

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

- Sede di Forlì -

**CORSO DI LAUREA  
IN INGEGNERIA MECCANICA**

Classe LM-33

TESI DI LAUREA

in

Meccanica dei Robot LM

**PROGETTO CONCETTUALE DI UN PIEDE  
PROTESICO A BASSO COSTO ED ELEVATE  
PRESTAZIONI**

CANDIDATO:

Jose Vicente Farina

RELATORE:

Ing. Marco Troncosi

CORRELATORE:

Ing. Alessandro Ceruti

Anno Accademico 2012/13

Sessione II



# Sommario

Nel seguente elaborato verrà presentato il lavoro volto alla progettazione di una protesi di piede realizzata con materiale composito in fibra di carbonio riciclato. Per il suo conseguimento sono state prese in considerazione due scelte progettuali che permetteranno una futura realizzazione semplice ed economica.

Una volta determinate le scelte progettuali, si sono generati dei semplici modelli di primo approccio, per i quali sono stati previsti modellazione CAD e simulazioni di opportuni modelli agli elementi finiti. Su quest'ultimi sono stati applicati i carichi e i vincoli secondo la norma UNI ISO 22675 e sono state eseguite diverse simulazioni al variare di alcuni parametri geometrici e del numero e orientamenti degli strati componenti le lamine.

Dalle simulazioni sono stati ricavati i valori di tensione, ai quali è stato applicato il criterio di resistenza strutturale per i materiali compositi di Tsai – Hill. Dal confronto di tutti i risultati, si sono determinati i parametri di progetto ottimali per ognuna delle due varianti progettuali proposte.

Sulla base dei risultati ottenuti sono stati realizzati nuovi modelli CAD più dettagliati, per i quali è stata condotta l'analisi FEM e la verifica del criterio strutturale come per i modelli di primo approccio. I modelli così definiti possono essere la base di partenza per la definizione del progetto costruttivo del prototipo di una o entrambe le varianti progettuali.



# Indice

Indice	5
Introduzione	7
Capitolo 1	19
Materiale e metodi	19
1.1 Generalità	19
1.2 Scelte del progetto	19
1.3 Criterio di resistenza per i materiali compositi	20
1.4 Definizione del materiale	21
1.5 Carichi e vincoli	23
1.6 Modello FEM	25
1.7 Definizione della geometria in analisi	26
1.8 Mesh	27
1.9 Inserzione delle caratteristiche del materiale nel FEM	28
Capitolo 2	30
Modelli di primo approccio	30
2.1 Generalità	30
2.2 Modelli studiati	31
Capitolo 3	37
Analisi e risultati	37
3.1 Generalità	37

3.2 Modello Monopezzo di primo approccio	38
3.3 Modello Scatolato di primo approccio	44
3.4 Modelli finali	47
3.4.1 Modello Monopezzo	48
3.4.1 Modello Scatolato	50
3.4.3 Modelli CAD	52
Conclusioni	57
Ringraziamenti	59
Bibliografia	61

## Introduzione

Nel mondo, le persone disabili si contano a milioni, il “World Health Organization”<sup>[1]</sup> stima che siano circa 650 milioni, cioè approssimativamente il 10% della popolazione mondiale. Quasi 80% di queste persone vivono in paesi in via di sviluppo o sottosviluppati, molte di queste hanno come causa del loro disagio la perdita di un arto. Questa può essere ricondotta a una serie di cause, tra le più frequenti troviamo le malattie (congenite e non), incidenti stradali, incidenti sul lavoro e cause legate a coinvolgimenti nei conflitti armati. La perdita di un arto causa senza ombra di dubbio una situazione di menomazione e disagio per il soggetto, ché; per continuare a svolgere una vita il più normale possibile, necessita di adoperare protesi, quando ciò è possibile. Nei paesi occidentali o appartenenti al cosiddetto “primo mondo”, il reperimento di arti sostitutivi è molto più agevole rispetto ad altri paesi meno fortunati. Questo è dovuto ai sistemi sanitari e istituti ortopedici a disposizione, che studiando il problema, riescono a soddisfare in parte la richiesta del paziente progettando una protesi che in molti casi riesce ad assolvere a gran parte delle azioni richieste.

Le protesi sostitutive di estremità corporee come braccia, mani, gambe e piedi, ricoprono un’altissima percentuale delle protesi prodotte. Queste hanno l’arduo compito non solo di rendere la vita del paziente più accettabile in termini di impatto psicologico e sociale, ma sono responsabili di una serie di compiti quotidiani a cui difficilmente si può rinunciare. Azioni come camminare, piuttosto che allacciarsi le scarpe, o il semplice gesto di saluto, sono parti fondamentale della vita quotidiana del paziente.

## Introduzione

Nella nostra società, come in quelle degli altri paesi sviluppati, lo sviluppo delle protesi e la loro manutenzione sono nella maggioranza dei casi operati da tecnici specializzati, che seguono passo dopo passo lo sviluppo del paziente, aiutandolo ad accettare la sua condizione e insegnandogli ad adoperare la protesi. I tecnici in questo caso possono contare sulle risorse tecniche ed economiche delle strutture sanitarie necessarie per rendere possibile tutto ciò. Al contrario di molti paesi in via di sviluppo o sottosviluppati, non dispongono delle strutture sanitarie adatte o delle risorse economiche per permettere una adeguata assistenza. Per ovviare a ciò, si ricorre alle cosiddette protesi a basso costo. Queste dovrebbero garantire un buon compromesso tra il costo della protesi e la qualità di quest'ultima in termini di confort e durabilità.

L'idea della realizzazione di protesi a basso costo presenta notevoli vantaggi a favore delle popolazioni economicamente disagiate, risolvendo l'impossibilità di acquisto di una protesi da parte delle stesse, ma presenta spiacevolmente un intrinseco controsenso: nella maggior parte dei casi ciascuna protesi verrà utilizzata in ambienti ostili, sarà soggetta ad elevata usura e ad intense sollecitazioni, quindi dovrà garantire buone prestazioni in termini di funzionalità, durata, flessibilità e resistenza; questi fattori, però, comportano oneri di progettazione e richiedono materiali più resistenti, portando ad un inevitabile innalzamento del costo della protesi. In definitiva sono necessarie buone caratteristiche tecnologiche, anche in termini di semplicità di manutenzione e riparazione, per permettere l'acquisto di protesi da parte di persone che vivono nei paesi in via di sviluppo. Tenere in considerazione il fattore costo insieme a tutte le altre caratteristiche tecniche non è semplice, ma si cerca di trovare un compromesso tra tutte le voci, senza dimenticare gli oneri di spesa per l'acquirente.

Se riduciamo il campo e andiamo nello specifico, cioè sulle protesi di arti inferiori, un arto sostitutivo che viene adoperato da un cittadino appartenente a un paese sviluppato, difficilmente verrà sottoposto ai carichi e alle intemperie a cui sono soggette le protesi adoperate in un paese in via di sviluppo: le stime



considerano per i paesi in via di sviluppo un uso quotidiano limite di 11 ore (+/- 3) per le protesi trans-tibiali, di 8,2 ore(+/-3) per le trans-femorali <sup>[2]</sup>, valori superiori a quelli riscontrati nei paesi sviluppati. Inoltre nei paesi in via di sviluppo, soprattutto nei paesi reduci da conflitti armati, spesso sono le persone con meno possibilità economiche ad avere maggior bisogno di un arto sostitutivo, siano essi un contadino superstite di una mina antiuomo, oppure un operaio di fonderia scampato ad un malaugurato incidente sul posto di lavoro.

Stabilire dei criteri di progetto è un primo passo alla risoluzione di tanti problemi riscontrati nella fase progettuale della protesi. A questo proposito nel convegno dell'ISPO "International Society for Prosthetics and Orthotics" dell'anno 2005 <sup>[2]</sup> sono stati presentati una serie di linee guida:

1. Basso costo della protesi;
2. Disponibilità dei materiali in loco;
3. Possibilità di fabbricazione manuale;
4. Considerazione sulle intemperie climatiche dove gli utenti svolgono i loro lavori(ad esempio coltivazione di campi di riso).
5. Durata;
6. Facilità di riparazione;
7. Utilizzo delle capacità locali per le realizzazioni;
8. Funzionalità;
9. Biomeccanica appropriata;
10. Resistenza a carichi dovuti a pesi che non appartengono al corpo del soggetto;
11. Impatto psicologico accettabile.

Inoltre in quell'occasione sono stati studiati 5 tipologie di protesi, valutate successivamente secondo i criteri già citati, riscontrando interessanti risultati e fornendo un metro di paragone alla progettazione dei seguenti elementi:

- ICRC CR-Sach foot
- HI Camboia (Sach type) foot
- VI multi-axial foot
- VI solid ankle (Sach type) foot.
- Jaipur.

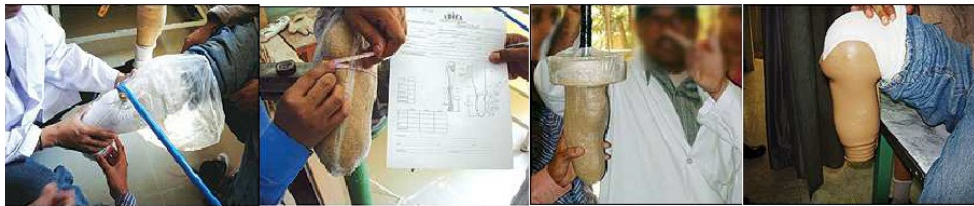
I tipi HI e VI avevano un'invasatura in gomma, sostenuta da cinghie che si deterioravano rapidamente, perciò si è passati ad adottare il poliuretano elastico compatto, utilizzabile anche come vernice o come adesivo. Questo materiale è stato impiegato anche nella produzione dell'elemento gambo delle protesi ICRC.

In India, luogo in cui sono stati condotti gli studi, la protesi presentava problemi legati alla durata, in quanto è usanza del luogo camminare a piedi nudi o con i sandali, esponendo la protesi ad un'usura elevata. A questo si aggiungono problemi di attrito (basti pensare ai luoghi in cui sono presenti pavimenti con scarsa aderenza, come ad esempio i bagni). In questa sperimentazione sono state studiate le protesi con piccoli trial di una durata dai 3 ai 9 mesi, ed altri dai 12 ai 18 mesi, a differenza dei Jaipur e HI dove i trial sono stati sviluppati su test di durata dai 2 ai 5 anni.

Si è osservato anche che, solo Jaipur – rubber e VI- feet superavano il test di durata, perché la percentuale delle protesi che hanno superato la soglia era del 53% per i 36 mesi, riscontrando anche una buona percentuale di protesi superstiti ai 12 mesi, cioè un 82%.

