenti, nel caso si abbia una doppia testina di due materiali diversi, oppure una creazione di scarti indesiderati che si possono depositare sulla superficie del provino determinandone caratteristiche meccaniche diverse, se non peggiori di quelle che si otterrebbero regolando scrupolosamente questo parametro.

1.2.4 Material Jetting

Una prototipazione creata grazie ad un getto di resina fotopolimerica liquida è la tecnologia PolyJet, una fotopolimerizzazione a getti che sfrutta un sistema di iniezione simile a quello dell'inchiostro per la stampa, dato che sono anche mobili e quindi possono spostarsi con facilità. Si garantisce un risparmio notevole di materiale a causa della quantità di scarto pari a zero. Il procedimento consiste nella emissione di una luce UV dalla testina di stampa, polimerizzando così lo strato di resina nei momenti successivi alla fuoriuscita di quest'ultimo. Il raggio UV riesce anche a controllare l'andamento della stampa e quindi gestire test, seppur limitati alla loro durata per la resistenza delle testine. Si possono quindi creare prototipi con molti materiali, che sono sicuramente sovrastampabili ammesso che i materiali accoppiabili siano compatibili chimicamente potendo garantire quindi la compattezza del prodotto. E' un processo particolarmente pulito rispetto ai processi convenzionali, soprattutto nel campo dell'utilizzo di fotopolimeri laser.

1.2.5 SLS

La tecnologia di stampa SLS (Sinterizzazione Laser Selettiva è pressochè identica alla SLM, la cui differenza consiste nell'impiego di materiali non metallici rispetto a quest'ultima. La metodologia è la stessa, conferendo energia al letto di polvere da convertire in liquido tramite sinterizzazione, che raffreddandosi diventa solido. Un vantaggio che si ha adottando questa soluzione è la possibilità di ottenere materiali ad alta densità, ma siccome i materiali sono tendenzialmente a bassa conduzione termica, non hanno la capacità di diffondere energia termica nell'immediata prossimità, infatti, la qualità superficiale risulta più alta e non si hanno particolari necessità di lavorare il prodotto superficialmente dopo la produzione tramite SLS. Nei tempi immediatamente successivi alla stampa, è necessario lasciar raffreddare il realizzato, per poi essere estratto. I materiali d'uso più comuni nella SLS sono solitamente i polimeri plastici, come ad esempio: Poliammide PA 12, un nylon speciale che garantisce una buona resilienza e resistenza ai prodotti chimici in particolare, senza correre il rischio della fessurazione; un altro materiale è il PEEK, ad alte prestazioni, un termoplastico capace di sostituire i metallo resistendo alle temperature fino a 260° e resistente alle radiazioni gamma ed X, adatto quindi ad applicazioni aeronautiche o petrolchimiche, senza escludere il settore delle corse, o il settore medico; il polipropilene è un altro dei materiali impiegati nell'SLS, la cui sigla è "PE", con una elevata resistenza e una temperatura di fusione di circa 430°, utile alla resistenza di abrasione e possiede un alto carico di rottura.

Solitamente i carichi di rottura dei Nylon prodotti tramite SLS si trovano in un intervallo di 40 – 50 Mpa, mentre i moduli elastici vanno dai 1600 ai 2800 Mpa. La maniera più comune di sfruttare questa tecnologia consiste nell'impiego di polvere monocomponente, ma sono nate nuove tecnologie in grado di garantire l'utilizzo di polvere bicomponente come ad esempio quelle rivestite, o più semplicemente le miscele di più polveri di stampa. Il range di spessori delle polverì è dai 10 ai 200 μm.

1.2.6 SLM

L'SLM (Selective Laser Melting) appartiene ad un metodo di produzione chiamato "a letto di polvere", in cui la fusione del materiale avviene grazie ad una fonte di energia termica, in grado di fondere localmente una parte di polvere che diventa istantaneamente liquida con un fascio laser. E' una tecnica principalmente coinvolta nel momento in cui si abbia la necessità di produrre parti metalliche, ad esempio le leghe di acciaio come l'AISI316L, l'AISI 304, un acciaio maraging, oppure parti in Alluminio, Nickel, Titanio. Il prodotto si crea quindi stratificandosi grazie al laser, che contemporaneamente si sposta e lascia raffreddare la zona appena fusa, permettendo al pezzo in questione di solidificarsi. Di conseguenza, un rullo riporta sulla superficie appena creata uno strato di polvere, che ciclicamente viene fuso e quindi solidificandosi crea lo strato successivo. Si può notare infatti come il prodotto rimanga immerso nella sua polvere durante la produzione, come se fosse stato inserito all'interno di essa, a seguire rimossa per completare il processo. Grazie alla fusione localizzata, combinata alla stratificazione, si ha una garanzia di flessibilità, poiché si possono sfruttare i parametri in maniera più elastica a partire dal tipo di polvere e dall'intensità dell'energia laser, la scansione e la velocità, o semplicemente la maniera di affrontare la geometria del pezzo che non ha un grande impatto sulla facilità di realizzazione soprattutto per quanto riguarda le strutture cave. Il vantaggio principale è anche qui dovuto al risparmio di materiale che si può ottenere rispetto alle tecniche tradizionali, permettendo così un'applicazione dei prodotti in campi dove è richiesta qualità abbinata a masse ridotte: l'esempio principale è l'ambiente del motorsport. Chiaramente il processo necessita di un'atmosfera controllata, con una percentuale di ossigeno bassa per garantire la non-ossidazione dei metalli, che potrebbe influenzare negativamente le proprietà meccaniche (si modifica la tensione superficiale dovuta a piccole ossidazioni) e chimiche del realizzato. Per fare fronte a questo problema si mette in pressione l'area di produzione inserendo un gas inerte, nella maggior parte dei casi è Argon oppure Azoto **[5], [9].** Un'altra variabile che potrebbe modificare la struttura del pezzo è dovuta alla fusione localizzata di polveri che si trovano intorno alla zona fusa principale, formando delle imperfezioni da rimuovere a seguire, infatti le parti prodotte richiedono successive lavorazioni poiché la qualità superficiale risente della stratificazione.

E’ noto quindi che ogni variazione non di progetto che si verifica nell’intervallo di tempo di produzione potrebbe portare ad errori di stampa e all’ottenimento di una parte non conforme alle normative o semplicemente alle aspettative di chi sostiene la produzione. I costi non vanno di pari passo con i vantaggi, dato che al giorno d’oggi sono ancora molto elevati, ma soprattutto si ha uno svantaggio in termini di gas e di pericolosità di impiego delle polveri, altamente esplosive.

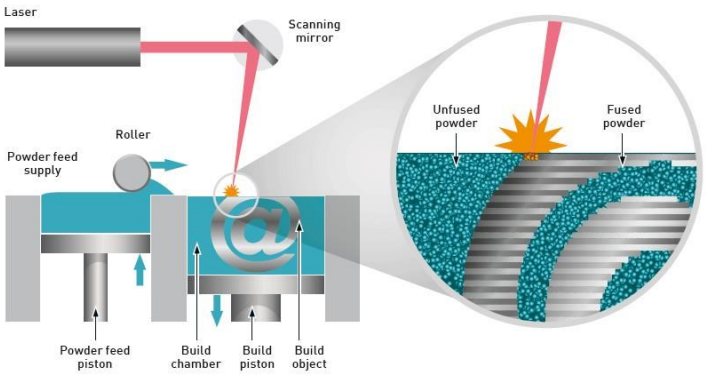

Figura 4 – Rappresentazione grafica del processo SLM **[9a]**

1.2.7 Laser cladding

Il Laser cladding è una lavorazione che si occupa di aggiungere materiale ad un prodotto, una parte, un pezzo, già esistente. E’ una maniera alternativa di fornire riparazioni su materiali di differenti nature, che probabilmente richiedono anche lavorazioni successive per raffinare ciò che si è realizzato in questo processo, che ha inizio nel momento in cui si fornisce energia ad una sorgente di elettroni (laser), capace di aumentare la temperatura locale del materiale creando una sorta di bagno fuso di filo o polvere. Grazie a questa procedura si hanno i cordoni di saldatura che possono creare il lavoro di rimodellazione o lavorazione desiderata. Anche in questo caso si fa uso di gas inerte per evitare l’ossidazione del materiale, ma la particolarità del processo in questione è quella che permette alla produzione di passare da un materiale all’altro in maniera rapida, potendo produrre grandi volumi in maniera più veloce.

1.2.8 DED

Come la maggior parte delle tecniche di produzione in 3D anche nella DED, ossia deposizione ad energia diretta, si parte dalla creazione di un modello tramite software CAD che viene tradotto in seguito dal programma della stampante. Successivamente, la stampante taglia il pezzo in una quantità finita di strati, ognuno da realizzare in maniera indipendente su quello precedente depositando il materiale sottoforma filamentosa. Una fonte di calore potente come un laser o un fascio di elettroni poi, si occupa di fondere il depositato, che solidificandosi da origine allo strato **[figura 5]**; il processo si realizza sottovuoto per non far interferire gli elettroni con le molecole d'aria.

Solitamente i protagonisti della DED sono i metalli, ceramiche e polimeri, a patto che i metalli siano saldabili visto che il processo può essere inteso come una forma alternativa di saldatura su parti, ad esempio, da riparare o ricostruire parzialmente. Si usano leghe di titanio, tungsteno, alluminio e anche acciai inossidabili, con un diametro di filamento che va da 1 a 3 mm. Secondo la normativa ASTM International: "la DED ha la capacità di produrre pezzi relativamente grandi (volume di stampa > 1000 mm^3), grazie ad una lavorazione primaria e secondaria".

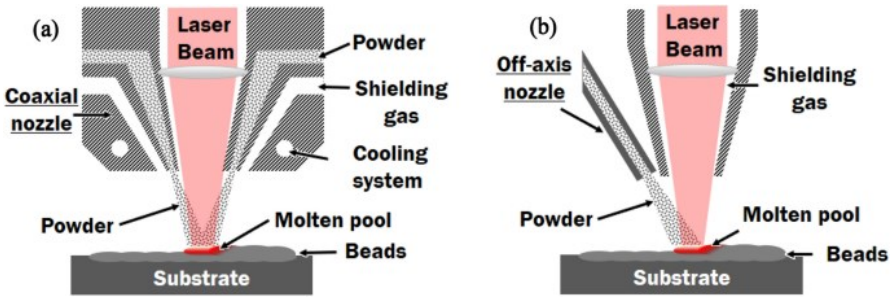

Figura 5 – Illustrazione grafica del funzionamento DED ***[10]***

1.3 Applicazioni in campo biomedico

1.3.1 Approccio dedicato

La stampa 3D non è soltanto una tecnologia che permette all'uomo di investire sul risparmio del materiale e sulla prototipazione con fine industriale, si ha un uso della stampa 3D particolarmente interessante, che coinvolge proprio il campo della medicina. L'additive manufacturing può infatti fornire soluzioni a problemi complessi per quanto riguarda la salute dell'essere umano, nonostante sia un concetto "insolito", dato che viene concepito come un modello di produzione destinato alle vendite, al progresso tecnologico.

Questo tipo di stampa viene in aiuto della salute, ad esempio tramite la creazione di vere e proprie porzioni di riparazione di tessuti umani, di protesi, di supporti e tutto quello che può essere adattato alle cure di una persona. Solitamente la necessità di strutture destinate al corpo umano nasce a causa della rottura delle articolazioni o delle ossa che non possono guarire in maniera autonoma o nei casi più gravi nel momento in cui è necessario inserire una protesi realizzata a dovere per sostituire un arto nella sua complessità.

L'additive manufacturing fornisce un contributo importantissimo in questo, dato che l'anatomia umana è complessa e ricca di curve funzionali o meno, con superfici destinate a ricoprire importanti ruoli o anche più semplicemente per garantire una funzione estetica di alta qualità, abbassando la percezione di indossare una protesi artificiale. Un esempio di applicazione che richiede alta qualità di progettazione è rappresentato dal campo dell'ortodonzia: in questo la durabilità e la funzione estetica correlata all'adattabilità sono i parametri principali di cui si deve tenere conto nel processo, poiché il materiale è necessariamente biocompatibile e la precisione nella ricostruzione impiantistica deve garantire una perfetta sostituzione di ciò che naturalmente alloggia in una parte così determinante del corpo umano. Ogni parte che costituisce un ruolo di supporto possiede delle caratteristiche di resistenza per ogni persona, dato che non tutti i corpi sono biologicamente uguali, nonostante ci si possa avvalere dei valori medi riconosciuti come riferimento principale. I realizzati dovranno quindi soddisfare le specifiche per ogni scopo, processo realizzabile tramite la creazione di provini con stessa tecnica sottoposti a prove meccaniche di resistenza. Infatti, è possibile dare vita a modelli standard adattabili ad ogni corpo umano, con il vantaggio dell'applicabilità grazie alla modifica di pochi parametri, ottenuti tramite una scansione professionale che acquisisce immagini tridimensionali riportandole in un file in formato STL con buone geometrie e accettabili qualità superficiali.

