



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

**Additive Manufacturing nel mondo dello sport: analisi e realizzazione di maschere
protettive facciali in ambito calcistico**

**Additive Manufacturing in the world of sport: analysis and realization of protective
face masks in football**

Relatore: Chiar.ma

Prof. Eleonora Santecchia

Tesi di Laurea di:

Simone Gallozzi

A.A. 2022 / 2023

A tutti coloro che mi sono stati vicini
e mi hanno aiutato a raggiungere
questo grande traguardo

INDICE

-	INTRODUZIONE	5
-	CAPITOLO 1. L'ADDITIVE MANUFACTURING E LE SUE APPLICAZIONI NEL MONDO DELLO SPORT: LA STAMPA 3D DI DISPOSITIVI DI PROTEZIONE	7
	1.1 Le maschere protettive facciali stampate in 3D: il caso Osimhen	9
	1.2 Il caso Prosilas-Lube Volley	12
-	CAPITOLO 2. I MATERIALI	14
	2.1 TPU	14
	2.2 Materiali per Stereolitografia SLA	16
	2.3 Fibra di carbonio	16
	2.4 Fibra di vetro	18
-	CAPITOLO 3. LE TECNOLOGIE DI PRODUZIONE	20
	3.1 Wet lay-up	20
	3.2 Laminazione pre-preg	21
	3.3 Resin Transfer moulding RTM	22
	3.4 Stereolitografia SLA	24
	3.5 Selective Laser Sintering SLS	26
	3.6 Confronto tra tecnologie e scelta della tecnologia più adatta al caso studio	29
-	CAPITOLO 4. WORKFLOW DI FABBRICAZIONE	31
	4.1 Test di resistenza	31
	4.2 Scansione 3D	39
	4.3 Design su misura	42
	4.4 Stampa 3D con SLS	43
-	CAPITOLO 5. CASO STUDIO: REALIZZAZIONE DI UNA MASCHERA PROTETTIVA FACCIALE PER ATTIVITÀ CALCISTICA	45
	5.1 Scelta del materiale, della tecnologia di stampa 3D e test di resistenza	45
	5.1.1 Prova di trazione	46
	5.1.2 Prova di flessione	53
	5.2 Scansione 3D del volto e modellazione 3D della maschera protettiva	60
	5.3 Stampa 3D	67
-	CONCLUSIONE	72
-	SITOGRAFIA	74
-	BIBLIOGRAFIA	76
-	RINGRAZIAMENTI	77

INTRODUZIONE

L'obiettivo iniziale che si pone questa tesi è quello di analizzare l'utilizzo dell'Additive Manufacturing nel mondo dello sport, in particolare del calcio, focalizzandosi sulla produzione tramite manifattura additiva di differenti tipologie di dispositivi di protezione per le varie zone del corpo affette da traumi.

Verranno quindi analizzati questi dispositivi di protezione stampati in 3D, con particolare attenzione ai device in fibra di carbonio creati per proteggere la zona maxillofacciale e balzati negli ultimi anni agli onori della cronaca sportiva.

Si esamineranno in primo luogo utilità e caratteristiche generali di questi dispositivi, mentre in seguito verranno trattati materiali e tecnologie per produrli. Infine, si riporteranno i vari passaggi da compiere nella realizzazione di un device di questo tipo.

L'obiettivo successivo di questa trattazione è il caso studio su cui si fonda questa tesi e cioè la realizzazione di una maschera protettiva maxillofacciale simile a quelle indossate dai calciatori durante l'attività sportiva.

La tesi si articola in cinque capitoli. I primi quattro rientrano nell'obiettivo iniziale precedentemente descritto e, infatti, questi capitoli sono utili innanzitutto a comprendere il contesto in cui ci si trova e come l'Additive Manufacturing si adatti bene alle esigenze del mondo dello sport, ma servono anche ad approfondire a livello teorico materiali, tecnologie e metodologia di lavoro per realizzare questi device protettivi. Nell'ultimo capitolo, quello del caso studio, verranno riportate in maniera dettagliata tutte le fasi di lavoro che hanno portato alla realizzazione della maschera protettiva. Ovviamente, tutti gli step seguiti nella fase pratica di questo lavoro si basano sulle ricerche fatte in precedenza e descritte sopra.

Il primo capitolo è un capitolo introduttivo nel quale si descrive brevemente prima il concetto di Additive Manufacturing e poi le fasi di lavoro per realizzare un manufatto tramite stampa 3D. Proseguendo sono riportate sia le differenti tecnologie di manifattura additiva esistenti sia i vantaggi che l'Additive Manufacturing porta con sé. Dopo questa fase introduttiva sull'Additive Manufacturing si espone il perché essa si adatti così bene ad essere utilizzata nel mondo dello sport, portando esempi di diversi dispositivi di protezione per le varie zone del corpo indossati dagli atleti durante l'attività sportiva e realizzati tramite stampa 3D. Si farà riferimento al caso delle maschere protettive facciali in carbonio indossate sempre più frequentemente dai calciatori riportando il celebre esempio della maschera in carbonio indossata dal calciatore del Napoli Victor Osimhen. L'argomento delle maschere protettive in carbonio verrà poi approfondito anche tramite pareri di esperti del settore, analizzandone caratteristiche e utilità. Il capitolo si conclude con un focus sulla collaborazione tra l'azienda Prosilas e la Lube Volley per la realizzazione tramite stampa 3D di dispositivi di protezione per le mani utilizzabili in fase di gioco dai due atleti che ne avevano bisogno.

Con il secondo capitolo si inizia ad entrare più nello specifico. Questo capitolo è infatti dedicato ai materiali con cui realizzare questi dispositivi di protezione. All'inizio vengono quindi presentate e descritte quattro diverse tipologie di materiali, scelte dal catalogo Prosilas. Il primo materiale è il TPU (poliuretano termoplastico), usato nella collaborazione Prosilas-Lube Volley, mentre la seconda classe di materiali sono i cosiddetti "materiali per SLA", quindi Resina simil-gomma e Resina simil-ABS. Con il terzo e il quarto materiale si entra nella sfera dei materiali compositi, in particolar modo caricati con fibra di carbonio e fibra di vetro. Andando più nello specifico i materiali scelti all'interno del catalogo Prosilas e che rientrano in queste due classi sono il PA603CF (Poliammide caricata con fibra di carbonio) e il PA12GF (Poliammide caricata con sfere di vetro). Per tutti questi materiali in questo capitolo vengono descritte le caratteristiche, le proprietà e i possibili campi di applicazioni.

Il terzo capitolo ha l'obiettivo di descrivere dettagliatamente le tecnologie di produzione di parti realizzabili con i materiali precedentemente descritti. Vengono analizzate e descritte le seguenti tecnologie: Wet Lay-up, Laminazione pre-preg, RTM, SLA e SLS. Nella parte finale del capitolo, sulla base dei materiali descritti

precedentemente e delle caratteristiche, dei pro, dei contro e degli step di fabbricazione di ciascuna tecnologia differente descritta, verrà identificata la tecnologia migliore per l'obiettivo finale di questa trattazione, ossia la realizzazione di una maschera protettiva maxillofacciale.

Il quarto capitolo ha l'obiettivo di riportare il workflow di fabbricazione di questi dispositivi di protezione stampati in 3D. Viene quindi descritta la metodologia di lavoro e tutti gli step da seguire per arrivare al prodotto finale. In particolare, il primo step riguarda la scelta del materiale che viene fatta in seguito alla verifica che le proprietà del materiale scelto siano adatte all'applicazione. Quindi vengono descritti nel dettaglio i diversi tipi di test da fare sul materiale dando informazioni sulle modalità di test, sulle dimensioni dei provini e sui risultati attesi da queste prove. Le prove descritte sono la prova di trazione, la prova di flessione e la prova d'impatto (prova Charpy e prova IZOD). Il secondo step riguarda la scansione 3D del volto o della zona del corpo che deve essere poi protetta dal device stampato in 3D. Viene quindi descritto il funzionamento di uno scanner 3D, analizzandone le diverse tipologie esistenti e i vantaggi che offre la scansione 3D. Il terzo step è la fase di design. In questa fase, sulla base dell'output della scansione, viene modellata la maschera protettiva o qualsiasi altro tipo di dispositivo di protezione. In questa parte del capitolo viene quindi descritto come passare dall'output della scansione al modello 3D del device protettivo, facendo riferimento e spiegando il concetto di Reverse Engineering. Infine, viene descritto l'ultimo step del workflow di fabbricazione che è la stampa 3D del pezzo e si introducono anche eventuali operazioni da effettuare post fase di stampa.

Il quinto e ultimo capitolo invece riguarda la parte pratica di questa tesi. Vengono infatti descritte tutte le attività svolte per realizzare la maschera protettiva per il volto in fibra di carbonio (PA603CF). Questo capitolo ha quindi l'obiettivo di spiegare perché si è scelto come materiale il PA603CF, portando a supporto della scelta la descrizione e i risultati delle prove di trazione e flessione fatte su dei provini del suddetto materiale. Viene poi indicata anche la tecnologia con la quale realizzare la maschera protettiva in fibra di carbonio. In seguito, viene riportata tutta la fase di modellazione del device protettivo per il volto, partendo dalla descrizione della fase di scansione 3D del volto del soggetto in esame e continuando con la vera e propria fase di design della maschera protettiva, che è stata modellata utilizzando il software NX. Infine, viene presentata la fase di stampa sia di un prototipo della maschera che della maschera vera e propria in fibra di carbonio, andando ad analizzare tecnologia e parametri di stampa 3D.

La trattazione si chiude con la sezione riguardante le conclusioni. In questa sezione verranno riportate le considerazioni finali sul lavoro svolto, il risultato finale e possibili sviluppi futuri.

CAPITOLO 1 - L'ADDITIVE MANUFACTURING E LE SUE APPLICAZIONI NEL MONDO DELLO SPORT: LA STAMPA 3D DI DISPOSITIVI DI PROTEZIONE

Da diversi anni ormai per realizzare un oggetto tridimensionale l'industria manifatturiera può contare non solo sulle classiche tecniche tradizionali di produzione ma anche sulle tecniche di produzione additive. L'Additive Manufacturing si contrappone infatti alle tecnologie di produzione sottrattive, categoria nella quale rientrano tutte le lavorazioni per asportazioni di truciolo come ad esempio fresatura e tornitura, offrendo diverse nuove possibilità in ambito manifatturiero.

A differenza di queste lavorazioni sottrattive, grazie alla manifattura additiva il pezzo finale viene ricavato non più sottraendo materiale dal pezzo di partenza, ma andando ad aggiungere materiale strato su strato fino all'ottenimento dell'oggetto tridimensionale desiderato.

Il processo di realizzazione di un oggetto tramite Additive Manufacturing si compone di diversi step, tra i quali quello della stampa 3D del pezzo ed è per questo che molto spesso si usa il termine "Stampa 3D" in sostituzione del termine "Additive Manufacturing", ma in realtà quest'ultimo termine racchiude in sé i concetti di Rapid Prototyping, Rapid Tooling e Rapid Manufacturing, quindi, è riduttivo identificare l'Additive Manufacturing solo come "Stampa 3D".

Rapid Prototyping, Rapid Tooling e Rapid Manufacturing indicano rispettivamente la capacità di prototipazione rapida, realizzazione rapida di utensili e produzione rapida di parti che sono concetti chiave dell'Additive Manufacturing.

Le fasi di lavoro, riassunte poi nella Figura 1.1 sottostante, per la fabbricazione di un manufatto tramite fabbricazione additiva sono le seguenti:

- Realizzazione del modello 3D, tramite software CAD o scanner 3D;
- Conversione del formato del file CAD in formato STL;
- Slicing, ossia scomposizione in strati stampabili da una stampante 3D del modello progettato;
- Stampa 3D;
- Eventuali trattamenti di post-produzione e finitura superficiale.



Figura 1.1 Gli step del processo di fabbricazione additiva [1]

Esistono tante tipologie di tecnologie di stampa 3D differenti tra loro sia per il processo, sia per lo stato fisico e il tipo del materiale di partenza e sia per le caratteristiche che fanno ottenere al prodotto finale. Ai fini di questa trattazione non verranno descritte tutte, ma solo alcune nei capitoli successivi a questo perché più inerenti alla tematica trattata. Per avere però una panoramica completa e generale sul mondo Additive è possibile osservare in Figura 1.2 le diverse categorie presenti e le loro principali caratteristiche.

ASTM Categories	Main technologies	Material	Process
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Plastic	Cured with laser
	Digital Light Processing (DLP)	Plastic	Cured with projector
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Plastic-Composite	
Material Jetting	Material Jetting (MJ)	Plastic	
	Photopolymer Jetting (PJ)	Plastic	Cured with UV light
Binder Jetting	Binder Jetting (BJ)	Sand-Metal-Plastic	Joined with bonding agent
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Plastic	Fused with laser
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Metal	Fused with laser
	Selective Laser Melting (SLM)	Metal	Fused with laser
	Electron Beam Melting (EBM)	Metal	Fused with electron beam
Direct Energy Deposition	Laser Metal Deposition (LMD)	Metal	Fused with laser
	Laser Engineering Net Shape (LENS)	Metal	Fused with laser
	Electron Beam Additive Manuf. (EBAM)	Metal	Fused with electron beam
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Paper-Composite	

Figura 1.2 Classificazione delle tecnologie di fabbricazione additiva [51]

Tra tutti i vantaggi che l'uso della manifattura additiva porta con sé sicuramente i più importanti sono:

- Totale libertà di progettazione e possibilità di ottenere geometrie non realizzabili con altre tecniche di fabbricazione;
- Riduzione del peso dell'oggetto grazie alla possibilità di deporre materiale solo dove necessario;

- Elevato grado di personalizzazione del prodotto;
- Tempo di costruzione indipendente dalla complessità del componente;
- Rapida realizzazione di modelli fisici e di prototipi;
- Fabbricazione in tempi brevi di parti e prodotti;
- Riduzione di tempi e costi nel passaggio dal disegno al prototipo;
- Drastica riduzione degli sfridi di lavorazione.

Grazie a tutti questi vantaggi le applicazioni nelle quali si ricorre all'utilizzo delle tecnologie additive di manifattura sono sempre di più. Una maggior libertà di progettazione rispetto alle tecnologie tradizionali, la possibilità di realizzare un prodotto completamente customizzato per il cliente e ovviamente la possibilità di realizzarlo in tempi brevi sono tra tutti i vantaggi sopracitati quelli che stanno portando l'Additive Manufacturing e la stampa 3D ad essere utilizzate in sempre più campi di applicazione.

Infatti, grazie a queste possibilità offerte dalla stampa 3D l'Additive Manufacturing è sempre più utilizzata nel mondo dello sport, offrendo la possibilità di realizzare in tempi brevi prodotti su misura, potendo contare su una sempre più ampia gamma di materiali tra cui scegliere.

Questa trattazione si concentrerà quindi esclusivamente sull'uso della stampa 3D nel mondo dello sport, più specificamente nel mondo del calcio per la realizzazione di device per la protezione della zona maxillofaciale, portando però anche esempi di device per proteggere gli arti.

1.1 LE MASCHERE PROTETTIVE FACCIALI STAMPATE IN 3D: IL CASO OSIMHEN

In questi anni sono balzate alla cronaca le famose maschere facciali protettive indossate dai calciatori e realizzate in fibra di carbonio, tra le quali il caso più celebre è quello della maschera indossata dal calciatore del Napoli Victor Osimhen. Ma questa è solo una delle innumerevoli possibili applicazioni dell'Additive Manufacturing nel mondo dello sport e più nello specifico nel mondo del calcio.

Questi dispositivi nascono con il chiaro intento di velocizzare il periodo di recupero post infortunio del giocatore in questione, consentendogli di tornare a giocare in tempi minori e in completa sicurezza. Ovviamente il prodotto finale dovrà essere sia efficace nell'azione protettiva sia il più confortevole e meno invasivo possibile per non pregiudicare le performance dell'atleta, motivo per cui la stampa 3D si sta affermando come la soluzione ideale per la realizzazione di device di questo tipo. Il dispositivo di protezione più conosciuto è sicuramente la maschera protettiva per la zona maxillofaciale indossata dai calciatori (Figura 1.1.1).



Figura 1.1.1 Un esempio di maschera protettiva per la zona maxillofaciale [32]

Tornando alla maschera protettiva in carbonio indossata dal calciatore Victor Osimhen va detto che questo è solo uno dei tanti casi in cui un calciatore ha giocato grazie all'ausilio di questo tipo di dispositivo di protezione, ma l'impatto mediatico che ha avuto questo avvenimento è stato talmente grande da far incuriosire sempre più persone sull'argomento, quando in realtà l'Additive Manufacturing veniva già da diversi anni ampiamente utilizzata anche nel mondo del calcio, soprattutto per realizzare queste maschere protettive.

Analizzando in maniera più dettagliata il caso Osimhen, è utile ai fini di questa trattazione riassumere un'intervista [2] rilasciata al Messaggero dal Professor Gianpaolo Tartaro, chirurgo e ideatore, insieme ad altri due colleghi, della maschera indossata da Osimhen nel campionato di Serie A 2021-2022. Nel corso di questa intervista il Professor Tartaro spiega innanzitutto che l'esigenza era quella di far rientrare il calciatore del Napoli in campo il prima possibile dall'infortunio riportato che consisteva in ben cinque fratture scomposte pluriframmentate allo zigomo sinistro che coinvolgevano anche l'orbita e che dopo aver operato l'atleta, l'uso di una maschera protettiva era l'unico modo per riuscire nell'obiettivo prefissato. Secondo il Professor Tartaro, l'uso di una maschera del genere riduce il rischio di recidiva dell'infortunio del 98%. La maschera è stata realizzata, grazie anche al lavoro dell'Ortopedia Ruggiero, in particolare nella persona di Roberto Riccardo Ruggiero, fisioterapista e tecnico ortopedico, utilizzando carbonio e kevlar e partendo da una scansione del volto 3D di Osimhen. Nel corso dell'intervista il Professor Tartaro spiega anche come nella progettazione della maschera si sia deciso di distanziarla in alcuni punti dal volto, per evitare che un nuovo trauma potesse interessare di nuovo la zona dello zigomo e della mascella, che era la zona dove sono state realizzate le incisioni per ricomporre le fratture del calciatore. Nella modellazione della maschera si è tenuto conto soprattutto delle zone interessate dal trauma da andare quindi a proteggere la meglio, ma si è tenuto conto anche delle richieste del calciatore per rendere il device più confortevole e meno limitante possibile sulla performance sportiva. Il risultato è stato quello di una maschera che pesa quasi zero grammi e che ha consentito al calciatore di tornare in campo dopo soli due mesi dall'infortunio e con straordinari risultati. In Figura 1.1.2 è mostrata una fotografia della maschera indossata dal calciatore Victor Osimhen.



Figura 1.1.2 La maschera protettiva indossata dal calciatore Victor Osimhen [36]

Indossare la maschera in carbonio è stato per il calciatore Victor Osimhen così importante e così rassicurante che nella stagione calcistica 2022-2023 ha continuato a indossarla, anche se in un modello differente, realizzato sempre dall'Ortopedia Ruggiero, più piccolo e dinamico, visto anche il graduale ricomponimento della frattura iniziale.

Questo esempio rende chiara l'utilità e l'efficacia di questi dispositivi di protezione, realizzabili in pochissimo tempo grazie alla stampa 3D e completamente personalizzabili, sulla base delle richieste e delle necessità del singolo soggetto.

Per approfondire ancora di più l'utilità e le caratteristiche di questi device sono state fatte delle apposite domande a un esperto del settore, il Dottor Filippo Lontri, che grazie alle sue competenze in ambito medico e fisioterapeutico ha potuto fornire una bella panoramica sull'argomento delle maschere protettive in carbonio. Il Dott. Lontri spiega come questi dispositivi di protezione per la zona maxillofacciale siano utili per proteggere praticamente tutti i tipi di traumi facciali, come quelli nella zona dell'orbita, dello zigomo, del naso, della fronte, dell'arcata sopraccigliare e del seno mascellare. Egli prosegue dicendo che ovviamente il rientro in campo per un calciatore che ha subito una frattura in una di queste zone non è del tutto sicuro anche indossando una maschera protettiva; perciò, è bene far riassorbire il più possibile la frattura e non accelerare troppo i tempi di recupero necessari anche perché il calciatore indossando la maschera potrebbe sentirsi troppo protetto e sicuro e trascurare il rischio di un possibile nuovo infortunio in questi casi. Infatti, secondo il suo parere, nei traumi minori, l'uso di maschere protettive per un calciatore riduce sicuramente il tempo di assenza dal campo, ma per le fratture molto gravi permangono dubbi e pareri discordanti sull'utilizzo di questi device. D'altro canto, il Dott. Lontri termina spiegando come portare più a lungo questi dispositivi di protezione anche dopo la guarigione faccia evitare il rischio di recidiva presente quando si guarisce da una frattura.

In questa prima parte del capitolo, quindi, si è parlato dell'Additive Manufacturing, del suo utilizzo nel mondo dello sport e si è fatta una panoramica dettagliata sull'esempio più celebre dell'uso della stampa 3D nel mondo del calcio, cioè la realizzazione di queste maschere protettive in carbonio, volte a proteggere il volto degli atleti, contenendo possibili urti o colpi sulle zone colpite da traumi precedenti.

La realizzazione di maschere protettive per la zona maxillofaciale è solo una delle tante possibili applicazioni dell'Additive Manufacturing nel mondo dello sport, anche perché grazie alla stampa 3D è possibile realizzare device protettivi per diverse parti del corpo e non solo per la zona maxillofaciale. A sostegno di ciò viene qui presentato un esempio dell'utilizzo della stampa 3D nel Volley.

1.2 IL CASO PROSILAS-LUBE VOLLEY

Per quel che riguarda, infatti, il caso di device per proteggere gli arti superiori, in maniera più specifica le mani, si può prendere come riferimento il lavoro dell'azienda Prosilas, in collaborazione con Lube Volley, per realizzare per i giocatori Ivan Zaytsev e Enrico Diamantini dei dispositivi di protezione per le mani utilizzabili in fase di gioco dai due atleti. Dispositivi di protezione che dovevano essere al tempo stesso personalizzati e su misura per entrambi i giocatori e funzionali, cercando sempre una soluzione innovativa. Era necessario trovare, in un caso un'alternativa al tutore temporaneo fino a quel momento indossato come sostegno all'articolazione del mignolo destro che aveva subito un trauma, mentre nell'altro serviva la sostituzione del tape medico utilizzato abitualmente per avvolgere e irrigidire le dita della mano destra durante le fasi di gioco a maggior impatto.

L'azienda Prosilas ha valutato in entrambi i casi che i limiti principali delle soluzioni fino a quel momento impiegate erano dati dai materiali non tecnicamente performanti utilizzati e dalla mancanza di personalizzazione che ovviamente determinava un feeling non ottimale. Questi limiti sono facilmente superabili con l'utilizzo della stampa 3D, essendo questa l'unico metodo per realizzare rapidamente e con precisione assoluta, device su misura, riutilizzabili e con materiali particolari.

La prima fase per la realizzazione dei device è l'acquisizione del modello 3D, fatta in entrambi in casi dai calchi in gesso delle mani dei due giocatori, tramite l'utilizzo di uno scanner 3D. Poi segue la fase progettuale che insieme al reverse engineering delle superfici ha contribuito alla modellazione di un design perfettamente su misura e customizzato in grado di proteggere e bloccare l'articolazione infortunata, in un caso, e di dare sostegno in pieno comfort, nell'altro. In Figura 1.2.1 sono riportate le immagini di queste due fasi di scansione 3D della mano e di progettazione 3D attraverso il reverse engineering dei dispositivi di protezione.

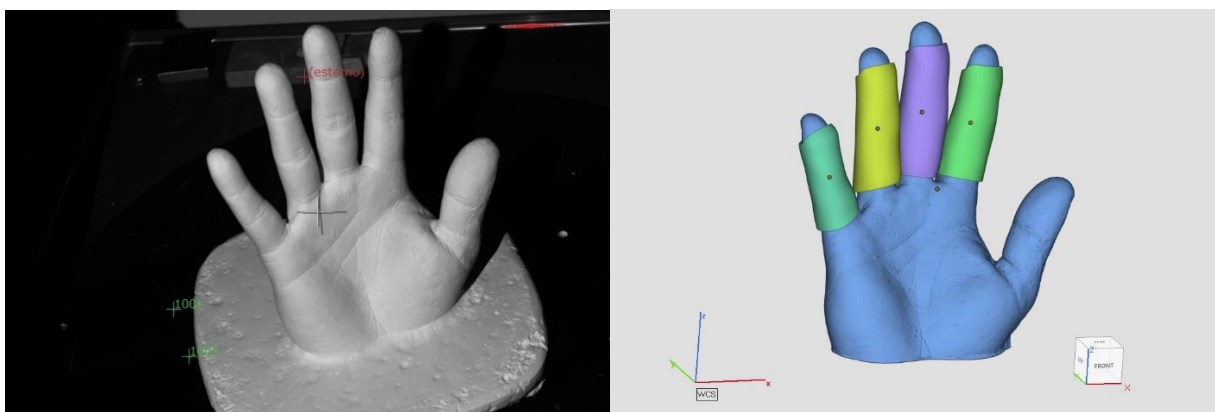


Figura 1.2.1 A sinistra la scansione 3D della mano, a destra la progettazione 3D [3]

I dispositivi realizzati con la tecnologia SLS, Selective Laser Sintering, sono poi stati testati in campo e, grazie ai feedback degli atleti, è stato possibile per Prosilas perfezionarli progressivamente, fino al miglior risultato ottenibile, arrivando alla versione definitiva in tempi brevissimi.

Per ottenere questi dispositivi personalizzati ed estremamente confortevoli Prosilas ha scelto il TPU, per le caratteristiche di flessibilità e resistenza meccanica agli urti. Il poliuretano termoplastico è un polimero

elastico, un materiale versatile e resiliente: resiste agli urti, alle abrasioni, agli strappi e agli agenti chimici e atmosferici, inoltre mostra impermeabilità all'acqua e ai gas. Per le caratteristiche fisiche, l'ampia gamma di durezza e la flessibilità mostrata in assenza di plastificanti il TPU viene considerato come il punto di contatto tra gomma e plastica.

La bontà dei risultati raggiunti da Prosilas nella realizzazione di questi device è testimoniata anche dai test di resistenza effettuati sul materiale utilizzato dal loro fornitore BASF 3D Printing Solutions. Durante questi test si è cercato di replicare una partita di pallavolo in laboratorio, valutando la resistenza chimica del materiale, la resistenza sul breve e lungo periodo e, infine, la stabilità del colore.

Il test di resistenza, a stretto contatto con il sudore sintetico, ha permesso di verificare la stabilità meccanica del materiale rispettivamente dopo 30 minuti, dopo 7 giorni e dopo 14 giorni.

Le parti sono state testate dopo tali periodi, sia per la resistenza alla trazione, sia per allungamento a rottura e in seguito è stato eseguito un test d'impatto improvviso per simulare la schiacciata. Tutti questi test hanno dato esiti positivi sulla bontà del materiale usato. In Figura 1.2.2 è possibile osservare il grafico dei risultati del test d'impatto improvviso eseguito.

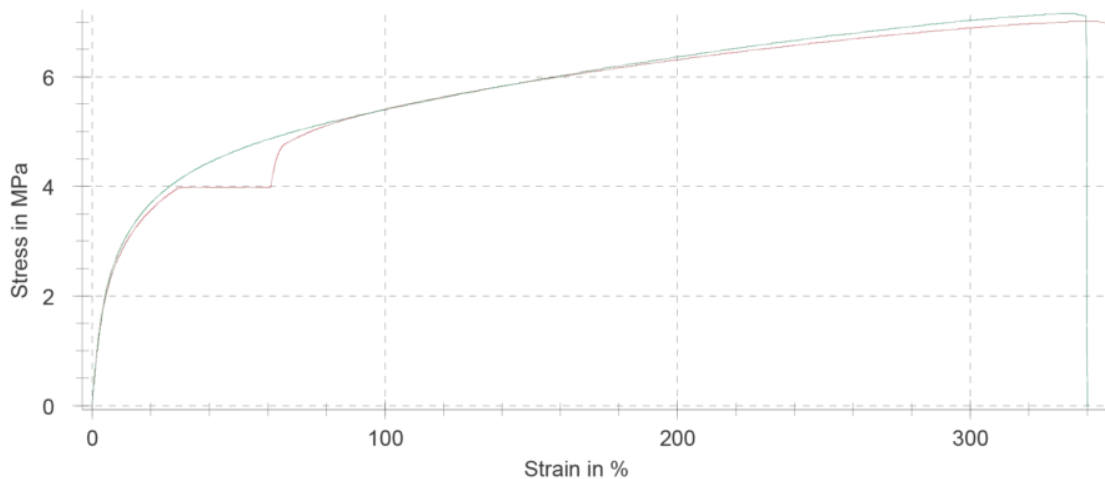


Figura 1.2.2 Grafico test d'impatto improvviso [3]

Infine, la misurazione del colore, che è servita a determinarne la stabilità nel tempo, ha confermato che non ci sono fenomeni di ingiallimento, né mutamenti degni di nota dopo 14 giorni.

Questo esempio della realizzazione di device protettivi per le mani tramite l'uso della stampa 3D mostra quindi come sia possibile realizzare parti con una elevata durabilità e una resistenza notevole. Inoltre, non è stato riscontrato nessun degrado significativo, a garanzia della totale longevità del prodotto anche sotto ripetuti stress e in condizioni chimiche particolari. Gli stessi atleti sono rimasti entusiasti dei prodotti realizzati da Prosilas, a dimostrazione della estrema adattabilità della stampa 3D ad essere utilizzata anche nel mondo dello sport, in questo caso del Volley.

Il caso Prosilas – Lube Volley è solo uno dei tanti esempi di utilizzo dell'Additive Manufacturing nel mondo dello sport e riguarda solo uno dei tanti possibili materiali utilizzabili per i diversi scopi.

Nel prosieguo della trattazione verranno approfonditi materiali, tecnologie e workflow di fabbricazione, terminando poi con il caso studio su cui si basa questa tesi e cioè la realizzazione di un device per la protezione della zona maxillofaciale.

CAPITOLO 2 – I MATERIALI

Sono tanti i materiali che possono essere impiegati nella realizzazione di device per la protezione delle varie zone del corpo. A seconda dell'applicazione, infatti, si possono scegliere materiali più o meno resistenti, flessibili e costosi e tutti in grado di essere stampati in 3D proprio perché nel corso degli anni l'evoluzione dell'Additive Manufacturing ha reso possibile l'utilizzo di una gamma di materiali sempre più ampia, in modo da ottenere ogni volta il prodotto migliore e più adatto alla richiesta del cliente. In questo paragrafo verranno quindi descritti solo alcuni dei possibili materiali da utilizzare, scelti tra quelli che poi sono stati considerati per il caso studio su cui si fonda questo elaborato.

2.1 TPU

Come visto nell'esempio riportato nel capitolo precedente del caso Prosilas – Lube Volley i materiali plastici sono altamente utilizzabili per questo tipo di applicazioni. Nello specifico nell'esempio riportato veniva utilizzato il TPU, ossia un poliuretano termoplastico bianco (Figura 2.1.1) o nero.

