



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO**

**Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Innovazione Tecnologica**

**DIPARTIMENTO DELL'INNOVAZIONE INDUSTRIALE E DIGITALE  
(DIID)**

**Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica, Meccanica  
Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/15**

**PROGETTAZIONE PER ADDITIVE MANUFACTURING  
DI ORTESI DI GOMITO PERSONALIZZATE E  
SVILUPPO DI MODELLO PARAMETRICO BASATO SU  
ALGORITMI GENERATIVI**

**DOTTORE  
Vito Ricotta**

**COORDINATORE  
Prof. Antonio Chella**

**TUTOR  
Prof. Vincenzo Nigrelli**

**CO-TUTOR  
Prof. Tommaso Ingrassia**

**CICLO XXX – 2015-2017  
ANNO CONSEGUIMENTO TITOLO - 2018**



# INDICE

## SOMMARIO

## INTRODUZIONE

Introduzione.....	1
-------------------	---

## 1. REVERSE ENGINEERING

1.1. Reverse Engineering.....	4
1.2. Tecniche di digitalizzazione 3D.....	6
1.2.1. Sistemi di acquisizione maggiormente impiegati in campo industriale e medico.....	8
1.2.1.1) Metodi a contatto.....	8
1.2.1.2) Metodi non a contatto.....	8
1.3. Reverse Engineering in campo biomedico: customizzazione protesi ed ortesi ortopediche.....	17

## 2. ADDITIVE MANUFACTURING

2.1 Additive Manufacturing.....	20
2.2. Tecnologie di Additive Manufacturing .....	23
2.2.1. Fused deposition modeling (FDM).....	23
2.2.2. PolyJet.....	24
2.2.3. Selective laser sintering (SLS).....	27
2.3. Materiali per l'Additive Manufacturing .....	28
2.4. Design per l'Additive Manufacturing .....	33
2.5. Applicazioni di Additive Manufacturing in campo biomedico.....	36

### **3. ADDITIVE MANUFACTURING TEXTILE**

<b>3.1. Additive Manufacturing Textile.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Modellazione CAD di strutture AMT e limitazioni.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Design per Additive Manufacturing Textile.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4. Applicazioni di Additive Manufacturing Textile.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.1. Applicazioni di Additive Manufacturing Textile per           strutture in materiale composito.....</b>	<b>48</b>

### **4. TECNICHE DI MODELLAZIONE PER ADDITIVE MANUFACTURING**

<b>4.1. Algoritmi generativi.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. Modellazione algoritmica con Grasshopper.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.1. Principali funzionalità di Grasshopper.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3. Applicazioni della modellazione basata su algoritmi generativi.....</b>	<b>58</b>

### **5. PROGETTAZIONE DI ORTESI PERSONALIZZATA DI GOMITO E SVILUPPO MODELLO PARAMETRICO BASATO SU ALGORITMI GENERATIVI**

<b>5.1. Ortesi di gomito.....</b>	<b>61</b>
<b>5.1.1. Patologie del gomito ed impiego delle ortesi .....</b>	<b>62</b>
<b>5.1.2. Ortesi di gomito in commercio.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1.3. Nuovo modello di ortesi di gomito.....</b>	<b>66</b>
<b>5.2. Acquisizione 3D e modellazione CAD .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2.1 Acquisizione 3D e modellazione CAD del braccio.....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.2 Modellazione CAD ortesi personalizzata .....</b>	<b>75</b>
<b>5.2.2.1. Tassellazione di Voronoi.....</b>	<b>82</b>

<b>5.3. Sviluppo modello parametrico basato su algoritmi generativi.....</b>	<b>86</b>
<b>5.3.1. Algoritmo generativo per la creazione di pattern .....</b>	<b>87</b>
<b>5.3.2. Tassellazione di Voronoi mediante algoritmo             generativo.....</b>	<b>91</b>
<b>5.3.3. Uso dell'Additive Manufacturing Textile nelle ortesi di             gomito.....</b>	<b>98</b>
<b>5.3.3.1. Realizzazione di una struttura flessibile con software                 convenzionali.....</b>	<b>98</b>
<b>5.3.3.2. Realizzazione di una struttura flessibile mediante algoritmo                 generativo.....</b>	<b>104</b>
<b>5.4. Studio dell'influenza dei parametri di processo in Additive     Manufacturing.....</b>	<b>111</b>
<b>5.4.1. Realizzazione dei campioni cilindrici .....</b>	<b>112</b>
<b>5.4.2. Analisi dimensionale .....</b>	<b>116</b>
<b>5.4.3. Controllo della circolarità e della cilindricità.....</b>	<b>118</b>
<b>5.5. Realizzazione dell'ortesi mediante tecniche di Additive     Manufacturing.....</b>	<b>121</b>
<b>5.5.1. Tecniche di AM impiegate .....</b>	<b>121</b>
<b>5.5.2. Stampanti 3D impiegate .....</b>	<b>121</b>
<b>5.5.2.1. Stampante 3D Connex 500 .....</b>	<b>121</b>
<b>5.5.2.2. Stampante 3D FORMIGA P100.....</b>	<b>123</b>
<b>5.5.3. Materiali impiegati.....</b>	<b>125</b>
<b>5.5.4. Realizzazione dei prototipi .....</b>	<b>128</b>
<b>5.5.4.1. Realizzazione prototipo con tecnologia PolyJet.....</b>	<b>128</b>
<b>5.5.4.2. Realizzazione prototipo con tecnologia SLS e tassellazione                 di Voronoi.....</b>	<b>134</b>
<b>5.5.4.3. Realizzazione prototipo con tecnologia SLS e struttura                 flessibile in Additive Manufacturing Textile .....</b>	<b>136</b>
<b>5.6. Analisi agli elementi finiti (FEM) dell'ortesi di gomito.....</b>	<b>142</b>

<b>5.6.1. Risultati.....</b>	<b>147</b>
<b>5.6.1.1. Ortesi di gomito in Veroclear.....</b>	<b>147</b>
<b>5.6.1.2. Ortesi di gomito in PA 2200.....</b>	<b>151</b>
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>156</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>158</b>

## SOMMARIO

L'attività di ricerca presentata in questa tesi si è occupata delle tecniche di Reverse Engineering e Additive Manufacturing applicandole al campo della biomeccanica. Nello specifico sono state applicate al settore delle protesi e ortesi ortopediche ed, in particolare, l'attività di ricerca si è concentrata sullo studio e realizzazione di prototipi di una ortesi di gomito customizzata che, con un sistema di molle di torsione, permette di simulare l'azione svolta dal fisioterapista, consentendo la ripresa di una normale attività del paziente.

Un aspetto importante della ricerca riguarda l'implementazione di algoritmi generativi, mediante software dedicato, che permettono di realizzare pattern 3D e strutture flessibili, adattandoli al modello CAD delle ortesi, consentendo così di risolvere problematiche legate alla modellazione per l'Additive Manufacturing.

E' stato condotto anche uno studio di diverse tecnologie di Additive Manufacturing e, successivamente si è lavorato con tre di esse: la FDM (Fused Deposition Modeling), la SLS (Selective Laser Sintering) e la Polyjet. Le ultime due tecniche sono state impiegate per realizzare i prototipi della ortesi di gomito customizzata.

Infine, sono state effettuate analisi agli elementi finiti (FEM) a supporto delle scelte progettuali per la realizzazione di tale dispositivo medicale.

Parte del lavoro è stato svolto presso la Loughborough Design School della Loughborough University (UK) sotto la visione del Prof. Ian Campbell e lavorando nel gruppo di ricerca di Design for Digital Fabrication.

## INTRODUZIONE

La tecnologia di Reverse Engineering (RE) costituisce uno strumento indispensabile per riprogettare prodotti di cui non si dispone più di modelli CAD, oppure per replicare manufatti e prodotti unici.

Il RE è collegato alla tecnologia di Additive Manufacturing (AM) che racchiude in sé tutta una serie di tecniche e tecnologie di fabbricazione in cui il prodotto finito è formato senza la necessità di fonderne il materiale in stampi né di rimuoverlo da una forma grezza. La natura additiva di questa classe di tecniche rispetto a quelle tradizionali, tipicamente sottrattive, è la caratteristica chiave che conferisce all'AM potenzialità enormi nei più vari campi di applicazione, dall'aerospaziale al biomedico, dal dentale all'oreficeria. Inoltre l'AM consente una grande libertà nell'ideazione del pezzo, estendendo indefinitamente la gamma di geometrie e complessità realizzabili, rimuovendo vincoli di progettazione e di lavorazione. Nelle tecniche AM il materiale è infatti apportato punto a punto e strato su strato, conformemente al modello originale, analogamente a quanto accade per la stampa digitale di un documento.

RE e AM sono nuove tecnologie che possono supportare la ricerca scientifica nell'ambito delle scienze della salute e la pratica clinica.

Un uso più ampio di tali tecnologie può portare allo sviluppo di vari prodotti medici customizzati, riducendone il costo di progettazione e produzione ed ottenendo risultati più significativi nei trattamenti dei vari casi clinici.

Molti progressi nella riabilitazione e nella fisioterapia sono stati raggiunti grazie ai progressi in altri campi, compresa l'ingegneria della riabilitazione, la medical IT e la robotica.

Ciò ha reso le attività di riabilitazione e fisioterapia aperte a nuovi approcci e tecnologie che possono aumentare efficacia degli interventi terapeutici. L'AM, la scansione 3D e le tecnologie associate possono costituire un ulteriore passo verso una migliore applicazione dei principi dell'ingegneria della riabilitazione nella pratica clinica corrente.

Uno dei settori in cui RE e AM stanno avendo una maggior diffusione è quello della customizzazione dei prodotti in diversi ambiti, tra i quali anche quello biomedico, con la possibilità di realizzare protesi ed ortesi ortopediche personalizzate, le quali si adattano meglio al corpo del paziente, garantendo anche delle prestazioni migliori rispetto ai dispositivi prefabbricati.

Tuttavia si presentano ancora delle problematiche riguardanti la modellazione per l'AM. Durante la modellazione di geometrie complesse, può capitare che i modelli CAD (ad esempio i moduli da ripetere in una struttura più complessa), dopo essere stati adattati ad una superficie, si deformino alterando le proprie dimensioni di progetto e, spesso, non consentendo neanche di poter essere stampati con le tecnologie di AM.

Lo scopo di questo lavoro è la messa a punto di una metodologia per la progettazione e realizzazione, interamente con tecniche di AM, di un'ortesi di gomito personalizzata e lo sviluppo di algoritmi generativi per la modellazione parametrica e creazione di patterns 3D e strutture flessibili da adattare al modello CAD dell'ortesi. Lo sviluppo di tali algoritmi generativi consente di risolvere problematiche legate alla modellazione per l'AM creando strutture complesse senza deformazioni o alterazioni delle stesse.

Inoltre, si è pensato di dotare l'ortesi di un sistema di molle di torsione che simulano l'azione svolta dai fisioterapisti, aiutando il paziente durante la riabilitazione.

Il lavoro è stato suddiviso in sei parti. La prima riguarda l'acquisizione 3D del braccio di un paziente e la modellazione CAD della struttura dell'ortesi di gomito. Nella seconda parte si è realizzata una tassellazione di Voronoi per curare l'aspetto estetico del dispositivo modellandola con software convenzionale e, successivamente, mediante un algoritmo generativo.

Nella terza parte è stata applicata la tecnologia di Additive Manufacturing Textile nella progettazione dell'ortesi di gomito, creando una struttura flessibile che apporta un contributo estetico ma allo stesso tempo ha la possibilità di adattarsi meglio alle deformazioni del braccio durante i movimenti in fase riabilitativa.

E' stato inoltre sviluppato un algoritmo generativo per ovviare a problematiche riscontrate durante la modellazione con software convenzionale.

La fase successiva del lavoro è stata dedicata allo studio dell'influenza di alcuni parametri di processo in Additive Manufacturing.

La quinta parte riferisce dell'attività di realizzazione dei prototipi di ortesi di gomito impiegando due tecnologie di Additive Manufacturing: PolyJet e SLS e sono stati realizzati tre prototipi.

L'ultima parte è stata dedicata alla conduzione di simulazioni agli elementi finiti (FEM) a supporto delle scelte progettuali per la realizzazione dell'ortesi di gomito.

# 1. REVERSE ENGINEERING

## 1.1. Reverse engineering

Il Reverse Engineering (RE) è un processo di digitalizzazione di un oggetto fisico per la rimodellazione computerizzata di superfici geometriche mediante apposite attrezzature e rielaborazioni.

Solitamente lo scopo del RE è quello di disporre di un modello digitale di un oggetto o dispositivo esistente di cui si è impossibilitati a misurare con esattezza le forme a causa della complessità della forma o della difficoltà di raggiungimento del riferimento in questione.

Il RE ha acquistato sempre più importanza nell'industria manifatturiera, nonché nei settori dei beni culturali, della biomeccanica, della "free form architecture" e del controllo qualità, grazie alla diffusione delle apparecchiature di digitalizzazione tridimensionale e dei sistemi CAD in grado di realizzare il modello geometrico del prodotto.

Nel campo della biomeccanica il RE ha assunto negli anni un ruolo importante. Esso permette di ricostruire modelli 3D di strutture biomediche e oggetti di interesse per lo sviluppo di prodotti medicali, applicazioni e ricerche biomediche, consentendo, ad esempio, di poter analizzare e studiare il comportamento di protesi ortopediche soggette a carichi durante particolari attività fisiche o durante semplice deambulazione [1,2], migliorandone le caratteristiche [3] e, di conseguenza, migliorando la qualità di vita del paziente a cui è stata impiantata la protesi.

Il processo di RE [4] è costituito dalle seguenti fasi:

- Pianificazione dell'acquisizione: riguarda diversi aspetti quali la tipologia di scanner da utilizzare, se possibile il posizionamento ottimale dell'oggetto da scansionare, pianificazione del numero di scansioni da effettuare per acquisire la superficie dell'oggetto: si deve cercare di ridurre al minimo il numero di scansioni per minimizzare tempi e costi di

acquisizione, ma anche evitare sovrapposizioni di parti di superficie che potrebbero falsare l'acquisizione stessa, e il tutto senza che il modello finale presenti parti non acquisite o incomplete.

- Acquisizione dei dati: vengono effettuate diverse scansioni dell'oggetto. Tali scansioni saranno effettuate in maniera differente in base alla tipologia di tecnica impiegata. Il risultato è una nuvola di punti rappresentante la superficie. In base alla tecnica di acquisizione impiegata, spesso si rende necessario l'allineamento delle diverse scansioni, quando queste sono state realizzate ognuna con un differente sistema di riferimento.
- Elaborazione dei dati e creazione del modello CAD: la nuvola di punti ottenuta dall'acquisizione non può essere direttamente impiegata come modello CAD ma è necessaria una fase di post-processing costituita da una serie di operazioni che portano alla realizzazione del modello CAD [5]. Tali operazioni vengono condotte mediante software dedicati e consistono in: eliminazione dei punti che non appartengono all'oggetto da scansionare (presenza di rumore nell'acquisizione), eliminazione delle parti di superfici sovrapposte che possono falsare la corretta conformazione dell'oggetto, esecuzione di operazioni di fill-holes e levigazione delle superfici attraverso smoothing, eventuale decimazione del numero di punti acquisiti al fine di ridurre la dimensione del file che spesso è un dato importante (ad esempio, per alcune successive applicazioni quali stampa 3D). In quest'ultimo caso si andrà a ridurre il numero dei punti sulle porzioni di superfici regolari, così da ottenere un'alta densità di punti solo nelle porzioni di superfici non uniformi e complesse. Il risultato è un file in formato STL. Il passo successivo è la conversione della mesh poligonale ottenuta in superfici NURBS e dopo in modello CAD.

- Applicazione del modello CAD: ultimo step del processo di RE è l'impiego del modello CAD per applicazioni quali la prototipazione rapida, le simulazioni numeriche, ecc.

Nella figura (Fig. 1.1) seguente è schematizzato il processo di RE dall'acquisizione al modello CAD nel quale partendo dal componente reale, tramite scansione 3D (step 1 e 2), si ottiene una nuvola di punti ed, infine, il modello CAD.

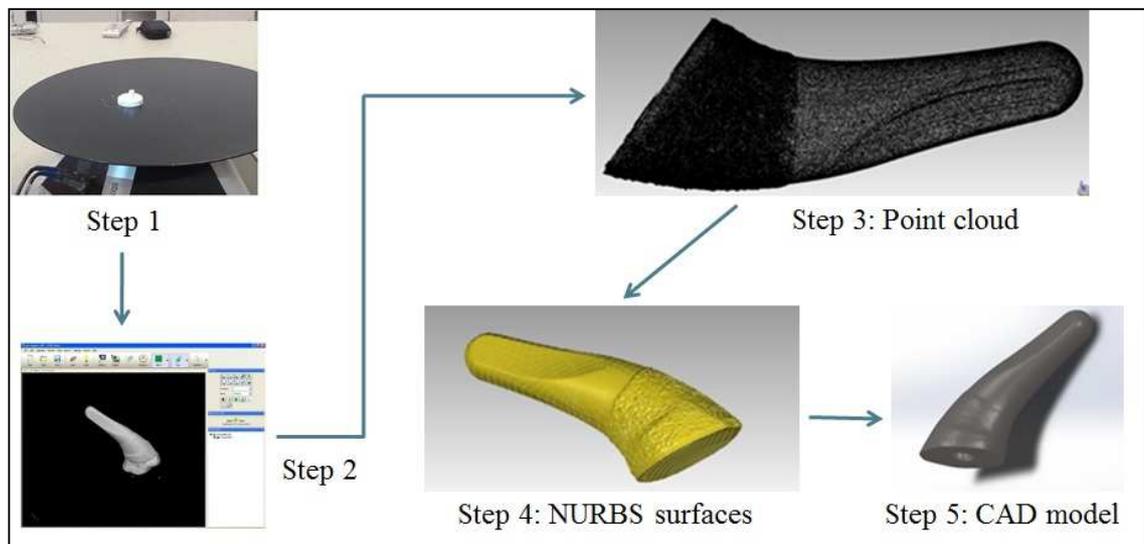


Figura 1.1 – Fasi del processo di Reverse Engineering

## 1.2. Tecniche di digitalizzazione 3D

Il rilievo di forma è uno degli argomenti di maggiore attualità nel campo dell'ingegneria industriale, consentendo una vasta gamma di possibili applicazioni soprattutto nell'ambito del RE.

Esistono varie tecniche di acquisizione 3D [6] che si differenziano per principio di funzionamento, livello di risoluzione [7], tempi di misura, costi.

Di seguito (Fig. 1.2) è riportato uno schema delle varie tecniche di acquisizione.

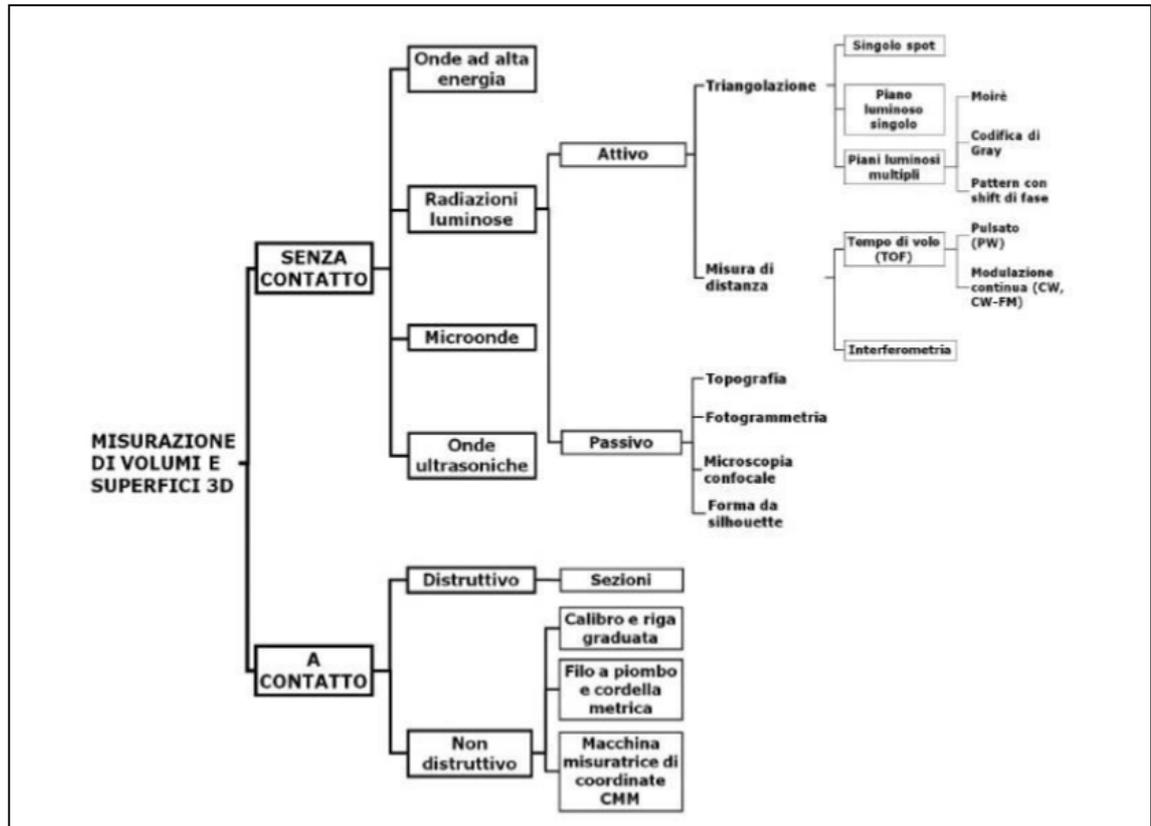


Figura 1.2 – Classificazione delle tecniche di acquisizione 3D

Le tecniche di acquisizione si dividono principalmente in due grandi famiglie: tecniche a contatto e tecniche non a contatto.

Le tecniche a contatto non distruttive si basano sull'impiego di sonde o sensori che consentono di acquisire i punti di una superficie. Con questo procedimento i tempi di scansione sono molto elevati e il contatto stesso con l'oggetto potrebbe deformare il campione da digitalizzare compromettendo la bontà della misura (per esempio in oggetti in silicone).

La seconda famiglia riguarda le tecniche non a contatto che sfruttano principi magnetici, acustici o, in forma maggiore, ottici per acquisire la superficie di un oggetto, ricostruendone il modello tridimensionale.

Questo particolare principio di misura ha alcuni vantaggi rispetto al metodo a contatto:

- non invasività: lo strumento opera senza necessità di contatto con la superficie dell'oggetto, quindi è possibile misurare senza problemi oggetti soffici o delicati;
- elevata parallelizzazione dell'acquisizione: con una singola misura si ottengono contemporaneamente centinaia di migliaia di punti;
- elevata riconfigurabilità: attraverso una rapida procedura di taratura si prepara lo strumento nella configurazione più opportuna per operare con una particolare superficie;
- larghissima applicabilità: i campi applicativi sono molto diversificati e vanno dall'industria, ai beni culturali fino ad applicazioni biomediche.

### **1.2.1. Sistemi di acquisizione maggiormente impiegati in campo industriale e medico**

#### **1.2.1.1 Metodi a contatto**

Sono sistemi automatici o semiautomatici che impiegano un sensore montato su una macchina o su un braccio articolato. I sensori (mono o bidimensionali) acquisiscono le forme integrandosi con sistemi di posizionamento in grado di rilevare la posizione e l'orientamento nello spazio.

I sistemi maggiormente utilizzati in campo industriale sono le macchine CCM (Coordinate Measuring Machines). Queste determinano forma e dimensioni dell'oggetto da acquisire attraverso il contatto fisico di una sonda. Dalla conoscenza della posizione del braccio a contatto con l'oggetto è possibile determinare le coordinate dei punti della superficie.

#### **1.2.1.2 Metodi non a contatto**

Come detto in precedenza, il principio di funzionamento di tali sistemi consiste nel proiettare sull'oggetto una diversa forma di energia (onde ad alta frequenza,

onde luce, onde ultrasoniche) e misurare l'energia da esso trasmessa o riflessa, ricostruendone il modello tridimensionale.

Questi metodi si distinguono in metodi non ottici e metodi ottici.

### **Metodi non ottici**

La Tomografia Computerizzata (TC) anche nota come TAC (Tomografia Assiale Computerizzata) è una tecnica utilizzata in ambito medico per generare un'immagine tridimensionale dell'interno di un oggetto (generalmente organi umani) a partire da un grande numero di immagini bidimensionali ottenute emettendo raggi X e misurando la quantità di radiazione che lo attraversa.

Questo permette di ottenere risultati insensibili ai fenomeni di riflessione, tipici degli scanner che fanno uso di laser o luce strutturata [8].

Un'altra tecnica molto utilizzata in ambito medico è la risonanza magnetica o MRI (Magnetic Resonance Imaging), la quale produce un maggiore contrasto tra i diversi tipi di tessuto del corpo sulla base della loro composizione biochimica.

Tra gli svantaggi dell'utilizzo di questa tecnica ci sono i costi elevati ed i tempi prolungati necessari per l'acquisizione delle immagini.

### **Metodi ottici**

In questi metodi la luce viene proiettata sulla superficie. Analizzando le riflessioni che essa subisce sull'oggetto è possibile determinarne la forma.

Questi metodi sono classificati in tecniche passive e attive.

Nelle prime la forma 3D è generata sfruttando l'illuminazione naturale presente nell'ambiente: si basano sull'acquisizione di molte immagini prese da punti diversi, sulla ricostruzione dei contorni dell'oggetto ripreso ed sull'integrazione di tali contorni per la ricostruzione del modello 3D.

I metodi ottici attivi sono costituiti da una coppia sorgente – sensore: la sorgente emette un pattern illuminante mentre il sensore acquisisce il segnale di ritorno riflesso dalla superficie dell'oggetto.

La sorgente luminosa scandisce lo spazio in modo regolare ed il sistema ritorna una matrice che codifica i punti rilevati, detta usualmente range map, che riporta l'informazione spaziale della parte di superficie dell'oggetto visibile dallo strumento di scansione.

Di seguito vengono illustrate brevemente le tecniche attive impiegate nel lavoro di ricerca.

### **Tecniche attive**

I sistemi ottici attivi sono in grado di acquisire in maniera rapida e precisa una grande quantità di dati. Sono costituiti da una sorgente che emette una determinata forma di fonte illuminante e da un sensore che acquisisce il segnale di ritorno riflesso dalla superficie dell'oggetto.

Tra queste tecniche sono stati impiegati i sistemi a triangolazione.

#### **- Sistemi a triangolazione**

Il metodo di triangolazione laser si basa su una semplice relazione geometrica. Un diodo laser emette un raggio laser che colpisce il target di misura, il raggio di luce riflessa viene trasferito attraverso una lente a un sensore CCD (Charge-Coupled Device). In base alla posizione del punto sul sensore si può determinare la distanza del bersaglio con estrema precisione utilizzando semplici calcoli trigonometrici.

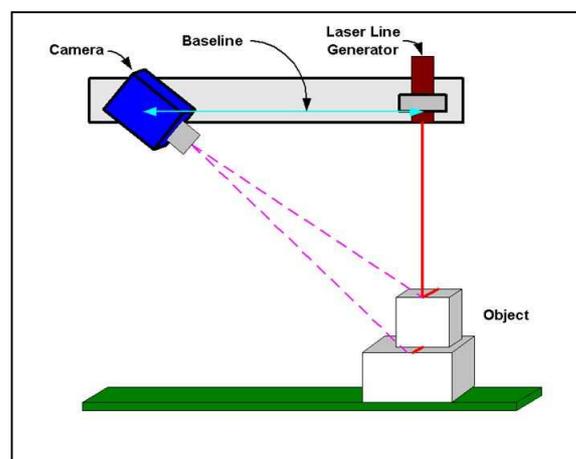


Figura 1.3– Principio di funzionamento di un sistema a triangolazione

Tra questi sistemi di acquisizione, quelli maggiormente diffusi sono i sistemi con proiezione di piano luminoso singolo e sistemi a luce strutturata.

- **Sistemi a proiezione di un singolo piano di luce**

Con questa tecnica viene proiettato un piano di luce sull'oggetto.

L'intersezione del piano di luce con la superficie dell'oggetto è utilizzata al fine di rilevarne il profilo. Il piano di luce viene originato utilizzando una sorgente laser puntuale combinata con una lente di emissione che genera sulla superficie un tratto di luce.