Ci sono, nell'esecuzione, probabili problematiche legate essenzialmente all'acquisizione: è molto più probabile che l'acquisizione sia distorta a causa della scarsa risoluzione degli scanner che si utilizzano, infatti, si possono avere problematiche legate alla deformazione delle superfici mentre si attraversa questa fase.

Prendendo in esempio il caso di un osso umano, il procedimento è più complesso se si osserva che quest'ultimo è costituito principalmente da due strati diversi di materiale, quello esterno e quello interno, ecco dove nasce la necessità di creare due strutture a guscio di diverse caratteristiche, ma che insieme possono ricreare perfettamente quella naturale di un osso in buona salute.

Un modulo che ricorre spesso nella trattazione di parti che richiedono una certa elasticità è ad esempio quello di Young, ossia il modulo di elasticità che esprime il rapporto tra tensione e deformazione di un materiale in determinate condizioni di tensioni in cui si trova, ossia trazione compressione e taglio. Questo dipende da come la stampa FDM viene impostata per la riproduzione del file contenente il modello da riprodurre, infatti, variando i parametri funzionali di riempimento si possono ottenere svariati moduli di Young per le diverse categorie di impostazioni.

Non soltanto si realizzano tramite la stampa 3D parti rigide o con funzioni strutturali, ma è possibile grazie all'innovazione dei materiali più soffici, creare veri e propri organi o parti di essi da installare direttamente all'interno del corpo umano. Per cui un'altra applicazione biocompatibile è proprio quella della chirurgia non ortopedica, che non si intende nel campo dell'ortodonzia, ma nella chirurgia cardiovascolare: i modelli anatomici delle sezioni da riprodurre si ottengono tramite l'angiografia tomografica, o una risonanza magnetica, permettendo così di avere un modello esatto di quello di partenza.

Sono stati condotti studi con lo scopo di ricreare le anatomie di pazienti reali, specifiche, dove in questo caso il punto non è soltanto quello di correre ai ripari di una sezione difettosa di organi, ma anche proprio generare una anatomia funzionale tale da poter annullare il rischio di malfunzionamenti successivi (un malfunzionamento ha l'equivalenza del fenomeno dell'infarto).

Uno in particolare si occupa dell'osservazione e della capacità raffigurativa effettiva delle immagini tomografiche dell'arteria carotide interna, che consentono la trasformazione delle immagini in un file 3D grazie al software Google SketchUp, un programma gratuito che consente di salvare le immagini create in formato stereolitiografico. Questo processo facilita l'osservazione delle proprietà geometriche arteriose, le curve e tutti quegli angoli che caratterizzano il funzionamento di un elemento così importante costituito da elementi tubolari come un vaso sanguigno.

1.3.2 Chirurgia cardiovascolare

Come accennato in precedenza, questo studio richiede un altissimo grado di precisione, poiché sono proprio le disfunzioni anatomiche del cuore a causare i fattori di rischio di arresti cardiaci o infarti, con la componente di rischio ereditaria che non è da sottovalutare. Per condurre questo tipo di studio sono state dissezionate le strutture superficiali della carotide, a partire dalla guaina carotidea, un rivestimento tubolare fatto di tessuto connettivo che si posiziona tra la base del cranio e il limite inferiore del collo. E' stato necessario quindi un intervento di estrazione reale del tessuto in questione, per esaminare la configurazione geometrica a forma di "O" di tale fascia carotidea **[11]**.

La particolarità superficiale consiste prettamente nei cambi di direzione repentini sulle angolature di questa fascia, che vengono chiamati "tortuosità", misuratasi in gradi, responsabile quindi di angolature che vanno dai 15° ai 60°, oppure da un altro parametro chiamato attorcigliamento, con invece angolature molto più grandi, che vanno dai 90° ai 145°. La stratificazione di 64 strati ha permesso di osservare anche l'avvolgimento della fascia, per prototipare al meglio l'accidentalità della curva tramite la stampante 3D, di uno spessore di 2 mm ottenuta tramite una stampante MakerBot.

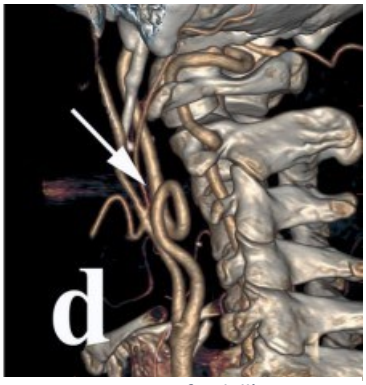

Figura 6 - Tomografia dell'arteria

Figura 7 - Ricostruzione 3D dell'arteria

La ricostruzione proposta ha come funzionalità principale quella del fornire un'interazione diretta tra il modello e la problematica principale, grazie alla visualizzazione su più piani, permettendo una migliore previsione dei fattori di rischio e soprattutto la conoscenza dell'anatomia specifica in maniera preventiva, senza aver ancora applicato la tecnica chirurgica direttamente sul paziente. Infatti, tale prospettiva necessita di garanzie per quanto riguarda l'accuratezza della creazione, a livello tattile e superficiale, oltre che all'individualità della terapia, poiché è possibile realizzare un modello perfettamente identico e conforme a quello di riferimento del paziente trattato.

La simulazione va quindi oltre rispetto a modelli generici e standardizzati, si studiano le relazioni spaziali tra le superfici, con l'aiuto dei chirurghi che hanno possibilità di riflessione e osservazione insolite, dato che una risorsa di questo genere riporta in maniera materiale il caso del paziente ancora prima di essere operato. I vantaggi principali sono specialmente la riduzione del tempo di esposizione della ferita all'atmosfera e quindi meno agenti batterici e un'operazione più veloce, soprattutto la prevenzione delle perdite di sangue dato che si conosce l'andamento dei vasi sanguigni.

A fronte di questo è possibile quindi scegliere il migliore strumento endovascolare per permettere la riuscita dell'intervento e la trattazione più adeguata alle esigenze che si prospettano con la tipologia di paziente che si ha. Quindi, in generale, è una tecnologia emergente che si aggiunge ai curriculum dei neochirurghi, una pratica mai vista prima in grado di arricchire le conoscenze di tutti che mira a garantire cure sempre più efficaci. **[12]**

Alcuni paesi europei stanno adottando la stessa tecnica descritta in precedenza per innalzare il livello di capacità e competenza del sistema sanitario, ad esempio, in Spagna. Precedentemente l'esercitazione sui modelli simil-reali non era una tecnica a noi sconosciuta, infatti, si disponeva e si continua a disporre di elementi come arti di suini o di polli per poter prendere confidenza con tecniche chirurgiche, ma è necessario avanzare questa tecnologia allargando l'utilizzo a materiali moderni come ad esempio degli stampati tridimensionali. Solitamente si effettua questo tipo di processo nel momento in cui la parte da trattare ha subito una lesione, da trattare chirurgicamente, o comunque un fenomeno di chirurgia dermatologica superficiale di non grave entità, con lo scopo di fornire una preparazione aggiuntiva preventiva alla formazione dei medici generici. Il sistema sanitario spagnolo aveva bisogno di uno sviluppo per l'aumento della sua efficienza, dato che si ha una scarsità di professionisti provvisti di qualifiche sufficienti a risolvere questa tipologia di problemi.

Nell'insegnamento della chirurgia minore (e quindi in questo caso si tratta quella dermatologica) si affrontano tutte le fasi di un intervento, dal momento dell'anestesia a finire, quindi, con le suture finali.

L'esigenza di modernizzare la preparazione sui modelli già esistenti nasce nel momento in cui le lesioni tipiche più diffuse non sono rappresentate sufficientemente bene, perciò le suture non potevano rendersi simili con alta qualità. Una stampante FDM con doppio filamento, soprattutto flessibile, dovrebbe essere quindi in grado di realizzare questi modelli, per essere utilizzati migliorando la percezione del modello in questione.

Si inizia prendendo in esame il caso che si vuole analizzare, come ad esempio il tipo di lesione o ferita d'interesse nel paziente, per poi fotografarlo in tutte le angolazioni necessarie a completare l'analisi. Anche le dimensioni del modello non sono da trascurare, perché la stampa deve essere agevolata date le difficili condizioni di riproduzione delle geometrie del corpo umano. Solitamente si usa per ragioni di similitudine un materiale quanto più simile all'epidermide umana, e due di questi sono il TPE oppure il TPU, cioè due filamenti di elastomero termoplastici stampabili tramite la tecnica FDM. Terminata la sezione multipla dei modelli reali acquisiti per poi essere stampati, i modelli prodotti tramite la stampante sono valutati tramite una giuria di esperti chirurghi che valutano i chirurghi generici appartenenti al Servizio Sanitario Andaluso da più di 15 anni. I modelli vengono "operati" dai chirurghi della giuria, che conferiscono pareri per quanto riguarda l'anestesia, l'estetica e soprattutto la capacità di rimozione della lesione su questa superficie, che viene infine richiusa a regola d'arte.

Si ottengono perciò diversi punteggi e pareri per quanto riguarda i cinque principi fondamentali di valutazione per queste tecniche.

Partendo dal livello di ricreazione estetico su una scala da 1 a 10, il punteggio dato dalla giuria è stato di circa 4,6 su 10, poiché la ricreazione degli interventi di chirurgia minore è stata molto buona, ma la riproduzione non è del tutto semplice, seppure promettente nel campo della preparazione preventiva.

L'anestesia è un altro punto fondamentale del giudizio del modello, dato che è il primo passo per iniziare una nuova rimozione del nevo, ad esempio, che si trova sulla reale epidermide. In questo caso la capacità di anestetizzare il modello è stata valutata con un 4,8, dato che la sensazione è piuttosto realistica, con molti pareri sulla strada del miglioramento, come ad esempio l'aggiunta di superfici ossee nel caso di arti e superfici tubolari microscopiche per riprodurre i vasi sanguigni. La lesione deve essere però anche rimossa, per cui questa fase si presenta critica, molto delicata, dato che è il fulcro dell'intervento. Purtroppo, questo aspetto, ha avuto una valutazione di circa 2,8 punti, perché la sensazione al tatto non corrisponde bene a quella reale, dato che il materiale utilizzato seppur studiato appositamente per questo risulta più duro della superficie della pelle umana.

Questa anomalia comporta anche un rischio particolare per il chirurgo stesso, ossia la risposta del materiale potrebbe permettere al chirurgo di tagliarsi con il bisturi, con il consiglio della giuria di sviluppare simili tecnologie con un materiale differente: il silicone.

La chiusura della ferita chirurgica ha invece ricevuto un punteggio ancora più basso, di quasi la metà della fase precedente, questo perché in caso di cheratosi seborroica non è la sutura a chiudere una ferita, ma un bisturi elettrico che opera in una maniera diversa. In ogni caso, il materiale risulta ancora troppo duro e anche una comune sutura troverebbe difficoltà nell'essere realizzata, specialmente in caso di una raffigurazione 3D di una porzione di unghia, materiale molto duro e spesso di difficile riproduzione.

Un punto a favore, oltre all'innovazione dei modelli, è sicuramente il costo di realizzazione, dato che ogni modello ha un costo di circa 6 euro **[13]** escludendo la manodopera e quindi se rapportato al fattore di rischio di un'operazione vera e propria, è molto basso. E' una tecnologia sempre più diffusa in grado di allargare le frontiere della sicurezza e della competenza chirurgica nella sanità in questo caso, spagnola.

Per fare riferimento alla stampante di prova utilizzata in questa trattazione, si può portare un esempio di realizzazione biomedica messa a punto proprio tramite una macchina Makerbot Replicator 2X, che ha coinvolto la chirurgia mandibolare di una persona. La tecnica utilizzata è chiamata "personal three-dimensional printing", che come indica il nome stesso, si basa sull'anatomia specifica del paziente in cura. La metodologia proposta nel Settembre del 2013 è stata presentata come studio e accettata nel 40° anniversario degli incontri della "Japanese Society of Reconstructive Microsurgery" di Morioka, in Giappone. Gli studi in questione sono stati condotti precedentemente alla ricostruzione chirurgica mandibolare di pazienti, usando uno scanner di acquisizione di Siemens, l'Healthcare SOMATOM Definition AS+ associato ad un computer con Windows 7. Questo file STL è stato convertito in un file 3D grazie ad un programma in grado di effettuare la trasformazione. Dopodichè, il file definitivo è stato inserito all'interno della stampante Makerbot Replicator 2X, elaborato tramite il programma Makerbot Desktop.