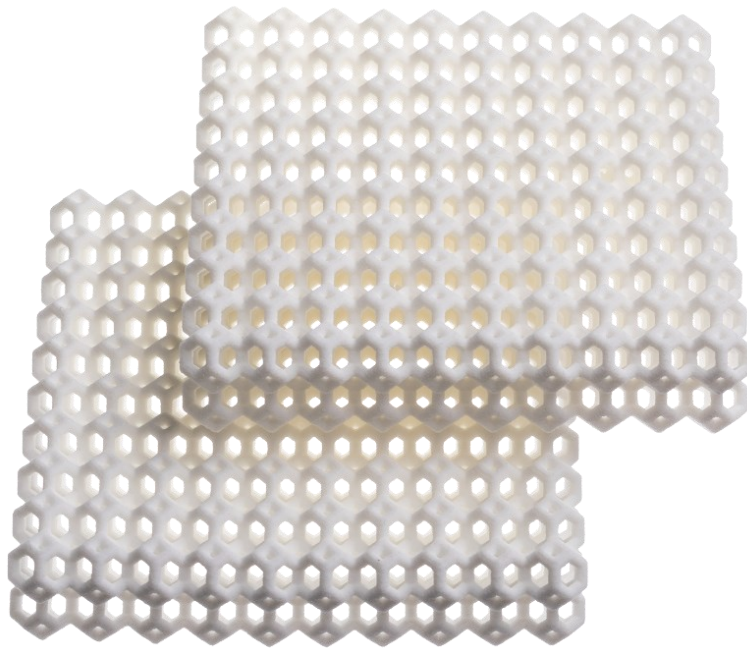


Figura 2.1.1 TPU prima di essere processato [5]

Questo è uno tra i materiali più utilizzati nel settore della produzione industriale con tecnologie additive e può essere processato con le tecnologie Selective laser Sintering (SLS) perché si trova sotto forma di polvere.

Le proprietà che acquisiscono le parti in sinterizzato laser sono eccellenti: elevata resistenza e rigidità, buona resistenza chimica, comportamento costante eccellente a lungo termine e alta risoluzione dei dettagli. Vengono qui di seguito riportate alcune proprietà, consultabili sui datasheet presenti sul sito di Prosilas, del Tpu White (Tabella 2.1.2) e Black (Tabella 2.1.3).

PROPRIETÀ	VALORI DIREZIONE X	VALORI DIREZIONE Z
Tensile Strength	8 MPa	7 MPa
Tensile Elongation at break	270 %	130 %
Tensile Modulus	75 MPa	75 MPa
Flexural Modulus	70 MPa	70 MPa
Charpy Impact Strength (notched 23°C)	No break	No break
Charpy Impact Strength (notched -10°C)	60 kJ/m ²	58 kJ/m ²

Tabella 2.1.2 Alcune delle proprietà del TPU White consultabili sul datasheet presente sul sito di Prosilas

PROPRIETÀ	VALORI DIREZIONE X	VALORI DIREZIONE Z
Tensile Strength	8 MPa	5 MPa
Tensile Elongation at break	360 %	100 %
Tensile Modulus	85 MPa	85 MPa
Charpy Impact Strength (notched -30°C)	No break	No break

Tabella 2.1.3 Alcune delle proprietà del TPU Black consultabili sul datasheet presente sul sito di Prosilas

Le parti realizzate con polveri di TPU possono essere impiegate in condizioni complesse. Basti pensare che grazie all'alta resistenza agli impatti e alla buona resistenza a contatto con olio ed agenti chimici, molte delle guarnizioni presenti sui macchinari industriali, sono realizzate in questo materiale. Il suo utilizzo è quindi consigliato per tubi e guarnizioni, per l'abbigliamento tecnico e la calzatura e per tutte quelle applicazioni dove sia necessario disporre di un materiale in grado di replicare la gomma, come nel caso dei device per la protezione delle mani. Le parti sinterizzate in TPU consentono poi l'applicazione di varie finiture, tra cui la verniciatura, la colorazione, la lisciatura chimica e vari tipi di coating. In Figura 2.1.4 è possibile osservare come appare il TPU Black dopo essere stato processato.



Figura 2.1.4 TPU Black dopo essere stato processato. Materiale senza finitura. [5]

2.2 MATERIALI PER STEREOLOGRAFIA SLA

Un'alternativa al TPU, materiale in polvere, è rappresentata dai polimeri allo stato liquido. Le parti da realizzare con questi materiali sfruttano la tecnologia della Stereolitografia (SLA), grazie alla quale la resina fotopolimerizza e si indurisce. I materiali SLA offrono numerose proprietà meccaniche e consentono di produrre parti con caratteristiche simili all'ABS o al polipropilene stampati a iniezione, adatte per diversi tipi di applicazioni e per la realizzazione di prototipi. Le caratteristiche principali di questi materiali sono buona rigidità, resistenza e durabilità, unite a trasparenza, resistenza alle alte temperature e flessibilità. Ovviamente a seconda del tipo di materiale queste proprietà variano, consentendo di scegliere il materiale più adatto per l'applicazione. Vengono di seguito proposti due tabelle con le proprietà di due materiali per SLA presenti nel catalogo Prosilas: la Resina Simil-Gomma e la Resina Simil-ABS.

La Resina Simil-Gomma è un materiale nero, flessibile, che replica le caratteristiche delle comuni gomme per stampaggio ad iniezione.

La resina Simil-ABS, invece, è una resina multiuso con un buon rapporto qualità-prezzo. È il materiale giusto quando si necessita di un prototipo il più vicino possibile all'oggetto finale.

In Tabella 2.2.1 e in Tabella 2.2.2 sono riportate alcune proprietà, consultabili sui datasheet presenti sul sito di Prosilas, della Resina Simil-Gomma e della Resina Simil-ABS.

PROPRIETÀ	VALORI
Density	1 g/cm ³
Elongation at break	30 ~ 60 %

Tabella 2.2.1 Alcune delle proprietà della Resina Simil-Gomma consultabili sul datasheet presente sul sito di Prosilas

PROPRIETÀ	VALORI
Density	1,02 g/cm ³
Elongation at break	13 ~ 25 %
Tensile Strength	30 ~ 45 MPa
Tensile Modulus	1200 ~ 1900 MPa
Flexural Strength	50 ~ 80 MPa
Flexural Modulus	1000 ~ 1800 MPa

Tabella 2.2.2 Alcune delle proprietà della Resina Simil-ABS consultabili sul datasheet presente sul sito di Prosilas

2.3 FIBRA DI CARBONIO

Quando si parla di device per la protezione della zona maxillofacciale si parla inevitabilmente delle maschere protettive realizzate in fibra di carbonio. Ovviamente si entra quindi nell'ambito dell'utilizzo dei materiali compositi nei quali la matrice è un polimero, mentre il rinforzo è appunto realizzato in fibra di carbonio. I compositi in fibra di carbonio sono tra i più in uso, proprio per le straordinarie proprietà, a fronte di un costo elevato, che possiedono. Infatti, la fibra di carbonio è quasi quattro volte più resistente e rigida dell'alluminio, nonché il 40% più leggera. Le fibre di carbonio vengono realizzate attraverso un processo industriale che impiega una materia prima, solitamente poliaccrilonitrile o un sottoprodotto del legno, e la porta a una temperatura elevatissima, "bruciando" di fatto tutti i componenti del materiale a parte il carbonio. Le fibre risultanti sono strutture cristalline costituite quasi interamente da carbonio, che vengono intessute tra loro per produrre quella che viene comunemente definita fibra di carbonio. Queste fibre possono essere aggiunte

a una resina per produrre lastre modellabili, intrecciate in un tessuto oppure aggiunte a una polvere per essere poi sinterizzate o unite da una stampante 3D. La resina è usata per tenere assieme le fibre e creare poi quando anche la resina indurisce tramite un indurente o catalizzatore, un composito rigido. Esistono centinaia di tipi di resine adatte allo scopo, come ad esempio le resine epossidiche, che abbinano massima resistenza e peso più leggero a un costo molto elevato, oppure il poliestere che è più facile da usare ed economico, ma ha robustezza e resistenza alla corrosione ridotte.

I materiali compositi come le plastiche rinforzate con fibre di carbonio possono avere una resa superiore a quella delle parti realizzate mediante la lavorazione meccanica di acciaio, legno o alluminio. Le fibre di carbonio conferiscono maggiore resistenza al materiale di base, ma non aggiungono molto peso, per cui, a parità di peso, questi compositi sono spesso molto più resistenti rispetto ai materiali omogenei. Vengono infatti utilizzati per realizzare condotti, collettori, prese d'aria per i motori delle automobili, telai per il settore aerospaziale, attrezzature sportive ad alte prestazioni e applicazioni per la produzione di imbarcazioni. Le fibre possono essere uni-direzionali e strategicamente allineate per creare forza relativa ad un solo vettore, oppure incrociate, in modo da generare forza in più direzioni e donare alle superfici l'aspetto reticolato tipico delle parti in materiali compositi. Spesso le parti vengono prodotte usando una combinazione di questi due metodi. La fibra di carbonio, che funge da rinforzo viene combinata con il polimero (resina) che funge da matrice.

In generale le proprietà principali che possiedono i compositi in fibra di carbonio sono le seguenti:

- Elevata resistenza meccanica
- Bassa densità
- Capacità di isolamento termico
- Resistenza a variazioni di temperatura e all'effetto di agenti chimici
- Buone proprietà ignifughe
- Elevata rigidità strutturale rapportata ad un basso peso
- Elevata resistenza
- Coefficienti di espansione termica pari o prossimi allo zero

I metodi più comuni per la produzione di parti in fibra di carbonio sono il wet lay-up, la laminazione pre-preg e lo stampaggio a trasferimento di resina (RTM). Tutti questi metodi necessitano di uno stampo e possono richiedere molta manodopera. Gli stampi possono essere realizzati a basso costo con la stampa 3D e questo ha permesso alle piccole e medie imprese di produrre parti per uso finale in fibra di carbonio a un costo molto inferiore rispetto ai metodi tradizionali. Tuttavia, anche quando si ricorre a stampi realizzati con la stampa 3D, ci sono dei limiti legati al volume di produzione e alla geometria. Per questo sono sempre più utilizzate oggi delle polveri di polimero a cui sono state aggiunte fibre di carbonio, in modo da poter poi realizzare il componente finale tramite la tecnologia additiva SLS.

In questo ambito l'esempio che viene riportato è quello del PA603CF, materiale utilizzato da Prosilas. Prosilas ha infatti avuto l'intuizione di utilizzare Poliammide PA12 caricata con fibra di carbonio. Questa rappresenta una soluzione altamente robusta, resistente, funzionale, estetica, competitiva e capace di soddisfare la necessità di molti settori ad alto tasso di performance. Il materiale, utilizzato in Prosilas, viene sinterizzato nelle stampanti 3D SLS attraverso la tecnica del letto di polvere. La fibra di carbonio conferisce a questo materiale durezza, stabilità dimensionale anche sull'asse delle Z e altissima risoluzione superficiale. Le parti sinterizzate a base di PA603CF possiedono ottime proprietà, in particolare rigidità estrema, eccellente resistenza alla deformazione e durezza, leggerezza, conducibilità elettrica e massima resistenza anche sull'asse Z. In Tabella 2.3.1 sono riportate alcune proprietà, consultabili sui datasheet presenti sul sito di Prosilas, del PA603CF.

PROPRIETÀ	VALORI
Sintered Part Density	1,1 g/cm ³
Ultimate Tensile Strength (XY)	85 MPa
Tensile Modulus (XY)	7900 MPa
Flexural Modulus (XY)	9170 MPa
Elongation at Break (XY)	4%
Izod Impact Strength – Notched (XY)	84 J/m

Tabella 2.3.1 Alcune delle proprietà del PA603CF consultabili sul datasheet presente sul sito di Prosilas

L'eccellente rigidità e una ratio massimizzata peso-resistenza consentono di realizzare progetti di parti funzionali per applicazioni per i settori motorsport, automotive, race e per attrezzatura sportiva ad alto impatto. Per quanto riguarda i trattamenti di finitura e post processing le superfici in PA603CF possono essere sabbiate, ma non si prestano alla lucidatura. La colorazione nera che deriva dalla polvere rinforzata con fibre di carbonio permette di ottenere un particolare che risulterà colorato uniformemente in tutto il suo volume. Una eventuale deposizione di rivestimento metallico a fini strutturali può coniugare le eccellenti caratteristiche del materiale di base, con le proprietà termiche e meccaniche tipiche di un metallo a struttura tubolare sottile. In Figura 2.3.2 è possibile osservare come appare il PA603CF dopo essere stato processato.



Figura 2.3.2 PA603CF senza finitura [19]

2.4 FIBRA DI VETRO

Un'alternativa ai materiali già proposti potrebbe essere l'utilizzo di materiali compositi realizzati con fibra di vetro. Il vetro è l'elemento rinforzante più diffuso nel campo dei compositi per l'ottimo rapporto tra proprietà meccaniche e costo. Infatti, in generale, ha proprietà meccaniche inferiori rispetto a quelle proprie della fibra di carbonio, a fronte di un costo decisamente minore. La fibra di vetro è tra le fibre sintetiche quella con densità maggiore e presenta scarsa sollecitazione a fatica, mentre ha ottima resistenza a trazione, compressione e flessione. Le fibre di vetro vengono prodotte filando una massa di vetro fuso attraverso crogioli di platino e successivamente si effettuano dei trattamenti superficiali delle fibre di vetro in modo da

proteggerle, prevenire possibili rotture, migliorarne la lavorabilità e aumentarne la compatibilità con la matrice polimerica.

I metodi più comuni per la produzione di parti in fibra di vetro sono quelli già citati per la fibra di carbonio e anche in questo caso esistono già in commercio delle polveri di polimero già caricate vetro, in modo da poter poi realizzare il componente finale tramite la tecnologia additiva SLS. Anche in questo caso viene riportato come esempio un materiale utilizzato da Prosilas: il PA12GF, ossia Poliammide + sfere di vetro.

Le parti prodotte con questo materiale attraverso le tecnologie SLS si contraddistinguono per le eccellenti proprietà meccaniche, inoltre i componenti realizzati in PA12GF, tramite SLS, hanno un'ottima finitura superficiale che può essere migliorata tramite successivi trattamenti. L'eventuale deposizione di uno strato metallico su tutte le superfici può essere sfruttata per aumentare moltissimo la resistenza meccanica, ottenendo strutture di tipo tubolare, metalliche, costruite attorno un'ossatura di forma molto complessa che può essere realizzata solo tramite processo di fabbricazione additiva. Un ulteriore processo di finitura applicabile è la verniciatura, che può essere realizzata tramite spray o per impregnazione.

Le caratteristiche che rendono il PA caricato vetro un materiale efficiente e funzionale sono:

- elevata rigidità
- elevata resistenza meccanica e all'usura
- buona capacità di carico termico
- ottima risoluzione superficiale
- alto dettaglio dimensionale ed accuratezza
- buona lavorabilità
- comportamento costante a lungo termine

In Figura 2.4.1 è possibile osservare come appare il PA12GF dopo essere stato processato.



Figura 2.4.1 PA12GF senza finitura [20]

CAPITOLO 3 - LE TECNOLOGIE DI PRODUZIONE

Nel descrivere i materiali sono state citate anche alcune tecnologie di produzione di parti realizzate con i suddetti materiali, in particolare per i compositi le tecniche di Wet lay-up, laminazione pre-preg e RTM, ma anche l'SLS, quest'ultima utilizzata anche per polimeri in polvere come il TPU. Infine, proprio per i polimeri, ma allo stato liquido, una tecnologia di formatura utilizzata è la Stereolitografia (SLA). Queste tecnologie verranno tutte descritte e analizzate e alla fine di questo paragrafo verrà proposta una riflessione su quale sia la più adatta allo scopo di realizzare un dispositivo di protezione per la zona maxillofaciale considerando il materiale, i tempi, i costi e tutti gli altri aspetti relativi alla produzione.

3.1 WET LAY-UP

Il Wet lay-up è una tecnica di laminazione manuale nella quale fibre continue vengono disposte manualmente sullo stampo in maniera unidirezionale o in direzioni differenti (tessuti). Lo stampo può essere realizzato a mano o con lavorazioni meccaniche CNC con materiali differenti come cera, schiume, plastica o metallo. Esiste anche la possibilità di realizzare stampi tramite Additive Manufacturing. Dopo aver depositato le fibre queste vengono impregnate direttamente nello stampo applicando la resina tramite un pennello, un rullo o una pistola a spruzzo. Lo stampo è costituito da una sola parte e solo una faccia del laminato viene a contatto con la superficie dello stampo, perciò, il manufatto avrà buona finitura superficiale solo su una faccia. Le fasi della realizzazione di un manufatto in composito tramite Wet lay-up sono le seguenti:

- Costruzione stampo
- Applicazione distaccante
- Deposizione rinforzo
- Impregnazione rinforzo con resina
- Stampaggio
- Estrazione parte

In Figura 3.1.1 è raffigurata una rappresentazione schematica del processo di Wet Lay-up.

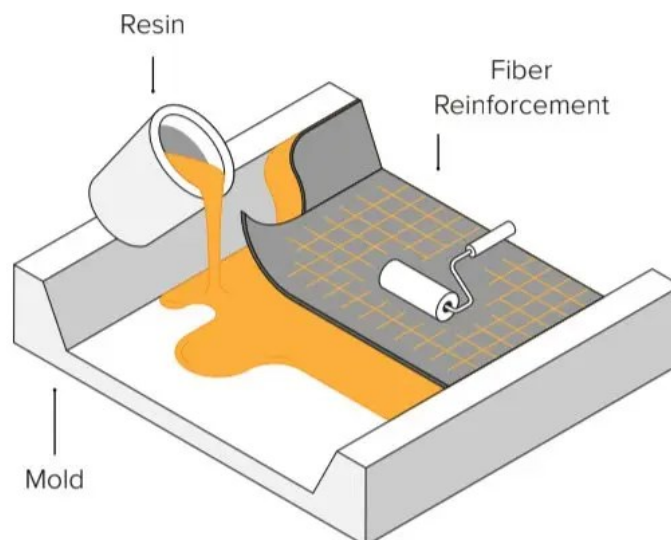


Figura 3.1.1 Schema del wet lay-up [6]

La compattazione del rinforzo impregnato e l'eliminazione della resina in eccesso avvengono tramite rullatura, mentre la polimerizzazione avviene a temperatura ambiente e con tempi di indurimento legati alla quantità di indurente utilizzato. L'estrazione della parte dallo stampo viene resa possibile mediante l'uso di aria compressa o di attrezzature di sollevamento.

Le proprietà meccaniche dello stampato non sono ottimali perché conseguenti all'utilizzo di sistemi produttivi con bassi costi d'impianto dai quali infatti non si pretende l'ottenimento di compositi con prestazioni elevate. Inoltre, vengono utilizzati formati di fibre facili da depositare, per esempio tessuti, che hanno basso grado di anisotropia per cui le potenzialità delle fibre non vengono sfruttate a pieno. Questo metodo è quindi il meno costoso, ma essendo manuale ha un alto rischio di errore se l'operatore non è esperto e abile. Gli errori potrebbero riguardare le fasi di deposizione e impregnazione del rinforzo ma anche la fase di compattazione dei vari strati. Infine, un ulteriore fattore da considerare, dovuto anch'esso al fatto che si tratta di una lavorazione manuale, è la bassa ripetibilità.

3.2 LAMINAZIONE PRE-PREG

I pre-preg o preimpregnati sono ottenuti impregnando il rinforzo con la quantità desiderata di matrice che può essere resina termoplastica o più spesso termoindurente. Il rinforzo è costituito da fibre unidirezionali, nastri o tessuti. I pre-preg sono quindi dei semilavorati in grado di garantire la costanza del rapporto fibre/matrice indispensabile per la ripetibilità delle caratteristiche del materiale, a fronte di un incremento del costo del materiale anche perché le macchine di preimpregnazione sono complesse e costose. L'impregnazione con resina termoindurente viene realizzata tramite due tipi processo: in soluzione o a caldo (hot melt).

Con l'impregnazione in soluzione le fibre vengono immerse in un bagno di resina in soluzione con solvente che, funge da diluente e ha lo scopo di ridurre la viscosità e favorire la bagnatura del rinforzo. Dopodiché il preimpregnato passa tra una serie di rulli per eliminare l'eccesso di resina regolandone la quantità. Il tessuto saturo viene poi riscaldato in un forno per l'eliminazione della maggior parte del solvente. La quantità di solvente rimosso e il grado di reticolazione della resina sono determinati dalla temperatura del forno e dalla velocità di passaggio. Infine, il pre-preg viene avvolto in rotoli con un film distaccante di polietilene su entrambi i lati per evitare l'adesione tra i diversi strati. Il processo di impregnazione in soluzione presenta però due criticità: i possibili problemi ambientali derivanti dalla lavorazione con un solvente volatile e la possibile presenza di residuo di solvente che può provocare difetti di compattazione e vuoti.

Con l'impregnazione a caldo si superano queste problematiche. In particolare, le fibre o i tessuti secchi vengono convogliati tra due film continui di resina supportati da carta siliconata. Si ha poi un passaggio attraverso un sistema di rulli di compattazione riscaldati che impongono pressione e regolano lo spessore. Il materiale poi in seguito alla fase di compattazione, passa attraverso rulli di raffreddamento prima della formazione del rotolo di preimpregnato utilizzando i film distaccanti. I rotoli di preimpregnato con resina termoindurente vengono conservati, nel loro imballo originale, in celle frigorifere, a temperature comprese tra -15°C e -20°C , per bloccare la reazione di polimerizzazione e il raggiungimento della T_{amb} avviene solo dopo il prelievo dalla cella frigo.

Il processo di laminazione pre-preg si basa quindi sulla stratificazione su uno stampo delle varie lamine di pre-preg fino al raggiungimento dello spessore desiderato. Il completamento della stratificazione delle lamine avviene entro 16-72 ore per evitare l'inizio della polimerizzazione. Il pre-preg viene tagliato dai rotoli nei quali è conservato prima della rimozione del film di polietilene. Il taglio è effettuato tenendo conto della forma desiderata, delle dimensioni e dell'orientazione delle fibre. In seguito, viene rimosso uno dei due film

distaccanti per la deposizione del pre-preg e vengono eliminate le bolle d'aria con un rullo. Poi si rimuove il secondo film e c'è una nuova rullatura del laminato e così via fino al raggiungimento dello spessore finale. La polimerizzazione avviene quindi all'interno dello stampo per mezzo di calore e pressione.

In Figura 3.2.1 è presente una raffigurazione schematica del processo di laminazione pre-preg.

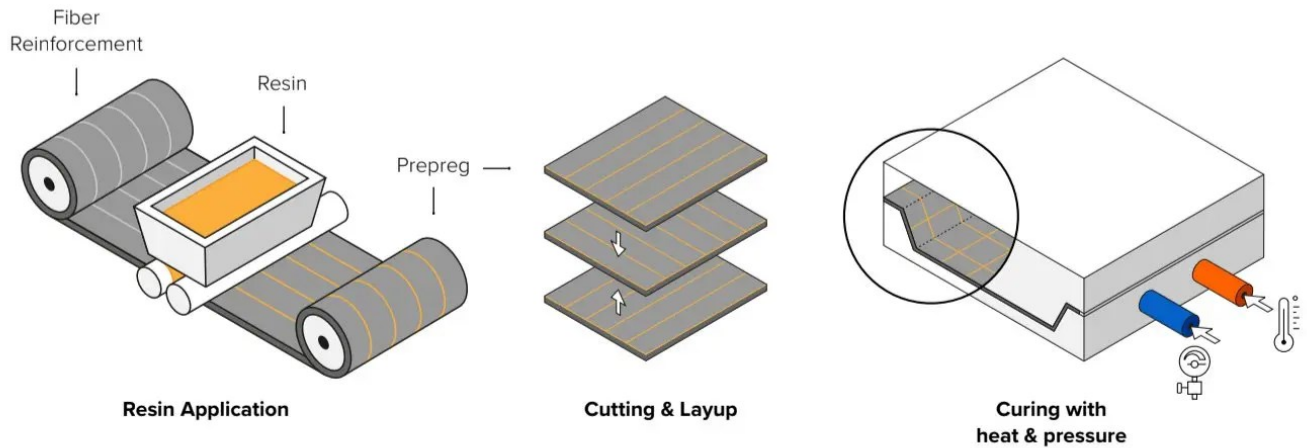


Figura 3.2.1 Schema della laminazione pre-preg [6]

La caratteristica fondamentale dei preimpregnati con resine termoindurenti è il grado di appiccicosità o “tack level” che rappresenta la capacità del pre-preg di aderire sia su se stesso che sulle superfici degli stampi e dipende dal grado di polimerizzazione della resina e dal rapporto resina/fibre. Questa caratteristica consente un più o meno agevole posizionamento degli strati durante l'operazione di deposizione.

Un'altra caratteristica dei pre-preg è rappresentata dalla drappabilità, ossia la capacità di conformarsi alla superficie della forma. Essa dipende dal grado di polimerizzazione della resina, dal rapporto resina/fibre e dal tipo di tessuto/nastro. Solitamente la drappabilità dei pre-preg è limitata e questo li rende difficilmente utilizzabili per realizzare parti con forme molto complesse. I vantaggi della laminazione pre-preg e quindi dell'utilizzo dei preimpregnati sono:

- Migliore controllo del tenore di resina e di rinforzo presenti
- Maggiore uniformità di impregnazione
- Ottenimento di migliori proprietà meccaniche
- Semplicità e rapidità di lavorazione
- Pulizia della lavorazione poiché non si usano resine liquide

Questo procedimento garantisce quindi maggiore precisione e ripetibilità, poiché la quantità di resina è misurata, ma è la tecnica più costosa e infatti normalmente viene impiegata per applicazioni ad alte prestazioni.

3.3 RESIN TRANSFER MOULDING RTM

La Resin Transfer Moulding (RTM), ossia stampaggio a trasferimento di resina, è un processo a stampo chiuso che fa parte delle tecnologie di formatura dei compositi LCM, ossia Liquid Composite Moulding. Queste tecnologie sono basate sull'iniezione di resina termoindurente in una preforma di fibra secca posizionata in uno stampo. Il flusso della resina liquida nella preforma permette di riempire gli spazi vuoti tra le fibre e di

espellere l'aria intrappolata. Questi metodi sono in grado di garantire una riduzione dei tempi di produzione rispetto alle tecniche basate sull'uso di preimpregnati, elevate finiture superficiali, oltre a delle tolleranze strette e la possibilità di fabbricare parti con forma molto complessa e spessori elevati. Risulta quindi possibile produrre in un unico componente parti altrimenti ottenute mediante l'assemblaggio di più sottocomponenti prodotti singolarmente e si possono includere nella preforma secca anche nervature, inserti e rinforzi localizzati. Le tecnologie LCM però rappresentano una valida alternativa solo se la produzione è su larga scala, quindi per dare una quantificazione, se la produttività si aggira tra i 10.000 e i 50.000 pezzi/anno.

Tornando alla descrizione dell'RTM essa permette di fabbricare manufatti in composito a matrice polimerica iniettando sotto pressione la resina entro una cavità, ottenuta chiudendo stampo e controstampo, che riproduce la forma del pezzo, al cui interno è stato preliminarmente posizionato il rinforzo fibroso secco. Lo stampo può essere realizzato con diversi materiali e in base a questo gli stampi vengono classificati in:

- Stampi in composito: costituiti da resina termoindurente rinforzata con fibre di vetro. Sono adatti a piccole serie perché hanno basso costo ma breve vita utile.
- Stampi elettroformati: rivestimento di un modello con un film di Ni o Cr ottenuto per deposizione elettrolitica. Lo stampo è costituito dal film separato dal modello.
- Stampi in metallo: utili nel caso di grandi serie per i loro costi elevati. Conferiscono al prodotto eccellenti finiture e precisione.
- Stampi in altro materiale: ad esempio cemento armato

Il ciclo di fabbricazione del processo RTM è suddiviso nelle seguenti fasi:

- Pulitura stampo: viene eseguita soffiando sulle superfici dello stampo con aria compressa e rimuovendo le particelle di gel-coat o di resina, aderenti alla superficie dello stampo dal ciclo precedente, utilizzando un raschietto realizzato con un materiale che non danneggia lo stampo.
- Applicazione agente distaccante: serve per facilitare l'estrazione del pezzo. Se l'agente distaccante è una pasta allora viene applicata allo stampo mediante un panno di cotone, mentre se è liquido viene applicato a spruzzo e consente anche una copertura della superficie dello stampo più completa e uniforme.
- Applicazione gel-coat: il gel-coat forma lo strato superficiale della parte e consente di migliorare la finitura superficiale e altre proprietà della parte, come la resistenza a corrosione. È formato da resina termoindurente particolarmente dura ed è un efficace rivestimento protettivo della parte. Viene deposto sullo stampo con un pennello o a spruzzo. Il gel-coat provoca l'aumento del tempo di ciclo poiché deve raggiungere uno stato avanzato di gelificazione per non essere alterato nelle successive operazioni, ma il tempo può essere ridotto preriscaldando gli stampi, velocizzando così la polimerizzazione del gel-coat.
- Posizionamento rinforzo, che è costituito dalla sovrapposizione di diversi strati di fibre posizionate in modo da ottenere una preforma, ossia una geometria prossima a quella della cavità tra gli stampi.
- Chiusura e bloccaggio stampo: il controstampo viene chiuso sullo stampo. La forza di bloccaggio deve essere sufficientemente elevata per resistere alle pressioni che nascono all'interno della cavità durante l'iniezione e la polimerizzazione della resina.
- Trasferimento resina: la miscela resina-indurente viene trasferita sotto pressione all'interno della cavità tra stampo e controstampo mediante appositi fori d'iniezione e poi avanza all'interno della cavità dai punti di iniezione verso i fori d'uscita con conseguente impregnazione della preforma e espulsione dell'aria. Il completo riempimento della cavità viene facilitato erogando una quantità di resina maggiore del necessario e permettendo l'evacuazione dell'eccesso di resina dai fori di uscita. Si inietta resina in eccesso (tipicamente l'eccesso ha valori stimati dal 5% al 20%) per superare i problemi legati alla complessità della forma e alle dimensioni della parte da ottenere. I valori di pressione e il tempo d'iniezione possono variare e dipendono dal sistema d'iniezione, dalla viscosità della resina, dalle caratteristiche del rinforzo e dal percorso che la resina deve seguire all'interno della

cavità. Di solito i valori utilizzati sono di 0,5÷4 bar per la pressione d'iniezione e di 20÷120 s per il tempo d'iniezione.