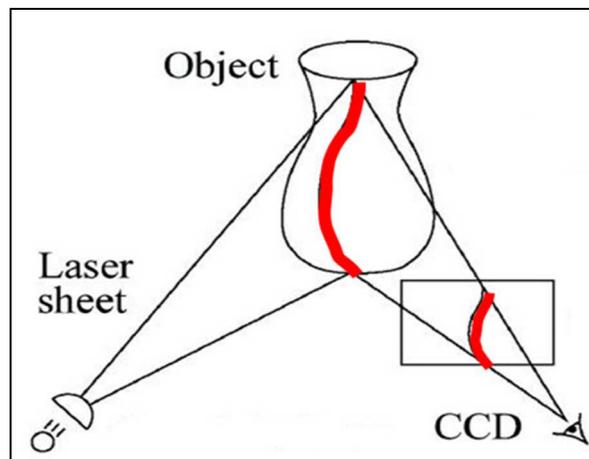


Figura 1.4 – Schema di funzionamento della tecnica a proiezione di singolo piano luminoso

Con questo metodo può essere raccolto, in una singola acquisizione, un elevato numero di punti, velocizzando la fase di acquisizione (in base al tipo di scanner, si possono acquisire anche 150.000 punti/s).

- **Sistemi a luce strutturata**

La proiezione di luce strutturata consiste nel proiettare un pattern conosciuto di pixel su una scena: il modo in cui queste figure si deformano incontrando la superficie permette ai sistemi di visione di ricostruire la superficie degli oggetti presenti nella scena stessa [10].

L'elaborazione delle immagini acquisite, svolta con algoritmi molto sofisticati, consente al calcolatore di ottenere la cosiddetta nuvola di punti dell'oggetto, ovvero un elenco delle coordinate dei punti che appartengono alla superficie.

### **- Sistemi di acquisizione impiegati nel lavoro di ricerca**

In questo lavoro sono stati impiegati tre scanner 3D a triangolazione:

- COMET 5 della Steinbichler
- HP-L-20.8 della HEXAGON METROLOGY
- ZScanner 800 della ZCorporation

I primi due scanner sono stati utilizzati all'interno dei laboratori dell'Università degli Studi di Palermo, mentre il terzo presso la Loughborough Design School della Loughborough University (UK).

Sebbene siano tutti sistemi a triangolazione e con buoni valori di accuratezza, la scelta di impiegare tutti e tre gli scanner è stata dettata dalle differenti modalità di utilizzo che i singoli sistemi offrono rispettivamente: sistema fisso e tavola rotante, braccio articolato con sistema di riferimento fisso, sistema con totale libertà di movimento intorno all'oggetto.

Di seguito si riporta una breve descrizione dei tre sistemi di acquisizione.

### **- COMET 5**

I sistemi COMET 5 sono tutti costituiti da un sofisticato dispositivo di proiezione e da una telecamera digitale che, opportunamente combinati, consentono di rilevare la superficie dell'oggetto vista dalla telecamera e tradurla in una densa ed accurata nuvola di punti disposti ordinatamente in uno spazio tridimensionale.

L'utilizzo del sistema è estremamente semplice ed intuitivo, si tratta infatti di inquadrare la superficie da digitalizzare con la telecamera posizionandosi alla corretta distanza.

L'accuratezza certificata del sistema è sostanzialmente legata al campo di misura selezionato, e può arrivare fino ai 5 micron con il campo di misura 100X100.



Figura 1.5 – Sistema di scansione COMET 5

Il sistema di misura COMET 5 è composto da due principali dispositivi: un proiettore ed una telecamera digitale. Il primo ha il compito di illuminare l'oggetto e di proiettare sulla superficie dello stesso un pattern regolare di frange in varie posizioni. Per ogni posizione delle frange, la telecamera digitale acquisisce un'immagine. Tali frange, proiettate sulla superficie, si deformano seguendone la morfologia. L'analisi della deformazione delle frange consente, attraverso il principio Moiré, di tradurre le immagini in entità tridimensionali, ottenendo la forma tridimensionale dell'area inquadrata, acquisendo fino a 4 milioni di punti per ogni scansione. L'intero processo ha la durata di 2-3 secondi.

#### **- HP-L 20.8 LASER SCANNER**

Altro scanner impiegato è HP-L 20.8 della HEXAGON METROLOGY.

Lo scanner laser HP-L-20.8 è un ottimo dispositivo per il rilevamento di nuvole di punti su bracci ROMER Absolute Arm.



Figura 1.6 – Sistema di scansione HP-L-20.8

Grazie alla larghezza regolabile del fascio laser e ad una più elevata velocità di acquisizione, questo scanner laser avanzato genera nuvole di punti 3D precise ad alta velocità. La capacità di autoadattamento permette di ottenere risultati di misura eccellenti anche sulle superfici più difficili.

L'HP-L-20.8, grazie alla sua facilità di trasporto e facilità di utilizzo, è uno strumento potente per una vasta gamma di applicazioni di misura, tra le quali la verifica di elementi geometrici e superfici modellate rispetto al modello CAD e il reverse engineering.

Il sistema HP-L-20.8 offre elevate prestazioni su componenti complessi e sui materiali più difficili. Con una larghezza regolabile del fascio laser fino a 220 mm e una velocità di acquisizione fino a 150.000 punti al secondo, questo scanner laser produce nuvole di punti 3D precise ad alta velocità.

### **- ZScanner 800**

Terzo scanner impiegato è ZScanner 800 della ZCorporation. Si tratta di un sistema ideale per il reverse engineering, la progettazione, la produzione, i prototipi e le simulazioni digitali; inoltre la sua precisione lo rende adatto per le esigenti applicazioni di ispezione 3D. La sua risoluzione e accuratezza consentono di catturare piccoli oggetti e superfici altamente dettagliate, trovando

impiego in una vasta gamma di settori quali quello automobilistico, multimediale, artistico, storico e medicale.

ZScanner 800 è dotato di una terza fotocamera ad alta definizione che aumenta notevolmente la risoluzione e la precisione di scansione entro  $40\mu\text{m}$  e rileva i cambiamenti di altezza della superficie fino a  $50\mu\text{m}$ . Inoltre consente anche una prima funzione multi-risoluzione automatica che auto-calibra il livello di risoluzione in base al tipo di superficie sottoposta a scansione.

Altra caratteristica fondamentale di questo scanner 3D portatile è il self-orienting, ovvero la possibilità di essere totalmente orientabile eliminando la necessità di treppiedi a posizione fissa, bracci meccanici voluminosi o dispositivi di posizionamento esterni. Inoltre, grazie ad un sistema di target ZScanner 800 consente all'utente di spostare l'oggetto durante la scansione e di visualizzare un'immagine sullo schermo in tempo reale della superficie sottoposta a scansione, ovvero consente la generazione automatica della superficie in tempo reale.

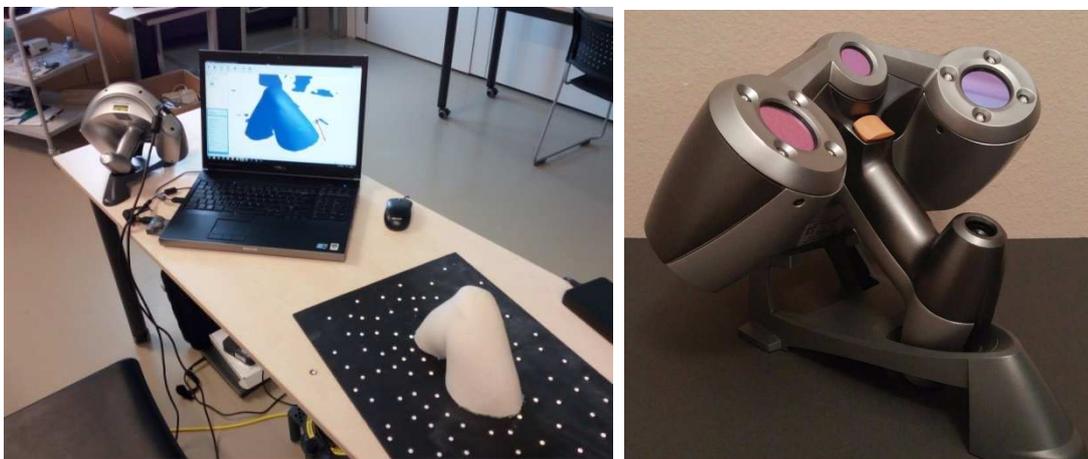


Figura 1.7 – Sistema di scansione ZScanner 800

Di seguito si riportano le principali caratteristiche dei tre scanner.

COMET 5 11 M	
Camera Resolution	4008 x 2672
Measuring Volume in mm <sup>3</sup>	Measuring Volume 150 in mm <sup>3</sup> : 140 x 95 x 70 Measuring Volume 350 in mm <sup>3</sup> : 330 x 220 x 200 Measuring Volume 700 in mm <sup>3</sup> : 700 x 460 x 400
3D Point Distance in µm	3D Point Distance: 150: 35 µm / 350: 85 µm / 700: 180 µm
Measuring Time in Seconds HighSpeed / High Quality	5.0 / 10.0
PC	HighEnd Workstation; 2 x Intel XEON Multicore CPU's, 32 GB
Sensor Positioning	tripod or sensor stand with motorized turn and tilt axis, robot
Automated Object Positioning	rotation table, robot

	ZScanner 800
Weight	1.25 kg (2.75 kg)
Dimensions	6.75 X 10.2 X 8.5 inches
Sampling Speed	25,000 measurements per second
Laser	Class II (eye safe)
XY Accuracy	Up to 40 microns
Resolution	0.050 mm in XYZ
Data Transfer	Firewire
Power Source	Firewire

Laser scanner HP-L-20.8	
Laser	Class 2
Standoff	180 ± 40 mm
Line rate	Max 100 Hz
Line width range min	176 mm / 104 mm / 51 mm / 40 mm / 20 mm
mid	220 mm / 130 mm / 63 mm / 51 mm / 25 mm
max	231 mm / 148 mm / 75 mm / 60 mm / 30 mm
Data Rate	max. 150,000 points per second
Minimum point spacing	0.013 mm
Probing Form error (1 σ)	9 µm
Probing Dispersion value P[Form.Sph.D95%:Tr.ODS]	36 µm
Operating Temperature	10° to 42° C / 50° to 108° F
Sensor Size L x W x H	137 x 76 x 85 mm
Sensor Weight	410g (462g with silicon sleeve)

### 1.3. Reverse Engineering in campo biomedico: customizzazione protesi ed ortesi ortopediche

Nel campo biomedico ed in particolare nel settore dei dispositivi biomedicali, il RE è ormai una tecnica molto impiegata ed in continuo sviluppo grazie al supporto del mondo della ricerca che consente di poter usufruire di nuove tecniche e tecnologie in questo settore, migliorando la qualità di vita dei pazienti. Le protesi sono dispositivi che sostituiscono in parte o totalmente parti mancanti recuperando la struttura e la funzione persa (ad esempio: protesi di mano, di arto superiore o inferiore).



Figura 1.8 – Esempi di protesi

Le ortesi sono dei dispositivi che aumentano, migliorano o controllano la funzione compromessa di parti del corpo.

Per i pazienti con disabilità, spesso, le ortesi sono utilizzate per applicare forze sul corpo per esigenze biomeccaniche.

Esempi di ortesi sono: collari e busti per la colonna vertebrale, ginocchiere, cavigliere, ortesi di gomito.



Figura 1.9 – Esempi di ortesi ortopediche

Le protesi ed ortesi possono essere personalizzate o prefabbricate [11]. I dispositivi prefabbricati sono meno costosi e sono facilmente disponibili in mercato. Tuttavia, le protesi ed ortesi personalizzate si adattano meglio al corpo del paziente, garantendo anche delle prestazioni migliori rispetto ai dispositivi prefabbricati.

Per quanto riguarda la progettazione di protesi ed ortesi, vi sono tre aspetti importanti che occorre soddisfare: la funzionalità, l'ergonomicità e l'estetica.

Progettare un prodotto combinando tutti e tre questi aspetti, significa poter realizzare un dispositivo protesico in grado di poter soddisfare a pieno i bisogni dei pazienti.

Grazie alla tecnica del RE è possibile, partendo da una scansione del paziente, progettare e realizzare il modello di un dispositivo biomedicale customizzato, il quale sarà in grado di offrire migliori prestazioni ortopediche durante il periodo di riabilitazione del paziente, migliorandone le condizioni di vita durante le normali attività quotidiane.

Il processo per la progettazione di dispositivi customizzati è costituito da tre fasi:

- acquisizione 3D: questa operazione può essere condotta direttamente sulla parte interessata del paziente o su un modello in gesso, ad esempio realizzato dopo aver preso il calco di una parte del corpo del paziente;
- ricostruzione ed elaborazione del modello CAD: in questa fase vengono rielaborati i dati dell'acquisizione realizzando il modello CAD del dispositivo customizzato. Viene dapprima elaborata l'acquisizione dell'arto del paziente e successivamente viene modellata l'ortesi.
- realizzazione del prodotto: attraverso le tecniche di Additive Manufacturing, del quale parleremo più avanti, è possibile realizzare l'ortesi finale per il paziente.

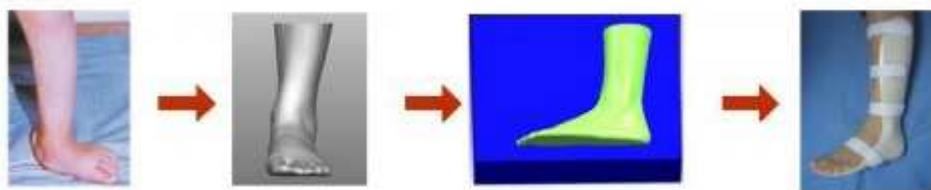


Figura 1.10 – Processo di RE per ortesi ortopediche

## 2. ADDITIVE MANUFACTURING

### 2.1. Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM) è una tecnologia di produzione avanzata in cui oggetti tridimensionali sono costruiti mediante l'aggiunta di materiale.

Sono stati fatti progressi significativi nel corso degli anni consentendo alla tecnologia di produzione additiva di rivoluzionare la produzione industriale e fornire vari benefici alla società [12,13]. Questi benefici includono:

- la realizzazione di prodotti sanitari personalizzati in base alle esigenze individuali dei consumatori che migliorarono in modo significativo il benessere pazienti;
- ridotto consumo di materie prime e di energia (contributo chiave alla sostenibilità ambientale);
- produzione su richiesta: rappresenta un'opportunità per riconfigurare la catena di produzione e, soprattutto, ridurre i costi di magazzino.

L'AM è una tecnologia in rapida espansione grazie, soprattutto, al fatto che consente la creazione di oggetti con forme molto complesse [14] e con costi contenuti [15].

La produzione additiva di un oggetto è un processo automatizzato [16] che non necessita di supervisione.

A differenza delle tecniche di produzione convenzionale [17], come le lavorazioni per asportazione di materiale che fabbricano prodotti rimuovendo materiale, l'AM crea la forma finale dell'oggetto aggiungendo materiale.

Quest'ultimo aspetto dà la possibilità di produrre parti con geometria complessa difficili da ottenere con le tradizionali tecnologie.

Il processo di AM ha consentito di fare un uso efficiente delle materie prime, portando al minimo la produzione di materiale di scarto e garantendo il raggiungimento di un buon livello di accuratezza geometrica.

L'AM consente la realizzazione di prodotti rispettosi dell'ambiente. A differenza dei tradizionali processi di produzione che posizionano molti vincoli sulla progettazione del prodotto (dovute anche a lavorazioni successive), la flessibilità dell'AM consente ai produttori di ottimizzare la progettazione per una produzione snella, che per sua natura elimina gli sprechi di materiale e gli scarti. Inoltre, la capacità dell'AM di costruire geometrie complesse [18] consente di poter fabbricare in un singolo oggetto, parti che in precedenza venivano realizzate separatamente, ottimizzando l'intero ciclo di produzione [19].

I progetti topologicamente ottimizzati che l'AM è in grado di realizzare potrebbero aumentare la funzionalità del prodotto, riducendo così la quantità di energia, combustibile o risorse naturali necessarie per il processo di produzione.

Rispetto alle tradizionali tecnologie di produzione, le tecnologie di AM presentano diversi vantaggi:

- efficienza dei materiali: a differenza delle tradizionali tecniche sottrattive in cui bisogna rimuovere una grande quantità di materiale l'AM utilizza materie prime in modo efficiente costruendo le parti strato per strato. I materiali rimanenti possono spesso essere riutilizzati con un minimo trattamento;
- efficienza delle risorse: i processi di produzione convenzionali richiedono risorse ausiliarie come impianti, utensili da taglio e refrigeranti oltre alla macchina principale. L'AM non richiede queste risorse aggiuntive. Di conseguenza, le parti possono essere realizzate da piccoli produttori che sono vicini ai clienti. Ciò rappresenta un'opportunità per migliorare le dinamiche della catena di produzione;
- flessibilità delle parti: poiché non ci sono vincoli di utensili, componenti con caratteristiche complesse possono essere realizzati in un unico pezzo. Inoltre, è possibile costruire un singolo oggetto con proprietà meccaniche variabili (flessibile in una parte e più rigida in un'altra). Quest'aspetto,

ovviamente, apre grosse opportunità per l'innovazione della progettazione;

- flessibilità di produzione: le macchine per l'AM non richiedono assemblaggi costosi e quindi risultano economiche nella produzione di piccoli lotti. Inoltre, i problemi del bilanciamento delle linee e dei rallentamenti della produzione sono praticamente eliminati perché le parti complesse sono prodotte in singoli pezzi.

Tuttavia, la tecnologia l'AM non è ancora in grado di competere pienamente con i sistemi di produzione convenzionale [20] in particolare nel campo della produzione di massa a causa spesso dei seguenti inconvenienti:

- limiti di dimensioni: i processi di AM utilizzano spesso polimeri liquidi o una polvere composta da resina o gesso per costruire i vari strati degli oggetti. Questi materiali possono rendere l'AM inadatto per la produzione di oggetti di grandi dimensioni a causa della mancanza di particolare resistenza del materiale. Inoltre, spesso le dimensioni delle macchine per AM non consentono fisicamente di stampare oggetti oltre determinate dimensioni. Infine, oggetti di grandi dimensioni sono spesso poco pratici a causa dell'elevato tempo necessario per completare il processo di produzione;
- imperfezioni: parti prodotte utilizzando processi di AM spesso possono possedere una finitura superficiale ruvida e nervata. Questo aspetto è dovuto a grani di plastica o particelle di polvere di grandi dimensioni che si possono accumulare l'uno sopra l'altro, dando al prodotto finito un aspetto incompiuto;
- costi: i macchinari per l'AM sono considerate ancora un investimento costoso. Per la produzione di prodotti con un buon livello di accuratezza, sono richiesti macchinari che possono andare dai 5.000 € ai 50.000 € e

più per modelli di alta gamma, escludendo il costo di accessori e resine o altri materiali necessari per la produzione [15].

## 2.2. Tecnologie di Additive Manufacturing

Ad oggi sono disponibili un gran numero di processi di AM; essi differiscono nel modo in cui gli strati vengono depositati per creare le parti, nel principio di funzionamento e nei materiali che possono essere impiegati.

Di seguito sono riassunti brevemente i processi di AM impiegati durante l'attività di ricerca.

### 2.2.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Questa tecnologia si basa sul concetto che qualsiasi oggetto 3D può essere teoricamente suddiviso in più sezioni o strati sottili, attraverso una procedura di slicing. Di conseguenza, qualsiasi oggetto 3D può essere creato sovrapponendo molti strati fisici uno dopo l'altro.



Figura 2.1 – Stampante 3D a FDM

Utilizzando la metodologia FDM, un filamento di materiale termoplastico viene portato allo stato plastico attraverso un estrusore riscaldato e depositato su un piano di supporto seguendo un percorso che definisce uno degli strati multipli in cui l'oggetto da produrre è stato suddiviso. Per ottenere la forma corretta di ogni singolo strato, in genere, l'estrusore può spostarsi lungo un piano orizzontale. La sovrapposizione di diversi strati può essere ottenuta attraverso movimenti verticali del piano di supporto o dell'estrusore [13].

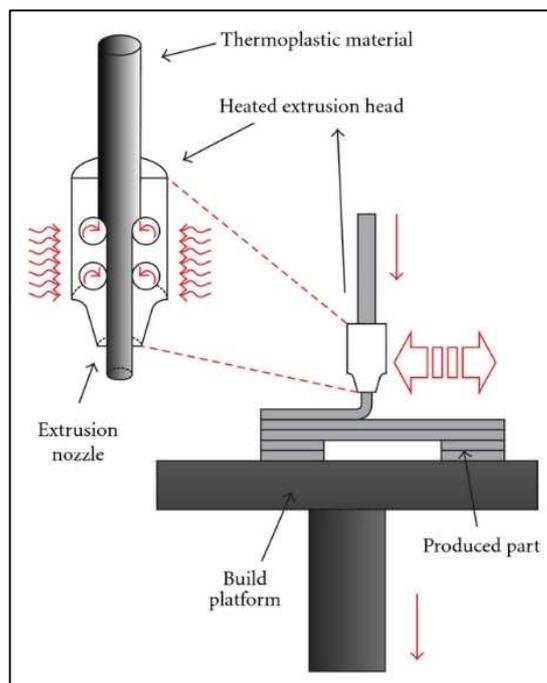


Figura 2.2 – Schema di funzionamento della tecnologia FDM

### 2.2.2 PolyJet

La stampa in 3D PolyJet è simile alla stampa a getto d'inchiostro, ma in questo caso, invece di rilasciare gocce d'inchiostro su carta, vengono depositati su un vassoio strati di fotopolimeri liquidi che via via solidificano attraverso raggi UV.



Figura 2.3 – Stampante PolyJet

Il software di preparazione della stampa 3D (in dotazione con la stampante 3D) calcola automaticamente il posizionamento dei fotopolimeri e dell'eventuale materiale di supporto elaborando un file CAD 3D.

Successivamente vengono depositate e polimerizzate con raggi UV minuscole gocce di fotopolimeri liquidi. Strati sottili vengono accumulati l'uno sopra l'altro sul vassoio di stampa creando un pezzo tridimensionale preciso.

Se i modelli da stampare presentano sporgenze o forme che richiedono un sostegno, la stampante 3D deposita contemporaneamente il materiale di supporto rimovibile (simile a un gel).

Completata la stampa del modello 3D, l'operatore rimuove facilmente i materiali di supporto con le mani o con dell'acqua. Una volta asciutti, i modelli 3D sono pronti per essere usati senza bisogno di ulteriori trattamenti.

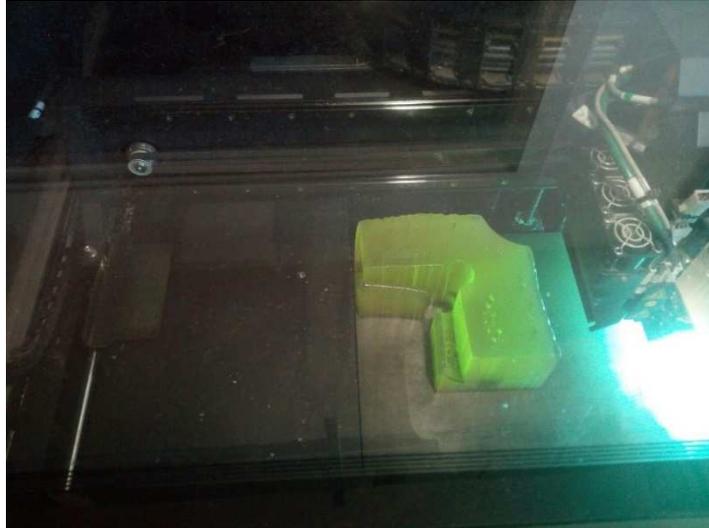


Figura 2.4 – Particolare durante una stampa con tecnologia PolyJet

La tecnologia PolyJet permette di creare prototipi di precisione che simulano perfettamente il prodotto finito. Grazie al layer da 16-32  $\mu\text{m}$  la precisione è quasi assoluta ( $\pm 0,1\text{mm}$ ) e la qualità superficiale è ottima.

Inoltre, la capacità delle stampanti 3D PolyJet di utilizzare più materiali contemporaneamente offre diverse possibilità come il co-stampaggio, l'uso di materiali completamente trasparenti, l'uso di materiali sterilizzabili e bio-compatibili, la stampa di prototipi 3D a colori.

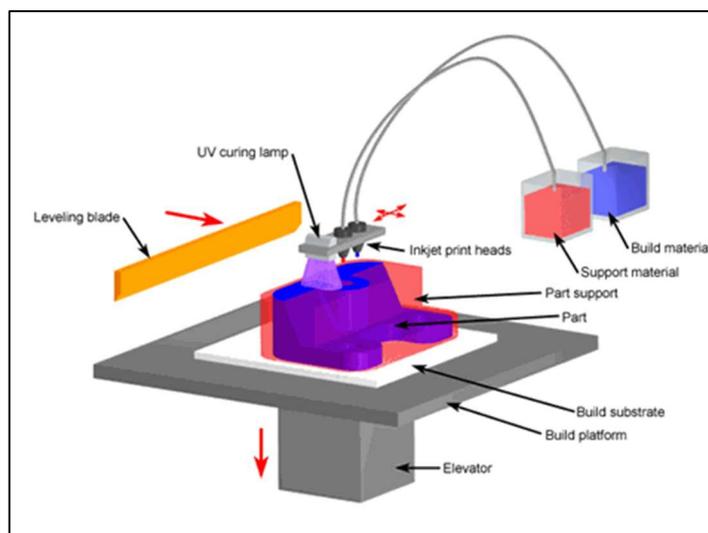


Figura 2.5 – Schema di funzionamento della tecnologia PolyJet

### 2.2.3 Selective Laser Sintering (SLS)

Nel processo SLS, particelle microscopiche del materiale di costruzione (polimeri, metalli, ceramica, vetro, o qualsiasi materiale che può essere polverizzato) sono esposte ad un laser di elevata potenza che le fonde insieme per formare un oggetto solido tridimensionale [22]. La polvere viene inizialmente rilasciata su una piattaforma per creare uno strato di circa 0,1 mm e, successivamente, viene colpita dal laser che la fonde in uno strato compatto.

Le polveri non sinterizzate sul piano costituiscono il supporto per gli strati successivi fino alla realizzazione dell'oggetto completo.

Al termine della lavorazione l'oggetto viene rimosso e separato dalle polveri non sinterizzate che, in parte o totalmente, possono essere riutilizzate.

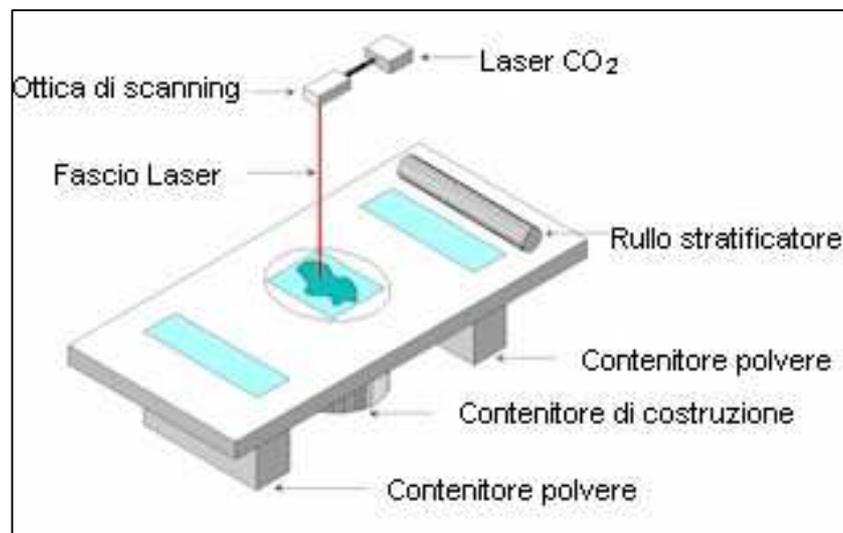


Figura 2.6 – Schema di funzionamento della tecnologia SLS

La tecnologia SLS può essere utilizzata sia per la realizzazione di prototipi estetici, con elevati livelli di finitura, sia per produrre oggetti funzionali con tempi molto rapidi.



Figura 2.7 – Stampante SLS

### 2.3. Materiali per l'Additive Manufacturing

Nel suo sviluppo iniziale, la tecnologia di AM è stata applicata per la produzione di prototipi in plastica e molti processi di AM (ad esempio SLA, SLS, FDM) sono stati sviluppati inizialmente per produrre parti con varie materie plastiche.