Altri studi accademici si sono concentrati sulla definizione dei problemi iniziali legati alla progettazione <sup>[3]</sup>, riscontrando un fattore comune; il personale medico che deve far fronte all'emergenza sia nel campo medico che su quello biomeccanico spesso non ha né la conoscenza né la tecnologia adatta. Inoltre i tempi di attesa per ricevere una protesi adatta e/o per cambiarla in caso di bisogno erano lunghissimi. A questo proposito diversi studiosi si sono concentrati sulla ricerca di nuovi approcci per la progettazione in tempi brevi. Jonathan Naber <sup>[4]</sup> ricercatore del “Illinois Prosthetic Technologies” e il professore Wu Yeongchi <sup>[5]</sup>

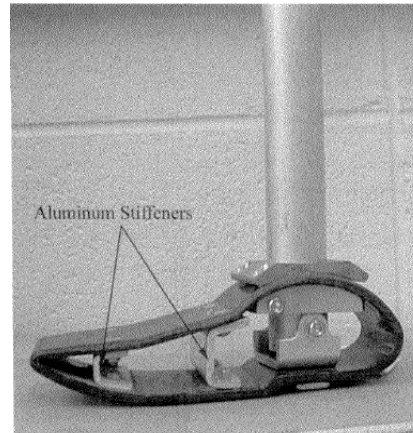
avevano individuato questo problema e si sono concentrati su una progettazione e realizzazione rapida della protesi, in particolare sulla parte più delicata da progettare, l'invasatura o "socket". Questa parte della protesi è la meno standardizzata a causa della sua finalità; infatti non tutti i monconi sono uguali e l'utilizzo di una protesi con un'invasatura non adatta può causare il deterioramento e la morte dei muscoli rimasti che compongono il moncone, oltre a causare forti dolori al soggetto che infine rinuncia all'utilizzo della protesi. Per ovviare a ciò i due accademici (in sede distaccate e in tempi diversi) sono riusciti a pianificare metodologie per snellire i tempi di realizzazione, uno di loro seguendo precise linee guida, come risultato più significativo, è riuscito nella realizzazione di una invasatura in solo 90 min; ciò si traduce in una protesi consegnata lo stesso giorno della visita del paziente. (fig. I.1)



**Figura I.1** Processo di realizzazione di un socket da parte dal Professore Wu Yeongchi

Ciò nonostante, i problemi e le difficoltà che si incontrano nella realizzazione di protesi a basso costo sono ancora moltissimi. Tra questi troviamo il problema del reperimento dei materiali per la fabbricazione in loco, che nel caso di paesi sufficientemente industrializzati non sussiste, ma ci sono realtà in cui ad esempio il reperimento della calce per la realizzazione del negativo del moncone non è sempre facile. Un altro problema, già nominato, è quello relativo alla durata delle protesi che, in ambienti così ostili, non riescono ad arrivare al tempo di vita minimo sperato, che secondo le linee guida dei congressi del ISPO è di 36 mesi . Per migliorare la durata e fornire una protesi prestante e confortevole, diversi accademici si sono indirizzati all'impiego di materiali compositi per la realizzazione, così come fecero, ad esempio, Jill Hahl et al. <sup>[6]</sup>. Questi studiosi realizzarono lo scheletro della protesi un materiale composito in fibra di vetro

tramite la tecnica di fabbricazione per pultrusione, disponendo come collegamento tra l'invasatura e lo scheletro un tubo di alluminio fissato con viti e piastre(fig I.2). In questo progetto i ricercatori hanno cercato di trovare un compromesso tra una buona durata della protesi e un metodo di realizzazione che permetta la produzione in massa, abbattendo i costi di produzione.



**Figura I.2** Protesi di Jill Hahl et al.

Un altro aspetto importante di cui tenere conto oltre alla durata e alla biomeccanica adatta, è il costo di produzione. Nella progettazione di protesi low cost, il costo è un fattore preponderante, ragione per cui la maggior parte di queste protesi è del tipo monolimb. Le monolimb sono protesi transtibiali a pezzo unico (*monolimb* = protesi trans-tibiale dove invaso e stinco sono stampati su un unico pezzo di materiale termoplastico) che possono essere fabbricate sul posto con un equipaggiamento minimo. Queste sono realizzate con plastica o legno e presentano un costo inferiore rispetto ad una protesi poco più complessa, ma tutto ciò va a discapito della biomeccanica dell'arto e, in certi casi, anche della durata. Le protesi monolimb più utilizzate sono del tipo:

- Monolimb Sach foot.
- Jaipur.

Il Sach foot <sup>[7]</sup> è uno dei piedi standard (fig.I 3) , e presenta come caratteristiche principali la economicità (infatti è costruita in legno o con materiali plastici,

certamente meno costosi del titanio o della fibra di carbonio). I Sach foot sono contraddistinti da limitata funzionalità e generalmente vengono adoperate da pazienti con un'attività fisica medio-bassa, poiché hanno buone caratteristiche nella fase statica, ovvero danno sensazioni di stabilità e sicurezza. I piedi SACH vantano una lunga tradizione e sono stati molto utilizzati negli ultimi decenni, in particolare per gli utenti meno attivi, che presentano un particolare bisogno di sicurezza e affidabilità. Il contatto del tallone col suolo durante la deambulazione è confortevole. Questi tipi di piede sono ideati per l'utilizzo in protesi esoscheletriche di arto inferiore e particolarmente indicati per utenti geriatrici.



**Figura I.3 Piede SACH**

Il piede Jaipur <sup>[8]</sup> (fig. I.4) è stato sviluppato dal professor PK Sethi per i mutilati che non adoperano scarpa. Egli ha usato gli artigiani locali e materiali facilmente reperibili per la sua realizzazione. La protesi è a buon mercato e potrebbe essere fatta in un'ora. Essa ha permesso ai mutilati di lavorare in ambienti rurali, fangosi e in campi bagnati. Il piede è stato ampiamente utilizzato in India, Sud-Est asiatico e in Africa, dove ora sono state fatte variazioni locali al design.



**Figura I.4** Piede Jaipur e sezione

Tuttavia nonostante la riuscita progettazione di questi piedi classici a basso costo, il design continua ad evolversi. Diversi gruppi di lavoro come quello di Winson C.C. Lee<sup>[9]</sup> lavorano sui progetti già esistenti, cercando di migliorare le parti o il design della protesi. Questo gruppo di ricercatori aveva come obiettivo principale migliorare la risposta elastica sotto carichi dinamici della protesi, per beneficiare l'utente portatore della protesi nella fase del cammino. È risaputo che il modello monolimb più usato è quello SACH, e che questo non ha una confortevole risposta dinamica, cioè sotto carichi dinamici questo tipo di monolimb offre scarse prestazioni in termini di confort. In questo studio i ricercatori sopra citati hanno dimostrato che una risposta flessibile alle sollecitazioni dinamiche migliorerebbe di molto il confort della protesi. Essi hanno analizzato 3 tipi di protesi monolimb SACH, la cui unica differenza tra queste era la parte di connessione tra il piede e l'invasatura, cioè il gambo. Una presentava un gambo a sezione ellittica, un'altra contava con un gambo a sezione circolare cedevole e l'ultima un gambo circolare rigido. Molti studi coincidono sul fatto che un *gambo* flessibile, quindi deformabile, porta un guadagno in termini di

efficienza nel ciclo dell'andatura, oltre che nel confort offerto al paziente; questo studio ha provato che una forma ellittica del gambo comporta i suddetti benefici.

Altri gruppi hanno concentrato il loro lavoro sulla possibilità di adottare materiali diversi rispetto alle solite plastiche o legni, sfruttando più a fondo le risorse presenti nel territorio. Questo è il caso dello studioso Muller e la sua esperienza nello Sri Lanka<sup>[10]</sup>, dove l'obiettivo principale del suo studio era il rendere la protesi resistente all'acqua utilizzando gomma vulcanizzata dura. In particolare, ha pensato che poteva essere usata la gomma naturale derivante dalla pianta "Hevea brasiliensis", meglio conosciuta come la pianta del "caucciù". Questa pianta è molto presente nell'Asia e nell'Amazzonia, cioè nelle foreste tropicali, da cui proviene il 90% della gomma naturale ed è nota per essere malleabile e facile da vulcanizzare.

Nella progettazione, sono stati presi in considerazione le linee guida consigliate dall'ente ISPO. Fattori come il basso costo e la durata della protesi sono stati aspetti predominanti tra le scelte tecniche, anche se non sono stati gli unici. Una biomeccanica appropriata è fattore di grande importanza, perché la protesi deve poter comportarsi in maniera idonea in ogni fase del ciclo di cammino, garantendo nella prima fase l'assorbimento dell'energia causata dall'urto, creatosi nel contatto tra la parte posteriore ed il suolo, e restituendo energia tramite la parte anteriore (avampiede) nella fase finale di slancio. In questo modo si aiuta l'utente ad avere un ciclo di cammino più continuo, con un minore dispendio in termini di energia da parte sua.

Un aspetto importante è l'impatto psicologico che si trova ad affrontare il paziente nell'adoperare una protesi. Il trauma subito da un individuo a seguito della perdita del piede è molto forte: la persona ha trascorso la sua vita abituato a vedere ed adoperare il suo arto originale, quindi dal momento della perdita dello stesso sarà obbligato per il resto della sua vita ad adoperare una protesi. Per aiutare la persona a condurre una vita più normale possibile, la protesi deve essere somigliante all'arto originale, agevolando l'accettazione della nuova situazione da parte dell'utente e permettendo un più rapido reinserimento nella società. Quindi, oltre

alla funzionalità, l'arto sostitutivo deve somigliare il più possibile all'arto originale, dando la possibilità di continuare a seguire i costumi del luogo in cui si vive, ad esempio l'uso di sandali in alcuni paesi asiatici piuttosto che il camminare a piedi nudi in India (fig.I.5).



**Figura I.5** Protesi alla quale è stato previsto l'uso di infradito

Le condizioni in cui viene adoperata la protesi sono un fattore da tenere sempre in considerazione. Questo genere di protesi sono destinate in gran parte al terzo mondo, dove di solito gli utenti a cui vengono destinate svolgono lavoro nei campi (fig. I.6). Terreni fangosi, scabri e umidi sono gli ambienti in cui la protesi svolgerà il suo compito; se si pensa ad uno sfortunato contadino a cui è stato amputato l'arto inferiore, questo, nello svolgere il suo lavoro, dovrà attraversare terreni difficili e magari dovrà anche caricare dei pesi che, generando una situazione di sollecitazione estrema per la protesi. Tuttavia, esistono altre possibili condizioni di lavoro: se si pensa ad un contadino che lavora nelle risaie, questo trascorre diverse ore al giorno in un terreno fangoso, con buona parte della protesi immersa in acqua. Queste evenienze devono essere prese in considerazione perché, come è noto, umidità, acqua e fango sono fattori che riducono considerevolmente la vita utile della protesi, provocando disagio all'utente, sia in termini di estetici, sia in termini di confort e utilità della protesi.





**Figura I.6 contadino che lavora in una risaia**

L'arto sostitutivo deve inoltre presentare un design semplice, in modo da permettere la fabbricazione manuale, con materiali possibilmente reperibili in loco; questo permetterebbe la realizzazione, la manutenzione e la riparazione di protesi da parte di personale meno esperto presente nel territorio.

A differenza degli studi sopraccitati, questo studio si concentrerà nella progettazione dello scheletro di una protesi di materiale composito riciclato. Tale scelta è alimentata dalla possibilità di ottenere un piede protesico con delle buone caratteristiche meccaniche ad un costo contenuto e che sia accessibile alle popolazioni delle zone del mondo con meno risorse economiche. Inoltre, questo progetto presenta un valore aggiunto in termini ecologici grazie all'utilizzo di un materiale che altrimenti dovrebbe essere smaltito. L'idea nasce da uno studio precedente <sup>[8][7]</sup> sul recupero di ritagli e scarti di materiale in fibra di carbonio, destinati allo smaltimento, da cui si denota che le lamine di carbonio ritratte mantengono caratteristiche meccaniche ancora buone.

Si presenteranno 2 modelli, per i quali sono stati definiti i parametri geometrici in coerenza con la UNI EN ISO 22675 ed adoperando scelte progettuali che verranno discusse in seguito. Ad ogni una di queste varianti sono stati associati modelli con diversi valori di alcuni parametri progettuali (ad esempio numero e disposizione degli strati). Tali modelli sono stati sottoposti ad analisi strutturale simulando i carichi come indicato nella norma appena citata.



# CAPITOLO 1

## Materiale e metodi

### 1.1 Generalità

Nel seguente capitolo verranno illustrate le metodologie utilizzate per l'analisi: in primo luogo si parlerà delle scelte progettuali, basi su cui si è condotta l'analisi, poi verrà introdotto il criterio di verifica strutturale per il composito utilizzato, cioè il criterio di Tsai – Hill. Verranno riportati i dati utilizzati per la caratterizzazione del materiale e l'applicazione dei carichi sul software usato per l'analisi, riferiti alla norma di pertinenza (UNI ISO 22675)<sup>[12]</sup>.