Il processo di stampa ha avuto una durata approssimativa di 6 ore in totale, di cui 2 sono state utilizzate per convertire il file mentre le restanti 4 ore hanno completato il processo tramite lo stampaggio vero e proprio.

Con una risoluzione di 0,1 mm per limiti fisici della macchina, è stato ottenuto un modello in grado di fornire un'elevata precisione, anche grazie al software che ha "tagliato" il modello in strati da 0,5 mm ciascuno. Inoltre, la capacità di stampa di questo modello di stampante è limitata a dimensioni massime di 25 x 16 x 15 cm, che sono abbondantemente maggiori di quelle di una comune mandibola, rendendo così il processo di stampa realizzabile. In questo caso il materiale protagonista della stampa FDM è un filamento di ABS, piuttosto rigido, il cui costo è stato di 48 dollari per 1 kg di prodotto.

Dato il peso ridottissimo del realizzato, cioè 30 grammi, il costo puro del materiale impiegato è di circa 1,50 dollari, una cifra piuttosto bassa.

Questo studio ha aiutato quindi la scienza a mettere a punto la riproduzione tridimensionale delle parti stesse del corpo umano, grazie allo stesso modello di stampante che è stata utilizzata nella presente trattazione.

Di seguito una rappresentazione schematica del processo di realizzazione (figura 8), completo dell'uso progressivo dei programmi e/o macchinari coinvolti nelle singole operazioni nello studio condotto.

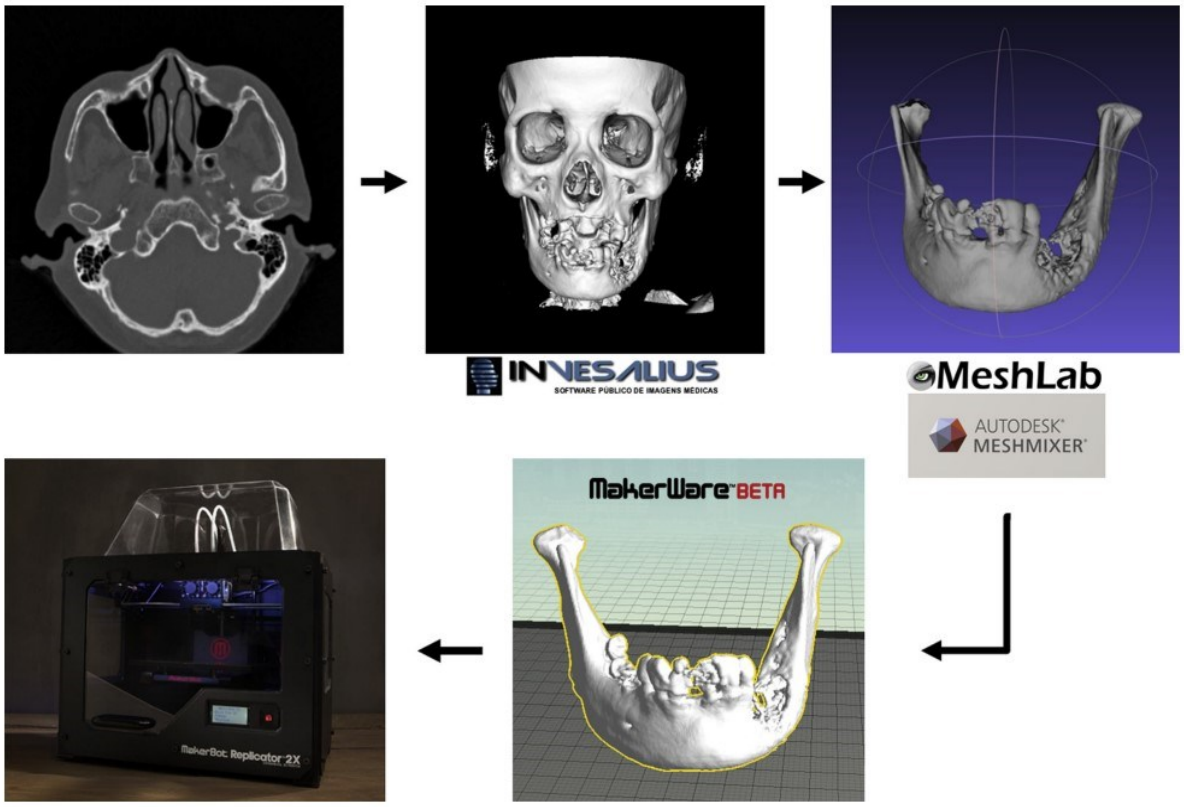

Figura 8– Illustrazione delle fasi di progettazione ***[14]***

Un altro studio recente molto approfondito è stato condotto sulle tecniche di chirurgia cardiovascolare, con l'obiettivo di fabbricare artificialmente dei vasi sanguigni di piccolo diametro grazie all'uso del TPU. Quando si diagnostica una malattia cardiovascolare che coinvolge vasi come l'arteria carotide, è sicuramente necessario intervenire tramite un bypass chirurgico per poter assicurare la sopravvivenza del paziente, ma in un caso in cui il vaso sia di diametro molto ridotto, le difficoltà dell'intervento aumentano e quindi di conseguenza anche i fattori di rischio.

Nei casi più difficili non è sempre possibile realizzare un autotrapianto, questo perché ci sono numerosi problemi a causa della scarsa vascolarizzazione, si ricerca quindi urgentemente un metodo alternativo per risolvere una problematica di questo tipo.

Solitamente, la maggior parte dei bypass effettuati tramite innesti sintetici (quindi biocompatibili) ha avuto luogo grazie al politetrafluoretilene espanso (ePTFE) oppure tramite l'uso di polietilene tereftalato (PET), dato che hanno un buon comportamento se usati nei casi ove il diametro è maggiore o uguale ai 6 mm, poiché per diametri inferiori potrebbero nascere problemi dovuti ad un'iperplasia.

Non solo, la realizzazione dei bypass coinvolge anche problematiche dovute alla dialisi, ossia un processo artificiale che consiste nella rimozione delle scorie dal corpo tramite il sangue, che si effettua quando i reni non hanno efficienza e non possono garantire lo scarto in autonomia. E' da considerare l'importanza di un trapianto autologo, dato che è il metodo migliore per garantire la perfetta funzionalità del vaso sanguigno nel paziente, perché nei tempi successivi all'operazione è la tecnica che permette di mantenere la pervietà più alta. Nel sistema di trapianto artificiale invece, questa qualità non è duratura nel tempo quanto nel caso del trapianto autologo, poiché si hanno riduzioni significative che dal 100% passano in pochi anni successivi al 60/70 % di pervietà, specialmente per quanto riguarda gli innesti vascolari di piccolo diametro.

Una maniera alternativa di affrontare questo tipo di intervento avviene quando si mette in atto la tecnica di "tissue engineering", in cui l'innesto in sé avviene impiantando la porzione di bypass artificiale nel tratto considerato, di conseguenza grazie al microambiente che si viene a creare, le cellule endogene seguono un percorso istruttivo chiamato "road map" per poter creare così dei tessuti nuovi che sono viventi e funzionali. Dopodichè il materiale innestato (artificiale) viene degradato dalle cellule circostanti, per essere poi scartato ed infine eliminato progressivamente: in tal caso il risultato che si ha è quello di un tessuto perfettamente autologo. Nel processo, il tratto di vaso sanguigno con piccolo diametro viene eparinizzato per evitare la coagulazione delle cellule del sangue, per evitare il rischio di trombosi.

Il materiale che viene scelto per effettuare un intervento del genere è quindi il TPU, un poli-etere-uretano che riesce a fornire un approccio alternativo grazie alle sue caratteristiche meccaniche date dalla sua composizione polimerica e alla sua capacità di biointegrazione e rigenerazione tissutale.

La tecnica utilizzata nello studio cardiovascolare appena menzionato consiste nell'utilizzo di una soluzione di TPU, associata alla soluzione del PCL, un altro materiale, senza però far uso della tecnica di produzione in FDM. E' quindi dimostrato che si tratta di un materiale innovativo, tecnologico e molto adatto alle applicazioni di questo tipo. **[15]** Il TPU è infatti un elastomero, che con questa caratteristica principale riesce ad assomigliare il più possibile ai tessuti umani, per questo viene scelto nei casi in cui si abbia a che fare con innesti o impianti biocompatibili alla natura del corpo umano, non solo per la realizzazione dei modelli 3D utilizzati in aree biomediche con scopo lo studio degli elementi. Successivamente si analizzerà un TPU particolare sottoposto a delle prove di taglio, le cui analisi verteranno sulla resistenza al taglio.

2. MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

2.1 Materiali

2.1.1 Bioflex FiloAlfa

I biopolimeri nella scienza medica sono materiali che combinano la riproduzione di modelli realistici tridimensionali di organi e tessuti insieme alla compatibilità biologica degli stessi all'interno del corpo umano. Una frontiera in continua evoluzione è quella che vede questi materiali coinvolti nei processi dell'industria medica, ossia nel campo dei polimeri durante l'avanzamento tecnologico dei materiali termoplastici. Solitamente si utilizzano le principali tecniche di produzione industriale come l'estrusione o la termoformatura, anche se lo stampaggio ad iniezione è ancora largamente diffuso per trattare i materiali termoplastici. Nei pazienti è però necessario tagliare i costi e raffinare il processo di stampaggio, ad esempio utilizzando la stampante 3D.

Filoalfa è un'azienda italiana che ha realizzato una fibra di colore bianco opaco che viene fornito con un diametro di 1.75 mm, con una certificazione medica di tipo ISO 10993-4/5/10. E' una qualità di TPU ritenuta molto soddisfacente per scopi biomedici, tanto da essere oggetto di osservazioni approfondite che di seguito verranno riportate.

Solitamente, quando si fa riferimento alla scienza medica, lo stampaggio dei materiali tridimensionali è caratterizzato da materiali termoplastici come ad esempio il PLA, l'acido polilattico. Per esigenze di innovazione e di adattabilità sono stati condotti studi su materiali molto più adattabili date le proprietà meccaniche e biocompatibili. Molte ricerche scientifiche riportano i vantaggi conseguenti alla scelta di un materiale come il TPU, infatti anche il Dipartimento della Tecnologia dei Polimeri di Gdansk, insieme al Dipartimento della Fisica allo stato Solido e al Dipartimento della Medicina Rigenerativa di Bydgoszcz ha presentato una valutazione della flessibilità dopo lo stampaggio di un materiale come il Bioflex di Filoalfa (un tipo di TPU). Lo stampaggio in FDM sta prendendo piede in maniera sempre più crescente, tanto che l'attenzione dei ricercatori si sta spostando sulle risposte al taglio o sulle proprietà meccaniche di questi materiali molto morbidi. Lo studio delle università della Polonia si è concentrato quindi sulle metodologie e tecniche per l'osservazione di questo materiale dopo lo stampaggio tridimensionale. Lo scopo principale è quello di documentare quanto la resistenza dello stampato sia ridotta rispetto al caso in cui il filamento non abbia ancora subito il processo di stampaggio.

L’analisi termica è stata condotta tramite la tecnica di calorimetria differenziale a scansione, anche siglata DSC, in cui si misura la differenza di quantità di calore che è necessaria per poter incrementare la temperatura di un corpo e di un riferimento, il tutto in funzione della temperatura. Solitamente la temperatura del campione viene fatta aumentare linearmente in funzione del tempo, mentre il riferimento (ad esempio, un altro campione), possiede una capacità termica nota nell’intervallo di temperatura di osservazione. Per determinare le temperature più significative del campione, è stata utilizzata la temperatura di transizione vetrosa dei termogrammi, cioè quell’intervallo di temperatura di un materiale in cui si verifica la transizione vetrosa. Quest’ultima è sempre inferiore alla temperatura di fusione del materiale allo stato cristallino; in particolare, nell’intervallo i polimeri sono soggetti ad un passaggio da stato rigido a stato flessibile/elastico, quindi con una mobilità delle catene polimeriche che aumenta in maniera significativa. I materiali termoplastici vengono infatti utilizzati a temperature inferiori di quelle di transizione vetrosa, poiché non è lo stato vetroso ad essere di interesse in questo tipo di studi; dunque, così procedendo sono state determinate la temperatura di fusione, l’entalpia termica e la temperatura di cristallizzazione.

