

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe 10

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN
MECCANICA DEGLI AZIONAMENTI MECCANICI

TITOLO DELL'ELABORATO:

Studio di fattibilità di una protesi di piede realizzata con
fibra di carbonio a basso costo

CANDIDATO
Marco Marian

RELATORE
Ing. Marco Troncosi

CORELATORE
Ing. Marco Ceruti

Anno Accademico 2013/2014
Sessione II

“Qualsiasi persona a cui sia risparmiato il dolore personale si deve sentire chiamata per aiutare a diminuire quello degli altri.”

Albert Schweitzer

Premio nobel per la pace nel 1952

Sommario

<u>Abstract</u>	pg.06
1. <u>Introduzione</u>	pg.07
1.1 Protesi ad elevate prestazioni	pg.09
1.2 Protesi a basso costo attualmente sul commercio	pg.16
1.3 La nostra idea di protesi a basso costo	pg.21
2. <u>Materiali compositi in Fibra di carbonio</u>	pg.23
3. <u>Introduzione ai principali metodi di produzione per materiali compositi</u>	pg.28
4. <u>Progettazione e analisi della protesi</u>	pg.37
4.1 Realizzazione modello 3D	pg.38
4.2 Analisi F.e.m	pg.40
4.3 Analisi dei risultati (Criteri di rottura per la fibra di carbonio)	pg.49
5. <u>Risultati. Conclusioni sulla geometria finale</u>	pg.52
6. <u>Realizzazione dello stampo</u>	pg.58
6.1 Modello al CAD	pg.58
6.2 Ciclo di lavorazione al CAM e realizzazione alla fresa CNC	pg.61

7. <u>Produzione della protesi</u>	pg.63
7.1 Realizzazione protesi con sagome intere	pg.65
7.2 Realizzazione protesi con sagome parziali	pg.68
8. <u>Prove alla pressa</u>	pg.70
8.1 Setup e protocollo di prove	pg.70
8.2 Risultati	pg.78
9. <u>Conclusioni</u>	pg.80
10. <u>Bibliografia</u>	pg.81
11. <u>Ringraziamenti</u>	pg.83

Abstract

Ad oggi il mondo dei materiali compositi è in continua espansione, e sono sempre di più le aziende che richiedono componenti prodotti con questo genere di materiali, uno fra essi è la fibra di carbonio. Tali aziende producono inevitabilmente degli scarti di lavorazione, derivanti dal taglio di sagome dei fogli di fibra di carbonio che costituiscono la materia prima della lavorazione. Tali ritagli prodotti rappresentano ancora una buona materia prima, che se ben conservata, può risultare ancora utilizzabile per fabbricazione di prodotti secondari. Così facendo sarà possibile ridurre il costo di smaltimento della fibra, e al contempo ottenere manufatti in fibra di carbonio a basso costo. È in questo contesto che rientra il lavoro e la ricerca di questo elaborato. L'obiettivo è quello di riutilizzare gli sfridi di lavorazione per realizzare protesi di piede a basso costo in fibra di carbonio. Un'ulteriore attenzione è stata posta al metodo di fabbricazione della protesi, il quale deve risultare semplice da realizzare. Per questa ragione si è deciso che la pressione durante la cottura fosse da applicare per via meccanica, attraverso la presenza di uno stampo e un controstampo, serrati tramite collegamenti bullonati.

Nell'elaborato sarà descritto il lavoro svolto per l'ottenimento della forma e della disposizione degli strati di fibra di carbonio, basato su simulazione di modelli ad elementi finiti, che ha condotto alle migliori sagome e al miglior orientamento delle fibre negli strati di materiale composito. Sarà inoltre illustrato il metodo utilizzato per ottenere lo stampo, e le procedure da seguire per la realizzazione del prototipo di protesi. Saranno infine illustrati i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione di due prototipi differenti, uno ottenuto con fibre intere, e uno realizzato con fibre corte.

1.Introduzione

La World Health Organization stima ad oggi 650 milioni di soggetti nel mondo con disabilità e amputazioni. Un numero pari al 10% della popolazione mondiale, la cui distribuzione tende a concentrarsi particolarmente nei paesi del terzo mondo, dove i rischi di subire amputazioni per cause varie, come malattie, conflitti armati o incidenti sul lavoro sono maggiori. I dati mostrano che l'80% delle disabilità sono concentrate nei paesi in via di sviluppo. Dati simili mettono in evidenza l'importanza di cercare soluzioni mediche che abbiamo come obiettivo il compromesso tra funzionalità ed economicità. Nei paesi più ricchi esistono soluzioni protesiche per ogni esigenza, differenziate per peso della persona, livello di attività e tipologia di attività. Esistono protesi per camminare, correre, nuotare, sciare o per fare climbing. La maggior parte di tali protesi sono realizzate in fibra di carbonio, un materiale che permette di combinare leggerezza e resistenza, ma che allo stesso tempo rende il prodotto costoso e difficile da realizzare con macchinari standard. Per queste ragioni tali protesi non sono adatte a essere esportate e vendute in tutto il mondo.

Fino ad oggi la ricerca di arti protesici a basso costo si è concentrata sull'utilizzo di materiali poco costosi, come legno e plastica, abbinati a tecniche produttive molto semplici per poter essere realizzate ovunque e con brevi periodi di preparazione tecnica. Ad oggi nei paesi con i più alti tassi di povertà sono quindi disponibili protesi economiche in legno e gomme varie, con livelli sufficienti di funzionalità, ma con il grosso difetto di non essere resistenti ad usura. Quest'ultimo infatti risulta ancora un grosso limite, considerando anche che la qualità di vita delle persone meno abbienti dei paesi del terzo mondo obbliga la protesi a lavorare in condizioni gravose, spesso immerse nel fango o nella polvere. È Quindi necessaria una frequente manutenzione, e qualora essa non bastasse, è obbligatorio cambiare l'intera protesi.

Per valutare la qualità di una protesi, sono tre i fattori chiave da considerare. Il primo è la funzionalità, ossia la capacità della protesi di svolgere correttamente le funzioni che spettano a un piede biologico, il più fedelmente possibile. Il secondo è il comfort, un aspetto molto importante per la vita quotidiana del paziente. È infatti facile generare

dolori nell'amputato, causati da movimenti particolarmente gravosi o da errate distribuzioni delle pressioni nelle connessioni tra protesi e corpo del paziente. La protesi deve permettere di concedere movimenti simili a quelli che si adotterebbero normalmente durante la camminata. Il terzo aspetto fondamentale è il design, importante dal punto di vista mentale per il paziente. Essa deve essere il più simile possibile ad un piede reale. Per questa ragione, solitamente le protesi varie vengono realizzate in fibra di carbonio con forme particolari, ma prevedendo la possibilità di essere inserite in una copertura gommata, che le rende del tutto simili ad un arto reale.

1.1 Protesi ad elevate prestazioni

Una protesi di piede deve essere progettata considerando una serie di caratteristiche fondamentali che essa dovrà possedere:

- Concedere il maggior numero possibile di gradi di libertà simili a quelli di un piede naturale, in modo tale da permettere gli stessi movimenti ammessi normalmente, per evitare di andare ad alterare le caratteristiche del corpo, provocando danni nel lungo termine.
- Sopportare i carichi a cui sarà soggetta, tenendo quindi conto del peso, ma anche del livello di attività del paziente. Nello svolgere determinate attività infatti, una protesi potrebbe essere soggetta a forze estremamente maggiori del semplice peso corporeo.
- Possedere buone caratteristiche di resistenza ad usura. Considerando che in 10 anni è stata calcolata una media di 10 milioni di cicli per protesi, significa cercare di progettare i componenti oltre il limite di fatica
- Considerare l'effetto dell'usura, quindi cercare di progettare la protesi in maniera che resista bene ad essa, o perlomeno che eventuali danneggiamenti non ne vadano a compromettere la funzionalità
- Essere facilmente indossabile
- Essere facilmente sostituibile

Ogni azienda produttrice di protesi garantisce un'ampia scelta di modelli. Nel momento quindi in cui è necessario individuare quella più adatta alle esigenze personali, sono due le caratteristiche da vagliare e combinare per individuare il modello più appropriato: Peso e livello di mobilità. Entrambi utili quindi per andare a definire il livello di robustezza che deve avere la protesi. Chiaramente maggiori saranno peso e livello di attività fisica, maggiore sarà la sua complessità, quindi inevitabilmente maggiore sarà anche il suo costo.

Protesi per attività quotidiana

In questa categoria rientrano un ampio numero di protesi. Il prezzo può andare dai 3.000 ai 15.000US. Come si può notare dalle immagini presenti nel capitolo, le forme sono tutte molto simili, in quanto è stato individuato il profilo che permette di simulare meglio il ciclo di camminata naturale dell'uomo. La camminata si basa sul concetto di accumulo di energia elastica. Quando il piede tocca terra, il peso va a deformare la protesi la quale accumula energia, che sarà rilasciata successivamente nel momento in cui, finito il movimento dell'anca, il piede si alza da terra, e la protesi torna della forma iniziale. All'incirca il concetto è simile a quello di una molla di flessione.

Qualunque protesi si prenda in considerazione, essa richiederà un qualche tipo di aggancio meccanico che simuli una caviglia. Attualmente il più utilizzato è l'attacco piramidale standard (fig.1.1), che garantisce buoni livelli di comfort abbinati ad una alta sicurezza contro le torsioni indesiderate del piede.



Figura 1.1 Attacco piramidale standard

Nonostante la ampissima gamma di prodotti sul mercato, le caratteristiche principali delle varie protesi sono molto simili.

In figura 1.2 è rappresentato un piede per bassa-media mobilità di casa Össur. Queste tipologie di protesi presentano una forma semplice, con suola piatta e un adattatore standard piramidale per la caviglia.

Il peso di una protesi simile è all'incirca di 500g (compreso dell'attacco piramidale), e regge fino a un peso di 160kg.

Sono adatte per camminate a velocità ridotte, e forniscono grande stabilità.

Per questa ragione sono solitamente utilizzate dai soggetti anziani o come prima protesi per la loro maggiore semplicità di utilizzo.



Figura 1.2 Protesi per media mobilità

Se è richiesto un maggior grado di mobilità sono presenti protesi ad un più elevato livello tecnologico che permettono di camminare velocemente e sollevare carichi modesti, gestendo meglio i processi di accumulo e rilascio di energia. In figura 1.3 è rappresentato un piede di tecnologia Roadrunnerfoot, il quale possiede tre lamine di appoggio. Questo permette di avere sempre una lamina in accumulo e una in rilascio, simulando meglio l'azione complessa di un piede reale.



Figura 1.3 Protesi Roadrunnerfoot a 3 lamine

Per i pazienti che hanno un elevato livello di mobilità esistono protesi che forniscono la possibilità di svolgere quasi qualunque tipo di attività. Un esempio è il modello rappresentato in figura (Össur), il quale permette di correre, saltare o andare in bicicletta, fornendo una protesi resistente agli urti e robusta a sufficienza da non richiedere manutenzione anche con gli utilizzi più estremi.

La molla frontale in composito riduce le forze di taglio sull'arto e offre un'ammortizzazione degli urti limitando così i movimenti di compensazione involontari che causano problematiche a livello muscolare e scheletrico. In questo modo viene migliorato sia il controllo che il comfort durante la deambulazione e le varie attività quotidiane.



Figura 1.4 Protesi Össur per elevata mobilità

Esistono infine soluzioni estremamente sofisticate che si avvicinano sorprendentemente al funzionamento di un piede umano (fig. 1.5). Motorizzando infatti il movimento della caviglia in maniera intelligente, è possibile andare a simulare l'intero movimento della camminata.

La protesi quindi è in grado di sollevare la punta del piede durante il movimento per ridurre le possibilità di inciampare, e modifica la sua angolazione durante l'intera camminata, rendendo più confortevole l'intero movimento, riducendo gli sforzi per le ginocchia. Permette inoltre di adattarsi alla tipologia di terreno, rendendo più facile affrontare pendii e scale.



Figura 1.5 Protesi a movimento assistito elettronicamente

Protesi sportive

Una categoria a parte è formata dalle protesi da corsa, le quali richiedono una maggior capacità di deformazione. Per questa ragione presentano una lunghezza maggiore, caratterizzata da un ampio raggio di curvatura.

La lamina in carbonio è progettata specificamente per gli scatti su brevi distanze (100-200 m), ha una curvatura più decisa e accentuata. La sua forma dinamica aumenta la flessione del piede, a favore di una maggiore resa di energia. Il piede più lungo e piatto potenzia la spinta, mentre il supporto di fissaggio promuove la progressione in avanti.



Figura 1.6 Protesi sportiva

Oltre a protesi per correre, esistono modelli per ogni tipo di sport, con piccole modifiche che permettono mobilità o caratteristiche speciali. Due esempi particolari sono le protesi per nuotare (fig. 1.7) o per fare climbing (fig. 1.8)



Figura 1.7 Protesi per nuotatori



Figura 1.8 Protesi per arrampicata

Rispetto ai modelli in legno, la protesi in fibra di carbonio ha il grande svantaggio estetico di non assomigliare ad un piede reale. Ciò può creare grossi problemi psicologici nei pazienti. Il problema è stato risolto prevedendo delle coperture in materiale plastico, in cui la protesi viene inserita. In questa maniera si ha il duplice vantaggio, in primis di poter indossare una calzatura, e di avere un piede somigliante ad uno reale. Aumenta inoltre l'aderenza con il terreno, data la maggiore rugosità della copertura gommata.



Figura 1.9 Protesi inserita in una copertura estetica di gomma

1.2 Protesi a basso costo sul commercio

Lo sviluppo di protesi a basso costo sta occupando una posizione in continua crescita a livello di importanza mondiale. Questo perché il numero di amputati è in aumento nei paesi meno sviluppati. Ricerche ci mostrano che l'80% dei soggetti con amputazioni vive in condizioni di povertà. Ciò implica un necessario impegno nel portare le cure e le soluzioni a basso prezzo, per restituire ai pazienti ad una vita il più possibile normale.

Nonostante gli sforzi siano molti e l'offerta di protesi a basso costo sia in aumento, il continuo crescere del numero di amputazioni porta a un incremento continuo di persone in eccesso rispetto al numero di protesi prodotte. Il divario si amplierà di 17000 unità l'anno.

Comunque gli sforzi degli ultimi 20 hanno condotto a grandi risultati. Grazie all'allestimento di campi temporanei in Afghanistan e Iraq, il *Jaipur Foot* ha ridato un arto a chi l'aveva perso per via delle mine anti-uomo. Vittime di guerra sono state assistite anche in Cambogia, Ruanda e in altri Paesi africani. Ad Haiti chi aveva perso un arto durante il terremoto del 2010 ha oggi una protesi realizzata in loco. Sono diecimila i disabili del Pakistan che hanno ricevuto l'aiuto del *Jaipur Foot*.

Al Bhagwan Mahaveer Viklang Sahayata Samiti, in India, arrivano persone da tutto il paese in stampelle. Qui un team di medici realizza in poco tempo una protesi a costo zero per il paziente (i 40 dollari dell'arto artificiale sono a carico di una ONG locale).

Analizzando i costi delle protesi per il mercato "occidentale", si percepisce immediatamente che sarebbe impossibile esportare questi modelli in tutto il mondo. Una protesi ad elevate prestazioni può costare dai 3000US ai 15000US, e causa usura va cambiata diverse volte nel corso della vita del paziente. Un bambino cambierà in media 25 protesi, un adulto 20, per una spesa complessiva che va oltre ai 60.000US per paziente. Considerando che ci sono parti del mondo in cui la popolazione delle campagne arriva a guadagnare 300 dollari l'anno, è intuitivo capire che le protesi in fibra di carbonio ai prezzi attuali non rappresentano una soluzione adeguata.

Breve evoluzione dei piedi a basso costo

MODELLO SACH

Nel 1972 arriva sul mercato uno dei primi modelli di protesi a basso costo, il modello SACH, che tuttora risulta uno dei più popolari nel terzo mondo, essendo di facile produzione e realizzabile con materiali economici (legno e gomme).

Risulta una protesi adatta ai soggetti con livelli di mobilità bassa. Permette una elevata stabilità statica e un elevato comfort. Il punto di forza di questa protesi è la qualità estetica, estremamente simile ad un piede naturale. Fattore che può risultare fondamentale in molti paesi in cui è abitudine non indossare calzature, soprattutto in zone di culto.

Di modelli SACH ne sono stati sviluppati di molti tipi. I più economici risultano i modelli statici, che non concedono possibilità di movimenti angolari del piede a livello delle caviglie. Più evoluti sono invece i modelli dinamici mono o multiassiali, che concedono movimenti angolari del piede, importanti principalmente nella camminata in ambienti accidentati.



Figura 1.10 Modello SACH statico

JAIPUR FOOT

Nel 1975 arriva una delle più importanti innovazioni del settore. Il Jaipur foot, il frutto del lavoro del fondatore dell'organizzazione umanitaria BMVSS, il Dr. Mehta. Dopo un incidente stradale che gli provocò la frattura di una gamba, il Dr. Mehta fu costretto a letto in ospedale per cinque mesi, dove vide con i suoi occhi la difficile vita a cui erano obbligati i soggetti con amputazioni agli arti. Così quando finì la riabilitazione, decise di fare qualcosa per migliorare le condizioni di vita dei soggetti amputati delle classi meno abbienti indiane.

Fonda (con meno di 10.000\$) la BMVSS, una organizzazione umanitaria con la quale realizza il primo modello di protesi Jaipur Foot, realizzabile con materiali a basso costo, con il quale da quel momento in poi, avrebbe fatto tornare a camminare migliaia di persone.



Figura 1.11 Protesi Jaipur

Oggi, l'organizzazione ha due centri associati in Pakistan e tre nelle Filippine, e sta aprendo un nuovo centro in Colombia. Ha portato più di 50 campi di protesi di emergenza in 26 paesi, e aiutato ad avviare "fitment centres" in Asia, Africa e America latina. Serve più di 65.000 pazienti all'anno, 20.000 dei quali richiedono il ricambio di nuove protesi, e opera con un budget di 3.5 milioni di dollari annui.

Oggi l'associazione offre due possibilità di protesi. Il modello per amputazioni sopra il

ginocchio, e il modello per amputazioni sotto il ginocchio. Rispettivamente a un costo di 65 e 45\$. Per la realizzazione della protesi del ginocchio a basso costo, si sono appoggiati ai ricercatori della Stanford University, in collaborazione coi quali sono riusciti nell'impresa di realizzare un modello di ginocchio al costo di 20\$ che si è meritato un posto nella classifica stilata dal Time del 2009, come una delle 50 Best Inventions of the World del 2009.

Una versione più bizzarra del Jaipur Foot, prevede l'utilizzo di ossa umane del piede da inserire all'interno della protesi, questo permette di avere una struttura più simile a quella reale. Non essendo le ossa di semplice reperibilità è stato pensato di inserire quelle del piede amputato, e si è scoperto che ciò aiutava anche a livello psicologico, migliorando i tempi di riabilitazione del paziente.