Successivamente, grazie alla continua ricerca in questo settore, la tecnologia di AM è diventata sempre più in grado di produrre componenti con forme complesse e con materiali che possono essere utilizzati direttamente come parti funzionali, quali polimeri, metalli, ceramiche e materiali compositi [26].

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva in cui sono evidenziate le diverse tecnologie AM associate alle quattro principali famiglie di materiali [27].

TECNOLOGIA	POLIMERI	METALLI	CERAMICHE	COMPOSITI
SLA	•		•	•
FDM	•		•	
SLS	•	•	•	•
PolyJet	•		•	•
LOM	•	•	•	•
LENS	•			
3DP	•		•	•

Tab. 1 – Tecnologie AM associate alle quattro principali famiglie di materiali.

## **Polimeri**

A questa categoria appartengono i materiali termoplastici e materiali termoindurenti [26].

### **Polimeri termoplastici**

Vengono indicati con il nome di termoplastici quei polimeri che presentano al riscaldamento forti decrementi di viscosità, divenendo malleabili, per poi riacquistare lo stato rigido durante il successivo raffreddamento e conservare la forma impartita: la trasformazione è reversibile anche se c'è sempre una certa degradazione che limita il numero di cicli possibili. Tale possibilità dipende dalla qualità della materia prima trattata.

Tra questi materiali, quelli maggiormente impiegati nel campo dell'AM sono polietilene (in campo biomedico è molto usato il Polietilene ad ultra-alto peso molecolare (UHMWPE)), ABS, PLA, Nylon.

### **Polimeri termoindurenti**

Vengono indicati con il nome di termoindurenti quei polimeri che, in opportune condizioni di temperatura e/o in presenza di particolari sostanze, si trasformano in materiali rigidi, insolubili e infusibili. Questa trasformazione si verifica a seguito a reazioni di reticolazione (processo tramite il quale le catene polimeriche vanno incontro a una reazione che crea legami fra diverse catene a livello di gruppi funzionali reattivi) dette curing che avvengono fra le catene polimeriche con formazione di legami forti (covalenti o ionici). Alcuni polimeri

termoindurenti vengono reticolati per mezzo del solo calore oppure attraverso combinazioni di pressione e calore, mentre altri possono essere reticolati attraverso reazioni chimiche a temperatura ambiente (reticolazione a freddo). Tali polimeri sono difficilmente riciclabili in quanto i nuovi legami formati a seguito delle operazioni di reticolazione sono definitivi. I due polimeri termoindurenti più noti sono il poliuretano (PU) e il teflon (o politetrafluoroetilene PTFE); quest'ultimo viene utilizzato nell'industria chimica per la realizzazione di guarnizioni e parti destinate al contatto con agenti corrosivi stante la sua inerzia chimica.

## **Metalli**

I prodotti metallici possono essere fabbricati utilizzando i processi AM in modo "indiretto" in cui viene utilizzato un legante per legare particelle di metallo che formano una parte 3D e successivamente è richiesta un'ulteriore lavorazione dopo il processo AM, o in modo "diretto", in cui le particelle di metallo sono completamente fuse dal processo AM per realizzare direttamente la parte finale. Nel caso dei materiali metallici le tecnologie di additive manufacturing rappresentano una valida alternativa alle soluzioni tradizionali, attuabile per specifiche tipologie di metalli puri o di leghe. Ogni tecnica comporta un grado di dettaglio, una finitura superficiale, una densità e delle proprietà meccaniche strettamente correlate ai processi ai quali sono sottoposti i materiali durante la deposizione degli strati [25-28].

Le attuali tecnologie additive sono in grado di processare metalli refrattari, come ad esempio cobalto, nichel e tungsteno (utili per la realizzazione e riparazione di componenti per applicazioni alle alte temperature), acciai da utensili ed inossidabili, metalli o leghe leggere a base di titanio, alluminio e rame (per applicazioni in campo aerospaziale e biomedicale).

Le leghe di titanio, in particolar modo la lega Ti-6Al-4V, sono tra i materiali fondamentali in settori quali quello aerospaziale e soprattutto quello biomedico,

grazie alle ottime combinazioni di proprietà meccaniche con un buon comportamento alla corrosione. Tuttavia, il motivo principale per cui non si usano in quantità considerevoli è dovuto al prezzo elevato rispetto ad altri materiali.

Le metodologie più diffuse per la produzione, mediante tecnica additiva, delle leghe di titanio sono l'EDM e il SLS. La prima tecnologia offre una migliore finitura superficiale, poiché utilizza una dimensione del raggio più piccola e minore spessore dello strato rispetto alle tecnologie laser. Come conseguenza però, si ha che la velocità di deposizione è inferiore rispetto al SLS e quindi il processo risulta più agevole, per tempistica, in caso di utilizzo della sinterizzazione.

### **Materiali ceramici**

L'importanza dei materiali ceramici deriva anche dalle loro proprietà meccaniche e fisiche che li distinguono dagli altri materiali. Tuttavia le prestazioni sono poco prevedibili a causa della natura casuale delle imperfezioni nella loro struttura e dell'influenza delle variabili di lavorazione, in particolare per quanto riguarda i prodotti in ceramica tradizionale.

Questi materiali sono molto fragili e duri, il che li rende difficili da produrre, in particolare per la produzione di parti con geometrie complesse.

Hanno buone caratteristiche di resistenza a compressione ma scarse di resistenza a trazione, con un bassi valori di tenacità a frattura [29]. Grazie all'elevata durezza hanno una buona resistenza all'usura.

Grazie all'elevata temperatura di fusione hanno un ottima resistenza alle alte temperature ed un basso coefficiente di dilatazione che le rende spesso utilizzate come isolanti termici e refrattari [30].

Grazie ai legami forti che le compongono hanno anche ottima stabilità chimica, non si degradano né a contatto con l'acqua né con solventi organici, che le rende spesso usate in applicazioni per laboratori, ospedali e per i sanitari.

Ceramiche industriali (ad es.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ), ceramiche avanzate (ad es. piombo zirconato di titanio (PZT)) e ceramiche biocompatibili (ad esempio idrossiapatite, usata come riempitivo per sostituire ossa amputate, oppure come rivestimento per stimolare la crescita ossea all'interno di impianti protesici) sono state studiate per fabbricare parti porose e dense usando processi di AM come FDM, SLS, 3DP, SLA, PolyJet e LOM.

### **Materiali compositi**

I materiali compositi sono materiali composti da due o più materiali costitutivi con proprietà fisiche o chimiche significativamente differenti che rimangono separate e distinte a livello macroscopico o microscopico all'interno della struttura completa, ma presentano proprietà che non possono essere raggiunte da nessuno dei materiali singolarmente. I materiali in un composito possono essere miscelati uniformemente, ottenendo un composto omogeneo (composito uniforme), o non uniformemente, ottenendo un composto non omogeneo (ad esempio, Functionally Graded Material (FGM)) [31] caratterizzati dalla variazione graduale della composizione e della struttura sull'intero volume, con conseguenti variazioni corrispondenti delle proprietà del materiale [32]. I materiali possono essere progettati per funzioni e applicazioni specifiche.

I materiali compositi che possono essere prodotti con la tecnologia di AM includono matrici polimeriche, matrici ceramiche, matrici metalliche e materiali compositi rinforzati con fibre e con particelle.

## 2.4. Design per l'Additive Manufacturing

Il Design for Additive Manufacturing (DfAM) ha come scopo quello di massimizzare le prestazioni [33] del prodotto attraverso la sintesi di forme, dimensioni, strutture gerarchiche e composizioni di materiali, soggetta alle capacità delle tecnologie di AM [34,35].

Per trarre vantaggio dai processi di AM, è necessario identificare le loro specifiche capacità di produzione così come i vincoli che devono essere rispettati.

La fase di DfAM riguarda sia lo studio e il rispetto dei vincoli legati direttamente alla tecnologia di AM scelta per la produzione di un componente [37], sia l'aspetto legato alla modellazione solida mediante software CAD.

Tra i diversi vincoli dei processi di AM ne sono stati identificati alcuni che maggiormente si presentano in questi processi [39,40].

Un primo vincolo può essere rappresentato dalla velocità di deposizione di materiale che dipende principalmente dalla velocità dell'ugello e dalla quantità di materiale spruzzato con l'ugello. Di conseguenza, fasi di accelerazione e decelerazione possono causare variazioni di altezza del materiale depositato. La ripetizione di questo il fenomeno può causare l'arresto della produzione (in particolare perché se la distanza tra l'ugello e la superficie è troppo grande, le gocce fuse si solidificano prima atterrando sulla superficie) o comunque la realizzazione di componenti con presenza di difetti che possono portare alla loro rottura immediata o, in ogni caso, ad un non corretto funzionamento. Per evitare questo, le fasi di accelerazione e decelerazione devono essere ridotte al minimo, ad esempio evitando angoli taglienti e sostituendoli con le curve.

Altri vincoli riguardano, ad esempio la dissipazione del calore. Per evitare la non fusione della polvere sotto lo strato prodotto dalla fusione durante la costruzione, i supporti devono essere utilizzati per dissipare il energia. Il loro scopo è anche quello di prevenire il collasso di metallo fuso (o sinterizzato) all'interno del letto di polvere quando si realizza la fabbricazione di grandi superfici a sbalzo. Inoltre,

in caso di processi che mostrano un'elevata distorsione termica, i supporti irrigidiscono la parte e ne impediscono le distorsioni.

Un altro vincolo nei processi di AM è la necessità di rimuovere la polvere dalla parte una volta che è stata costruita: ciò potrebbe danneggiare il componente non adeguatamente progettato.

Altro aspetto importante da tenere in considerazione durante la fase di progettazione di un componente mediante tecnologie di AM è l'influenza dei parametri di processo, ed in particolar modo dello spessore del layer. Questo, infatti, ha notevole influenza sia sulla finitura superficiale di un pezzo, ma anche sulle sue caratteristiche meccaniche.

Come detto in precedenza, altro aspetto legato alla fase di DfAM è quello relativo alla modellazione solida.

La realizzazione di un componente mediante processi di AM implica che il relativo modello CAD creato deve soddisfare alcune specifiche condizioni (quali ad esempio spessori delle parti, superfici regolari, evitare compenetrazioni fra parti, ecc.) per poter effettuare la stampa 3D ed ottenere un componente che risponda a pieno ai requisiti di progetto prefissati.

Oggi, l'AM è una tecnica di produzione digitale diretta altamente automatizzata che discretizza un modello digitale del manufatto e genera percorsi utensile della macchina, maschere digitali e altre istruzioni per produrlo [40]. Questo impone il primo grosso vincolo: i progettisti devono creare modelli digitali globali e completi del prodotto finale. Dal momento che ci sarà poco o nessun intervento umano nella traslazione del modello digitale al prodotto fisico, i modelli CAD per l'AM devono essere di elevata qualità e contenere più informazioni complete di quelle tradizionalmente necessarie per altri processi tecnologici.

La realizzazione di modelli digitali per l'AM è una fase impegnativa della progettazione, perché la maggior parte dei software CAD disponibili in commercio sono sistemi parametrici adatti per modellare le geometrie associate a processi di produzione tradizionali (estrusioni, rivoluzioni, loft) ma spesso

inadeguati per le forme più organiche e geometrie più complesse associate ad AM.

In letteratura vengono presentati due metodi comuni per superare alcune delle limitazioni geometriche legate ai sistemi CAD: la modellazione tattile (Haptic modeling) e il reverse engineering.

L'haptic modeling è un metodo di scultura, modellazione virtuale che utilizza uno strumento palmare a ritorno di forza per interagire con un modello CAD 3D, il quale dà all'utente la sensazione di toccare fisicamente una sorta di "argilla virtuale" da poter modellare ed è quindi è molto più adatto alla creazione di forme libere.

Un'alternativa per generare forme organiche e complesse dal nulla è quello di avviare il processo di modellazione mediante scansione 3D di un oggetto fisico esistente. Questo è particolarmente adatto per lo sviluppo di modelli basati su dati anatomici, ma può essere utilizzato anche su modelli in argilla, schiuma o altro materiale. I dati scansionati vengono elaborati ed esportati in formato STL e successivamente lavorati e convertiti prima in superfici NURBS e poi in modello CAD.

Indipendentemente da come vengono generati, i modelli CAD spesso hanno bisogno di ulteriori modifiche e preparazione dei dati prima che possano essere convertiti nelle istruzioni della macchina.

Altra soluzione per superare alcune delle limitazioni geometriche legate ai sistemi CAD è il ricorso alla modellazione parametrica mediante algoritmi generativi, i quali permettono di creare modelli CAD aventi geometrie e superfici complesse, senza subire deformazioni o alterazioni delle forme e dimensioni.

Quest'ultima soluzione sarà oggetto di un capitolo successivo di questo lavoro di ricerca.

## 2.5. Applicazioni di Additive Manufacturing in campo biomedico

Nel campo biomedico sono diverse le opportunità di applicazione della tecnologia di AM [44,45], grazie allo sviluppo di nuovi materiali e tecnologie di stampa.

L'AM è utilizzata in modo significativo per la realizzazione di componenti con biomateriali, di nuove protesi e dispositivi ortopedici [11], di protesi maxillo-facciali personalizzate; ma anche per applicazioni in odontoiatria [42], nel settore cardiovascolare, nella realizzazione di scaffold nel settore dell'ingegneria tissutale [43] e della medicina rigenerativa.

Nella figura di seguito, vengono riportati alcuni esempi di applicazioni della tecnologia di AM nel settore biomedico.





Figura 2.8 – Esempi di applicazioni della tecnologia AM

Il processo per la realizzazione di dispositivi e strutture biomedicali tramite AM è simile per la maggior parte dei casi [11].

Il primo passo è l'acquisizione delle parti interne o esterne del corpo del paziente relativamente all'applicazione da realizzare.

Nel primo caso si fa uso di tecnologie di Tomografia Computerizzata (TC) o Risonanza Magnetica; nel secondo caso le parti esterne del paziente vengono acquisite mediante scanner 3D.

Successivamente, i dati acquisiti vengono elaborati mediante software dedicati (differenti per i due casi) al fine di ottenere un modello CAD, il quale viene poi esportato in formato STL per poter essere importato nella macchina per la tecnologia di AM scelta.

Dopo aver creato il modello CAD in formato STL le variabili di input come materiale, spessore del layer, velocità di stampa, temperatura di stampa, orientamento, contorni, temperatura / condizioni ambientali ed altri parametri, possono essere selezionate sulla base dell'analisi della letteratura o dell'esperienza personale.

Tuttavia possono verificarsi alcuni problemi quali: caratteristiche superficiali scadenti, scarsa precisione dimensionale, bassa resistenza, biocompatibilità, problemi di microstruttura. Tali problemi sono ad oggi oggetto di continui studi.

In questo lavoro ci si è occupati principalmente dell'applicazione della tecnologia di AM nel settore delle ortesi ortopediche, ed in particolare della

customizzazione di tali dispositivi medicali, rispettando gli aspetti della funzionalità, dell'ergonomicità e dell'estetica, per soddisfare a pieno i bisogni dei pazienti. L'AM è una tecnologia ideale per la realizzazione di ortesi customizzate, soprattutto per la sua capacità di poter realizzare forme complesse in poco tempo e con costi contenuti.

## 3. ADDITIVE MANUFACTURING TEXTILE

### 3.1. Additive Manufacturing Textile

Le strutture tessili realizzate mediante tecniche di AM hanno ricevuto crescente attenzione nel corso del tempo. La ricerca nell'area dell'Additive Manufacturing Textile (AMT) si è principalmente concentrata sullo sviluppo di strategie di modellazione efficienti per la creazione di modelli CAD necessari per la fabbricazione di strutture tessili mediante tecniche AM [46].

Grazie alla possibilità di creare strutture complesse ed impiegare materiali innovativi, le strutture tessili in AM presentano una serie di opportunità per progettare e sviluppare nuove soluzioni per applicazioni tessili convenzionali e ad alte prestazioni [47].

Ciò ha spinto diversi mercati di nicchia come quello del tessile smart (smart textile) e ad alte prestazioni ad utilizzare tali tessuti.

I tessuti intelligenti sono definiti così per la loro capacità di percepire gli stimoli dall'ambiente esterno e di reagire e adattarsi ad essi tramite l'integrazione di funzionalità all'interno della struttura tessile.

Per i tessuti ad alte prestazioni, il punto fermo rimane la funzionalità meccanica, come l'alta resistenza o traspirabilità; quindi con il termine tessuti ad alte prestazioni non sono indicati anche i tessuti intelligenti.

Tuttavia, perchè il settore dei tessuti smart e ad alte prestazioni diventi una realtà manifatturiera consolidata, in particolare nella realizzazione di articoli su misura, occorre affrontare diversi problemi di base. Quello sicuramente più importante riguarda la loro complessità geometrica e la conseguente necessità di scegliere una tecnica di produzione adeguata.

Questo problema può essere risolto sfruttando i vantaggi offerti dalle tecnologie di AM nel poter realizzare oggetti con forme complesse e su misura.

Tuttavia, nonostante il grande potenziale del settore dell'AMT, si tratta ancora di un'area nuova e che richiede una continua e significativa ricerca.

### 3.2. Modellazione CAD di strutture AMT e limitazioni

La modellazione 3D delle strutture AMT è difficile con i software CAD tradizionali; tuttavia, i modelli planari di tali strutture possono essere realizzati utilizzando la funzione "Array" o "Patterning" comune alla maggior parte dei sistemi CAD. I modelli planari possono essere generati come array a quadrilatero o a base triangolare come mostrato nella figura seguente.

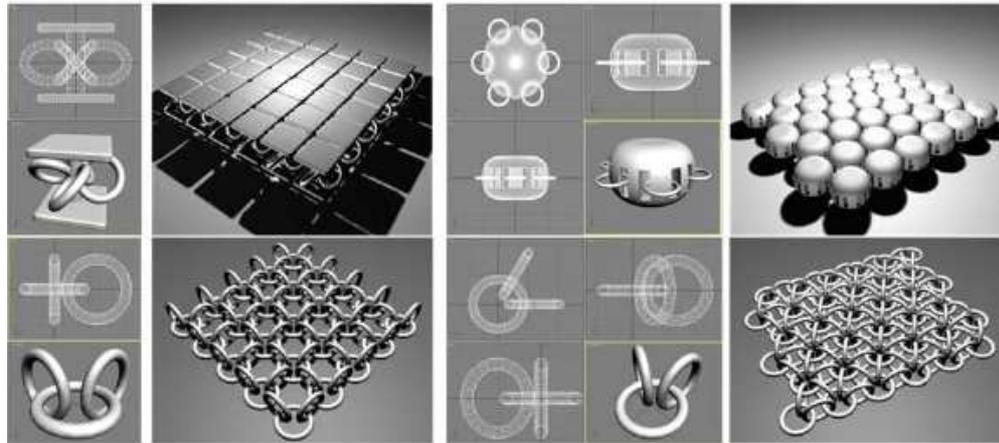


Figura 3.1 – Modelli di strutture di AMT

Le limitazioni associate agli attuali sistemi CAD riguardano, invece, la capacità di generare strutture tessili net-shape o conformi, ovvero strutture che si adattano perfettamente a superfici complesse. Mentre è possibile generare strutture net-shape semplici (ad es. strutture cilindriche), la generazione di forme più complesse, come ad esempio modelli emisferici o altri con superfici più complesse, è problematica e può comportare una tassellazione errata delle singole strutture di collegamento, come dimostrato nella figura 3.2 .

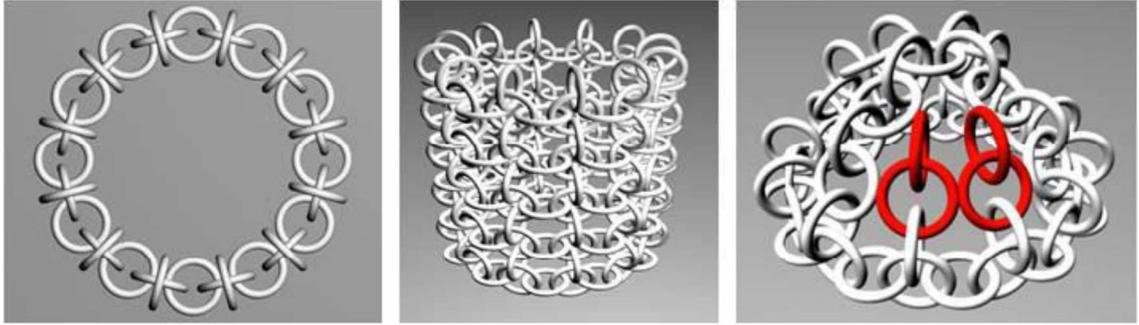


Figura 3.2 – Modelli di strutture di AMT cilindrica ed emisferica

Il problema risiede nella capacità di descrivere con precisione le posizioni dei singoli collegamenti nello spazio 3D. Per i campioni planari, le posizioni dei collegamenti sono limitate a un piano 2D e descritte dalla funzione 'Array'. Ciò genera una serie della geometria originale a valori impostati in entrambi gli assi X e Y. Tuttavia, non esiste tale funzionalità per descrivere accuratamente una matrice 3D e l'alternativa disponibile è la modifica manuale dei singoli collegamenti da parte del modellatore CAD. Se da un lato questa alternativa potrebbe essere tollerata per manufatti tessili piccoli, la modellazione di strutture tessili più grandi, che possono incorporare centinaia o forse migliaia di collegamenti individuali, sarebbe poco pratica e dispendiosa.

Altro problema che si ha nel passaggio dalla modellazione CAD di modelli planari alla modellazione 3D di strutture AMT conformi e net-shape è dovuto al fatto che non solo deve essere mantenuta la separazione dei collegamenti, ma occorre considerare anche la direzione normale della superficie ed eventuali rotazioni per garantire la corretta tassellatura dei singoli collegamenti.

Nella realizzazione di strutture semplici che presentano simmetria radiale, per esempio un toroide, la considerazione della rotazione non è un problema. Tuttavia, la direzione normale della superficie rimane di fondamentale importanza per la creazione di una struttura tessile conforme. L'importanza della normale alla superficie è dimostrata nella figura 3.3, nella quale è illustrato un esempio di curva semplice. Da sinistra a destra, l'immagine mostra la direzione normale della curva in diverse posizioni (indicata dalla freccia), una serie di

collegamenti che non seguono la normale alla superficie della curva, ed infine mostra la superficie normale correttamente calcolata.

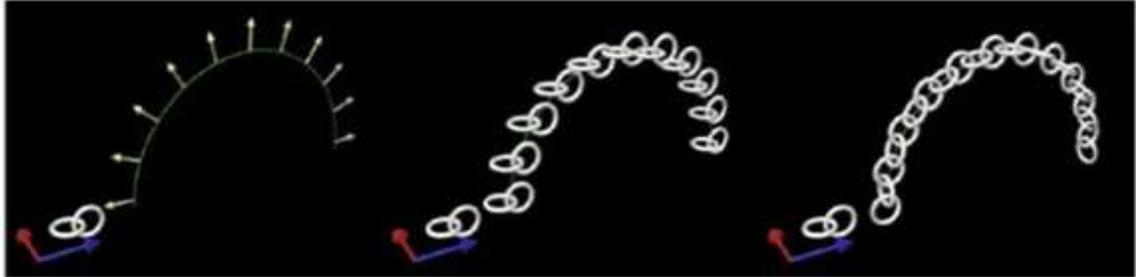


Figura 3.3 – Esempio di normale e tassellazione di una catena di anelli

In definitiva, una singola struttura di collegamento tessile può essere progettata con un livello estremamente elevato di complessità geometrica. Tuttavia, le difficoltà si incontrano quando si tenta di combinare questi collegamenti in strutture AMT conformi o net-shape. In questo caso, il requisito non è la creazione di una matrice singolare o lineare e circolare di geometrie complesse singole, ma la creazione automatizzata di una serie uniformemente distribuita di geometrie complesse, anche migliaia a seconda del modello che si vuol realizzare, che alla fine crea la struttura tessile. Poiché le geometrie complesse (a doppia curvatura) difficilmente possono essere descritte con precisione da qualsiasi semplice funzione array o patterning all'interno dei sistemi CAD attuali e attualmente non esiste alcuna funzione di mappatura automatica per sostituire la necessaria manipolazione delle singole geometrie di collegamento, la generazione di strutture AMT conformi presenta ancora molti limiti.

In un capitolo successivo verrà presentato il lavoro svolto che ha portato allo sviluppo di un nuovo approccio per ridurre queste restrizioni, consentendo di modellare strutture tessili AM complesse in modo parametrico ed efficiente.

### 3.3. Design per Additive Manufacturing Textile

Il processo di progettazione di strutture AMT ha come scopo quello di massimizzare le prestazioni del prodotto attraverso la sintesi di forme, dimensioni, strutture gerarchiche e composizioni di materiali e attraverso la realizzazione di strutture reticolari regolari [50].

Questo processo è caratterizzato dai seguenti fattori:

- modellazione della struttura di collegamento: ogni tipo di struttura di collegamento ha la sua caratteristica unica in termini di prestazione fisica e meccanica, ma incide anche sull'estetica del prodotto finale. Di seguito sono riportati alcuni esempi di unità base per la modellazione di strutture AMT;



Figura 3.4 – Esempio di unità base per la modellazione di strutture AMT

- scelta dei materiali: la selezione del materiale da impiegare per la realizzazione della struttura tessile influenza sia le caratteristiche fisiche e meccaniche del prodotto finito, ma anche la modellazione della struttura stessa dovendo tener conto della possibilità di deformazione o meno dell'unità base. Inoltre, l'impiego di alcune tecnologie di AM consente di

produrre strutture con materiali differenti ed ottenere così prodotti con caratteristiche customizzate per le specifiche applicazioni;

- scelta dei parametri strutturali: i principali parametri strutturali di un'unità base includono la dimensione e la forma dell'unità (filo, detto anche link, o geometria differente), l'angolo di orientamento dell'unità, il numero di unità base e dimensioni della struttura. Nelle tecnologie di AM, lo spessore delle unità di base, se non scelto in maniera adeguata, può portare alla realizzazione di componenti molto sottili che determinano strutture instabili o la rottura anticipata della struttura stessa;
- scelta della tecnologia AM: ovviamente la scelta della tecnologia di AM da impiegare influenza l'intero processo di progettazione della struttura. Questa selezione avviene in funzione di alcuni fattori quali la funzionalità e le caratteristiche che deve avere la struttura finale, costi, tempi di produzione, tipologia di materiale impiegabile;
- risoluzione: indica la dimensione più piccola che può essere stampata da una macchina di produzione additiva. È generalmente descritta come punto (spot) per unità di lunghezza. Ovviamente, maggiore è la risoluzione, maggiore è il numero di spot per unità di lunghezza da stampare e possono essere realizzati oggetti con elevati dettagli. Inoltre, la risoluzione gioca un ruolo importante nei tempi di costruzione. Un alto valore della risoluzione implica un numero maggiore di tracce di stampa che richiedono più tempo per essere realizzate;
- spessore del layer: lo spessore del layer influenza il tempo di costruzione e la finitura della superficie. Per una determinata altezza dell'oggetto, un valore di spessore più elevato significa un numero inferiore di strati e una maggiore velocità di fabbricazione. Di contro, uno spessore elevato dello

strato porta anche ad un evidente effetto gradino e quindi una scarsa finitura superficiale che rende il prodotto finale anche esteticamente deludente.

### 3.4. Applicazioni di Additive Manufacturing Textile

Nel settore dell'AMT, grazie alla grande libertà di progettazione e produzione di strutture con forme irregolari e fantasiose, il link o il modulo da collegare possono essere qualsiasi geometria più o meno complessa. La geometria collegabile deve avere la capacità di interconnessione con le strutture adiacenti e fornire gradi di libertà per eventuali movimenti, e questo è l'unico requisito posto su di esso (quindi la geometria collegabile potrebbe essere quasi qualsiasi struttura, smart o semplice, progettata per una particolare funzionalità).

Nelle due immagini di seguito sono riportati due esempi di link e struttura collegabile. Nella prima si osserva come la struttura si realizza mediante l'utilizzo di un filo di collegamento, mentre nella seconda si crea la struttura mediante un'unità di collegamento ad anello.