A seguito di un riscaldamento, sono stati rilevati due punti di fusione diversi: il primo a 0,36 °C con un ΔH di 14,82 J/g e il secondo a 189,4 °C, corrispondente ad un ΔH di 4,87 J/g. Il primo punto corrisponde alla fusione dei segmenti cristallini soffici (SS), mentre invece il secondo è dovuto alla fusione dei segmenti cristallini rigidi (HS). Per quanto riguarda le entalpie rilevate, la bassa entalpia relativa alla fusione dei segmenti rigidi va ad indicare un grado di bassa cristallinità della fase rigida, con una concentrazione bassa comparata invece a quella della fase più soffice, in termini di segmenti. La transizione vetrosa avviene a circa -68,7 °C, leggermente differente dal valore fornito da FiloAlfa che è invece di -70°C. Per quanto riguarda la temperatura di cristallizzazione, si ha una temperatura di 134,6 °C nella fase rigida, mentre nella fase più soffice la temperatura è di -30,8 °C. In definitiva, risulta che il processo di stampa non ha portato cambiamenti significativi alle caratteristiche del materiale.

Tramite una misurazione TGA (analisi termogravimetrica), è stato possibile ottenere informazioni per quanto riguarda la decomposizione termica di questo materiale, dato che è una tecnica in cui la massa di un campione si misura nel tempo contemporaneamente alla variazione di temperatura. La degradazione osservata si trova in un range di temperatura che va dai 370 ai 470 °C, con una temperatura di stabilità media attorno ai 368 °C. Il processo di decomposizione inizia a 355 °C con una degradazione del materiale che è molto veloce.

"Le stampe hanno mostrato una temperatura leggermente superiore di perdita di peso del 90% e massa residua rispetto al filamento come indicato dall'azienda. Tuttavia, differenze così insignificanti potrebbero essere dovute al poco differenza nelle masse dei campioni testati. Quindi, le analisi termiche condotte dagli studi hanno dimostrato che il filamento BioFlex è un materiale termicamente stabile che conserva le sue proprietà anche dopo il processo di stampa 3D." **[16]**

Oltre alle precedenti osservazioni e attente analisi sul comportamento del materiale in seguito alle sollecitazioni termiche ed alle scansioni spettroscopiche, lo studio riguarda anche la parte **fisico-meccanica** della risposta del materiale, potendo avere così un quadro chiaro anche delle proprietà meccaniche. In questo caso, il processo per ottenere tali informazioni è stato quello del DMA, ossia l'analisi meccanica dinamica, che si usa per studiare il comportamento viscoelastico dei polimeri: la sollecitazione che viene applicata è di tipo sinusoidale e in questa maniera si misura la deformazione del materiale, consentendo la determinazione del modulo complesso, il rapporto tra la sollecitazione e la deformazione in condizioni di vibrazione. Non solo, questa analisi ha consentito anche di aggiungere utili informazioni sul comportamento del provino anche a fronte delle transizioni termiche, come ad esempio per quanto riguarda la temperatura di fusione. Per una misurazione simile è stato necessario fare uso di provini con dimensioni standard, i cui risultati sono riportati su una curva che inquadra diverse aree di transizione del materiale, dove ad esempio uno stato vetroso viene localizzato in un range di bassa temperatura. Quando invece la temperatura passa dai -25 ai 75 °C, la transizione comprende una fase morbida amorfa, il cui picco si verifica ai -46°C, confermando quindi la presenza di una fase soffice nel BioFlex, come i dati ufficiali forniscono, insieme ad altri segmenti soffici oppure rigidi. A seguire, alcuni dei moduli rilevati in questa analisi.

Sono state poi effettuate altre prove sul filamento trattato, che sono di natura meccanica e quindi di durezza, trazione e resistenza alla compressione. La risposta del materiale a queste prove è influenzata dal metodo di progettazione e di stampa impiegato nel processo, con la partecipazione alla variazione della risposta da parte del tipo di riempimento coinvolto.

Infatti, nella tabella seguente (figura 9), con dati riferiti in Mpa, si riportano alcuni risultati dopo le prove appena menzionate, con la variazione dell'angolo raster, cioè l'angolo del percorso utensile che deposita rispetto all'asse x della tabella di costruzione del provino.

Infill raster orientation	0/90°	± 45°
Hardness (Shore A)	76 ± 1	78 ± 1
Young modulus (MPa)	0.16 ± 0.1	0.19 ± 0.1
Tensile strength (MPa)	12.6 ± 1.8	14.1 ± 0.9
Elongation at break (%)	646.7 ± 37.5	757.3 ± 35.7
Relative elongation (%)	318.3 ± 45.2	275.6 ± 42.6
Compression test	Yield point (MPa)	Maximum registered compressive strength (MPa)

Figura 9 – Tabella riportante i valori dei moduli caratteristici in diverse condizioni ***[16]***

Per quanto riguarda invece la prova di resistenza alla tensione di compressione, è stata effettuata in maniera perpendicolare P e longitudinale, A, testando campioni diversi ossia campioni solidi e porosi, di forma cubica.

I campioni testati nella direzione longitudinale hanno mostrato dei valori di resistenza alla compressione molto superiori rispetto ai provini testati nella direzione perpendicolare, dimostrando così un comportamento anisotropo dopo aver effettuato la stampa 3D, che nonostante la prova non hanno però riportato deformazioni di danneggiamento.

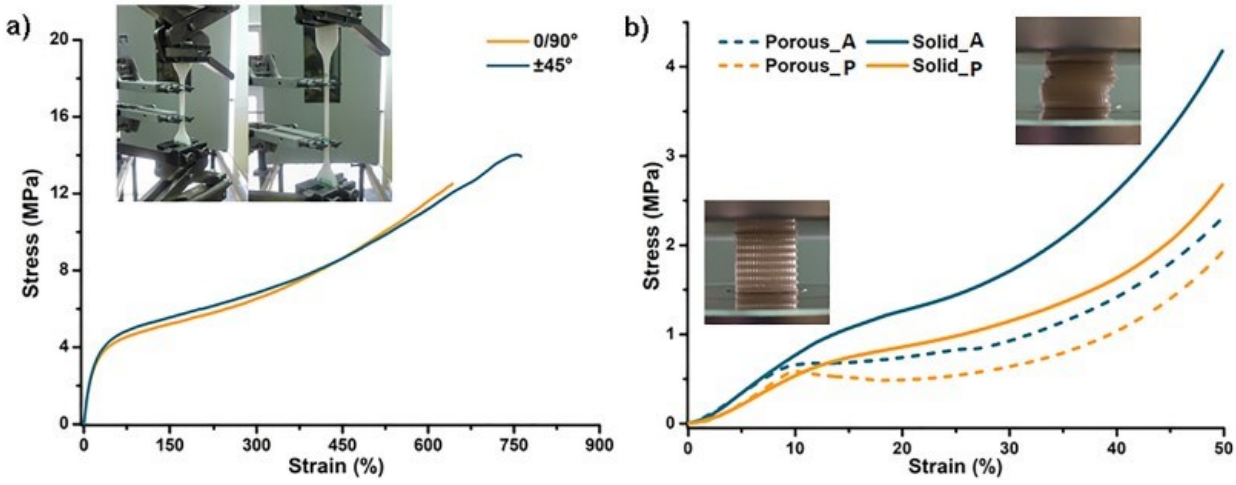

Figura 10 – Andamento dei valori di resistenza con confronto di variazione dell'angolo raster ***[16]***

Un punto molto innovativo di questo tipo di studi si concentra sull'interazione del materiale analizzato con gli scopi destinati ad un uso biomedico. I test condotti hanno sicuramente riportato buone caratteristiche generali meccaniche del BioFlex FiloAlfa, ma test di citotossicità offrono un punto di vista diverso di un orizzonte che prevede l'utilizzo di questo materiale anche come sostituto di impianti all'interno del corpo umano, che siano questi protesi oppure, come modelli di esercitazione per gli studi di chirurgia.

La citocompatibilità è una qualità dei materiali che si verifica tramite test in vitro che hanno il fine di valutare la risposta cellulare del corpo umano rispetto a qualsiasi tipo di impianto o protesi all'interno di quest'ultimo, con caratteristiche di biodegradabilità e atossicità. I test effettuati hanno utilizzato una linea cellulare di fibroblasti con vitalità cellulare in concentrazioni variabili a partire dal 12,5 fino ad arrivare al 100% di preparazione dell'estratto. Il materiale ha mostrato valori di vitalità superiori al 100%, e visto che qualora il materiale dovesse garantire la vitalità delle cellule all'interno in cui si trova superiore al 70% potrebbe essere considerato come un materiale citocompatibile e non tossico, requisito soddisfatto dal test.

Questo processo ha confermato ancora che la stampa del materiale tridimensionale non ha comportato degradazioni neanche in questi termini per cui il materiale BioFlex FiloAlfa è utilizzabile anche nel campo delle protesi.

Di seguito (figura 11) una tabella riassuntiva sugli studi condotti in base alle proprietà del TPU Bioflex FiloAlfa.

Trade name (company)		**Bioflex® (Filoalfa)**	**Arnitel® ID 2045 (DSM)**	**FibreTuff® II (IPM)**	**guidel!ne® (taulman3D)**
Chemical family/product description		TPC (thermoplastic copolyester elastomer)	TPC (thermoplastic copolyester elastomer)	PMC (composite based on polyamide, polyolefin and cellulose fibres)	PETG based (glycol-modified polyethene terephthalate)
Mechanical properties	Tensile modulus (MPa)	35 (ASTM D790)	29 / 29* (ISO 527)	850 (ISO 527)	1940 (ASTM D412)
	Tensile strength (MPa)	16 (ASTM D638)	8 / 7.6* (ISO 527)	23 (ISO 527)	47 (ASTM D412)
	Elongation at break (%)	800 (ASTM D638)	350 / 390* (ISO 527)	4 (ISO 527)	5.9 (ASTM D412)
	Hardness	27 Sh D (ASTM D2240)	34 Sh D (ISO 868)	–	–
Thermal properties	Melting point (°C)	185 (ASTM D3417)	158 (ISO 11357)	–	220
	Glass transition temperature (°C)	–70	–35 (ISO 11357)	–	77
Biological evaluation of medical devices		USP Class VI ISO 10993-4/5/10	USP Class VI ISO 10993-5/10	USP Class VI	USP Class VI ISO 10993-3/4/5/6/10/11 ISO 11607-1 DMF (type III)

– tests conducted on printed specimens.
* – infill raster orientation 0/90° and ± 45°, respectively.

Figura 11 – Confronto tra materiali e normative diverse **[16]**

2.1.1 Makerbot Replicator 2X

Nella conduzione della procedura per lo studio del comportamento di taglio è stato necessario produrre una serie di provini normati, tramite la tecnica in FDM, grazie ad una stampante 3D piuttosto compatta e versatile che ha permesso di impostare diversi parametri per poter ampliare il campo delle prove ed ottenere quindi risultati diversificati grazie alla variazione delle caratteristiche di stampa. Il dispositivo utilizzato è Makerbot Replicator 2X, una macchina prodotta a partire dal 2014 (figura 12).

Le dimensioni esterne della macchina sono di 42 x 53,1 x 49 cm , perciò occupa uno spazio ridotto, dato soprattutto il peso di circa 12kg, che la rende trasportabile e facilmente collocabile dove è necessario. Sfrutta la tecnologia in FDM, che comprende 3 motori: un motore sposta gli ugelli in orizzontale, un motore invece si occupa dello spostamento nella direzione orizzontale perpendicolare alla precedente, mentre invece per quanto riguarda lo spostamento verticale si ha la partecipazione del piatto di stampa, che è mobile.

I due ugelli possono essere impostati ad una temperatura differente o identica, potendo anche lavorare con due diversi filamenti.

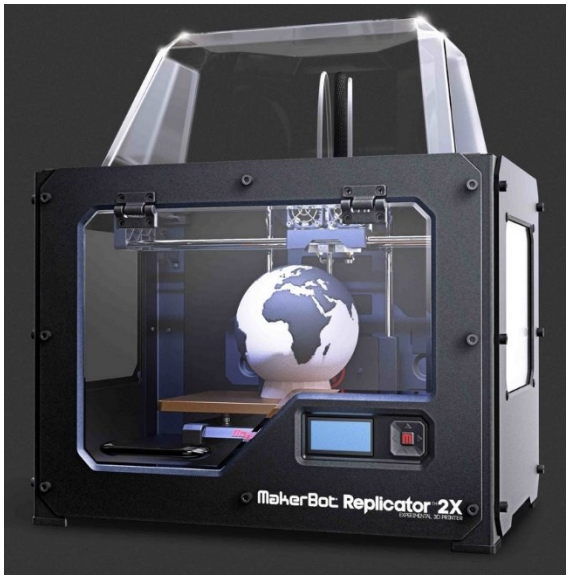

Figura 12 – Una Makerbot Replicator 2X **[17]**

Questi ultimi vengono incanalati all'interno dell'ugello grazie ad un piccolo motore elettrico, che tramite un ingranaggio scanalato permette il passaggio del filamento all'interno dell'ugello.