NIAGARA FOOT

Uno degli ultimi arrivati sul mercato nel campo delle protesi a basso costo è il Niagara Foot, creato da un team di esperti canadesi. Il piede è stato progettato concentrandosi su coloro che hanno subito una amputazione a causa di una mina. La particolarità di questa protesi risiede nella forma, ricercata dai progettisti per poter restituire il massimo dell'energia nonostante la rigidità del materiale di cui è costituita (un polimero di brevetto canadese).

Gli studi che sono stati condotti su questa protesi, miravano a confrontare il Niagara Foot con il modello SACH. Dai test è risultato che su venti pazienti, il 100% ha preferito il modello Niagara, grazie al risparmi di energie che si avvertivano durante la camminata.



Figura 1.12 Niagara Foot

Conclusione

Il mondo delle protesi a basso costo che si è sviluppato fino ad oggi, rappresentato principalmente dai modelli SACH e Jaipur, è basato sulla forte riduzione dei costi garantita dall'utilizzo di materiali economici e da processi produttivi semplici. Come già espresso, sono tre i fattori fondamentali con i quali è possibile valutare la qualità di una protesi: funzionalità, comfort ed estetica. Chiaramente se si vuole ottenere una protesi a prezzi che vanno dai 30\$ ai 100\$ qualche aspetto deve essere penalizzato, e sino ad oggi si è andati nella direzione di sfavorire la funzionalità, producendo protesi che fungono da appoggio, ma con scarse caratteristiche di assorbimento energetico (quindi molto depenalizzate in termini di fatica muscolare durante la camminata).

1.3 La nostra idea di protesi a basso costo

Con protesi a basso costo si intende una soluzione che permetta di svolgere tutte le attività di base della vita quotidiana con un livello adeguato di comfort, mantenendo contenuti i costi di produzione. Adeguati livelli di confort, per una protesi di piede, si traducono in un basso dispendio di energia per camminare. Questo è possibile solo con l'utilizzo di un materiale che permetta un'ampia deformazione sotto carico, e che resista bene alle tensioni che conseguentemente si generano. Questo perché maggiore è la deformazione e maggiore sarà l'energia elastica accumulata nella prima fase della camminata. Tale energia elastica sarà infine rilasciata nell'ultima fase di slancio, permettendo un risparmio di energia del paziente. Materiali come il legno non concedono questo tipo di accumulo energetico, e ciò rappresenta il limite delle protesi a basso costo attualmente sul commercio. Al contrario la fibra di carbonio risulta un materiale particolarmente adatto a questo scopo, grazie alle sue caratteristiche di resistenza. Un altro grande vantaggio proveniente dall'utilizzo di questo materiale composito consiste nel basso peso in confronto alle elevate caratteristiche meccaniche che possiede. Anche questo aspetto risulta estremamente importante per una protesi.

Nonostante la fibra di carbonio sia un materiale costoso, le industrie che ne fanno uso producono inevitabilmente una serie di sfridi e resti non utilizzati, per i quali sono costretti a sostenere i costi di un adeguato smaltimento, in quanto le resine utilizzate nei preimpregnati risultano tossiche. L'idea è quella di creare una serie di partnership con queste aziende, le quali possono trasformare ciò che rappresenta un costo vivo (lo scarto, da smaltire) in un valore aggiunto (cioè la produzione di un manufatto "secondario"), ciò che apre la strada ad una produzione globalmente economica.

Per mantenere basso il costo del prodotto finito è necessario adottare altri particolari accorgimenti sia in fase di progetto sia in fase di produzione. Tale protesi infatti sarà estremamente semplice nella forma, ciò renderà possibile una produzione manuale senza bisogno di particolari preparazioni tecniche degli addetti. Lo spessore sarà costante e la struttura a singola lamina, ciò per semplificare al massimo il processo di produzione. Si è deciso inoltre di progettare gli stampi in maniera tale che la pressione sia generata per via meccanica attraverso il serraggio di viti. Così facendo non sarà necessario l'utilizzo di un autoclave per il ciclo di cottura.

In conclusione, gli sforzi sono stati mirati ad ottenere una protesi il più semplice possibile con elevate caratteristiche meccaniche garantite dall'uso della fibra di carbonio. Il tutto mantenendo i costi competitivi con i modelli già presenti sul mercato.

2.Fibra di carbonio

Generalità sui materiali compositi

Un composito è un insieme, generalmente non omogeneo e non isotropo, ricavato mettendo insieme materiali di forma e composizione diversa allo scopo di riuscire a combinare le proprietà e le caratteristiche dei vari costituenti in modo da ottimizzarle nel prodotto finale, ottenendo particolari requisiti.

Chiaramente a livello microstrutturale un gran numero di elementi potrebbe essere inteso come composito, dunque bisogna intenderlo a livello macrostrutturale, e i vari componenti devono essere indipendenti, ossia diversi dal punto di vista chimico.

Secondo questa definizione l'uso di materiali compositi è più antico di quello che si può pensare, un esempio può essere il calcestruzzo, ossia un insieme di acqua, cemento, sabbia e ghiaia triturata che una volta asciugata risultano della durezza di particolari rocce.

I compositi possono essere classificati in base alla forma dei costituenti:

1. materiali compositi a fibre
2. materiali compositi a scaglie
3. materiali compositi a particelle
4. materiali compositi con riempitivo
5. materiali compositi a lamine

Il materiale di interesse per la costituzione del piede sarà la fibra di carbonio, quindi l'esposizione sarà concentrata sui materiali compositi a fibre.

Materiali compositi a fibre

I materiali compositi a fibre sono generalmente costituiti da una matrice in materiale poco pesante, elastico, spesso tenace ma con bassa resistenza meccanica, che viene rinforzata mediante fibre ad alta resistenza e rigide, ma spesso fragili. All'interfaccia tra questi due componenti esiste spesso un legante che ne garantisce l'interconnessione voluta.

La definizione ASTM prevede che possa essere chiamato filamento qualunque materiale in forma allungata con rapporto tra minima lunghezza e massima dimensione trasversale di 10:1 e con una massima dimensione trasversale inferiore al millimetro; la denominazione di fibra va attribuita ad uno o più filamenti riuniti assieme in modo ordinato.

In corrispondenza di piccole dimensioni delle sezioni, i materiali presentano caratteristiche di resistenza molto elevate. Ciò è dovuto al cosiddetto "effetto dimensionale", che porta i materiali di piccole dimensioni a possedere resistenze maggiori, grazie alla ridotta possibilità statistica di contenere imperfezioni che vanno a indebolire fortemente la struttura (una sorta di effetto catena, dove la resistenza dell'intero insieme di anelli è dato dal valore di resistenza dell'anello più debole). Per avere un'idea dell'effetto dimensionale si può citare il vetro, dove la tensione di rottura delle fibre di piccola dimensione supera di 100-200 volte quello tipica dello stesso materiale nelle condizioni di dimensione usuale). Allo stato attuale tecnologico, è possibile ottenere filamenti monocristallini, dell'ordine del micron o sue frazioni, che si avvicina al valore di resistenza del materiale privo di difetti. Sempre prendendo ad esempio il vetro, si può ottenere un valore di resistenza pari a 400-800 volte il valore nelle condizioni usuali.

L'orientamento delle fibre può andare a formare un materiale con le caratteristiche desiderate nelle varie direzioni. In generale le fibre orientate in una determinata direzione garantiscono caratteristiche ortotopre, con la direzione di stesura della fibra come la favorita. Formando dei tessuti in più direzioni è possibile arrivare a formare materiali con elevate proprietà in due o più direzioni. Con l'utilizzo di fibre corte disposte in maniera casuale, si può ottenere un materiale con resistenza meccanica inferiore, ma isotropo.

Le matrici hanno lo scopo di dare forma al componente, e di inglobare le fibre, tenendole in posizione e proteggendole dalle condizioni esterne, e di deformarsi in modo tale da uniformare il più possibile la tensione fra le fibre. Le matrici devono inoltre assicurare un'adesione sufficiente e resistere agli sforzi di taglio, devono essere tenaci ed avere allungamento a rottura più elevato delle fibre, in modo che, in caso di rottura dell'elemento di rinforzo, siano in grado di impedire, deformandosi opportunamente, la propagazione del difetto.

Le matrici più utilizzate sono: termoidurenti, materiali termoplastici e materiali metallici.

Caratteristiche della fibra di carbonio

Le fibre di carbonio hanno diametri in genere compresi tra i 5 e i 15µm, risultando quindi difficili da manipolare. Per questa ragione in genere sono raccolti in fasci comprendenti dai 1000 ai 16000 filamenti individuali.

Esistono principalmente due tipi di fibre, distinte per la materia prima necessaria alla loro preparazione. Le fibre prodotte utilizzando poliacrilonitrile (PAN) e quelle prodotte utilizzando la pece. Le prime possiedono caratteristiche migliori, ma partendo da un elemento più pregiato, risultano di costo maggiore. Al contrario quelle prodotte dalla pece risultano economicamente più competitive, a scapito di minori caratteristiche.

Nella tabella si elencano a titolo indicativo, dei valori di caratteristiche per alcune fibre di carbonio (Valori della sola fibra senza matrice)

Tipo di Fibra	Massa Volumica (kg/dm ³)	Modulo Di Young (MPa)	Tensione di Rottura (MPa)	Allungam. A rottura (%)	Diametro Filamento (µm)
Thornel T-50 3K	1.8	390000	2900	0.60	6.5
Thornel T-40 12K	1.8	290000	6560	1.8	-
Thornel T-50 3K	1.8	231000	3650	1.4	11

Le matrici

Come detto in precedenza, i principali tipi di resina sono: termoindurenti, termoplastiche, e matrici metalliche.

La principale differenza tra resine termoindurenti e termoplastiche consiste nel fatto che le prime, una volta indurite non tornano alle condizioni iniziali, e se portate a elevate temperature arrivano a degradazione. Le termoplastiche invece anche se scaldate, possono essere modellate. Non temono quindi l'alta temperatura.

Resine termoindurenti: Posseggono caratteristiche meccaniche molto elevate, che le portano quindi ad essere anche estremamente fragili. Ciò è particolarmente svantaggioso per la scarsa resistenza alla propagazione di cricche.

Le più utilizzate sono le resine epossidiche e le resine fenoliche.

Le resine epossidiche hanno il vantaggio di poter essere lavorate anche a limitate pressioni e temperature, oltre a possedere buone caratteristiche meccaniche. Risultano inoltre chimicamente stabili e resistenti, con buona sopportazione dell'umidità. Risultano economiche e non formano sottoprodotti di reazione come acqua o gas, comportando quindi un basso ritiro. Caratteristica molto importante per la minor possibilità di decoesione della matrice dalle fibre, che porterebbe alla formazione di cricche.

Le resine fenoliche sono composti duri, fragili e solubili in solventi. Sono particolarmente indicate per usi ad alta temperature ed elevate sollecitazioni, e risultano le meno costose tra le resine termoindurenti. Il difetto principale sta nella produzione di sottoprodotti volatili durante la reticolazione, che porta ad un elevato ritiro che può causare una mancata adesione con le fibre e presenza di vuoti. Per evitare ciò è necessaria l'applicazione di una elevata pressione durante la preparazione dei laminati.

Resine termoplastiche: Le resine termoplastiche non subiscono reticolazione o indurimento se scaldate. Ciò comporta che possono essere scaldate, diventando man mano meno viscosi, modellate e una volta raffreddate tornano alle caratteristiche iniziali. Ciò comporta una condizione di utilizzo a temperature inferiori rispetto alle resine termoindurenti, ma con possibilità di essere scaldate fino a temperature elevate ed essere ancora utilizzabili. In genere sono più tenaci delle termoindurenti, e richiedono processi

produttivi meno costosi.

Non subendo indurimento per reticolazione, hanno resistenza a trazione e rigidità inferiori. Per questa ragione solitamente non vengono utilizzate in ambiti strutturali.

3.Introduzione ai principali metodi di produzione per materiali compositi

Per la produzione di manufatti in fibra di carbonio, e più in generale per materiali compositi, esistono differenti processi produttivi utilizzabili, che si possono dividere in due macrocategorie:

- Processi in forma aperta
- Processi in forma chiusa

Ogni prodotto realizzato in fibra di carbonio richiede due condizioni essenziali che saranno presenti in tutti i vari processi. La presenza di un forno per portare il materiale ad elevate temperature, per fare in modo che la resina penetri all'interno delle fibre e si attivi il processo di reticolazione, e la presenza di una pressione che mantenga compatte le fibre, elimini i vuoti e generi il contatto necessario tra resina e fibra.

Nei prossimi paragrafi saranno presentati alcuni processi produttivi per prodotti in materiale composito con matrice in resina termoindurente, tralasciando quelli con resina termoplastica. Questo perché la protesi sarà realizzata con resina termoindurente, caratterizzata da valori più elevati di resistenza meccanica.

PROCESSI IN FORMA APERTA

Rientrano in questa categoria tutti quei processi in cui è presente un solo stampo, senza che ci sia bisogno del controstampo. Ciò comporta necessariamente che il prodotto finale abbia superfici con diversa qualità superficiale, in particolare sarà presente almeno una superficie con qualità inferiore.

Formatura a mano:

Risulta una delle metodologie più antiche per la produzione di manufatti in materiale composito, data la sua estrema semplicità. Il procedimento consiste nell'aver uno stampo, adeguatamente sagomato (concavo o convesso), che permetta di adagiarvi sopra a mano i vari strati di fibra.

Come prima cosa si applica uno strato di materiale distaccante (solitamente un lubrificante), procedendo poi con l'applicazione alternata di strati di fibra e resina.

Dopo ogni applicazione di uno strato di fibra è opportuno applicare una pressione con un apposito rullo in modo tale da eliminare le sacche d'aria presenti e di aumentare l'adesione con lo strato di resina precedente.

Le resine più utilizzate con questo metodo di formatura sono le resine epossidiche.

Una volta depositati tutti gli strati richiesti, si termina applicando un foglio di polietilene, cellofan o polistirene, per migliorare la qualità superficiale anche sul lato esterno, e per ottenere una maggiore protezione dall'aria.

In questo processo solitamente viene utilizzato anche un particolare catalizzatore per avere la reticolazione della resina anche a pressione e temperatura ambiente, non necessitando quindi di altre attrezzature e limitando al massimo il costo del prodotto finito. Indicativamente i tempi di reticolazione della resina sono 10 ore a temperatura ambiente e circa 3 ore a 90 °C.

Risulta quindi un processo estremamente economico e facile da realizzare. Viene utilizzato per la realizzazione di prototipi in piccolissima serie o quando le dimensioni elevate non permettono l'utilizzo di altri processi, come nell'esempio degli scafi delle imbarcazioni in vetroresina.

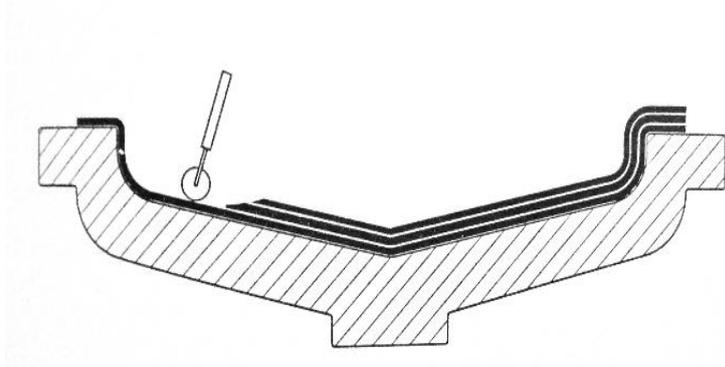


Figura 3.1 Metodo di formatura a mano. In evidenza il rullo per l'eliminazione di sacche d'aria durante la deposizione

Formatura a sacco:

Per questo metodo di produzione si procede come nel caso precedente di formatura manuale, con l'unica differenza che l'insieme dei vari strati viene coperto con una membrana flessibile a tenuta, chiamata sacco, in grado di ottenere il vuoto al suo interno. Dopodiché il tutto viene posto a temperatura e pressioni sufficienti a garantire la fuoriuscita dell'aria intrappolata e della resina in eccesso, e per permettere la reticolazione della resina termoindurente.

Il sacco è sigillato con mastice, per garantire la tenuta all'interno della membrana.

Solitamente si hanno più connessioni alla pompa a vuoto, per avere una rimozione più uniforme dell'aria all'interno. L'aria viene rimossa gradualmente, e durante il processo è necessario agire con un apposito utensile in teflon, applicando una pressione dall'interno del pezzo verso l'esterno per eliminare le grinze e sacche d'aria presenti.

Il processo quindi necessita di un elevato grado di laboriosità. Questo rende il procedimento indicato per piccole serie che richiedono una elevata qualità.

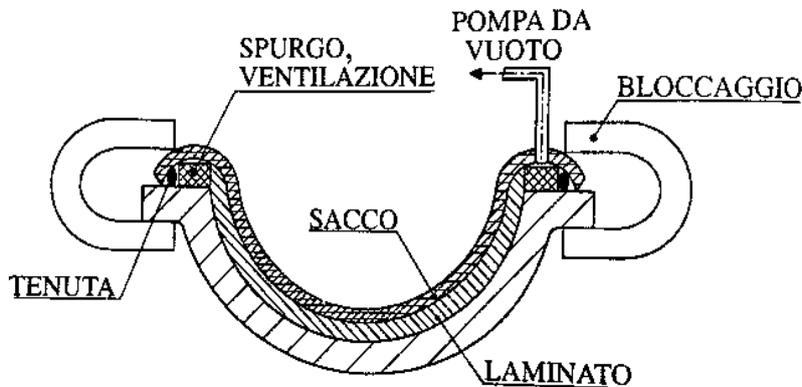


Figura 3.2 Illustrazione di una formatura a secco.

A questo punto per il consolidamento ci sono principalmente tre varianti:

- Formatura a sacco sottovuoto
- Formatura a sacco in pressione
- Formatura in autoclave

Formatura a sacco sottovuoto

Inizialmente viene realizzato un vuoto parziale e graduale, procedendo con la spianatura e la levigazione del sacco. Viene poi collocato il tutto in forno per completare l'indurimento della resina, mantenendo il vuoto, che permette anche di mantenere in compressione i vari strati, con un valore di circa 1bar. Il processo richiede attrezzature poco costose e permette di realizzare componenti anche di grosse dimensioni.