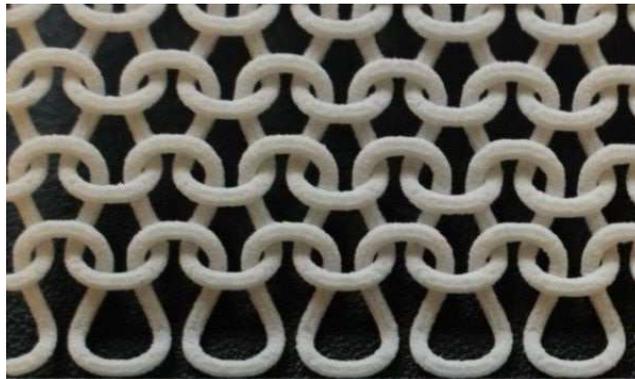


Figura 3.5 – Esempio di link di collegamento per la modellazione di strutture AMT

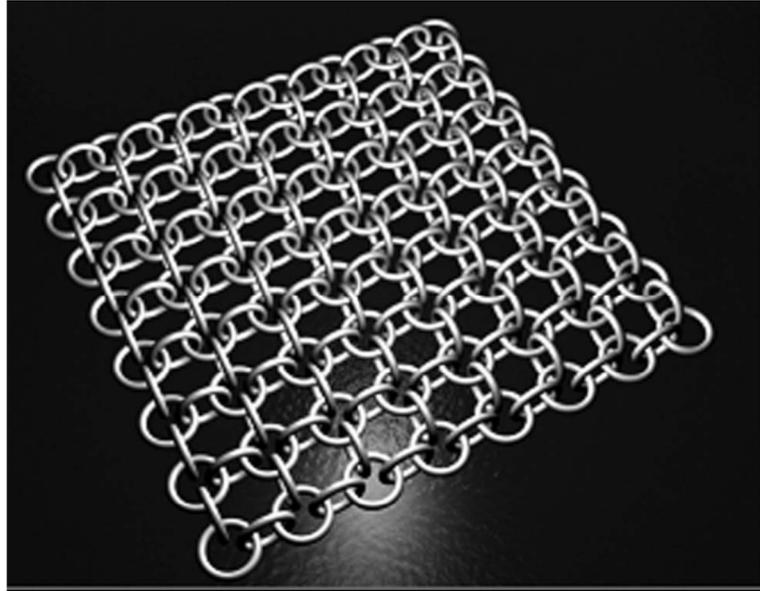


Figura 3.6 – Esempio di unità collegabile per la modellazione di strutture AMT

Per quanto riguarda le applicazioni dell'AMT, queste sono diverse: realizzazione di strutture tessili smart, strutture tessili ad elevate prestazioni, ma anche nel settore dell'abbigliamento, delle calzature, degli accessori e del design in generale.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di applicazioni dell'AMT.





Figura 3.7 – Esempi di applicazioni di AMT

Per quanto riguarda il settore dei dispositivi medicali, quali ortesi ortopediche, l'impiego della tecnologia di AMT non è ancora molto diffusa, infatti, sono pochi i casi riscontrabili in letteratura.

Un'applicazione è riportata nell'immagine seguente ed è riferita ad un'ortesi per il polso realizzata alla Loughborough Design School della Loughborough University (UK).



Figura 3.8 – Esempio di applicazione di AMT ad un ortesi per il polso

### **3.4.1. Applicazioni di Additive Manufacturing Textile per strutture in materiale composito**

Gli attuali metodi di produzione additiva presentano il potenziale per costruire strutture net-shape con geometrie complesse, eliminando così la necessità di elaborazione multi-step e fissaggi/giunti.

In aggiunta a queste caratteristiche vi è la capacità di attribuire proprietà del materiale alla scala sub-millimetrica, ispirando progettazioni di strutture multi-materiale. Queste caratteristiche rendono la produzione additiva un'opzione attraente per lo sviluppo strutture in materiali compositi [50].

I compositi tradizionali sono costituiti da una fase di rinforzo tenuto insieme da un legante; le loro proprietà meccaniche e fisiche possono essere personalizzati attraverso una corretta selezione dei materiali costitutivi e tecniche di elaborazione, come la progettazione dei parametri microstrutturali. Tra i parametri microstrutturali, i rinforzi possono essere sotto forma di particelle

separate, fibre continue, tessuti intrecciati bidimensionali o preformati tridimensionali. Nei preformati 3D, le fibre sono generalmente allineate lungo più di una direzione. Grazie alle loro caratteristiche uniche, inclusa proprietà meccaniche fuori dal piano, ampia progettualità strutturale, integrità strutturale migliorata, tolleranza ai danni e efficacia dei costi, i preformati tessili multidirezionali hanno trovato ampie applicazioni industriali.

Sebbene siano state sviluppate una serie di tecniche tradizionali di formatura dei tessuti per fabbricare preformati multidirezionali, rimangono alcuni limiti tecnologici fondamentali. Di conseguenza, la micro e macrostruttura di un preformato fabbricato possono differire da quelli del modello progettato e ottimizzato; ciò che porta a incertezze nelle previsioni di rendimento. I rapidi progressi nelle tecniche di produzione additiva hanno fornito una nuova possibilità nella produzione nel settore dei materiali compositi.

I tessuti multidirezionali rappresentano una classe di preformati per i compositi in cui le fibre di rinforzo sono orientate in più direzioni, tipicamente woven, braided, knitted.

Il processo di progettazione di tali strutture è analogo a quanto già descritto nel paragrafo 3.3.

Di seguito si riportano degli esempi di preformati multidirezionali di materiali compositi.

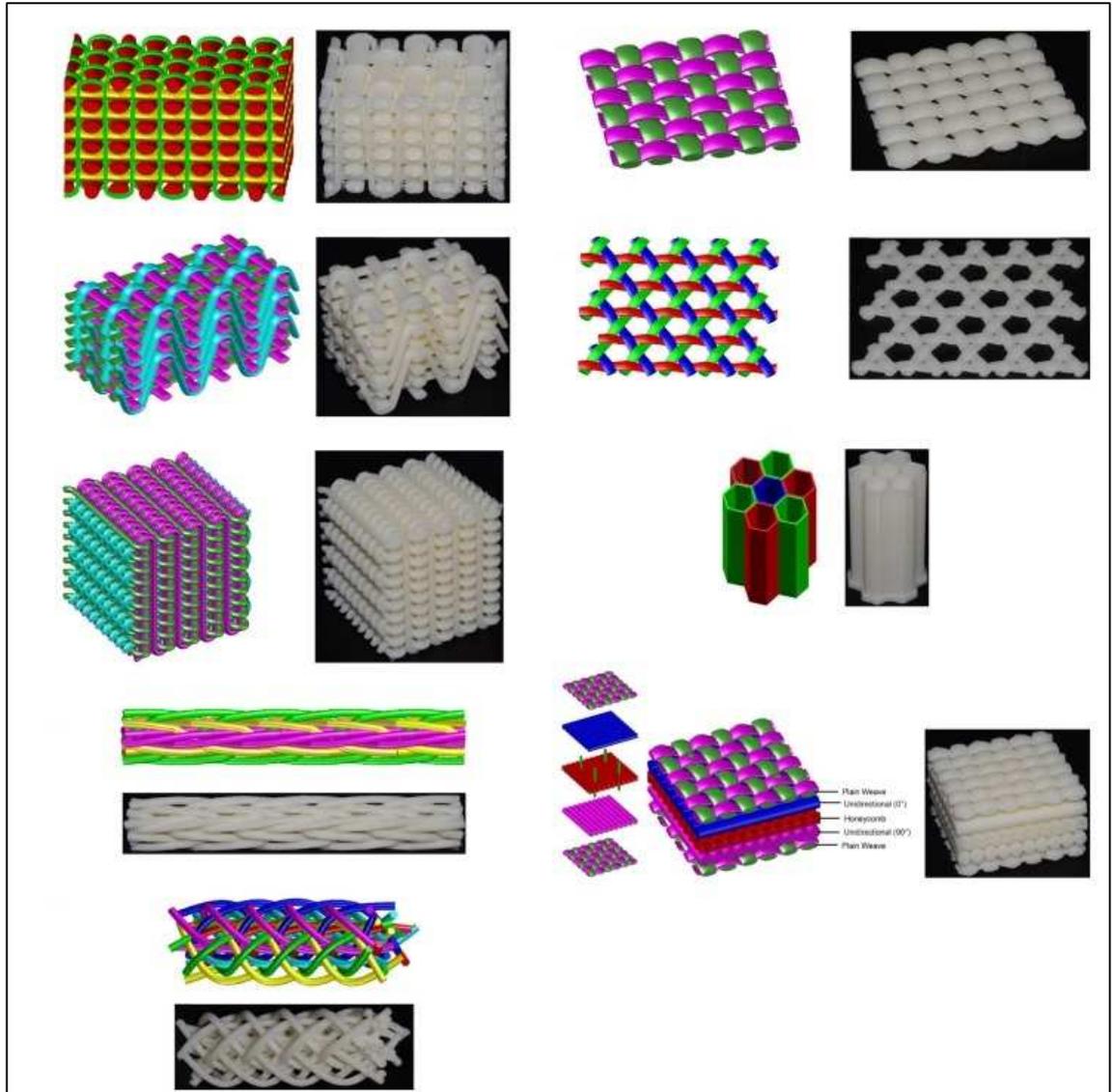


Figura 3.9 – Esempi di preformati multidirezionali di materiali compositi: a sinistra il modello e a destra la foto del componente realizzato

## 4. TECNICHE DI MODELLAZIONE PER ADDITIVE MANUFACTURING

### 4.1. Algoritmi generativi

La modellazione solida parametrica consente di generare i solidi mediante l'immissione di parametri numerici e di poter intervenire su questi parametri anche dopo aver realizzato il modello per modificarne e aggiornarne la geometria senza doverlo ricostruire.

Un aspetto importante nella modellazione solida parametrica è l'impiego di algoritmi generativi che consentono di superare alcuni possibili limiti dei modellatori classici.

Nella modellazione basata su algoritmi generativi, per lavorare con oggetti complessi, il processo progettuale parte da un primo semplice livello, al quale si aggiungono nuovi livelli costituendo dei blocchi funzionali più complessi. Questi livelli sono anche tra loro interconnessi, e i loro membri influiscono l'uno con l'altro. Tale metodo viene spesso definito "associativo".

In generale, la modellazione associativa si riferisce ad un metodo in cui gli elementi progettuali sono costruiti gradualmente in gerarchie multiple e, ad ogni livello, alcuni parametri di questi elementi sono estratti per generare altri elementi in un altro livello e questo procedimento va avanti, passo dopo passo, per produrre la geometria complessiva [51]. Quindi, ad esempio, il punto estremo di una curva può essere il centro di una circonferenza: ogni cambiamento nella curva comporta un cambiamento associato della circonferenza.

Fondamentalmente questo metodo di modellazione gestisce una grande quantità di dati e di calcoli e avviene attraverso il flusso degli algoritmi.

Caratteristica fondamentale della modellazione parametrica è che tutte queste geometrie sono facilmente regolabili dopo il processo. I progettisti hanno sempre accesso agli elementi di design del prodotto; essendo quest'ultimo frutto di un algoritmo, gli input dell'algoritmo possono essere modificati e il risultato può essere aggiornato di conseguenza [52].

## 4.2. Modellazione algoritmica con Grasshopper

Grasshopper è una piattaforma che attraverso Rhinoceros permette di creare algoritmi generativi.

L'interfaccia di Grasshopper presenta un pannello dei componenti e il canvas (tela). Il pannello dei componenti fornisce tutti gli elementi necessari per i vari progetti, mentre il canvas rappresenta l'area di lavoro dove inserire i componenti e creare i diversi algoritmi, costituiti dalla combinazione di blocchi input-output che eseguono operazioni su liste di dati, rappresentanti la geometria o altre caratteristiche del modello.



Figura 4.1 – Pannello dei componenti in Grasshopper

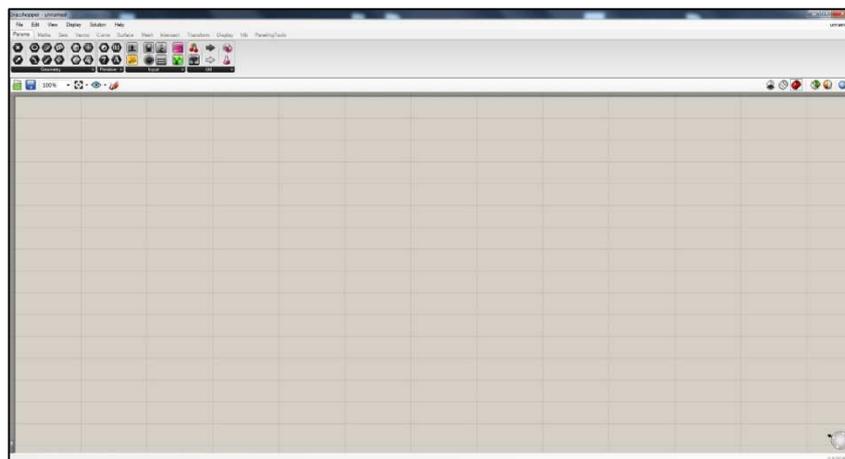


Figura 4.2 – Canvas di Grasshopper

Il passaggio di dati da un blocco all'altro avviene stabilendo dei collegamenti tra i blocchi per mezzo di "cavi" che trasportano flussi di dati dall'output del blocco che precede all'input del successivo, come mostrato in figura 4.3.

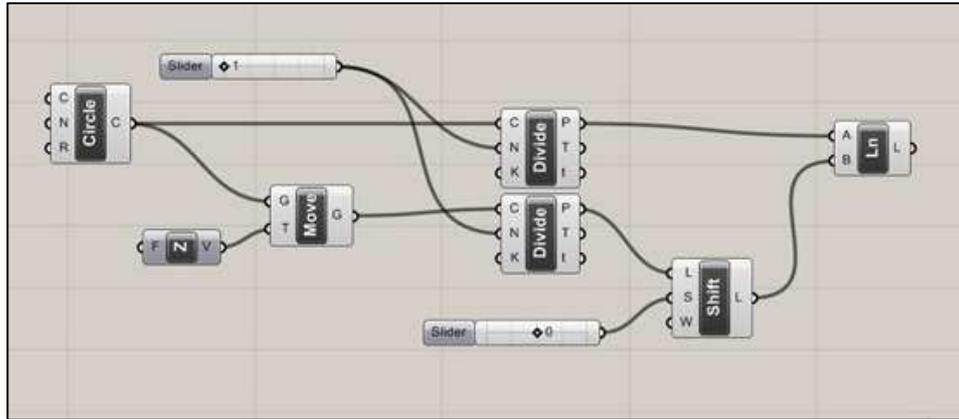


Figura 4.3 – Esempio di collegamenti in Grasshopper

L'ambiente, oltre alla grande quantità di blocchi che effettuano operazioni geometriche, dispone anche di numerosi strumenti supplementari per l'analisi strutturale o altri strumenti che offrono la possibilità di creare blocchi per altre funzioni. La possibilità di integrare diversi strumenti che eseguono differenti tipi di analisi e operazioni all'interno dello stesso ambiente, utilizzando una base di dati condivisa tra loro, rende Grasshopper uno strumento di progettazione estremamente flessibile. Oltre alla flessibilità, l'ambiente offre anche il vantaggio di automatizzare la procedura, velocizzando di molto l'esecuzione delle singole operazioni, sia di disegno che di calcolo, e aprendo inoltre la strada dell'utilizzo di procedure iterative.

#### 4.2.1. Principali funzionalità di Grasshopper

Nella modellazione parametrica mediante algoritmi generativi ci sono diverse azioni che si possono applicare ai componenti. Generalmente un componente prende dei dati da una o più sorgenti e restituisce dei risultati. Pertanto si connettono dei componenti che includono i dati in ingresso con dei componenti che li processano e, successivamente, si collegano a loro volta ad altri componenti che necessitano di questi risultati e così via, creando l'algoritmo e vedendo i risultati nell'area di lavoro di Rhinoceros [51].

Tra le innumerevoli funzionalità di Grasshopper, le principali sono:

- funzioni matematiche;
- trasformazioni;
- morphing.

### Funzioni matematiche

Nei software 3D si selezionano delle geometrie dai menù o si disegnano in maniera esplicita senza pensare agli aspetti matematici che stanno dietro; per poter lavorare, invece, con gli algoritmi generativi, dobbiamo pensare ai dati e alla matematica per creare dei valori in entrata per alimentare l'algoritmo e generare oggetti.

Il modo in cui un algoritmo lavora prevede che ci siano dei dati in ingresso, il processo di questi dati e un risultato in output; di conseguenza, nella modellazione parametrica mediante algoritmi generativi, si ha bisogno di procurare le informazioni necessarie, le quali verranno processate attraverso un algoritmo e verrà creata una geometria come risultato finale.

All'interno di Grasshopper vi sono diversi componenti numerici che possono essere combinati tra loro per poter generare diversi insiemi di dati numerici.

È possibile utilizzare i componenti quali il singolo valore numerico, serie di numeri, range di numeri, dominio o anche set di numeri casuali.

Inoltre è possibile utilizzare anche i componenti funzione capaci di eseguire funzioni matematiche su Grasshopper. Talvolta potrebbe essere necessario alimentare le funzioni con dati specifici (non sempre numeri, ma anche valori booleani o stringhe) che verranno eseguite in base agli input.

### Trasformazioni

Le trasformazioni sono operazioni fondamentali sia nella modellazione che nella geometria generativa: permettono di ottenere variazioni da semplici oggetti iniziali, quali la scala, l'orientamento, la copia o lo specchio delle diverse

geometrie. Esistono diversi tipi di trasformazioni. Una classificazione può essere fatta tra trasformazioni lineari attuate in uno spazio 2D e trasformazioni spaziali in uno 3D.

All'interno di Grasshopper è possibile utilizzare una serie di componenti quali piani, vettori e curve per poter effettuare le operazioni di trasformazione desiderate.

### Morphing e deformazioni

La deformazione e il morphing sono tra le funzioni più potenti nel campo del design free form.

Attraverso le deformazioni è possibile curvare ed inclinare le geometrie, mentre attraverso il morphing possiamo trasformare le geometrie da una condizione limite all'altra.

All'interno della trattazione della tecnica del morphing, vi sono due concetti fondamentali: geometrie NURBS e punti di controllo. Le NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) sono delle rappresentazioni matematiche della geometria 3D, le quali definiscono accuratamente qualunque forma: da una semplice linea, ad un cerchio, un arco o una curva, fino al più complesso solido o superficie a forma libera 3D. Grazie alla loro accuratezza e flessibilità, i modelli NURBS possono essere usati nei più svariati processi. Tra le caratteristiche principali di una geometria NURBS vi sono:

- grado
- punti di controllo
- nodi

I punti di controllo che compongono una curva NURBS sono una serie di punti in numero almeno pari al grado della curva stessa + 1. I punti di controllo sono quindi dei punti di riferimento su una curva e vengono utilizzati per modificarne la forma. Ad ogni punto di controllo è associato un peso (ovvero, la sua capacità di attrarre la curva). Quando i vertici di controllo di una curva hanno tutti lo

stesso peso (di solito 1), la curva viene denominata "non razionale". In caso contrario, è detta "razionale".

Uno dei modi più semplici per modificare la forma di una curva NURBS consiste nel variare la posizione dei suoi punti di controllo e dai relativi pesi.

Aumentando il valore del peso di un punto di controllo si avvicina la curva al punto stesso; viceversa il punto di controllo eserciterà una minor influenza sulla curva.

I nodi sono una serie di numeri pari a  $(\text{grado}+N-1)$ , ove N rappresenta il numero di punti di controllo. Questa sequenza di numeri che precisa la definizione parametrica della curva è detta anche "vettore dei nodi".

Per quanto riguarda la funzione deformazione, un esempio semplice potrebbe essere la deformazione di una sfera: in questo caso esiste un parallelepipedo limite (gabbia) attorno, la cui manipolazione deforma l'intera geometria.

In base al tipo di trasformazione si può avere un'inclinazione o deformazione libera. Per ogni funzione di deformazione, si potrà avere bisogno dell'intero parallelepipedo limite o solo uno dei suoi lati come piano oppure uno dei suoi punti. Se si è in grado di controllare i diversi componenti per le deformazioni, si possono facilmente trovare le costruzioni geometriche di base per ottenere la deformazione.

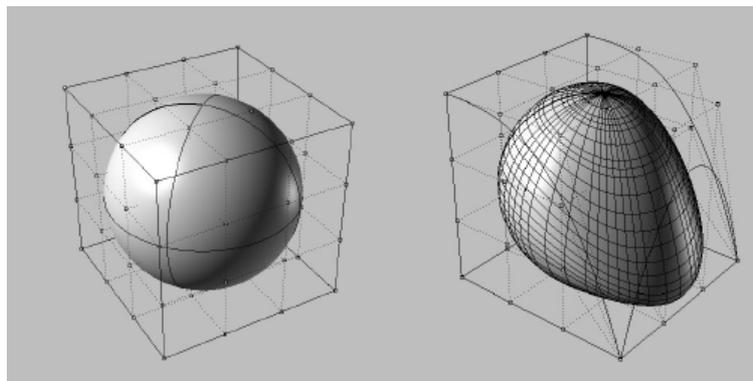


Figura 4.4 – Esempio di deformazione di una sfera in Grasshopper

Nel campo dell'industria cinematografica, il termine morphing indica la trasformazione fluida, graduale tra due immagini di forma diversa che possono essere oggetti, persone, volti, paesaggi.

I componenti di Morphing in Grasshopper lavorano allo stesso modo. Per esempio il componente "Box Morph" deforma un oggetto attraverso un parallelepipedo di riferimento (parallelepipedo limite) in un parallelepipedo destinazione (target box), mentre il componente "Surface morph" lavora con una superficie di base sulla quale è possibile, nel dominio specificato, deformare le geometrie e l'altezza dell'oggetto.

Una delle applicazioni più comuni del morphing è la pannellizzazione, ovvero la possibilità di dividere una superficie complessa in parti più piccole (dette componenti).

Come esempio, si suppone di avere una generica superficie a doppia curvatura e un componente da usare per la pannellizzazione (Fig.4.5).

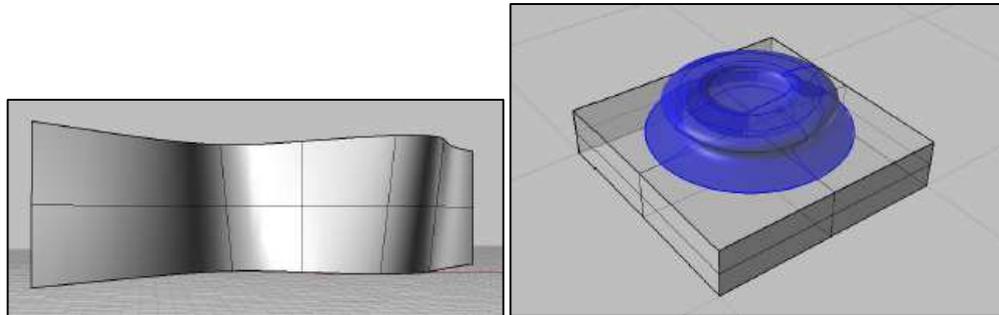


Figura 4.5 – Superficie e componente per la pannellizzazione

Si crea un modulo (un componente) da ripetere e si disegna la superficie. Successivamente si genera una serie di parallelepipedi sopra questa superficie (parallelepipedi bersagli) e quindi si "morfizza", ovvero si ripete il modulo dentro i parallelepipedi. Dopo questo passaggio, sarà possibile modificare il numeri di elementi in entrambe le direzioni U e V e cambiare anche il modulo, avendo sempre un aggiornamento dinamico sulla superficie.

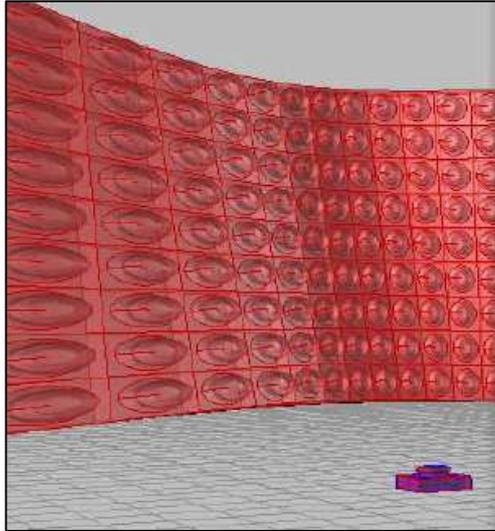


Figura 4.6 – Esempio di pannellizzazione con Grasshopper

### 4.3. Applicazioni della modellazione basata su algoritmi generativi

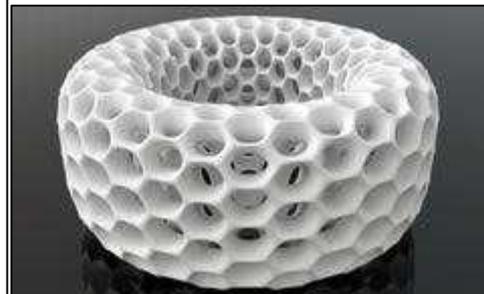
Per anni limitati ad ambiti prevalentemente teorici gli algoritmi generativi caratterizzano oggi un tema di crescente rilevanza, con numerosi esempi anche a livello applicativo.

Grasshopper consente di organizzare i progetti in sistemi parametrici, basati su logiche di relazione tra parti, offrendo la possibilità di modificare la configurazione complessiva del sistema, agendo sulle variabili poste alla base del processo progettuale.

Spesso Grasshopper viene associato alla realizzazione di opere e strutture in campo architettonico che collocano questo software in un settore piuttosto ristretto ed elitario. In realtà, invece, l'impiego di Grasshopper e della modellazione basata su algoritmi generativi si è diffusa in numerosi settori con vantaggi anche per applicazioni relativamente più semplici.

Il vantaggio fondamentale risiede nella possibilità di realizzare oggetti e strutture con forme altamente complesse.

Di seguito sono riportate alcune immagini con esempi di applicazioni della modellazione parametrica basata su algoritmi generativi.



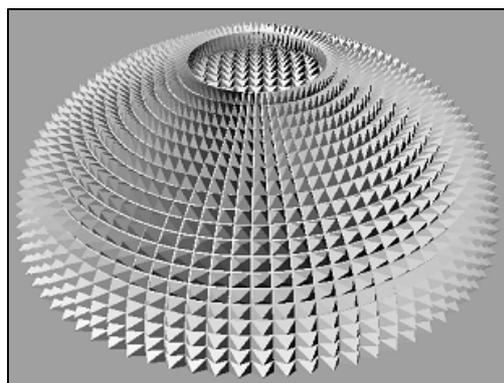
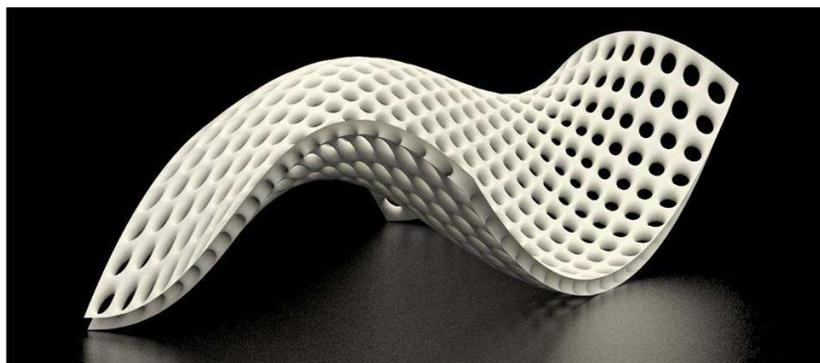


Figura 4.7– Esempi di applicazioni della modellazione basata su algoritmi generativi

## **5. PROGETTAZIONE DI ORTESI PERSONALIZZATA DI GOMITO E SVILUPPO MODELLO PARAMETRICO BASATO SU ALGORITMI GENERATIVI**

### **5.1. Ortési di gomito**

Le ortesi sono dispositivi medici esterni usati in ortopedia nel trattamento di alcune patologie per correggere un'anomalia funzionale, ma che non sostituiscono parti anatomiche mancanti.

In sintesi, un'ortesi può essere impiegata per i seguenti scopi:

- ✓ mantenere o correggere l'allineamento di un segmento corporeo;
- ✓ assistere o proteggere le articolazioni mobili durante le fasi di movimento del paziente;
- ✓ alleviare o distribuire il carico di forze agenti;
- ✓ proteggere da stimoli esterni;
- ✓ ripristinare la mobilità;
- ✓ minimizzare il rischio di malformazioni.