- Polimerizzazione resina: il tempo di polimerizzazione dipende dal tipo di miscela resina-indurente utilizzata, dalle caratteristiche geometriche della cavità, dalla temperatura d'iniezione della miscela e dalla temperatura alla quale viene scaldato lo stampo. Il periodo di permanenza della parte nello stampo per consentire la polimerizzazione è un fattore importante nella determinazione del tempo di ciclo.
- Apertura stampo ed estrazione manufatto: queste operazioni sono effettuate usualmente prima del completo indurimento della matrice. Dopo l'estrazione la parte viene posizionata su un supporto che garantisce la conservazione della forma durante il completamento del ciclo di polimerizzazione. Le difficoltà nell'operazione di estrazione sono legate agli angoli che le superfici della parte formano con la direzione di estrazione.
- Finitura manufatto: la principale operazione di finitura è il taglio dei margini del pezzo corrispondenti alle zone di contatto stampo controstampo. Possono poi seguire altre operazioni come, ad esempio, la verniciatura o la foratura.

In Figura 3.3.1 si può osservare una raffigurazione schematica del processo di RTM.

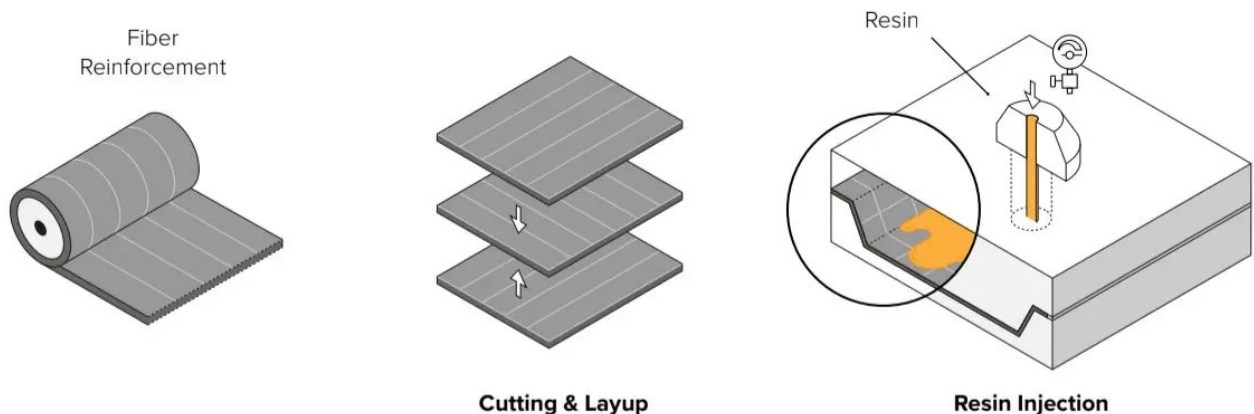


Figura 3.3.1 Schema dell'RTM [6]

L'RTM può essere impiegata in molti campi, per esempio nell'industria automobilistica, in quella aerospaziale e anche per realizzare attrezzature sportive. Le proprietà dei pezzi realizzati con questa tecnica sono buone, ma non si parla di prestazioni elevate, mentre la ripetibilità del processo è ottima in quanto molte fasi del processo di fabbricazione sono automatizzate. I limiti principali di questa tecnologia però risiedono nei costi e nella complessità e per questo si adatta a produzioni su larga scala e non unitarie.

3.4 STEREOLOGRAFIA SLA

La Stereolitografia (SLA) è stata la prima tecnologia additiva sviluppata nei primi anni '80. È un processo che si basa sulla fotopolimerizzazione selettiva, tramite laser puntiforme, di materiale liquido (resina fotosensibile) all'interno di una vasca. È una potente tecnologia di stampa 3D che produce pezzi estremamente accurati e ad alta risoluzione che possono essere utilizzati direttamente per un uso finale, nella produzione a basso volume o per la prototipazione rapida.

Una stampante SLA (Figura 3.4.1) è composta da quattro sezioni primarie:

- Un serbatoio riempito con resina liquida che solitamente è una plastica trasparente e liquida.
- Una piattaforma perforata, immersa nel serbatoio resina. Può essere abbassata e può spostarsi verso l'alto e verso il basso, lungo l'asse Z a seconda del processo di stampa.
- Un laser ultravioletto ad alta potenza.
- Un'unità di controllo computerizzata che controlla la piattaforma e i movimenti del laser UV.

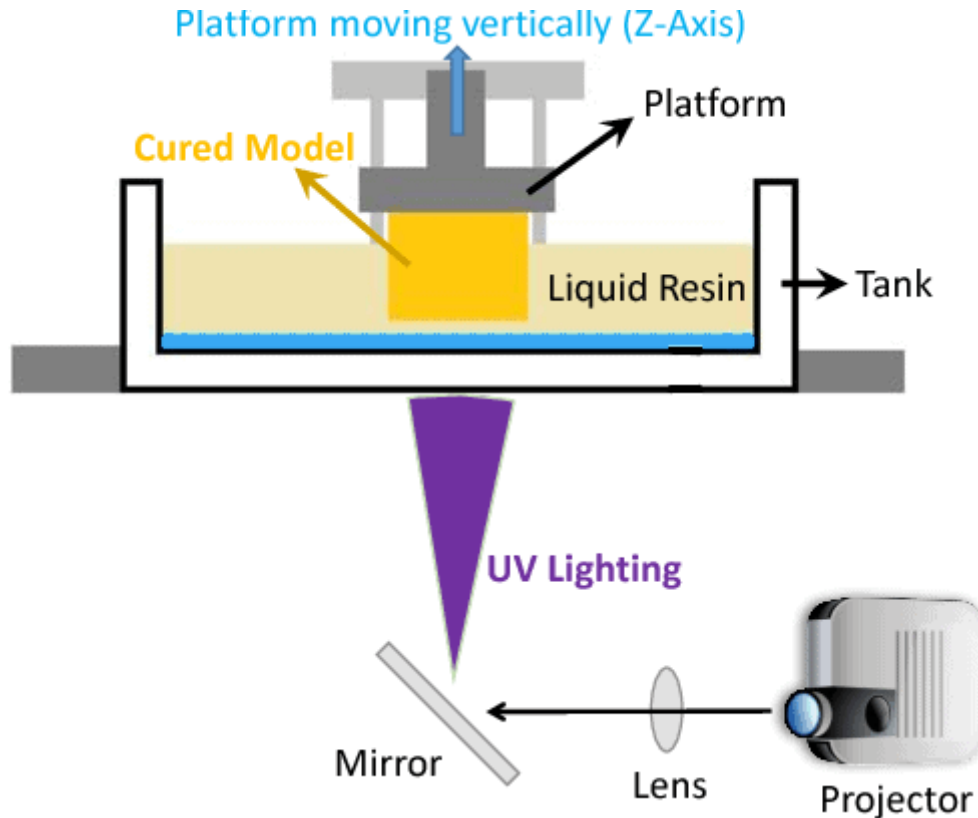


Figura 3.4.1 Schema stampante SLA [21]

Dopo che i dati CAD sono stati inseriti nel sistema, il processo di stampa segue queste fasi:

- Il laser UV traccia la sezione del pezzo sulla superficie di una resina liquida fotosensibile. In qualsiasi punto colpito dal laser, il liquido si solidifica. Il laser è diretto secondo le coordinate appropriate in base al progetto.
- Dopo il primo strato, la piattaforma viene sollevata in base allo spessore dello strato (circa 0,1 mm) e la resina aggiuntiva viene lasciata scorrere al di sotto della porzione già stampata. Il laser, quindi, solidifica il successivo strato e il processo viene ripetuto fino al completamento dell'intera sezione. La resina che non interagisce con il laser rimane e può essere riutilizzata.
- Dopo aver completato la sezione, la piattaforma si solleva dal serbatoio di resina e la resina in eccesso viene scaricata.
- Alla fine del processo, il modello viene rimosso dalla piattaforma, lavato dalla resina in eccesso con alcool e quindi posto in un forno UV per l'indurimento finale. La polimerizzazione post-stampa consente agli oggetti di raggiungere la massima resistenza possibile e diventare più stabili.
- Infine, le strutture di supporto vengono rimosse durante il processo di post-elaborazione. Un'altra operazione di post-lavorazione è il lavaggio per la pulizia di superfici esterne del pezzo senza compromettere le proprietà del prodotto che si realizza immergendo il pezzo in un solvente per un tempo sufficiente a disciogliere il liquido aderente al componente.

Per quanto riguarda i criteri progettuali da tenere conto quando si intende realizzare un manufatto tramite SLA vanno considerati i seguenti aspetti:

- Necessità di strutture di supporto, spesso di forma trabecolare, rastremati nella zona di contatto con il pezzo per favorirne la rottura durante la post-lavorazione.
- Uso di una base sia per migliorare l'adesione del pezzo alla piattaforma durante la costruzione sia per facilitarne il distacco a fine processo.
- Problemi di distorsioni di strutture snelle a causa delle tensioni di ritiro.

I vantaggi della Stereolitografia sono molti e spiegano il perché essa sia una tecnica così utilizzata. I pro dell'utilizzo di questa tecnica sono i seguenti:

- Dettagli raffinati ed eccellente precisione: lo spessore dello strato ottenuto dalla Stereolitografia è molto piccolo (da 0,05 a 0,10 mm) e con il raggio laser molto sottile è possibile ottenere dettagli piccoli e complessi con una finitura molto realistica. È possibile anche creare pezzi piccoli ad alta definizione, così come pezzi più grandi fino a due metri di dimensione, mantenendo alta precisione e tolleranze ristrette.
- Elevata velocità di stampa: si traduce quindi in elevata produttività.
- Possibilità di realizzare design complessi: anche se la SLA utilizza strutture di supporto, è ideale per design complessi poiché utilizza resine e questo conferisce fluidità al design che aiuta a ottenere caratteristiche interne complesse.
- Finitura superficiale liscia: grazie alla sua finitura superficiale di alta qualità e all'alta definizione, i dettagli esterni e interni possono essere visti perfettamente. È anche utile per i prototipi funzionali per una panoramica generale.
- Nessuno spreco di materiale: la resina termoindurente che viene drenata dopo la realizzazione del pezzo può essere riutilizzata senza sprechi. Lo spreco di materiale prodotto da SLA è trascurabile ed è anche un fattore chiave nella scelta di SLA come opzione più economica per i progetti di stampa 3D.

A fronte di questi vantaggi la Stereolitografia presenta però anche i seguenti limiti:

- Scelta limitata di materiali da stampare: l'SLA non offre un'ampia selezione di materiali da stampare. Anche tra le resine impiegabili la scelta è limitata, vengono usate solo resine termoindurenti e fotoattive, il che rende la tecnologia molto limitata con i materiali di costruzione.
- Costi elevati: la stereolitografia è più costosa rispetto alle sue controparti più economiche e utilizzate per costruire prototipi. Ciò è dovuto principalmente a processi e materiali fotochimici più costosi.
- Basse proprietà meccaniche: la maggior parte delle resine standard è adatta per strutture delicate e dettagliate, utilizzate principalmente per scopi espositivi come i prototipi. Le resine SLA non sono paragonabili per resistenza e prestazioni meccaniche a filamenti come PC, nylon o altri materiali e pertanto, non sono raccomandati per operazioni in cui sono previsti elevato stress o carichi ciclici.
- Possibili problemi dovuti al ritiro e alle tensioni interne, alla presenza di molta luce durante il processo e impossibilità di realizzare strutture cave.

I campi di applicazione della Stereolitografia sono tanti e riguardano soprattutto la prototipazione rapida, il settore medico ma anche quello della gioielleria.

3.5 SELECTIVE LASER SINTERING SLS

L'SLS, Selective Laser Sintering, è una tecnologia additiva che sfrutta la sinterizzazione selettiva e localizzata delle polveri attraverso una fonte di calore diretta, generalmente laser. La tecnologia SLS utilizza polveri con granulometria controllata come materiale di produzione che viene depositato uniformemente all'interno della camera della macchina. I materiali di stampa vengono fusi mediante l'applicazione di energia termica

fornita da un laser ad alta potenza che consente di sinterizzare localmente le particelle strato per strato. L'SLS è una delle tecnologie di stampa 3D più popolari che produce componenti precisi e durevoli, ottimi per l'uso finale, adatta per la produzione di volumi medio-bassi o per la prototipazione rapida.

In Figura 3.5.1 è riportata la rappresentazione schematica di una stampante SLS.

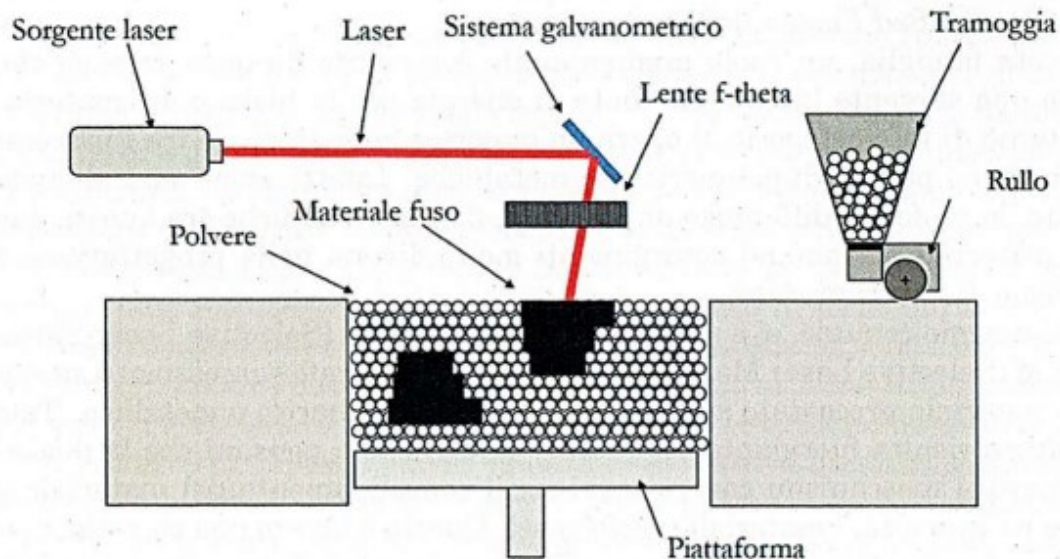


Figura 3.5.1 Schema stampante SLS [51]

L'SLS rientra quindi tra le tecnologie PBF basate, cioè sulla "fusione del letto di polvere" e il processo con cui si realizza il pezzo è il seguente:

- Deposizione dello strato di polvere.
- Il laser traccia il modello di ogni sezione trasversale di un progetto 3D su uno strato di polvere. I percorsi che può compiere il laser sono sia percorsi di contorno (contouring) che percorsi di riempimento (hatching).
- Dopo aver costruito uno strato, la piattaforma di costruzione si abbassa e un altro strato viene costruito al di sopra del precedente. Questo processo continua fino all'esaurimento degli strati e al completamento della parte.
- Raffreddamento della vasca di costruzione: la vasca di costruzione viene portata a temperatura ambiente prima dell'estrazione del componente in modo naturale (lento raffreddamento fino a T_{amb}) o forzato (estrazione del calore dall'area di lavoro). Può quindi essere gestito un parametro fondamentale come la velocità di raffreddamento. Infatti, a una velocità di raffreddamento elevata corrisponde un miglioramento delle proprietà meccaniche, ma una riduzione dell'accuratezza dimensionale, perciò, va trovato il giusto compromesso. Inoltre, grazie al raffreddamento della vasca di costruzione si ha una redistribuzione progressiva del calore e una riduzione delle deformazioni indotte durante il raffreddamento.
- Estrazione del componente: la polvere non sinterizzata viene rimossa tramite sistemi di aspirazione che filtrano la polvere selezionando i granelli di dimensione idonea. Il prodotto finale, avvolto in polvere non processata viene pulito con spazzole e aria pressurizzata. La polvere non sinterizzata può quindi essere riutilizzata, sebbene ci sia una degradazione delle proprietà della polvere all'aumentare dei riutilizzi.

Per quanto riguarda i criteri progettuali da tenere conto quando si intende realizzare un manufatto tramite SLS vanno considerati i seguenti aspetti:

- La polvere non sinterizzata è in grado di sostenere efficacemente i layer in costruzioni: non sono necessari supporti perché gli stress e le temperature sono più basse rispetto, per esempio ai metalli
- Non sono necessari ancoraggi della parte alla piattaforma di costruzione per le contenute tensioni interne durante il processo.

I vantaggi dell'SLS sono i seguenti:

- Elevata produttività: il processo costituisce la più veloce tecnologia di stampa 3D in quanto i laser hanno una velocità di scansione rapida e le polveri utilizzate necessitano solo di una breve esposizione per fondere. Inoltre, è possibile disporre più pezzi nella camera a una distanza minima per sfruttare al massimo lo spazio di costruzione disponibile, in modo da ottenere più pezzi prodotti più velocemente.
- No supporti: a differenza di altri processi di stampa 3D, il pezzo non necessita di strutture di supporto poiché gli spazi vuoti vengono riempiti con polvere inutilizzata che rendono il pezzo autoportante. Ciò consente la libertà di progettare spazi vuoti, elementi sporgenti e elementi molto sottili e questo fa sì che si possano progettare pezzi con componenti o canali interni complessi senza il fastidio delle strutture di supporto; perciò, se si necessita di un design complesso, l'SLS rappresenta una buona scelta e non rende più necessario produrre più pezzi per raggiungere questo obiettivo.
- Ottime proprietà meccaniche e termiche: il processo SLS produce un'adesione molto forte tra gli strati; pertanto, i pezzi hanno buone proprietà isotropiche. Ciò significa che resistenza alla trazione, durezza e allungamento a rottura dei pezzi sono quasi uguali lungo gli assi x, y e z. Inoltre, grazie ai materiali utilizzati, generalmente nylon, i pezzi sono caratterizzati anche da una buona resistenza chimica.
- Altri vantaggi sono: buone precisioni dimensionali e un'ampia gamma di materiali utilizzabili.

Gli svantaggi invece dell'SLS sono:

- Scarsa finitura superficiale: la superficie dei pezzi stampati tramite SLS è ruvida e presenta delle porosità. Per migliorare la finitura superficiale è possibile utilizzare delle tecniche di post-lavorazione come il Vapour Smoothing, grazie alla quale si ottiene una superficie liscia, a prova di perdite e vengono migliorate anche le proprietà meccaniche come resistenza all'urto e allungamento a rottura.
- Elevato tasso di ritiro: poiché la polvere di stampa è sottoposta a temperature elevate per la sinterizzazione, questo significa che, quando inizia a raffreddarsi si ritira, il che può produrre un pezzo meno preciso dal punto di vista dimensionale rispetto ad altre tecnologie di produzione additiva. A seconda del progetto, il tasso di ritiro può raggiungere il 3-4%. Occorre quindi tenere conto nella progettazione di questo ritiro e regolare il volume del pezzo di conseguenza. Inoltre, lo stress causato da questa contrazione può anche deformare o distorcere gli spigoli e gli angoli.
- Costo della macchina elevato.

Infine, per quanto riguarda i campi di applicazione, la tecnologia SLS trova largo impiego nel campo della prototipazione rapida per la realizzazione di oggetti di design molto complessi che richiedono anche buone proprietà meccaniche. Viene utilizzato anche nella produzione grazie all'elevata produttività rispetto ad altre tecniche di produzione additiva, consentendo di aumentare l'efficienza e ridurre i costi di post-elaborazione. I settori in cui si ricorre all'SLS sono diversi e spaziano dal settore automobilistico, alla realizzazione di prodotti elettrici e sportivi o prodotti sanitari e ortopedici.

3.6 CONFRONTO TRA TECNOLOGIE E SCELTA DELLA TECNOLOGIA PIÙ ADATTA AL CASO STUDIO

Sono state presentate e descritte nei paragrafi precedenti tutte le tecnologie che sono state oggetto di riflessione per poter poi realizzare il device protettivo per la zona maxillofacciale. Ora l'obiettivo di questo paragrafo è quello di metterle a confronto e capire quale tra queste sia la più adatta allo scopo, considerando vari fattori, tra i quali i costi, il processo da svolgere, il materiale con cui verrà realizzato il device e la numerosità delle parti da realizzare.

In riferimento alle classiche tecnologie di fabbricazione di manufatti in composito va detto che tutte quelle presentate innanzitutto richiedono la realizzazione dello stampo con tutti i problemi che ne derivano. Progettare uno stampo infatti richiede di considerare molti aspetti che complicano il workflow e aumentano i tempi di realizzazione. Lo stampo infatti può essere realizzato con materiali diversi, valutando il ritiro dimensionale e il coefficiente di dilatazione termica del materiale composito, la rigidità richiesta, la finitura superficiale che si vuole ottenere, gli angoli di sforno e i raggi di curvatura. Lo stampo deve poi essere stabile alla temperatura di laminazione, sopportare la pressione operativa, resistere all'usura, essere compatibile con gli altri strumenti utilizzati, avere una buona resistenza ai solventi di lavaggio e deve essere facile applicare su di esso gli agenti distaccanti.

Quindi è facile capire come, in presenza di altre alternative, si possano scartare queste tecnologie di formatura che necessitano di uno stampo. Inoltre, si è anche detto come con il Wet lay-up sia impossibile raggiungere proprietà meccaniche ottimali e sia invece facile incorrere in errori umani durante la fabbricazione della parte. Con la laminazione pre-preg invece la difficoltà sta nel riuscire a realizzare parti con forma complessa e anche il costo del materiale di partenza è elevato, essendo già un semilavorato. L'RTM è da scartare subito perché lo scopo di questo lavoro è la realizzazione di un singolo device, mentre l'RTM è adatta a produzioni su larga scala.

Rimangono quindi l'SLA e l'SLS. Ci sono molte differenze tra le due tecnologie additive, soprattutto per le proprietà del pezzo finale e per la possibilità di stampare materiali diversi.

Nel caso della sinterizzazione vengono utilizzati come materiale di produzione polveri (come nel caso degli esempi dei materiali proposti da Prosilas, ossia Poliammide caricata vetro o carbonio) che hanno una granulometria controllata che vengono depositate in strati uniformi all'interno della camera di lavorazione. L'energia termica fornita poi dal fascio laser ad alta potenza permette di sinterizzare localmente le particelle. Per la Stereolitografia invece i materiali utilizzati sono del tutto differenti. Infatti, questa tecnologia si basa sulla fotopolimerizzazione di una resina liquida contenuta in una vasca. L'azione di un raggio laser che emette una radiazione ultravioletta polimerizza la resina portando al cambio di stato del materiale.

Ma la differenza fondamentale tra SLS e SLA sta nelle caratteristiche dei pezzi stampati e di conseguenza nei campi di utilizzo e applicazione.

Le parti stampate con SLS hanno caratteristiche di resistenza meccanica e termica superiore rispetto ai pezzi ottenuti con Stereolitografia, a discapito però della qualità della definizione e di una ruvidezza più pronunciata. Grazie alla SLA, infatti, si possono stampare oggetti dalla qualità estetica elevata, paragonabile a quella ottenibile con stampi a iniezione e una precisione dimensionale che può andare sotto il decimo di millimetro.

Per questo l'SLS è soprattutto indicata per la produzione di componenti industriali o prototipi funzionali, mentre l'SLA per tutte le produzioni o campionature nelle quali è richiesta alta precisione e una qualità superficiale elevata.

Un altro fattore di cui tenere conto è che l'SLA è di solito più costosa dell'SLS nonostante con l'SLS le parti resistano ad uno stress meccanico decisamente superiore. Va inoltre considerata, nel caso dell'SLA, la rimozione dei supporti, mentre l'SLS ha il grande vantaggio di non dover ricorrere ai supporti.

Considerati quindi tutti questi aspetti si può dire che per lo scopo di questo lavoro è molto più adatta la tecnologia SLS, sia perché quello che più interessa nella realizzazione di un device per la protezione della zona maxillofaciale è la necessità di avere ottime caratteristiche di resistenza meccanica, sia perché i materiali come il PA603CF, scelti per le loro proprietà, con cui si andrà a costruire questo device sono processabili per SLS.

CAPITOLO 4 - WORKFLOW DI FABBRICAZIONE

Nel capitolo precedente sono stati presentati i materiali e le tecnologie con cui possono essere realizzati i dispositivi di protezione per le varie zone del corpo e sono state identificate la tecnologia di stampa additiva e i materiali più adatti allo scopo della produzione di un device di protezione per la zona maxillofaciale. In questo capitolo, invece, considerato quanto detto in precedenza, verrà descritto in maniera dettagliata il workflow di fabbricazione del dispositivo di protezione, ossia tutte le fasi da compiere per realizzare in maniera opportuna il prodotto desiderato.

Il punto di partenza per realizzare una maschera protettiva per il volto è l'analisi delle caratteristiche che essa deve possedere. Innanzitutto, deve adeguarsi perfettamente alla forma del volto di chi la dovrà indossare in maniera tale da proteggere la zona interessata dal trauma e allo stesso tempo consentire all'utente di avere un campo visivo più ampio possibile non limitando quindi la vista periferica. Inoltre, ovviamente, deve essere rigida e flessibile allo stesso tempo.

Si possono quindi elencare le fasi che compongono il workflow di fabbricazione di un device per la protezione della zona maxillofaciale da stampare in 3D:

1. Test di resistenza sui materiali da utilizzare (resistenza a trazione e allungamento a rottura, flessione, test d'impatto)
2. Scansione 3D per acquisizione modello 3D
3. Fase progettuale per realizzazione design su misura
4. Stampa 3D con SLS

Avendo scelto in precedenza di realizzare la maschera con la tecnologia SLS nel workflow non compare la fase di realizzazione dello stampo, necessaria invece se fosse stata presa la decisione di realizzare la maschera protettiva con la laminazione pre-preg, il wet lay-up o addirittura l'RTM. Scegliendo l'SLS tra i tanti vantaggi già citati c'è quindi anche quello di evitare la fase di costruzione dello stampo che complicherebbe il lavoro e allungherebbe i tempi. Con un workflow di questo tipo, non considerando la fase dei test sui materiali e quindi partendo già dalla conoscenza di che tipo di materiale è necessario usare, le tempistiche per la realizzazione di una maschera protettiva per la zona maxillofaciale sono di circa 24/48 ore.

4.1 TEST DI RESISTENZA

Questa è una fase fondamentale per garantire una buona riuscita della realizzazione di un dispositivo per la protezione della zona maxillofaciale. Infatti, prima di produrre la maschera protettiva, va capito con che materiali realizzarla attraverso dei test di resistenza volti a verificare che i materiali con i quali si pensa di realizzare il prodotto siano effettivamente adatti all'applicazione in questione. I materiali che possono essere più o meno adatti alla realizzazione di un device di questo tipo sono stati descritti nel capitolo precedente e presentano caratteristiche diverse l'uno dall'altro e proprio per comprendere al meglio quale scegliere tra loro vanno testati. I test che vengono svolti solitamente sono:

- Prova di trazione.
- Prova di flessione.
- Test d'impatto.

Questi test vengono svolti rispettando le linee guida delle normative vigenti che regolano sia le dimensioni dei provini che gli step delle prove. In questo paragrafo verranno ora analizzate una per una queste prove, seguendo, a scopo informativo, le normative vigenti per le materie plastiche.

Le normative ISO 527-1 (principi generali) e ISO 527-2 descrivono le prove di trazione sulle materie plastiche. Il principio guida della norma ISO 527 è l'alta riproducibilità dei risultati di prove tra laboratori, aziende e stati.

Dalla prova di trazione vengono ricavati dei valori caratteristici per descrivere le proprietà meccaniche essenziali di un materiale da stampaggio. Questi valori caratteristici vengono principalmente utilizzati a scopo comparativo e sono:

- Resistenza a trazione: forza relativa alla sezione trasversale iniziale del provino.
- Deformazione: variazione della lunghezza con riferimento alla lunghezza iniziale.
- Modulo di trazione: gradiente della curva nel diagramma sforzo-deformazione.
- Punto di snervamento: resistenza e deformazione nel punto della curva in cui il gradiente è a zero.
- Punto di rottura: resistenza e deformazione nel momento della rottura del provino.
- Coefficiente di Poisson: coefficiente di contrazione trasversale alla deformazione longitudinale.

Le normative ISO 527-1/-2 e ASTM D638 definiscono i metodi di prova per i test di trazione. Pur essendo tecnicamente equivalenti, le prove eseguite seguendo queste norme non forniscono risultati pienamente comparabili, in quanto la forma dei provini, la velocità di prova e la determinazione dei risultati sono diversi fra loro per svariati aspetti. Nelle prove di trazione standard, i risultati di prova vengono visualizzati sulla base di una velocità di trazione imposta al provino. In caso di test su componenti di forme non standardizzate i risultati possono variare notevolmente. A causa delle proprietà viscoelastiche dei polimeri, le proprietà meccaniche possono risultare diverse se misurate su un provino standard o su un componente di forma particolare, perciò, i risultati determinati con un test di trazione sono condizionati dalla geometria del provino testato, ma rappresentano comunque una valida base per il confronto dei diversi materiali.

La forma e le dimensioni dei provini sono definite nella norma ISO 527-2. I campioni più indicati sono quelli di tipo 1A (stampati a iniezione) e di tipo 1B (stampati o lavorati meccanicamente).

I provini tipo 1A secondo ISO 527-2 sono generalmente prodotti tramite stampaggio a iniezione e presentano un orientamento decrescente all'aumentare della distanza dal punto di iniezione. Questo comporta uno sviluppo non costante della curva delle proprietà meccaniche lungo il provino che ne causa spesso la rottura nel lato opposto del punto di iniezione.

I provini tipo 1B sono generalmente ricavati per intaglio da lastre ottenute per iniezione e l'orientamento strutturale di questi provini è significativamente diverso da quello dei provini ricavati direttamente per iniezione.

In Figura 4.1.1 è possibile osservare forma e dimensioni dei provini per le prove di trazione seguendo la normativa UNI EN ISO 527-2 1A e 1B.

Provette per la prova di trazione UNI EN ISO 527-2:2012

1A: provini ottenuti mediante stampaggio (iniezione o compressione)

1B: provini ottenuti mediante lavorazione meccanica

Adatti per materiali sia **termoplastici** che **termoindurenti** (v. specifica del materiale di caso in caso)

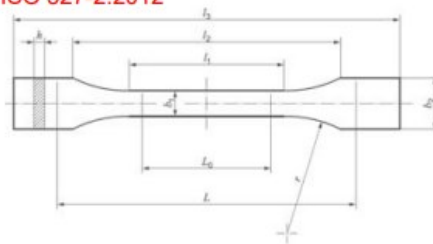


Figure 1 — Type 1A and 1B test specimens

Table 1 — Dimensions of type 1A and 1B test specimens

		Dimensions in millimetres	
Specimen type		1A	1B
l_3	Overall length ^a	170	≥150
l_1	Length of narrow parallel-sided portion	80 ± 2	60,0 ± 0,5
r	Radius	24 ± 1	60 ± 0,5
l_2	Distance between broad parallel-sided portions ^b	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
b_2	Width at ends	20,0 ± 0,2	
b_1	Width at narrow portion	10,0 ± 0,2	
h	Preferred thickness	4,0 ± 0,2	
l_0	Gauge length (preferred)	75,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
	Gauge length (acceptable if required for quality control or when specified)	50,0 ± 0,5	
L	Initial distance between grips	115 ± 1	115 ± 1

^a The recommended overall length of 170 mm of the type 1A is consistent with ISO 294-1 and ISO 10724-1. For some materials, the length of the tabs may need to be extended (e.g. $l_3 = 200$ mm) to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, resulting from l_1 , r , b_1 and b_2 , but within the indicated tolerances.