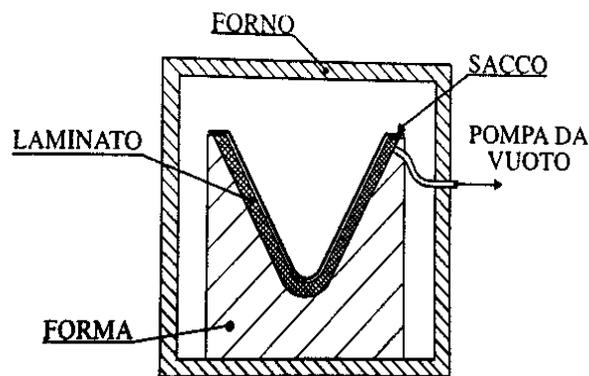


Figura 3.3 Formatura a secco sottovuoto

° Formatura a sacco in pressione

In questo caso si utilizzano sacchi di gomma per rivestire il componente. L'indurimento della resina è applicato con aria, acqua o vapore in pressione. Rispetto alla formatura sottovuoto, l'applicazione di uno stato di compressione maggiore, pari a circa 2bar sui vari strati di fibra permette di ottenere prodotti più resistenti e legati.

° Formatura in autoclave

I vari strati di compositi vengono posti sottovuoto, dopodiché mantenendo il vuoto si pone il tutto in autoclave.

L'autoclave è un recipiente cilindrico in grado di funzionare da forno e di creare ambienti pressurizzati al suo interno. Il componente può quindi essere posto a pressioni fino a 10bar. In questo caso è necessario abbassare ulteriormente la depressione all'interno del sacco

una volta inserito nell'autoclave, al fine di rilevare facilmente eventuali perdite di pressione all'interno del sacco. Anche durante il raffreddamento viene mantenuto il vuoto, al fine di limitare i rischi di deformazioni dovute ai salti termici.

Con questa tecnica è possibile realizzare prodotti di elevatissima qualità, con quasi assenza di vuoti nel componente, ottima aderenza tra gli strati e con un elevato controllo degli spessori. Viene utilizzato quando sono richiesti valori elevati di resistenza meccanica e affidabilità.

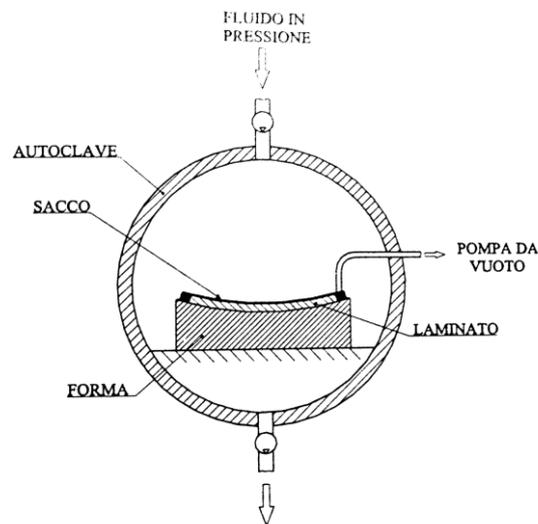


Figura 3.4 Formatura in autoclave

PROCESSI IN FORMA CHIUSA

Questi processi richiedono l'utilizzo di uno stampo e di un controstampo, presentando però il vantaggio di generare tutte le superfici con uguale buona finitura superficiale.

Di seguito saranno esposti alcuni tra i principali metodi di formatura in forma chiusa

Stampaggio per compressione:

Con questa tecnica il materiale composito viene compresso con l'ausilio di una pressa, tra stampo e controstampo, realizzati in genere in acciaio o alluminio. Per la reticolazione della resina gli stampi vengono riscaldati.

Questo processo viene utilizzato con fibre corte preimpregnate posizionate nello stampo

e pressate per conferire la forma desiderata. Quindi i prodotti finiti possederanno caratteristiche non paragonabili a quelle di manufatti realizzati con fibre orientate, per contro risulta una operazione facilmente automatizzabile quindi economica.

A termine dello stampaggio e della reticolazione possono essere eseguite ulteriori lavorazioni per migliorare la qualità del prodotto finale, esempio sbavature o cicli termici particolari.

Può essere previsto l'utilizzo di una pompa a vuoto, al fine di migliorare il mantenimento delle fibre nella loro posizione.

La temperatura necessaria per la reticolazione varia a seconda della resina, valori indicativi sono 150 °C per le resine fenoliche, e di circa 130°C/180°C per le resine epossidiche. Le pressioni possono andare dai 0.1MPa ai 10MPa. I valori di uso comune sono attorno a 0.5-1.5MPa.

Lo stampaggio per compressione permette di ottenere buone caratteristiche meccaniche, elevata precisione dimensionale, buona riduzione dei vuoti e buona finitura superficiale, il tutto grazie principalmente all'effetto dell'elevata pressione a cui sono sottoposti gli strati delle fibre. Dato l'elevato costo dello stampo e del controstampo, lo stampaggio per compressione è solitamente utilizzato solo in caso di elevati lotti di produzione.

Anche in questo caso le resine indicate sono le resine fenoliche e le resine epossidiche.

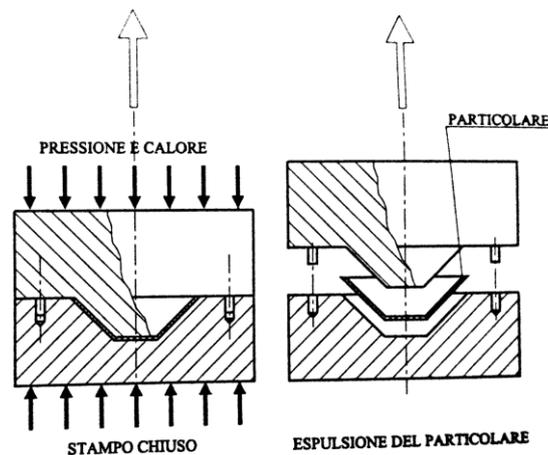


Figura 3.5 Stampaggio per compressione

Stampaggio per trasferimento (RTM = resin transfer molding):

Lo stampaggio per trasferimento risulta un processo in forma chiusa a bassa pressione. Il procedimento prevede di depositare gli strati di fibre (senza l'apporto di resina) a stampo aperto. Dopodiché si chiude con il controstampo, iniziando ad agire pressione. Con l'utilizzo di uno stantuffo si procede iniettando la resina liquida e il catalizzatore. È possibile anche prevedere l'utilizzo di apparecchiature per creare il vuoto all'interno dello stampo, al fine di favorire l'inserimento della resina all'interno degli strati di fibre, e per evitare che si creino sacche d'aria all'interno del pezzo finito. In alternativa è possibile prevedere semplicemente degli sfiati d'aria.

Anche in questo caso lo stampo viene riscaldato per diminuire la viscosità della resina. Lo stantuffo agisce fintanto che tutta la resina non è penetrata all'interno dello stampo. Le pressioni generate dallo stantuffo hanno valori tendenzialmente bassi (0.05-1MPa). Quindi è bene che gli spessori del componente non siano superiori ai 15mm, per fare in modo che la resina riesca a penetrare in tutto il pezzo.

I costi dello stampaggio per trasferimento risultano competitivi coi precedenti, grazie alle basse pressioni di cui necessita, permettendo apparecchiature di modeste dimensioni.

Il difetto risiede nella difficoltà di progettazione dello stampaggio, a causa dell'elevato grado di accuratezza richiesto, simulato quindi con modelli numerici. Il tutto perché bisogna evitare di avere trasferimenti di resina non uniformi o spostamenti degli strati di fibre durante l'iniezione.

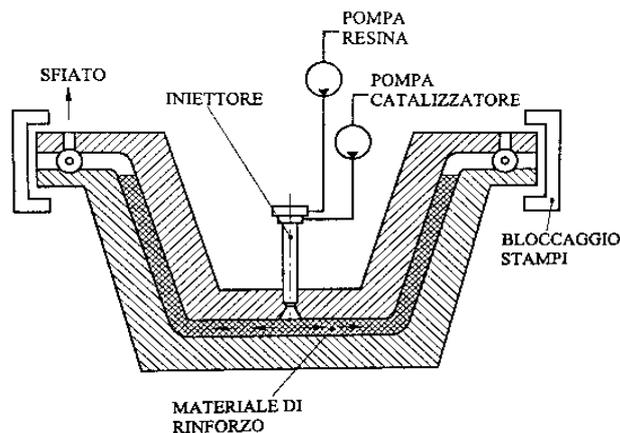


Figura 3.6 Stampaggio con metodo RTM

Stampaggio ad iniezione

È un processo simile al precedente, in cui come materia prima è utilizzato una pasta semifluida composta da fibre corte (circa 3mm), resina e catalizzatore.

Il procedimento consiste nell'iniettare nello stampo e controstampo già chiusi la materia prima con l'utilizzo di una vite di Archimede che ruota all'interno di un cilindro. L'apporto di materiale è assicurato da una tramoggia.

A fine iniezione il calore permette di solidificare la resina, poi si procede all'apertura dello stampo e all'eliminazione delle bave prodotte.

È un metodo completamente automatico che permette tempi di riempimento dello stampo di 1-3s. Data la velocità di iniezione elevata, una quota parte di calore necessario per la diminuzione di viscosità della resina, e successivamente di indurimento, è fornito dall'attrito durante l'iniezione.

Temperature tipiche per la reticolazione si aggirano tra i 150 °C e i 180 °C, con pressioni variabili tra i 0.7MPa e i 10MPa.

Il costo delle attrezzature per lo stampaggio ad iniezione è all'incirca il doppio di macchine di analoghe prestazioni per stampaggio a compressione o stampaggio a trasferimento, ma l'elevata produttività può giustificare l'investimento maggiore.

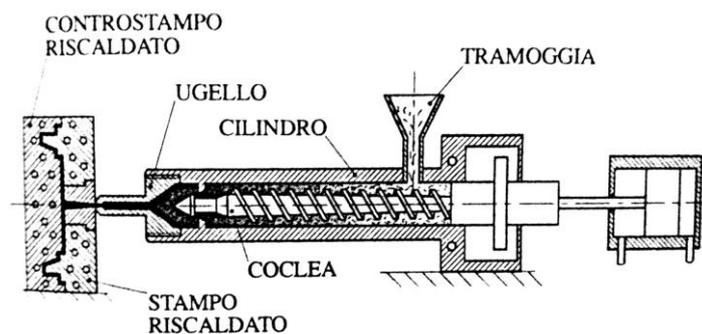


Figura 3.7 Stampaggio per iniezione

USO DI RESINE TERMOPLASTICHE

Come già detto le resine termoplastiche risentono diversamente dell'influenza della temperatura, la quale li rende semplicemente più viscosi. Questo comporta il necessario utilizzo in generale di temperature e pressioni più elevate rispetto al caso delle resine termoindurenti, per poter permettere un sufficiente grado di diffusione della resina all'interno del componente. Quindi si tende ad evitare di iniettare resina durante il processo, preferendo la stesura manuale fra due strati di fibra depositati, operando quindi in maniera simile al metodo precedente di deposizione manuale.

Dopo la formatura, basta in genere un semplice raffreddamento fino a temperatura ambiente per garantire la desiderata stabilità dimensionale.

4. Progettazione e analisi della protesi

In questo capitolo sarà spiegato come è stata realizzata la progettazione della protesi, quindi come si è arrivati alla forma e agli spessori finali, verificando la resistenza meccanica agli sforzi provenienti dalle normative.

Il processo si sviluppa principalmente in tre fasi.

- Realizzazione del modello 3D
- Importazione in Patran del modello
- Calcolo in nastran
- Elaborazione dei risultati

Per la generazione di superfici, è più intuitivo utilizzare Solidworks rispetto a Patran, quindi è stato utilizzato il primo per realizzare il modello 3D della protesi.

Completato il primo passaggio, è necessario salvare il file in un formato compatibile con Patran (.Step o .IGES), il quale trasforma il file in un insieme di superfici semplici. A questo punto si procede calcolando la superficie 2D media di sviluppo del piede, e si importa su Patran. Infine il modello generato in Patran viene risolto con il solutore NASTRAN.

Per realizzare l'analisi sono necessari i seguenti passaggi:

- Creazione della mesh
- Definizione del materiale
- Definizione dei carichi
- Definizione dei vincoli

Per la generazione della mesh è importante individuare la massima dimensione degli elementi, che non comporti nel caso di una ulteriore diminuzione delle dimensioni, differenze apprezzabili sui risultati. In questo modo si ottiene una mesh abbastanza fitta da rendere validi i risultati, ma non troppo da impiegare lungo tempo per l'elaborazione. Per definire il materiale è sufficiente importare i valori provenienti da precedenti lavori svolti sull'utilizzo di fibra di carbonio riciclata, che hanno permesso di conoscere i valori del modulo di elasticità, modulo di taglio e coefficiente di Poisson.

Per quello che riguarda la definizione dei carichi e dei vincoli è sufficiente attenersi a ciò che è previsto dalle norme. In questo caso si è considerata solo una prova statica, evitando di impostare anche prove dinamiche e a fatica.

4.1 Realizzazione del modello 3D

In uno studio precedente era stata trovata una forma semplificata di una protesi di piede in fibra di carbonio riciclata. La progettazione quindi è partita dalla conoscenza di tale forma (fig.4.1). Lo scopo del lavoro è quello di apportare delle modifiche al modello, allo scopo di renderlo esteticamente più simile ad una protesi di piede, sfruttando le informazioni tratte dal lavoro precedente, per esempio l'influenza degli angoli del tacco e della punta sulla rigidità della protesi.



Figura 4.1 Modello 3D di un progetto precedente da cui si è partiti

Il lavoro è stato svolto applicando un processo iterativo. Ciò significa che, partendo da un modello semplice e facendone l'analisi lineare statica con Patran, si sono verificati i risultati degli sforzi.

Andando successivamente a vedere come le modifiche sulle dimensioni (variazioni di angoli, variazione della sagoma e variazione dei raggi di raccordo) influivano sui risultati, si è cercato di creare la forma che andasse a minimizzare lo stato tensionale sul piede, cercando al contempo di massimizzare il valore di deformazione (Come spiegato nel capitolo 1.3) e il livello di qualità estetica.

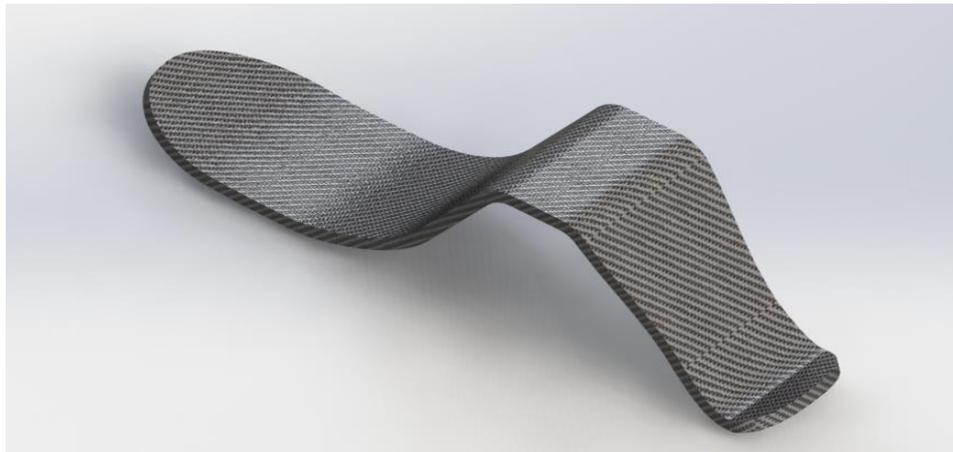


Figura 4.2 Modello della protesi realizzato con Solidworks

Dopo numerosi tentativi e analisi, il modello finale di piede (fig.4,2) ha subito diversi cambiamenti, presentando come principale modifica una grossa diminuzione della larghezza, che è passata da un valore iniziale di 90mm a un valore di 60mm.

In figura 4.3 è rappresentato il disegno contenente alcune quote importanti del modello finale di protesi.

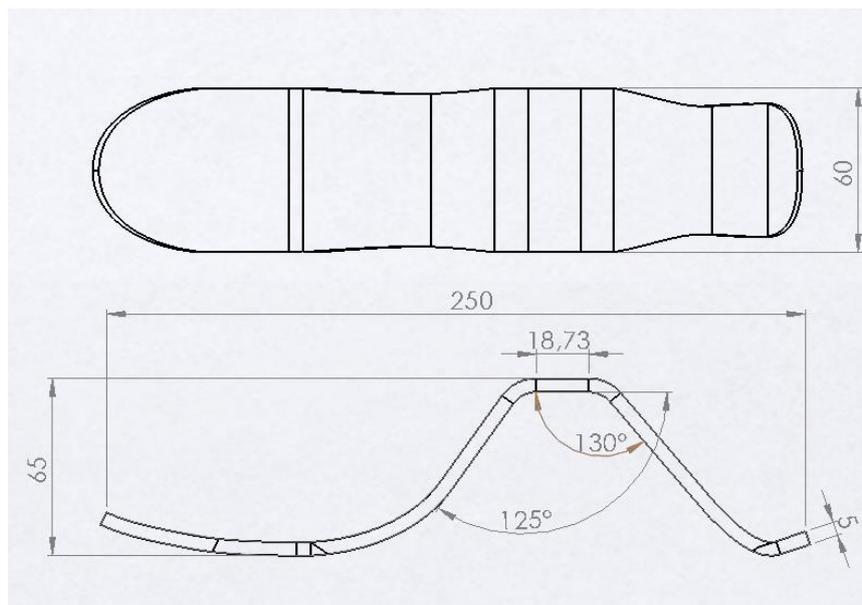


Figura 4.3 Tavola quotata protesi

Il risultato finale è una protesi abbastanza snella, di spessore pari a circa 5mm, caratterizzata da una estrema semplicità geometrica e costruttiva. Siccome il processo produttivo prevede di ritagliare a mano i vari strati di fibra di carbonio, è stato scelto di non prevedere molti sfiancamenti o sagome particolari, in modo da rendere più semplice l'operazione manuale.

4.2 Analisi ad elementi finiti

Introduzione:

Ad ogni modifica geometrica del modello è stato necessario impostare una analisi ad elementi finiti, la quale permette di conoscere lo stato tensionale della protesi, una volta impostati vincoli e carichi agenti su di essa. Il lavoro sulla geometria è stato impostato ricercando un compromesso tra i valori di tensioni e quelli di deformazioni, cercando di minimizzare i primi, e massimizzare i secondi.

Una volta trovata la geometria migliore, è iniziata la ricerca della stratificazione migliore, sempre basandosi sul concetto precedente.

Passaggio dal modello 3d all'ambiente Patran

Per semplicità di utilizzo, il modello della protesi del piede è stato ricreato nell'ambiente di Solidworks, che non permette una comunicazione diretta con il software Patran, utilizzato per l'analisi fem.

È stato quindi necessario salvare il file in formato IGES, che trasforma il solido in un insieme di superfici, individuare la superficie media a spessore nullo del profilo del piede, e importarla su Patran. Sarà su questa superficie che saranno impostati i calcoli, andando a definire su di essa quanti strati di fibre dovranno essere impilate.