Si procederà presentando il modellatore FEM e nominati gli ambienti di nostro interesse al suo interno. Si illustreranno inoltre i procedimenti utilizzati per la creazione della mesh, per la definizione dei parametri geometrici e la definizione della struttura del materiale dentro il software.

### 1.2 Scelte del progetto

L'obiettivo principale del progetto, è la creazione di una protesi di piede a basso costo, ottenuta implementando materiale composito in fibra di carbonio. Per il raggiungimento di ciò, alla base del progetto si sono focalizzati concetti come la semplicità e facilità di fabbricazione. Si ritiene che una protesi a basso costo debba essere semplice in configurazione e metodologia di assemblaggio. Per una

buona riuscita della progettazione di una protesi a basso costo, il progettista deve seguire le seguenti specifiche: costo di produzione limitato, ridotto numero di attrezzature da adoperare, facilità di manutenzione e riparazione della protesi. Per soddisfare tali specifiche, si è pensato che la realizzazione della protesi e/o dei componenti debba essere ottenuta tramite un unico stampo.

I modelli studiati, che presenteremo in seguito, sono stati concepiti in modo da soddisfare tale requisito. Il modello “Monopezzo”, come suggerisce il nome, è una protesi costituita da un unico pezzo, ottenuto tramite un unico stampo sagomato in modo opportuno.

La realizzazione del modello “Scatolato”, il quale è composto da due parti sovrapposte, risulta invece più complessa. Le parti sono state concepite in modo da poter essere fabbricate con lo stesso stampo in momenti diversi e devono presentare le medesime dimensioni, ad eccezione della lunghezza ; tali caratteristiche geometriche permetteranno il successivo assemblaggio. Per fare la realizzazione delle due parti con un solo stampo, si è pensato di adoperare inserti all'interno dello stampo.

### **1.3 Criterio di resistenza per i materiali compositi**

Tra i criteri di verifica strutturale più diffusi per i materiali compositi troviamo il criterio di resistenza di Tsai-Hill. Questo criterio è utile per verificare la resistenza della lamina sottoposta a carichi. In questo progetto, tale criterio è stato adoperato dopo l'analisi FEM, utilizzando i risultati in termini di tensioni. Tenendo presente che in questo studio gli elementi sottoposti a verifica strutturale sono stati pensati come lamine, quindi elementi bidirezionali, la tensione  $\sigma_z$  risulta nulla e il criterio si presenta nella sua forma ridotta (Eq. 1):

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

**Equazione 1.1 Criterio di resistenza di Tsai - Hill ridotta**

dove  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  sono le tensioni che vengono ricavate dal modello, mentre  $\sigma_{1R}$ ,  $\sigma_{2R}$ ,  $\tau_{12}$  sono le tensioni ammissibili del materiale.  $\sigma_{1R}$  e  $\sigma_{2R}$  sono tensioni di trazione se  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  sono positive, di compressione se  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  sono negative.

Per l'applicazione del criterio si devono valutare gli stati tensionali nei tre punti della lamina in cui risulteranno massime  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  (zone che, generalmente, non coincidono). Dopodiché con le tensioni ricavate, alla lamina viene applicato il criterio di Tsai-Hill: se in tutti e tre i punti il coefficiente di sicurezza H risulta minore di 1, il risultato dell'applicazione del criterio è positivo e quindi la lamina resiste al carico. Avendo testato la lamina maggiormente sollecitata, si può sostenere che anche le altre resistano al carico imposto e concludere che l'intero laminato, quindi il modello testato, rientra nei canoni di sicurezza imposti da Tsai-Hill. Viceversa, se il coefficiente di sicurezza calcolato dovesse risultare maggiore di 1, anche solo in un punto, la lamina potrebbe cedere, e per lo stesso motivo appena descritto, anche il laminato risulterebbe fuori dal limite di sicurezza, non essendo verificata la resistenza del modello.

## **1.4 Definizione del materiale**

Il materiale preso in considerazione è un composito riciclato in fibra di carbonio. In questo elaborato non sono stati presi in esame lo studio e la caratterizzazione del materiale, ma sono stati importati i dati dai lavori precedenti <sup>[7]</sup>. In coerenza con questi, da questo punto in avanti verrà chiamato carbonio Reglass il materiale composito di scarto.

Questo paragrafo si limiterà ad illustrare le caratteristiche del materiale preso in considerazione e come sono stati riprodotti nel software. Con Patran è possibile scegliere il comportamento del materiale, cioè se considerarlo isotropo, ortotropo od anisotropo. Visto la natura del materiale e il tipo di mesh usata, si è scelto di seguire la linea adottata dai lavori precedenti a questo <sup>[7]</sup> e di considerare il materiale come *2DOrthotropic*. Così facendo si andrà a definire una singola lamina che in un secondo momento sarà possibile usare per andare a creare il composito finale.

Per caratterizzare il comportamento di una lamina di composito, in questo caso, occorrono le grandezze  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $G_{12}$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\sigma_{1R(t,c)}$ ,  $\sigma_{2R(t,c)}$  e  $\tau_{12}$ . In particolare, chiamando 1 la direzione longitudinale alle fibre e 2 quella trasversale, definire tali grandezze hanno il seguente significato:

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

Il software Patran necessita di  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $G_{12}$  e  $\nu_{12}$ , per definire un materiale *2DOrthotropic*. Successivamente, per effettuare un calcolo di verifica a resistenza, serviranno anche  $\sigma_{1R(t,c)}$ ,  $\sigma_{2R(t,c)}$  e  $\tau_{12}$ . A continuazione le tabelle (Tab 1.1 e 1.2) che riassumono i dati necessari all'analisi tramite il software, queste come già dichiarato in precedenza sono state prese da lavori precedenti <sup>[7]</sup>.

<b>CARATTERISTICHE MATERIALE REGLASS</b>	
$E_{11}$	179,18 GPa
$E_{22}$	10,83 GPa
$G_{12}$	7,17 GPa
$\nu_{12}$	0,15

**Tabella 1.1** Valori inseriti in Patran per definire le proprietà elastiche della singola lamina unidirezionale per il materiale Reglass 2DOrthotropic.

<b>TENSIONI MASSIME DEL MATERIALE REGLASS (MPa)</b>	
$\sigma_{1Rt}$	1815,00
$\sigma_{2Rt}$	60,57
$\tau_{12}$	89,02
$\sigma_{1Rc}$	1475,56
$\sigma_{2Rc}$	330,00

**Tabella 1.2** Valori delle tensioni ammissibili di una lamina unidirezionale Reglass.

## 1.5 Carichi e Vincoli.

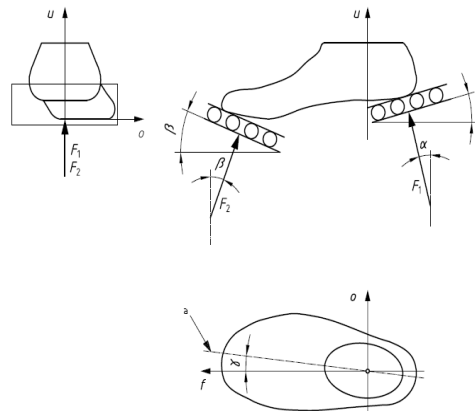
I carichi applicati e i vincoli assegnati ai modelli nelle simulazioni, sono quelli indicati nella norma UNI EN ISO 22675. In questo caso sia i modelli di primo approccio, sia i modelli definitivi, presentano una lunghezza complessiva di 26

cm; sono stati vincolati a telaio all'altezza della caviglia dove si considera sia collocata l'origine del sistema di riferimento. Seguendo queste indicazioni le coordinate di applicazione del carico sono:

- Coordinata X = -41 mm sull'asse di simmetria della protesi (carico sul tacco).
- Coordinata X = 136 mm sull'asse di simmetria della protesi (carico sulla punta).

Seguendo la dicitura della norma, sono stati considerati i modelli appartenenti alla categoria P3; le categorie tengono conto del peso dell'utente a cui è destinata la protesi, quindi i carichi massimi che la protesi deve sopportare per essere in linea con la norma. In questo caso i carichi sono:

- Entità della forza applicata sul tacco: 1580 N inclinata di un angolo  $\alpha = 15^\circ$  rispetto alla verticale.
- Entità della forza applicata sulla punta: 1601 N inclinata di un angolo  $\beta = 20^\circ$  rispetto alla verticale.



**Figura 1.1** Posizionamento del piede provino durante le prove condotte secondo la norma UNI ISO 22675



## 1.6 Modello FEM

Per la realizzazione del modello agli elementi finiti della protesi del piede è stato utilizzato il software MD\_Patran, un modellatore che è affiancato nell'analisi dal software MD\_Nastran, un solutore.

L'ambiente di Patran è suddiviso in diversi sottoambienti, quelli di nostro interesse sono:

- *Geometry*, per definire la geometria del modello;
- *Elements*, per creare e controllare la mesh;
- *Loads and Boundary Conditions*, per inserire carichi e vincoli;
- *Materials*, dove si definiscono le caratteristiche del materiale;
- *Properties*, per assegnare il materiale alle varie parti del modello;
- *Analysis*, per impostare l'analisi;
- *Result*, per osservare i risultati ottenuti.

Per l'esecuzione dell'analisi FEM, in prima battuta, sono stati realizzati dei modelli molto semplici, denominati modelli di primo approccio. Questo per avere un'idea dei possibili risultati ottenibili e per snellire i calcoli nella ricerca della configurazione ottimale. Nonostante questi fossero dei modelli molto approssimativi, i risultati ottenuti non si discosteranno eccessivamente da quelli dei modelli definitivi. I modelli di primo approccio sono stati molto utili nella ricerca di soluzioni al variare dei diversi parametri. La loro analisi verrà trattata in dettaglio nei paragrafi successivi.

Descriviamo ora la metodologia utilizzata per ottenere il modello agli elementi finiti. Si procederà descrivendo a grandi linee la definizione della geometria, anche se questa verrà trattata più nel dettaglio con l'introduzione dei modelli studiati. In seguito un paragrafo sarà destinato alle mesh e ai metodi che sono stati operati per la loro creazione. Infine si descriverà brevemente la procedura

dell'inserimento delle caratteristiche del materiale per l'analisi FEM. Lo studio specifico di ogni modello verrà descritto nei paragrafi successivi e l'esame dei risultati verrà invece descritto nel capitolo successivo.

### **1.7 Definizione della geometria in analisi**

Il materiale adoperato, la forma e le dimensioni del piede hanno permesso di considerare questo modello come composto da superfici, quindi in 2D. Ovvero, le parti del piede sono rappresentate come porzioni di superficie (shell). Lo spessore viene definito in un secondo momento quando si andranno a inserire i diversi strati di materiale composito.

Essendo poco pratico creare figure con l'interfaccia di Patran, si è preferito passare tramite un modello CAD 3D, in questo caso però creando delle superfici a spessore nullo, come prima riferito. Il modello a superfici è stato salvato nel formato Step (.STEP) e successivamente importato in Patran.

La norma prevede l'applicazione di cariche e vincoli in determinati punti e zone del piede, nella consapevolezza che il modello importato dal CAD è composto da una superficie divisa in aree; si è pensato di sfruttare queste aree per allocare i cariche e i vincoli. Dove queste aree non risultavano coincidenti con i punti di applicazione, sono state create altre divisioni all'interno delle aree, in modo da prevedere i punti di applicazione o rendere semplice l'individuazione di questi ultimi. Questo è il caso dell'applicazione delle forze di punta e di tacco: nell'intorno del loro punto di applicazione sono state previste delle ulteriori divisioni dell'area di corrispondenza, in modo da far coincidere esattamente il punto di applicazione con un nodo, nel quale è stata posizionata la forza.