Figura 4.1.1 Dimensioni provini 1A e 1B per prova di trazione [52]

Il procedimento per effettuare la prova è il seguente: si fissa il provino tra due morsetti in posizione verticale. Dopodiché il provino viene sottoposto a uno sforzo continuo di allungamento e si genera una forza crescente. La prova termina quando il provino si rompe. Sulla macchina è presente una cella di carico che misura istante per istante la forza applicata al provino sul quale inoltre è applicato un estensimetro, che misura l'allungamento. Grazie all'estensimetro e alla cella di carico, si ottengono valori di sforzo e deformazione a intervalli di tempo costanti ottenendo quindi un diagramma sforzo-deformazione (Figura 4.1.2).

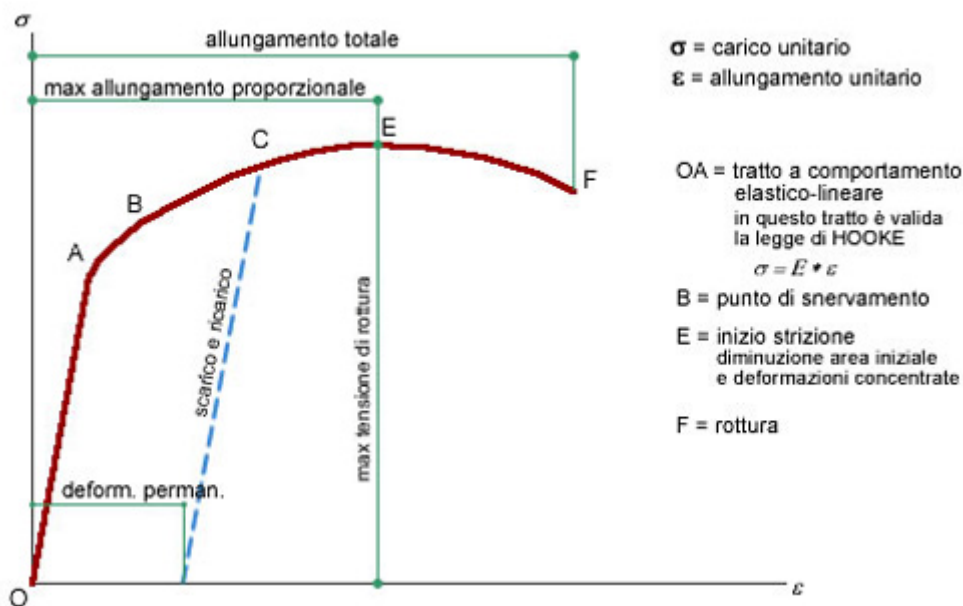


Figura 4.1.2 Diagramma sforzo-deformazione [35]

La prova di flessione, invece, misura la forza richiesta per piegare una trave in condizioni di carico su tre punti. Il modulo di flessione viene utilizzato come indicazione della rigidità di un materiale quando flessato. Poiché le proprietà fisiche di molti materiali, soprattutto termoplastici, possono variare a seconda della temperatura ambiente, a volte è opportuno testare i materiali a temperature che simulano l'ambiente di utilizzo finale previsto. La prova di flessione a 3 punti secondo la normativa ISO 178 viene utilizzata quindi per determinare le proprietà di flessione di termoindurenti e termoplastici. I principali risultati di questa prova sono il modulo di flessione, calcolato in base alla pendenza iniziale del diagramma sforzo-deformazione, la resistenza alla flessione e l'allungamento a flessione alla rottura del provino. Un altro metodo per la caratterizzazione delle proprietà di flessione delle materie plastiche è descritto nella norma ASTM D790. La configurazione della prova di flessione a 3 punti secondo la norma ISO 178 consiste in due incudini o supporti paralleli e una trave di carico centrale, o incudine superiore, tra i quali viene deformato un provino standard nell'ambito di piccoli angoli di flessione. In particolare, nella prova di flessione a 3 punti, secondo la norma ISO 178, un provino di plastica a forma di barra viene collocato tra due supporti e una forza viene applicata verticalmente alla parte superiore del provino a metà tra i supporti. Per l'ASTM D790, la prova viene interrotta quando il provino raggiunge una deflessione del 5% o si rompe prima del 5%. Per l'ISO 178, la prova viene interrotta quando il provino si rompe. Se il provino non si rompe, la prova continua per quanto possibile e viene riportata la sollecitazione al 3,5% (deflessione convenzionale). La Figura 4.1.3 mostra l'apparecchiatura necessaria ad eseguire una prova di flessione a 3 punti.

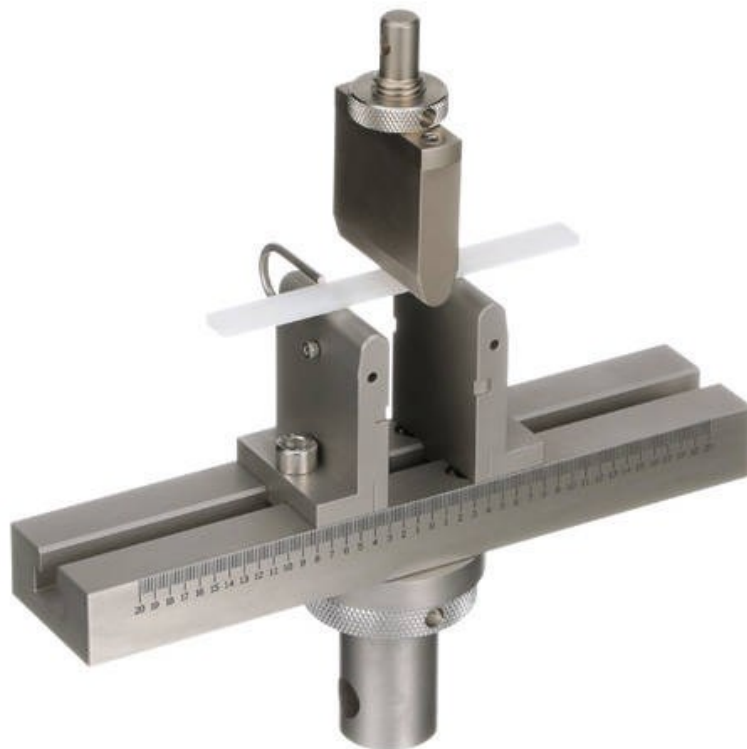


Figura 4.1.3 Apparecchiatura per prova di flessione a 3 punti [39]

Misurando opportunamente le forze di flessione e le deflessioni, è possibile determinare le sollecitazioni e le deformazioni estreme della fibra del provino, da cui vengono calcolati i risultati delle singole prove sotto forma di dati a punto singolo. I risultati tipici includono:

- Modulo di flessione e resistenza alla flessione: il modulo di flessione è una misura della rigidità del materiale e indica la sua capacità di resistere ai carichi di flessione. La resistenza alla flessione fornisce informazioni sul carico massimo che il materiale può sopportare a flessione prima di rompersi.
- Sollecitazione al 3,5 % della deformazione.

- Sollecitazioni e deformazioni al punto di snervamento e alla rottura del provino.

Per questo test è possibile utilizzare provini di diverse forme, ma le dimensioni più utilizzate per ASTM sono 3,2 mm x 12,7 mm x 125 mm (0,125" x 0,5" x 5,0") e per ISO 10 mm x 4 mm x 80 mm. La Figura 4.1.4 riporta in modo schematico forma e dimensioni di un provino da testare a flessione secondo la normativa ISO 178.

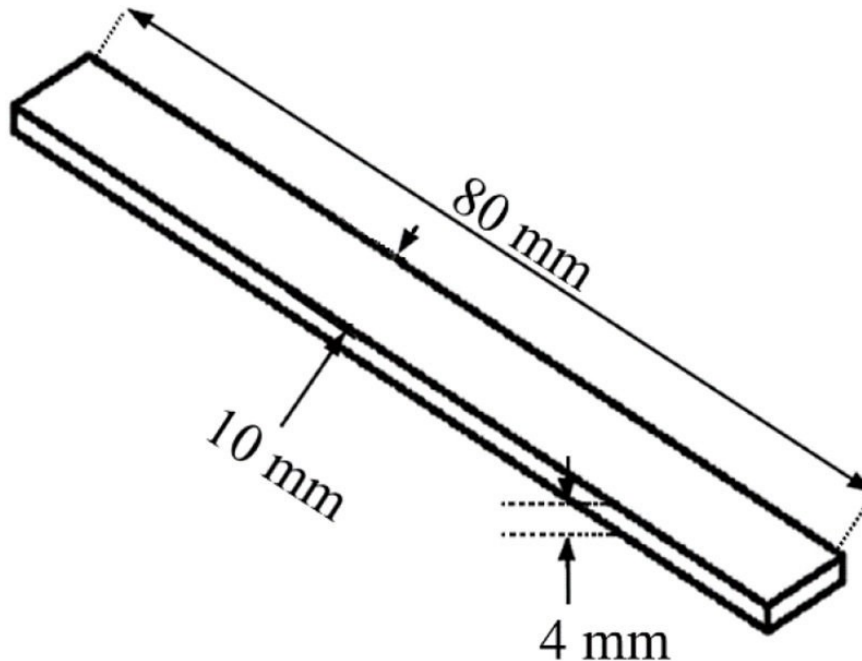


Figura 4.1.4 Possibili dimensioni per un provino da testare a flessione [38]

Per quanto riguarda i test d'impatto esistono fondamentalmente due possibili prove da poter eseguire: la prova Charpy e la prova Izod che generano conclusioni simili in termini di forza d'impatto.

Le prove d'impatto Izod sono utilizzate per la caratterizzazione della resistenza all'impatto delle materie plastiche o dei compositi ad alta velocità di deformazione. La prova di impatto a flessione Izod su provini con intaglio secondo ASTM D256 fornisce valori caratteristici per la resistenza all'impatto e la sensibilità all'intaglio ad alte velocità sotto forma di energia legata allo spessore. I test sono di solito eseguiti in condizioni climatiche di 23° e 50% di umidità relativa secondo ASTM D618. La prova d'impatto a flessione su provini con intaglio secondo ASTM D256 viene utilizzata per tutte le materie plastiche per caratterizzare il loro comportamento sotto carico d'impatto. La sollecitazione di impatto a flessione viene applicata lateralmente su un campione intagliato che viene bloccato su un lato. Il risultato è presentato come un assorbimento di energia legato allo spessore del campione. Questa norma descrive varie procedure, forme e modalità dell'intaglio per misurarne la sensibilità in un materiale polimerico:

- Il metodo A è usato per le materie plastiche con una resistenza all'impatto su provini Izod con intaglio maggiore o uguale a 27 J/m. In alcuni casi viene usato un raggio di 0.25 mm. Il risultato è calcolato direttamente dall'altezza del martello dopo l'impatto.
- Il metodo B è usato per le materie plastiche molto fragili con una resistenza all'impatto su provini Izod con intaglio inferiore a 27 J/m. Corrisponde al metodo A, ma l'energia d'impatto misurata viene corretta con la quantità di lavoro centrifugo calcolato del campione.
- Il metodo C è utilizzato per caratterizzare la sensibilità all'impatto di un polimero. Qui l'energia di impatto è misurata su campioni con diversi raggi di taglio e la sensibilità all'impatto è calcolata come un gradiente lineare sul raggio di taglio.

- Il metodo D è usato per stimare la resistenza d'impatto dei campioni senza intaglio. Per questo metodo, il campione viene afferrato ruotato di 180° in modo che la tacca sia posizionata in direzione opposta a quella dell'impatto. Il risultato è direttamente comparabile solo con test su campioni senza intaglio.

Le dimensioni esterne dei provini secondo ASTM D256 devono rispettare le seguenti dimensioni: lunghezza 63,5 mm e altezza 12,5 mm. La larghezza dei provini stampati a iniezione può essere compresa tra 3 mm e 12,5 mm, ma è comune l'uso di provini con una larghezza di 3,2 mm o 6,35 mm.

Per il metodo A, comunemente utilizzato, viene scelto un provino intagliato con un raggio di 0,25 mm e un angolo di 45° in modo che alla base dell'intaglio rimanga un'altezza di 0,40 pollici (10,16 mm).

Se la sensibilità dell'intaglio deve essere misurata secondo il Metodo C, i provini devono essere preparati con raggi di intaglio diversi. Oltre all'intaglio standard secondo il Metodo A, i campioni vengono lavorati con un raggio di intaglio di 1 mm. Per la prova, è importante che l'intaglio sia posizionato esattamente nell'area del momento flettente maggiore.

Per le prove di impatto Izod con intaglio secondo ASTM D256, viene utilizzato un martello a pendolo formato da un'asta e un percussore. Il principio di misurazione si basa sul martello da impatto, con capacità energetica e altezza di caduta definite, che trasferisce parte della sua energia cinetica quando colpisce il campione. Di conseguenza, il martello non ritorna alla sua altezza di caduta originale dopo l'impatto. La differenza di altezza misurata tra quella di caduta e quella di risalita è quindi la misura dell'energia assorbita. Stabilendo l'altezza di caduta, si definisce anche la velocità d'impatto in modo che le prove possano essere eseguite con tassi di deformazione riproducibili. La Figura 4.1.5 mostra una rappresentazione schematica di come avviene la prova IZOD.

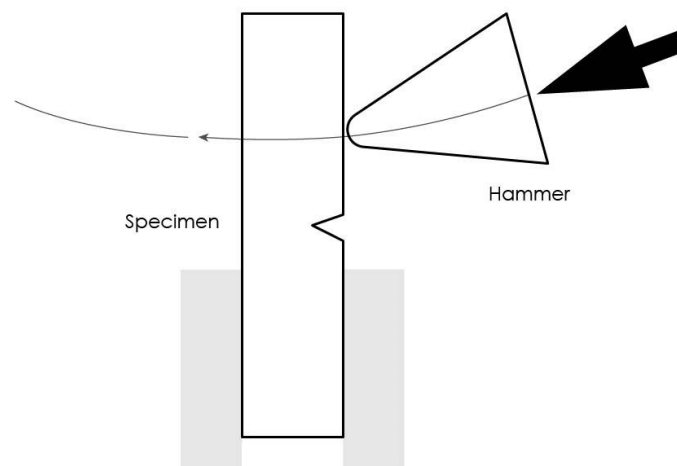


Figura 4.1.5 Schema di come avviene la prova Izod [10]

Il martello standard secondo ASTM D256 ha un'energia potenziale iniziale di 2,7 J ad un'altezza di caduta specificata di 610 ± 2 mm. Per i martelli aggiuntivi, l'energia iniziale è sempre raddoppiata alla stessa altezza di caduta. Questo si traduce in una velocità di impatto di circa 3,46 m/s per tutti i martelli.

Anche la norma ISO 180 descrive la prova di impatto Izod sulle materie plastiche per la determinazione della resistenza all'impatto e all'impatto con intaglio.

Il metodo per la misurazione della resistenza all'impatto Izod secondo ISO 180 si basa sulla ASTM D256, tuttavia, utilizza dimensioni diverse del provino, infatti la sollecitazione d'impatto a flessione è applicata ad un provino con o senza intaglio aggraffato da un lato, con dimensioni 10 mm x 4 mm x 80 mm, e fornisce un quadro normativo sia per la misurazione della resistenza all'impatto su provini senza intaglio, che per la misurazione della resistenza e della sensibilità all'impatto su provini intagliati. La ISO 180 prevede l'impatto longitudinale, così come l'impatto dal lato piatto, usato più raramente. La prova di impatto a flessione Izod su provini con intaglio secondo ISO 180 fornisce valori caratteristici per la resistenza all'impatto ad alte velocità di deformazione sotto forma di energia legata allo spessore. Anche in questo caso i test sono di solito eseguiti in condizioni climatiche di 23° e 50% di umidità relativa secondo ISO 291.

Per le prove di impatto Charpy, il provino viene ricavato dal materiale da testare. Le dimensioni del provino sono specificate nelle relative norme. I provini possono essere privi di intaglio o avere un intaglio a V (Charpy v-notch test) o a U (Charpy u-notch test). Secondo la normativa ISO 179 nella prova Charpy il provino prismatico deve avere dimensioni pari a 80 mm di lunghezza, 10 mm di altezza e 4 mm di spessore. Inoltre, nel mezzo della sua lunghezza, perpendicolare all'asse longitudinale, deve essere realizzato un intaglio che può avere due forme: V a 45°, di profondità pari a 2 mm, con raggio del fondo dell'intaglio pari a 0,25 mm; U o a buco di chiave di profondità pari a 5 mm, con raggio del fondo d'intaglio pari a 1 mm. La Figura 4.1.6 mostra la forma di un provino per la prova Charpy.

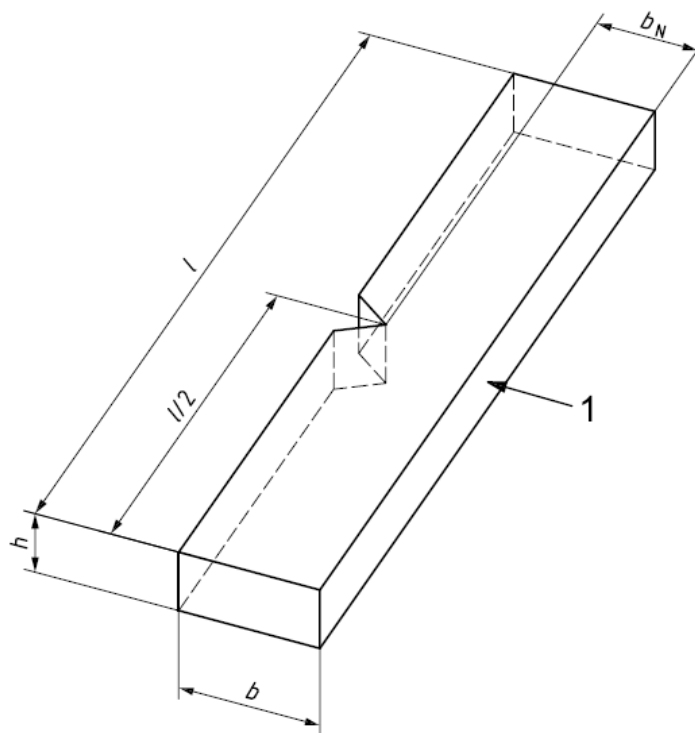


Figura 4.1.6 Rappresentazione schematica di un provino per la prova Charpy [50]

Le norme ISO 179-1 (prove di impatto non strumentate) e ISO 179-2 (prove di impatto strumentate) descrivono la prova d'impatto Charpy nell'ambito della determinazione della resistenza all'impatto su provini in plastica con e senza intaglio. Le stesse prove sono descritte anche nella norma ASTM D6110. Le prove d'impatto Charpy sono utilizzate per la caratterizzazione delle materie plastiche ad alta velocità di deformazione. Nel metodo classico, il risultato è rappresentato come l'assorbimento di energia del campione. I metodi strumentati forniscono anche diagrammi forza-spostamento con informazioni aggiuntive sul materiale e una determinazione automatica del tipo di rottura. La prova viene eseguita preferibilmente su provini senza intaglio con impatto sul lato stretto. Se con questa configurazione di prova il provino non si rompe, devono essere utilizzati campioni con intaglio. In questo caso i risultati delle due prove non potranno

essere direttamente comparabili. La prova d'impatto Charpy e la prova di resistenza all'impatto con intaglio secondo ISO 179-1 e ISO 179-2 forniscono valori caratteristici relativi alla resistenza all'impatto ad alte velocità di deformazione sotto forma di un valore di energia superficiale. I test sono di solito eseguiti in condizioni climatiche normali o a basse temperature. Paragonato al metodo Izod, il metodo Charpy, oltre a vantare un ampio range di applicazioni, è più adeguato a testare i materiali soggetti a fratture per scorrimenti interlaminari o per effetti superficiali. Inoltre, il metodo Charpy offre dei vantaggi nelle prove a basse temperature perché i supporti del provino sono più lontani dall'intaglio e quindi si evita un rapido trasferimento di calore alle aree critiche del provino, semplificando il processo di raffreddamento in un dispositivo di raffreddamento esterno e la successiva immissione nello strumento di prova.

I pendoli per prove di impatto sono utilizzati per le prove di impatto convenzionali Charpy non strumentate secondo ISO 179-1. Questo garantisce un'elevata riproducibilità delle prove effettuate tra diversi strumenti, laboratori, operatori e luoghi. Il principio di misurazione si basa su un martello da impatto, con capacità energetica e altezza di caduta definite, che trasferisce parte della sua energia cinetica quando colpisce il campione. Di conseguenza, il martello non ritorna alla sua altezza di caduta originale dopo l'impatto. La differenza di altezza misurata tra quella di caduta e quella di risalita è quindi la misura dell'energia assorbita. Stabilendo l'altezza di caduta, si definisce anche la velocità d'impatto in modo che le prove possano essere eseguite con tassi di deformazione riproducibili. Ogni mazza del pendolo può essere utilizzata nel range che va dal 10% all' 80% della sua energia nominale potenziale iniziale. Se più martelli soddisfano questo requisito per un dato materiale viene scelto il martello con la più alta energia potenziale iniziale. Questo assicura che la perdita di velocità durante l'impatto sia ridotta al minimo. Questo tipo di misurazione implica che tutte le perdite di energia siano attribuibili al campione. È quindi importante minimizzare, correggere o eliminare completamente tutte le cause esterne di errore.

Nella Figura 4.1.7 è possibile notare graficamente un riepilogo schematico delle caratteristiche di provini e strumentazioni nella prova Charpy e in quella IZOD.

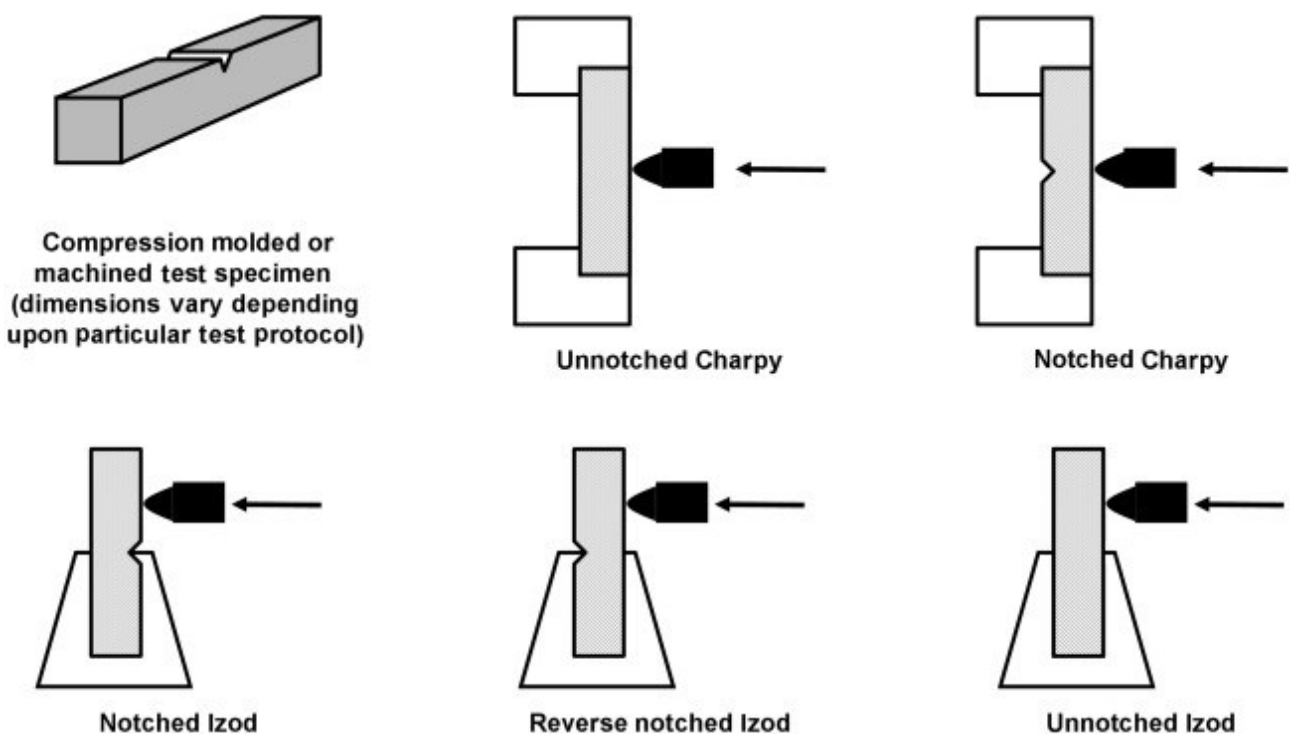


Figura 4.1.7 Riepilogo e differenze fra prova Charpy e Izod [40]

Sono stati dunque presentati i vari test da effettuare sui materiali. Dai risultati di questi test si può decidere quali materiali siano più adatti all'applicazione. Scelti i materiali il processo operativo per la realizzazione del device protettivo prosegue.

4.2 SCANSIONE 3D

In questo paragrafo verrà descritto innanzitutto il funzionamento di uno scanner 3D, i vantaggi che esso porta in fase produttiva e infine come esso si applica al caso studio oggetto di questa tesi.

La scansione 3D è un processo di raccolta di dati relativi alle superfici di un oggetto fisico tramite un apposito macchinario chiamato appunto scanner 3D. Le informazioni raccolte dallo scanner 3D quindi descrivono la forma dell'oggetto scansionato in termini di spazio tridimensionale e il risultato della scansione è una digitalizzazione dell'oggetto, che può essere pertanto modificato, rielaborato e stampato in 3D.

Non esiste un'unica tipologia di scanner 3D perché esistono diverse tecnologie e tipologie di scansione 3D. La più diffusa è la triangolazione laser che è una tecnologia che utilizza per l'appunto laser, ma vengono usate anche tecnologie che sfruttano luce e mappatura fotografica. Ogni tipologia di scansione ha vantaggi e svantaggi ed ognuna ha il proprio costo.

La prima tecnologia che si analizza è la triangolazione laser. La triangolazione è un processo geometrico-matematico che utilizza tre punti nello spazio per costruire un piano che li contenga tutti e tre. Gli scanner basati sulla tecnica della triangolazione laser sfruttano un fascio laser per l'analisi delle superfici di un oggetto. Il fascio laser, emesso ad impulsi costanti dallo scanner, colpisce la superficie dell'oggetto da analizzare, ci si riflette sopra e torna indietro allo scanner, che lo capta grazie ad un sensore. Il sensore calcola lo scostamento della traiettoria e sfruttando un'operazione trigonometrica viene calcolato l'angolo di deviazione. L'angolo calcolato fornisce allo scanner informazioni sulla distanza dall'oggetto scansionato. Raccogliendo un elevato numero di dati di questo tipo i software dello scanner riescono a mappare ogni punto della superficie dell'oggetto e di conseguenza costruirne una copia digitale. Questa è la tecnologia più economica ed un altro grande vantaggio è il raggiungimento di un'altissima risoluzione ed accuratezza. Al contrario però, l'utilizzo di un laser pone limiti nel caso di superfici riflettenti o trasparenti.

In Figura 4.2.1 viene mostrato come funziona uno scanner a triangolazione laser.

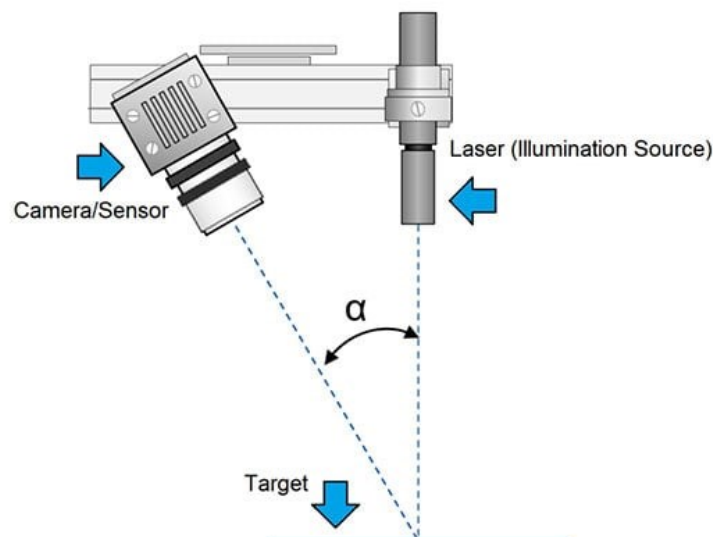


Figura 4.2.1 Schema del funzionamento di uno scanner a triangolazione laser [23]

La seconda tipologia di scanner 3D sono quelli che usano la luce strutturata. Anch'essi si basano sulla tecnica della triangolazione, ma invece di sfruttare un laser utilizzano una serie di proiezioni di luce. Una lampada proiettore viene affiancata da una serie di telecamere con angolazioni differenti. I sensori delle telecamere analizzano i pattern di luce proiettati sull'oggetto scansionato calcolando delle coordinate XYZ per i punti della superficie illuminati dalla proiezione. Il colore della luce della proiezione impatta in maniera diretta sulla risoluzione della scansione finale: scanner a luce blu garantiscono la qualità di acquisizione migliore in

assoluto, grazie alla precisione data dalla corta lunghezza d'onda della luce blu. Anche questa tecnologia si dimostra molto accurata e rapida nella fase di acquisizione e la migliore in termini di eliminazione dei rumori di fondo, ma è molto sensibile alle condizioni di illuminazione dell'ambiente di scansione. Le sue prestazioni, infatti, subiscono un calo notevole in casi di forte illuminazione e scansioni in ambiente esterno.

In Figura 4.2.2 viene mostrato come funziona uno scanner a luce strutturata.