Mesh della superficie

Per eseguire la mesh della superficie sono stati utilizzati degli elementi di tipo tria. Questo perché alcune superfici non sono bi-parametric, quindi il programma non permette la suddivisione di tutte le superfici in elementi di uguali dimensioni (isomesh). È estata

quindi usata una mesh di tipo Paver, che scompone le superfici in elementi di dimensioni differenti. Utilizzando però una forma tria piuttosto che una quad, si ottiene una uniformità maggiore.

È infine necessario individuare quale dimensione si vuole dare al singolo elemento.

È chiaro che minori esse sono, e più preciso sarà il risultato fornito dall'analisi, a discapito però di un lungo tempo di attesa per la risoluzione dell'analisi da parte del computer.

Per individuare le dimensioni adatte della mesh è stato utilizzato un metodo empirico. È stato necessario andare a ridurre gradualmente le dimensioni della mesh, fino a che non si ottiene una convergenza dei risultati. A quel punto significa aver individuato una mesh abbastanza fitta da essere affidabile nei risultati, ma non troppo da richiedere troppo tempo per la sua elaborazione.

La mesh finale che è stata utilizzata contiene :

- Numero nodi: 1213
- Numero elementi: 2163

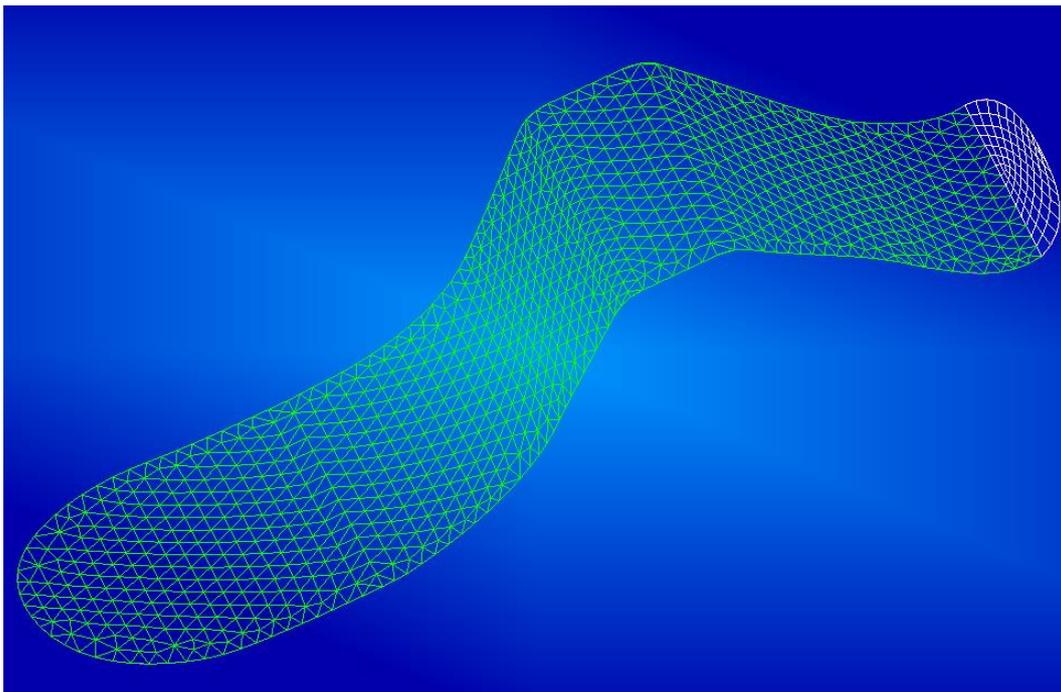


Figura 4.4 Superficie della protesi suddivisa in elementi finiti

Materiale

Una volta impostata la geometria, ossia importata la superficie del profilo, è necessario andare a impostare il materiale di cui sarà composto ogni strato di fibra.

Per dare tutte le informazioni inerenti ad un materiale composito, Patran richiede 3

passaggi distinti:

1. Richiesta di informazioni sulle caratteristiche meccaniche del singolo strato di fibra di carbonio
2. Creazione della stratificazione delle varie fibre
3. Assegnazione del materiale alle superfici

○ **Richiesta di informazioni sulle caratteristiche meccaniche del singolo strato di un materiale**

Per la caratterizzazione di un materiale ortotropo, il programma richiede le seguenti grandezze: E_{11} , E_{22} , G_{12} , ν_{12} , $\sigma_{1R}(t,c)$, $\sigma_{2R}(t,c)$, e τ_{12} , dove:

- E_{11} : modulo elastico in direzione 1;
- E_{22} : modulo elastico in direzione 2;
- G_{12} : modulo di taglio;
- ν_{12} : coefficiente di Poisson;
- $\sigma_{1R}(t,c)$: tensione di rottura in direzione 1 (t: a trazione, c: a compressione)
- $\sigma_{2R}(t,c)$: tensione di rottura in direzione 2 (t a trazione, c: a compressione)
- τ_{12} : tensione di rottura taglio.

I primi 4 valori sono necessari al software per impostare l'analisi e fornire i risultati delle tensioni e delle deformazioni. Gli ultimi invece permettono di andare ad applicare il criterio di resistenza di Tsai-Hill, per la verifica strutturale della protesi.

Essendo la protesi realizzata con materiale di scarto proveniente da aziende esterne, non ci si potrà affidare alla scelta di un materiale unico, bensì bisogna cercare di realizzare una protesi che soddisfi i requisiti, anche con l'utilizzo di materiali differenti e proveniente da aziende diverse. La protesi per esempio potrà essere realizzata con fibra di carbonio proveniente da due aziende differenti: Reglass e Riba composites.

Per quello che riguarda la prima, le informazioni proverranno da degli studi precedenti alla mia tesi, mentre per il materiale Riba, le informazioni necessarie sono state richieste al loro ufficio tecnico. Bisogna comunque sempre tenere in conto che i valori forniti in entrambi i casi saranno indicativi. Le caratteristiche della fibra infatti possono variare fortemente per molti fattori differenti, primo fra tutti lo stato di conservazione di essa prima di essere riutilizzata. Infatti è frequente trovare gli strati di fibre sotto forma di preimpregnati, ossia matrici immerse in resina e catalizzatore. Ciò significa che anche a temperatura ambiente, il catalizzatore inizia la reazione di reticolazione della resina che avvia il processo di indurimento. Tali fibre andrebbero conservate a temperature vicino agli 0° per bloccare tali reazioni. Probabilmente il materiale che sarà reso disponibile verrà lasciato a temperatura ambiente per un tempo non trascurabile, quindi sono previsti deperimenti delle caratteristiche meccaniche. Scopo della tesi è anche andare a vedere quanto questi fattori di indebolimento della fibra incidano sulla resistenza finale.

Di seguito sono elencati alcuni valori per il materiale reglass

(Riferito a una lamina di unidirezionale)

CARATTERISTICHE MATERIALE REGLASS	
E_{11}	179,18 GPa
E_{22}	10,83 GPa
G_{12}	7,17 GPa
ν_{12}	0,15
σ_{1Rt}	1815,00
σ_{2Rt}	60,57
τ_{12}	89,02
σ_{1Rc}	1475,56
σ_{2Rc}	330,00

E per il materiale Riba Composites:

(Riferito a una lamina di tessuto 380g/m²)

CARATTERISTICHE MATERIALE RIBA	
E ₁₁	57 GPa
E ₂₂	57 GPa
G ₁₂	4 GPa
v ₁₂	0,08
σ _{1R}	900 GPa
σ _{2R}	900 GPa
τ ₁₂	50 GPa

Come si può notare dalle tabelle sopra, i due materiali posseggono caratteristiche fortemente differenti. Principale causa di ciò è rappresentata dalla grossa differenza tra il comportamento di una lamina di materiale unidirezionale con quello di una lamina di tessuto. Guardando i dati sopra infatti si nota chiaramente come l'unidirezionale sia un materiale ortotropo, con una direzione privilegiata nella quale esprime tutte le sue ottime caratteristiche, e la sua ortogonale rispetto la quale vi è una netta diminuzione di esse. Per una matrice di materiale intrecciato a 90° invece il discorso è differente. In questo caso vi sono due direzioni equivalenti sia per quello che riguarda il modulo elastico che per la resistenza a rottura. Ciò comporta anche differenze rilevanti nel comportamento sotto carico, che saranno sottolineate e discusse nell'apposito capitolo sull'analisi FEM.

- **Creazione della stratificazione delle fibre**

Una volta forniti tutti i dati sopra indicati, Patran conosce le caratteristiche meccaniche di uno strato monodirezionale. A questo punto è necessario andare a impilare una sopra l'altro i vari strati, indicando con quale inclinazione sono posti, e quanto vale lo spessore di ogni strato. Come si può vedere in figura 4.5, Patran propone un'opzione di creazione di un "laminato", dove richiede l'inserimento di tutti i punti elencati.

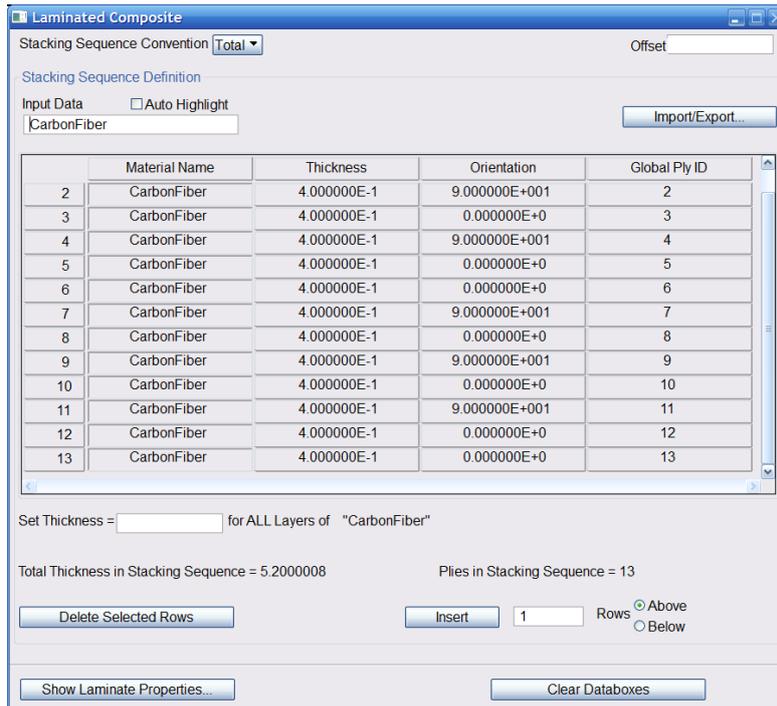


Figura 4.5 Tabella Patran per la creazione del laminato

Solitamente si utilizzano angoli di 0° , 90° e $+ o - 45^\circ$. Il modo con cui disporre gli strati di fibre deve seguire alcune regole generali e alcune regole di carattere tecnologico. Se è preponderante uno sforzo normale, è necessario orientare le fibre soprattutto nella direzione del carico (angolo di 0°) e alcune fibre a 90° possono essere disposte sulla superficie. Se invece ad essere preponderante fosse uno sforzo di taglio, sarà necessario disporre le fibre principalmente inclinate di 45° . È buona norma non utilizzare più di quattro lamine consecutive nella stessa direzione. Nel nostro caso sarà presente una grossa componente flessionale, che andrà quindi a generare il tipico “diagramma a farfalla” lungo la sezione, sollecitando le fibre a trazione. Per questa ragione ho deciso, in linea generale, di preferire le fibre orientate a 0° , inserendo comunque anche strati a 90° e 45° . Come già detto, la fibra di carbonio che utilizzeremo per la protesi, proverrà da scarti di lavorazione di altre aziende, le quali producono prodotti differenti. Questo porterà a dover creare il nostro prodotto con materiale eterogeneo. Infatti potremmo ricevere sia del tessuto intrecciato sia dell’UD (unidirectional). Il tessuto intrecciato potrebbe avere differenti trame, inoltre anche la grammatura potrebbe essere differente, portando a diversi spessori dei singoli strati.

I tessuti sono particolari compositi costituiti da due fibre disposte perpendicolarmente che si intrecciano tra loro come a formare una maglia. In prima approssimazione possiamo

considerare un tessuto come due strati semplicemente posti uno sopra l'altro orientati a 90° rispettivamente.

È stato quindi necessario realizzare due differenti stratificazioni, una nel caso in cui sia fornito tessuto, e una nel caso siano forniti singoli strati orientati.

○ **Assegnazione del materiale alle superfici**

Generata anche la stratificazione delle fibre, l'ultimo passo consiste nell'andare ad indicare quali superfici sono costituite del materiale da noi creato. In questo caso tutte le superfici della protesi sono costituite dello stesso materiale, e posseggono la stessa stratificazione, quindi è sufficiente attribuire a tutta la protesi lo stesso materiale.

Carichi e vincoli (Normativa)

La norma UNI EN ISO 10328, contiene le informazioni e le direttive necessarie per eseguire i test sulle protesi di arto inferiore.

Sono previste le seguenti prove:

- Static test in torsion
- Static proof test
- Static ultimate strength
- Cyclic test

Nel nostro caso la protesi sarà testata solo con una prova statica a rottura, in quanto lo scopo dell'elaborato rappresenta la prima parte del ciclo di prototipazione. Quindi è sufficiente verificare la resistenza a rottura della protesi, e controllare la corrispondenza delle prove alla pressa con i risultati provenienti dalle analisi fem.

Per tale prova statica sono previsti quattro livelli di carico, che porteranno poi a definire l'intensità della forza da andare ad applicare durante il test. Tali livelli sono:

- P3 per persone di peso inferiore ai 60Kg
- P4 per persone di peso inferiore agli 80Kg
- P5 per persone di peso inferiore ai 100Kg
- P6 per persone di peso oltre i 100Kg

Le prove da realizzare sono due, una sulla punta e una sul tacco. La norma indica quindi i punti precisi in cui applicare tali forze, e con quale inclinazione. Per iniziare, lo studio di fattibilità ci si baserà sul livello di carico P3, che richiede i seguenti valori:

	Prova sul tacco	Prova sulla punta
Forza	$F = 1580\text{N}$	$F = 1601\text{N}$
Inclinazione	$\alpha = 15^\circ$	$\beta = 20^\circ$
Distanza rispetto alla caviglia	$X = -41\text{mm}$	$X = 136\text{mm}$

Nel nostro caso è necessaria una considerazione per quello che riguarda la distanza a cui applicare le forze. Innanzitutto vanno applicate nella mezzeria della protesi (non generando quindi componenti torsionali). La norma indica inoltre il valore della distanza a cui bisogna andare ad applicare la forza. Come si può notare nelle due figure sottostanti però, la geometria della nostra protesi si discosta dalla normale distribuzione delle distanze tra caviglia, punta e tacco. Quindi applicare le distanze fornite da normativa non sarebbe stato sensato, in quanto sarebbero state applicate delle forze in punti privi di significato. Per questa ragione i punti di applicazione delle forze sono stati spostati nei punti in cui avviene il contatto tra la protesi e il terreno.

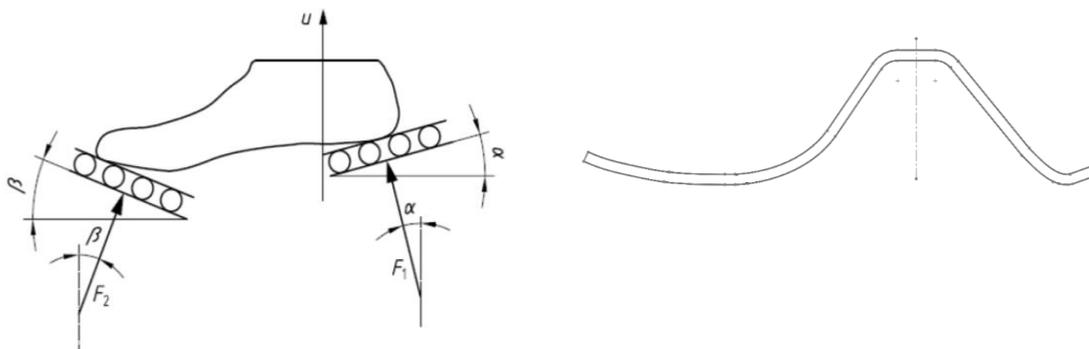


Figura 4.6 Differenza di distanze caviglia, tallone e punta tra una normale protesi di piede e quella in studio

Per quanto riguarda il vincolo, la norma impone di eseguire i test di rottura bloccando l'attacco con la caviglia in pressa, e applicando la forza sul tacco o sulla punta. Seguendo questa linea, è stato applicato un vincolo che bloccasse spostamenti e rotazioni della superficie su cui è montato tale attacco.

Analisi lineare

Esistono due possibilità per eseguire un'analisi ad elementi finiti di un componente. La differenza essenziale consiste nel concetto di rigidità di una struttura.

La rigidità è la caratteristica che determina la risposta in termini di spostamento di una struttura quando è sottoposta a carico. Tale caratteristica è la somma di tre fattori: la forma, il materiale e il tipo di vincolo.

Durante l'applicazione del carico qualunque componente subisce una deformazione, così facendo uno dei tre fattori sopra elencati potrebbe variare, portando di conseguenza ad un cambiamento del valore di rigidità della struttura.

Se quindi eseguiamo una analisi in cui teniamo conto delle possibili variazioni di rigidità, allora si tratta di una analisi non lineare.

Se invece consideriamo le deformazioni appartenenti a piccoli range, allora possiamo trascurare le variazioni di rigidità, eseguendo quindi una analisi lineare.

Chiaramente una analisi non lineare risulta essere più precisa, ma richiede più tempo ed esperienza per essere impostata e risolta.

Nello studio di fattibilità della protesi è stata eseguita una analisi lineare, in quanto il problema di analisi possiede già grosse semplificazioni e incertezze, per questa ragione una analisi non lineare non aggiungerebbe un giustificato livello di precisione alla soluzione.

Ogni analisi deve prevedere quindi lo studio separato nel caso di forza applicata sulla punta e di forza applicata sul tacco. Le analisi vengono risolte dal solutore Nastran, dopo di che Patran offre la possibilità di visualizzare i risultati dell'analisi, fornendo differenti tipi di output.

Per applicare il criterio di resistenza, i valori interessanti risultano essere quelli delle tensioni σ_x , σ_y e τ_{xy} .

Tali valori saranno utilizzati nella formula del criterio di Tsai-Hill per la verifica di resistenza. La formula è la seguente, e verrà descritta nel capitolo seguente:

$$H = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{1R}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{2R}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_{12}} \right)^2 - \frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{\sigma_{1R}^2} \leq 1$$

Teoricamente se l'effetto preponderante fosse quello di flessione, su di una sezione qualsiasi della protesi dovrebbe generarsi un diagramma a farfalla, con degli spostamenti di simmetria rispetto all'asse neutro provocati dall'eventuale trazione presente. Quindi lo strato più esterno dovrebbe anche essere quello più sollecitato. Questo sarebbe valido se tutte le fibre fossero disposte nella stessa direzione. Andando invece a modificare strato per strato l'inclinazione delle fibre, si nota la possibilità di avere gli strati maggiormente sollecitati qualche strato sotto rispetto a quello più esterno. Patran include la possibilità di andare ad indagare lo stato tensionale di uno singolo strato scelto, opportunità utile per la considerazione sopra citata.