## 1.8 Mesh

Definita la geometria del modello, è necessario passare alla fase di discretizzazione, ovvero alla generazione della mesh o maglia poligonale. Dall'icona *Elements* presente nella barra principale è possibile accedere a tutte le funzioni relative alla creazione e successiva manipolazione della mesh, ma anche a quelle che permettono di creare elementi FEM come i nodi.

Per la discretizzazione si è usata la tipologia a rettangoli, questa scelta è dovuta al fatto che gli ultimi permettono un miglior controllo sulla posizione e dimensione della mesh. Per ottenere ciò, si è sfruttato il comando *Mesh Seed*; quest'ultimo permette la disposizione di elementi mesh di dimensioni scelte dal progettista. Poi che una superficie è *biparametrica*, basterà disporre la *Mesh Seed* nei contorni della superficie che si vuole discretizzare e indicare in quanti elementi si vuole dividere quel contorno. Realizzando la stessa operazione sugli altri contorni della superficie, si crea un contorno di nodi, che funge come guida al programma, nel momento di ordinare la creazione della *Mesh* per la superficie presa in considerazione.

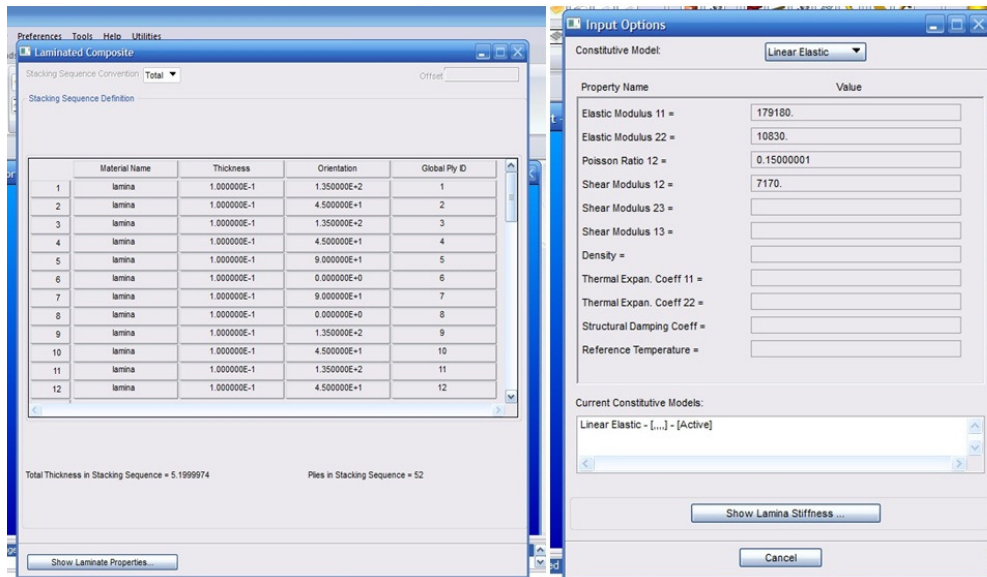
Il procedimento appena descritto, in cui viene creata *Mesh Seed* e poi usata come guida per la *Mesh* definitiva, è stato condotto sia per i modelli di primo approccio sia per i modelli definitivi, dividendo ogni contorno della superficie presente in questi ultimi, permettendo l'individuazione rapida dei punti di applicazione dei carichi e vincoli, e un maggior controllo dei risultati ottenuti.

Una volta realizzata la discretizzazione di ogni superficie appartenente ai modelli, si è specificata l'unione dei nodi sovrapposti nelle linee di contatto tra le superfici stesse. In altre parole, l'inizio o la fine di una superficie è delimitata dall'inizio o dalla fine della seguente; in questa delimitazione ci sono nodi appartenenti ad una superficie sovrapposti ai nodi dell'altra confinante. Per ottenere un corpo unico e far sì che si fondano i nodi, il programma ci offre in ausilio il comando

*Equivalence*, che elimina i nodi sovrapposti e impone la continuità tra le superfici contigue.

## 1.9 Inserimento delle caratteristiche del materiale nel FEM

Prima di costruire il modello del laminato si assegnano le caratteristiche appena viste ad ogni tipologia di lamina che si vuole immettere nel modello per creare il composito. Patran dà la possibilità, una volta predefinita la lamina, di decidere da quanti strati è costituito il composito e, per ogni strato, assegnare un orientamento e uno spessore (fig. 1.2). In questa sede si è adoperato uno spessore di 0,1 mm per ogni strato. Lo spessore totale della lamina sarà dato dal totale degli strati moltiplicato per lo spessore del singolo strato.



**Figura 1.2** Tabella dell'ambiente materials di Patran usata per definire il composito laminato Reglass, composto da tutti strati unidirezionali, ma orientati diversamente e tabella della caratterizzazione meccanica del materiale.

Una volta inserito il materiale e creata la lamina di composito, il programma tramite il comando “*Properties*” , rende possibile dichiarare quali zone o regioni del modello presentano le caratteristiche di un materiale piuttosto che di un altro.

## Capitolo 2

### Modelli di primo approccio.

#### 2.1 Generalità

In un primo luogo sono stati studiati due modelli, molto semplici, denominati modelli di primo approccio. Questo con lo scopo di realizzare un primo analisi di fattibilità sulle forme di protesi pensate all'inizio del progetto. Dallo studio di questi, verranno poi definiti i parametri geometrici e del materiale che andranno a conformare i modelli finali.

In seguito, si presenteranno i modelli di primo approccio, come è stato condotto lo studio e le variabili prese in considerazioni in quest'ultimo. Si riporteranno di questi si presenteranno i modelli CAD e la forma in cui è stato condotto il loro analisi.

Trattandosi di uno studio di fattibilità preliminare, questi modelli non sono particolarmente complessi, ma i risultati trovati servono per avere una fondamentale indicazione se portare avanti lo studio ed arrivare alla costruzione di un prototipo di piede protesico con il materiale composito in fibra di carbonio di “scarto”.

## 2.2 Modelli studiati

In un primo approccio si è effettuato un'analisi strutturale su elementi protesi più semplici e approssimativi di quelli definitivi, allo scopo di ottenere dei risultati che guidassero lo studio nella scelta della definizione della geometria finale. Diversi parametri geometrici sono stati variati in questo punto dell'analisi, oltre alle configurazioni di strati con diverso orientamento delle fibre. I modelli studiati in primo approccio sono stati riportati nelle figure 2.1 e 2.2.

Come dimensioni caratteristiche dei due modelli troviamo la lunghezza complessiva di 260 mm, una altezza di 80 mm, una larghezza scelta di 90 mm e raggi di raccordo di 5mm.

Nel modello Monopezzo di primo approccio (fig.2.1), sono state studiate separatamente le parti posteriore e anteriore, questo è stato possibile grazie al tipo di configurazione del modello e ai vincoli presenti in quest'ultimo.

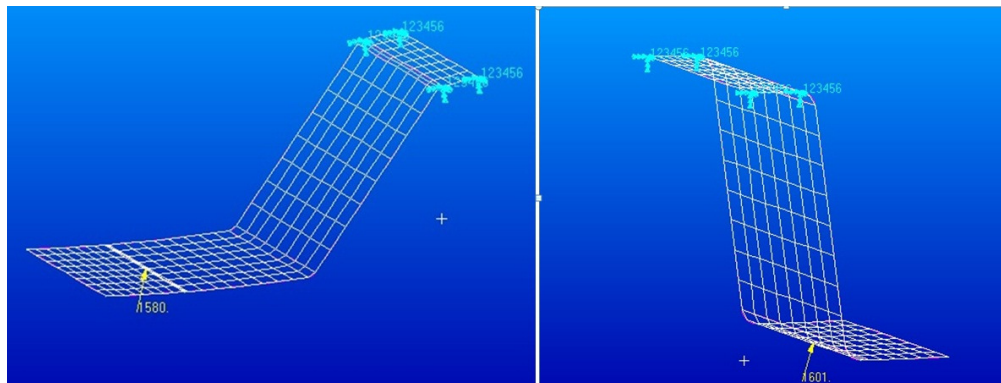


Figura 2.1 Modello Monopezzo. Parte anteriore e posteriore rispettivamente

Per il modello Scatolato di primo approccio (figura 2.2), non è stato possibile eseguire la semplificazione prevista nel modello precedente, quindi è stato studiato nel suo complesso. Un aspetto rilevante di questo modello, è dato dalla

sovrapposizione di due lamine di composito nel tratto di superficie tra la fine della parte inclinata e l'inizio della curvatura. Il modello è stato concepito in modo da rinforzare la parte che presentava più problemi di verifica strutturale, cioè l'avampiede. La lamina superiore verrà a contatto con la lamina inferiore in due zone: la prima zona è situata all'altezza della caviglia, nella parte posteriore del pezzo. La seconda zona è posizionata nella tra la curvatura e la prima parte con estensione verticale. Questa seconda zona ha una estensione di 82 mm, e come prima riferito è concepita per conferire resistenza al pezzo. Questa caratteristica è presente non solo nel modello di primo approccio, ma anche nel modello Scatolato definitivo.

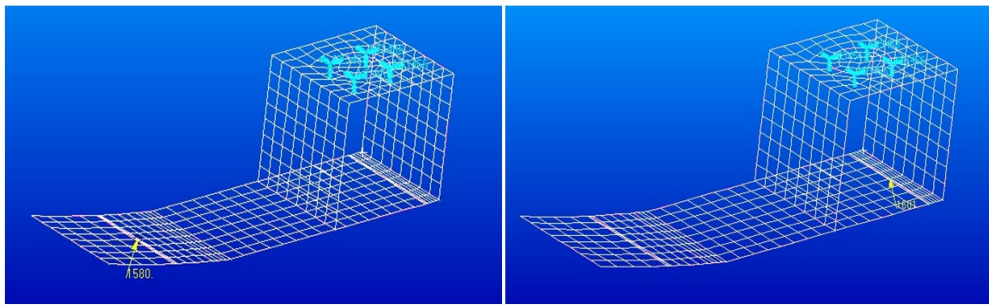


Figura 2.2 Modello Scatolato primo approccio

La simulazione realizzata per i modelli di primo approccio, è stata eseguita attraverso un'analisi statica, di tipo lineare, con applicazione puntuale del carico; le condizioni di staticità e linearità sono definite nell'ambiente *Analysis* di Patran. In questa sede è stato considerato un comportamento lineare in virtù di deformazioni non elevate, e carichi statici per avere una prima stima sulla resistenza del materiale studiato.

Diverse variabili geometriche sono state individuate grazie allo studio di questi modelli. Prima però, di analizzare le variabili geometriche dei modelli, si presenterà un parametro geometrico rilevante, che introduce migliorie in termini



di continuità de ciclo del cammino, cioè la curvatura delle parti a contatto con il suolo.

Nel ciclo di cammino di una persona, esistono parametri da tenere in considerazione, perché gestiscono e garantiscono un andamento fluido e continuo. Anche se la trattazione di questi esulano dallo studio condotto in questa sede, si è preso spunto da studi realizzati in questa direzione <sup>[11]</sup> per aggiungere caratteristiche ai modelli che beneficiassero il ciclo di cammino.

Si è appreso da questi studi che, nel ciclo del cammino della gamba si ricrea un compasso alla altezza dell'anca. La continuità di questo compasso è un fattore rilevante per ottenere un ciclo di cammino fluido e un dispendio di energia ridotto per parte del utente. Avendo presente ciò, è stato pensato di sagomare con una curvatura le parti dei modelli a contatto con il suolo, in modo da rendere più naturale, continuo e dolce il ciclo di cammino della persona che usufruisce della protesi. Per determinare il raggio della curvatura si è preso in considerazione l'altezza dell'anca, quest'ultima è situata a circa  $0,51 \cdot h$ , intendendo con  $h$  l'altezza del soggetto. In questo caso si è preso in considerazione una persona di altezza 1,75 m, in modo di determinare il raggio dei curvatura, che risulta essere di circa 900 mm.