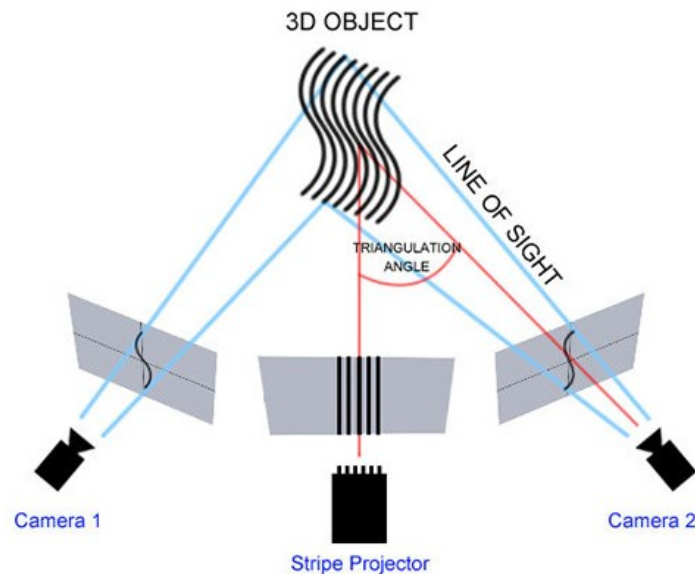


Figura 4.2.2 Schema del funzionamento di uno scanner a luce strutturata [23]

Infine, ci sono gli scanner 3D a fotogrammetria, ossia quelli che sfruttano una mappatura fotografica. Gli scanner di questo tipo estrapolano informazioni sulla geometria di un oggetto basandosi sull'analisi di una serie di fotografie ad altissima risoluzione dell'oggetto scansionato dietro complessi algoritmi geometrici. Una fotocamera cattura immagini dell'oggetto in rapida successione e da prospettive e angolazioni sempre diverse. In seguito, un software analizza le immagini e grazie ad una serie di calcoli riesce a stabilire l'orientamento dei vari punti nello spazio tridimensionale. Assieme alle fotocamere altri sistemi giroscopici tengono traccia dei movimenti dello scanner attorno all'oggetto. Il grande vantaggio di questa tecnologia è la libertà di movimento del macchinario di scansione, che può essere mosso ed angolato secondo le preferenze dell'operatore. Inoltre, la scansione a fotogrammetria non risente gravemente delle condizioni di illuminazione ambientale e questo la rende adatta anche ad acquisizioni all'aperto. Anche con questa tecnologia il limite è relativo all'acquisizione di oggetti altamente riflettenti o trasparenti e, inoltre, la risoluzione della singola fotografia impatta molto sulla risoluzione delle superfici dell'oggetto 3D. Un'altra cosa da considerare è che sia il tempo sia la potenza di calcolo necessari a processare le immagini tridimensionali sono sicuramente maggiori rispetto alle altre due tecnologie già descritte.

In Figura 4.2.3 viene mostrato l'esempio di uno scanner a fotogrammetria.



Figura 4.2.3 Scanner a fotogrammetria [26]

Tornando a parlare più in generale di scansione 3D essa, nonostante possa risultare costosa, offre enormi benefici. Grazie alla scansione 3D è possibile creare nuovi prodotti su misura o ottimizzare prodotti già esistenti in pochissimo tempo, riducendo tempi e costi di progettazione e guadagnando in termini di competitività sul piano produttivo. Con la scansione 3D si ha infatti l'opportunità di sfruttare i modelli 3D per operazioni di reverse engineering su pezzi e componenti già esistenti al fine di ottimizzarne le prestazioni oppure la riproduzione di pezzi originali e pezzi di ricambio in tempi rapidissimi e senza necessità di progettazioni ex novo. Inoltre, utilizzando le tecnologie di scansione 3D, si riesce ad avere accesso a tutta una serie di dati dimensionali ad altissima precisione e queste informazioni possono contribuire ad una semplificazione ed ottimizzazione dei processi di produzione. Un altro pro della scansione 3D è che si presta perfettamente come tool di controllo dimensionale a fine produzione.

La scansione 3D può quindi essere applicata in un vasto numero di campi, ma soprattutto in campo medico e paramedico nel quale rientra anche la realizzazione di device per la protezione della zona maxillofacciale. I vantaggi che essa porta sono i seguenti:

- **Tecnologie non invasive:** la scansione 3D può avvenire senza un diretto contatto con i tessuti dei pazienti. L'utilizzo di uno scanner 3D garantisce un grado di accuratezza molto elevato perché non appoggiandosi alla superficie morbida non ne modifica la forma naturale.
- **Rapidità:** le scansioni avvengono in pochi minuti così come l'elaborazione delle immagini in modo tale da velocizzare il processo di analisi e la successiva creazione di un'ipotetica protesi o prototipo.
- **Altissima customizzazione:** grazie alla scansione 3D è possibile ottenere duplicati esatti per ogni tipo di geometria, permettendo la produzione di protesi, tutori o supporti perfettamente adattabili all'anatomia dei pazienti.
- **Grado di accuratezza elevatissimo:** il grado di accuratezza raggiunto dagli scanner 3D consente di creare device che si adattano perfettamente alle caratteristiche fisiche e alle esigenze del paziente.

Ora che è stato descritto il funzionamento e i vantaggi portati dalla scansione 3D è facile capire come questa sia una fase fondamentale del processo operativo per la realizzazione di device per la protezione di varie zone del corpo. In particolare, tornando alla realizzazione delle maschere protettive per la zona maxillofacciale che si vedono abitualmente nel mondo del calcio il primo passo è proprio quello di scansionare accuratamente il volto del giocatore, con particolare attenzione alla zona interessata dal trauma, che sarà ovviamente la zona dove andare a garantire la massima protezione.

4.3 DESIGN SU MISURA

È stata descritta la fase di scansione 3D che consente di acquisire il modello 3D digitale dell'oggetto. A questo punto bisogna generare il file CAD sulla base del quale poi verrà stampato il pezzo. Un sistema di scansione 3D, infatti, restituisce in output un modello 3D sotto forma di mesh poligonale o di nuvola di punti, in formato STL, OBJ, PLY, o in altri formati simili. Questo va trasformato in un file CAD. I file CAD sono entità matematiche come curve, superfici e solidi i cui formati di interscambio più comuni sono STEP, IGES, PARASOLID. Bisogna quindi passare da dei dati 3D derivanti da una scansione ad un modello CAD e questo passaggio non viene fatto automaticamente dallo scanner, perciò, esistono varie tecniche per ricostruire un modello CAD a partire da una mesh. La logica alla base di queste procedure è quella del Reverse Engineering che è il procedimento, i cui step sono riportati in Figura 4.3.1, che permette di ottenere un modello CAD di un oggetto a partire da misure acquisite mediante rilievi sull'oggetto stesso.

3D REVERSE ENGINEERING

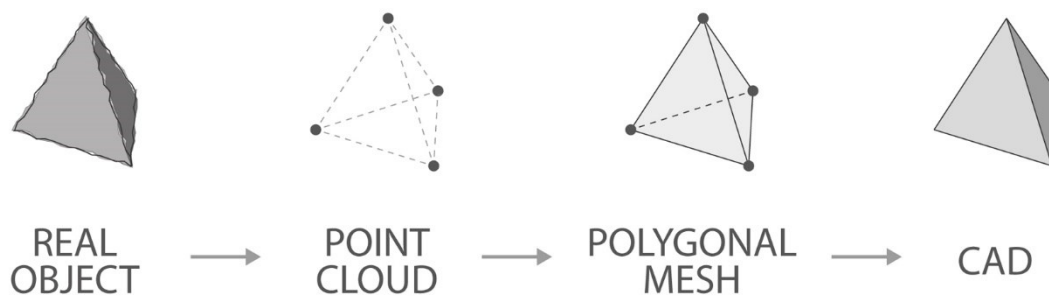


Figura 4.3.1 Step del Reverse Engineering [30]

Il primo passo da fare per creare il modello CAD è la rifinitura della mesh perché è probabile che lo scanner 3D possa produrre file di mesh molto grandi, che appesantiscono il resto del processo. In seguito, si importa la mesh nel software CAD dotato di strumenti per il Reverse Engineering.

Esistono varie procedure e tecniche per ricostruire un modello CAD a partire da una mesh:

- Reverse Engineering per autosurfacing.
- Reverse Engineering per estrazione di entità.
- Reverse Engineering integrato o completo.

La prima tipologia di Reverse Engineering consiste nell'utilizzo di strumenti per il fitting automatico di superfici, il cosiddetto autosurfacing. Questi strumenti sono disponibili nei migliori software di scansione e di modellazione di mesh come "Geomagic Design X" o "Geomagic Wrap". Il vantaggio di questa tecnica è che è sufficiente effettuare piccole ottimizzazioni della mesh e premere semplicemente un tasto per ottenere un modello CAD completo, ma ovviamente, il risultato finale non è esattamente ciò che verrebbe fuori se il componente fosse progettato da zero. Esso è semplicemente un modello costituito da tante superfici ritagliate che approssimano la superficie rilevata dallo scanner 3D; quindi, non si ha un vero e proprio progetto originale del componente ma solo una sorta di pelle che racchiude il solido generato. Questa tecnica è consigliata soltanto per oggetti freeform.

Il Reverse Engineering per estrazione di entità nell'uso di software di elaborazione mesh con funzioni di estrazione di entità matematiche dalla mesh. Tra i software di questo tipo ricordiamo Geomagic Wrap, con il quale è possibile selezionare la mesh per regioni e trasformare ogni regione in una specifica superficie che interpoli i dati risultanti dalla scansione. Così facendo, tutte le entità matematiche create per interpolazione della mesh possono essere successivamente esportate in un qualsiasi software CAD, anche sprovvisto di strumenti di reverse engineering, per essere lavorato. La modellazione CAD a questo punto consiste nel ritagliare le superfici per ottenere il modello 3D completo. Questa tecnica è sicuramente più efficace della precedente perché il modello CAD può essere ricostruito effettuando una vera e propria riprogettazione. L'efficacia del risultato dipende dall'abilità e dall'esperienza dell'operatore e la tecnica può essere applicata solo per oggetti di geometria non troppo complessa.

Il Reverse Engineering integrato o completo è la tecnica più efficace e consiste nell'utilizzo di software CAD che integrino al loro interno strumenti di elaborazione mesh e reverse engineering. Questa tecnica sarà tanto più efficace quanto più il software utilizzato è performante e quante più sono le funzioni che mette a disposizione. Software di questo tipo sono ad esempio "Geomagic Design X" o "SolidWorks+Polyga". Tramite questi software è possibile modellare direttamente sulla mesh creando curve, superfici e solidi che interpolino il risultato della scansione. Tutte le operazioni possono essere fatte come se si fosse il progettista originale del componente perché si hanno a disposizione tutti gli strumenti di modellazione e per questo motivo l'utilizzo di questa tecnica richiede particolari competenze e abilità dell'operatore dalla cui esperienza dipende la qualità del risultato. Sicuramente questa tecnica è la migliore per ottenere un risultato di qualità e soprattutto utilizzabile per qualsiasi scopo; infatti, con questa procedura è possibile effettuare il reverse di oggetti di qualsiasi forma, anche quelli particolarmente complessi.

Dopo aver descritto il Reverse Engineering si capisce bene come esso possa essere applicato anche al caso studio della realizzazione di una maschera protettiva per la zona maxillofaciale. In particolare, l'oggetto fisico scansionato sarà il volto dell'atleta e sulla base della mesh ricavata dalla scansione si andranno a realizzare curve e superfici ad hoc per la realizzazione del device protettivo. Una cosa di cui tenere particolarmente conto durante la realizzazione del design di questi strumenti protettivi è la zona interessata dal trauma. In questa zona è infatti necessario creare un volume maggiorato al fine di evitare il contatto della superficie in carbonio, spesso, o di qualsiasi altro materiale di cui è composta la mascherina, con l'area interessata dal trauma. L'obiettivo sarà quello di scaricare la parte interessata dal trauma, dalle sollecitazioni che possono avvenire per esempio durante una partita di calcio, come possibili pallonate o scontri. Per fare ciò è necessario il contatto della maschera su superfici sane, chiamate zone di scarico, sempre tenendo a mente di impedire il meno possibile la vista periferica all'atleta.

4.4 STAMPA 3D CON SLS

Una volta che è stato ultimato il design del pezzo da stampare il file CAD viene inviato alla stampante 3D che realizzerà il prodotto. Nel capitolo precedente si è detto che la tecnologia additiva più congeniale alla realizzazione di pezzi che fungono da protezione per mani e soprattutto volto è l'SLS (Selective Laser Sintering) e se ne sono analizzati i motivi.

In Figura 4.4.1 viene raffigurata una stampante 3D per realizzare tramite SLS il prodotto finale.



Figura 4.4.1 La stampante SLS 380 di 3D Systems [31]

Dopo la fase di stampa tramite l'SLS, descritta nei particolari nel capitolo precedente, si procede con altre operazioni. In particolare, se la maschera protettiva per il volto viene realizzata in fibra di carbonio, usando per esempio come materiale il PA603CF, si dovrà rivestire la parte che va a contatto con la pelle con un materiale morbido in maniera da aumentare il comfort che offre questo device ed evitare il contatto carbonio pelle. Inoltre, dovranno essere inseriti gli "elastici" per applicare la maschera al volto e tenerla ben salda nella giusta posizione. Altre operazioni possono essere trattamenti superficiali per rendere la superficie più liscia come per esempio il Vapour Smoothing.

Terminata questa fase il dispositivo di protezione è pronto all'uso.

CAPITOLO 5 - CASO STUDIO: REALIZZAZIONE DI UNA MASCHERA PROTETTIVA FACCIALE PER ATTIVITÀ CALCISTICA

Nei capitoli precedenti è stato analizzato l'argomento di questa trattazione da un punto di vista teorico, con approfondimenti sull'utilizzo dei dispositivi di protezione sia per la zona maxillofacciale che per altre parti del corpo, sui materiali e sulle tecnologie per realizzarli e sul workflow di fabbricazione.

In questo capitolo, invece, verrà descritto l'intero procedimento che traduce a livello pratico quanto spiegato precedentemente e quindi verranno riportati in maniera dettagliata tutti gli step che sono stati compiuti per realizzare da zero una maschera protettiva facciale utilizzabile da un calciatore.

Le fasi di lavoro sono state le seguenti:

- Scelta del materiale, della tecnologia di stampa 3D e test di resistenza sul materiale scelto;
- Scansione 3D del volto del soggetto in esame e modellazione 3D della maschera protettiva;
- Stampa 3D.

Essendo un caso di studio accademico non si è analizzato e scansionato il volto di un soggetto che avesse riportato un trauma nella zona maxillofacciale; quindi, si è incentrato il lavoro su un livello qualitativo, andando a concentrarsi molto più sullo svolgimento di ogni singola fase del workflow da seguire per realizzare una maschera protettiva in fibra di carbonio, piuttosto che sulla realizzazione di un perfetto design a livello medico per la maschera. Per questo la fase di modellazione è stata trattata in maniera abbastanza standard, pur essendo a conoscenza che andare a realizzare realmente una maschera per un soggetto con un trauma facciale richieda delle piccole accortezze in più in fase di design e modellazione. Ciò nonostante, in fase di modellazione si è tenuto conto di realizzare una maschera sulla base di una scansione di un volto di un soggetto sano e si è cercato di coprire maggiormente con la maschera la zona che è stata ipotizzata come quella interessata dal trauma per simulare al meglio lo svolgimento di questa fase di modellazione quando ci si trova di fronte ad una vera area del volto affetta da un qualche tipo di trauma.

5.1 SCELTA DEL MATERIALE, DELLA TECNOLOGIA DI STAMPA 3D E TEST DI RESISTENZA

Nel capitolo 2 sono stati presentati i materiali utilizzabili per realizzare alcune tipologie di device di protezione per le diverse zone del corpo e nel capitolo 3 le diverse tecnologie con le quali fabbricare questi dispositivi. Analizzando bene le caratteristiche dei materiali descritti la scelta per la realizzazione della maschera protettiva per la zona maxillofacciale non può che ricadere sul PA603CF per le eccellenti proprietà che possiede questo materiale composto da Poliammide PA12 caricata con fibra di carbonio. Questo materiale rappresenta una soluzione altamente robusta, resistente, funzionale ed estetica, e infatti, le parti stampate in PA603CF hanno un'eccellente resistenza alla deformazione e durezza, ma sono anche molto leggere. Il PA603CF si trova sotto forma di polvere e per questo viene sinterizzato e stampato nelle stampanti 3D utilizzando la tecnologia di stampa SLS.

Individuato il materiale e la tecnologia sono stati effettuati sui provini di PA603CF i test di resistenza per essere certi della scelta fatta.

I test che sono stati effettuati sono stati i seguenti:

- Prova di trazione
- Prova di flessione

Il primo step di questa fase è stata la modellazione e la realizzazione tramite il software NX dei modelli CAD delle due tipologie differenti di provini da utilizzare in modo tale da stampare con SLS i provini in PA603CF sulla base di queste modellazioni.

Sono state cercate in primo luogo le normative che regolassero le dimensioni per i diversi tipi di provino da utilizzare nelle varie prove e poi sulla base di tali normative sono stati modellati i provini sul software NX. Le normative prese in considerazione per lo svolgimento delle prove sono state:

- UNI EN ISO 527-2, 1A per il provino per la prova di trazione;
- ISO 178 per il provino per la prova di flessione.

In seguito, tali provini di PA603CF sono stati realizzati tramite stampa 3D e poi si è proceduto con l'esecuzione dei diversi tipi di test.

5.1.1 PROVA DI TRAZIONE

Su NX è stato modellato il classico provino per eseguire la prova di trazione, seguendo la normativa UNI EN ISO 527-2, 1A. Nella Figura 5.1.1.1 e nella Tabella 5.1.1.2 è possibile vedere la forma e le dimensioni, riportate tutte in mm, del provino modellato.

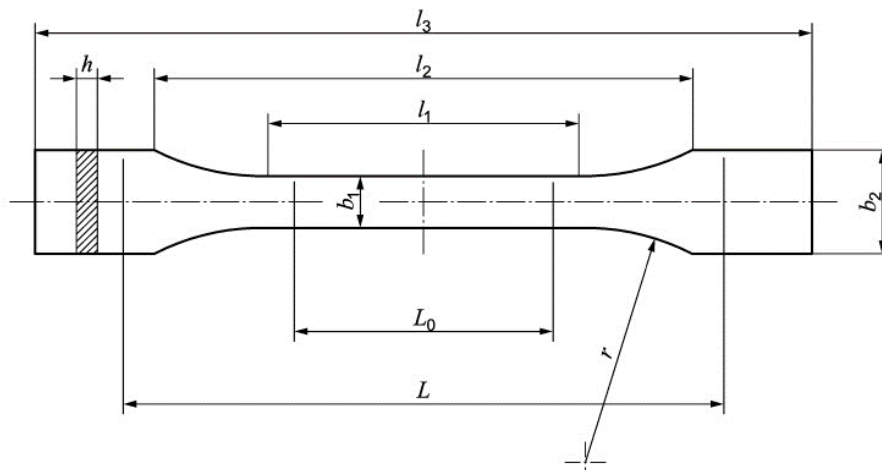


Figura 5.1.1.1 Forma del provino per la prova di trazione [52]

l_3	170
l_2	109,3
l_1	80
b_1	10
b_2	20
L_0	75
L	115
h	4
r	24

Tabella 5.1.1.2 Dimensioni del provino per la prova di trazione

In Figura 5.1.1.3 è invece possibile osservare il risultato della modellazione sul software NX del provino da utilizzare.

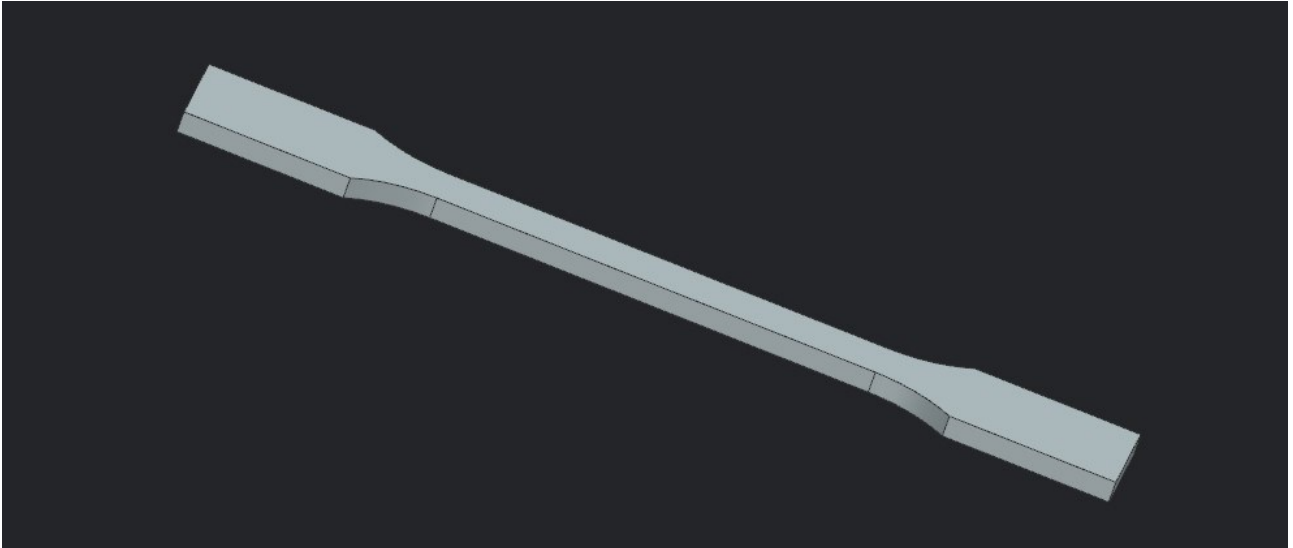


Figura 5.1.1.3 Provino per la prova di trazione modellato su NX

In seguito, il provino è stato stampato dall'azienda Prosilas tramite la tecnologia di stampa 3D SLS e realizzato in PA603CF e si è potuto procedere con la prova di trazione, svolta nei laboratori UNIVPM. Sulla macchina per la prova di trazione sono stati montati gli afferraggi e poi il provino è stato bloccato tra questi. Per calcolare la deformazione in modo più preciso è stato montato un estensometro localizzato. In Figura 5.1.1.4 si può vedere l'attrezzatura utilizzata per la prova e il provino bloccato tra gli afferraggi.

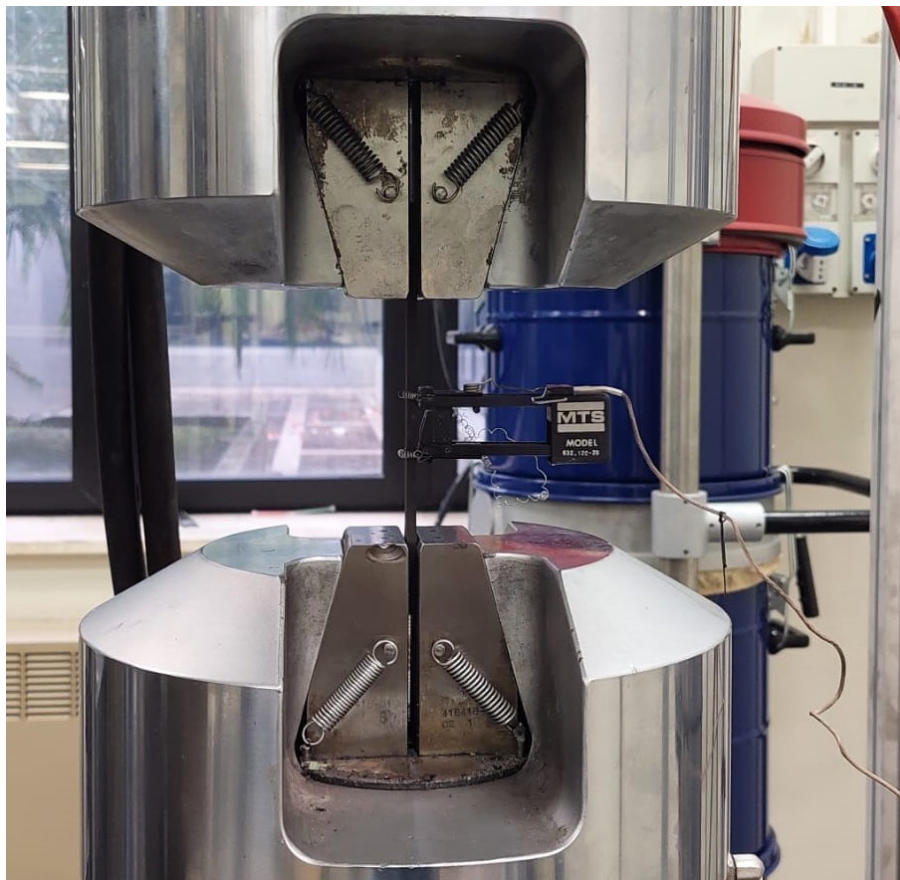


Figura 5.1.1.4 Attrezzatura per la prova di trazione

Dopo aver preparato la macchina per il test, sono stati testati a trazione tre provini. Tutti e tre si sono rotti nel tratto utile (il tratto utile è quello compreso tra le due curvature del provino) e hanno dato risultati

confrontabili tra loro, perciò, si è potuto tenere conto dei risultati ricavati dal test. In Tabella 5.1.1.5 vengono riportati i dati forniti in ingresso al software di analisi dei risultati, riguardanti dimensioni dei provini, frequenza di campionamento e velocità di esecuzione della prova.

	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 3
Lunghezza tratto utile	80 mm	80 mm	80 mm
Spessore	4,11 mm	4,10 mm	4,08 mm
Larghezza	10 mm	10 mm	10 mm
Velocità prova	0,033 m/s	0,033 m/s	0,033 m/s
Frequenza di campionamento	5 Hz	5 Hz	5 Hz

Tabella 5.1.1.5 Dati di partenza prova di trazione

Le prove di trazione sono terminate nel momento della rottura dei provini e con i dati ricavati dallo svolgimento di esse è stato possibile ricavare le curve Forza – Spostamento e soprattutto quelle di Sforzo – Deformazione. Si sono ricavati anche i valori di:

- Ultimate tensile strength: carico di rottura o resistenza a trazione
- Elongation at break: allungamento a rottura
- Young's modulus: modulo elastico dato dal rapporto tra tensione e deformazione. Il modulo di Young viene determinato dal diagramma sforzo-deformazione andando a ricavare la pendenza della retta nel tratto in cui il materiale subisce una deformazione elastica lineare

Si riportano in Figura 5.1.1.6, 5.1.1.7, 5.1.1.8 le curve Forza – Spostamento ricavate dalle prove sui singoli provini.

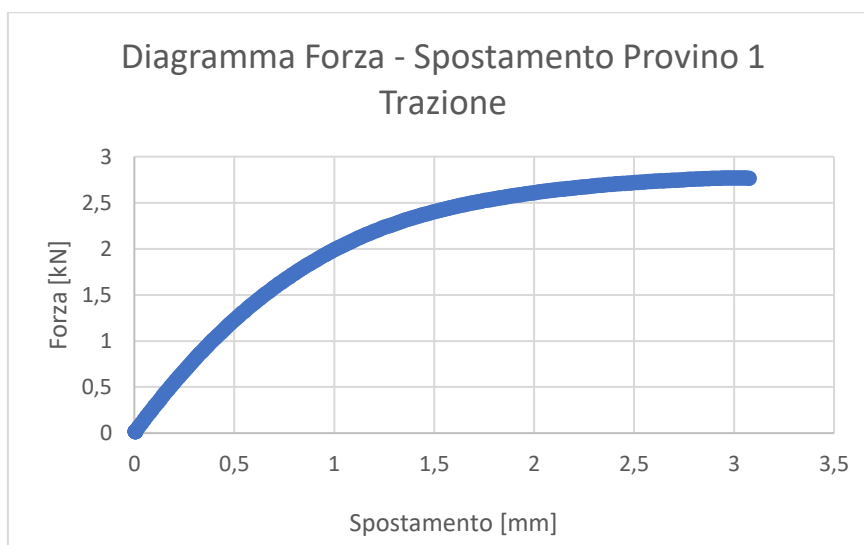


Figura 5.1.1.6 Diagramma Forza - Spostamento provino 1

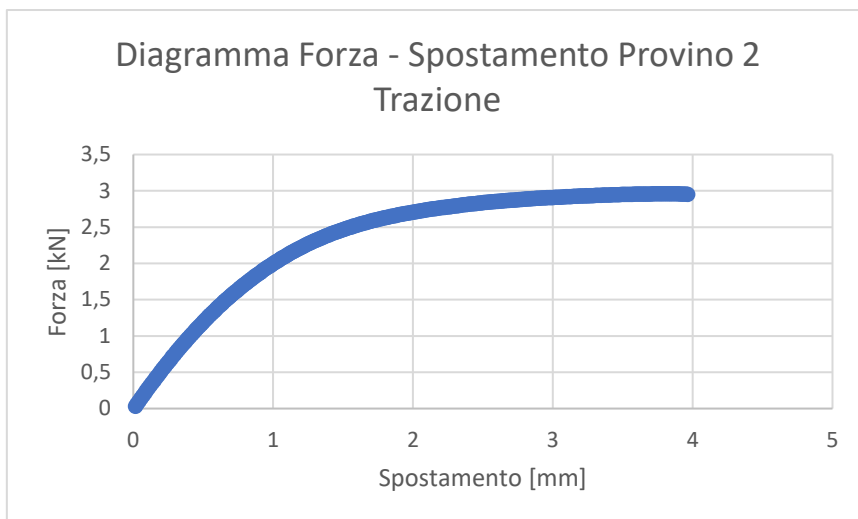


Figura 5.1.1.7 Diagramma Forza - Spostamento provino 2

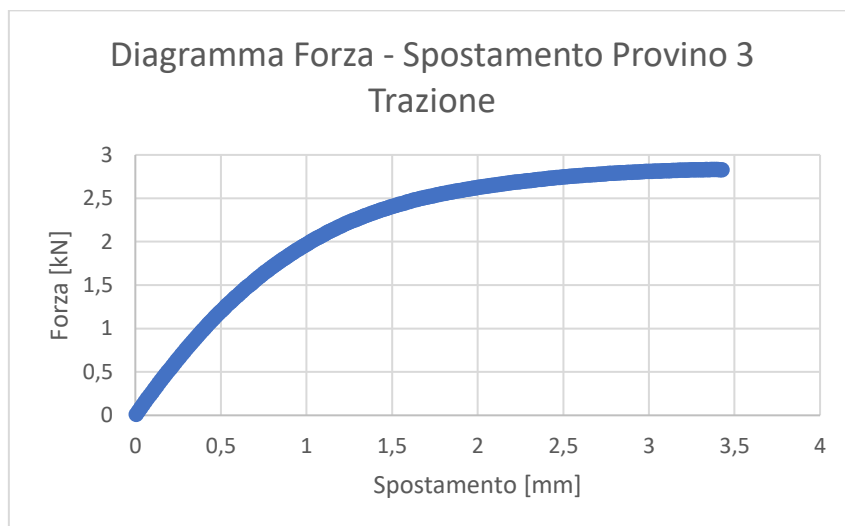


Figura 5.1.1.8 Diagramma Forza - Spostamento provino 3

Si riportano in Figura 5.1.1.9, 5.1.1.10, 5.1.1.11 le curve Sforzo – Deformazione ricavate dalle prove sui singoli provini e la linea di tendenza ricavata su Excel considerando solo il tratto lineare della curva per calcolare poi, tramite il coefficiente angolare, il modulo di Young.