Successivamente, una resistenza posta proprio sull'ugello si occupa di gestire la temperatura scelta per poterla raggiungere e sfruttare la caratteristica principale del materiale termoplastico: la fusione. Così, la fusione del filamento abbinata alla rotazione del motorino permette di avere una velocità di deposizione controllata e impostabile tramite il software. La scelta di queste caratteristiche è fondamentale e soprattutto varia a seconda del materiale utilizzato, per conferire allo stampato le proprietà migliori.

Il piatto di stampa è anch'esso riscaldabile alla temperatura desiderata, per non far avere una differenza di temperatura critica, che potrebbe dare vita a distorsioni al provino, tra la stampa e la deposizione del filamento fuso.

Le dimensioni massime realizzabili dei modelli sono molto più ridotte della dimensione della stampante stessa, infatti, misurano circa la metà delle 3 grandezze della macchina: 34,6 x 15,5 x 15,2 cm.

Il filamento viene caricato quindi dai motori dei due ugelli, ma dev'essere reso disponibile da un apposito supporto che si trova sul lato posteriore della stampante, sempre pronto ad essere srotolato e quindi inserito all'interno dell'ugello. Dopodichè si inserisce il file STL da realizzare all'interno di un'apposita scheda SD, che quando viene inserita nella porta della stampante, si rende disponibile tramite un menù che visualizza tutti i file STL presenti all'interno di essa.

L'ultimo passo prima della stampa è quella dell'avvio del "pre-heat", un'opzione che ottimizza l'inizio dello stampaggio, dato che rende il materiale subito uniforme evitando il distacco della stampa dovuto all'inizio del processo in cui le temperature non hanno probabilmente ancora raggiunto completamente i valori prestabiliti, creando possibili malformazioni iniziali che possono dare vita a veri e propri difetti di fabbricazione. Questa opzione è selezionabile tramite l'utilizzo diretto del menù di impostazioni della stampante, senza passare indirettamente dal software "Makerbot Desktop"

2.1.2 Makerbot Desktop

Per quanto riguarda invece l'implementazione dei comandi di stampa caratterizzanti i provini da realizzare, è stato necessario utilizzare un programma chiamato "Makerbot Desktop", specifico per il modello di stampante in uso. Concettualmente, dopo aver creato il file del provino in un programma CAD e dopo averlo convertito in un formato STL, lo si inserisce all'interno del programma in questione e perciò si avrà a disposizione in maniera virtuale il modello del provino che è posizionato su una superficie che idealmente è lo stesso piatto di stampa della Makerbot Replicator.

L'interfaccia del programma è quindi paragonabile a quella di un programma CAD, dato che è possibile modificare secondo direzioni principali il modello in questione (larghezza, spessore, lunghezza) o variarne le dimensioni in scala. Si possono modificare i punti di vista del modello tramite i comandi di movimento principali del computer, con conseguente capacità dell'operatore per quanto riguarda soprattutto il posizionamento del modello sulla superficie del piatto di stampa. In figura 13 una schermata relativa all'implementazione.

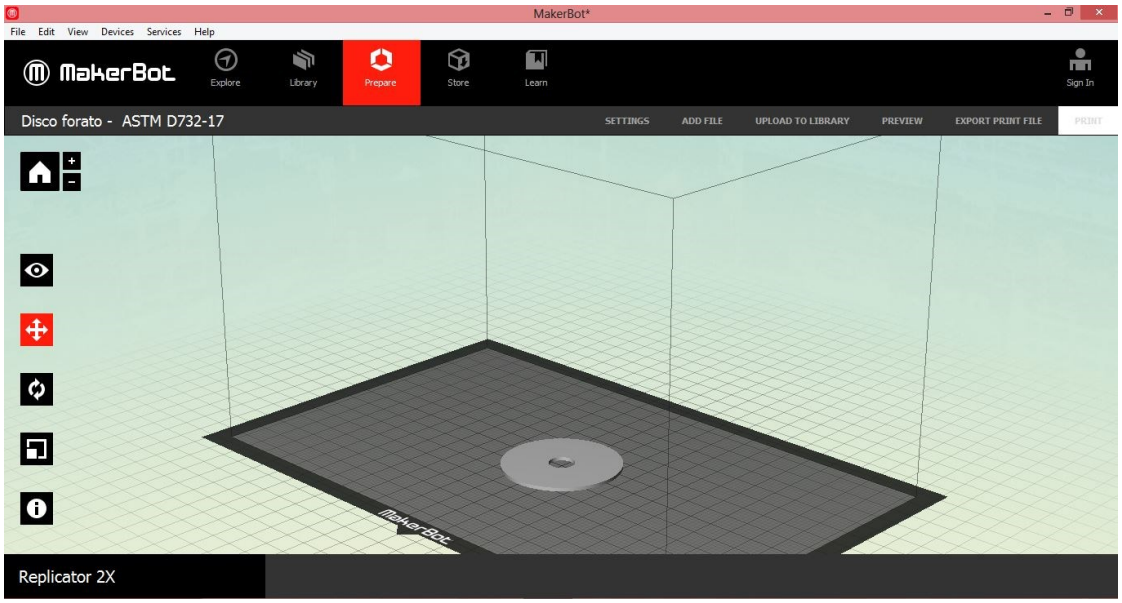

Figura 13 – Vista del posizionamento del modello 3D di un provino

Dopo aver posizionato al meglio il provino, è necessario definirne le dimensioni effettive. Normalmente si fa uso di una normativa ASTM per quanto riguarda le caratteristiche dei prodotti, infatti anche nella presente trattazione si hanno riferimenti normati sia per quanto riguarda il modello che per quanto riguarda la prova effettuata in laboratorio, sull'analisi della resistenza al taglio.

Attraverso il programma Makerbot Desktop sono quindi disponibili nella sezione “settings” tutti i parametri capaci di modificare elementi importantissimi del modellino da stampare. In ordine, si effettua uno scrupoloso studio per quanto riguarda le temperature di stampaggio, cioè le temperature raggiunte dagli estrusori in questa fase. A seconda del materiale utilizzato, la Makerbot Replicator riesce a fornire una temperatura massima di 250° C, che solitamente vengono raggiunti soltanto in casi di materiali termoplastici molto rigidi, mentre invece per i materiali più soffici le temperature di estrusione si aggirano attorno ai 190 °C. Ovviamente è possibile impostare temperature diverse per estrusori diversi che quindi utilizzano, di conseguenza, materiali diversi. La regolazione delle temperature appartiene anche al piatto di stampa, che viene impostato anch’esso a seconda del materiale in uso. La temperatura massima raggiungibile dal piatto è quindi di 130 °C e viene riscaldato da una resistenza sottostante. Vale anche in questo caso la regola secondo la quale un modello realizzato in materiali molto rigidi necessita di un surriscaldamento maggiore.

Altri parametri fondamentali per l’impostazione della stampa sono le velocità, racchiudendo una serie di velocità che riguardano il processo nella sua completezza. Gli ugelli sono continuamente raffreddati da una ventola posta solidalmente a questi ultimi, che gira quindi ad una velocità impostabile secondo le esigenze.

Per quanto riguarda invece la velocità di stampa, e cioè la velocità con cui il materiale esce dal foro dell’ugello, nella trattazione presente è stata usata una velocità costante (è sempre costante) di 25 mm/s.

Per ogni estrusore si possono impostare velocità diverse come ad esempio la velocità di retrazione, che in questa trattazione è stata impostata a 25 mm/s, la velocità di ripartenza dopo una pausa o la realizzazione di una geometria diversa e infine il diametro del filamento utilizzato, di 1,75 mm in questo caso.

L’infill è invece un parametro specifico che permette di diversificare i provini per ampliare lo studio delle caratteristiche, specialmente quando si ha intenzione di realizzare su di essi delle prove meccaniche: di resistenza a deformazione, o come nel caso presente, di taglio. Questo parametro viene definito quindi da una densità, in termini percentuali, dove il 100% rappresenta la densità massima mentre le percentuali inferiori rappresentano un riempimento uniforme ma meno denso. Lo spessore dello strato realizzato tramite infill viene definito dall’operatore, e nello studio qui condotto è stato impostato a 0,20 mm, mentre la percentuale delle densità variava ciclicamente tra il 15 - 25 – 50 -100. Non solo è possibile modificare quindi la densità del riempimento, ma si può anche realizzare una vera e propria texture del provino.

Generalmente con un infill impostato al 100% si avrà una superficie che vista in sezione sarà perfettamente liscia e piena, mentre invece con percentuali inferiori questa sezione presenterà un reticolo ordinato corrispondente alla densità selezionata: è possibile dare una forma al reticolo in questione, che può essere esagonale, a forma di diamante oppure semplicemente simile ad altre figure geometriche caratteristiche. Nello studio condotto è stato utilizzato un infill di qualità esagonale ove questo fosse presente. La parte esterna del provino è solitamente costituita da dalle superfici uniformi, che sono indipendenti dal tipo di infill selezionato, e sono incluse all'interno delle dimensioni del pezzo. Relativamente al programma utilizzato, il Makerbot Desktop, queste superfici sono chiamate "shells", dato che formano un vero e proprio guscio solitamente laterale (ad esempio nel nostro caso costituiscono la superficie cilindrica interna ed esterna) che racchiude il tipo di infill desiderato. E' quindi possibile scegliere il numero di shells da conferire al modello in stampa e a seconda di queste, la sezione interna realizzata con uno specifico infill verrà ridotta o aumentata. Per quanto riguarda i provini stampati in TPU è stato scelto un numero di shells che vanno da 2 (nei provini con densità infill < 100%) a 100 (nei provini con una densità pari al 100%). Oltre ai gusci laterali in questa trattazione, dove la densità dell'infill era inferiore al 100% sono stati usati degli strati ausiliari che chiudessero le sezioni superiori ed inferiori dei provini, attivate tramite la definizione del loro spessore nella voce "roof" e "floor".

Nello studio condotto non è stato necessario utilizzare l'opzione del multimateriale, ma normalmente la Makerbot Replicator 2X ammette la funzione contemporanea di due ugelli, di conseguenza si ha il bisogno dell'impostazione tramite Makerbot Desktop dei parametri di stampa che sfruttano questa caratteristica. Quando si ha la necessità di produrre pezzi instabili, ossia con una geometria che non è in grado di essere autoportante, è possibile aggiungere dei supporti al modello tramite un'opzione specifica. Si possono definire angolazioni, spessori e anche la densità del materiale con cui sono realizzati. Successivamente i supporti creati vengono poi rimossi dal modello prodotto, la loro aggiunta quindi non comporta una modifica permanente alla geometria del pezzo realizzato.

In figura 14 una cattura del menù delle impostazioni, durante la scelta dei parametri di stampa per caratterizzare ogni tipologia di provini.

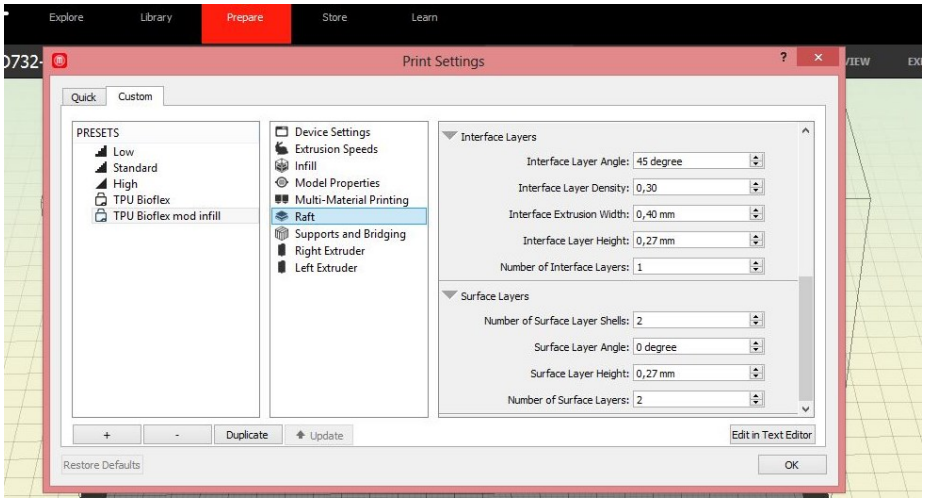

Figura 14 – Voce "Settings" adibita alle impostazioni delle caratteristiche di stampa

2.2 Procedure sperimentali

2.2.1 Stampa

La progettazione dei provini da sottoporre alla prova di taglio inizia con la creazione di un file tramite software CAD: in questo caso è stato utilizzato Rhino, un programma in grado di disegnare file tridimensionali. Il provino, un disco forato al centro, non è definito da misure scelte dall'operatore, bensì è stato necessario far riferimento ad una normativa ASTM per la realizzazione della prova di taglio. La normativa ASTM D732-17 fornisce informazioni ben precise sull'utilizzo dei provini, infatti, la stessa fabbricazione inizia dall'analisi della normativa menzionata.