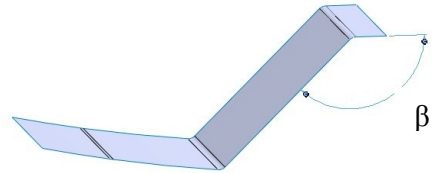
Le variabili geometriche prese in considerazioni dall'analisi sono stati riportate in tabelle 2.1.

Modello monopezzo di prima approccio	Parte del modello	Angolo	Valore
Monopezzo	Posteriore	$\alpha$	10°
Monopezzo	Posteriore	$\alpha$	20°
Monopezzo	Posteriore	$\alpha$	25°
Monopezzo	Anteriore	$\beta$	120°
Monopezzo	Anteriore	$\beta$	135°
Monopezzo	Anteriore	$\beta$	150°
Scatolato	Posteriore	$\theta$	10°

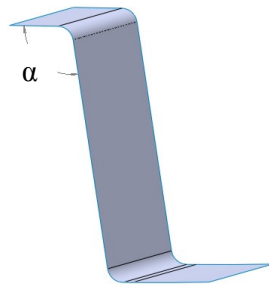
Tabella 2.1 elenco delle variabili geometriche per i modelli di primo approccio

## Capitolo 2 Modelli di primo approccio

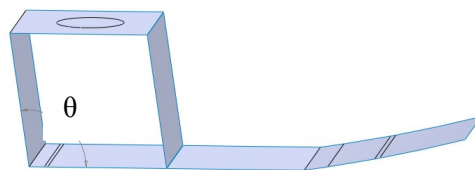
Di seguito, nelle figure 2.3, 2.4, 2.5, sono stati riportati gli angoli presi in considerazione.



**Figura 2.3 Modello Monopezzo di primo approccio. Angolo  $\beta$  di inclinazione dell'avampiede**



**Figura 2.4 Modello Monopezzo di primo approccio. Angolo  $\alpha$  di inclinazione della parte posteriore**



**Figura 2.5 Modello Scatolato di primo approccio. Angolo  $\theta$  di inclinazione della parte posteriore**

Oltre a ciò, sui modelli sono stati testati diversi orientamenti delle fibre del composito nella ricerca delle migliori configurazioni. Inizialmente si è concepita una configurazione delle lamine, composta da un primo strato con fibre orientate a  $0^\circ$  rispetto all'orizzontale, al quale veniva sovrapposto un'altro strato con fibre orientate a  $90^\circ$  rispetto al primo. In un secondo momento è stato studiato un'altra configurazione delle lamine di composito, questa volta con strati di fibre orientate a  $45^\circ$  rispetto all'orizzontale, al quale veniva sovrapposto un'altra strato con fibre orientate a  $135^\circ$  rispetto all'orizzontale. Su queste due configurazioni è stata realizzata l'analisi strutturale per la valutazione delle tensioni e degli spostamenti variando il numero di strati componenti la lamina, sono state considerate lamine aventi 25, 30, 35, 40 strati.

In seguito sono state testate due nuove configurazioni, la prima che chiameremo configurazione "A" (Tab 2.2), è composta da un primo gruppo formato da 3 strati a  $45^\circ$  e tra essi sono interposti 2 strati a  $135^\circ$ . Questo insieme di strati è seguito da un altro gruppo composto da 3 strati a  $0^\circ$  nei quali sono interposti 2 strati a  $90^\circ$ . La seconda configurazione che chiameremo configurazione "B" (Tab 2.3), è molto simile alla prima. È composta da un primo gruppo formato da 2 strati a  $45^\circ$  e tra essi e sono interposti 2 strati a  $135^\circ$ , seguito da un'altro di strati composto da 2 strati a  $0^\circ$  nei quali sono interposti 2 strati a  $90^\circ$ .

<b>Gruppo</b>	<b>Numerazione degli strati contenuti nel gruppo</b>	<b>Quantità di strati</b>	<b>Tipo ed orientamento</b>
1	1	1	Unidirezionale $45^\circ$
	2	1	Unidirezionale $135^\circ$
	3	1	Unidirezionale $45^\circ$
	4	1	Unidirezionale $135^\circ$
	5	1	Unidirezionale $45^\circ$
2	1	1	Unidirezionale $0^\circ$
	2	1	Unidirezionale $90^\circ$
	3	1	Unidirezionale $0^\circ$
	4	1	Unidirezionale $90^\circ$
	5	1	Unidirezionale $0^\circ$

Tabella 2.2 Configurazione "A" degli strati di composito

<b>Gruppo</b>	<b>Numerazione degli strati contenuti nel gruppo</b>	<b>Quantità di strati</b>	<b>Tipo ed orientamento</b>
1	1	1	Unidirezionale 45°
	2	1	Unidirezionale 135°
	3	1	Unidirezionale 45°
	4	1	Unidirezionale 135°
2	1	1	Unidirezionale 0°
	2	1	Unidirezionale 90°
	3	1	Unidirezionale 0°
	4	1	Unidirezionale 90°

Tabella 2.3 Configurazione B degli strati di composito

Chiaramente, per semplicità di rappresentazione, nelle tabelle precedenti sono solo stati riportati solo 10 e 8 strati rispettivamente, in realtà il numero di gruppi conformanti la lamina dipenderà dal numero minimo di strati necessari a verificare il criterio di resistenza strutturale.

Realizzata l'analisi per queste configurazioni, i risultati sono stati confrontati con quelli delle precedenti configurazioni, riscontrando che le ultime configurazioni presentavano miglie in termini di tensione ed spostamento, per cui si è scelto di proseguire lo studio con queste configurazioni. Le tensioni ricavate, sono state poi sottoposte al criterio di verifica strutturale, in modo da riscontrare una indicazione su quanti strati di fibre erano necessari per un conseguimento di un risultato positivo alla suddetta verifica.

## Capitolo 3

### Analisi e risultati

#### 3.1 Generalità.

Nei seguenti paragrafi si presenteranno i risultati riscontrati nelle analisi condotte. Si affronterà in primo luogo il modello Monopezzo di primo approccio e su questo si elencheranno le soluzioni al variare dei diversi parametri. Di seguito si affronterà l'analisi dei risultati per il modello di primo approccio Scatolato, la cui analisi ha coinvolto meno parametri e variabili rispetto al modello Monopezzo, a causa dell'esperienza acquisita dall'analisi sul precedente modello e della sua geometria. Successivamente verranno presentate alcune considerazioni sui risultati e si riporteranno i diagrammi di tensione e di spostamento per i due modelli.

Infine sulla base dei risultati ottenuti per i modelli di primo approccio, si definiranno i due modelli finali. Prevedendo in questi delle modifiche al design che gli rendano più vicini agli standard di protesi presenti nel mercato e reiterando su quest'ultimi l'analisi condotta per i modelli di primo approccio, allo scopo di ritrovare le configurazioni finali.

### 3.2 Modello Monopezzo di primo approccio

Come precedentemente riferito, il modello è stato suddiviso in 2 parti, il tacco e l'avampiede. Lo studio delle parti separate, è stato possibile a causa della forma del modello e del modo in cui sono stati applicati i vincoli su di esso. Il modello prevedeva un vincolo di incastro nella zona di unione tra le parti, e quindi lecita l'ipotesi in base alla quale una sollecitazione sul tacco o sull'avampiede non veniva a modificare la configurazione dell'altra parte.

Come obiettivo dell'analisi ci si è posti la definizione e scelta dei parametri geometrici, in modo da conferire al modello la massima flessibilità compatibilmente con il criterio di verifica strutturale del materiale. Il modello complessivo presentava le seguenti dimensioni: lunghezza 260 mm, larghezza 90mm e una altezza di 80 mm; inoltre presentava una curvatura di raggio 900 mm nelle parti di appoggio con il suolo.

Le variabili geometriche considerate nello studio sono gli angoli  $\alpha$  e  $\beta$  definiti nel precedente capitolo. Per quanto riguarda le variabili del materiale sono stati considerati l'orientamento degli strati contenenti le fibre del composito ( $0^\circ$ - $90^\circ$  oppure  $45^\circ$ - $135^\circ$ ) e lo spessore complessivo; quest'ultimo dipendente dal numero di strati applicati. Sono state previste 5 configurazioni variabili tra 20 e 40 strati.

Dalle analisi FEM risultante dalle simulazioni, emergono i risultati in termini di tensione, valutate successivamente mediante il criterio di resistenza per i materiali compositi. Le tabelle 3.1 e 3.2 riassumono il lavoro condotto, riportando le variabili geometriche e la conformità del modello in base al numero di strati presi in considerazione.

<b>Sottomodello</b>	<b>Parte simulata</b>	<b>Valore del angolo <math>\alpha</math></b>	<b>Orientamento delle fibre presenti negli strati</b>	<b>N° minimo di strati *</b>
1	Posteriore	10°	0°-90°	Conforme per un minimo di 25 strati
2	Posteriore	20°	0°-90°	Conforme per un minimo di 30 strati
3	Posteriore	25°	0°-90°	Conforme per un minimo di 30 strati
4	Posteriore	10°	45°-135°	Conforme per un minimo di 40 strati
5	Posteriore	20°	45°-135°	Conforme per un minimo di 35 strati
6	Posteriore	25°	45°-135°	Conforme per un minimo di 35 strati

**Tabella 3.1 Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte posteriore al variare dei numeri strati, orientamento delle fibre e angolazione.**

\* N° minimo di strati: Numero minimo di strati per raggiungere la conformità del criterio di resistenza

<b>Sottomodello</b>	<b>Parte simulata</b>	<b>Valore del angolo <math>\beta</math></b>	<b>Orientamento delle fibre presenti negli strati</b>	<b>N° minimo di strati *</b>
1	Anteriore	120°	0°-90°	Conforme per un minimo di 40 strati
2	Anteriore	135°	0°-90°	Conforme per un minimo di 40 strati
3	Anteriore	150°	0°-90°	Non conforme per i casi studiati
4	Anteriore	120°	45°-135°	Non conforme per i casi studiati
5	Anteriore	135°	45°-135°	Non conforme per i casi studiati

6	Anteriore	150°	45°-135°	Non conforme per i casi studiati
---	-----------	------	----------	----------------------------------

**Tabella 3.2 Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte anteriore al variare dei numeri strati, orientamento delle fibre e angolazione.**

\* N° minimo di strati: Numero minimo di strati per raggiungere la conformità del criterio di resistenza

Come si evince dalla tabella 3.1, il laminato con strati di fibre unidirezionali orientate a 0° - 90° nella parte posteriore, riesce a verificare il criterio di resistenza strutturale per il numero di strati minimo di 25, mentre il laminato con strati di fibre unidirezionali orientate a 45°-135° verifica il criterio di resistenza strutturale per un numero minimo di strati di 35.

Per la parte anteriore si riscontra invece che il laminato con strati di fibre unidirezionali orientate 0° - 90° verifica il criterio di resistenza strutturale per il numero di strati minimo di 40, mentre il laminato con strati di fibre unidirezionali orientate a 45°-135° non è conforme al criterio per nessuna delle configurazioni testate (Tab. 3.2).

Visto che i risultati ottenuti non erano quelli sperati, si è scelto di non aggiungere altri strati e di abbandonare queste configurazioni per intraprendere un'altra strada. Si è scelto infatti, di adoperare una configurazione di strati orientati a 0° - 90°, insieme ad altri strati orientati a 45°-135° nello stesso laminato. Le nuove configurazioni adoperate sono state le configurazioni "A" e "B" introdotte nel capitolo precedente.