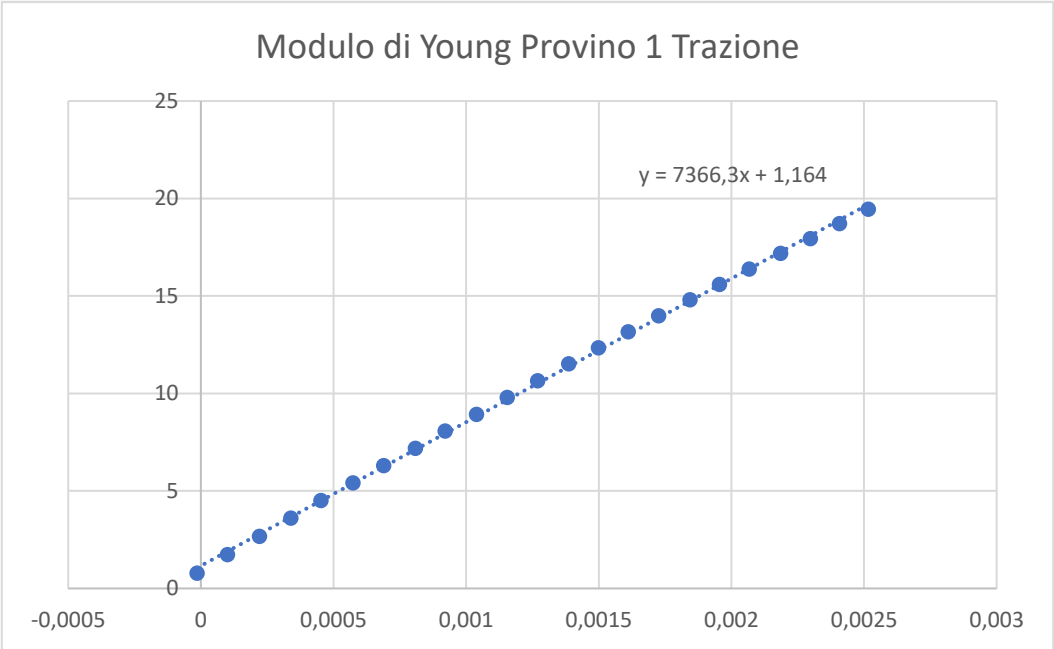
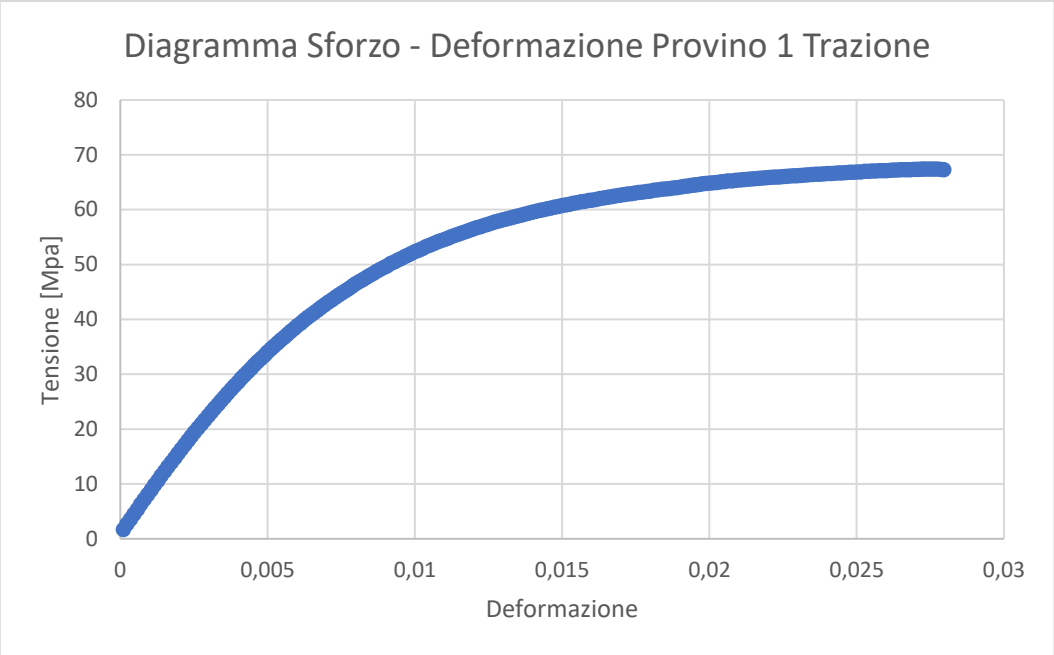


Figura 5.1.1.9 Diagramma Sforzo - Deformazione e calcolo modulo di Young provino 1

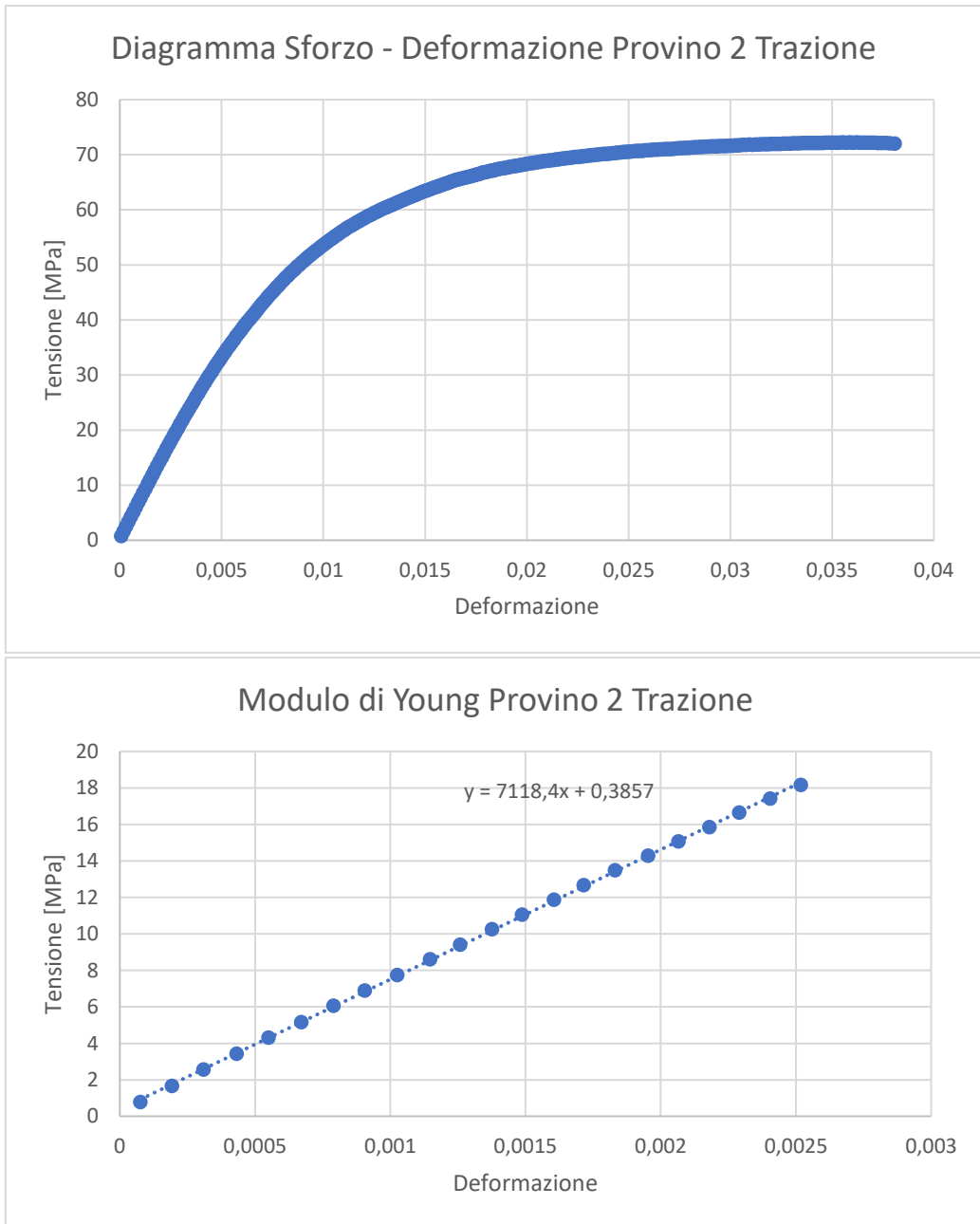


Figura 5.1.1.10 Diagramma Sforzo - Deformazione e calcolo modulo di Young provino 2

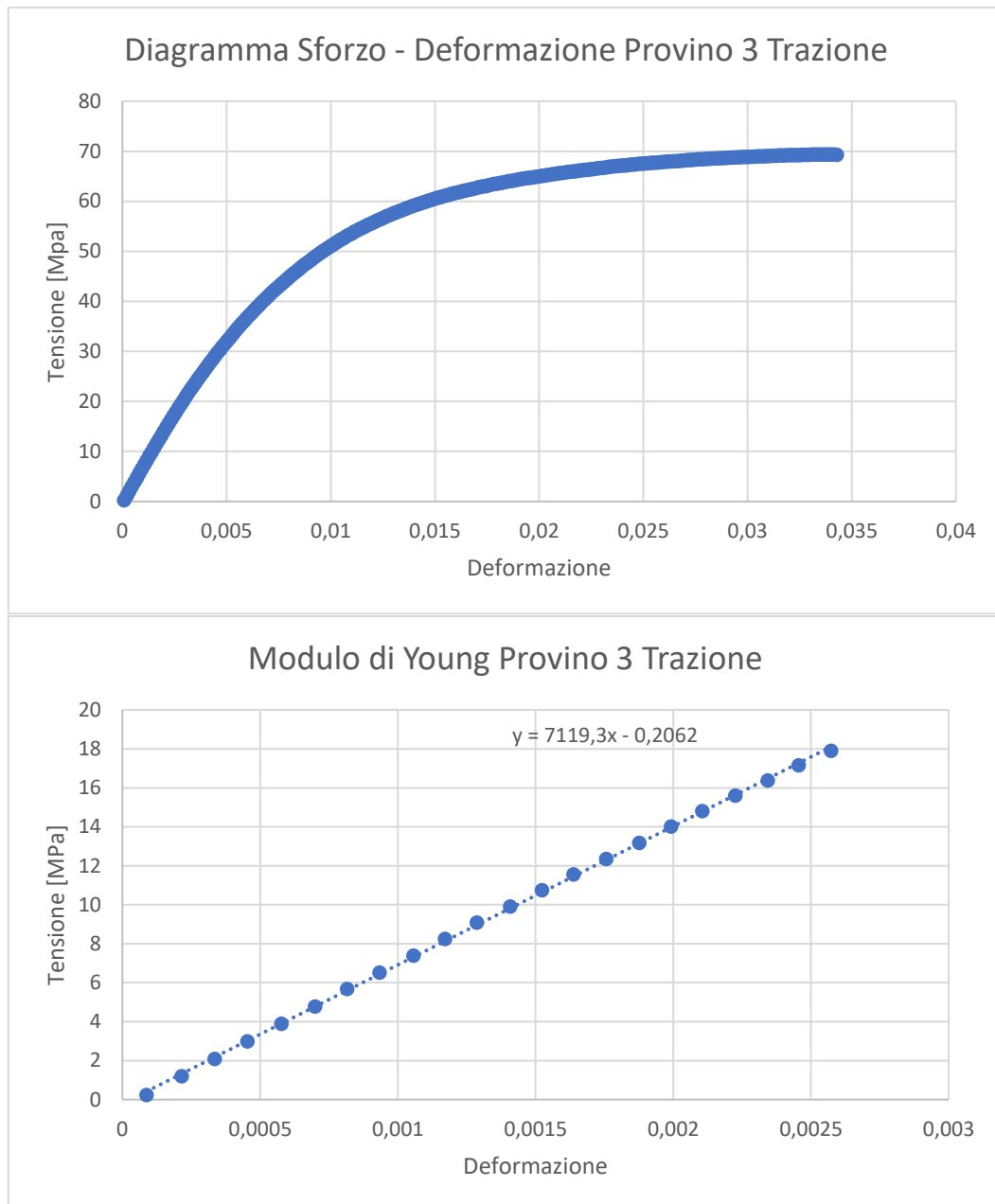


Figura 5.1.1.11 Diagramma Sforzo - Deformazione e calcolo modulo di Young provino 3

Dopo aver ricavato quindi le tre curve di trazione, una per ciascun provino di PA603CF testato, è stato possibile ricavarsi i risultati fondamentali della prova di trazione: Resistenza a trazione, Allungamento a rottura e Modulo di Young. Questi risultati sono riassunti nella tabella 5.1.1.12.

	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 3	MEDIA
Resistenza a trazione	67,4 MPa	72,2 MPa	69,4 MPa	69,7 MPa
Allungamento a rottura	2,7 %	3,5 %	3,4 %	3,2 %
Modulo di Young	7366 MPa	7118 MPa	7119 MPa	7201 MPa

Tabella 5.1.1.12 Risultati prova di Trazione

Questi risultati sono abbastanza vicini a quelli presenti nel datasheet del PA603CF sul sito di Prosilas, nonostante le normative seguite siano differenti (nel datasheet viene indicata come normativa seguita l'ASTM D638 e non l'ISO 527-2). Inoltre, questi valori di resistenza a trazione, allungamento a rottura e modulo di Young ricavati dalle prove di trazione effettuate nel laboratorio dell'UNIVPM sono un'ulteriore certezza che il materiale PA603CF vada più che bene per la realizzazione della maschera protettiva in quanto si è certificato

come esso sia un materiale robusto e resistente, anche alla deformazione, pur essendo molto leggero. Un'altra cosa da notare è l'andamento della curva sforzo - deformazione ricavata dalla prova di trazione sui provini in PA603CF. Questa curva segue perfettamente l'andamento della curva sforzo-deformazione per i materiali compositi. In letteratura, infatti, la curva sforzo – deformazione per i materiali compositi è quella qui sotto riportata in Figura 5.1.1.13.

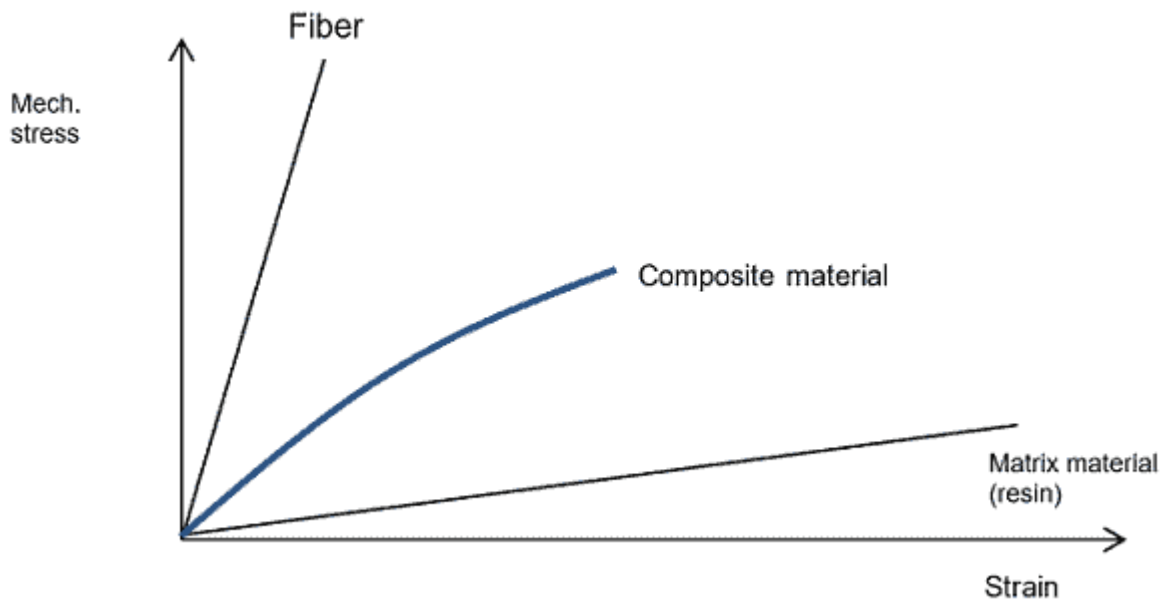


Figura 5.1.1.13 Curva Sforzo- Deformazione per i materiali compositi [47]

Come si può notare i materiali compositi hanno sia resistenza meccanica inferiore alle singole fibre che deformazioni inferiori ai materiali polimerici (resine). La combinazione però di fibre di rinforzo inserite in una matrice polimerica fa sì che si ottenga un materiale composito le cui proprietà sono ottime sia per quel che riguarda la resistenza meccanica che la deformazione, come dimostrato dalla curva Sforzo – Deformazione che mostra come il comportamento meccanico di un composito, come il PA603CF, sia il perfetto compromesso tra le proprietà delle fibre e dei materiali polimerici.

5.1.2 PROVA DI FLESSIONE

Su NX è stato modellato il provino per eseguire la prova di flessione a tre punti seguendo la normativa ISO 178. Nella figura 5.1.2.1 è possibile vedere la forma e le dimensioni del provino modellato.

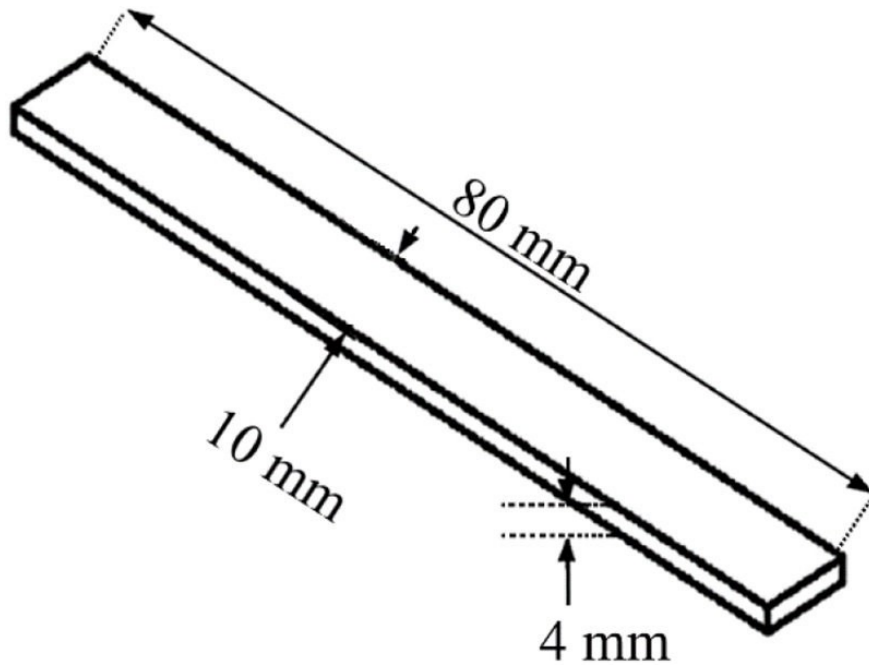


Figura 5.1.2.1 Forma e dimensioni del provino per la prova di flessione [38]

In Figura 5.1.2.2 è invece possibile osservare il risultato della modellazione sul software NX del provino da utilizzare.

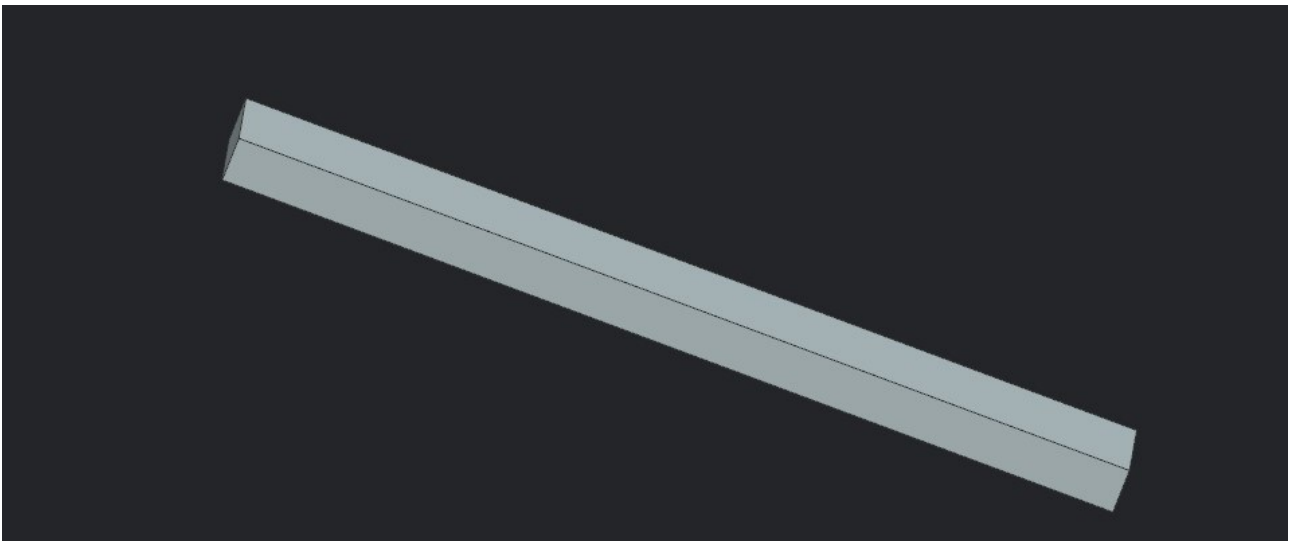


Figura 5.1.2.2 Provino per la prova di flessione modellato su NX

In seguito, il provino è stato stampato dall'azienda Prosilas tramite la tecnologia di stampa 3D SLS e realizzato in PA603CF e si è potuto procedere con la prova di flessione a tre punti, svolta nei laboratori UNIVPM. Sulla macchina per la prova di flessione è stata scelta una distanza (SPAN) di 60 mm tra i due supporti che reggono il provino, dopodiché è stato posizionato il provino sopra ai due supporti, facendo in modo che il carico centrale andasse a impattare il provino lungo 80 mm nella sua metà.

In Figura 5.1.2.3 si può vedere l'attrezzatura utilizzata per la prova e come è stato posizionato il provino.

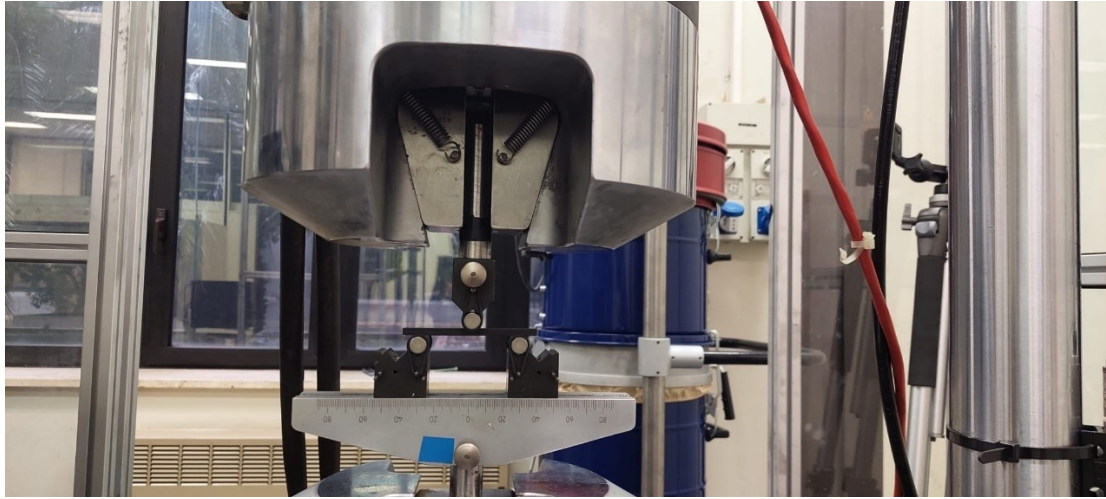


Figura 5.1.2.3 Attrezzatura per la prova di flessione a 3 punti

Dopo aver preparato la macchina per il test, sono stati testati a flessione quattro provini. Il test sul provino numero 3 ha dato risultati molto diversi dai test sugli altri provini dai quali si sono ricavati invece dati confrontabili tra loro, perciò, si è tenuto conto in fase di analisi dei risultati soltanto dei test di flessione a 3 punti sui provini 1, 2 e 4, mentre il 3 è stato scartato. In Tabella 5.1.2.4 vengono riportati i dati forniti in ingresso al software di analisi dei risultati, riguardanti dimensioni dei provini, frequenza di campionamento e velocità di esecuzione della prova.

	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 4
Distanza (SPAN)	60 mm	60 mm	60 mm
Lunghezza	80 mm	80 mm	80 mm
Larghezza	10 mm	10 mm	10 mm
Spessore	4,11 mm	4,13 mm	4,06 mm
Velocità prova	0,033 m/s	0,033 m/s	0,033 m/s
Frequenza di campionamento	5 Hz	5 Hz	5 Hz

Tabella 5.1.2.4 Dati di partenza prova di flessione a 3 punti

Le prove di flessione a tre punti sono terminate nel momento della rottura dei provini e con i dati ricavati dallo svolgimento di esse è stato possibile ricavare le curve Forza – Spostamento e soprattutto quelle di Sforzo – Deformazione. Si sono ricavati anche i valori di:

- Resistenza alla flessione: carico a rottura
- Deformazione a rottura
- Modulo di Flessione: viene determinato dal diagramma tensione-deformazione andando a ricavare la pendenza della retta nel tratto in cui il materiale subisce una deformazione elastica lineare

Si riportano in Figura 5.1.2.5, 5.1.2.6, 5.1.2.7 le curve Forza – Spostamento ricavate dalle prove sui singoli provini.

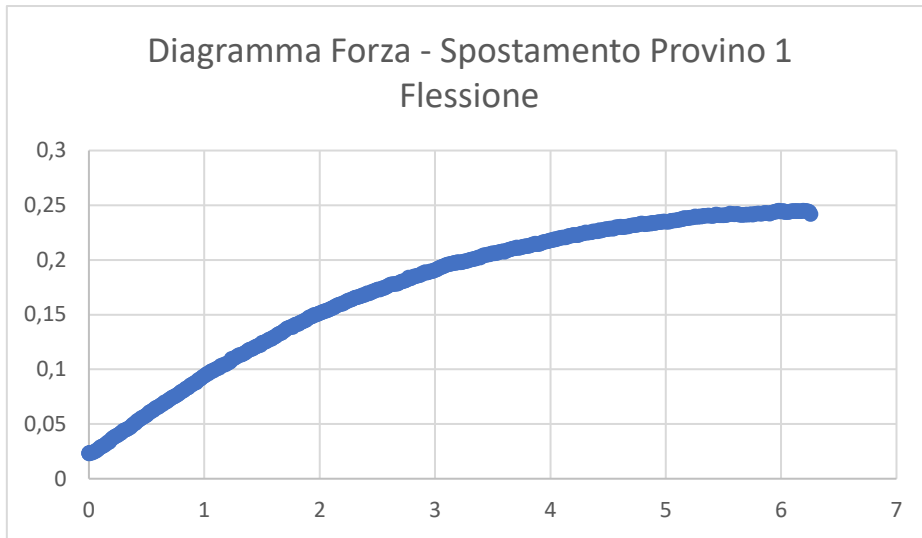


Figura 5.1.2.5 Diagramma Forza - Spostamento provino 1

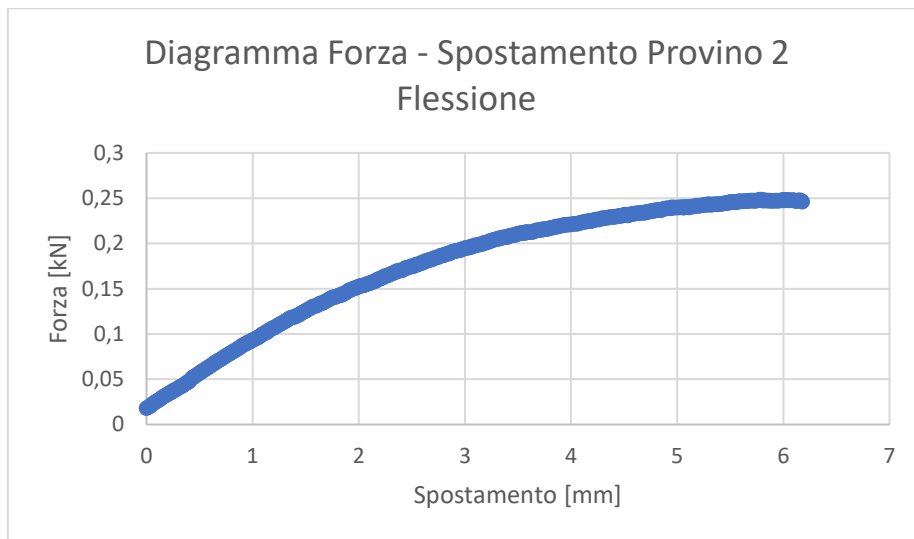


Figura 5.1.2.6 Diagramma Forza - Spostamento provino 2

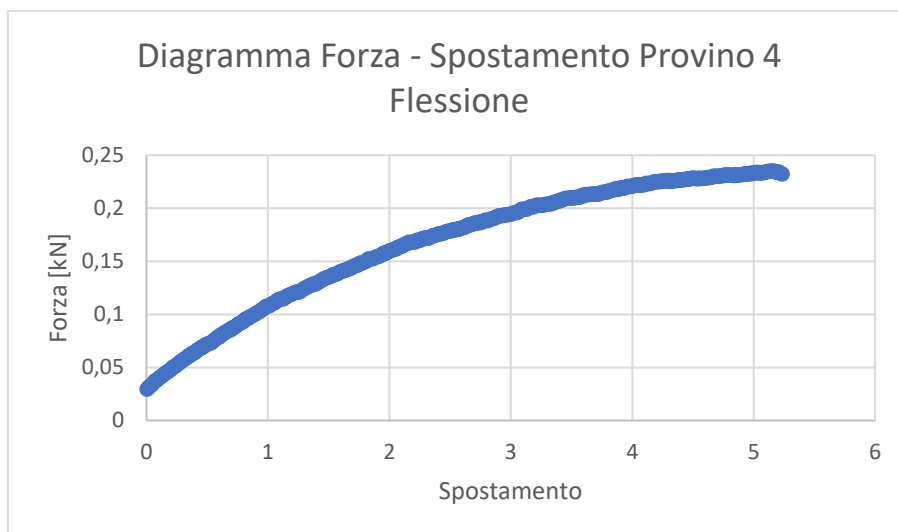


Figura 5.1.2.7 Diagramma Forza - Spostamento provino 4

Si riportano in Figura 5.1.2.8, 5.1.2.9, 5.1.2.10 le curve Sforzo – Deformazione ricavate dalle prove sui singoli provini e la linea di tendenza ricavata su Excel considerando solo il tratto lineare della curva per calcolare poi, tramite il coefficiente angolare, il modulo di flessione.