Le dimensioni dei provini possono variare in base alla loro forma: qualora il provino fosse un quadrilatero, secondo la normativa le sue dimensioni sarebbero di 50 mm per lato, mentre in questa trattazione sono stati usati provini di forma circolare, per cui le misure adottate sono quelle fornite per i dischi, il cui diametro è di 50,8 mm, che è una misura costante per tutto l'assortimento dei modelli stampati in FDM.

Una misura che è stata variata per poter dare un range di prova più ampio è invece quella dello spessore, che inquadra l'intervallo di realizzazione tra 1,27 e 12,7 mm, in condizioni di parallelismo tra la faccia superiore e inferiore del disco forato, dove il foro stesso presenta un diametro di 11 mm circa.

Una volta realizzato un modello singolo di disco forato con le dimensioni riportate secondo normativa, il processo è stato quello di inserire il file contenente il corpo di prova all'interno del programma di stampa, Makerbot Desktop, descritto in precedenza. Da questo punto è stato possibile impostare tutti i parametri di stampa e anche le caratteristiche del provino stesso a partire da un solo modello a norma, ciò significa che le misure e le impostazioni da mantenere non sono state variate, mentre i parametri variabili hanno giocato un ruolo importante, come ad esempio la possibilità di realizzare due provini contemporaneamente sullo stesso piatto di stampa. Sono stati testati almeno due dischi per tipologia, nel momento in cui ha avuto luogo la prova di taglio nella macchina di prova universale.

Dopo aver definito ogni categoria di disco forato, in base a parametri di densità, di spessore o di altre caratteristiche, lo stampaggio è considerato il passo successivo, infatti, sono stati inseriti i file di stampa definitivi all'interno della stampante stessa, che con l'interfaccia di utilizzo sono stati selezionati per poi essere creati. I tempi di stampa sono variabili, dipendono dalle dimensioni, dalla densità e dallo spessore del modello da stampare: in questo caso per i provini più sottili i tempi oscillavano tra i 30 e 40 minuti per realizzare una coppia di massima densità, mentre si allungavano a più di due ore per provini molto spessi (5,7 mm). Tempi intermedi sono trascorsi per la realizzazione dei provini con infill inferiore, cioè con densità percentuale ridotta, nei dischi con spessore costante di 2,7 mm.

Per tutte le stampe effettuate è stata utilizzata una funzione della macchina denominata "pre-heat", questa funzionalità ha permesso all'estrusore di essere riscaldato alla temperatura scelta di fusione, di 195° C, permettendo così all'ugello di eseguirà una sorta di pre-flusso per pulire e assicurare un inizio di stampa molto più pulito, come se fosse già in funzione. Il materiale risulta infatti sin da subito privo di sporcizie o carbonizzazioni localizzate.

Di seguito si elencano tutte le combinazioni progettate e quindi stampate in FDM, associate alla relativa fotografia scattata prima della prova di taglio.

La categoria in figura (figura 15), come si può facilmente osservare, è una tipologia di provini a densità di riempimento pari al 100% mentre il numero di shell è stato scelto di 100.

Non ci sono infatti opzioni di infill con forme particolari, mentre gli spessori sono stati scelti di 3 misure differenti: 1,5 - 2,7 - 5,7 mm. Per ogni spessore il numero di provini stampati è di 2, ottenendo così **6** provini in questa categoria.

Figura 15 – Un provino a riempimento = 100%

La seconda serie di provini realizzati, invece, (figure 16 e 17) differisce dalla prima tipologia per molte caratteristiche. In questo caso, principalmente per la scelta dell'opzione Infill, permettendo così alla macchina di realizzare un riempimento percentuale a scelta con una forma altrettanto a scelta: in questo caso la forma esagonale, con uno spessore di 2,7 mm.

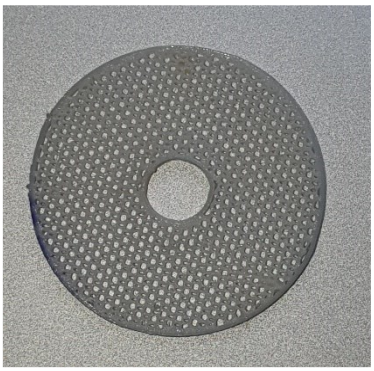

Figura 16 - Provini ad infill = 50%

Figura 17 - Provini ad infill = 25%

Il numero di shell è stato ridotto a 2 per poter configurare i provini con due strati di chiusura lungo la loro circonferenza e le combinazioni stampate sono di due tipologie: **2** provini con infill al 50% (figura 16) e **2** provini con infill al 25% (figura 17), senza strati di chiusura per quanto riguarda le facce inferiori e superiori del modello, si può notare la sezione esagonale dello stile di riempimento.

L’intenzione dell’assortimento è stata quella di creare una serie di almeno 3 coppie per ogni assortimento, ma i limiti meccanici e fisici hanno portato allo stampaggio di provini inutilizzabili: è stato il caso della combinazione ad Infill = 5% (figura 18), con spessore 2,7 mm, non compatibile con le modalità di prova di taglio per la scarsissima densità di riempimento.

Figura 18 - Provino ad infill =5%

Di seguito ancora si riporta una serie di provini stampati, con però degli strati di chiusura sulle facce del provino.

Nelle figure 19 e 20 si ha una rappresentazione di una serie di provini progettati con un riempimento di Infill = 50 %, di forma esagonale e spessore 2,7 mm.

La particolarità di questa serie è quella di riportare sulla superficie inferiore e su quella superiore una sorta di strato di chiusura, che non permette infatti di vedere le celle esagonali. Quest’ultimo, di spessore pari a 0,35 mm è il risultato di due sottilissimi strati di materiale per ciascuna faccia. I provini realizzati sono quindi **2**.

Figura 19 – Infill = 50 %

Figura 20 – Infill = 50 %

Successivamente, si ha la stessa categoria di dischi forati con una differenza che risiede nella percentuale di riempimento, diminuita al 25% mentre lo spessore è costante e di 2,7 mm. Anche in questo caso **2** provini sono provvisti degli strati di chiusura (compresi nello spessore di 2,7 mm) di 0,40 mm, mentre altri **2** provini sono caratterizzati dagli strati con misura 0,35 mm. L'ultima configurazione in elenco prevede un riempimento pari al 10% di Infill, una misura più idonea per quanto riguarda l'utilizzabilità, soprattutto per via degli strati di chiusura inseriti: una serie di **2** provini è stata realizzata infatti con uno strato di 0,40 mm ed una serie di altri **2** dischetti riporta gli strati con spessore 0,35 mm. Non ci sono particolari differenze visive tra i 2 provini con strati di 0,40 mm e quelli con strati di 0,35 mm.

Figura 21 – Retro di un provino

La circonferenza "aggiuntiva" che si può osservare in questa ultima serie di provini stratificati non dipende dalla progettazione, ma rappresenta l'impronta lasciata dall'utensile durante la prova eseguita, che caratterizza quindi tutti i provini nella loro completezza.

Come si evince dalla figura 22, non tutti i provini sono riusciti perfettamente durante lo stampaggio: in questo caso, un dischetto da 5,7 mm non ha avuto una perfetta adesione al piatto di stampa, che ha portato come conseguenza la sua piegatura, con conseguente stampa parziale dello spessore del disco, dislivello evidenziato in figura; pertanto, l'eccessiva differenza tra misure ideali e reali anche in questo caso ha causato l'inutilizzabilità del disco forato, poiché non è stato possibile garantire una ripetibilità della prova a causa della superficie di taglio inferiore rispetto ai provini progettati con le stesse caratteristiche.

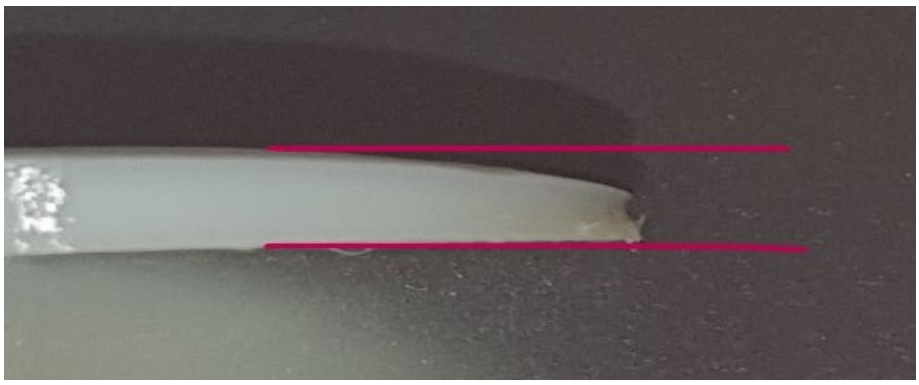

Figura 22 – Evidente differenza di spessore tra parte centrale e parte periferica, danneggiata dalla scarsa adesione del provino a piatto di stampa

2.1.2 Prova di taglio

La prova di taglio è un'operazione che consiste nel taglio di un materiale in diverse maniere sempre verificate tramite normativa standard, per poi andare a registrare i dati contenuti in base alla forza impiegata, alla tipologia di danno che il materiale ha riportato e a tutti quei parametri che si estrapolano dal compimento di questa azione. In particolare, come anticipato nell'introduzione, in questo caso il riferimento per la prova è quello della normativa ASTM D732 – 17 **[18]**, cioè un metodo di test standard per misurare la Shear Strength dei materiali plastici (in questo caso termoplastici).

La Shear Strength, o resistenza al taglio, non è un parametro ottenibile direttamente dalla prova, come ad esempio potrebbe esserlo la forza impiegata o lo spazio percorso dalla macchina di prova, bensì è una funzione di più misure e della forza massima raggiunta per imprimere il taglio e cioè la rottura del provino. In questo caso, l'utensile impiegato è di tipo a punzone, dato che è uno dei metodi riconosciuti per il confronto dei dati ottenuti tramite i materiali nel campo dell'ingegneria. La resistenza al taglio si calcola analiticamente sfruttando il rapporto tra il carico applicato e l'area del bordo appena tranciato (questa area è definita come il prodotto tra la circonferenza del punzone e lo spessore del provino).

$$SHEAR\ STRENGTH = \frac{F}{d*\pi*t}$$

F = forza massima applicata (N)

d = diametro del punzone (mm)

t = spessore del provino (mm)

Il procedimento per effettuare la prova in sé è non complesso e consiste nella spinta del punzone attraverso il provino stampato, per poi romperlo in un istante, il quale avrà una corrispondenza con un valore della forza tale da poter calcolare la Shear Strength di quel provino. La macchina di prova impiegata è una MTS 810.

L'attrezzatura utilizzata consiste nell'inserimento dei provini all'interno di un pesante cilindro in ferro, dentro al quale sono stati posizionati due dischi pressochè identici a quelli stampati ma con un foro al centro dal diametro identico a quello del punzone: così il taglio è perfettamente centrato ed il materiale ha la possibilità di ridurre al minimo le imperfezioni di rottura dovute alla piegatura (comunque non annullabile del tutto, come si vedrà di seguito). La velocità deve essere necessariamente costante, come nel caso presente in cui è stata impostata a 0,0215 $\frac{mm}{s}$, per impartire un taglio uniforme sul provino attraverso un disco di metallo fissato al punzone, scelto di diametro pari a 20,42 mm, misura rilevata con un micrometro.

Si nota nella figura 23 una rappresentazione del punzone in fase di carico sulla superficie del provino, che si trova all'interno della struttura costruita appositamente per questo tipo di prova; grazie a questa attrezzatura il provino è così fissato rigidamente al cilindro all'interno del quale viene effettuata la prova.

In questa fase la macchina universale di prova è costantemente connessa ad un foglio excel che memorizza tutti i dati con una frequenza molto alta (Immagine 9), ossia i dati di spostamento per quanto riguarda il punzone mentre di forza invece per quanto riguarda il carico esercitato sulla superficie del provino.

Figura 23 – Sistema di prova su pressa idraulica

E' stato possibile infatti osservare la variazione di tali parametri, con la creazione di curve di andamento da interpretare nei momenti successivi in cui si sono analizzati tutti i risultati ottenuti da questa prova standard (figura 24).