Le protesi ed ortesi possono essere prefabbricate o personalizzate. I dispositivi prefabbricati sono meno costosi e sono facilmente disponibili in mercato. Tuttavia, le protesi ed ortesi personalizzate si adattano meglio al corpo del paziente, garantendo anche delle prestazioni migliori rispetto ai dispositivi prefabbricati.

Una classificazione delle ortesi viene fatta in base alla parte del corpo sulla quale viene indossata: ortesi di tronco, di arto superiore e di arto inferiore. In questo lavoro ci si è concentrati sullo studio di ortesi di gomito.

### 5.1.1. Patologie del gomito ed impiego delle ortesi

La ortesi di gomito vengono impiegate per il trattamento di diverse patologie legate a quest'articolazione.

Tra queste, quelle più comuni sono:

- Epicondilite laterale: è una sindrome dolorosa localizzata all'epicondilo laterale (ovvero sull'esterno del gomito), spesso dovuta a una serie di microtraumi ripetuti che si sono verificati a livello dei tendini dei muscoli estensori del polso e della mano, in corrispondenza della loro inserzione prossimale sull'epicondilo, con conseguente degenerazione tendinea: ecco perché rientra nelle tendinopatie inserzionali. Ipsollecitazioni muscolari eccentriche e ripetute intervengono nello sviluppo dell'epicondilite laterale. Anche lo svolgimento di attività inusuali per il paziente, oltre a una sindrome da ipersollecitazione possono rappresentare fattori determinanti nella genesi di tale patologia. Questo può avvenire per lavoro o per sport e proprio per questo viene comunemente chiamata gomito del tennista.
- Epitrocleeite (o epicondilite mediale): quando il fastidioso dolore si presenta sul versante interno del gomito si parla di epitrocleeite o di epicondilite mediale. In tal caso, invece, saranno interessati i muscoli dei tendini flessori del carpo e della mano. L'epitrocleeite è più tipica dei golfisti per via del loro gesto atletico che tende a sovraccaricare di più i muscoli flessori del carpo. Per questo viene comunemente chiamata gomito del golfista.

In generale l'epicondilite laterale e mediale può colpire diverse categorie lavorative che implicano movimenti di rotazione del polso o sollevamento di pesi e situazioni che inducono "microtraumi ripetitivi" del gomito e del polso stesso. Generalmente insorge fra i 30 e i 50 anni.

- Tunnel cubitale (o intrappolamento/compressione del nervo ulnare): la sindrome del canale cubitale è la seconda patologia da compressione di un

nervo più diffusa dopo la sindrome del tunnel carpale alla mano. Si manifesta a causa della compressione del nervo ulnare a livello del gomito: in questa posizione il nervo risulta essere molto superficiale.

Il nervo ulnare ha una funzione fondamentale per la mano, la presa di forza, il “power grip”. Perciò è fondamentale fare molta attenzione a questa patologia. Solitamente la patologia sopraggiunge a seguito di movimenti ripetitivi e anomali del gomito dovuti a certe tipologie di lavoro o allo svolgimento di alcune attività sportive. Inoltre possono influire altre patologie oppure può essere dovuta a dei traumi diretti.

Le cause principali che innescano la compressione del nervo ulnare, e quindi generano la sindrome del canale cubitale, sono:

- gesti ripetitivi con il gomito: appoggiarsi continuamente con i gomiti (ad esempio i camionisti che viaggiano con i gomiti sempre appoggiati alla portiera del camion);
- eseguire ogni giorno numerose flessioni;
- presenza di alcune patologie come: artriti e cisti gangliari;
- traumi diretti;
- instabilità del nervo ulnare;
- valgismo del gomito;
- artrosi di gomito.

La sindrome del canale cubitale presenta alcuni sintomi che tendono a peggiorare con il passare del tempo: parestesia, torpore al gomito, dolore diffuso fino alla mancanza di forza nella mano.

- Frattura del capitello radiale: la frattura del capitello radiale è una delle patologie più comuni del gomito.

La patologia coinvolge il capitello e/o il collo del radio che è l'osso più piccolo dell'avambraccio che si articola con l'ulna per consentire la rotazione del braccio; solitamente si manifesta a seguito di un trauma diretto o indiretto sull'avambraccio o direttamente sull'articolazione:

l'energia del trauma si trasmette dal polso al gomito, attraverso il radio, e causa l'impatto del capitello radiale contro il condilo omerale.

Sono state classificate 4 tipologie di frattura del capitello radiale:

- frattura composta ad un solo frammento composta: il frammento osseo rimane nella sua posizione originaria;
- frattura ad un solo frammento scomposta (il frammento osseo si sposta di almeno 2 mm rispetto al resto del capitello) oppure frattura del collo del capitello;
- frattura pluri-frammentaria: in questo caso il capitello si rompe in numerosi frammenti;
- frattura associata alla lussazione di gomito: in questo caso le tre precedenti tipologie di frattura si associano alla lussazione che comporta la perdita dei normali rapporti tra le ossa del gomito.

La sintomatologia della frattura del capitello radiale è la seguente:

- dolore che aumenta quando si muove il gomito;
- difficoltà nello svolgere i movimenti con il braccio;
- rossore localizzato;
- gonfiore al gomito;
- ematomi;
- rottura dell'ulna e dell'omero;
- lesioni ai tendini, ai muscoli, ai legamenti (legamento collaterale radiale o ulnare), ai nervi e ai vasi sanguigni.

### 5.1.2. Ortesi di gomito in commercio

Esistono in commercio alcune tipologie di ortesi di gomito, la maggior parte delle quali sono prefabbricate e poche customizzate.

Di seguito si riportano alcuni esempi di ortesi di gomito presenti in commercio: possono essere sia con angolazione regolabile sia fisse.



Figura 5.1.a – Esempi di ortesi di gomito con angolazione regolabile



Figura 5.1.b – Esempi di ortesi di gomito con angolazione regolabile



Figura 5.1.c – Esempi di ortesi di gomito fisse

### 5.1.3. Nuovo modello di ortesi di gomito

L'idea alla base della progettazione di un nuovo modello di ortesi di gomito è quella di realizzare un dispositivo customizzato e fabbricato interamente mediante tecnologie di AM.

La maggior parte delle ortesi presenti in commercio sono dispositivi prefabbricati che si possono adattare alle diverse misure mediante delle opportune fasce o altre modalità, realizzate solo in parte con tecnologie di AM e poi assemblate per costituire il dispositivo finale, con conseguente aumento delle fasi di produzione e dei costi.

Ulteriore componente innovativa del dispositivo realizzato risiede nell'applicazione di un sistema di molle di torsione che simulano l'azione svolta dai fisioterapisti durante gli esercizi per la riabilitazione del paziente.

Di seguito si riporta un'immagine che schematizza il movimento di flessione ed estensione del gomito durante la riabilitazione.

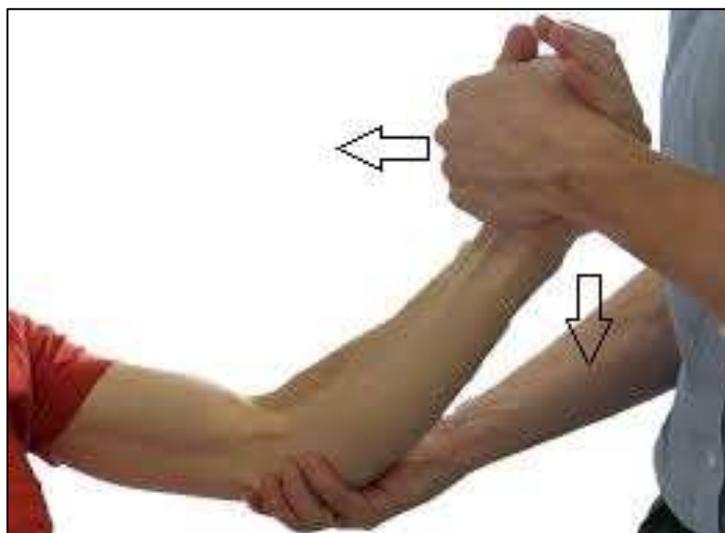


Figura 5.2 – Movimenti del gomito

Uno degli esercizi fondamentali durante la riabilitazione del paziente è l'esecuzione di movimenti di flessione ed estensione dell'avambraccio per poter tornare ad acquisire pian piano la completa funzionalità e mobilità del braccio. In questi movimenti, il paziente esercita uno sforzo per poter effettuare la flessione e l'estensione dell'avambraccio e poi è aiutato dal fisioterapista a tornare nella posizione di partenza e di riposo (angolo fra braccio e avambraccio di 90°).

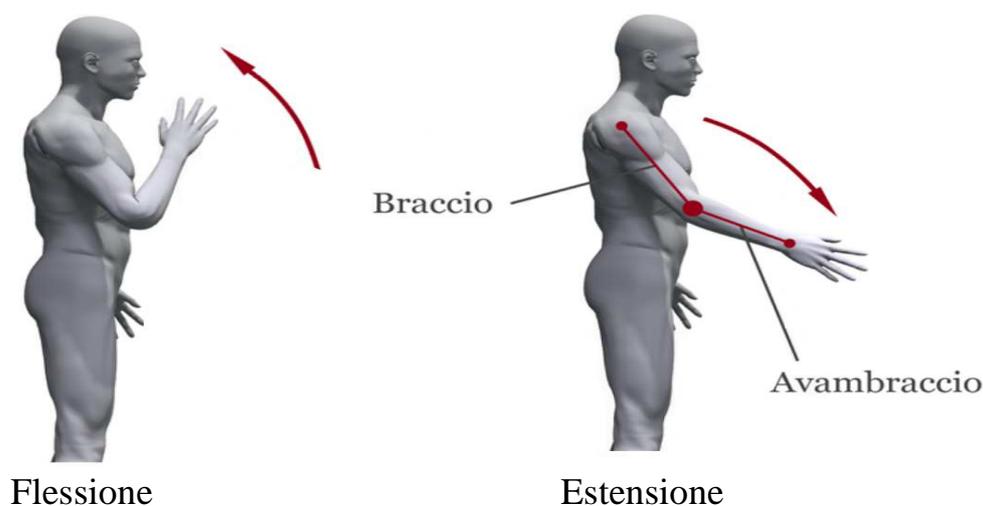


Figura 5.3 – Movimenti di flessione ed estensione del gomito

Al fine di aiutare il paziente in questo esercizio, anche in assenza del fisioterapista, si è pensato di applicare all'ortesi un sistema di due molle a torsione con angolo dei rami a  $90^\circ$  (Fig. 5.4).

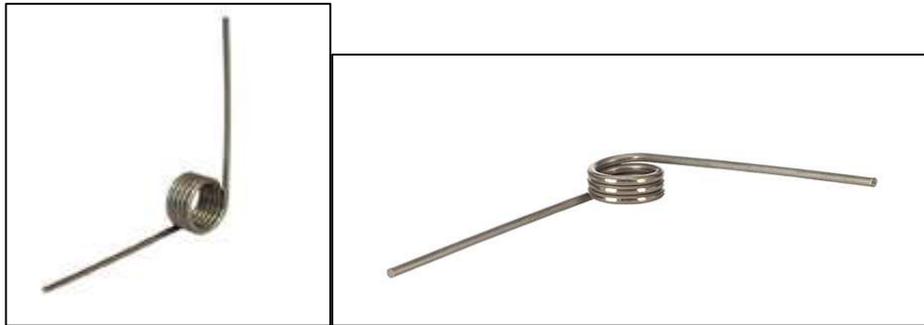


Figura 5.4 – Molle di torsione

Il paziente con l'ortesi applicata, partendo dalla posizione di riposo a  $90^\circ$ , esercita uno sforzo per eseguire i movimenti di flessione ed estensione, deformando così le molle, ed è aiutato dalle stesse durante la fase di scarico e ritorno nella posizione di partenza. In questo modo il paziente potrà svolgere l'esercizio in piena autonomia grazie al supporto del sistema di molle.

Il sistema di molle è stato scelto tenendo in considerazione il fatto che il paziente, durante la fase riabilitativa, deve evitare attività faticose con l'arto interessato e, in particolare, non può sollevare pesi superiori a 5 kg.

Le molle sono state, quindi, scelte in funzione della forza massima che può essere applicata all'estremità. Inoltre, sono stati previsti due set di molle (da 25 N e 50 N) in modo da poter iniziare la fase riabilitativa in maniera graduale, senza sforzare eccessivamente il gomito.

## 5.2. Acquisizione 3D e modellazione CAD

Per poter modellare un'ortesi customizzata è necessario disporre del modello CAD del braccio, ed in particolare della zona relativa al gomito.

Al fine di acquisire correttamente questa parte del paziente, si è pensato di riprodurre una copia fedele mediante un calco di gesso; scansionare direttamente il braccio del paziente potrebbe portare ad un modello acquisito non soddisfacente o richiedere una fase di post processo molto complessa a causa di diversi problemi dovuti, ad esempio, alla superficie non perfettamente liscia del braccio, alla presenza di peli che potrebbero creare effetti di rumore nella superficie acquisita, all'impossibilità di mantenere il braccio del paziente immobile per tutta la durata della scansione.

Per evitare, quindi, questi inconvenienti è stato realizzato un calco in gesso del braccio del paziente.

Il primo passo è la creazione dello stampo: questo è stato ottenuto immergendo il braccio del paziente in un contenitore con alginato (Fig. 5.5) per pochi minuti.



Figura 5.5 – Esecuzione del calco del braccio

Successivamente è stato colato del gesso liquido all'interno dello stampo fino alla completa essiccazione (Fig. 5.6).



Figura 5.6 – Esecuzione del calco del braccio

Sono stati realizzati tre calchi del braccio in tre configurazioni angolari differenti, in funzione del range massimo di movimento consentito ad un paziente affetto da una patologia al gomito, al fine di poter osservare le reali deformazioni del braccio, ed in particolare della zona del gomito, e la variazione di forma che si manifesta nel braccio durante i movimenti di estensione e flessione. Nello specifico, sono state realizzate tre configurazioni per i seguenti angoli: 50°, 90°, 110°, misurati considerando come angolo di 0° la posizione di riposo con braccio disteso lungo il fianco e valori crescenti durante il movimento di flessione dell'avambraccio.

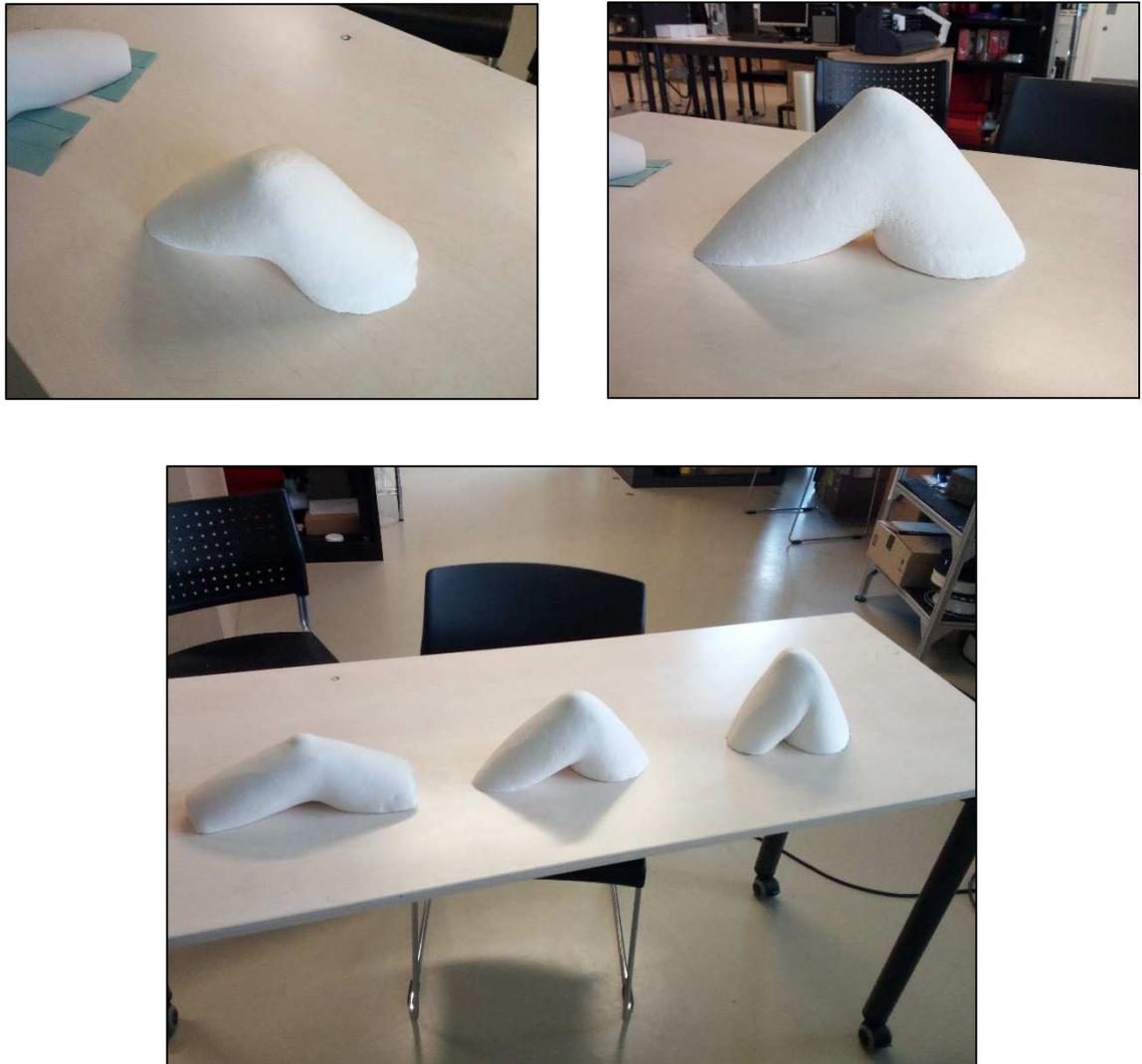


Figura 5.7 – Calchi del braccio nelle tra configurazioni

### 5.2.1. Acquisizione 3D e modellazione CAD del braccio

Realizzato il calco, si è passati alla fase di acquisizione 3D. La scansione è stata effettuata mediante lo scanner 3D della ZCorporation, ZScanner 800.

La scelta è ricaduta su questo sistema di scansione per alcune caratteristiche fondamentali: la prima è il self-orienting, ovvero la possibilità di essere totalmente orientabile eliminando la necessità di tripodi a posizione fissa, bracci meccanici voluminosi o dispositivi di posizionamento esterni, che rendono difficile o quasi impossibile l'acquisizione di alcune superfici nascoste; per

quanto riguarda la seconda caratteristica, lo scanner ZScanner 800, grazie ad un sistema di target, consente all'utente di spostare l'oggetto durante la scansione; infine, consente di visualizzare un'immagine sullo schermo in tempo reale della superficie sottoposta a scansione, ovvero consente la generazione automatica della superficie in tempo reale.

Queste sue caratteristiche hanno agevolato molto la fase di acquisizione e post-processing, diminuendo i tempi richiesti per l'elaborazione dei dati acquisiti.

Di seguito si riporta un'immagine della fase di acquisizione 3D, in cui si osserva il calco posto su una tavola con dei target, grazie ai quali è possibile ruotare la tavola durante la scansione, registrando in automatico le differenti posizioni del pezzo e restituendo la superficie acquisita senza sovrapposizioni degli strati scansionati.

Grazie alla maneggevolezza dello scanner 3D e al sistema di target è stato possibile acquisire anche la zona compresa tra braccio e avambraccio, altrimenti difficilmente acquisibile con altri sistemi.

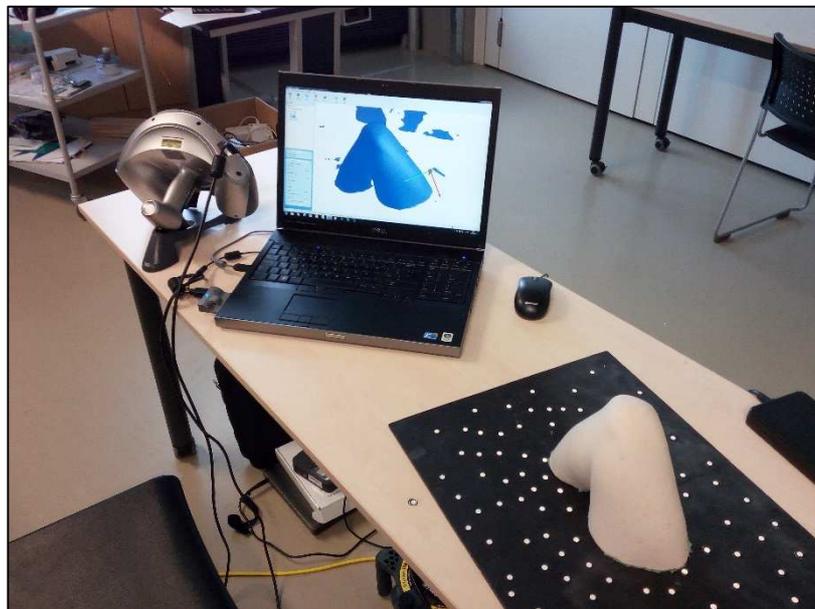


Figura 5.8 – Acquisizione 3D con scanner ZScanner800

Durante la fase di post processo sono state effettuate delle operazioni di editing mediante l'impiego del software Geomagic Studio.

La mesh poligonale necessita di operazioni di rifinitura, eliminando possibili anomalie derivanti da:

- triangoli degeneri presenti, per esempio, sui bordi;
- facce intersecanti la superficie complessiva;
- ricostruzione dei bordi;
- chiusura dei buchi/gap eventualmente rimasti;
- una prima decimazione e successivo remesh per ridurre il numero dei triangoli, alleggerendo il modello.

Il risultato di questa fase è un modello poligonale completo e con le superfici regolari.

Dopo aver effettuato alcuni controlli sulla mesh mediante opportune funzioni di Geomagic Studio, è possibile creare delle superfici NURBS del componente e convertire quest'ultime in modello CAD.

Ovviamente il modello ottenuto dalla scansione è solo la parte relativa alla zona del gomito; per poter ricostruire completamente il modello del braccio, sono state effettuate una serie di misure di diverse sezioni del braccio a determinate distanze.

Successivamente, mediante il software SolidWorks, è stato possibile ricostruire l'intero modello del braccio partendo da una serie di sezioni poste alle stesse distanze di misura e poi collegate mediante una funzione di loft.

Le sezioni sono state create come offset delle sezioni del modello CAD della zona del gomito acquisita.

Nella figura sottostante, è possibile osservare i piani di misura e le relative sezioni per la ricostruzione delle parti relative a braccio e avambraccio non scansionate.

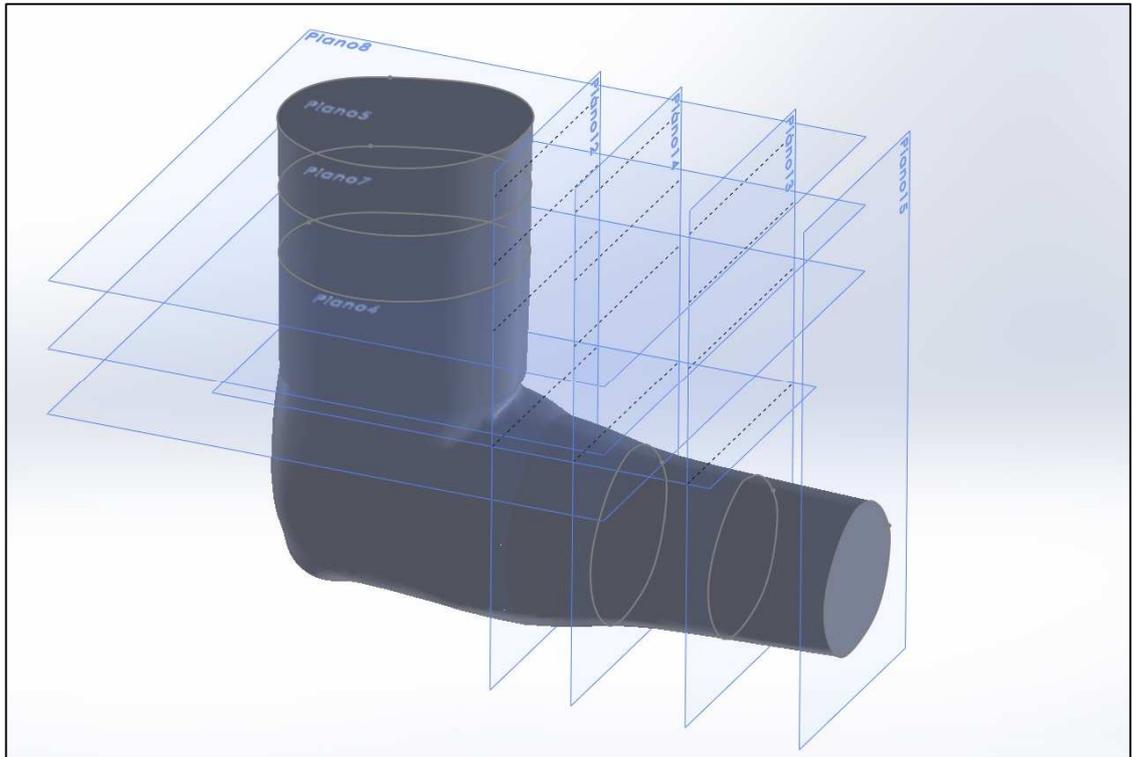


Figura 5.9 – Piani di misura e relative sezioni

Queste operazioni sono state condotte per tutte e tre le configurazioni, ottenendo i rispettivi modelli CAD.

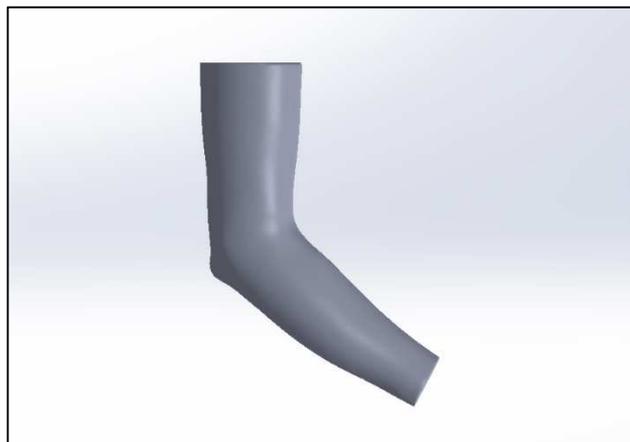


Figura 5.10 – Modello CAD braccio: configurazione a 50°

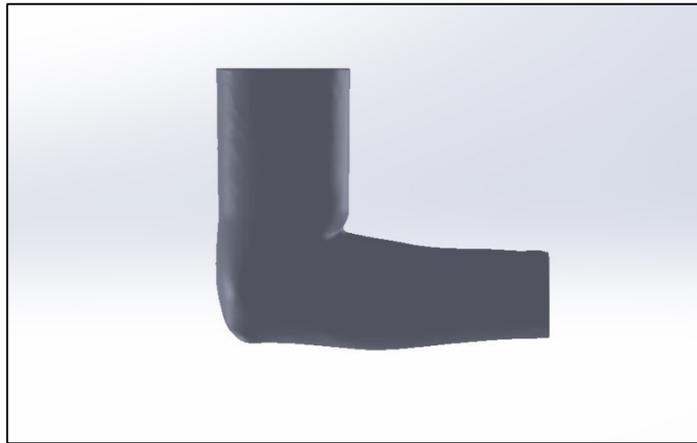


Figura 5.11 – Modello CAD braccio: configurazione a 90°

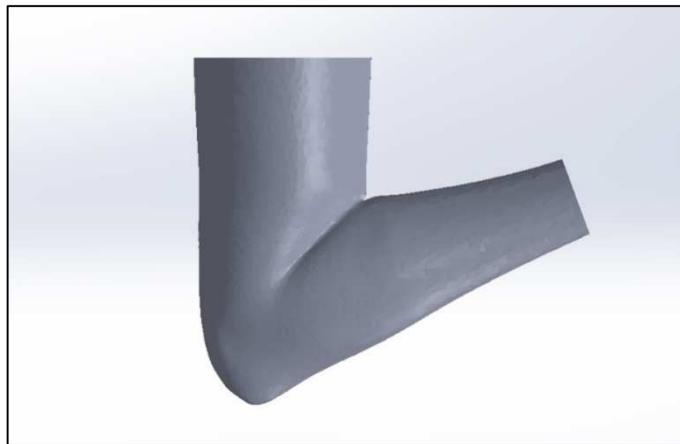


Figura 5.12 – Modello CAD braccio: configurazione a 110°

### 5.2.2. Modellazione CAD ortesi personalizzata

La generazione di un modello 3D di ortesi consente al progettista di differenziare la morfologia dell'oggetto di paziente in paziente, gestendo specifiche esigenze di performance oltre che l'adattamento all'anatomia personale. È possibile creare dispositivi con diversi compromessi di rigidità e flessibilità, consentire alcuni movimenti e inibirne altri, integrare caratteristiche morfologiche nuove ad una determinata categoria di prodotto.