Considerando i risultati ottenuti nella precedente analisi, si è scelto di fissare i parametri geometrici, in base ai migliori risultati riscontrati per la configurazione 0° - 90°; questi sono riportati in tabella 3.3.



<b>Angoli</b>	<b>Valore</b>
$\alpha$	10°
$\beta$	120°

**Tabella 3.3 Angoli della parte posteriore e anteriore rispettivamente**

Una volta fissate le variabili geometriche si è passato alla simulazione del modello, al variare del numero di strati . Dalle prime simulazioni si è riscontrato che la parte più condizionante è quella anteriore del modello, cioè l'avampiede. Avendo presente ciò, è stata svolta l'analisi nel seguente modo: in un primo momento si sono effettuate le simulazioni inerenti la parte anteriore della protesi; in un secondo momento, sui risultati riscontrati per la parte anteriore, si è applicata l'analisi mediante il criterio di verifica di resistenza strutturale. Nei casi riscontrati positivi alla verifica, è stata realizzata la simulazione per la parte posteriore; in caso negativo, si è passato direttamente alla configurazione seguente, ovvero con un numero maggiore di strati. Nelle tabelle 3.4 e 3.5 sono stati riportati rispettivamente i risultati per la parte anteriore e posteriore.

<b>Simulazione numero</b>	<b>Configurazione di tipo</b>	<b>Numero di strati</b>	<b>Esito delle verifica di resistenza strutturale</b>
1	A	30	Non conforme
2	B	32	Non conforme
3	A	35	Non conforme
4	B	36	Non conforme
5	A	40	Non conforme
6	B	44	Non conforme
7	A	45	Non conforme
8	B	48	Non conforme
9	A	50	Non conforme
10	B	52	Non conforme
11	A	55	Conforme

12	B	56	Conforme
----	---	----	----------

**Tabella 3.4** Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte anteriore, al variare del numero di strati applicati

Simulazione numero	Configurazione di tipo	Numero di strati	Esito delle verifica di resistenza strutturale
1	A	55	Conforme
2	B	56	Conforme

**Tabella 3.5** Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte posteriore, al variare del numero di strati applicati

Dall'analisi dei risultati riscontrati, si è giunto alla definizione di tutti i parametri che descrivono la geometria e la composizione del materiale del modello; nella tabella 3.6 è stata riportata la combinazione dei parametri costituenti la configurazione del modello risultante.

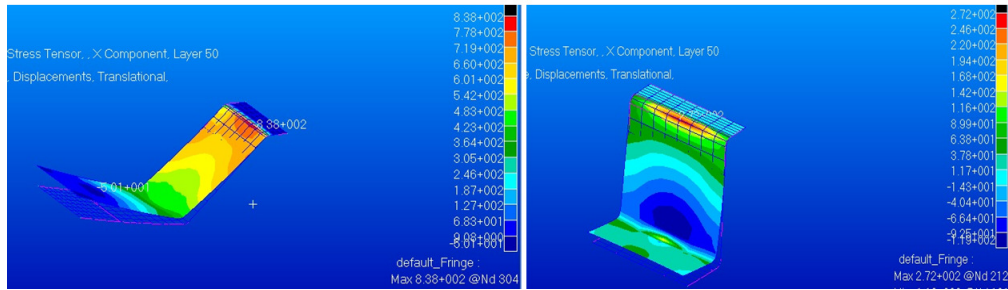
Variabili	Valori
$\alpha$	10°
$\beta$	120°
N strati min.*	55 strati

**Tabella 3.6** Tabella dei risultati finali per il modello Monopezzo di primo approccio

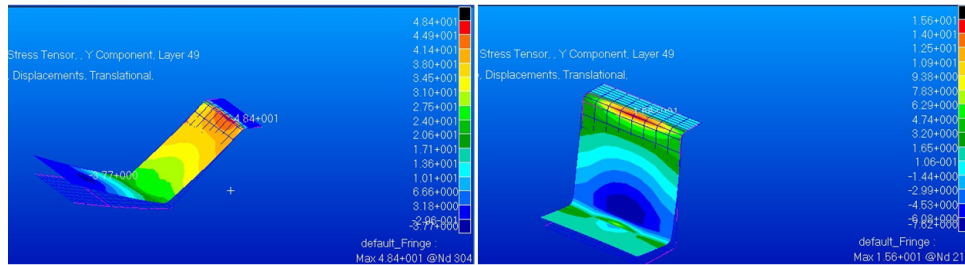
\* Con N strati min: Numero di strati minimo necessari per la verifica del criterio di resistenza strutturale.

Il software adoperato per l'analisi FEM, offre la possibilità di visualizzare gli andamenti delle tensioni all'interno della struttura e gli spostamenti registrati in

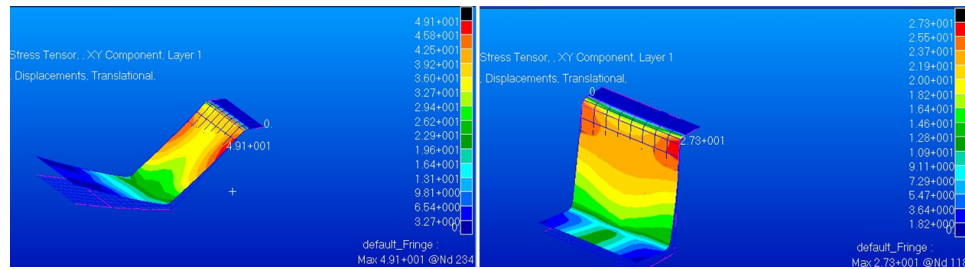
quest'ultima. Nelle seguenti figure (da fig.3.1 a 3.4) sono riportati questi andamenti.



**Figura 3.1 Distribuzioni delle tensioni  $\sigma_x$  nella parte anteriore e posteriore del modello**



**Figura 3.2 Distribuzioni delle  $\sigma_y$  nella parte anteriore e posteriore del modello**



**Figura 3.3 Distribuzione delle  $\tau_{xy}$  nella parte anteriore del modello**

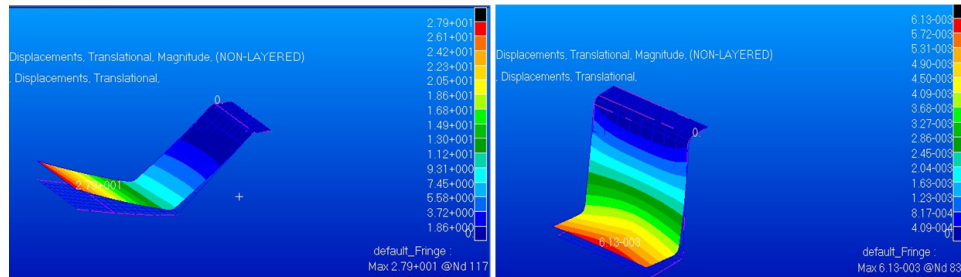


Figura 3.4 Distribuzione degli spostamenti nelle parti anteriore e posteriore del modello

### 3.3 Modello Scatolato di primo approccio.

Per modello “Scatolato” di primo approccio, la geometria è sommariamente definita; questo presenta le seguenti dimensioni: 260 mm di lunghezza, 80 di altezza, 90 di larghezza e un angolo  $\theta$  d’inclinazione delle pareti verticali di  $10^\circ$ . Tenendo presente i risultati riscontrati per il modello monopezzo, si è passati direttamente a simulare la struttura con le configurazioni di lamina A e B presentate nel precedente capitolo.

Nelle tabelle seguenti sono elencati (tabelle 3.7 e 3.8) i risultati ottenuti per questo modello. Come riscontrato in precedenza, anche in questo modello la parte più condizionante è quella anteriore del modello, cioè l’avampiede. Avendo presente ciò, è stata svolta l’analisi nel seguente modo: in un primo momento si sono effettuate le simulazioni inerenti la parte anteriore della protesi; in un secondo momento, sui risultati riscontrati per la parte anteriore, si è applicata l’analisi mediante il criterio di verifica di resistenza strutturale. Nei casi riscontrati positivi alla verifica, è stata realizzata la simulazione per la parte posteriore; in caso negativo, si è passato direttamente alla configurazione seguente, ovvero con un numero maggiore di strati.

<b>Simulazione numero</b>	<b>Configurazione di tipo</b>	<b>Numero di strati</b>	<b>Esito delle verifica di resistenza strutturale</b>
1	A	30	Non conforme
2	B	32	Non conforme
3	A	35	Non conforme
4	B	36	Conforme
5	A	40	Non conforme
6	B	44	Conforme
7	A	45	Conforme
8	B	48	Conforme

**Tabella 3.7** Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte anteriore, al variare del numero di strati applicati

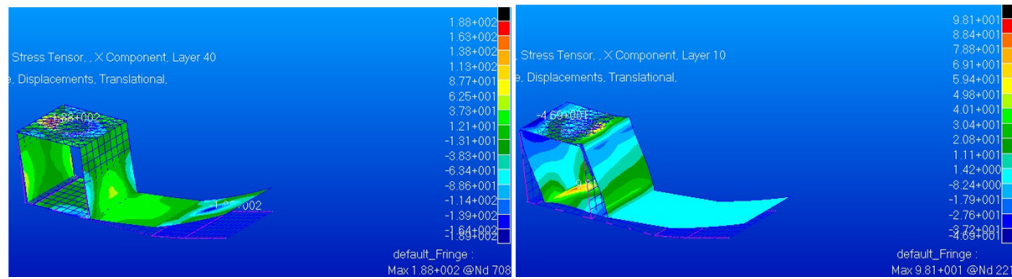
<b>Simulazione numero</b>	<b>Configurazione di tipo</b>	<b>Numero di strati</b>	<b>Esito delle verifica di resistenza strutturale</b>
1	B	36	Conforme
2	B	44	Conforme
3	A	45	Conforme
4	B	48	Conforme

**Tabella 3.8** Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte posteriore, al variare del numero di strati applicati

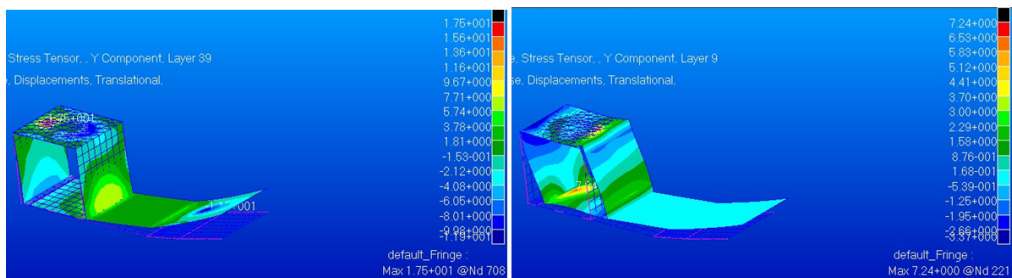
In questa occasione è stato riscontrato che la configurazione B del materiale composito, verifica il criterio di resistenza strutturale per un numero di strati minori rispetto alla configurazione A; nello specifico soddisfa il criterio di resistenza strutturale per 36 strati.

Come precedente, verranno riportati nelle seguenti figure (da fig 3.5 a fig 3.8) gli andamenti di distribuzione delle tensioni e il degli spostamenti per il modello studiato.