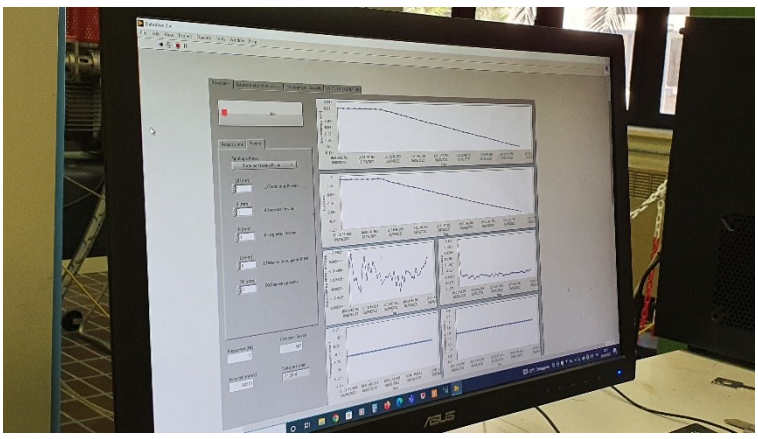

Figura 24 – Studio dei parametri durante la prova

Terminata la prova per il singolo disco forato, la sua superficie risulta rotta e pertanto si ha un disco ricavato all'interno del provino stesso che teoricamente sarebbe dovuto fuoriuscire dal corpo principale dello stampato.

Nel caso reale invece, questo fenomeno in genere non si è verificato mai, poiché le piccolissime imprecisioni delle attrezzature e il comportamento non-ideale dei dischetti in TPU hanno partecipato a creare elasticità tra le "fibre" del materiale, portando come conseguenza quella di una prova a comportamento non-ideale, pur assicurando valori ben interpretabili per quando riguarda le forze in gioco e soprattutto il calcolo della resistenza al taglio fornita per ogni categoria.

Di seguito si presenta come un provino appare frontalmente (figura 25) e lateralmente (figura 26) dopo il taglio impartito. La prova risulta perfettamente riuscita se il taglio è completo, ossia se si può ottenere il distacco completo del più piccolo disco forato espulso dal provino originario.

Figura 25 – Provino testato

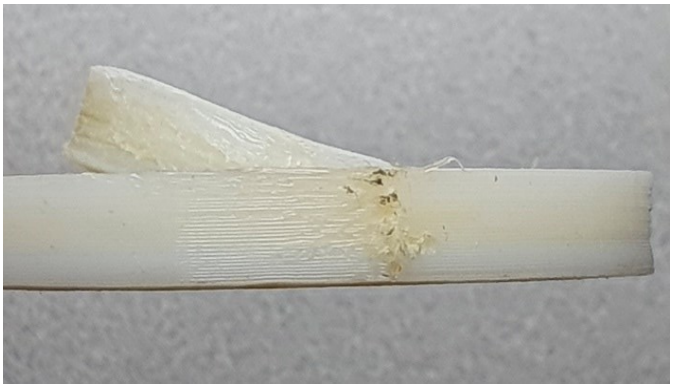

Figura 26 – Vista laterale sul provino testato

3. RISULTATI

3.1 Studio dei dati

I valori ottenuti e studiati dalla prova di taglio eseguita con la macchina di prova universale sono stati oggetto di un'elaborazione dei dati ad alta frequenza trascritti durante questa operazione, per ogni categoria di provino.

I valori di forza massima sono stati quindi utilizzati per il calcolo della Shear Strength mentre i valori rilevati dello spostamento non hanno contribuito a fornire informazioni importanti circa lo stato del disco forato durante la prova, o meglio, sono stati considerati soltanto in maniera indicativa per avere un riscontro sul probabile stato di avanzamento del punzone nell'attraversamento dello spessore intero del provino, dato che a causa della conformazione dell'attrezzatura non è stato possibile osservare passo per passo lo stato del taglio. Le uniche osservazioni a livello visivo sono state quindi ottenute soltanto una volta terminata la prova di taglio, riscontrando il danno nella sua "completezza" soltanto una volta completata la prova, come si può osservare dalle figure nei capitoli precedenti.

E' stato possibile ottenere da ogni test eseguito su ciascun disco forato, una curva rappresentante l'andamento della forza rispetto allo spostamento: infatti, nella prima fase della corsa del punzone l'andamento della curva è piuttosto regolare, ossia spostamento e forza variano con un rapporto stabile; nella seconda e ultima parte della corsa invece si osserva un picco che fa cambiare drasticamente il percorso della curva, dirigendola dopo tale massimo verso il basso, quindi con una forza decrescente. Il picco rappresenta chiaramente il valore di forza massima raggiunta dal punzone per la rottura del provino, valore da considerare per calcolare la shear strength del materiale in questione sottoposto a prova di taglio.

Si riporta di seguito un esempio (figura 27), a partire da una delle prove effettuate, dove è ben visibile il picco di forza e anche l'andamento della corsa del punzone prima e dopo il picco, che rompe il provino poco prima di oltrepassare completamente lo spessore del provino in questione, di misura 5,7 mm a riempimento massimo (100%). I provini a riempimento massimo hanno dimostrato una rottura più semplice in quanto la tranciatura è stata più immediata rispetto invece al caso in cui i provini avessero una percentuale di riempimento inferiore al 100%, portando così una discontinuità della prova e di conseguenza anche della curva, potendo comunque estrapolarne il valore massimo di forza, ma con curve meno morbide rispetto al caso qui riportato.

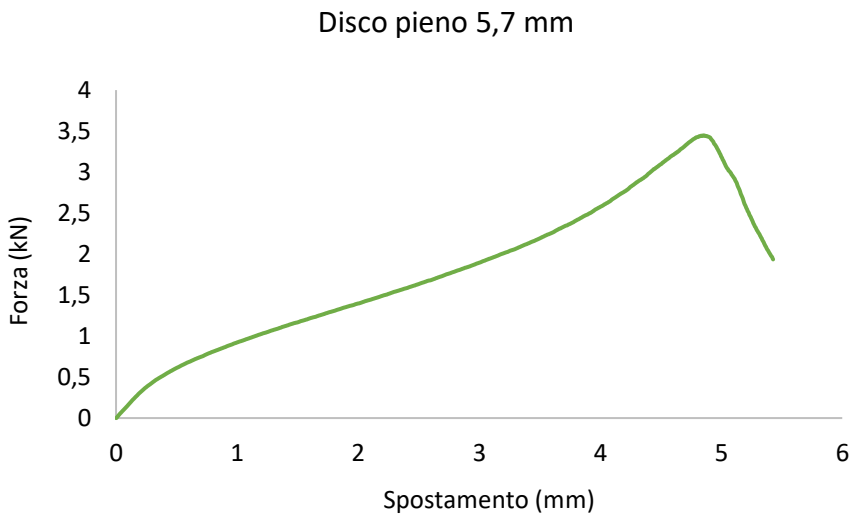

Figura 27 – Grafico spostamento – forza su un disco pieno di spessore = 5,7 mm

La prima parte dei risultati verterà sull'analisi dei dati appartenenti alla serie di dischi a densità massima, per cui un confronto con variazione dello spessore. Successivamente si osserveranno i dati sui parametri variabili dell'infill a spessore costante, dato che l'unica serie di provini che ha subito variazione di spessore è quella dei dischi pieni, con valutazioni generali in base alle forze e quindi, con il fine ultimo di analizzare l'andamento del parametro Shear Strength.

I dati ricevuti una volta terminato l'attraversamento del punzone (tabella 1) sono stati posti in un piano spessore - forza (figura 27a) e in un piano spessore – shear strength (figura 28).

Nella prima serie di provini con spessore 1,5 mm hanno permesso di calcolare un valore di Shear Strength molto simile a quello ottenuto tramite lo stesso calcolo per quanto riguarda i provini con spessore di 2,7mm. Questo è il risultato dato dai valori di forza necessaria al raggiungimento della rottura del provino, che sono variati in maniera proporzionale rispetto all'aumento dello spessore dei provini stessi, avendo così un comportamento simile tra le due misure. Un valore di Shear Strength inferiore di circa 2,3 Mpa rispetto al primo e di 1,5 rispetto al secondo è stato invece raggiunto dal disco con spessore di 5,7 mm, che ha determinato, dopo un iniziale andamento in crescita della curva, un'inclinazione verso il basso, decrescendo in funzione dell'aumentare dello spessore.

Tabella 1 – Considerazione dei principali dati di Shear Strength della prova

Spessore disco forato (mm)	Shear Strength (Mpa)	Forza (kN)
1,5	11,28	1,09
2,7	11,43	1,98
5,7	9,35	3,42

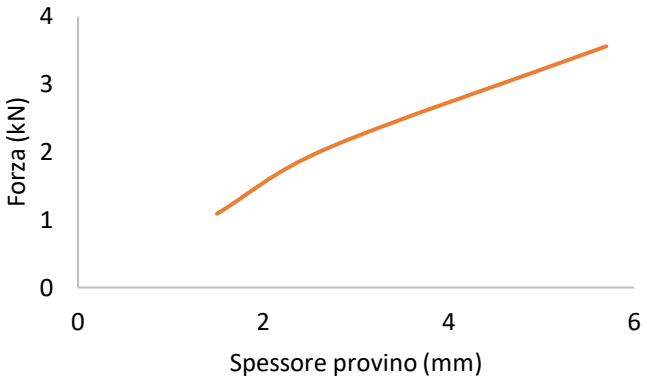

Figura 27a – Spessore - Forza

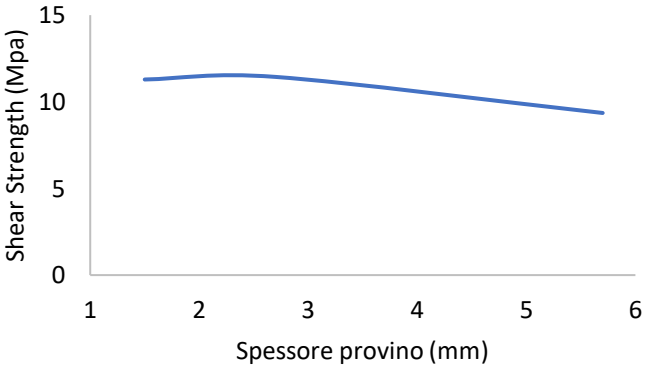

Figura 28 – Spessore Shear Strength

L'andamento della Shear Strength può considerarsi buono, data la non repentinità della sua variazione rispetto al raddoppiare e al triplicare (circa) dello spessore del provino. Anche l'andamento della forza è da considerare piuttosto buono, dato che si ha un andamento decisamente crescente e quindi il comportamento nella risposta del materiale è in generale, lineare.

L'unico provino che determina una discontinuità piuttosto rilevabile è il disco forato con spessore di 2,7 mm, infatti, è proprio a causa di questa rilevazione che le due curve mostrano segni di differente orientazione prima e dopo tale valore. Il buon andamento della prova si può evincere anche dall'andamento dei valori di forza impiegati nella rottura del provino, variano infatti linearmente con l'aumentare dello spessore, con maggiore precisione nelle misure di spessore più alte (dai 2,7 mm ai 5,7 mm in particolare).

La seconda serie di provini testati invece è appartenente alla configurazione della variazione del parametro Infill. In questo caso i risultati ottenuti hanno quindi la caratteristica di variare in base alla percentuale di riempimento (con una sezione a nido d'ape) che va da massimo e raggiunge, a diminuire, una percentuale del 10%, mentre lo spessore è un parametro costante per tutta la serie. Inoltre, tutti i dischi forati sono provvisti dello strato di chiusura da 0,35 mm sulla faccia superiore e da un identico strato di chiusura da 0,35 mm sulla faccia inferiore (tabella 2). Lo spessore, nonostante la presenza dei suddetti strati di chiusura è sempre di 2,7 mm, infatti tali strati sulle facce sono compresi nella definizione dello spessore del disco forato stesso.