La modellazione dell'ortesi customizzata parte dal modello CAD del braccio del paziente, il quale viene tagliato in corrispondenza delle misure scelte per l'ortesi, ed estrapolandone una superficie.

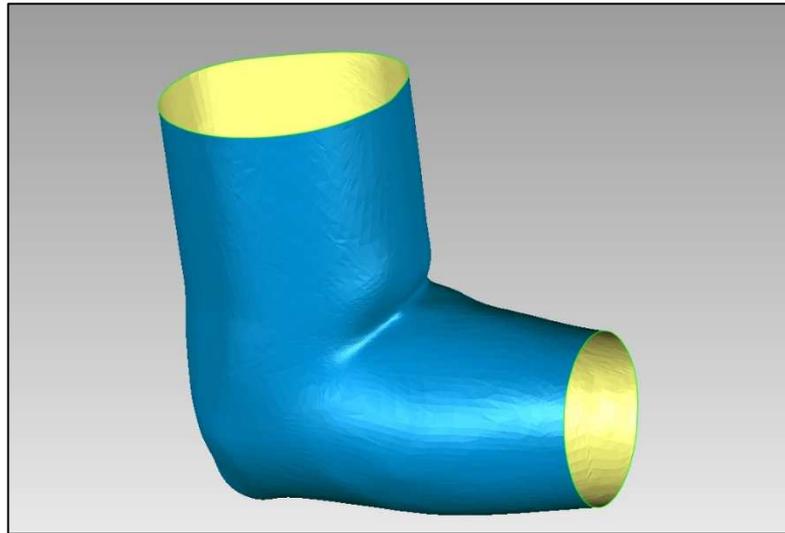


Figura 5.13 – Superficie di partenza per la modellazione dell’ortesi

Per assicurare un buon livello di ergonomia, l’ortesi dovrebbe perfettamente adattarsi al braccio del paziente. Tuttavia, in fase di modellazione, bisogna anche considerare l’eventuale presenza di gonfiore del gomito del paziente o comunque garantire che l’ortesi non comprima eccessivamente, al fine di evitare ulteriori infiammazioni o altri effetti indesiderati.

Riguardo la funzionalità, uno degli aspetti da tenere in considerazione è la possibilità da parte del paziente di indossare e levare l’ortesi facilmente ed autonomamente, senza che questo implichi fastidi al gomito.

Per poter soddisfare i suddetti requisiti di ergonomia ed indossabilità, partendo dalla superficie iniziale (Fig. 5.13), è stato applicato un offset di 2 mm, garantendo un piccolo gioco tra braccio e ortesi; inoltre, sono stati eseguiti dei tagli, realizzando due aperture nell’ortesi. Queste consentono sia di poter indossare l’ortesi senza problemi, sia di aumentare l’adattabilità del dispositivo senza effetti indesiderati per il paziente.

Successivamente, sono stati definiti i bordi sulla superficie dell’ortesi (Fig. 5.14).

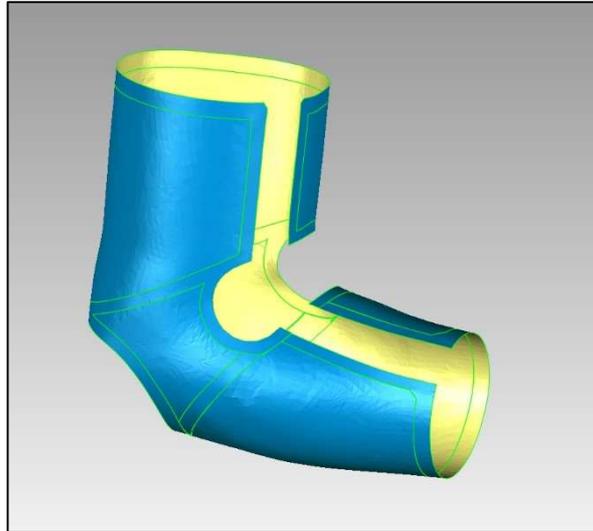


Figura 5.14 – Superficie di partenza dell'ortesi con aperture e contorni

Dopo aver tracciato i bordi sulla superficie mediante il software Meshmixer, è stata creata la struttura dell'ortesi (Fig. 5.15).

In seguito, sono state modellati i supporti per le molle di torsione (Fig. 5.16).

Per garantire una certa resistenza dell'ortesi, ma nello stesso tempo non appesantire l'intero dispositivo è stato scelto uno spessore di 4 mm della struttura. Si tratta di un valore già impiegato nelle ortesi di gomito in commercio che, tuttavia, successivamente è stato verificato mediante simulazioni numeriche. L'ortesi, infatti, deve adattarsi perfettamente al gomito, ma allo stesso tempo deve assicurare una certa rigidità per poter svolgere a pieno la sua funzione di tutore: valori minori non avrebbero potuto garantire tale rigidità, così come valori di spessore troppo elevati avrebbero appesantito inutilmente la struttura senza dare alcun beneficio.

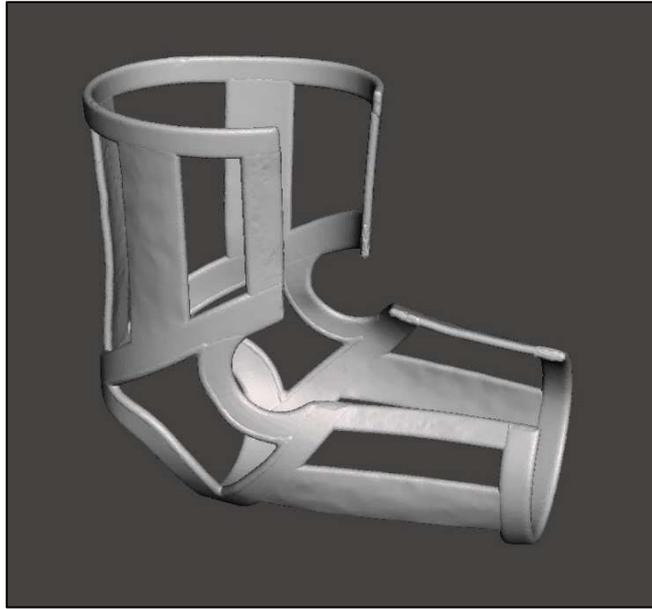


Figura 5.15 – Struttura dell’ortesi

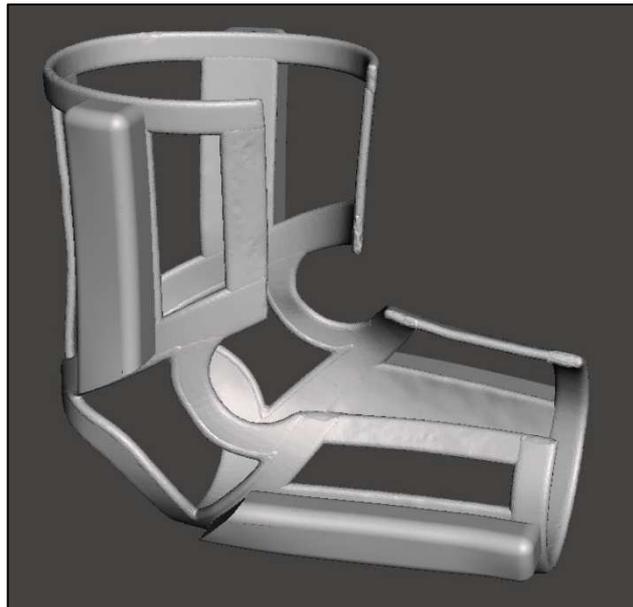


Figura 5.16 – Struttura dell’ortesi e supporti per le molle

Il passo successivo è stata la conversione del modello in superfici NURBS e poi in modello CAD.

Ottenuto il modello CAD di base dell’ortesi, mediante il software SolidWorks, sono state eseguite tutte le lavorazioni di modellazione necessarie per completare l’ortesi. In particolare si sono modellate le molle, le asole per alloggiarle e le

fascette a strappo. Tutti i singoli componenti sono stati quindi assemblati nel modello CAD finale dell'ortesi mostrato nelle figure 5.17 – 5.19.



Figura 5.17 – Ortesi di gomito customizzata



Figura 5.18 – Particolare dell'ortesi di gomito: chiusura con fascette a strappo

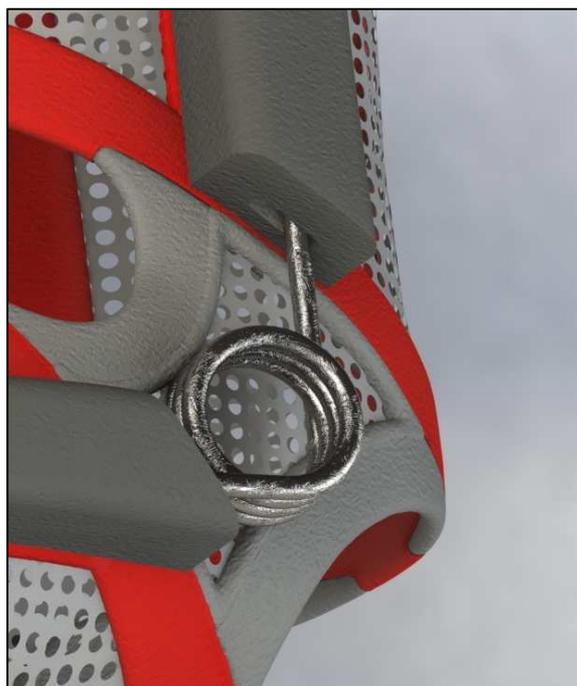


Figura 5.19 – Particolare dell'ortesi di gomito: molle di torsione



Figura 5.20 – Ortesi di gomito e braccio

La figura 5.20 mostra il modello CAD completo dell'ortesi e del braccio.

In questa tipologia di ortesi realizzata la mobilità relativa è affidata alla deformabilità del materiale. Sono stati previsti, infatti, due differenti materiali.

Come sarà ripreso nei paragrafi successivi, la realizzazione mediante tecnologia AM di questo primo modello ha mostrato alcuni problemi quali rotture di parte della struttura realizzata con materiale più morbido e non perfetto incollaggio tra i due materiali in alcuni punti della giunzione del gomito.

Si è allora pensato di ovviare a questi inconvenienti realizzando un modello di ortesi con diverso meccanismo mediante cerniera, per consentire la rotazione relativa del braccio e dell'avambraccio durante i movimenti di estensione e flessione.

Nella figura 5.21 è riportata un'immagine del nuovo meccanismo.

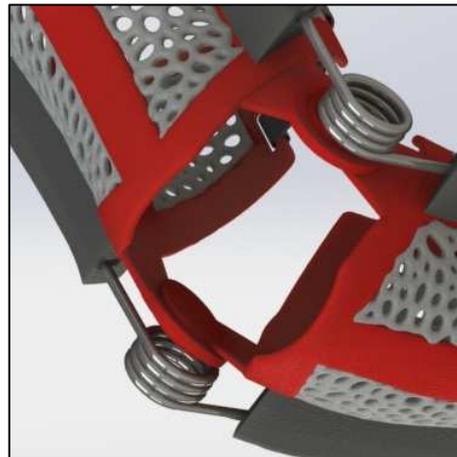


Figura 5.21 – Meccanismo con cerniera

Per curare l'aspetto estetico dell'ortesi è stata prevista la realizzazione di una tassellazione di Voronoi.

### 5.2.2.1 Tassellazione di Voronoi

La tassellazione di Voronoi o decomposizione di Voronoi consiste in un partizionamento del piano in  $n$  poligoni derivati da  $n$  punti principali, dove ciascun poligono contenga uno solo degli  $n$  punti principali e dove ogni altro punto del poligono sia più vicino al punto principale del poligono che a tutti gli altri punti principali. Il perimetro di ciascun poligono è a metà strada tra due punti principali.

Un diagramma di Voronoi è dunque un particolare tipo di decomposizione di uno spazio metrico, determinata dalle distanze rispetto ad un determinato insieme discreto di elementi dello spazio (ad esempio, un insieme finito di punti).

Nel caso più semplice e comune, quello del piano, dato un insieme finito di punti  $S$ , il diagramma di Voronoi per  $S$  è la partizione del piano che associa una regione  $V(p)$  ad ogni punto  $p \in S$  in modo tale che tutti i punti di  $V(p)$  siano più vicini a  $p$  che ad ogni altro punto in  $S$ .

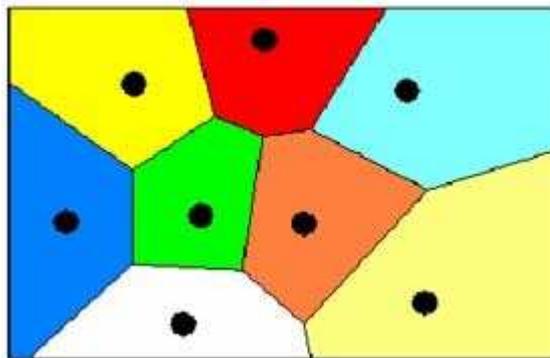


Figura 5.22 – Esempio di tassellazione di Voronoi nel piano

Tra le applicazioni della tassellazione di Voronoi in campo architettonico e del design industriale, una delle principali è la possibilità di essere impiegati nella discretizzazione di superfici curve e nell'architettura tridimensionale per costruire forme strutturali complesse.

La tassellazione di Voronoi da applicare alle parti non strutturali dell'ortesi è stata creata mediante il software Autodesk Meshmixer.

MeshMixer è un software di modellazione 3D gratuito che consente di creare e modificare facilmente modelli 3D. Una sua caratteristica è la creazione di modelli 3D sulla base dei volumi esistenti che vengono combinati utilizzando strumenti di facile utilizzo.

Mediante l'impiego di questo software è stato possibile creare una struttura basata sulla tassellatura di Voronoi utilizzando direttamente le superfici dell'ortesi che dovevano essere sostituite dalla nuova struttura.

Dopo aver importato il modello STL dell'ortesi e delle superfici (Fig. 5.23), per creare una tassellazione di Voronoi mediante Meshmixer, il primo passo è rappresentato dalla riduzione dei poligoni e remesh delle superfici. Questo è dovuto al fatto che il software crea una tassellazione di Voronoi automaticamente in funzione del numero di poligoni della superficie.

Con questa procedura, l'unico modo per controllare la realizzazione della struttura è quello di modificare il numero di triangoli della mesh. Meno poligoni producono aperture più grandi nel modello finale.

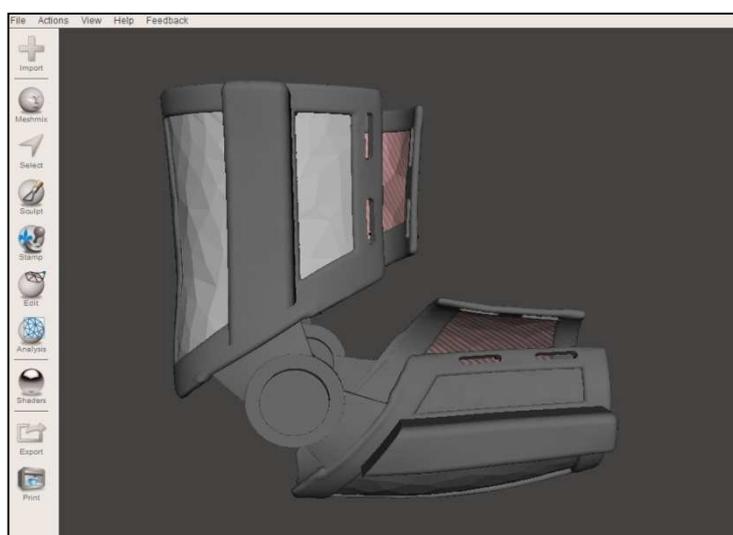


Figura 5.23 – Modello importato in Meshmixer

Dopo aver modificato la mesh delle superfici, la creazione della tassellazione avviene mediante la funzione "Make pattern" che consente di creare e gestire una serie di "primitive" solide. Per mezzo dei diversi modelli presenti nel software, è

possibile creare un numero di primitive diverse da combinare con il modello iniziale.

Per la creazione della tassellazione di Voronoi, è stato impiegato il modello "Dual Edges", il quale crea una struttura con lo spessore desiderato a partire della mesh (Fig. 5.24).

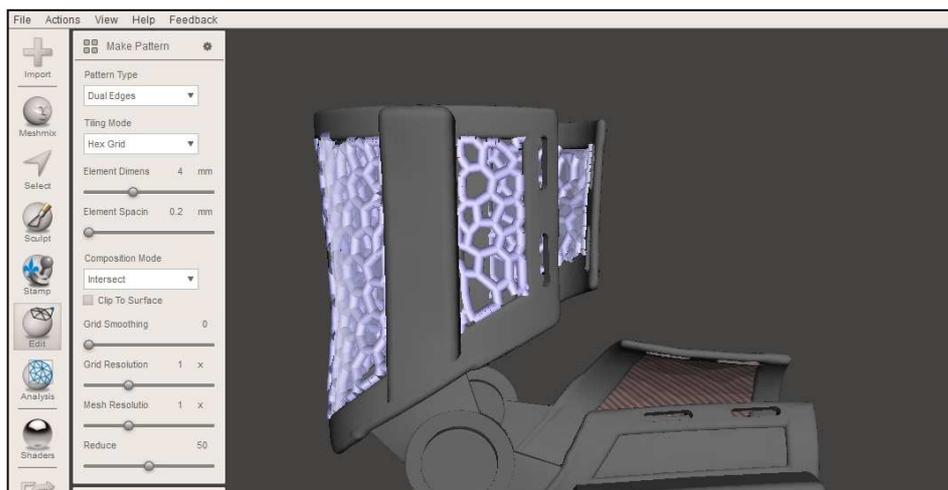


Figura 5.24 – Realizzazione della tassellazione di Voronoi in Meshmixer

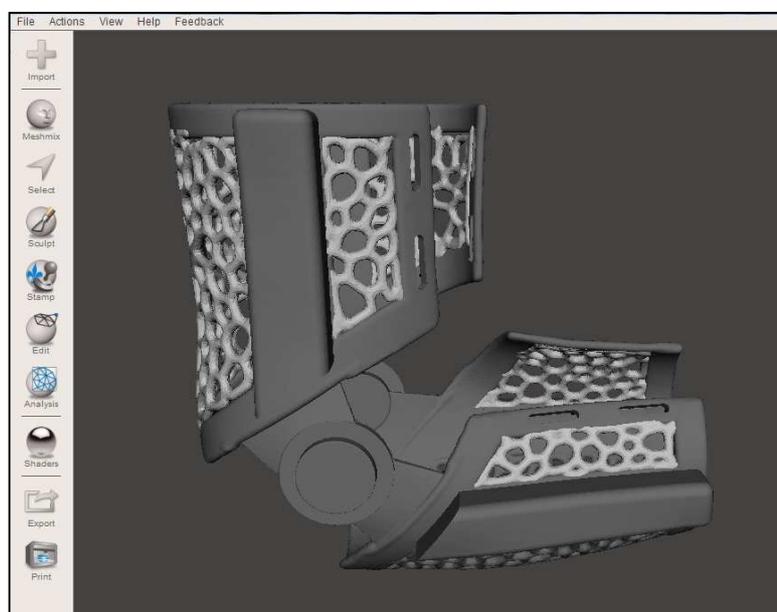


Figura 5.25 – Modello STL dell'ortesi con tassellazione di Voronoi in Meshmixer

Il software consente di esportare il modello in formato STL ed è stato necessario l'impiego del software Geomegic Studio per poter convertire la mesh prima in superfici NURBS e successivamente in modello CAD.

Di seguito sono riportate alcune immagini del modello CAD completo dell'ortesi.



Figura 5.26 – Modello CAD dell'ortesi con tassellatura di Voronoi in Meshmixer

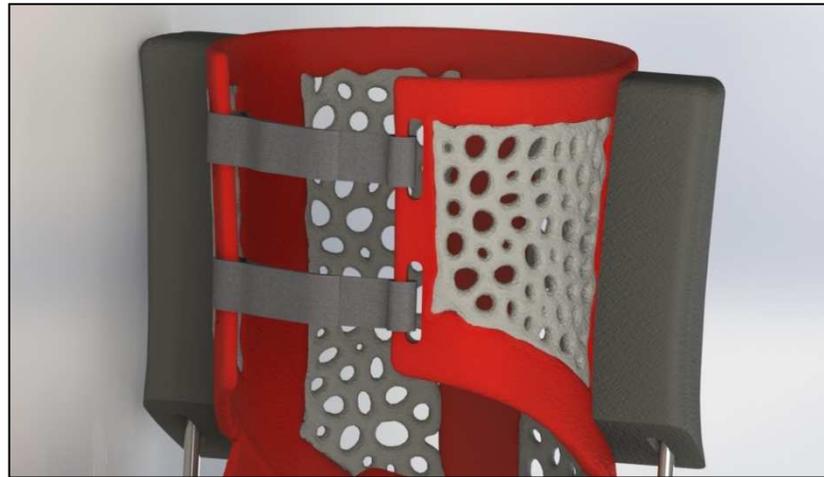


Figura 5.27 – Particolare del modello CAD dell'ortesi con tassellatura di Voronoi in Meshmixer

### 5.3. Sviluppo modello parametrico basato su algoritmi generativi

Un aspetto importante nella modellazione solida parametrica, come già detto, è l'impiego di algoritmi generativi che consentono di superare alcuni possibili limiti dei modellatori classici.

Infatti, la modellazione parametrica basata su algoritmi generativi è un ottimo strumento che consente, mediante i diversi collegamenti tra funzioni e componenti, di poter trovare soluzioni ai problemi che possono incontrarsi con i classici sistemi di modellazione CAD quando ci si trova a dover modellare superfici e forme complesse di componenti, soprattutto quando questi devono poi essere realizzati mediante tecniche di AM.

In questo lavoro sono stati implementati degli algoritmi generativi per la modellazione delle parti non strutturali dell'ortesi che, oltre ad alleggerire la struttura, devono rendere gradevole l'ortesi dal punto di vista estetico.

Gli algoritmi sono stati sviluppati con Grasshopper; il primo permette la creazione di pattern su superfici complesse, il secondo consente di realizzare una tassellazione di Voronoi, mentre mediante terzo è stata creata una struttura flessibile da applicare all'ortesi.

### 5.3.1. Algoritmo generativo per la creazione di pattern

Questo algoritmo consente di creare dei pattern su una superficie complessa, consentendo di poter personalizzare l'ortesi con differenti geometrie decorative.

Mediante le funzioni disponibili in Grasshopper, si possono generare diversi parallelepipedi sulla superficie, impiegati come oggetti bersaglio, ed applicargli un modulo della geometria da ripetere.

Il primo passo è l'importazione della superficie in Rhinoceros e la creazione del componente da ripetere sulla superficie.

Sia la superficie che il componente vengono successivamente collegati nel canvas di Grasshopper mediante i parametri "Surface" e "Geometry".

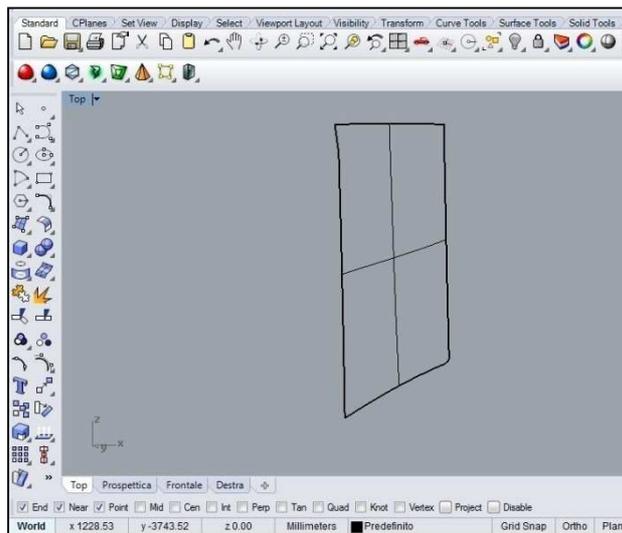


Figura 5.28 –Superficie per pattern

Il componente da ripetere viene definito all'interno di un "Box Morph", ovvero un modulo che verrà poi applicato rispetto ai moduli bersaglio per ricoprire la superficie.

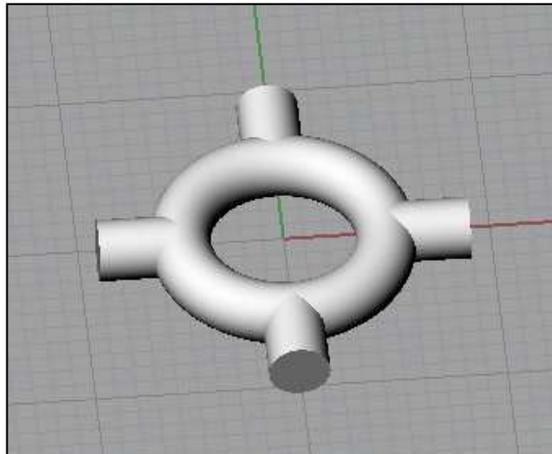


Figura 5.29 – Componente base da ripetere sulla superficie

Successivamente sono stati generati parallelepipedi bersaglio per fare il Morph del componente mediante la funzione "Surface Box" (Fig. 5.30).

Questo componente genera parallelepipedi adattandoli ad una superficie in base all'intervallo indicato dal dominio della superficie e all'altezza del parallelepipedo.

Il dominio viene definito attraverso un'altra funzione "Divide Domain<sup>2</sup>", che consente di dividere un dominio 2D in uguali segmenti lungo le direzioni U e V per creare i parallelepipedi.