4.3 Analizzare i risultati: Criteri di rottura per la fibra di carbonio

Con l'aumentare dell'utilizzo di materiali compositi si sono sviluppati di pari passo anche criteri di resistenza adattati a questo tipo di materiali.

I materiali compositi sono spesso materiali ortotropi, ciò comporta inevitabilmente che non si possano utilizzare le stesse tecniche utilizzate per materiali isotropi, in quanto vengono a cadere una serie di condizioni (anche analitiche), che portano a semplificazioni nella risoluzione dei problemi. Con ortotropo si intende un materiale che possiede due direzioni preferenziali orientate a 90° l'una rispetto all'altra, lungo le quali presenta due diversi valori di modulo elastico.

I criteri di resistenza che maggiormente hanno preso posizione nello studio di materiali compositi sono:

- Il criterio della massima tensione
- Il criterio della massima deformazione
- Il criterio di Tsai-Hill

I primi due riprendono ciò che è valido anche per materiali isotropi, l'ultimo invece è un criterio adatto al caso di materiali ortotropi.

° Criterio della massima tensione

Si ha rottura se una delle tensioni principali supera il valore della tensione di rottura.

° Criterio della massima deformazione

Si ha rottura quando una delle componenti di deformazione riferite al sistema principale supera il valore della deformazione ammissibile del materiale

° Criterio di Tsai-Hill

Il criterio di Tsai-Hill può essere pensato come un adattamento al caso di materiale ortotropo del noto criterio di Von Mises, e risulta uno dei criteri più utilizzati per la verifica di componenti in fibra di carbonio.

In una lamina σ_z risulta nullo, e il criterio si riduce all'equazione:

$$H = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{1R}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{2R}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_{12}} \right)^2 - \frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{\sigma_{1R}^2} \leq 1$$

dove σ_x , σ_y e τ_{xy} sono le tensioni che vengono ricavate dal modello, mentre σ_{1R} , σ_{2R} , τ_{12} sono le tensioni ammissibili del materiale. σ_{1R} e σ_{2R} sono tensioni di trazione se σ_x e σ_y sono positive, di compressione se σ_x e σ_y sono negative. Quindi bisogna controllare se lo stato tensionale è di compressione o di trazione, in quanto i risultati ottenuti saranno differenti.

Il criterio di Tsai-Hill presenta il vantaggio di poter esprimere un criterio di resistenza abbastanza accurato con una unica equazione, presenta per contro il limite di non poter distinguere tra sforzi di trazione e sforzi di compressione direttamente dalla formula. Per questa ragione richiede una analisi svolta quadrante per quadrante

CONFRONTO TRA I CRITERI DI ROTTURA

In generale si può dire che il criterio più appropriato dipenda dal tipo di materiale e dal tipo di carico.

I criteri di massima deformazione e di massima tensione sono adatti a rotture di tipo fragile. Il vantaggio di questi è che risultano più semplici da applicare, in quanto richiedono solamente prove di tipo monoassiale. Il criterio di Tsai-Hill è maggiormente indicato per le rotture di tipo duttile.

In generale i risultati che offrono questi criteri sono differenti a seconda del quadrante che si sta considerando. Per esempio sul primo quadrante (due stati di trazione), le teorie offrono tutti risultati simili e soddisfacenti. Sui restanti invece vi sono differenze apprezzabili. Questo porta spesso a dover utilizzare tutti i criteri disponibili, per andare poi a prendere le soluzioni ibride più conservative.

CARICHI DI ROTTURA

I metodi analizzati nei paragrafi precedenti rappresentano delle semplificazioni analitiche che permettono con accettabile precisione di comprendere se un componente in materiale composito reggerà o meno a determinati sforzi. Non sono tenute però in conto i modi in cui questo avverrà. Data la maggiore complessità strutturale dei materiali compositi, presenteranno un maggior numero di modalità di rottura rispetto ai materiali omogenei.

Principalmente si possono schematicamente distinguere i seguenti casi:

- Rottura trasversale delle fibre, fragile o duttile a seconda della loro natura
- Rottura trasversale e longitudinale della matrice, con formazione di microfessure
- Rottura del legame fibra-matrice
- Delaminazione con separazione degli strati del composito

I primi tre si riferiscono alla rottura della singola lamina, mentre l'ultimo è una rottura complessa del composito. Solitamente si ha che la rottura del composito risulta una combinazione di tutti i tre meccanismi semplici.

5. Risultati: conclusioni sulla geometria finale

Nella produzione del piede vi saranno due varianti per le quali è necessario separare le analisi: il caso di fibra di carbonio a strati unidirezionali, e il caso di utilizzo di tessuti. È chiaramente necessario andare a suddividere lo studio dei due, in quanto si otterranno risultati differenti.

Ogni modello che deve essere analizzato richiede innanzitutto due analisi differenti, una con il carico applicato sulla punta, e una con il carico applicato sul tallone.

Per ognuno di questi, è necessario andare a vedere gli andamenti delle tensioni σ_x , σ_y e τ_{xy} . Dove con σ_x si intende la direzione preferenziale della fibra, σ_y è la sua direzione ortogonale e τ_{xy} rappresenta la tensione tangenziale che si genera tra due layer consecutivi. Patran permette di andare ad isolare una delle tre precedenti tensioni, e mostra i dati direttamente sul modello. A questo punto è necessario ricercare per ognuno di essi il punto in cui è maggiormente sollecitato, e interrogare il software sul valore delle restanti due tensioni in quei punti. Così facendo si sono individuati quelli che dovrebbero essere i punti più sollecitati. A questo punto sarà sufficiente andare ad applicare il modello di Tsai-Hill per verificare la resistenza del laminato, facendo attenzione ad eseguire una analisi “a settori”, ossia tenendo conto dei segni delle tensioni.

In entrambi i casi è stato necessario eseguire un elevato numero di analisi, per comprendere quale fosse la composizione migliore dei vari strati in termini di orientamento di fibre. È stato poi necessario calcolare il numero di strati necessari per verificare il criterio di resistenza.

Di seguito sono descritti i risultati delle analisi dividendo i due casi di fibre unidirezionali e tessuto.

Analisi protesi fibre unidirezionali

Per quello che riguarda le tensioni σ_x , il massimo dello sforzo agisce sul quinto strato (ply 5), ossia il primo strato unidirezionale orientato a 0° , quindi in quel caso è stato interrogato il quinto strato, mentre nei restanti due casi i valori sono stati ricercati nel primo strato (ply 1). La migliore disposizione è risultata la seguente:

45°-135°-45°-135°-0°-0°-0°-90°--27x0°--90°-0°-90°-0°-0°-0°-135°-45°-135°-45°

Per uno spessore totale di 4.7mm

Le rappresentazioni degli stati tensionali ottenuti con tale disposizione sono i seguenti:

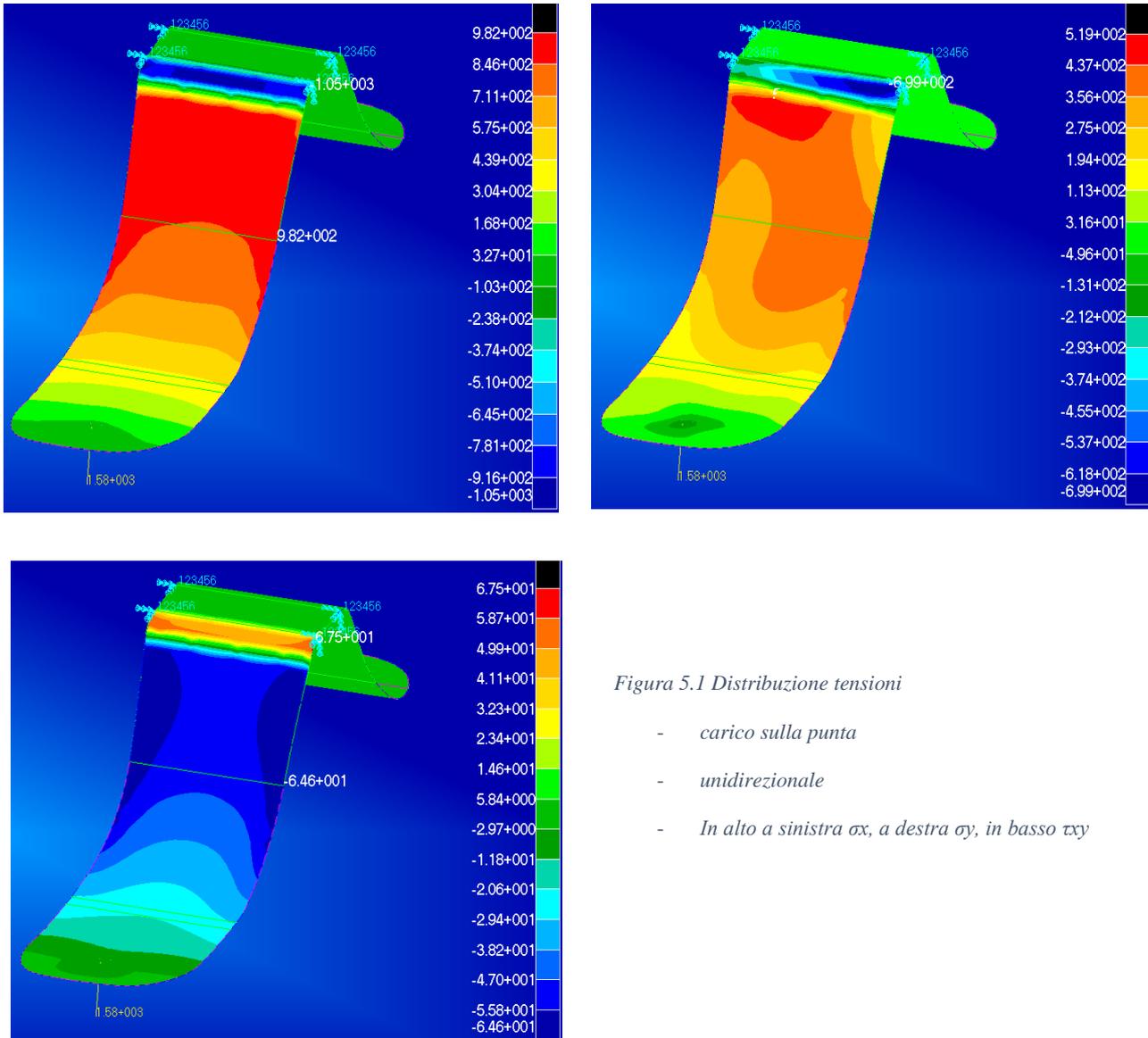


Figura 5.1 Distribuzione tensioni

- *carico sulla punta*
- *unidirezionale*
- *In alto a sinistra σ_x , a destra σ_y , in basso τ_{xy}*

I valori puntuali rilevati per le tensioni sono i seguenti:

σ_x ,	σ_y	τ_{xy}	H
-1050	12.1	14.4	0.5782
-226	-50.6	57.1	0.4515
-66.3	-20.4	67.5	0.5779
403	24.4	-64.6	0.7

Come si può notare in tutti i casi il criterio di Tsai-Hill è verificato. Il valore più elevato è quello del quarto caso. Tale punto non rappresenta un massimo di una delle tre tensioni, ma risultava particolarmente gravoso come combinazione delle tre, in quanto sono presenti valori elevati di tutte e tre.

Nel secondo caso di forza applicata al tallone i valori inferiori delle tensioni che nascono permettono di non dover eseguire una analisi puntuale come nel caso precedente. Si nota infatti che il criterio è chiaramente verificato in tutta la superficie.

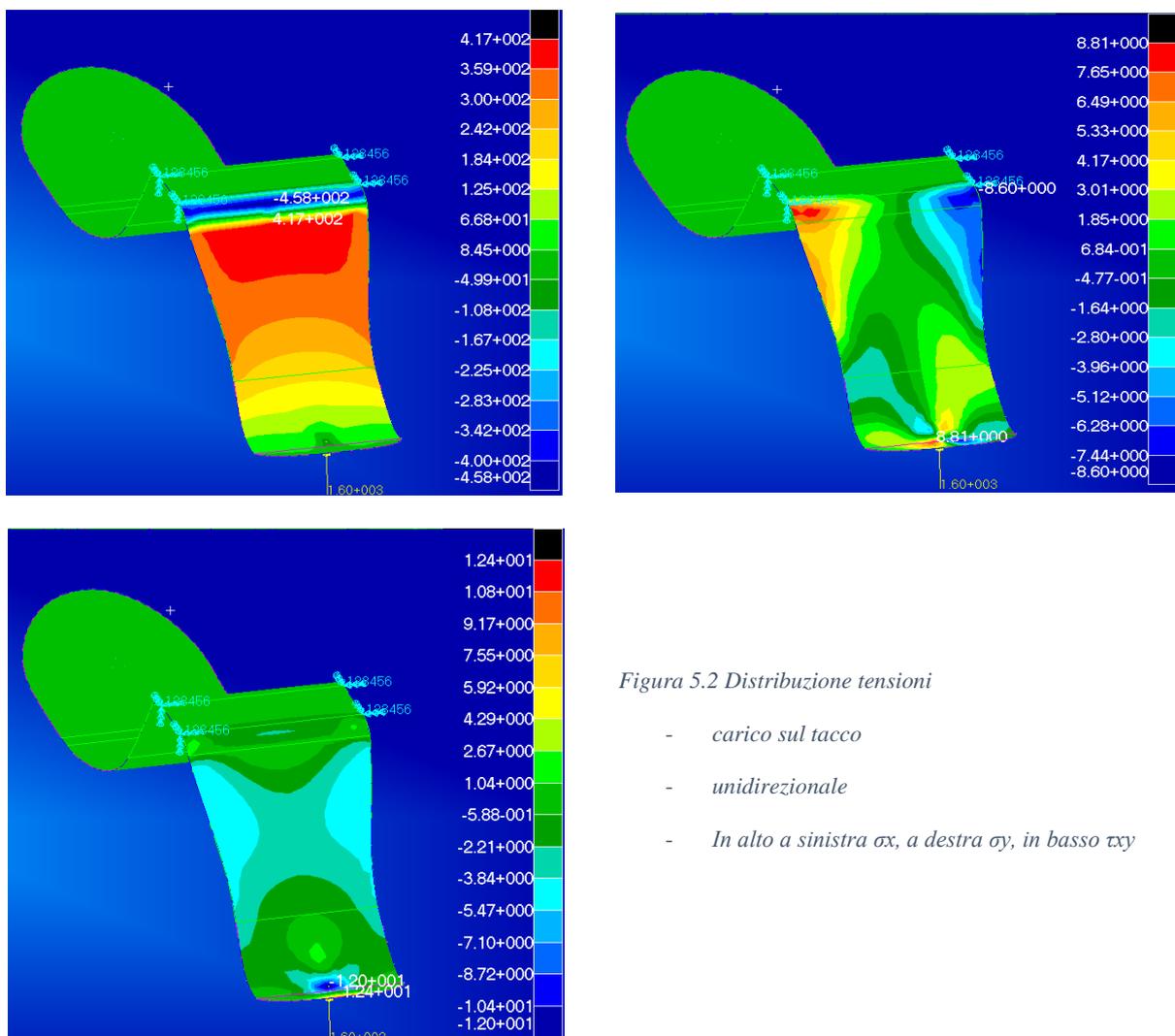


Figura 5.2 Distribuzione tensioni

- carico sul tacco
- unidirezionale
- In alto a sinistra σ_x , a destra σ_y , in basso τ_{xy}

σ_x ,	σ_y	τ_{xy}	H
417	8.81	12.4	0.09

Considerando i valori massimi di tensioni si ha:

Analisi protesi tessuto

Per realizzare le prove sul tessuto si eseguono gli stessi passaggi del caso unidirezionale, con la sola differenza che andranno inseriti dati differenti (vedi la differenza tra direzioni preferenziali di resistenza pag.32), e il fatto che tutte le lamine sono disposte nella stessa direzione (0° - 90°). Nel caso del tessuto vi è una precisazione da fare. Esso infatti è composto da un intreccio di fili che si incrociano a 90° rispettivamente. Ciò non andrà ad influire nella precisione dell'analisi di Patran. Infatti i dati che vanno inseriti sono stati calcolati dall'esperienza maturata negli anni dalla Riba, l'azienda che ha fornito il materiale. Si può infatti notare che i valori di modulo elastico e quelli di resistenza sono decisamente inferiori (rispettivamente 57GPa contro 179GPa per il modulo elastico e 900MPa contro 1815MPa per la resistenza a rottura). Ciò fa capire che gli effetti negativi dell'intreccio sono già tenuti in considerazione, eseguendo quindi i calcoli con tali dati corretti, si esegue una analisi veritiera.

L'analisi quindi procede come nel caso precedente, dividendo i casi di forza applicata sulla punta e poi sul tacco, e andando a guardare puntualmente i valori dei massimo delle tre tensioni per applicare infine il criterio di resistenza di Tsai-Hill.

Le simulazioni sono state effettuate con un carico di 2030N, corrispondente ad una prova di tipologia P4 per carichi fino agli 80Kg.