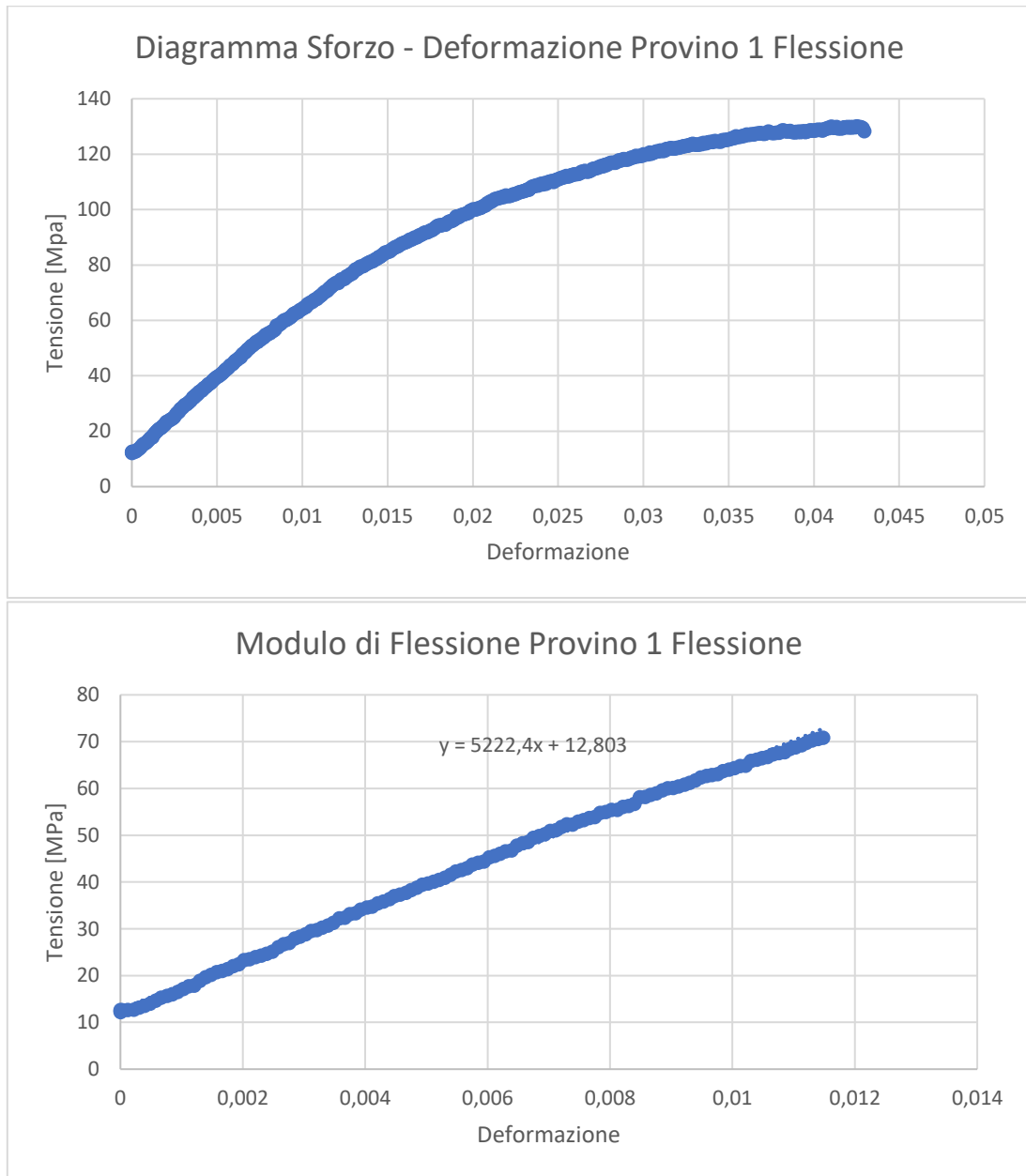


Figura 5.1.2.8 Diagramma Sforzo - Deformazione e calcolo modulo di flessione provino 1

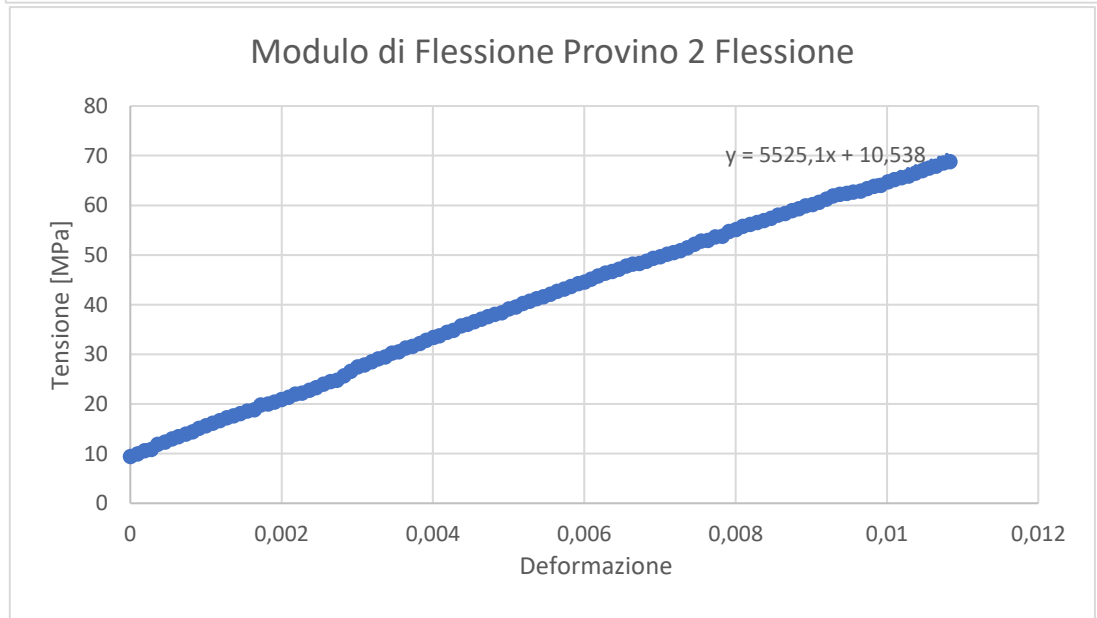
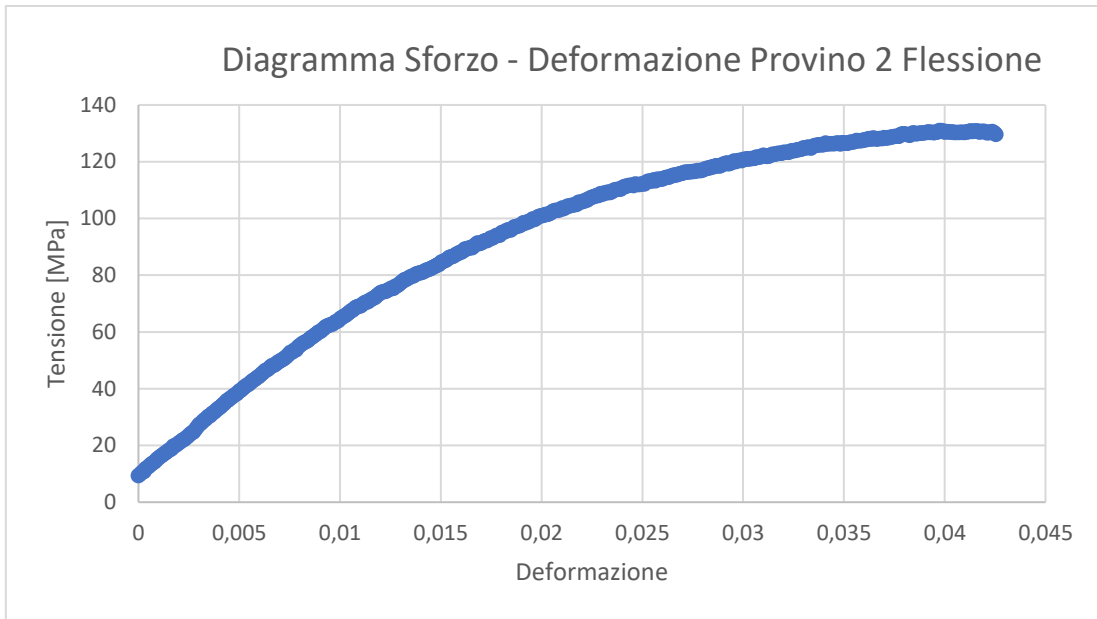


Figura 5.1.2.9 Diagramma Sforzo - Deformazione e calcolo modulo di flessione provino 2

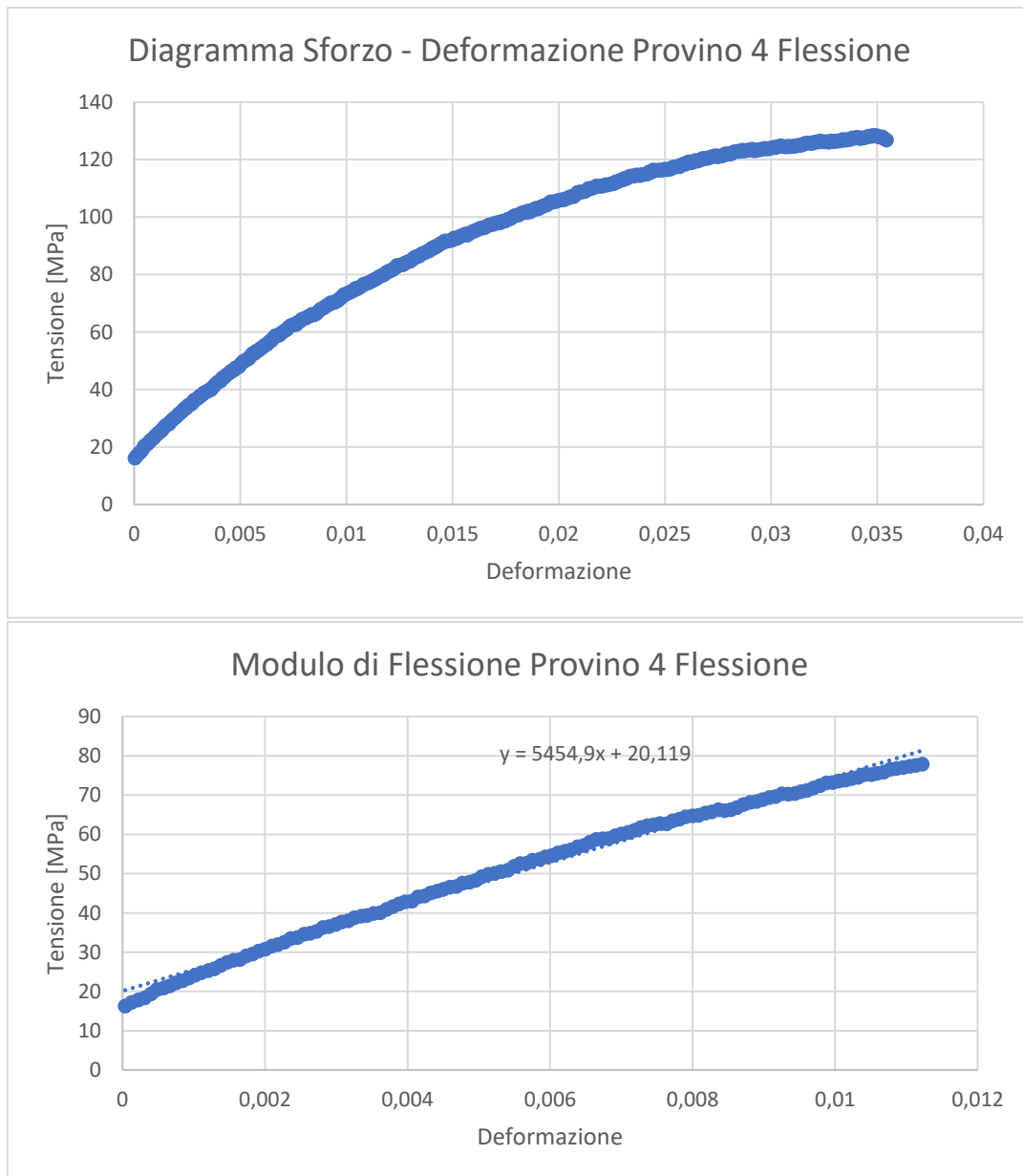


Figura 5.1.2.10 Diagramma Sforzo - Deformazione e calcolo modulo di flessione provino 4

Dopo aver ricavato quindi queste curve per i provini di PA603CF, è stato possibile ricavarsi i risultati fondamentali della prova di flessione: resistenza alla flessione, deformazione a rottura e modulo di flessione. Questi risultati sono riassunti nella tabella 5.1.2.11.

	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 4	MEDIA
Resistenza alla flessione	130,1 MPa	131 MPa	128,4 MPa	129,9 MPa
Deformazione a rottura	4,3 %	4%	3,5 %	3,9 %
Modulo di flessione	5222,4 MPa	5525,1 MPa	5454,9 MPa	5400,8 MPa

Tabella 5.1.2.11 Risultati prova di flessione a tre punti

Questi valori di resistenza alla flessione, deformazione a rottura e modulo di flessione ricavati dalle prove di flessione a tre punti effettuate nel laboratorio dell'UNIVPM sono, insieme ai risultati delle prove di trazione, una conferma che il materiale PA603CF sia adatto per la realizzazione della maschera protettiva. A differenza però dei risultati della prova di trazione, questi risultati sono più differenti rispetto a quelli presenti nel datasheet del PA603CF sul sito di Prosilas, in particolare per quel che riguarda il modulo di flessione che sul datasheet Prosilas è di 9170 Mpa, ma questa sostanziale differenza è spiegabile dal fatto che nel datasheet

Prosilas viene indicata come normativa seguita per i test l'ASTM D790, mentre nei test in laboratorio UNIVPM è stata seguita l'ISO 178 ed è normale avere risultati diversi anche perché le dimensioni dei provini testati cambiano in base alla normativa che si segue. Inoltre, anche con questa prova, come già visto nel paragrafo precedente sulla prova di trazione, l'andamento della curva sforzo-deformazione segue il tipico andamento che ci si aspetta quando si va a testare un materiale composito come in questo caso.

5.2 SCANSIONE 3D DEL VOLTO E MODELLAZIONE 3D DELLA MASCHERA PROTETTIVA

Dopo aver eseguito i test di resistenza ed aver confermato la scelta del materiale PA603CF e della tecnologia di stampa 3D SLS per realizzare la maschera protettiva si passa quindi alla fase di scansione 3D del volto del soggetto in esame. Sulla base di questa scansione verrà poi modellata la maschera.

Nel capitolo 4 sono state presentate le diverse tipologie di scanner. Per questo caso studio lo scanner utilizzato è il "Go! SCAN SPARK" di Creaform (Figura 5.2.1) che rientra nella categoria degli scanner a luce strutturata.



Figura 5.2.1 Lo scanner Go! SCAN SPARK di Creaform

Dopo aver effettuato le operazioni preliminari di taratura dello scanner si è potuto procedere con la scansione del volto, avvalendosi anche dell'utilizzo del software VXelements, che viene fornito insieme allo scanner Go! SCAN SPARK. Grazie a questo software si riesce a vedere in tempo reale i dati acquisiti dalla scansione e si riesce anche ad iniziare a modellare la superficie scansionata. In Figura 5.2.2 è possibile notare i primi step del processo di scansione.

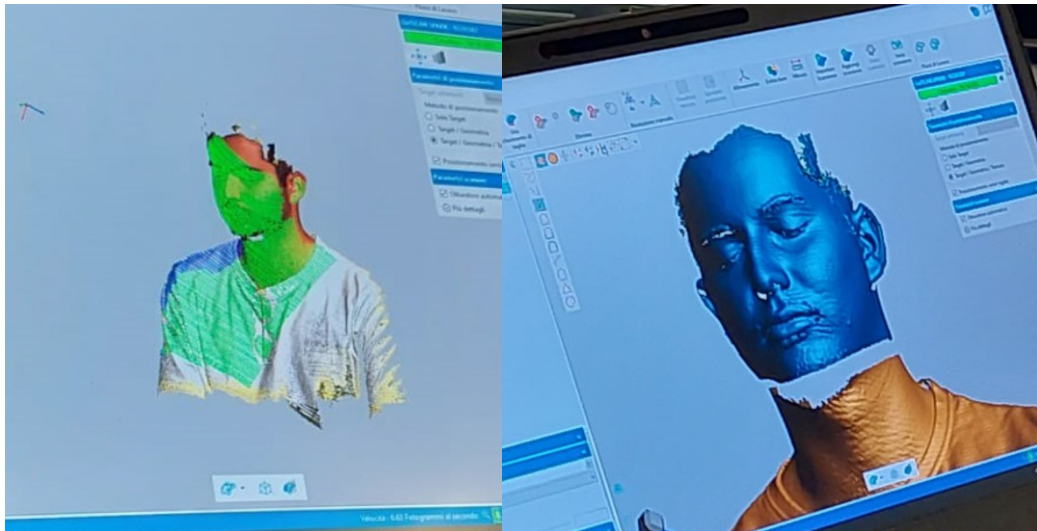


Figura 5.2.2 Acquisizione dati e primo risultato della scansione

In seguito, si è eliminata la zona di non interesse ai fini di questo lavoro, ottenendo solamente il modello 3D del volto del soggetto in questione. In Figura 5.2.3 è possibile vedere il risultato di questo step.

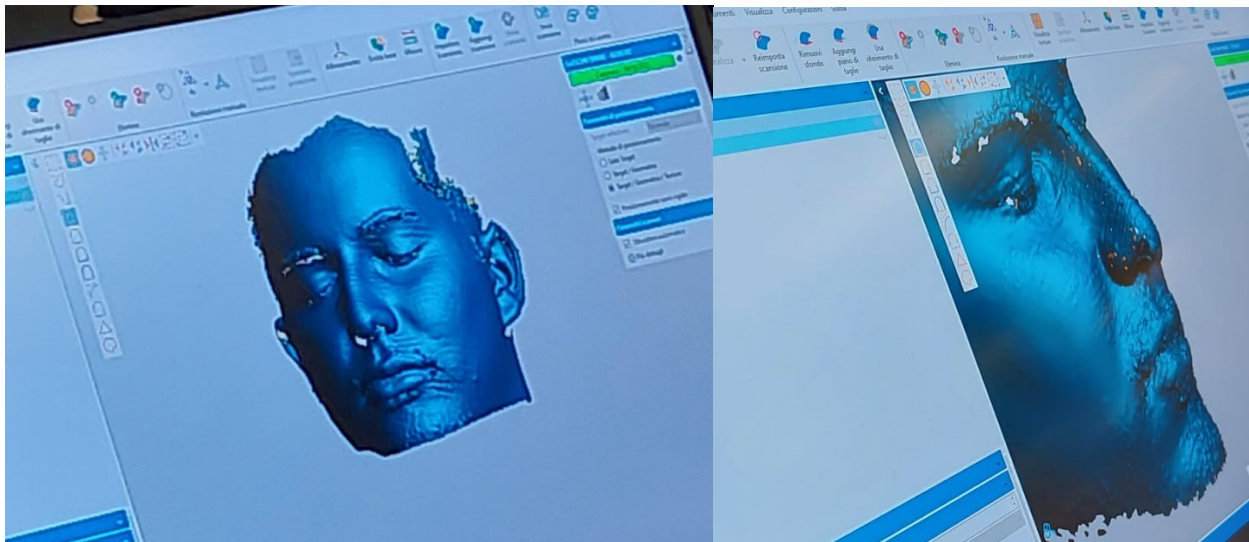


Figura 5.2.3 Ottenimento del modello 3D del volto

Come si può notare dalle foto in Figura 5.2.3 il modello che è stato ricavato presenta dei piccoli difetti (solchi, increspature, ecc..). Per poter lavorare su una superficie migliore si è quindi lavorato su questa superficie per renderla liscia e facilitare così la modellazione della maschera sulla base di un modello 3D esente da difetti. Il risultato di questo step è visibile in Figura 5.2.4.



Figura 5.2.4 Risultato dopo l'operazione di eliminazione difetti

Dopo aver quindi acquisito un modello 3D liscio del volto del soggetto in questione si può iniziare la fase di modellazione della maschera protettiva. Uno step preliminare però che è stato fatto è stato quello di rifinire ancora di più la superficie del volto 3D andando a dare una prima forma geometrica a quella che poi diventerà la maschera protettiva modellata definitivamente. Il risultato di questo step è riportato in Figura 5.2.5 dove è possibile vedere la sequenza dei modelli 3D ricavati, in particolare quello con difetti, quello liscio e infine quello rifinito.

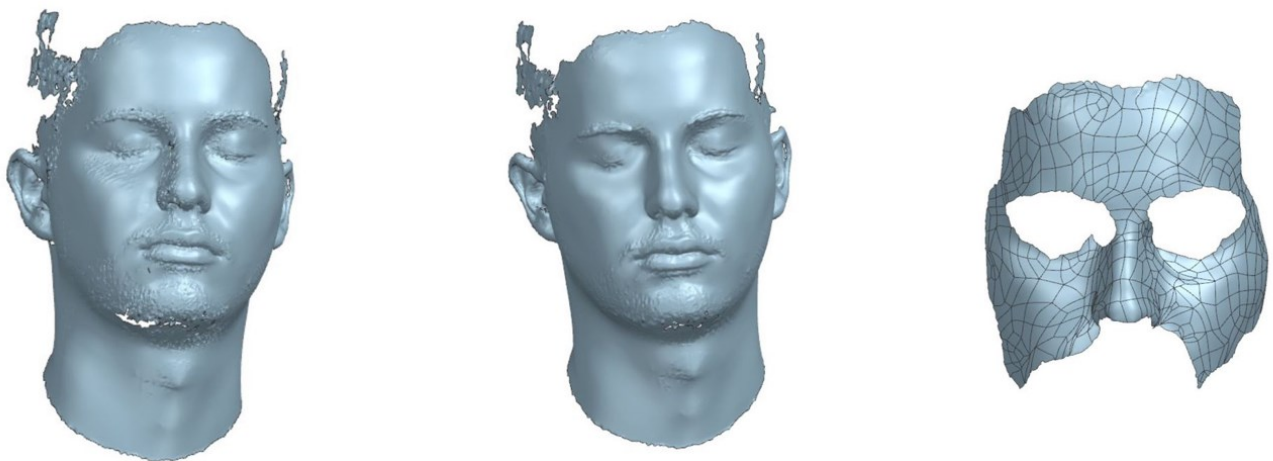


Figura 5.2.5 A sinistra la scansione con difetti, al centro quella senza difetti e a destra il modello 3D rifinito del volto

Sulla base di quest'ultimo risultato si è poi proceduto con la modellazione della maschera protettiva sul software NX.

Il punto di partenza per iniziare la fase di design della maschera protettiva è capire quali zone del volto essa debba proteggere di più perciò in questo caso dove il soggetto in esame non presentava fratture di alcun tipo si è ipotizzata una possibile frattura nella zona dello zigomo destro, quindi in quella zona si è aumentata l'area coperta dalla maschera, mentre nella zona opposta si è cercato di utilizzare meno materiale possibile per

rendere la maschera ancora più leggera e comoda, lasciandola anche aperta nell'area esterna all'occhio sinistro in modo da ampliare il più possibile il campo di vista del soggetto che dovrà indossarla. Questo perché un altro fattore di cui si è tenuto molto conto in fase di design è stato quello di realizzare un dispositivo che incidesse il meno possibile sulla vista periferica del soggetto, consentendo quindi all'atleta di avere un campo di vista più largo possibile. Post stampa poi un'operazione da fare quando si andrà a rivestire internamente la maschera in carbonio con un materiale morbido e che può entrare in contatto con la pelle è quella di aumentare il volume nell'area del trauma in modo tale da evitare il contatto tra quell'area e la maschera così da scaricare la parte interessata dal trauma dalle sollecitazioni che possono avvenire per esempio durante una partita di calcio, come possibili pallonate o scontri.

La modellazione della maschera su NX è stata effettuata svolgendo diversi passaggi che verranno descritti qui di seguito.

La fase iniziale è quella di realizzare un primo perimetro della maschera per cui su NX è stato creato un piano frontale alla maschera su cui poi disegnare il perimetro tramite i comandi "Sketch" e "Spline". In seguito si è utilizzato il comando Offset per proiettare più all'esterno la curva realizzata in modo poi da tagliare la zona compresa tra le due curve. In Figura 5.2.6 sono visibili questi passaggi.

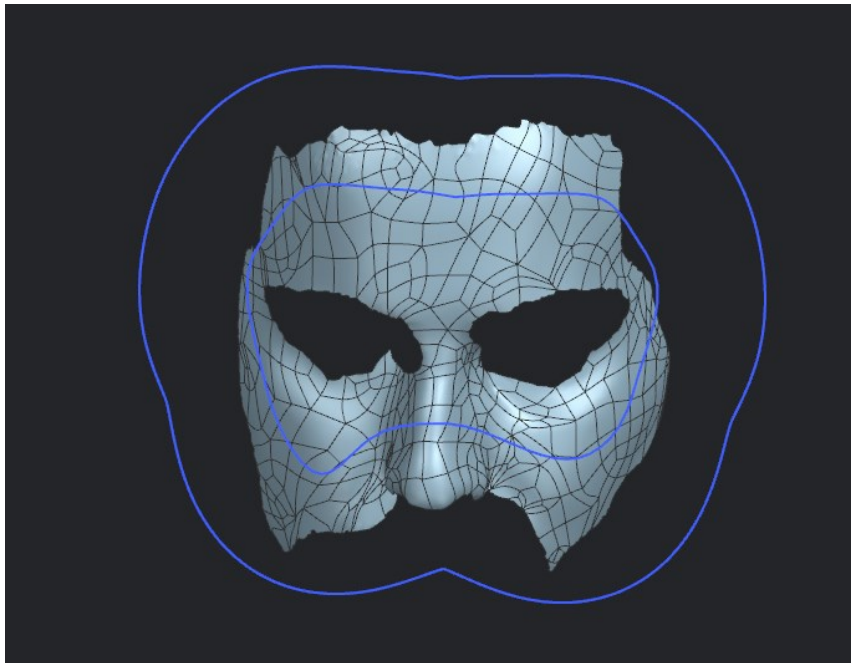


Figura 5.2.6 Creazione primo perimetro della maschera

Dopo questa prima fase si è proceduto all'eliminazione delle parti della maschera fuori dal perimetro disegnato tramite i comandi "Estrusione → Sottrai". Il risultato è riportato in Figura 5.2.7.



Figura 5.2.7 La forma della maschera dopo la prima estrusione

Dopodiché si è seguito il procedimento “Sketch → Spline” (Figura 5.2.8) per creare il contorno nella zona degli occhi. In particolare nella parte destra della maschera il contorno è chiuso perché nel lato destro del volto è stata ipotizzata la zona affetta dal trauma, mentre sul lato sinistro vicino all’occhio sinistro si è deciso di lasciare la maschera aperta per aumentare il più possibile il campo di vista del soggetto.

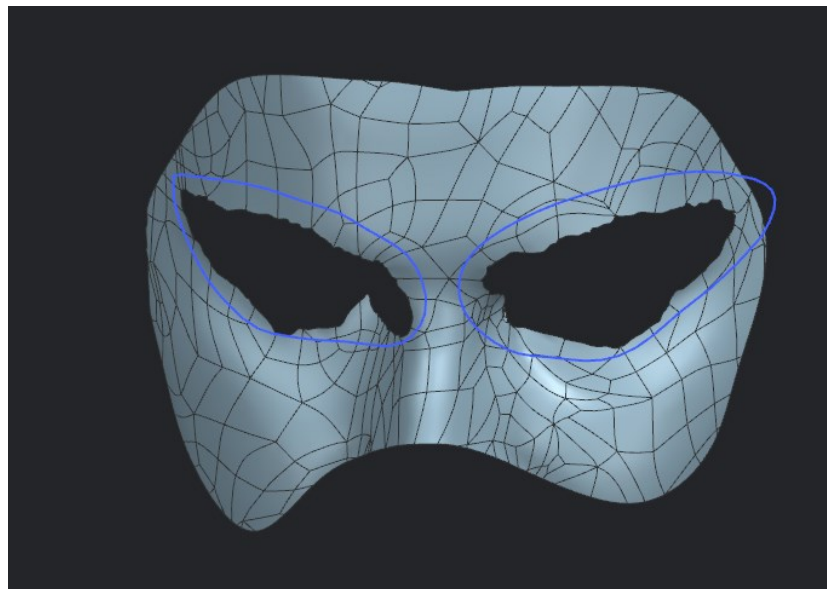


Figura 5.2.8 Creazione forma degli occhi

Anche in questo caso si è proceduto poi all’eliminazione delle parti della maschera dentro al contorno disegnato tramite i comandi “Estrusione → Sottrai”. Il risultato è riportato in Figura 5.2.9.



Figura 5.2.9 Risultato dopo la seconda estrusione

Si sono poi realizzate altre piccole modifiche per migliorare la forma della maschera e degli occhi, con lo stesso procedimento sopra descritto e, in seguito, è stata selezionata tutta la maschera e con un offset di 2,5 mm è stato dato uno spessore a quella che fino ad ora era una superficie senza spessore. È stato scelto uno spessore di 2,5 mm perché è stato ritenuto lo spessore adatto a realizzare una maschera leggera e comoda, ma soprattutto robusta e resistente. Il risultato di questo passaggio è riportato in Figura 5.2.10.

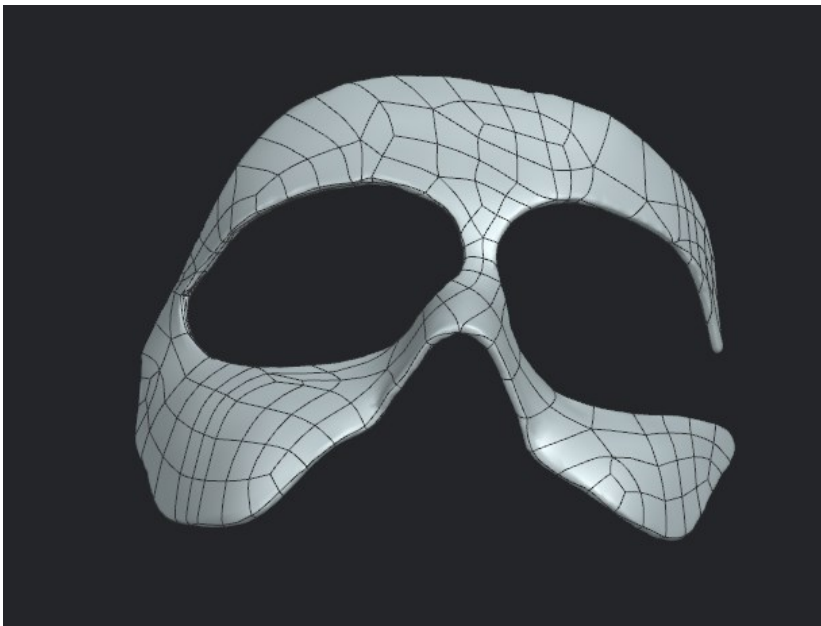


Figura 5.2.10 Maschera con spessore

Una volta creato il solido con spessore si è migliorata il più possibile la forma finale da dare alla maschera, quindi sempre con i comandi "Sketch → Spline → Estrusione → Sottrai" si è creato sia il perimetro esterno definitivo della maschera che il contorno per gli occhi. In seguito sono stati realizzati tre fori sui lati della maschera, due sul lato sinistro e uno su quello destro, per inserire post stampa gli elastici che terranno legata la maschera al volto. I fori, di diametro di 4 mm, sono stati realizzati tramite i comandi "Sketch → Cerchio → Estrusione → Sottrai". Il risultato di questa fase di modellazione è visibile in Figura 5.2.11.



Figura 5.2.11 Maschera con perimetro definitivo e fori

Infine sono stati fatti i raccordi (con raggio 0,4 mm) sui fori, sul contorno degli occhi e sul contorno della maschera. Il file è stato quindi salvato in formato STL per poter poi essere inviato alla stampante per la fase di stampa 3D. In Figura 5.2.12 si può osservare il risultato finale della fase di modellazione, ossia la maschera da stampare con tecnologia SLS.