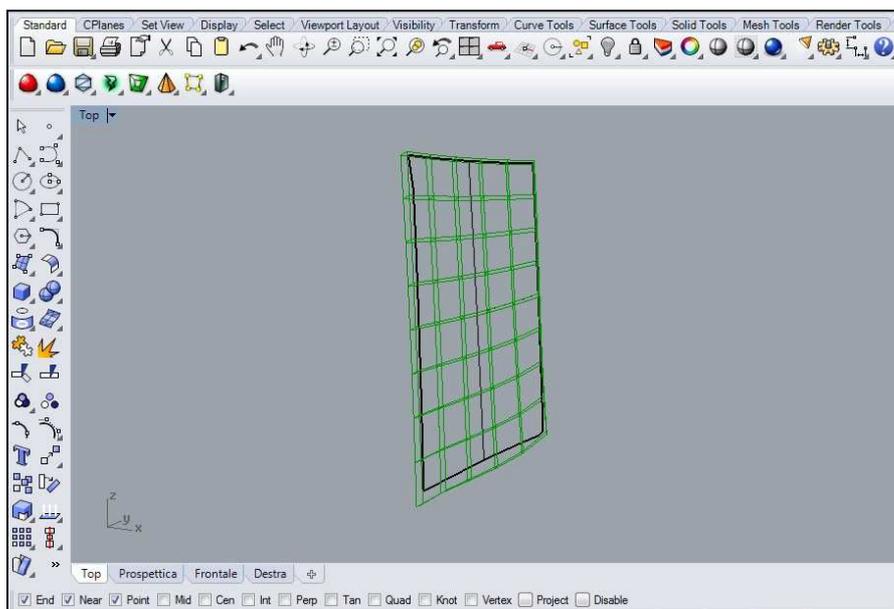


Figura 5.30 – Parallelepipedi bersagli sulla superficie

Il risultato finale sarà il pattern creato sulla superficie che si adatta perfettamente ad essa e seguendone la morfologia in maniera regolare (Fig. 5.31)

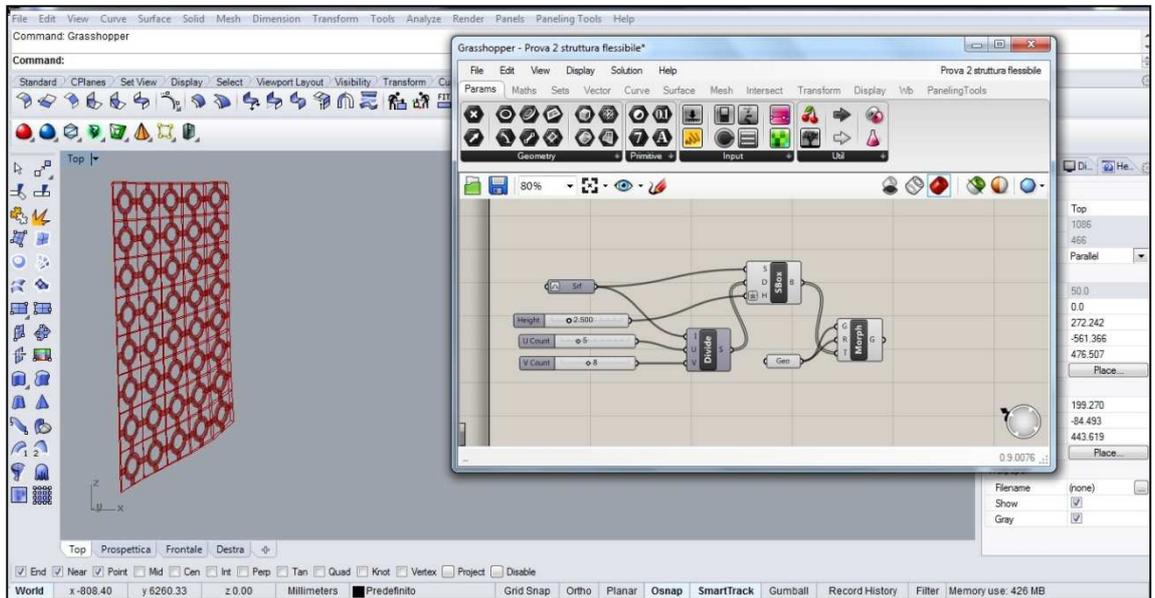


Figura 5.31 – Pattern realizzato sulla superficie e algoritmo

In figura 5.32 si riporta lo schema a blocchi dell'algoritmo sviluppato.

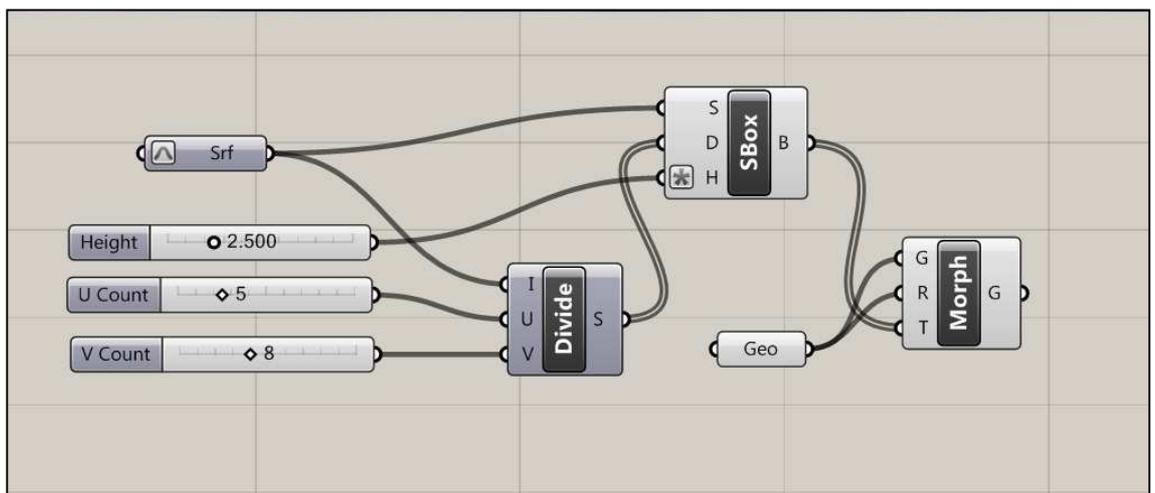


Figura 5.32 – Schema a blocchi dell'algoritmo generativo per la creazione del pattern

Dopo questo passaggio sarà possibile modificare il numero di elementi in entrambe le direzioni U e V e cambiare anche il modulo, avendo sempre un aggiornamento dinamico sulla superficie e creando nuovi pattern per personalizzare l'ortesi.

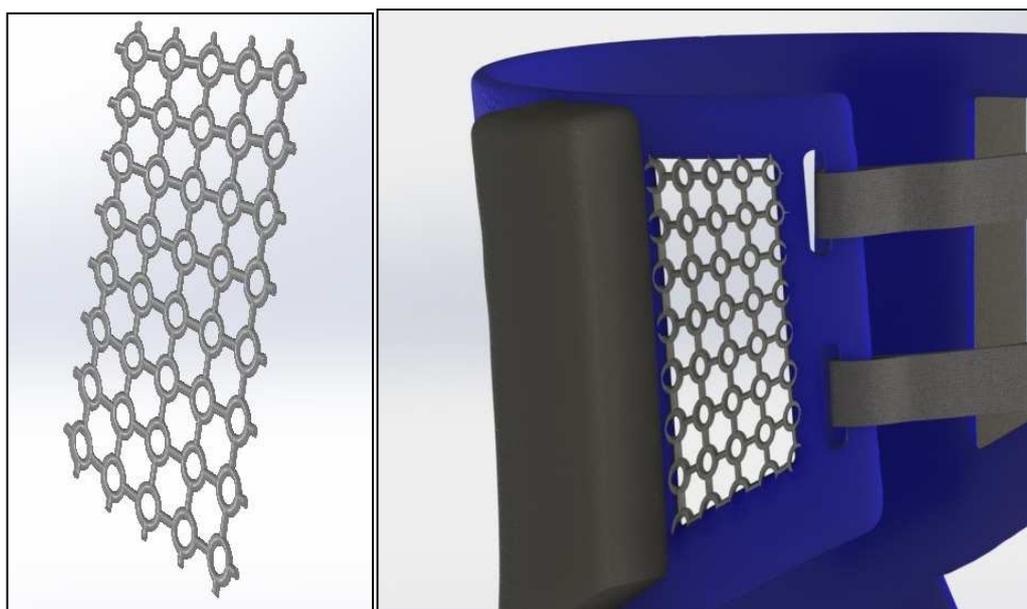


Figura 5.33 – Pattern realizzato ed applicato all'ortesi

Di seguito due esempi di pattern realizzati con questo algoritmo ed applicati all'ortesi di gomito.

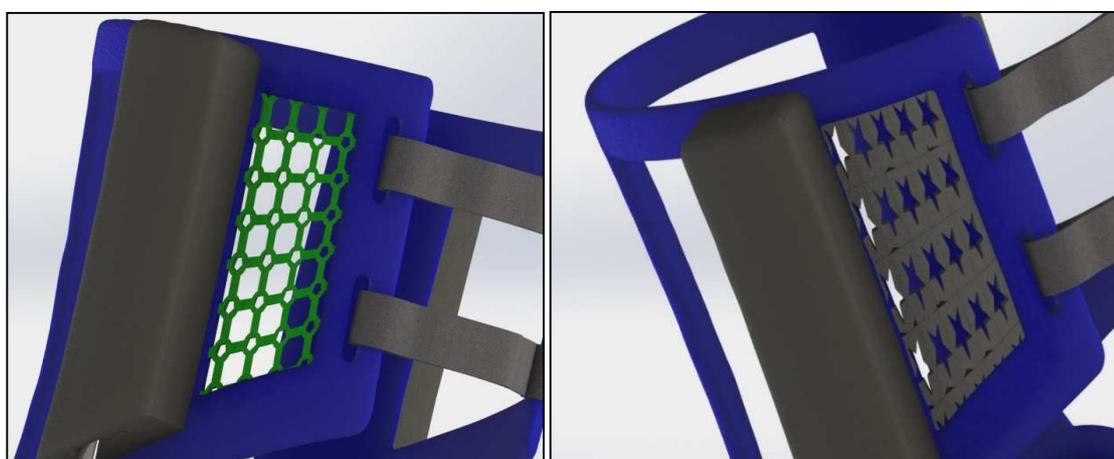


Figura 5.34 – Esempi di pattern realizzabili ed applicati all'ortesi

### 5.3.2. Tassellazione di Voronoi mediante algoritmo generativo

Dal momento che con il software Meshmixer non è possibile gestire in maniera autonoma i parametri di input per la creazione della tassellatura di Voronoi, è stato sviluppato un algoritmo generativo per poter gestire questi parametri e modellare parametricamente la struttura Voronoi nell'ortesi customizzata.

La tassellazione di Voronoi si crea inizialmente su una superficie nel piano xy e successivamente viene mappata sulla superficie dell'ortesi e con specifiche funzioni viene generata la mesh da poter poi esportare.

La superficie planare viene creata mediante la funzione “Boundary Surface” a partire da una serie di curve di contorno come in Fig. 5.35.

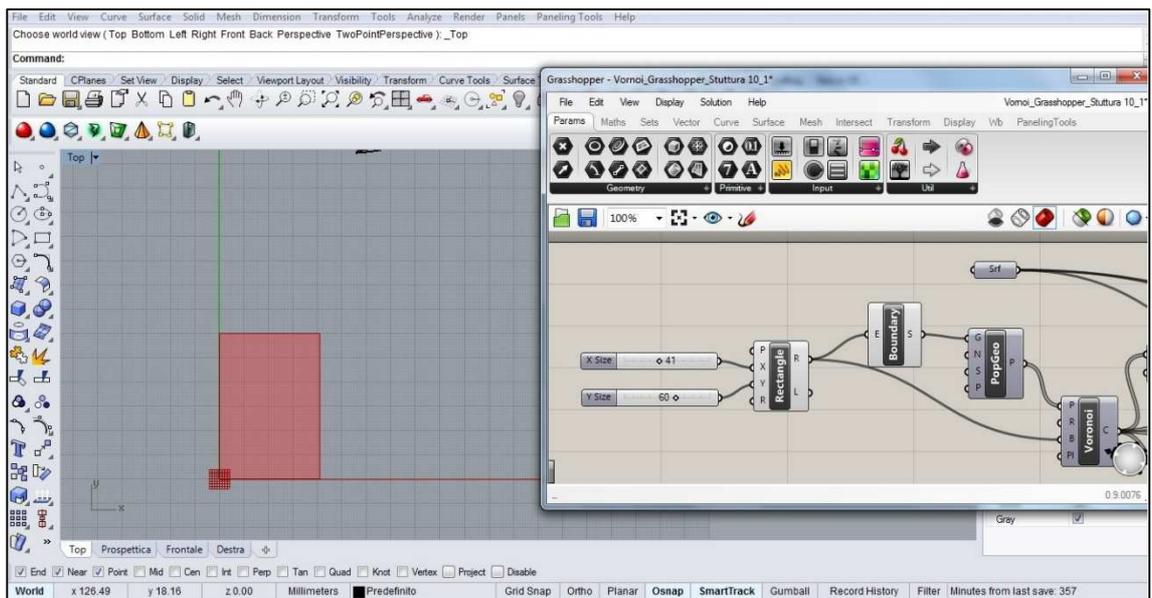


Figura 5.35 – Superficie planare generata su Grasshopper

Dopo aver creato la superficie planare, questa viene popolata da un insieme di punti che rappresentano il centro dei poligoni della tassellazione di Voronoi mediante la funzione “Populate Geometry”; a questo punto, attraverso la funzione Voronoi, si crea una tassellazione Voronoi bidimensionale in funzione dei punti creati precedentemente e viene collegata al rettangolo di contorno e ad una funzione “Bounding Box (BBox)” che genera una rettangolo di selezione,

cioè un riferimento della geometria che si vuole mappare su una superficie. Qualsiasi geometria all'interno del BBox viene mappata rispetto allo spazio UVW.

Nella figura di seguito, si osserva la tassellatura di Voronoi bidimensionale.

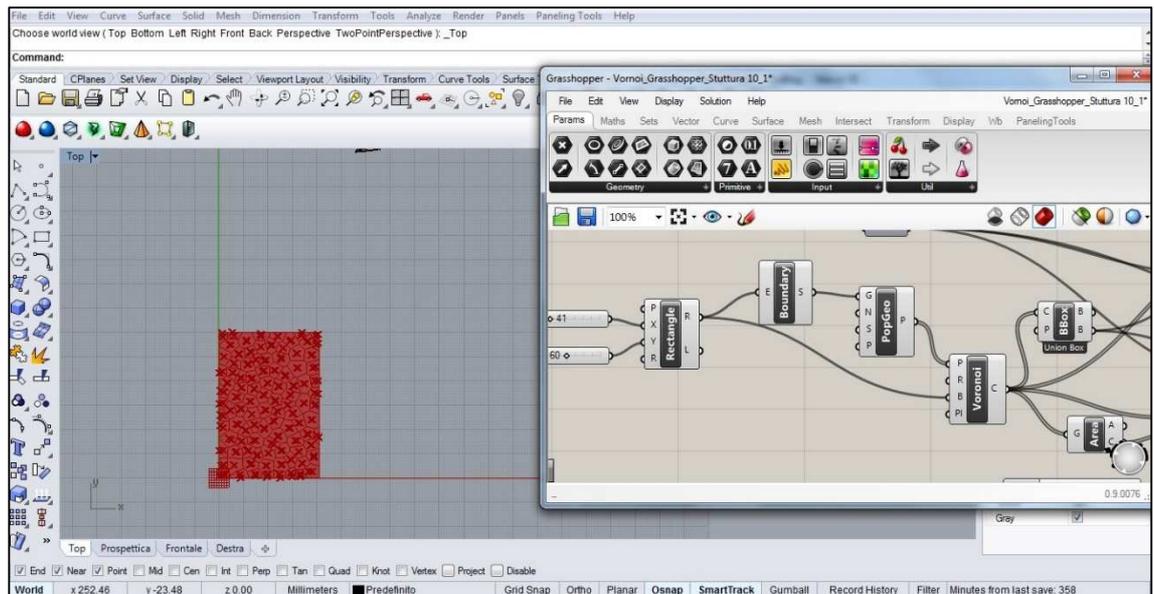


Figura 5.36 – Tassellatura di Voronoi bidimensionale su Grasshopper

Il passo successivo è la creazione della struttura di base 2D della tassellatura di Voronoi da mappare poi sulla superficie dell'ortesi; per far ciò occorre scalare la geometria realizzata precedentemente creando la superficie con tassellatura di Voronoi da poter poi estrarre per creare il modello 3D (Fig. 5.37).

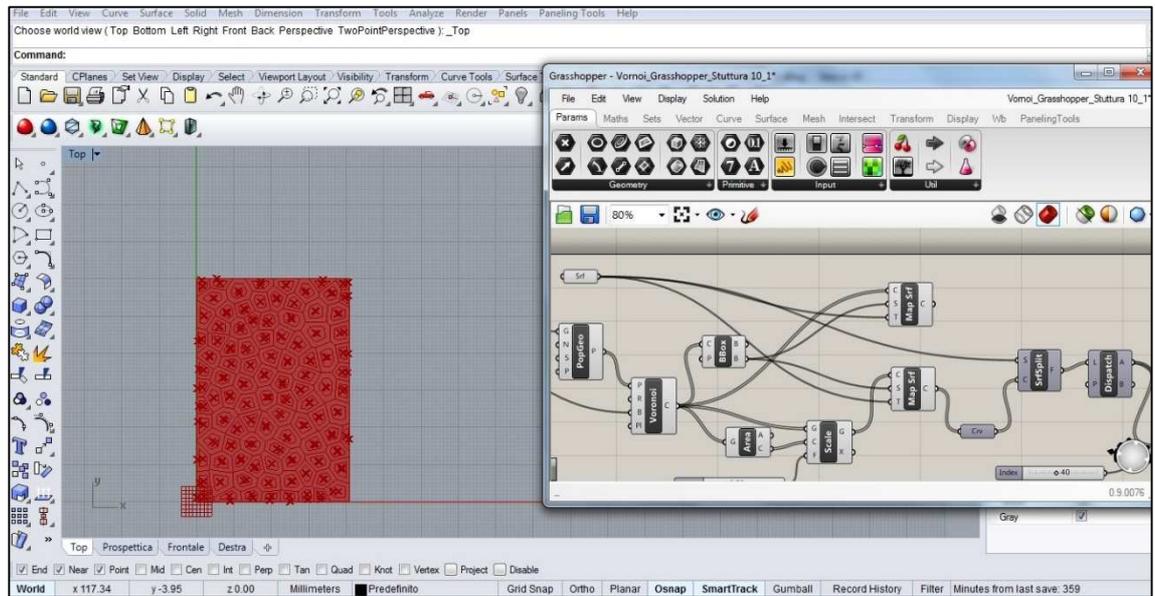


Figura 5.37 – Struttura della tassellatura di Voronoi bidimensionale

La struttura realizzata viene mappata sulla superficie dell’ortesi mediante la funzione “Map to Surface” (Fig. 5.38), adattandosi alla morfologia della superficie.

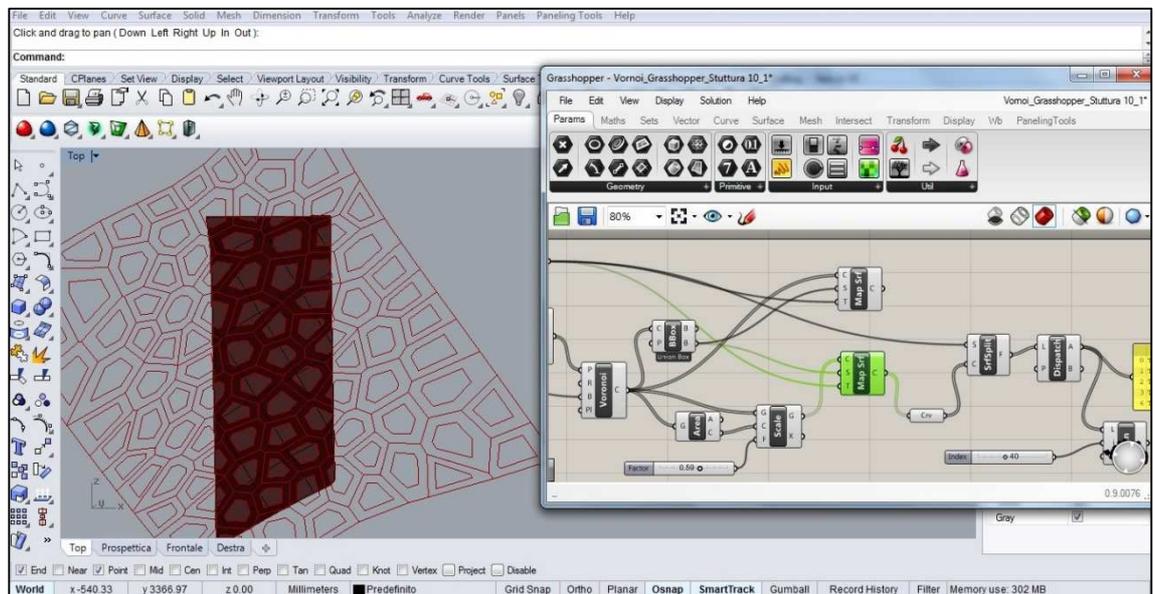


Figura 5.38 – Struttura della tassellatura di Voronoi mappata sulla superficie dell’ortesi

Dalla superficie così generata, viene poi estratta solamente la tassellatura di Voronoi relativa alla superficie effettiva dell'ortesi.

A questo punto, mediante la funzione "Mesh" si crea una mesh della struttura e successivamente, mediante la funzione "Weaverbird's Mesh thicken", l'algoritmo calcola una nuova mesh che è un solido chiuso attribuendo anche l'altezza della nuova mesh.

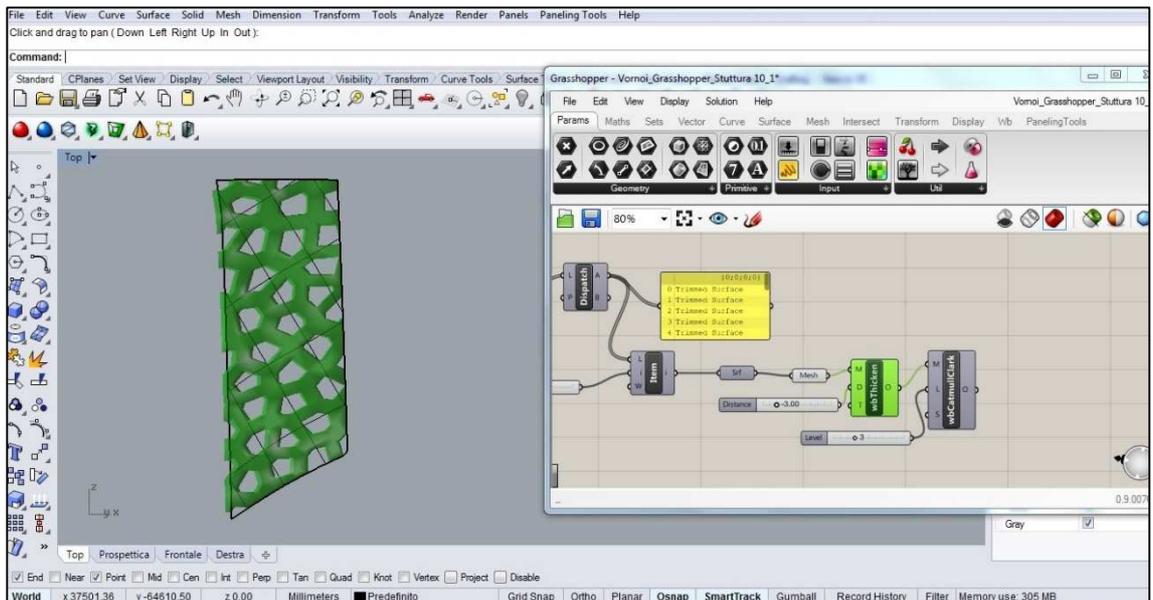


Figura 5.39 – Mesh della tassellatura di Voronoi

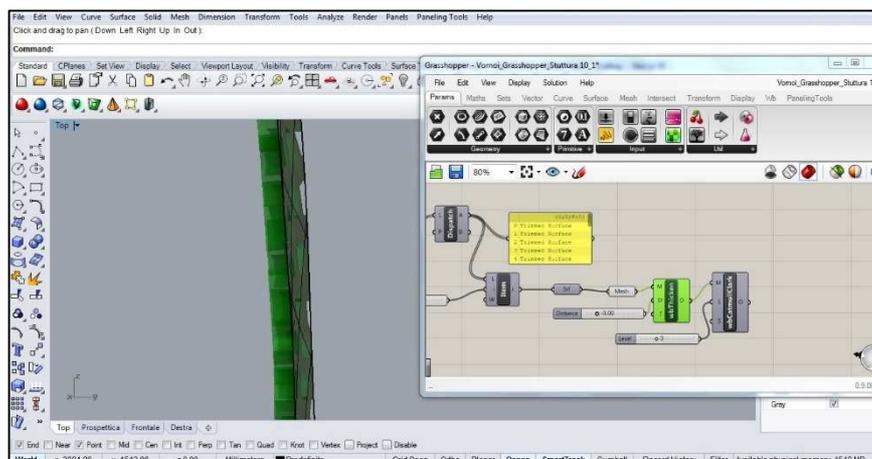


Figura 5.40 – Particolare dello spessore della mesh della tassellatura di Voronoi

L'ultimo passaggio dell'algoritmo è l'operazione di smoothing al fine di avere una struttura con contorni raccordati e non con spigoli vivi. Questa operazione è stata svolta mediante la funzione "Weaverbird's Catmull-Clark Subdivision", la quale si basa sull'algoritmo Catmull-Clark.

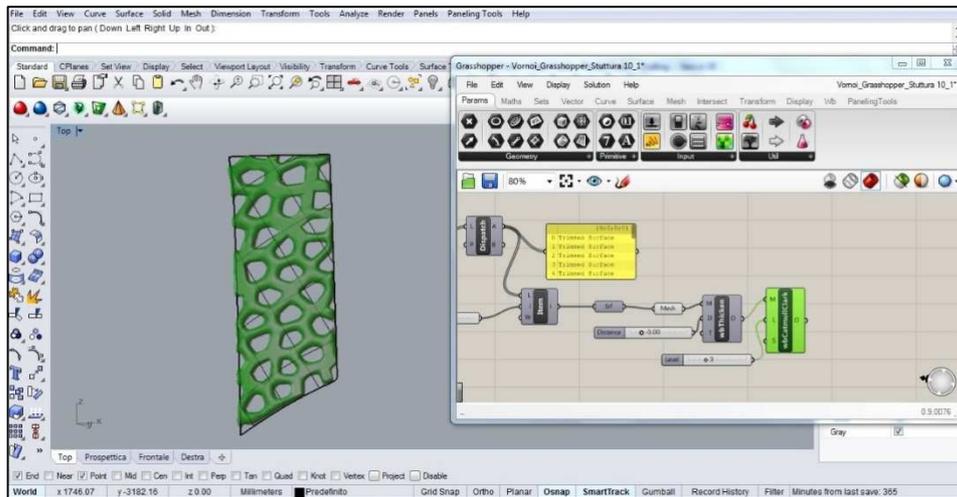


Figura 5.41 – Mesh della tassellatura di Voronoi finale

Di seguito si riporta lo schema a blocchi dell'algoritmo generativo sviluppato in Grasshopper per la realizzazione della tassellatura di Voronoi da applicare per la customizzazione dell'ortesi di gomito.

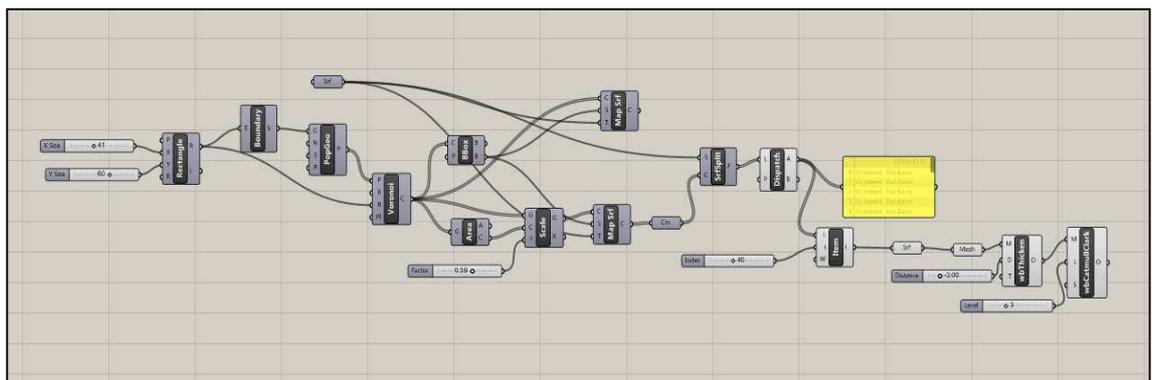


Figura 5.42 – Schema a blocchi dell'algoritmo generativo per la tassellatura di Voronoi

A questo punto è possibile estrarre la mesh della tassellatura di Voronoi ed esportarla in formato STL.

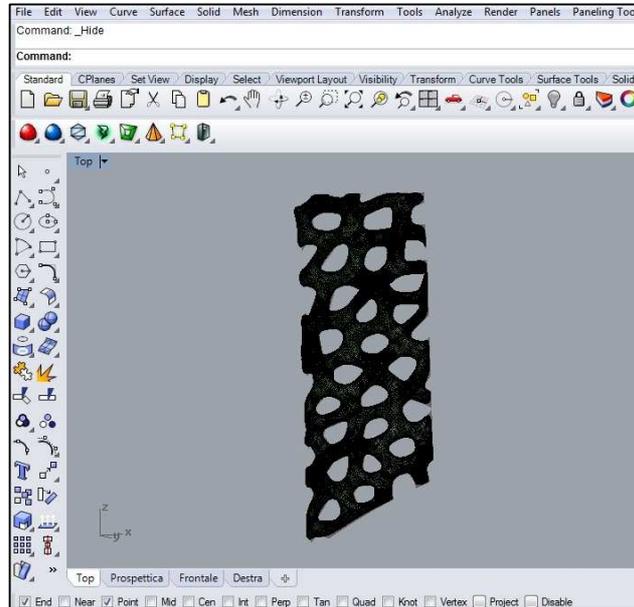


Figura 5.43 – Mesh finale in STL della tassellatura di Voronoi

Anche in questo caso è stato necessario l'impiego di Geomegic Studio per poter convertire la mesh prima in superfici NURBS e successivamente in modello CAD.