Anche in questo caso dopo un elevato numero di prove, la migliore stratificazione è risultata la seguente:

12 strati 0° - 90° da 0.4mm l'uno (grammatura 360g/mm²)

Spessore totale: 5.2mm

Di seguito sono raffigurate le analisi tensionali ottenute con tale stratificazione:

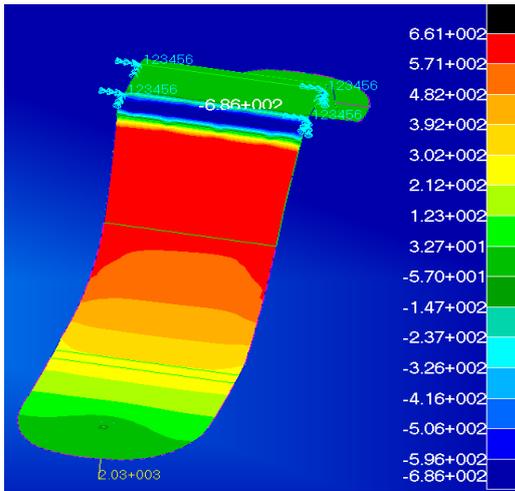
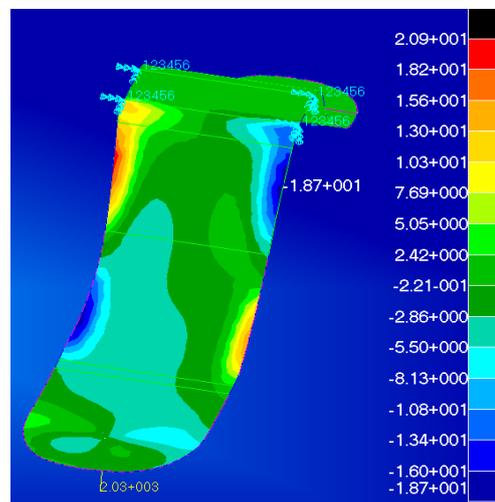
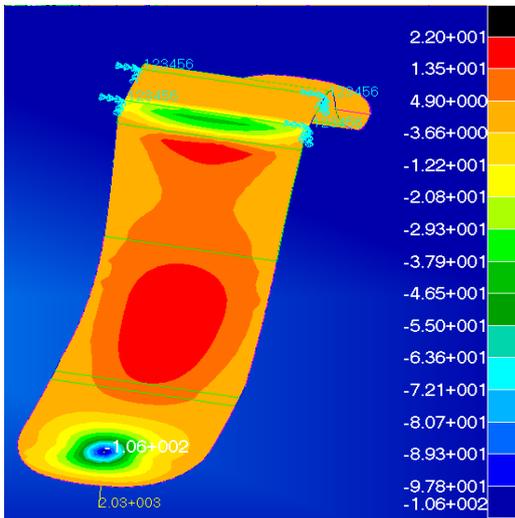


Figura 5.3 Distribuzione tensioni

- carico sulla punta
- unidirezionale
- In alto a sinistra σ_x , a destra σ_y , in basso τ_{xy}



I valori puntuali delle tensioni sono i seguenti:

σ_x ,	σ_y	τ_{xy}	H
-686	50	20	0.70

In questo caso i punti di massimo delle tre tensioni coincidono, quindi il singolo caso sopra esposto è esaustivo per verificare la resistenza della protesi.

Per il tallone vale la stessa considerazione fatta in precedenza di valori di tensioni trascurabili rispetto al caso di forza applicata sulla punta

σ_x ,	σ_y	τ_{xy}	H
202	37	20	0.39

Conclusioni sulla stratificazione

Sono state quindi individuate le stratificazioni migliori, con verifica di resistenza attraverso criterio di Tsai-Hill. Le prove sono state fatte solo con un livello di carico P3 per quello che riguarda gli strati unidirezionali, mentre sono verificate al livello P4 per il tessuto proveniente da Riba Composites.

Per sviluppi futuri, sarà necessario verificare la protesi con i livelli di carico maggiori, andando ad aumentare il numero degli strati necessari per la resistenza meccanica. In questo modo si potrà ottenere una gamma di protesi a spessori variabili personalizzata sul peso del paziente.

6.Realizzazione dello stampo

La protesi che si vuole realizzare non solo deve costare poco, ma deve anche garantire di potere essere fabbricata con strumenti semplici per due motivi:

1. Basso costo d'ammortamento delle attrezzature
2. Basso livello tecnico richiesto agli operatori

Per questa ragione si è deciso di realizzare il manufatto con una tecnica a stampo aperto di formatura a mano. Ciò richiede un primo stampo in cui stendere le lamine di carbonio, e un secondo che permetta di applicare la pressione necessaria durante la fase di reticolazione della resina.

Lo stampo è realizzato in alluminio, e lavorato con una fresatrice CNC.

6.1 Modello al CAD

Il primo passo consiste nel generare al CAD il modello, utilizzando Solidworks. Le specifiche richieste da uno stampo per fibra di carbonio sono essenzialmente:

1. Possedere una bassa inerzia termica (riducendo la massa), per non avere un gradiente di temperatura troppo elevato tra aria dentro il forno e stampo, e tra stampo e fibra, in modo tale da garantire un controllo migliore sulla temperatura durante lo stampaggio.
2. Prevedere una sagoma rialzata per l'applicazione costante di pressione durante lo stampaggio (fig. 6.3). Infatti durante la fase di cottura la resina fuoriesce dallo stampo, si presenta la necessità di permettere ad esso di continuare ad applicare pressione. L'azione combinata di molle a tazza aggiunte al sistema di bloccaggio e del rialzo, permette di compensare i ritiri causati dall'evacuazione della resina
3. Prevedere l'utilizzo di perni di posizionamento
4. Prevedere la presenza di un "estrattore", ossia un perno inserito all'interno dello stampo che permetta di evacuare la protesi dalla sede dello stampo. Esso è inserito in un foro predisposto sullo stampo basso (vedi fig.6.1), ed è stato ottenuto lavorando lo stampo con l'estrattore inserito, in modo tale che assuma la forma della sagoma del piede. È serrato allo stampo con una vite. Così realizzato, a fine stampaggio sarà sufficiente togliere la vite e fare scorrere l'estrattore nella sua sede (con l'utilizzo di un martello), per forzare la fuoriuscita della protesi

In figura 6.1 è rappresentato lo stampo basso. Nella sede scavata andranno posizionate a mano le lamine di fibra di carbonio. I tre fori di piccola dimensione sono le sedi dei perni di posizionamento, mentre il foro ricavato lungo la sagoma ha lo scopo di ospitare l'estrattore, che andrà a ricoprire tale vuoto.

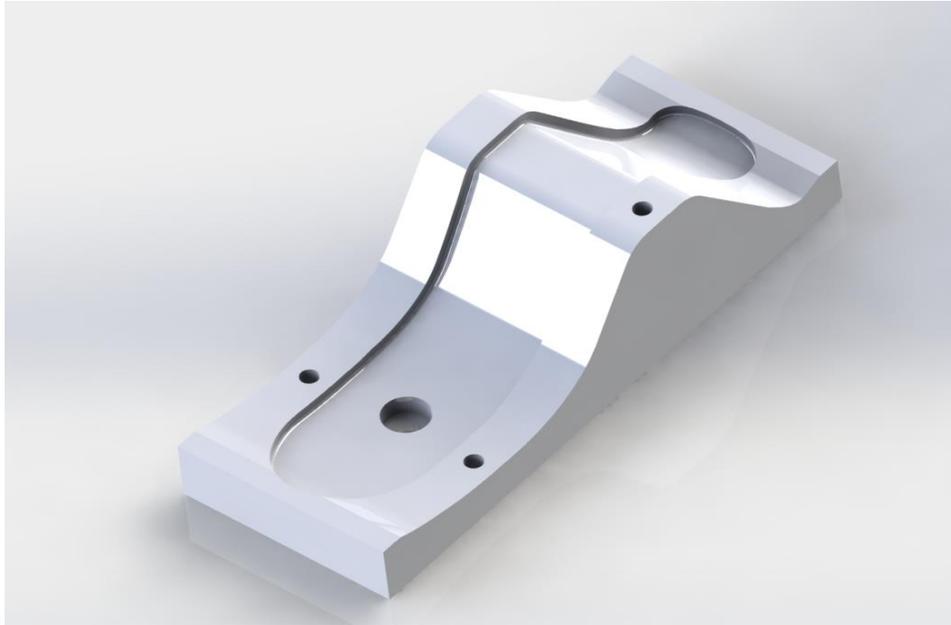


Figura 6.1 Rendering dello stampo basso

In Figura 6.2 è rappresentata la tavola quotata dello stampo basso. È importante notare la presenza degli angoli di sforno, da noi impostati a 10° , senza i quali risulterebbe difficile andare a estrarre la protesi senza danneggiarla.

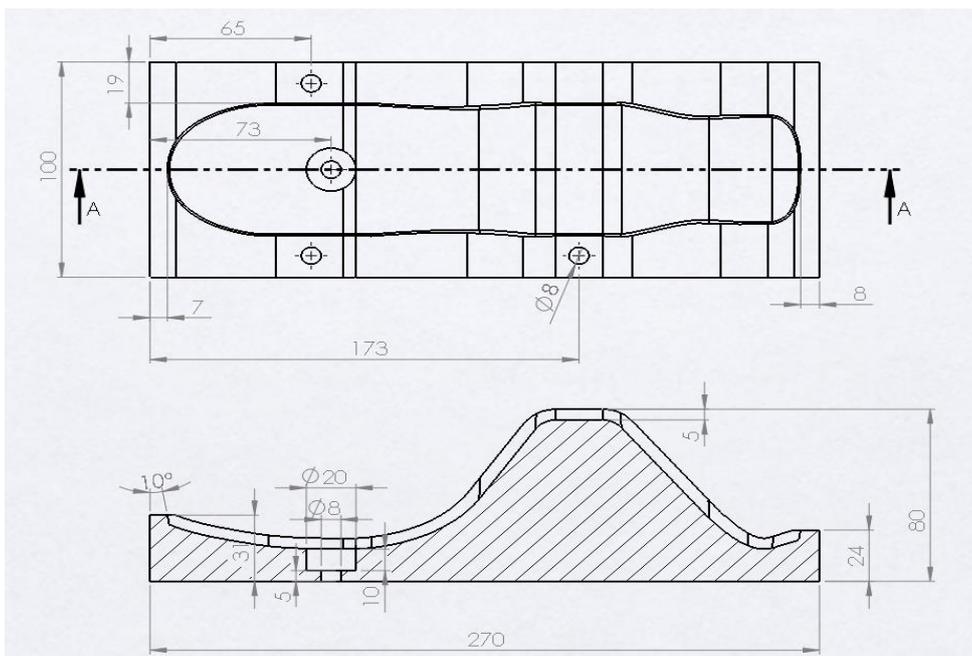


Figura 6.2 Disegno quotato stampo basso

In figura 6.3 è rappresentato lo stampo alto. In Rilievo è presente la sagoma della protesi, utile alla garanzia della pressione durante tutto il periodo di stampaggio.

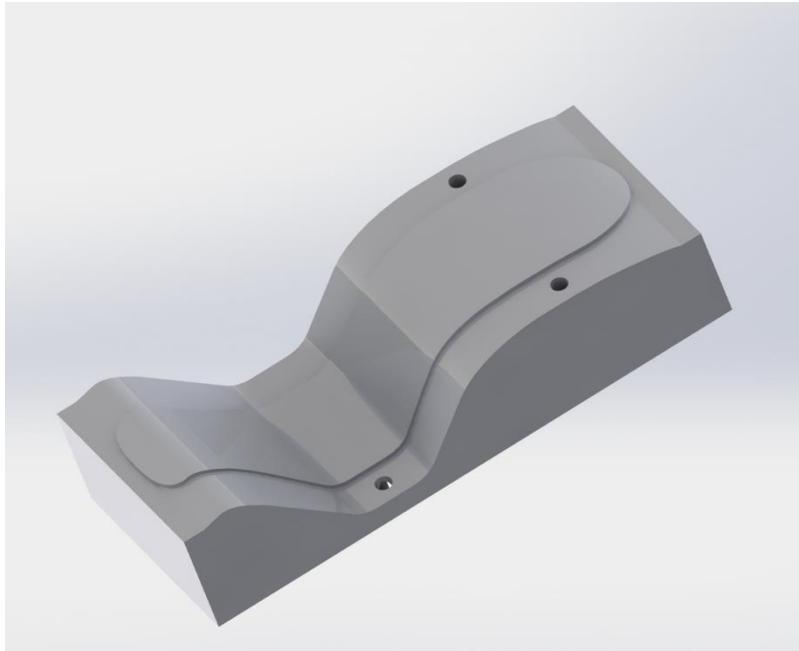


Figura 6.3 Rendering stampo alto

In figura 6.4 è rappresentata la tavola quotata dello stampo alto.

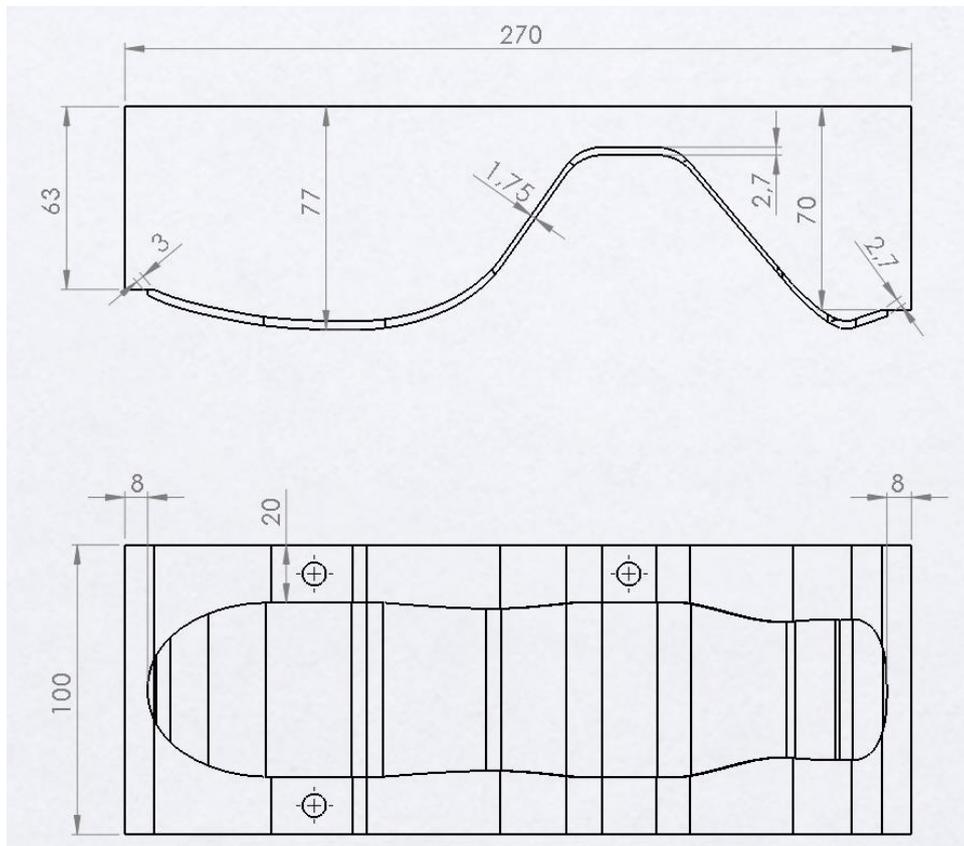


Figura 6.4 Disegno quotato stampo alto

6.2 Ciclo di lavoro al CAM e realizzazione alla fresa CNC

Realizzato il modello dello stampo, è necessario andare a produrre il pezzo con l'utilizzo di una fresatrice a controllo numerico, nel nostro caso una macchina automatica a tre assi (modello Cortini HS644P).

Per fare ciò bisogna prima creare un file con tutte le istruzioni da dare alla macchina. È stato utilizzato Cimatron, il quale una volta impostato il tipo di utensile, la tipologia di operazione (sgrossatura, finitura etc.) e qualche dettaglio sulla tecnica di lavorazione, genera in automatico una traiettoria utensile.



Figura 6.5 Operazione di finitura dello stampo alto con fresatrice CNC

La macchina impiega all'incirca una giornata intera di lavoro per realizzare entrambi gli stampi. Concluso il ciclo è necessario migliorare la qualità di quelle superfici che saranno a contatto con la fibra di carbonio, in maniera tale da andare ad ottenere la migliore rugosità possibile anche sulla protesi in carbonio. Una volta smontato dalla macchina quindi, lo stampo necessita di essere pulito con carta abrasiva.



Figura 6.6 Stampo basso dopo le operazioni di finitura manuale delle superfici

Completata la realizzazione dello stampo, è necessario procedere stendendo su tutte le superfici di esso diverse mani di distaccante, il quale ha lo scopo di evitare che la resina epossidica, durante lo stampaggio, vada ad incollarsi allo stampo stesso, impedendo quindi di poter estrarre la protesi dalla sede.

In figura 6.6 è mostrato il risultato finale dello stampo basso.

7. Produzione della protesi

Al fine di limitare i costi, il sistema produttivo della protesi è stato appositamente sviluppato per essere estremamente semplice ed eseguibile con pochi mezzi e strumentazioni (come si vede in figura 7.1), in modo tale da poter essere eseguito da chiunque in qualunque parte del mondo, e senza specializzazioni.



Figura 7.1 Strumentazione necessaria per la realizzazione della protesi

Come prima prova verranno realizzati due modelli distinti di protesi, uno con sagome intere di piede (fig.7.2), e l'altro con lamine parziali (fig 7.3). Il secondo caso risulta indispensabile quando gli scarti di produzione sono di piccole dimensioni, e non si riuscirebbe a ricavare sagome abbastanza grandi per avere lamine intere. Scopo finale dell'elaborato sarà anche andare a quantificare in termini di resistenza meccanica la differenza dei due casi. Il processo produttivo parte con il ritaglio manuale delle sagome, con l'utilizzo di semplici forbici o cutter.



Figura 7.2 Sagoma intera



Figura 7.3 Sagoma parziale

In figura 7.3 si può notare come la sagoma sia ottenuta come somma e sovrapposizione di più ritagli di piccole dimensioni. In questo modo si potrà utilizzare praticamente qualunque tipo di scarto.

Chiaramente una protesi realizzata interamente con sagome parziali sarà caratterizzata da una minore resistenza, in quanto sarà anche la resina a dover resistere agli sforzi di trazione che solleciteranno il pezzo.

Nelle figure 7.2 e 7.3 si possono notare delle linguette realizzate nei ritagli delle sagome. Esse hanno lo scopo di facilitare la fase di rimozione delle pellicole protettive di cui sono rivestiti gli strati di fibra di carbonio. Essendo infatti il materiale un preimpregnato, le pellicole risultano particolarmente appiccicose, e la fase più complicata è quella in cui si inizia la rimozione di esse, nella quale è facile rovinare le fibre. Le linguette hanno quindi lo scopo di poter iniziare la rimozione della pellicola concedendo di rovinare localmente i filamenti, in quanto in seguito andranno tagliate per ottenere quella che è la sagoma voluta.

7.1 Realizzazione protesi con sagome intere

Questo modello ha lo scopo di fare da riferimento come prototipo ottimale che è possibile ottenere. In questo modo possiamo andare a confrontare i risultati che si otterranno dal secondo modello riuscendo a quantificare quanto il secondo metodo di produzione (più economico ma meno efficace) influisce sulla qualità del prodotto. Per questa ragione questo primo prototipo è stato realizzato interamente con materiale Riba, di cui si è a conoscenza sia delle caratteristiche meccaniche, sia della buona conservazione che ha ricevuto.

I layer sono stati disposti tutti a 0°-90°, e per tutti è stato utilizzato materiale con stessa grammatura (360g/m²).

Una volta depositati i vari strati si procede serrando lo stampo e mettendo in forno.

La pressione ottimale a cui devono essere soggetti gli strati di fibra di carbonio durante il trattamento di cura è compresa in un range di valori di 5 e 6 bar. Nel nostro caso si è deciso di applicare una pressione pari a 5 bar.

Per il serraggio sono stati scelti dei dadi M8 di acciaio zincato. Si possono quindi dedurre:

Diametro medio: $D_m = 7.19\text{mm}$

Passo: $p = 1.25\text{mm}$

Coefficiente di attrito: $f = 0.25$

E' necessario inoltre calcolare la superficie sulla quale agisce la pressione dello stampaggio. Tale valore è pari alla superficie della protesi, dato ottenibile dal modello realizzato su solidworks.