Tabella 2 – Andamento della Forza e Shear Strength al variare dell'infill

Shear Strength (Mpa)	Infill	Forza (kN)
3,24	10	0,58
4,23	25	0,73
5,53	50	0,96
11,44	100	1,98

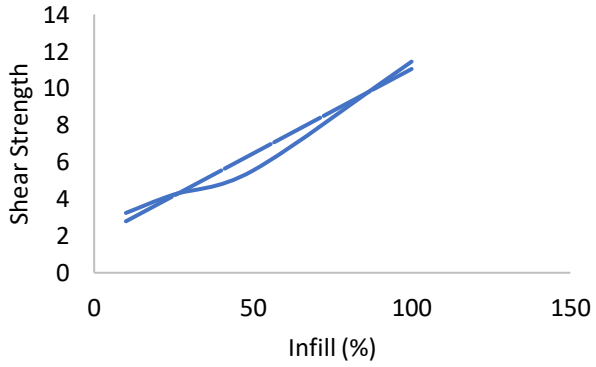

Figura 29 – Andamento Infill – Shear Strength con linea di tendenza (tratteggiata)

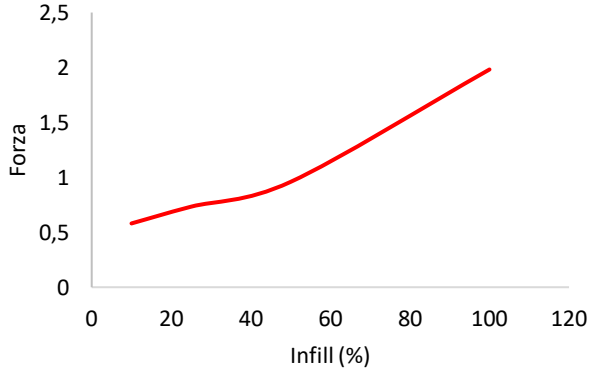

Figura 30 – Andamento Infill – Forza

L'orientazione delle curve che contengono la variazione dell'infill (figure 29 e 30) mostrano un deciso andamento verso l'alto, in maniera quasi lineare: dalla traccia di tendenza si evince che in generale le prove hanno restituito una traiettoria regolare della resistenza al taglio, mentre nel caso reale, specialmente dove l'infill ha un valore di 50, si ha uno spostamento della curva, perché la Shear Strength ha un calo del suo valore in prossimità di questa misura.

Per quanto riguarda invece l'applicazione della forza, non si hanno sostanziali cambiamenti del suo andamento rispetto all'infill: questo perché la variazione della shear strength è direttamente proporzionale all'andamento della forza come si deduce dalla modalità in cui si calcola, quindi si ha soltanto un cambiamento di scala, mantenendo l'identicità della curva. Si può notare la corretta esecuzione e riuscita della prova proprio nella parte di risultati in cui si possono mettere a confronto le percentuali di riempimento:

Tabella 2a – Raddoppio della Shear Strength rispetto al raddoppio dell'Infill

Infill	Shear Strength
100 %	11,44 Mpa
50 %	5,53 Mpa

Un'ulteriore considerazione si può fare proprio sulla linearità di questo confronto: all'aumentare della percentuale di riempimento, il rapporto tra densità e forza applicata è sempre più lineare, avvicinandosi quindi maggiormente ad un comportamento ideale del materiale.

Un confronto utile per quanto riguarda l'uso dello strato di chiusura nei provini, tenendo conto della loro densità, è stato ottenuto tramite la comparazione di 4 prove con caratteristiche diverse ma tutte con almeno un parametro costante, cioè lo spessore di 2,7 mm. La prima prova fa riferimento ad un provino con densità avente infill = 25 % senza strati di chiusura, la seconda e la terza invece possiedono rispettivamente superfici di chiusura di spessore 0,35 e 0,40 mm con un infill comune del 25 % mentre l'ultimo dato inserito nella tabulazione della prova fa riferimento ad un provino avente densità massima, ossia infill = 100% con uno strato di chiusura massimo: si ha cioè la corrispondenza al pieno riempimento del provino e in questo caso l'infill è ridotto allo 0 %. Si ricorda che ove previsti, gli strati aggiunti non hanno valori variabili di densità, sono sempre a riempimento massimo, cioè privi di Infill.

L’interpretazione di questo andamento è complessa: il punto di inizio della retta che ingloba diversi provini è impostato come “0” nel caso in cui gli strati di chiusura sono assenti, perché non ci sono facce superiori o inferiori dato che la sezione è aperta con infill a vista. Si esclude la tabulazione da questo “parametro”, che deve essere comunque considerato nell’interpretazione del grafico.

Successivamente invece si ha una lettura molto più semplice, che tra l’altro conferma anche la buona riuscita della prova di taglio. Infatti, a partire dal test dei provini con spessore = 27 mm e strato di chiusura = 0,35 mm, l’andamento della retta è regolarissimo e passando per le altre due categorie di provini si ha una perfetta corrispondenza del rapporto spessore strati – shear strength. Il comportamento e cioè la risposta al taglio dei dischi forati si può considerare quindi ideale, ottenendo in uscita valori molto affidabili per quanto riguarda il loro significato sperimentale. Si evince infine che l’aggiunta degli strati di chiusura non conferisce irregolarità all’andamento di valori di shear strength, soprattutto perché non hanno uno spessore particolarmente significativo rispetto alle dimensioni totali dello spessore del provino, mentre il parametro decisivo all’inclinazione della curva, che questa sia regolare o meno, è sicuramente la variazione dell’infill, che da 25 % passa ad un valore del 100% pilotando la retta nella direzione osservata. I dati sono riportati nella tabella 3.

Tabella 3 – Confronto tra Infill, Shear Strength e strati di chiusura

Shear Strength (Mpa)	Strato di chiusura (mm)	Infill (%)
1,34	0	25
4,23	0,35	25
4,72	0,4	25
11,44	2,7	100

CONCLUSIONI

In questi capitoli è stato affrontato in maniera piuttosto approfondita il punto di vista dell'additive manifacturing negli ambiti industriali, scientifici e anche biomedici. La frontiera della produzione in tecnologia additiva è quindi sempre più largamente diffusa data la flessibilità di uso ma soprattutto il vantaggio in termini di costi e avanzamento tecnologico.

Infatti, grazie alla possibilità di realizzare parti specifiche si possono risparmiare tempi, costi e anche materiale in eccesso, come si può dedurre dallo stesso nome delle tecniche impiegate: il tipo di approccio è additivo, al contrario dei tradizionali metodi sottrattivi, come ad esempio fresatura, tornitura, ecc. che portano ad un consumo di materiale in eccesso durante la lavorazione.

Nel campo della manifattura additiva sono presenti varietà di materiali diverse tra loro, che possono essere metallici o plastici, liquidi (resina) o anche in grani; in questo caso il filamento utilizzato nella stampa in FDM è un TPU fornito da BioFlex Filoalfa, un polimero termoplastico caratterizzato dalla sua morbidità, consigliato per lo studio in questione.

Le prove di taglio effettuate hanno fornito dei risultati piuttosto chiari, dove l'obiettivo è stato quello di osservare il comportamento del termoplastico TPU, che subendo parametrizzazioni diverse ha fornito comportamenti differenti in base alla modifica di: percentuale di riempimento, spessore, strati di chiusura e numero di strati sulla superficie ricurva a lato della circonferenza (Shell). Grazie all'assortimento dei campioni da testare è stato possibile comparare curve e andamenti per quanto riguarda le forze in gioco, da non sottovalutare, in quanto è stato il parametro fondamentale al calcolo di tale resistenza al taglio detta appunto shear strength. I risultati hanno mostrato:

- al crescere della percentuale di infill, la Shear Strength aumenta in maniera proporzionale
- all'aumentare dello spessore dei provini di taglio, I valori della Shear Strength hanno mostrato un andamento costante
- infine, la condizione che fornisce la più bassa resistenza al taglio, è caratterizzato da un valore di Infill pari al 25 % e spessore di 2,7mm

L'aspetto principale del tema è stato quello di vedere nell'additive manufacturing un'applicazione a livello sanitario, che abbraccia quindi due scienze come l'ingegneria e la medicina dando vita ad uno studio che inizia con delle prove di taglio e che finirà sicuramente con l'uso, sottoforma di modello, da parte di neo-medici. I modelli che verranno realizzati dovranno riprodurre il più fedelmente possibile la qualità dei tessuti umani, per permettere un'esperienza pre-operatoria formativa a chi poi andrà ad intervenire direttamente sul corpo umano, magari sfruttando proprio il TPU con shear strength più bassa possibile.

BIBLIOGRAFIE E SITOGRAFIE

[1] 1967, Swainson, Danimarca

[2] www.3dprintingindustry.com

[2a] 2014, Drew Turney, Dana Goldberg

"History of 3D Printing: It's Older Than You Think", www.redshift.autodesk.com

[3] 1986, Chuck Hull

[4]"Additive Manufacturing: The past and the prominence of 3D Printing" www.pre-scient.com

[5] 1998, J.-P. Kruth, M.C. Leu, T.Nakagawa, "Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping", www.sciencedirect.com

[5a] 2022, Springerlink

[6] 2009, Qingyu Zhang, Mark A. Vonderembse, Mei Cao, "Product concept and prototype flexibility in manufacturing: Implications for customer satisfaction" www.sciencedirect.com

[7] 2021, Gonçalo Cardeal, Diogo Sequeira, Joana Mendonça, Marco Leite, Inés Ribeiro, "Additive manufacturing in the process industry: a process-based cost model to study life cycle cost and the viability of additive manufacturing spare parts", www.sciencedirect.com

[8] LDM WASP extruder, www.3dwasp.com

[8a] Stampare 3D, www.studiodigiacomo.com

[9] 2016, Thomas G. Spears, Scott A.Gold, "In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing" www.link.springer.com

[9a] 2018, John Duffy, "Characterizing metal powders for Additive Manufacturing" www.materials-talks.com

[10] Directed Energy Deposition Process: State of the Art

[11] 2016, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

[12] 2016, Figen Govsa, Tahir Yagdi, Mehmet Asim Ozer, Cenk Eraslan & Ahmet Kemal Alagoz, "Building 3D anatomical model of coiling of the internal carotid artery derived from CT angiographic data", www.link.springer.com

[13] 2019, M.C. Luque, A. Calleja-Hortelano, P.E. Romero, "Use of 3D Printing in Model Manufacturing for Minor Surgery Training of General Practitioners in Primary Care", www.mdpi.com

[14] Yohei Sotsuka, Soh Nishimoto Department of Plastic Surgery, Hyogo College of Medicine, 1-1 Mukogawa, Nishinomiya, Hyogo 6638501 Japan

[15] 2022, Zhiping Fang, Yonghao Xiao, Xue Geng, Liujun Jia, Yuehao Zing, Lin Ye, Yongquan Gu, Ai-ying Zhang, Zeng-guo Feng, "Fabrication of heparinized small diameter TPU/PCL bi-layered artificial blood vessels and in vivo assessment in a rabbit carotid artery replacement model" www.sciencedirect.com

[16] 2020, Agnieszka Harynska, Iga Carayon, Paulina Kosmela, Kamil Szeliski, Marcin Lapinski, Marta Pokrywczynksa, Justyna Kucinska-Lipka, Helena Janik, "A comprehensive evaluetion of flexible FDM/FFF 3D printing filament as a potential material in medical application", www.sciencedirect.com

[17] www.stampa3d-forum.it

[18] Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool www.astm.org

RINGRAZIAMENTI

Il traguardo che ho raggiunto non è soltanto il guadagno di un titolo, ma una vera e propria esperienza che ha caratterizzato alcuni anni della mia vita, di cui sono soddisfatto, in tutto ciò che ha comportato.

Sono arrivato ad un primo obiettivo che è stato per me lo stimolo principale, con la speranza e la certezza che non sarà l'unico.

Ringrazio in prima linea la mia famiglia, che ha compreso i miei obiettivi e mi ha spinto con fiducia affinchè io li raggiungessi, permettendomi con immenso interesse di cogliere questa opportunità sostenendomi in tutte le maniere possibili; vorrei inoltre, se solo si potesse, sventolare questa bandiera con orgoglio a chi non c'è più, che in particolar modo ha desiderato per me un momento come questo.

Ringrazio i miei relatori e correlatori, che mi hanno consigliato il percorso giusto per la realizzazione di questo lavoro, ulteriore esperienza di approfondimento e studio formativo in tale campo.

Ringrazio tutte quelle persone che anche solo per un momento hanno sperato per me il raggiungimento della meta.

Ringrazio tutti gli amici, che hanno considerato questa mia priorità, vicini o lontani, credendo nei miei obiettivi: ragione per cui oggi mi sento orgoglioso di dire che ne è valsa la pena, ringraziando particolarmente tutti quelli che mi hanno aiutato.

Ci sono poi persone che nel corso degli anni hanno creduto in me, avendomi sempre assicurando di essere all'altezza per fare quello che avrei voluto: le ringrazio perché le loro parole risuonavano nella mia mente in ogni momento di difficoltà, che non sono mancati, dandomi uno stimolo aggiuntivo già da tempi precedenti al percorso che ho intrapreso.

Infine, dedico questo felice successo a me stesso.