Figura 5.2.12 Risultato finale della modellazione. Maschera in formato STL pronta per essere stampata

A questo punto la fase di modellazione 3D della maschera può definirsi conclusa e rimane solo la fase di stampa 3D.

5.3 STAMPA 3D

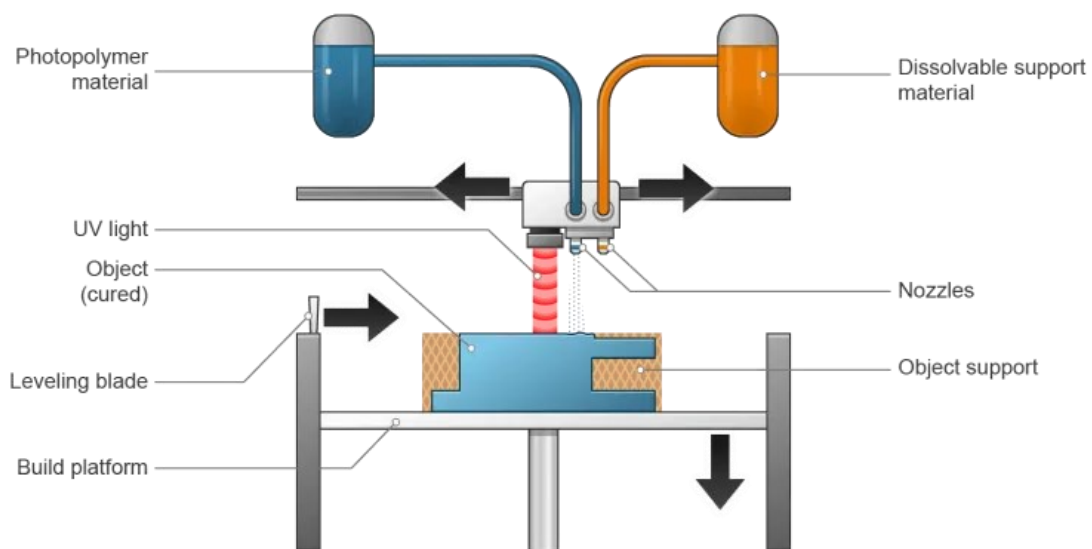
Una volta terminata la fase di design della maschera protettiva questa è pronta per essere stampata. Essendo questo un caso di studio accademico si è deciso di non stampare subito la maschera in PA603CF tramite una stampante 3D SLS, ma di procedere in primo luogo con la stampa 3D di un prototipo della maschera protettiva, per constatare la bontà del lavoro svolto in fase di design.

Il prototipo è stato stampato all'interno dei laboratori UNIVPM utilizzando la stampante 3D Objet30 di Stratasys che sfrutta la tecnologia additiva Material Jetting.

Il Material Jetting è un processo di stampa 3D che offre la possibilità di creare oggetti combinando diversi materiali e colori. In questa tecnologia additiva vengono uniti i principi del getto d'inchiostro, usato dalle stampanti 2D, e l'uso di fotopolimeri. In particolare, il Material Jetting prevede l'utilizzo di fotopolimeri che si solidificano quando vengono esposti alla luce o al calore, in modo simile alla stereolitografia.

Il processo di stampa parte con la creazione dell'oggetto desiderato servendosi di un software CAD, a cui poi segue la fase di slicing, ossia l'oggetto da stampare viene tagliato in numerose immagini digitali, ciascuna corrispondente a uno strato dell'oggetto, tramite un apposito software. Il file STL viene poi inviato alla stampante 3D per la stampa.

La fase di stampa con tecnologia additiva Material Jetting prevede poi diversi passaggi. Centinaia di minuscoli ugelli, che si trovano all'interno della testina di stampa distribuiscono un fotopolimero per costruire una parte strato per strato, in modo simile alla stereolitografia, consentendo di depositare il materiale di costruzione in modo rapido e lineare. Dopo che le gocce di fotopolimero sono state depositate sulla piattaforma di costruzione, queste polimerizzano e solidificano tramite applicazione di energia sottoforma di raggi ultravioletti o calore e così si forma il primo strato. Dopodiché la piattaforma scende, viene depositato nuovo materiale e il processo descritto sopra si ripete fino alla formazione di tutti gli strati, quindi fino alla realizzazione dell'oggetto finale. In Figura 5.3.1 è possibile osservare una rappresentazione schematica di una stampante 3D Material Jetting.



2018 © Dassault Systèmes

Figura 5.3.1 Schema del Material Jetting [48]

I processi additivi a getto di materiale richiedono l'utilizzo di strutture di supporto, che vengono stampate contemporaneamente alla parte per garantirne la stabilità durante la stampa. I supporti sono realizzati con un materiale solubile che viene quindi depositato contemporaneamente al materiale con cui viene realizzata

la parte e possono essere rimossi dopo la stampa semplicemente immergendo la parte in acqua o in altri solventi.

Diverse tecniche costituiscono il termine Material Jetting, le più popolari sono:

- Stampanti a Material Jetting DOD (Drop On Demand): hanno due getti di stampa di cui uno per depositare il materiale di costruzione e un altro per il materiale di supporto solubile. Le stampanti 3D DOD seguono un percorso predeterminato e depositano il materiale in modo puntiforme per costruire la sezione trasversale di un componente. Queste macchine impiegano anche una fresa volante che rasenta l'area di costruzione dopo ogni strato per garantire una superficie perfettamente piana prima di stampare lo strato successivo.
- PolyJet di Objet: la tecnologia di stampa 3D PolyJet è stata brevettata per la prima volta dall'azienda Objet, ora marchio Stratasys. I materiali fotopolimerici vengono spruzzati in strati ultrasottili sulla piattaforma di costruzione, come nella stampa di documenti a getto d'inchiostro. Ogni strato di fotopolimero viene polimerizzato dalla luce UV subito dopo il getto. La ripetizione delle fasi di getto e polimerizzazione, strato dopo strato, produce modelli completamente polimerizzati che possono essere maneggiati e utilizzati immediatamente. Il materiale di supporto gelatinoso, appositamente progettato per supportare geometrie complesse, può essere facilmente rimosso a mano o con un getto d'acqua.
- NanoParticle Jetting (NPJ) di XJet: questa tecnologia di Material Jetting, brevettata da XJet, utilizza un liquido contenente nanoparticelle di costruzione o di supporto che viene caricato nella stampante sotto forma di cartuccia e gettato sul vassoio di costruzione in strati estremamente sottili di goccioline. Le alte temperature all'interno dell'involucro edilizio fanno evaporare il liquido, lasciando dietro di sé parti realizzate con il materiale da costruzione.

Il Material Jetting presenta quindi molti vantaggi:

- Precisione: deposizione precisa di minuscole goccioline di materiale, strati sottili fino a 0,013 mm, ottenimento di parti con finitura superficiale di elevata qualità e con caratteristiche piccole ma altamente accurate.
- Parti a colori e multimateriale
- Strutture di supporto solubili
- Grandissima varietà di materiali
- Componenti trasparenti
- Possibilità di realizzare materiali compositi.

Ovviamente esistono anche dei contro nell'utilizzo di questa tecnologia che sono principalmente le scarse proprietà meccaniche delle parti realizzate con questa tecnica di stampa 3D e il processo di stampa lento.

Visti e considerati quindi tutti questi pro e questi svantaggi è facile capire come la tecnologia di stampa 3D Material Jetting sia una scelta eccellente per realizzare prototipi realistici, in quanto fornisce un eccellente livello di dettaglio, un'elevata precisione e una finitura superficiale liscia.

Questa descrizione teorica del Material Jetting è utile ai fini di questa trattazione per capire il perché si sia scelto di stampare il prototipo della maschera protettiva facciale con questa tecnologia e il processo che la stampante 3D ha seguito durante la fase di stampa.

In particolare, come già accennato sopra, per la stampa del prototipo è stata utilizzata la stampante Objet30 di Stratasys. Prima di far partire la stampa è stato inviato il file STL della maschera al software di slicing. I parametri di stampa indicati dal software sono i seguenti:

- Orientamento parte automatico: il software imposta automaticamente l'orientamento della parte nella stampante in maniera da minimizzare i supporti e metterla il più vicino possibile alle testine di stampa
- Peso materiale: 130 g
- Peso supporti: 251 g
- Tempo di stampa: 20 ore e 23 minuti

Post fase di stampa i supporti sono stati rimossi accuratamente prima con operazioni manuali e poi tramite l'utilizzo di un'idropulitrice. Il risultato finale è dunque il prototipo realizzato in VeroWhitePlus (RGD835), un fotopolimero rigido e opaco, della maschera facciale protettiva. Il prototipo è visibile in Figura 5.3.2.

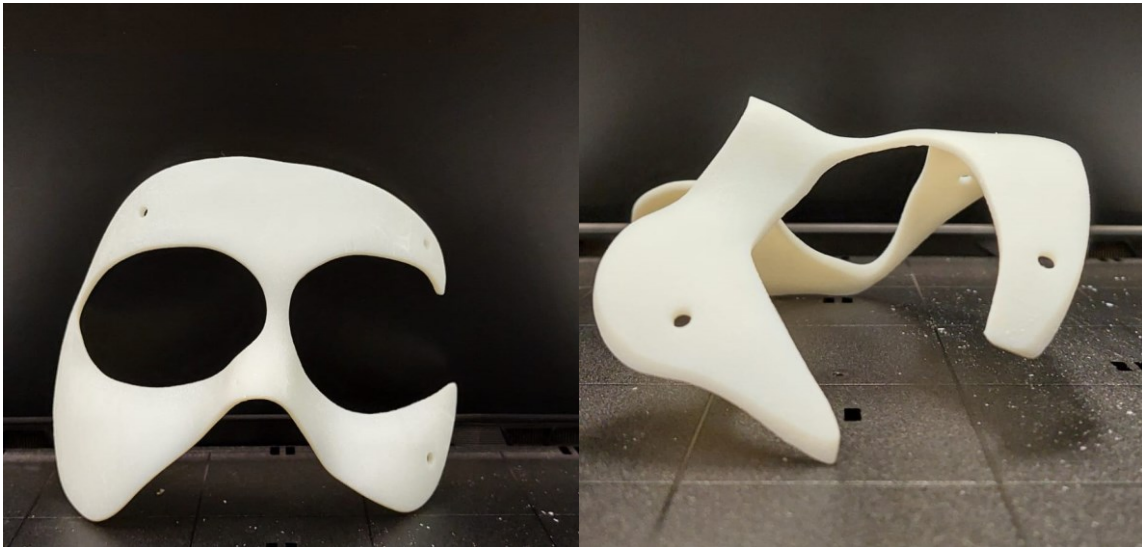


Figura 5.3.2 Prototipo della maschera protettiva

Vista la buona riuscita della stampa 3D del prototipo della maschera protettiva si è potuto procedere con la stampa 3D della maschera protettiva in PA603CF.

Il file in formato STL contenente il design 3D della maschera facciale protettiva è stato inviato all'azienda Prosilas per poter essere stampato grazie alle loro stampanti 3D SLS, realizzando così la maschera protettiva facciale in PA603CF. L'SLS (Selective Laser Sintering) è già stata descritta nel capitolo 3, quindi in questo paragrafo verranno riportate solamente le informazioni più importanti.

La tecnologia SLS utilizza polveri con granulometria controllata come materiale di produzione che viene depositato uniformemente all'interno della camera della macchina. I materiali di stampa vengono fusi mediante l'applicazione di energia termica fornita da un laser ad alta potenza che consente di sinterizzare localmente le particelle strato per strato.

Il processo con cui si realizza il pezzo è il seguente:

- Deposizione dello strato di polvere.
- Il laser traccia il modello di ogni sezione trasversale di un progetto 3D su uno strato di polvere.
- Dopo aver costruito uno strato, la piattaforma di costruzione si abbassa e un altro strato viene costruito al di sopra del precedente fino al completamento della parte.
- Raffreddamento della vasca di costruzione: la vasca di costruzione viene portata a temperatura ambiente prima dell'estrazione del componente in modo naturale (lento raffreddamento fino a T_{amb}) o forzato (estrazione del calore dall'area di lavoro).

- Estrazione del componente: la polvere non sinterizzata viene rimossa tramite sistemi di aspirazione che filtrano la polvere selezionando i granelli di dimensione idonea. Il prodotto finale, avvolto in polvere non processata viene pulito con spazzole e aria pressurizzata.

I vantaggi principali dell'SLS sono:

- Elevato rateo produttivo
- Non c'è necessità di supporti
- Possibilità di impilare le parti
- Ottime precisioni dimensionali
- Facile riutilizzo delle polveri

Per quanto riguarda invece i principali parametri di processo da impostare nel momento in cui si stampa un pezzo con tecnologia SLS questi sono:

- Potenza Laser
- Velocità di scansione
- Spessore strato
- Hatch spacing o spaziatura tra due tracce parallele del laser

L'azienda Prosilas è l'unico service in Europa di stampa 3D in grado di processare il materiale scelto per la stampa della maschera, ossia il PA603CF, nella stampante EOS P770. La stampante EOS P770 (Figura 5.3.3), utilizzata per produrre la maschera protettiva, è una stampante 3D SLS con tecnologia di fusione a letto di polvere ed ha un sistema dotato di due laser. Questa stampante ha una camera di stampa molto ampia ed è dotata anche di un sistema di controllo automatico della temperatura della camera di stampa per ottenere una miglior qualità di stampa.



Figura 5.3.3 La stampante EOS P770 [18]

Il risultato della stampa 3D su questa stampante è il punto di arrivo di questo lavoro di tesi, ossia la realizzazione della maschera protettiva facciale in PA603CF. La maschera prodotta è visibile in Figura 5.3.4.



Figura 5.3.4 La maschera protettiva facciale in PA603CF

Post fase di stampa la maschera è pronta, ma prima di poter essere utilizzata devono essere fatti altri step che non sono stati eseguiti e riportati in questa tesi perché come scritto a inizio capitolo in questo lavoro di tesi si è voluti rimanere su un livello qualitativo, andando ad analizzare gli step che portavano dal concepimento alla stampa di una maschera protettiva facciale per uso calcistico. Ciò che deve essere fatto post stampa è stato analizzato a livello teorico e non pratico. Infatti, si è già detto sia che la maschera debba essere rivestita internamente con un materiale morbido che può entrare a contatto con la pelle del soggetto sia che va evitato il contatto tra l'area interessata dal trauma e la maschera, favorendo invece il contatto maschera – zone sane, così da scaricare la parte interessata dal trauma dalle sollecitazioni che possono avvenire per esempio durante una partita di calcio, come possibili pallonate o scontri. Questo contatto tra maschera – zona del trauma può essere evitato tramite degli appoggi, realizzati con un materiale morbido e posizionati in maniera strategica in modo da rialzare leggermente la maschera nel punto dove non si desidera il contatto con il volto. Possono poi essere fatti dei trattamenti superficiali per migliorare l'estetica della mascherina ed è possibile anche personalizzare la maschera con adesivi colorati. Un'ultima operazione da fare è aggiungere alla maschera, tramite gli appositi fori realizzati, gli elastici per legare la maschera al volto.

CONCLUSIONE

L'obiettivo iniziale che si pone questa tesi è quello di analizzare l'utilizzo dell'Additive Manufacturing nel mondo dello sport, in particolare del calcio, focalizzandosi sulla produzione tramite manifattura additiva di differenti tipologie di dispositivi di protezione per le varie zone del corpo affette da traumi.

È stato quindi analizzato l'uso della stampa 3D nello sport per la realizzazione di dispositivi protettivi da utilizzare durante l'attività sportiva per proteggere l'area colpita dal trauma e consentire quindi all'atleta di poter giocare senza rischiare di incorrere in un nuovo infortunio in quella zona del corpo. Sono stati portati esempi di questi dispositivi di protezione, come le maschere facciali in carbonio indossate dai calciatori o i device protettivi per le mani utilizzati da alcuni giocatori di pallavolo della Lube Volley e realizzati tramite stampa 3D dall'azienda Prosilas.

In seguito, sono stati confrontati e descritti alcuni dei possibili materiali con cui realizzare questi dispositivi e alcune tecnologie di produzione. La conclusione di questa analisi su materiali e tecnologie è che non esiste un materiale migliore di un altro a prescindere, così come non esiste una tecnologia di produzione migliore dell'altra. La scelta di materiale e tecnologia migliori si fonda sulle caratteristiche che il device protettivo deve avere, sulla quantità da produrre, sui costi e anche sulle esigenze del cliente.

Da quello che si evince da questa tesi si può però concludere che, dovendo identificare una tecnologia da scegliere in questi casi, considerando che il dispositivo da realizzare è singolo, che si deve badare più a ottenere ottime proprietà meccaniche che alla qualità superficiale e tenendo a mente costi e materiali processabili, allora la scelta migliore ricade sull'SLS che consente di ottenere parti con ottime caratteristiche meccaniche, non è costosa come altre tecnologie, non ha il problema di rimuovere i supporti e c'è un'ampia gamma di materiali lavorabili con questa tecnologia. Per la scelta dei materiali vale lo stesso discorso, ma dovendo scegliere tra quelli presentati i materiali migliori si può dire che per realizzare i device usati dai giocatori di volley per proteggere le dita delle mani allora il TPU è la scelta corretta perché ha ottime proprietà meccaniche e flessibilità, essendo il punto di contatto tra plastica e gomma. Se, invece, va realizzata una maschera protettiva facciale, allora in quel caso la scelta ideale è il PA603CF che abbina le straordinarie proprietà meccaniche dei compositi in fibra di carbonio (rigidità estrema, eccellente resistenza alla deformazione e durezza, leggerezza) alla possibilità di essere stampato in 3D tramite SLS perché si presenta sotto forma di polvere ed è in grado quindi di essere sinterizzato.

È stato poi presentato il workflow di fabbricazione, con gli step da seguire per realizzare questi device protettivi tramite stampa 3D. Questi step, comprendenti i test di resistenza sul materiale scelto, la scansione 3D della superficie del corpo affetta dal trauma su cui poi andare a realizzare il dispositivo di protezione, la fase di design e la fase di stampa 3D, sono stati descritti dettagliatamente in modo tale da capire anche come procedere nella seconda fase di questo lavoro di tesi e cioè la realizzazione di una maschera protettiva maxillofacciale simile a quelle indossate dai calciatori durante l'attività sportiva.

Realizzare una maschera protettiva maxillofacciale è, infatti, l'obiettivo finale e principale di questa tesi. Dopo aver discusso e analizzato materiali, tecnologie e workflow, è stato messo in pratica tutto ciò che nei capitoli precedenti della tesi era stato trattato da un punto di vista teorico. Per la realizzazione della maschera protettiva è stato scelto il PA603CF, proprio per le caratteristiche che possiede questo materiale, che combina fibra di carbonio e Poliammide, e che si adattano perfettamente allo scopo. È stata poi ovviamente scelta l'SLS come tecnologia di produzione. In seguito, sono stati effettuati i test di resistenza su dei provini di PA603CF e i risultati della prova di trazione e di quella di flessione a tre punti hanno confermato la bontà della scelta fatta. Si è poi proceduto con la scansione 3D del volto del soggetto in esame e con la modellazione 3D della maschera facciale ipotizzando l'area coinvolta da un trauma facciale, perché il soggetto, essendo un caso studio accademico non riportava alcun trauma. Tramite la stampa 3D di un prototipo è stata poi verificata la bontà del lavoro svolto in fase di design della maschera. L'attività finale è stata la stampa 3D, grazie all'azienda

Prosilas, della maschera protettiva in PA603CF, tramite la tecnologia SLS ed il risultato finale ha soddisfatto le aspettative.

I possibili sviluppi futuri di questo lavoro di tesi, che non sono stati analizzati in questa trattazione, riguardano le operazioni da svolgere nella fase successiva a quella di stampa. Dopo aver stampato la maschera in carbonio, infatti, questa va rivestita internamente con un materiale morbido che può entrare a contatto con la pelle del soggetto. Dopodiché vanno posizionati in maniera strategica degli “appoggi” in modo da rialzare leggermente la maschera nel punto dove non si desidera il contatto maschera – zona del trauma, favorendo invece il contatto maschera – zone sane, così da scaricare la parte interessata dal trauma da eventuali sollecitazioni. Possono poi essere fatti dei trattamenti superficiali per migliorare l'estetica della mascherina. Queste fasi potrebbero tutte essere oggetto di studio in futuro per capire, per esempio, che tipo di trattamenti superficiali è bene fare, con che materiale e processo è meglio rivestire la maschera ed anche la forma e la tecnologia di produzione degli appoggi. Un'altra operazione che può essere eseguita post fase di stampa e che non è stata trattata in questa tesi rientrando quindi tra i possibili sviluppi futuri di questo lavoro è l'esecuzione di test d'impatto sulla maschera realizzata, per verificare come essa reagisca e avere dei dati in più sulla resistenza all'impatto della maschera, oltre ai dati già presenti sul datasheet sul sito Prosilas del PA603CF riguardanti le voci “Izod Impact Strength – Notched” e “Izod Impact Strength – Unnotched”.

In conclusione, si può affermare che il workflow seguito e le scelte fatte sul materiale e nella modellazione 3D hanno portato i risultati desiderati e quindi in futuro gli step seguiti possono essere ripetuti per stampare in 3D qualsiasi tipo di dispositivo di protezione per il corpo. Si è quindi constatato che la metodologia di lavoro seguita è stata corretta e potrebbe essere replicata in futuro davanti all'esigenza di creare una maschera protettiva facciale per un soggetto che ne abbia veramente bisogno per riprendere in sicurezza l'attività sportiva dopo aver subito un determinato tipo di trauma facciale.

SITOGRAFIA

- [1]<https://www.ridix.it/blog/approfondimenti/additive-manufacturing-cosa-e/>
- [2]https://www.ilmessaggero.it/salute/moltoSalute/osimhen_maschera_carbonio_kevlar_chirurgo_maxillo_facciale_tartaro-7338057.html?refresh_ce
- [3]<https://www.prosilas.com/lube-volley-prosilas-caso-studio/>
- [4][Material Data Center | Datasheet Ultrasint™ TPU 88A](#)
- [5][TPU materiale per stampa 3d SLS - Selective Laser Sintering \(prosilas.com\)](#)
- [6]<https://formlabs.com/it/blog/lay-up-materiali-compositi-fibra-di-carbonio/>
- [7]<https://formlabs.com/it/blog/presentazione-nylon-11-cf-powder/>
- [8]<https://it.3dsystems.com/stereolithography>
- [9] <https://it.3dsystems.com/selective-laser-sintering>
- [10] <https://www.instron.com/en/resources/glossary/izod-impact?region=Global%20Site>
- [11]<https://xometry.eu/it/stampa-3d-sinterizzazione-laser-selettiva-sls/>
- [12]<https://www.prosilas.com/materiali-prosilas-s-r-l/#materialisla>
- [13]<https://www.prosilas.com/capabilities-tecnologia-stampa3d-prosilas/#amtech>
- [14]<https://www.protolabs.com/it-it/risorse/blog/sinterizzazione-laser-selettiva-vantaggi-e-svantaggi/>
- [15]<https://www.prosilas.com/poliammide-e-fibra-di-carbonio-un-alleato-alla-produzione-solido-e-leggero/>
- [16]<https://www.prosilas.com/materiali-prosilas-s-r-l/alm603cf/>
- [17]<https://www.prosilas.com/in-prosilas-e-arrivata-la-4-stampante-3d-eos-%F0%9D%97%A3%F0%9D%9F%B3%F0%9D%9F%B3%F0%9D%9F%AC/>
- [18]<https://na.eos.info/Equipment/Polymer-Platforms/EOS-P-770>
- [19][PA 603 CF - Materiali SLS \(prosilas.com\)](#)
- [20][PA12 + VETRO - Materiali SLS \(prosilas.com\)](#)
- [21]<https://xometry.eu/it/stereolitografia-sla-stampa-3d-panoramica-della-tecnologia/>
- [22]<https://blog.treddy.it/scansione-3d-cose-come-funziona-e-come-puo-aiutare-il-tuo-business/>
- [23]<https://www.3dnatives.com/it/scanner-3d-qual-e-scegliere-170920219/>
- [24][SLS ed SLA, qual è la differenza? | LinkedIn](#)
- [25]<https://3dscanexpert.com/shining3d-launches-einscan-pro-2x-2x-plus-at-formnext-2018/>
- [26]<https://www.vger.eu/scanner-3d/scanner-3d-portatili/fotogrammetria/digimetric>
- [27]<https://www.creaform3d.com/it/soluzioni-di-metrologia/scanner-3d-portatili-goscan-3d>
- [28]<https://www.vger.eu/scansione-3d-reverse-engineering-modello-cad.html>
- [29]<https://formlabs.com/it/blog/come-usare-scansione-stampa-3d-ingegneria-inversa/>

- [30]<https://www.ilprogettistaindustriale.it/reverse-engineering-e-i-sistemi-di-acquisizione-3d/>
- [31]<https://it.3dsystems.com/3d-printers/sls-380>
- [32]<https://www.itop.it/dispositivi-ortopedici-su-misura/9f-maschera-protettiva-per-fratture-di-setto-nasale-zigomoi/>
- [33]<https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/plastiche/materiali-termoplastici-e-termoindurenti-da-stampaggio/prove-di-trazione-iso-527-1-2/>
- [34]<https://www.dazn.com/it-IT/news/altro/napoli-victor-osimhen-maschera/1lid1vrhxwm9k1md2x9eictqwq>
- [35]<http://www.steelservice.it/snervamento-rottura/>
- [36]https://www.areanapoli.it/varie/osimhen-nuova-maschera-speciale-la-usera-contro-il-venezia-foto_448660.html
- [37]<https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/plastiche/materiali-termoplastici-e-termoindurenti-da-stampaggio/prove-di-flessione-a-3-punti-in-accordo-alla-normativa-iso-178/>
- [38]https://www.researchgate.net/figure/Dimensions-of-PLA-flexural-specimen_fig1_356062799
- [39]<https://www.instron.com/it-it/products/testing-accessories/flexure-fixtures/three-point-bend-test-fixtures>
- [40]<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/izod-impact>
- [41]<https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/plastiche/materiali-termoplastici-e-termoindurenti-da-stampaggio/resistenza-di-impatto-su-provini-con-intaglio-izod-secondo-astm-d256/#:~:text=La%20norma%20ISO%20180%20descrive, valore%20legato%20alla%20sezione%20trasversale>
- [42]<https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/plastiche/materiali-termoplastici-e-termoindurenti-da-stampaggio/resistenza-di-impatto-su-provini-con-intaglio-izod-secondo-astm-d256/#c78019>
- [43]<https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/plastiche/materiali-termoplastici-e-termoindurenti-da-stampaggio/resistenza-di-impatto-izod-resistenza-allimpatto-su-provini-con-intaglio-iso-180/>
- [44]<https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/plastiche/materiali-termoplastici-e-termoindurenti-da-stampaggio/resistenza-di-impatto-charpy-resistenza-allimpatto-su-provini-con-intaglio-secondo-iso-179-1-iso-179-2/>
- [45]<https://www.intertek.com/polymers/testing/flexural-properties/#:~:text=A%20variety%20of%20specimen%20shapes,10mm%20x%204mm%20x%2080mm.>
- [46][99_269_Testing_of_Plastics_and_Rubber_E_EN.pdf \(zwickroell.com\)](#)
- [47]<https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/strain-measurement-basics/strain-gauge-fundamentals/tips-and-tricks-strain-gage-installation-on-fiber-reinforced-plastics>
- [48]<https://www.3ds.com/it/make/guide/process/material-jetting>
- [49]<https://www.3dnatives.com/it/material-jetting-polyjet-stampa-3d-110920219/>
- [50]<https://www.instron.com/en/resources/glossary/charpy?region=Global%20Site>

BIBLIOGRAFIA

[51] Dispense del corso UNIVPM di Tecnologie di fabbricazione additiva a.a. 2022/2023

[52] Dispense del corso UNIVPM di Tecnologie delle materie plastiche e dei compositi a.a. 2022/2023

[53] Dispense del corso UNIVPM di Tecnologie di fabbricazione di manufatti in composito a.a. 2021/2022

RINGRAZIAMENTI

Scrivo quest'ultima pagina perché tengo veramente tanto a ringraziare tutte le persone che mi sono state vicino durante questo capitolo della mia vita e che mi hanno aiutato a raggiungere questo traguardo.

Per prima cosa vorrei ringraziare la Professoressa Eleonora Santecchia, relatrice della mia tesi, per l'aiuto e il sostegno che mi ha dato in fase di preparazione di questo elaborato. La ringrazio anche e soprattutto perché ha saputo stimolare la mia curiosità verso il mondo Additive, consentendomi di lavorare sempre con il sorriso e mai con paura e agitazione.

Ringrazio vivamente anche il Professor Marco Mandolini per l'aiuto e per i preziosi consigli che mi ha saputo dare sulla modellazione 3D.

Ringrazio la mia fidanzata, Giuliana, perché è semplicemente la persona che ho sempre desiderato avere al mio fianco e non potrei chiedere altro. Grazie di esserci, sempre.

Grazie a mamma e papà per avermi sempre motivato a dare il massimo e a non accontentarmi mai.

Grazie a mio fratello Peppe per aver sempre creduto in me, in qualsiasi campo della mia vita, e per l'esempio che ogni giorno mi dà nel cercare di seguire i propri sogni e le proprie passioni.

Ringrazio tutti i miei parenti, quelli di sangue e quelli acquisiti. Perché non mi hanno fatto mai sentire solo in questo cammino e mi hanno insegnato ognuno qualcosa di importante. Chi da vicino, chi da lontano, chi con uno sguardo, chi con una parola, chi con una carezza e chi con una risata.

Ringrazio mia Nonna. Nonna Nina, per essere sempre la mia tifosa numero uno in tutto quello che faccio e per avermi insegnato, tra le tante cose che ho cercato di imparare da te, cosa sia la bontà d'animo.

Ringrazio tutti i miei amici per i momenti indimenticabili passati insieme e perché so che nel bene e nel male ognuno di noi ci sarà sempre per l'altro.

Grazie a tutti i miei compagni di università, per aver reso leggero un percorso impegnativo.

Grazie Matteo. Perché in poco tempo sei diventato per me un vero amico e una persona importantissima su cui so di poter sempre contare. E grazie per essere riuscito a superare la prova estrema di condividere con me per cinque mesi una camera minuscola nel cuore della Repubblica Ceca.

Infine, perché alla fine arriva il meglio si dice, grazie Gabriele. Potrei ringraziarti per centomila cose. Per l'aiuto, per gli appunti perfetti, per la pazienza infinita, per le spiegazioni sugli argomenti che non capivo e per le tante volte che ti ho stressato e tu mi hai comunque dato sempre una mano. Però il ringraziamento più grande te lo faccio per avermi insegnato a studiare con il piacere di farlo. Per conoscere di più e non per prendere un voto migliore. Per sapere sempre più cose e non per non sapere meno cose possibili. Grazie Gabri.