$A = 16437\text{mm}^2$

Ciò significa che ogni singolo bullone deve applicare una forza circa pari a:

$F = 2055\text{N}$

A questo punto è possibile calcolare il momento da applicare alla vite per il serraggio:

$$M_t = F \frac{D_m}{2} \left[2f + tg \left(\frac{p}{2\pi} \right) \right]$$

Quindi:

$$M_t = 2055\text{N} \frac{7.19\text{mm}}{2} \left[2 \cdot 0.25 + tg \left(\frac{1.25}{2\pi} \right) \right] = 5\text{Nm}$$

Nel momento di serraggio dello stampo sarà quindi necessario utilizzare una chiave dinamometrica, allo scopo di applicare con precisione la pressione richiesta.

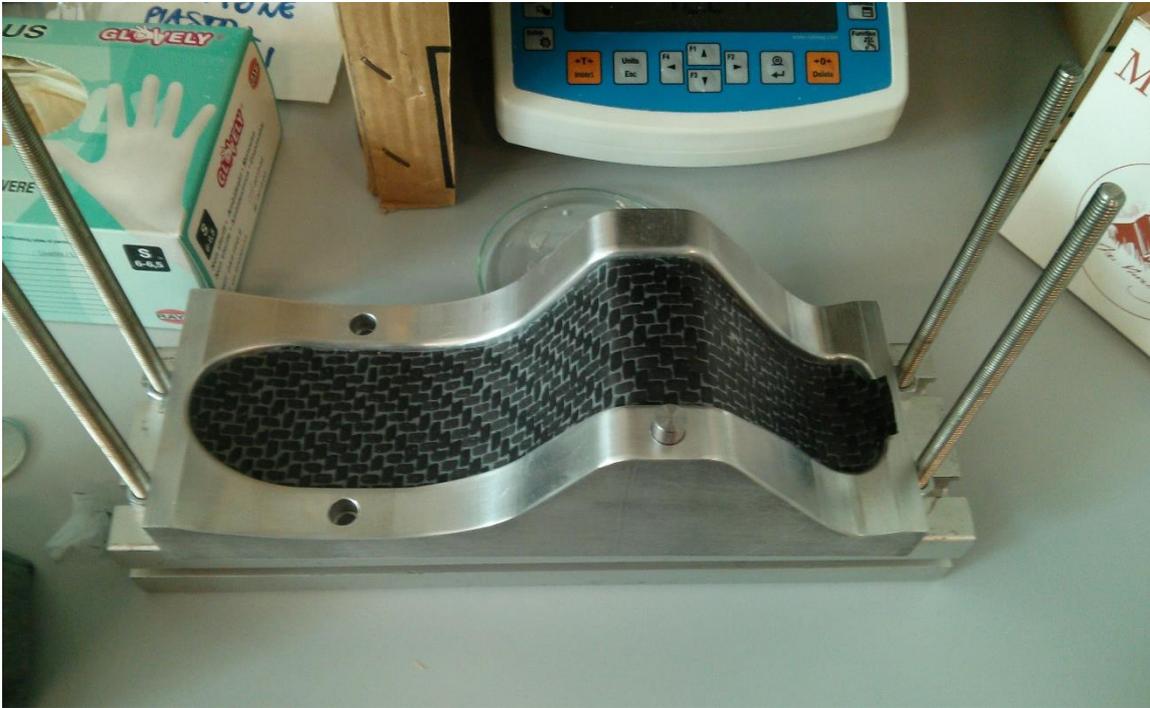


Figura 7.4 Primo strato inserito nello stampo

Per il primo stampaggio è stato necessario inserire una termocoppia nello stampo. Infatti si è a conoscenza del ciclo ottimale di cottura che deve ricevere la fibra di carbonio per ottenere le massime prestazioni. Esso consiste in una rampa di riscaldamento da $3^{\circ}/\text{min.}$, seguita da un mantenimento per 2 ore a 120° e un successivo raffreddamento a $5^{\circ}/\text{min.}$ fino a temperatura ambiente. A causa della elevata inerzia termica dello stampo, non siamo però a conoscenza della temperatura della fibra. Infatti mentre l'ambiente del forno può riscaldarsi molto velocemente, lo stampo faticherà ad aumentare la propria temperatura. Inserendo quindi la termocoppia abbiamo verificato che sono necessarie 4 ore a 120 gradi e 1 ora per il raffreddamento, per un tempo totale di ciclo pari a 5 ore. Quindi d'ora in poi sarà possibile utilizzare un semplice forno (senza termocoppia), utilizzando temperature e tempi sopra forniti.

Terminata la fase di cottura si utilizza l'estrattore precedentemente illustrato per permettere la fuoriuscita della protesi dallo stampo. Come si vede in figura 7.5, nel momento dell'estrazione, il prodotto presenta dei bordi estremamente frastagliati, che richiedono quindi una sbavatura manuale.



Figura 7.5 Protesi tolta dallo stampo, con bordi da rifinire

Terminata la sbavatura, il ciclo di produzione della protesi è concluso. Non rimane che eseguire delle lavorazioni meccaniche per quello che sarà l'attacco alla caviglia, oppure predisporre la superficie piana per un incollaggio. Il risultato finale è mostrato in figura 7.6.



Figura 7.6 Protesi rifinita

7.2 Realizzazione protesi sagome parziali

Questo modello di protesi sarà quello di maggiore interesse, in quanto permette di realizzare il prodotto con praticamente qualunque tipo di scarto di produzione. Non solo per quello che riguarda le dimensioni, ma anche per le diverse provenienze del materiale. Per realizzare questa protesi infatti sono stati utilizzati tre tipologie differenti di fogli di fibra di carbonio.



Figura 7.7 Composizione degli strati del modello a sagome parziali

In figura 7.7 è mostrata la composizione dei layer del modello di protesi realizzato con strati parziali. La prima sagoma a sinistra sarà la prima depositata, diventando quindi lo strato più basso della protesi, si procede quindi con la deposizione andando da sinistra verso destra. Il punto in cui sono presenti le interruzioni non sono decisi a priori, ma sono dettate dall'esigenza della dimensioni degli scarti. Nella fase in cui si compone la stratificazione, bisogna porre attenzione a non disporre le interruzioni su strati adiacenti negli stessi punti, in modo da evitare di indebolire troppo il materiale. È inoltre consigliato di inserire gli strati con più interruzioni nella parte centrale della protesi, dove sono presenti le tensioni minori.

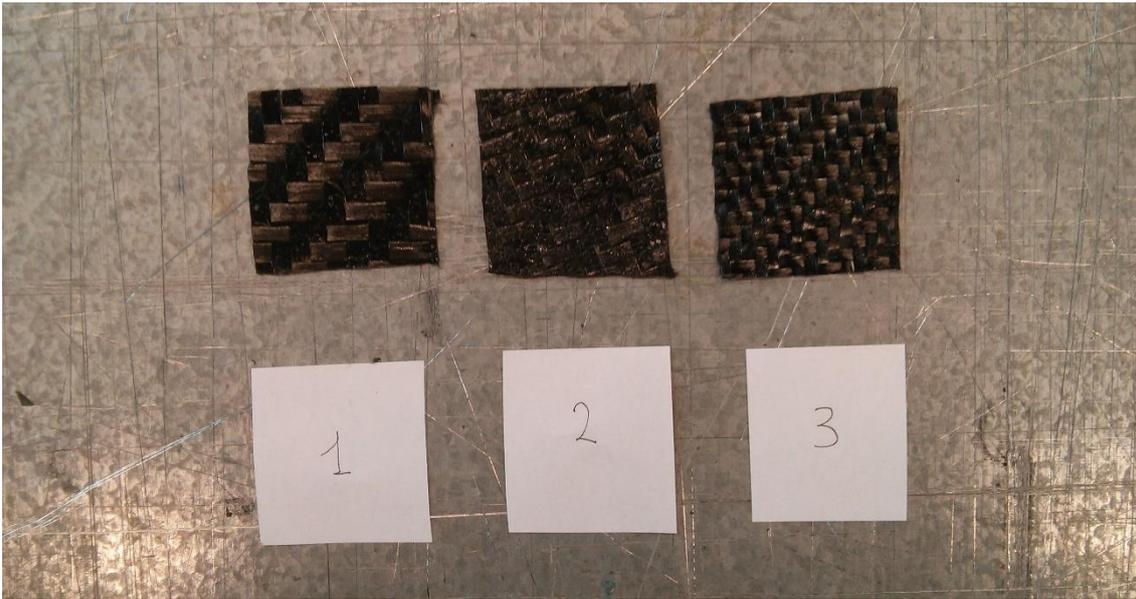


Figura 7.8 Dettaglio sulla tipologia di materiale utilizzato per la protesi in sagome parziali

In figura 7.8 sono mostrate le tre tipologie di materiale utilizzato. Si può notare la differenza di trama del tessuto (grosso, medio e fine). Inoltre vi è una leggera differenza di grammatura tra i modelli 1,2 e 3 che risultano rispettivamente di 360g/m^2 , 400g/m^2 e 300g/m^2 .

Il processo di produzione è analogo quello della protesi a sagome intere. Anche esteticamente i due modelli risultano uguali, e come si può vedere in figura 7.9 i due non sono riconoscibili a vista.



Figura 7.9 Foto dei due modelli di protesi realizzati

8. Prove alla pressa

Terminata la realizzazione delle protesi è necessario eseguire delle prove alla pressa su di esse per due motivi:

- Calcolarne la rigidezza
- Verificare la resistenza ai carichi di rottura imposti dalle norme

Il primo punto è importante non solo per avere indicazioni sulla reale rigidezza della protesi, ma anche per poter verificare che il modello numerico realizzato ed elaborato con Patran garantisca risultati veritieri. Bisogna quindi confrontare i dati teorici ottenuti con le analisi ad elementi finiti, con quelli reali ottenuti in pressa.

Inoltre sarà importante verificare che la protesi resista alle condizioni di carico imposte dalle normative, sia nel caso di carico applicato in punta, che nel caso di carico applicato sul tacco.

8.1 Setup e protocollo di prove

Il primo punto da definire riguarda il metodo di bloccaggio in pressa della protesi. Il vincolo che si vuole ottenere è analogo a quello impostato sulle prove in Patran, quindi si vuole vincolare l'intera superficie piatta alta, dove andrà posto l'attacco con la caviglia. Per fare ciò si è deciso di forare la protesi e prevedere un collegamento bullonato. Andrà inoltre predisposta una piastra per distribuire la pressione il più uniformemente possibile su di una superficie di maggiori dimensioni.

La vite utilizzata per il bloccaggio della protesi in macchina è un M16.



Figura 8.1 Sistema di bloccaggio della protesi alla pressa

Le prove verranno realizzate presso il Laboratorio della seconda facoltà di Ingegneria a Forlì.

Le prove che si ha intenzione di realizzare sono tre. In figura 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5 sono schematicamente rappresentate le metodologie di applicazione dei carichi:

- Carico sulla punta applicato lungo una linea: sollecitazione a flessione

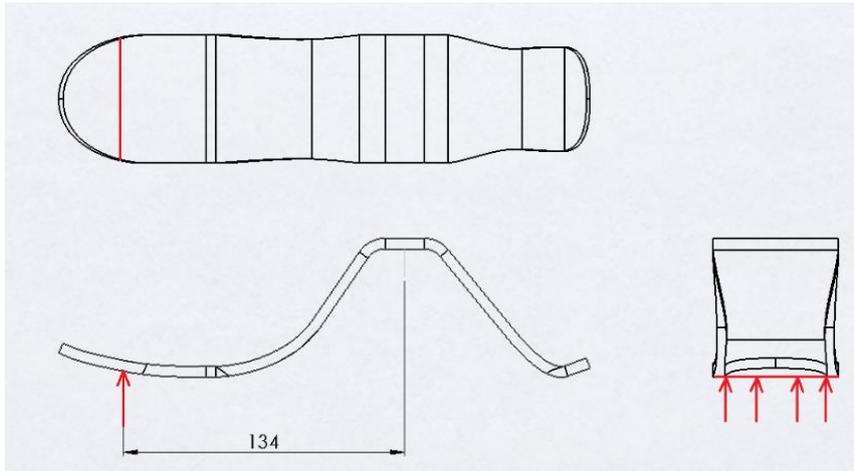


Figura 8.2 Carico flessionale applicato in punta

- Carico sulla punta puntuale applicato a destra: sollecitazione a flessotorsione

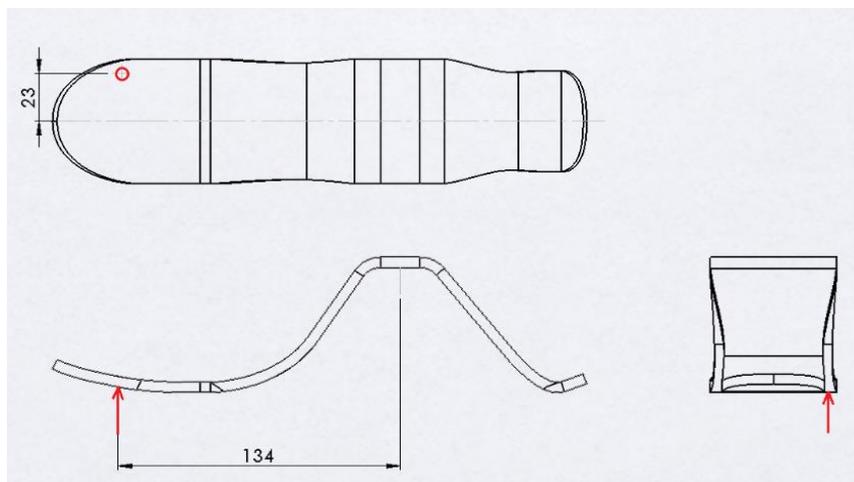


Figura 8.3 Carico di flessotorsione applicato in punta

- Carico sulla punta puntuale applicato a sinistra: sollecitazione a flessotorsione

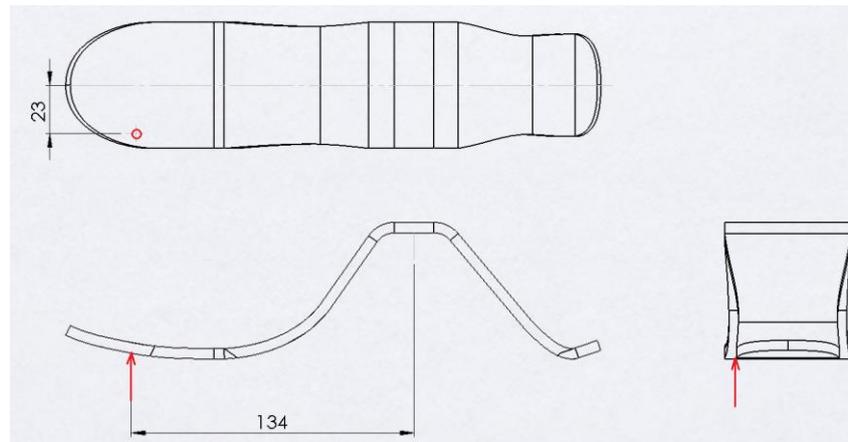


Figura 8.4 Carico di flessotorsione applicato in punta

- Carico sul tacco applicato lungo una linea: sollecitazione a flessione

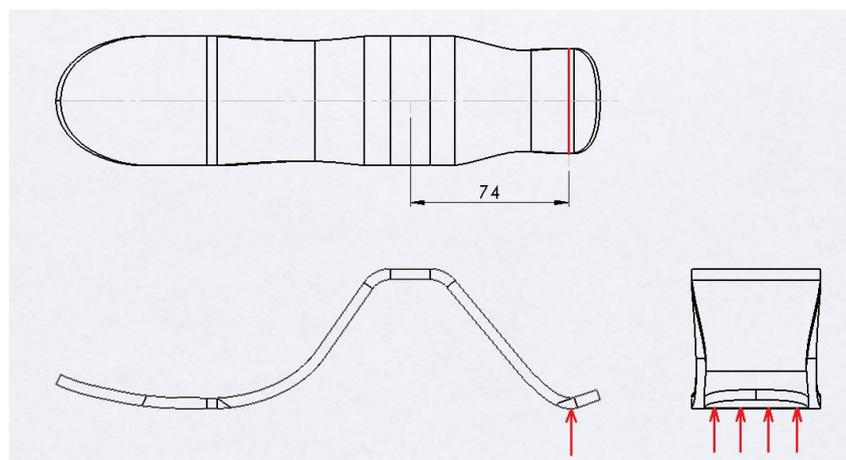


Figura 8.5 Carico di flessionale applicato sul tacco

- Carico sul tacco a destra applicato su un punto: sollecitazione a flessotorsione

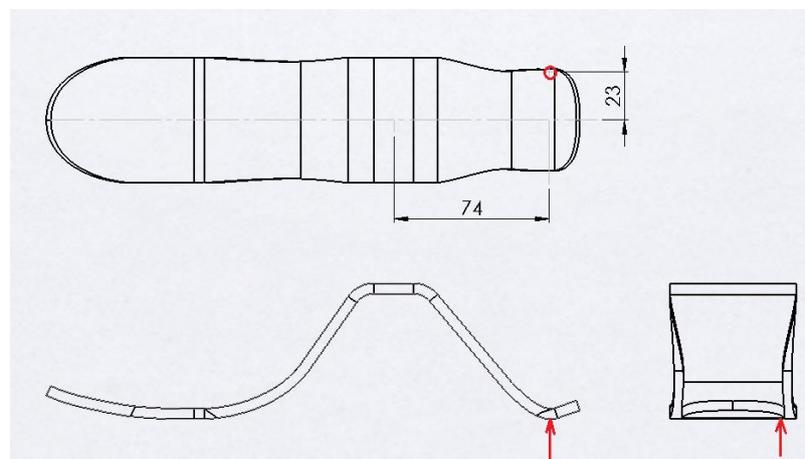


Figura 8.6 Carico di flessotorsione applicato sul tacco

- Carico sul tacco a sinistra applicato su un punto: sollecitazione a flessotorsione

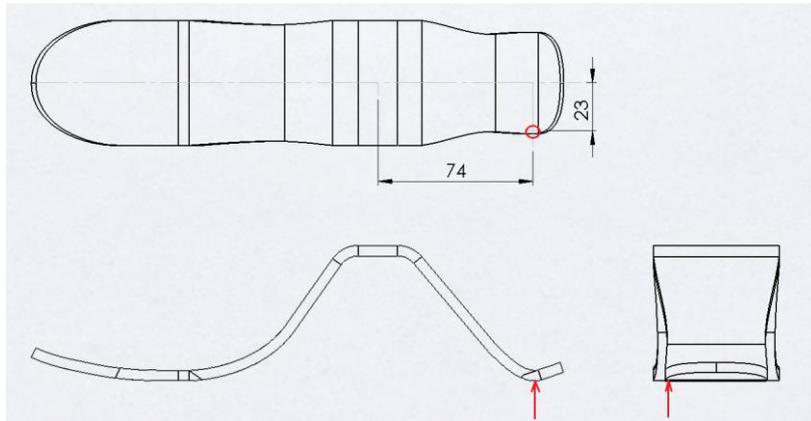


Figura 8.7 Carico di flessotorsione applicato sul tacco

Di seguito saranno descritti nel dettaglio i parametri utilizzati nelle prove. Si ricorda che esse sono state eseguite su entrambi i modelli di protesi, sia quindi sul modello a fibre lunghe che sul modello a fibre corte. Per rendere confrontabili i risultati, le prove sono state eseguite nelle analoghe condizioni.