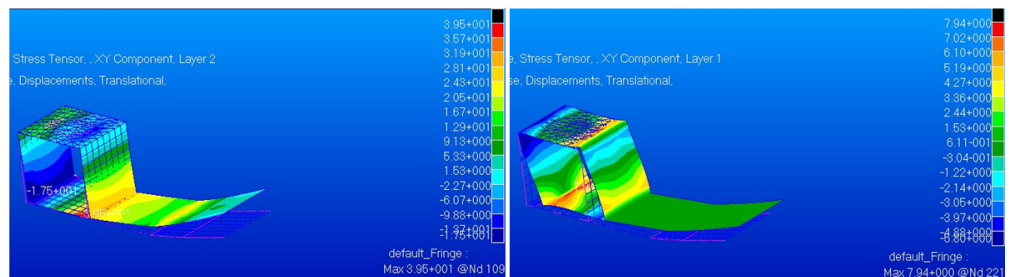
### Capitolo 3 Analisi e risulta



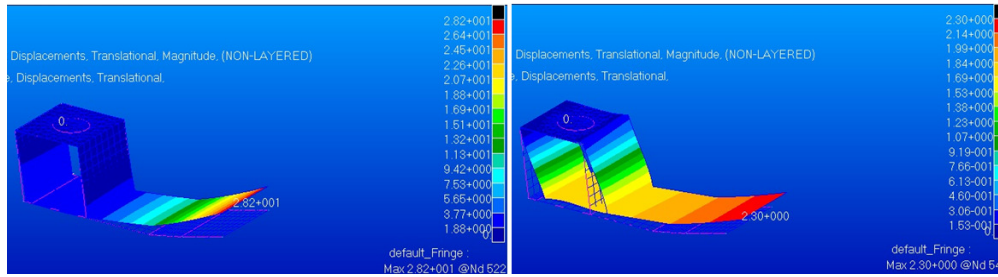
**Tabella 3.5 Distribuzioni delle tensioni  $\sigma_x$  nella parte anteriore e posteriore del modello**



**Tabella 3.6 Distribuzioni delle  $\sigma_y$  nella parte anteriore e posteriore del modello**



**Tabella 3.71 Distribuzione delle  $\tau_{xy}$  nella parte anteriore del modello**



**Tabella 3.8 Distribuzione degli spostamenti nelle parti anteriore e posteriore del modello**

Prendendo spunto da questi risultati, si sono aggiunte alcune modifiche ai modelli definitivi, ed è stato simulato il comportamento dei due modelli al variare del numero di strati; nel seguente paragrafo verranno affrontate queste tematiche e si presenteranno esempi di calcolo realizzati per la verifica strutturale.

### 3.4 Modelli finali

Sulla base dei modelli di primo approccio che sono stati utilizzati per affrontare il problema a livello preliminare, sono stati realizzati altri due modelli. In questi ultimi tuttavia, sono state previste modifiche geometriche che li rendono più vicini agli standard di design delle protesi attuali. Le dimensioni di questi modelli sono riportate in tabella (Tab 3.9).

Modello	Dimensione	Valore
Monopezzo	Lunghezza	260mm
	Larghezza	90 mm
	Altezza	80 mm
	R. di raccordo	5 mm
	Curvatura	900 mm
Scatolato	Lunghezza	260mm
	Larghezza	70 mm
	R. di raccordo	5 mm
	Altezza	80 mm
	Curvatura	900 mm

**Tabella 3.9 Dimensioni dei modelli finali**

Sono state definite tutte le grandezze geometriche ad eccezione dello spessore che verrà definito a seconda del numero di strati necessari per la verifica di resistenza strutturale dei modelli.

Una volta concepita la forma dei modelli, è stato eseguito lo stesso procedimento visto per i modelli di primo approccio:

- Realizzazione dei modelli CAD;
- Importazione dei modelli nel programma solutore;
- Creazione della mesh;
- Applicazione di carichi e vincoli;
- Simulazione.

Sono stati simulati i modelli sotto carichi e vincoli al variare dei numeri di strati contenenti la lamina; in questo caso però, è stato preso in considerazione solo il materiale composito in configurazione A e B.

Si sono realizzate una serie di simulazioni mirate all'individuazione del numero di strati minimo per cui veniva verificato il criterio di resistenza strutturale. Come in precedenza, prima è stata effettuata l'analisi per la parte anteriore ed in un secondo momento per la parte posteriore; quest'ultima è ridotta solo alle configurazioni risultate positive al criterio di verifica strutturale per la parte anteriore. Nel seguente paragrafo verranno elencati i risultati ottenuti per i modelli al variare della configurazione componente il materiale.

### **3.4.1 Modello Monopezzo**

Nelle seguenti tabelle (Tab 3.1 e 3.2) sono stati elencati gli esiti della verifica di resistenza strutturale condotta per il modello al variare degli strati che compongono il laminato.



<b>Mondello Monopezzo, parte anteriore</b>			
<b>Simulazione numero</b>	<b>Configurazione di tipo</b>	<b>Numero di strati</b>	<b>Esito delle verifica di resistenza strutturale</b>
1	A	30	Non conforme
2	B	32	Non conforme
3	A	35	Non conforme
4	B	36	Non conforme
5	A	40	Non conforme
6	B	44	Non conforme
7	A	45	Non conforme
8	B	48	Non conforme
9	A	50	Non conforme
10	B	52	Non conforme
11	A	55	Conforme
12	B	56	Conforme

**Tabella 3.10** Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte anteriore, al variare del numero di strati applicati

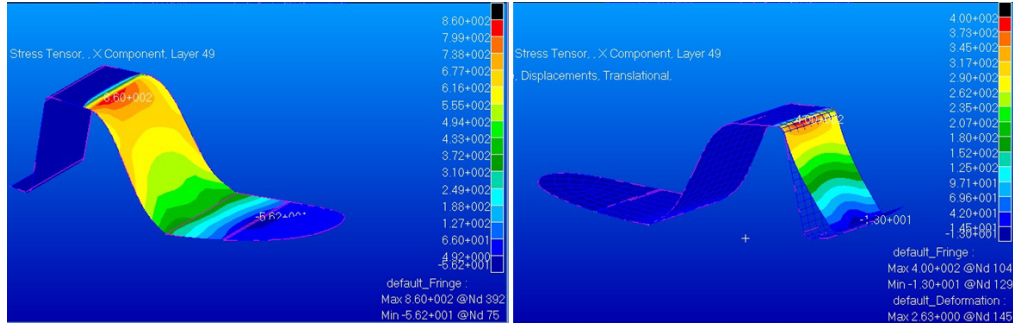
<b>Mondello Monopezzo, parte posteriore</b>			
<b>Simulazione numero</b>	<b>Configurazione di tipo</b>	<b>Numero di strati</b>	<b>Esito delle verifica di resistenza strutturale</b>
1	A	55	Conforme
2	B	56	Conforme

**Tabella 3.11** Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte posteriore, al variare del numero di strati applicati

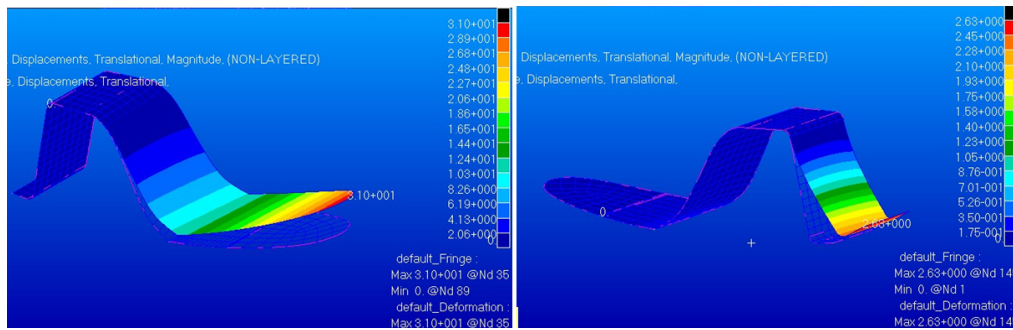
Come si può notare, i risultati riscontrati per il modello monopezzo finale, sono i medesimi che per il modello di primo approccio. Da questi risultati si ricava l'unica dimensione che non era stata definita precedentemente, cioè lo spessore. Dato il buon margine ottenuto nella verifica di resistenza strutturale, si è scelto di scegliere la configurazione a 55 strati. Questo comporta uno spessore di 5,5 mm.

Anche per questo modello è stato riportati nelle figure 3.9 e 3.10 gli andamenti di distribuzione delle tensioni e degli spostamenti; in questo caso sono riportati solo gli andamenti della tensione massima e gli andamenti degli spostamenti; questo

dovuto al fatto che come si può notare gli andamenti sono molto simili a quelli riscontrati per i modelli di primo approccio.



**Tabella 3.9** Distribuzioni delle tensioni  $\sigma_x$  nella parte anteriore e posteriore del modello Monopezzo



**Tabella 3.10** Distribuzione degli spostamenti nelle parti anteriore e posteriore del modello Monopezzo

### 3.4.2 Modello Scatolato

Anche per questo modello sono stati elencati gli esiti della verifica di resistenza strutturale condotta per il modello al variare degli strati che compongono il laminato (Tab. 3.12 e 3.13). I risultati sono i seguenti:

<b>Mondello Scatolato, parte anteriore</b>			
<b>Simulazione numero</b>	<b>Configurazione di tipo</b>	<b>Numero di strati</b>	<b>Esito delle verifica di resistenza strutturale</b>
1	A	30	Non conforme
2	B	32	Non conforme
3	A	35	Non conforme
4	B	36	Non conforme
5	A	40	Non conforme
6	B	44	Non conforme
7	A	45	Non conforme
8	B	48	Non conforme
9	A	50	Non conforme
10	B	52	Conforme
11	A	55	Conforme

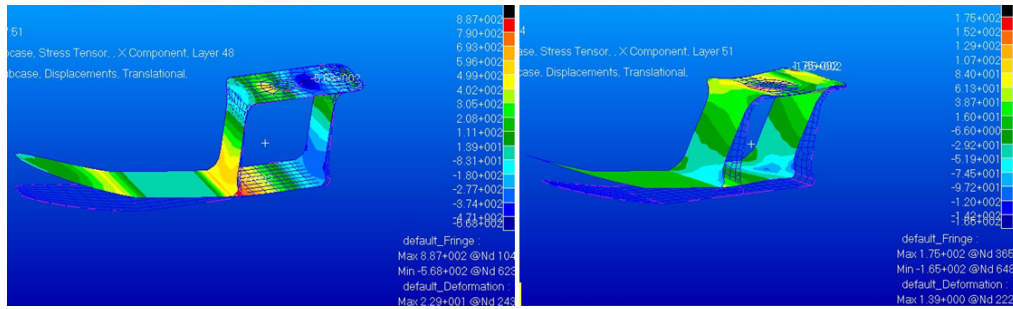
Tabella 3.12 Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte anteriore, al variare del numero di strati applicati

<b>Mondello Scatolato, parte posteriore</b>			
<b>Simulazione numero</b>	<b>Configurazione di tipo</b>	<b>Numero di strati</b>	<b>Esito delle verifica di resistenza strutturale</b>
1	A	52	Conforme
2	B	55	Conforme

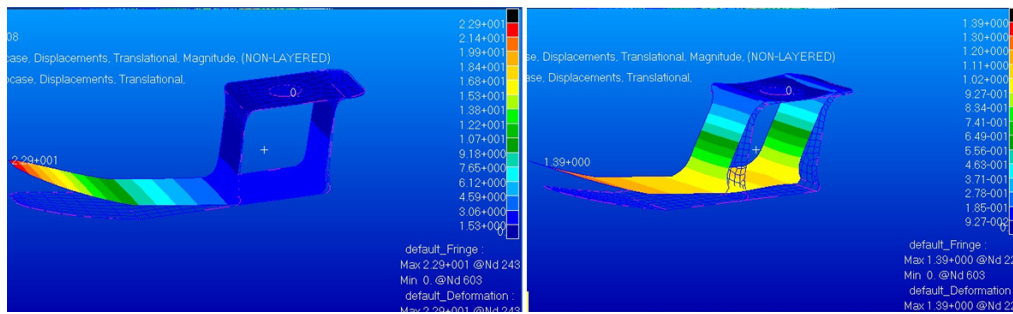
Tabella 3.13 Esiti della verifica di resistenza strutturale per la parte posteriore, al variare del numero di strati applicati

I risultati riscontrati per questo modello, differiscono sensibilmente da quelli riscontrati per il suo corrispondente modello di primo approccio; tuttavia è da tenere presente che le dimensioni sono state variate. In accordo ai risultati riscontrati, si è scelto la configurazione a 52 strati, la quale prevede uno spessore di 5,2 mm.