Le prove realizzate sono di due tipi. Le prime a bassi carichi che hanno lo scopo di determinare la rigidità della protesi. La seconda rappresenta la prova di rottura eseguita sulla punta di entrambe le protesi.

Le prove per la rigidità sono state realizzate con controllo sullo spostamento. Per la determinazione dello spostamento massimo limite da impostare, all'inizio di ogni prova si è testata alla pressa (manualmente) quale spostamento fosse generato da una forza applicata di 200N. Tale valore di spostamento viene impostato su ogni prova come spostamento massimo. Ciò viene fatto per realizzare prove di rigidità a livelli di carico lontani dal carico (ignoto) di rottura.

Inoltre tutte le prove sono state effettuate tre volte, per verificare la ripetibilità della prova.

Di seguito sono riportate le impostazioni utilizzate durante le prove per il calcolo della rigidità.

Flessione in punta

Il carico è applicato lungo una linea. Ciò è ottenuto predisponendo sul piano di riferimento un cilindro tagliato, come è possibile vedere in figura 8.8.



Figura 8.8 Prova Flessione in punta

Spostamento massimo: 7mm

Velocità: 0.05mm/s

Flessotorsione in punta

In questo caso la forza è stata applicata bloccando sul piano un cilindro cavo, che portava in sede una sfera (vedi figura 8.9). Ciò ha permesso di simulare un carico applicato puntualmente.



Figura 8.9 Prova di flessotorsione sulla punta

Spostamento massimo: 8mm

Velocità: 0.05mm/s

Flessione sul tacco

In questo caso il carico è applicato lungo una linea. Si è utilizzato quindi un metodo analogo al caso di flessione sulla punta, con la trasmissione della forza che avviene mediante un cilindro tagliato. (vedi figura 8.10)



Figura 8.10 Prova di flessione sul tacco

Spostamento massimo: 2mm

Velocità: 0.05 mm/s

Flessotorsione sul tacco

In questo caso il carico è applicato puntualmente. Quindi come nel caso della punta, si è utilizzato il metodo di trasmissione del carico attraverso una sfera appoggiata su sede cilindrica (Fig 8.11)



Figura 8.11 Prova di flessotorsione sul tacco

Spostamento massimo: 2mm

Velocità: 0.05mm/s

Prove di resistenza a rottura:

La prova di resistenza a rottura è stata impostata analogamente alla prova di flessione in punta, con la differenza che non si imposta il limite di spostamento. Per velocizzare la prova è stata impostata una velocità di 0.1mm/s. La pressa andrà quindi ad aumentare lo spostamento imposto, fino a che la protesi non giungerà a rottura. A questo punto è sufficiente leggere i valori ottenuti di spostamento ultimo e carico ultimo.

Tale prova è stata realizzata su entrambe le tipologie di protesi.

8.2 Risultati

Come output, la prove restituiscono una nuvola di punti nel piano Spostamento-Carico. Dato il rumore presente sulle misure effettuate dalla cella di carico della pressa, essi sono affetti da una certa dispersione. Tuttavia per tutte le prove di rigidità si è potuto osservare un andamento chiaramente lineare della forza in funzione dello spostamento. La figura 8.12 riporta il caso di flessione in punta del modello a fibre lunghe, mostrato come esempio. Per questa ragione, per ogni prova si sono interpolati i risultati per ottenere l'equazione della retta che meglio interpola tale nuvola di punti. Per fare ciò è stato utilizzato Matlab, e la funzione utilizzata è l'interpolazione lineare, la quale fornisce anche il valore del coefficiente della retta, che nel caso in questione rappresenta anche la rigidità. (fig. 8.12)

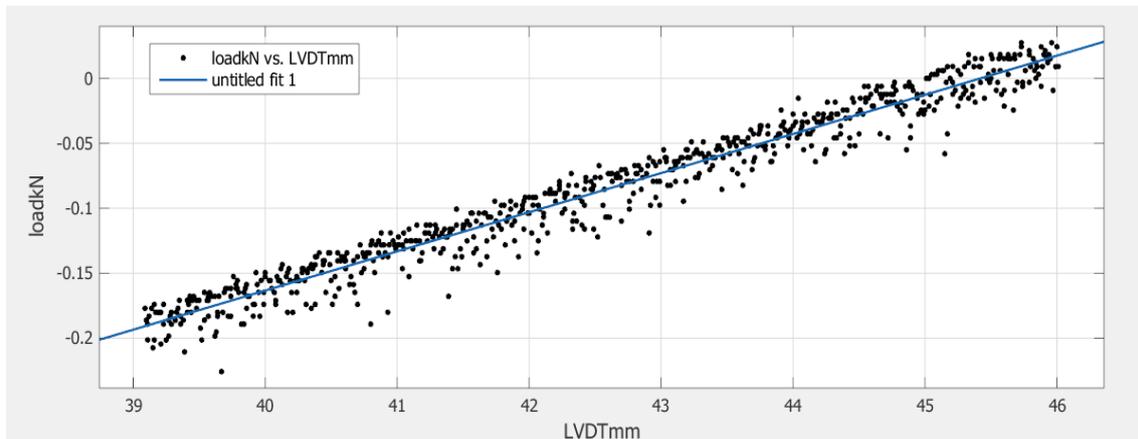


Figura 8.12 Esempio di dati in output interpolati con una retta

È inoltre necessario verificare la ripetibilità della prova. Per fare ciò, tutte le prove sono state effettuate tre volte. Bisogna quindi controllare che la retta ottenuta tramite interpolazione delle tre prove sia la stessa.

Di seguito è riportato il caso di flessione in punta.

I tre valori di coefficienti angolari della retta ottenuti dalle tre prove sono:

$$k_1 = 0.03015 \text{ KN/mm}$$

$$k_2 = 0.0307 \text{ KN/mm}$$

$$k_3 = 0.03115 \text{ KN/mm}$$

Si può quindi affermare che la prova abbia una buona ripetibilità.

Lo stesso risultato è valido anche per tutte le altre prove svolte, quindi i valori che indicherò come coefficienti angolari, si intenderanno come le medie ottenute dalle tre ripetizioni.

Tipo di prova	Rigidezza [KN/mm] Protesi fibre lunghe	Rigidezza [KN/mm] Protesi fibre corte
Flessione punta	0.0307	0.0293
Flessotorsione punta Dx	0.0263	0.0267
Flessotorsione punta Sx	0.0256	0.0272
Flessione tacco	0.1441	0.1417
Flessotorsione tacco Dx	0.0988	0.1242
Flessotorsione tacco Sx	0.1007	0.1146

Di seguito sono presentati i confronti dei valori delle rigidezze (coefficienti angolari delle rette) tra i due modelli di piede nelle varie prove effettuate. Si ricorda che nei due casi le prove sono state effettuate nelle stesse condizioni di carico, con una forza di 200N al valore di spostamento massimo.

Dal confronto presentato in tabella si nota che le due rigidezze sono comparabili. Le prove di flessotorsione non evidenziano grandi differenze tra il caso di forza applicato a destra e quello di forza applicato a sinistra. Ciò significa che la stratificazione dei layer è stata sufficientemente omogenea anche nel caso di modello a fibre corte.

Prove a rottura

Di seguito sono presentati i grafici Spostamento-Carico ottenute dalle prove a rottura delle due protesi. Da notare i segni negativi di carico, causati dallo spostamento verso l'alto dello stelo della pressa. Inoltre lo spostamento parte da valori positivi, e con il progredire della prova diminuiscono di valore.

Si ricorda inoltre che la prova è stata fermata al primo segno di cedimento della protesi in prova.

Modello a fibre lunghe:

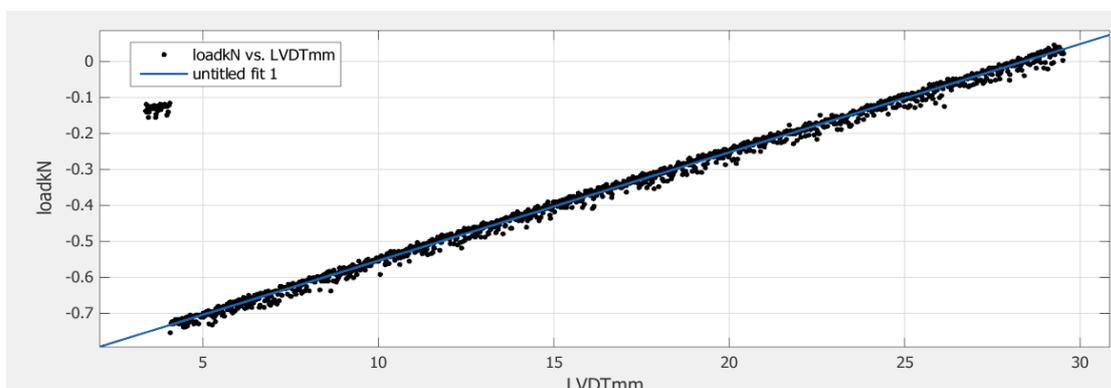


Figura 8.13 Prova di rottura del modello a fibre lunghe

Carico di rottura registrato: 720N

Spostamento a rottura: 25mm

Modello a fibre corte:

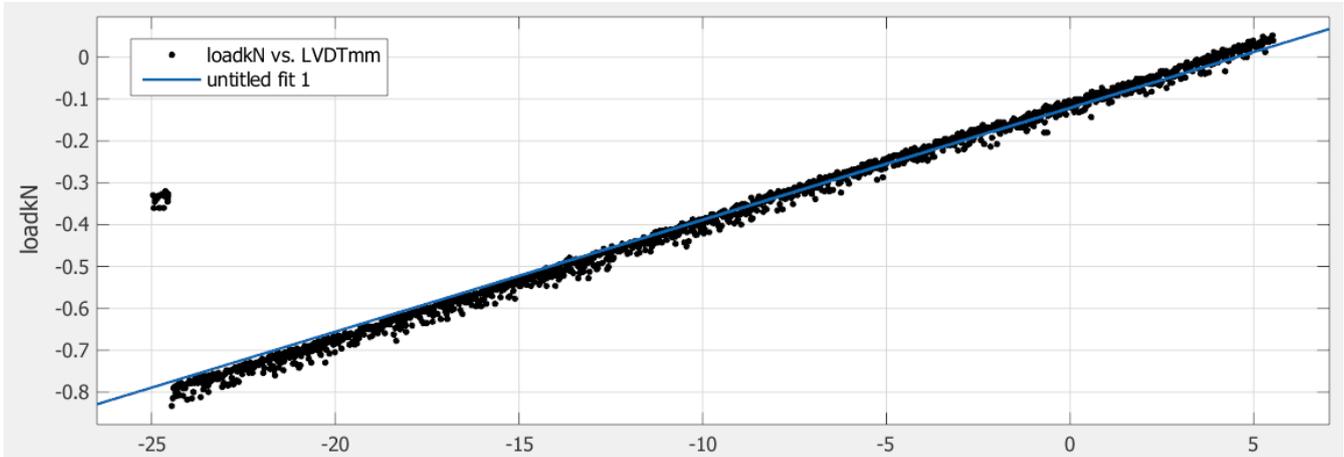


Figura 8.14 Prova di rottura del modello a fibre lunghe

Carico di rottura registrato: 800N

Spostamento a rottura: 30mm

Dalle prove effettuate si possono ricavare una serie di interessanti conclusioni.

Il primo dato che emerge è che non vi sono apprezzabili differenze tra la protesi ottenuta con fibre lunghe e quella ottenuta con fibre corte. Ciò significa che è possibile pensare ad un ciclo di fabbricazione che utilizza anche ritagli di piccole dimensioni, in quanto non sono state misurate differenze apprezzabili in termini di rigidità e resistenza meccanica. I valori ottenuti come resistenza a rottura sono inferiori ai dati previsti, raggiungendo valori di circa 800N, non sufficientemente elevati per rientrare nei limiti imposti dalle normative.

Un altro importante risultato ottenuto dalle prove riguarda la rigidità della protesi ottenute. Da quelle che erano le conoscenze iniziali, ci si aspettava un comportamento estremamente rigido, ma al contrario i risultati hanno mostrato un comportamento particolarmente cedevole della punta. Avendo ottenuto risultati differenti da quello che era stato l'output delle analisi fem, sarà necessario andare a ridefinire i parametri impostati, per aumentare l'affidabilità delle simulazioni. È necessario inoltre evidenziare che è stata effettuata una analisi lineare, applicabile solo in caso di piccole deformazioni, quando sono state misurati spostamenti dell'ordine delle decine di millimetri. Sarebbe quindi preferibile applicare una analisi non lineare.

9. Conclusioni

Lo scopo dell'elaborato era lo studio di fattibilità di una protesi di piede ottenuta dal riutilizzo di materiale proveniente da sfridi di altre lavorazioni principali, e cercare quindi di comprendere se è possibile ottenere risultati promettenti in termini di resistenza meccanica della protesi. L'obiettivo costante durante la progettazione è stato quindi il basso costo del prodotto finale. Ciò ha portato a particolari scelte progettuali del ciclo di produzione. Per esempio si è deciso di realizzare uno stampo che fornisse pressione per via meccanica attraverso l'utilizzo di viti di serraggio. Ciò svincola dall'utilizzo di un'autoclave in fase di cottura, che risulterebbe una attrezzatura costosa in relazione con quelli che sono i nostri scopi di costi di produzione limitati. Durante l'attività è stata ricercata la forma ottimale che andasse a conferire alla protesi le caratteristiche di resistenza ed elasticità richieste, paragonando i risultati derivanti dal cambiamento della forma attraverso analisi fem. Determinata la forma del piede si è individuata la stratificazione migliore che soddisfasse le normative, anche questo con l'ausilio di analisi ad elementi finiti. Da esse è risultato che lo spessore minimo dovesse essere di 5mm. È stata poi svolta l'attività di progettazione e realizzazione dello stampo. Esso è stato prodotto con una fresatrice CNC. Un'attenzione particolare è stata posta sulla qualità superficiale delle superfici a contatto con la fibra, le quali quindi sono state rifinite a mano. Conclusa la realizzazione degli stampi è stata svolta la prototipazione dei primi due modelli di protesi, uno a fibre corte e uno a fibre lunghe. In particolare il modello a fibre corte risulta particolarmente interessante, in quanto può essere realizzato con ritagli di minori dimensioni. La fase di realizzazione delle protesi ha portato a buoni risultati. I prototipi ottenuti presentavano una buona coesione degli strati e una buona qualità superficiale. Sono state infine realizzate le prove alla pressa dei due modelli al fine di calcolare la rigidità e la resistenza a rottura, e poter fare un confronto di queste due caratteristiche tra i due modelli. È risultato che essi non presentano rilevanti differenze in termini di rigidità e resistenza a rottura, quindi è pensabile realizzare tali protesi anche con fibre corte, rendendo possibile l'utilizzo di un grande numero di scarti, potendo includere anche quelli di piccole dimensioni. Le prove hanno però registrato bassi valori di resistenza delle protesi. Lavori futuri dovranno essere quindi focalizzati sulla ricerca di uno spessore maggiore a quello realizzato in questi primi prototipi, per ricercare quello

che conceda una resistenza sufficiente a superare i test imposti da normative. Sarà inoltre necessario svolgere un maggior numero di prove sui due modelli di protesi, per aumentare l'affidabilità statistica, e poter confermare con maggior sicurezza che protesi ottenute con fibre lunghe e protesi ottenute con fibre corte posseggono rigidezze e resistenza meccanica simili.

10. Bibliografia

- [1] G. Caligiana, F. Cesari, I materiali compositi. Pitagora, Bologna, 2002

- [2] C. Badini, Materiali compositi per l'ingegneria. Celid, Torino, 2003

- [3] M. Marchetti, D. Cutolo, Tecnologie dei materiali compositi. Masson. Milano, 2001

- [4] Gay Daniel, Hoa Suong V., Composite Materials - Design And Applications, Taylor & Francis, Portland (OR), 2007

- [5] UNI EN ISO 22675 - Prove dei dispositivi d'articolazione caviglia-piede e unità piede. Requisiti e metodi di prova, 2007

- [6] UNI EN ISO 10328 - Prove strutturali delle protesi degli arti inferiori. Requisiti e metodi di prova, 2007

- [7] ISO 8549-1 - Protesi e ortesi - Vocabolario, 1989

- [8] UNI EN ISO 22523 - Protesi d'arto esterne e ortesi esterne. Requisiti e metodi di prova, 2007

- [9] <http://www.ottobock.it>

- [10] <http://www.ossur.com>

- [11] <http://www.roadrunnerfoot.com>

- [12] <http://www.reglass.it>

- [13] <http://www.angeloni.com>

[14] http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp

[15] Tomei. F., “Studio di fattibilità di una protesi di piede a basso costo realizzata in fibra di carbonio”, Tesi di Laurea Magistrale, Seconda Facoltà di Ingegneria - Università di Bologna – 2010

[16] Farina J.V., “Progetto concettuale di un piede protesico a basso costo ed elevate prestazioni” Tesi di Laurea Magistrale, Facoltà di Ingegneria - Università di Bologna – 2013

11. Ringraziameti

Vorrei ringraziare prima di tutti il Prof. Ing. Marco Troncosi, per avermi assegnato un argomento di laurea che è stato per me di grande interesse, e per avermi seguito nel lungo percorso che ci ha portato a realizzare il primo prototipo di protesi.

Un ringraziamento sincero al Prof. Ing. Alessandro Ceruti, per avermi insegnato e fornito preziosi consigli nella fase di progettazione.

Ringrazio inoltre Paolo Proli, per avermi dato un enorme aiuto nella fase di realizzazione pratica, e grazie al quale, nonostante gli imprevisti incontrati nei giorni passati in hangar, siamo riusciti ad ottenere il risultato voluto.

Ringrazio tutti coloro che sono stati al mio fianco in questi anni di studi, compagni di corso e amici, molti dei quali, volenti o nolenti, sono stati coinvolti in lunghe discussioni riguardanti questo progetto.

Un ringraziamento speciale va infine ai miei genitori. Per avermi sempre sostenuto in tutte le mie attività, per essere stati al mio fianco e per avermi consigliato e formato.