Nelle figure 3.11 e 3.12 sono stati riportati gli andamenti di tensione ed spostamento come per il modello precedente.



**Tabella 3.11** Distribuzioni delle tensioni  $\sigma_x$  nella parte anteriore e posteriore del modello Scatolato



**Tabella 3.12** Distribuzione degli spostamenti nelle parti anteriore e posteriore del modello Scatolato

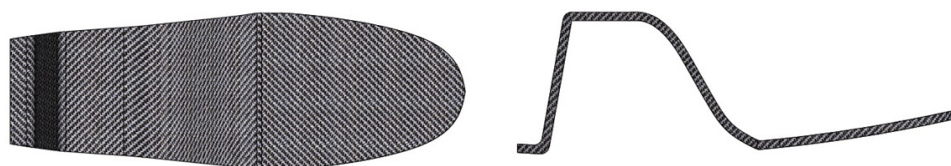
### 3.4.3 Modelli CAD

In base ai risultati ottenuti, è stato possibile riscontrare l'ultima dimensione dei modelli non ancora definita, cioè lo spessore. Una volta definite tutte le dimensioni, è stato possibile la realizzazione dei modelli CAD finali. Queste sono stati riportati nelle figure seguenti (da fig.3.13 a 3.19).

*Modello monopezzo*



- **Figura 3.13 Vista Trimetrica del modello Monopezzo**



- **Figura 3.14 Vista dall'alto e Vista laterale del modello Monopezzo**

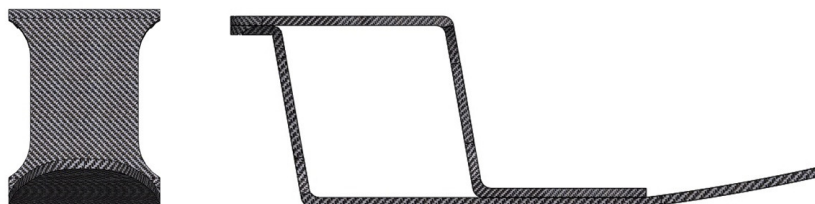


- **Figura 3.15 Vista da dietro e d'avanti del modello Monopezzo**

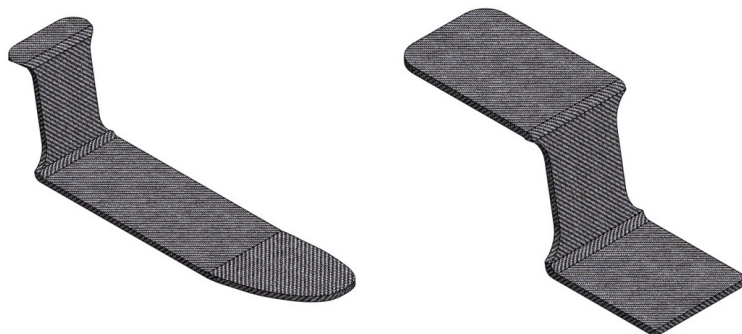
*Modello Scatolato*



**Figura 3.16** Vista isometrica del modello Scatolato



**Figura 3.17** Vita di fronte e Vista laterale del modello Scatolato



**Figura 3.18** Vista isometrica lamina inferiore e della lamina superiore del modello Scatolato

Come discusso nei paragrafi precedenti, il modello Scatolato è stato concepito per essere realizzato con un solo stampo, tramite la sovrapposizione di due lamine con configurazione uguale e di differente lunghezza. Affinché sia possibile l'assemblaggio così concepito, lo stampo dovrà essere in grado di riprodurre una lamina di lunghezza complessiva maggiore rispetto a quella della lamina inferiore, che contenga le dimensioni delle due parti; in questo modo tramite l'inserimento di inserti si rende possibile la realizzazione delle due parti di differente lunghezza. Le parti realizzate in due momenti diversi verranno poi assemblate. La lamina complessiva è stata riportata nella figura 3.19



**Figura 3.19** Vista isometrica lamina complessiva riprodotta dallo stampo per il modello "Scatolato"





## **Conclusioni.**

Lo scopo dell'attività presente in questa tesi è quello di progettare un modello di piede protesico realizzato con lamine in fibra di carbonio, che presentasse come caratteristiche principali il basso costo e le buone prestazioni. Queste specifiche mirano al concepimento di una protesi durevole, confortevole e accessibile agli utenti dei paesi con meno risorse economiche.

Per diminuire i costi, si è scelto di adoperare materiale composito riciclato, oltre ad intraprendere opportune scelte progettuali per rendere il design del piede meno elaborato rispetto agli attuali standard, cercando di ridurre al minimo il numero di lavorazioni richieste, elaborando così un modello CAD dalle forme più semplici possibili.

In un primo momento, si sono effettuate una serie di valutazioni, che hanno condotto all'individuazione di due varianti progettuali di cui si sono proposti due modelli di primo approccio. Quest'ultimi sono stati disegnati al CAD, adoperando una modellazione a superfici (shell), in modo da permettere la realizzazione dei modelli adatti all'analisi agli elementi finiti.

Sono state condotte le analisi agli elementi finiti dei modelli di primo approccio modificando la configurazione geometrica ed il materiale (cioè variando alcuni parametri di progetto), simulando carichi statici sulla punta e sul tacco del piede in momenti differenti. Ai risultati ottenuti si è applicato il criterio di resistenza di Tsai-Hill per materiale composito in modo da verificare la resistenza del piede alle sollecitazioni. Dal confronto dei risultati ottenuti, è stata individuata la configurazione ottimale alla quale ci si è ispirati per la definizione dei modelli "finali".

## Conclusioni

Dai risultati ottenuti per i modelli di primo approccio e da altre considerazioni di tipo geometrico, si è passati quindi alla modellazione CAD e FEM dei modelli finali. È stata quindi eseguita l'analisi agli elementi finiti e infine si è ricercato il numero minimo di strati per ogni modello in grado di verificare il criterio di resistenza strutturale di Tsai-Hill.

Analizzando i risultati ottenuti per i due modelli, si può giungere alla conclusione che questi possono essere presi in considerazione per la realizzazione di un piede protesico, perché rispecchiano le caratteristiche di semplicità adatte al conseguimento di una protesi a basso costo cercate dall'inizio del progetto. Tuttavia si ritiene che, per riuscire ad adoperare questi modelli realmente, si dovrà aggiungere un grado di definizione molto più dettagliato rispetto a quello ottenuto in questo elaborato. Aspetti come l'elemento di unione tra il piede e il gambo, copertura dello scheletro della protesi e la invasatura da adoperare devono essere ancora definiti.

Dai risultati ottenuti dalle simulazioni statiche è possibile stabilire che la realizzazione di un piede protesico con materiale in fibra di carbonio destinato allo smaltimento (apportando così una sensibile riduzione dei costi relativi al materiale) risulta attuabile.

Seguendo i risultati ottenuti in questo elaborato, le ricerche future possono essere indirizzate alla definizione degli elementi componenti la protesi appena menzionati, ad un design più dettagliato che permetta la creazione degli stampi e verso la creazione di un primo prototipo di piede protesico con il materiale di scarto, che permetta di testarne sperimentalmente il comportamento. Da uno studio di questo tipo certamente sarà possibile trarre conclusioni ed indicazioni maggiormente significative ed approfondite.

## Ringraziamenti

Vorrei ringraziare innanzitutto il Prof. Ing. Marco Troncosi, che nonostante le mie innumerevoli mancanze, mi ha sempre indirizzato sempre sulla strada giusta, dimostrando passione e dedizione per il suo lavoro, lasciandomi insegnamenti non solo in ambito accademico. Il Prof. Ing. Alessandro Ceruti, per i suoi consigli ed il suo tempo a me dedicato.

Quisiera dar gracias a mis padres, Italo y Lisett. Porque me han apoyado en cada decision importante de mi vida, han caminado junto a mi y me han ayudado a levantarme a cada caida.

Ringrazio mia Zia, Clara Passa, perché il solo sentire la sua voce mi ha confortato nei momenti più oscuri della mia permanenza in Italia.

Ad Alessandro e Luca, amici che mi hanno aiutato a crescere, consigliato nelle situazioni difficili, condividendo insieme a me sia i momenti buoni sia momenti sgradevoli.

A Paolo e Isidoro, perche mi hanno aperto le porte della loro casa, offrendomi una famiglia, quando la mia era troppo distante per sentirla.

A Dio, perche ha fatto sì che incrociassi tante brave persone sulla mia strada, persone che hanno in qualche modo interagito nella mia vita. Perché sono certo, senza questa interazione, non sarei quello che sono, ne saprei quello che so.



## Bibliografia

1. Provision of prosthetic and orthotic services in low-income countries: A review of the literature, by Colette S harkins, Antony McGarry and Arjan Buis.
2. Prosthetics feet for low-income countries, John Craig, CPO, JPO 2005:
3. Advances in prosthetic and orthotic education and training in developing countries: a personal view S. Hein Chicot China:
4. From academy to the developing world: students of engineers create collaborative technologies, from left: Adam Booher, Ehsen Nourlehi and John Naber, hold prosthetic arm prototypes Illini Prosthetic Technologies(I.P.T.), May 2011:
5. Sustainable O&P fabrication for developing countries: Posted by Miki Faireley on the work of Professor Wu Yeongchi.
6. Experimental and numerical predictions of the ultimate strength of a low cost composite transtibial, by Jill Hahl, MS and Minoru Taya, PHD. July/August 2000
7. Studio della fattibilità di una protesi di piede a basso costo realizzata in fibra di carbonio, tesi : Federico Tomei, Università di Bologna:
8. [www.bjjboneandjoint.org.uk](http://www.bjjboneandjoint.org.uk)
9. Gait Analysis of Low-Cost Flexible-Shank, Transtibial Prostheses. By Winson C. C. Lee, Ming Zhang, Peggy P. Y. Chan, and David A. Boone. September 2006.
10. Jaipur Foot. Dr M.K Mathur, physical medicine and rehabilitation, S.M.S. medical college, Jaipur. ISPO 14<sup>th</sup> World congress, Hyderabad, India:
11. Procedura di progettazione di protesi a basso costo per arto inferiore, Tesi di dottorato del ingegnere Corrado Borghi, Università di Bologna:

## Bibliografia

12. UNI EN ISO 22675 - Prove dei dispositivi d'articolazione caviglia-piede e unità piede. Requisiti e metodi di prova, 2007.
13. Lower-limb prosthetic technologies in the developing world: A review of literature from 1994–2010:
14. Prosthetics in the developing world: a review of the literature, D. Cummings, Texas Scottish rite hospital of children, Dallas, U.S.A. Prosthetics and Orthotics International, 1996, 20, 51-60:
15. Outdoor dynamic subject-specific evaluation of internal stresses in the residual limb: Hydraulic energy-stored prosthetic foot compared to conventional energy-stored prosthetic feet: by Sigal Portnoy, Ana Kristal, Amit Gefen, Itzhak Siev-Ner, 12 February 2011:
16. Testing and Analysis of Low Cost Prosthetic Feet, Faculty of the WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, by Morgan Carpenter, Carolyn Hunter, Dean Rheaume. Date: April 24, 2008
17. Material Fatigue in the prosthetic SACH Foot: Effects on mechanical characteristics and gait. Jody Van Rooyen, bachelor of prosthetics and orthopedics, La Trobe University, Melbourne Australia. November 1997.
18. <http://www.ottobock.it>
19. <http://www.ossur.com>