Di seguito sono riportate alcune immagini del modello CAD completo dell'ortesi.

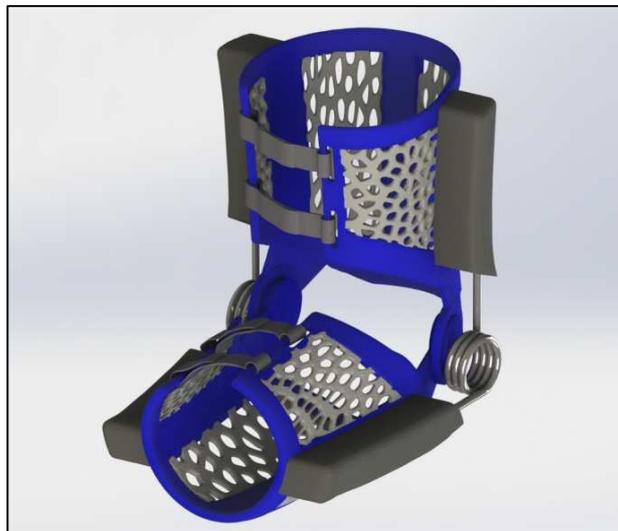




Figura 5.44 – Modello CAD dell'ortesi con tassellatura di Voronoi in Grasshopper

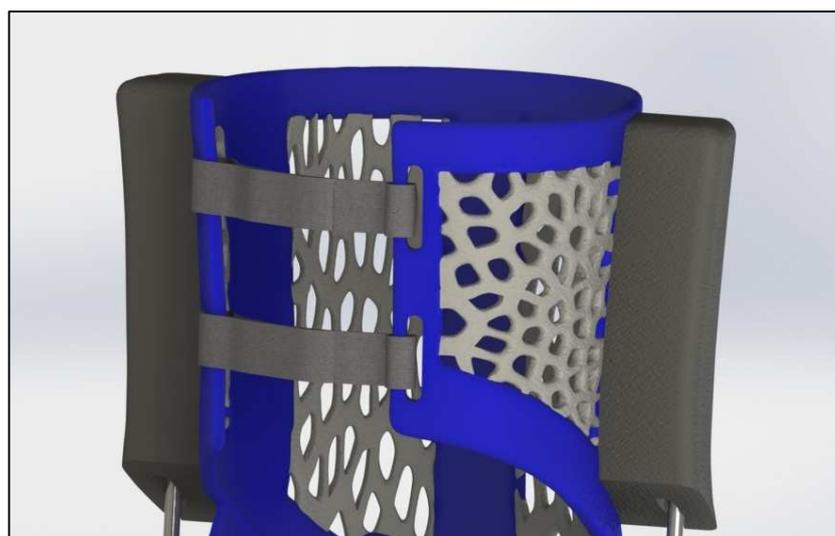


Figura 5.45 – Particolare del modello CAD dell'ortesi con tassellatura di Voronoi in Grasshopper

### 5.3.3. Uso dell'Additive Manufacturing Textile nelle ortesi di gomito

Un altro aspetto curato in questo lavoro è legato alla progettazione di una struttura flessibile, tipica dell'Additive Manufacturing Textile, da utilizzare nell'ortesi di gomito customizzata. Questo tipo di struttura, oltre a rendere più gradevole esteticamente l'ortesi, permette una maggiore adattabilità dell'ortesi ai cambiamenti di forma del braccio durante i movimenti.

Tale struttura è stata progettata sia con software di modellazione convenzionale, sia mediante un algoritmo generativo opportunamente implementato in Grasshopper. Ciò rappresenta una soluzione innovativa capace di superare dei problemi riscontrati durante la modellazione della struttura con software convenzionali.

#### 5.3.3.1. Realizzazione di una struttura flessibile con software convenzionali

Per la realizzazione della struttura flessibile con software convenzionale, è stato impiegato Rhinoceros.

Il primo passo è l'importazione della superficie dell'ortesi in Rhinoceros (Fig. 5.46).

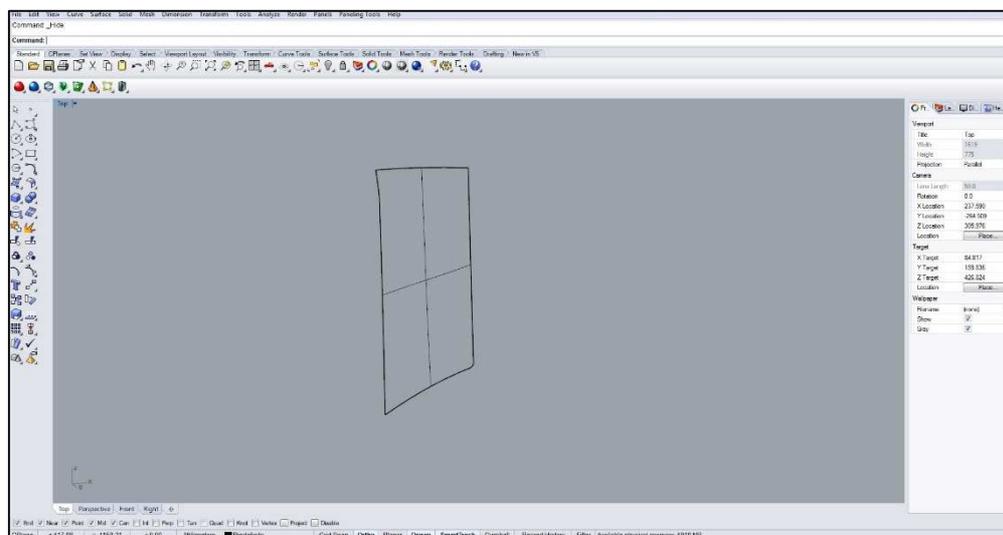


Figura 5.46 – Superficie ortesi

Per la modellazione della struttura flessibile, è stato impiegato un plug-in di Rhinoceros: il Paneling Tools. Questo plug-in consente di effettuare la pannellizzazione di superfici e polisuperfici creando dei pattern.

Il modello da ripetere può essere importato o generato all'interno di Rhinoceros. In questo caso si è voluto realizzare una struttura flessibile composta da anelli (Fig. 5.47) aventi un diametro di 6 mm e sezione circolare di diametro pari a 1,30 mm.

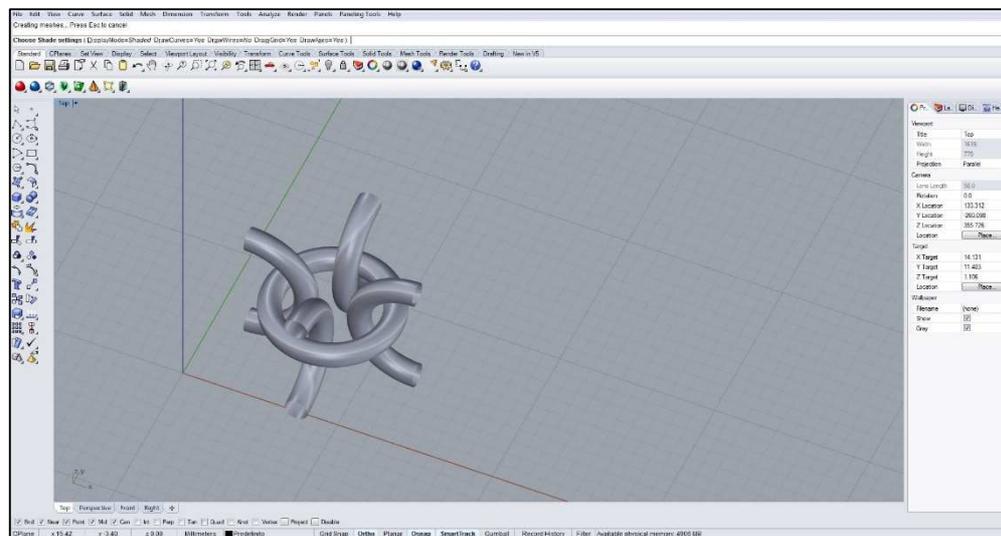


Figura 5.47 – Modello ad anelli usato per la pannellizzazione

Per effettuare la pannellizzazione del modulo sulla superficie è stato impiegato il comando “ptPanel3DCustom”, il quale ripete un determinato riquadro di delimitazione del modello 3D in una casella della griglia di unità (una griglia di unità è una casella delimitata da quattro punti di una prima griglia di delimitazione sulla superficie e quattro punti della seconda griglia di delimitazione realizzata con un offset rispetto la prima).

Mediante dei comandi presenti nel plug-in sono state create le due griglie di punti sulla superficie (Fig. 5.48).

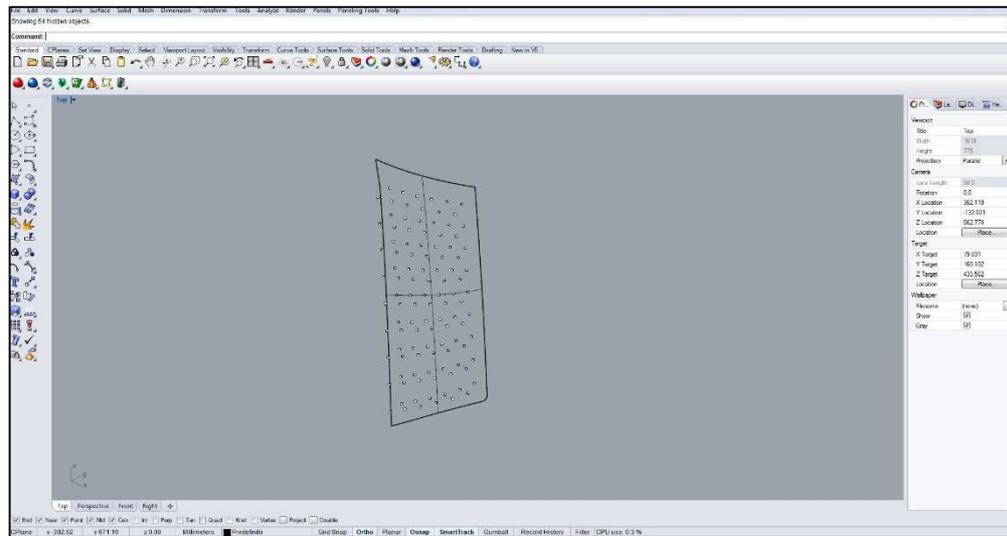


Figura 5.48 – Griglie di punti

Nella figura di seguito è riportata la struttura realizzata ed adattata alla superficie dell'ortesi.

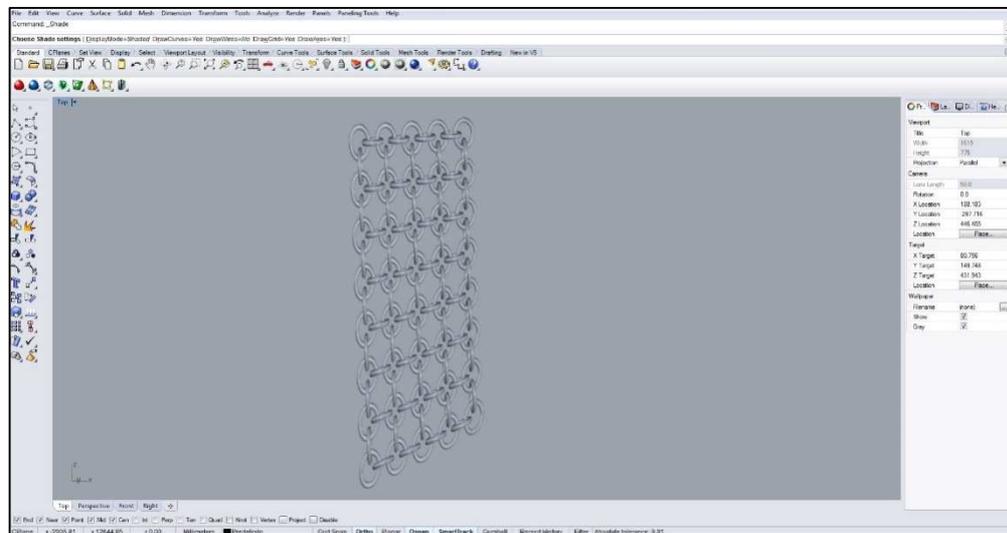


Figura 5.49 – Modello della struttura flessibile

La realizzazione di una struttura flessibile con questo approccio, però, presenta delle limitazioni legate principalmente alla deformazione che gli anelli subiscono rispetto le loro dimensioni originali durante la loro pannellizzazione.

Di seguito sono riportate alcune immagini da cui è possibile evincere le problematiche riscontrate nella realizzazione di una struttura flessibile con un approccio convenzionale.

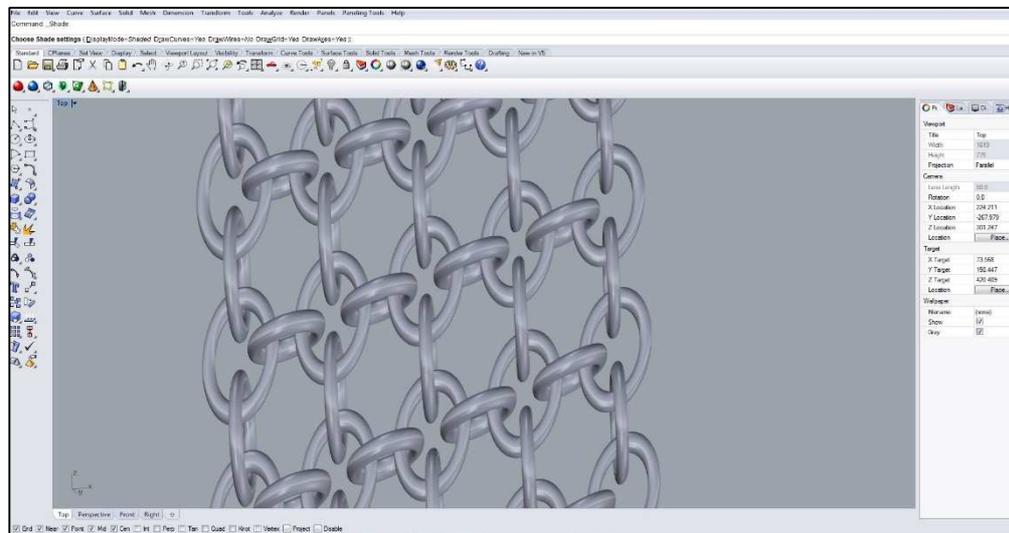


Figura 5.50 – Deformazione degli anelli della struttura flessibile

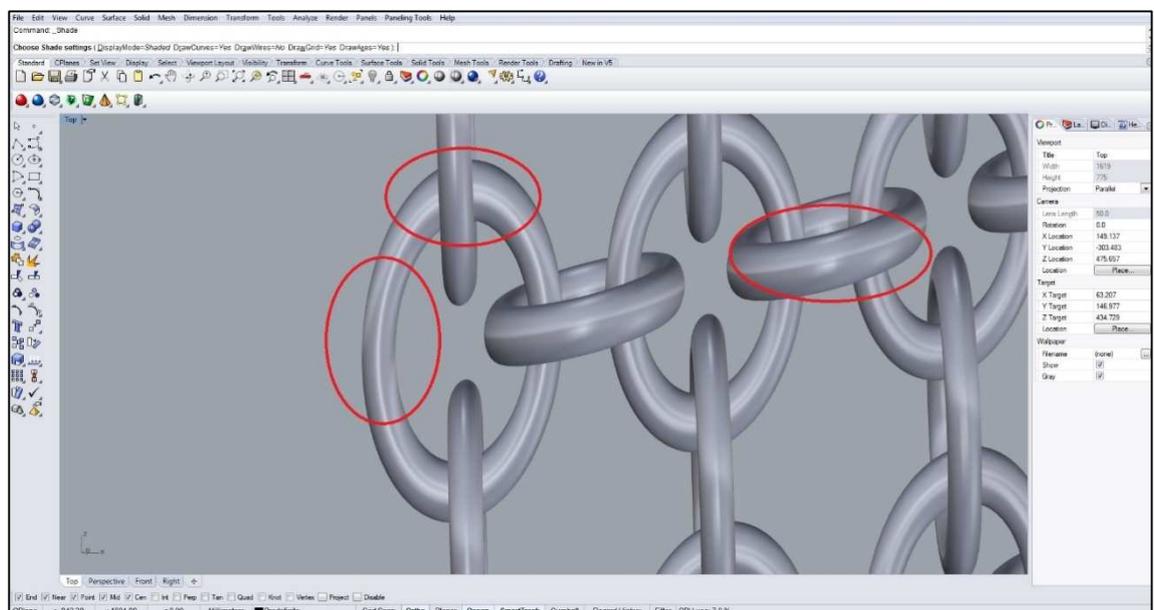


Figura 5.51 –Particolare: deformazione degli anelli della struttura flessibile

In particolare, la figura 5.51 mostra la variazione di diametro subita dagli anelli.

Osservando da altra angolazione è possibile notare le deformazioni subite dagli anelli nelle altre direzioni (Figg. 5.53 – 5.54).

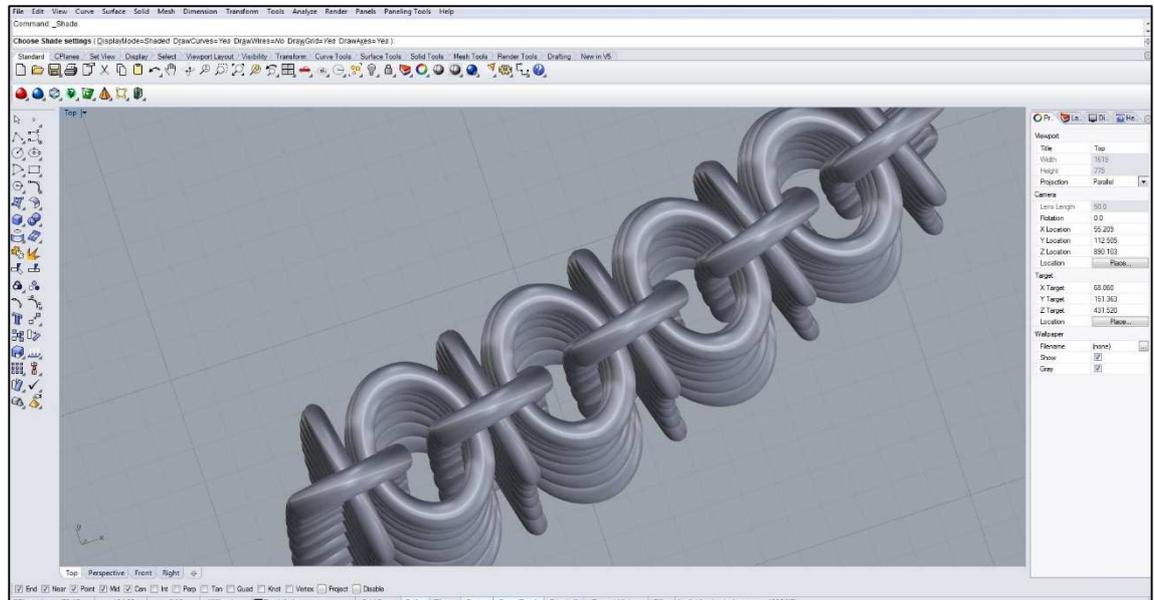


Figura 5.53 – Deformazione degli anelli della struttura flessibile

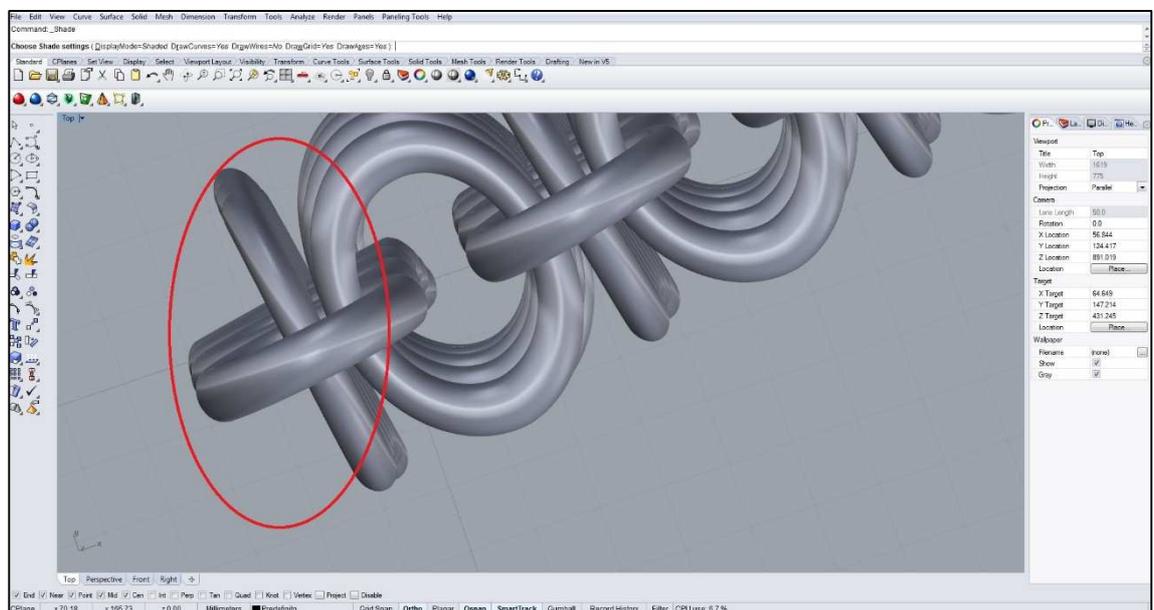


Figura 5.54 – Particolare: deformazione degli anelli della struttura flessibile

Spesso si sono riscontrate diminuzioni del diametro della sezione dell'anello anche del 40÷50%.

In alcuni casi, oltre alle deformazioni, si sono rilevati dei disallineamenti tra gli anelli che, pertanto, rendono la struttura instabile.

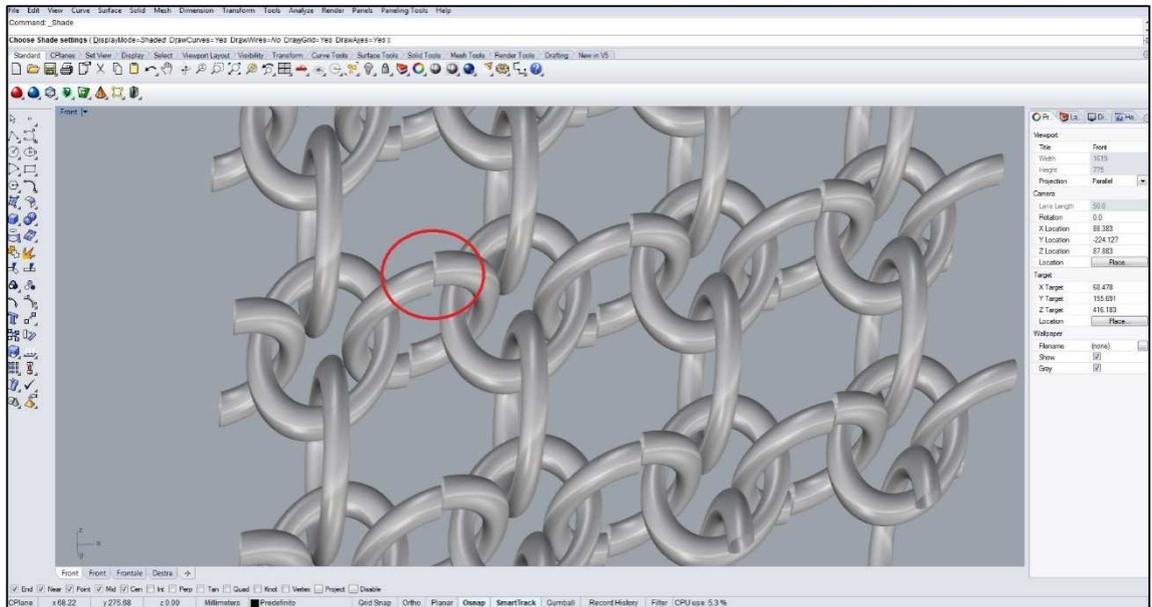


Figura 5.55 – Particolare: disallineamento e deformazione degli anelli della struttura flessibile

Tutti questi problemi che si riscontrano nella realizzazione di una struttura complessa mediante un approccio tradizionale, oltre ad avere un impatto negativo a livello estetico, rappresentano una limitazione importante nella fase di fabbricazione dell'ortesi mediante tecniche di AM dal momento che la modifica delle dimensioni dei singoli componenti della struttura può causare problemi nella fase di realizzazione in quanto può portare alla rottura della struttura flessibile.

### **5.3.3.2. Realizzazione di una struttura flessibile mediante algoritmo generativo**

Per ovviare ai problemi riscontrati durante la modellazione della struttura flessibile con Rhinoceros, è stato sviluppato un algoritmo generativo in Grasshopper.

Questo algoritmo consente di creare una struttura flessibile costituita da anelli ed adattarla perfettamente alle superfici dell'ortesi di gomito, senza comportare alcuna deformazione degli anelli stessi rispetto alle loro dimensioni nominali.

L'algoritmo è composto da tre blocchi principali che consentono la:

- generazione del modulo base da ripetere;
- creazione di una griglia di punti sulla superficie;
- pannellizzazione della geometria sulla superficie.

Il primo passo nello sviluppo dell'algoritmo è la generazione della geometria da ripetere. Nel caso di una struttura composta da anelli, come moduli base da ripetere sulla superficie è stato creato un gruppo di tre anelli tra loro connessi (Fig. 5.56), tutti aventi un diametro di 6 mm ed un diametro della sezione circolare pari a 1,30 mm.

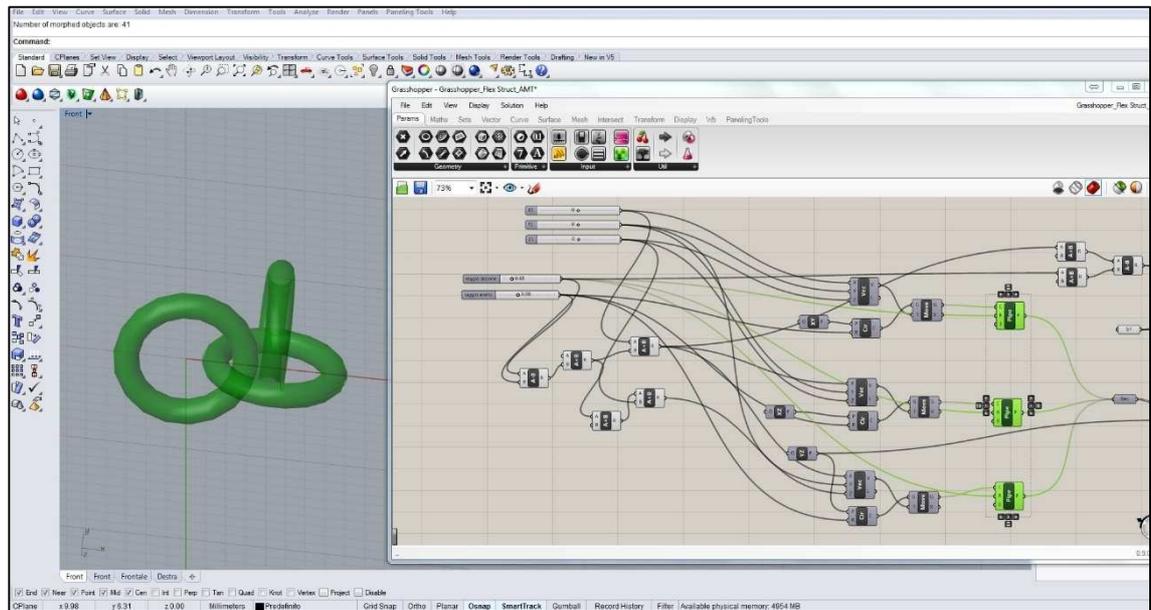


Figura 5.56 –Anelli della struttura flessibile (in rosso le circonferenze di base)

Le posizioni relative dei tre anelli sono state parametrizzate, mediante operazioni matematiche, in funzione dei parametri di input (diametri dell’anello e della sezione circolare dello stesso). In questo modo si è creato un modello robusto in quanto anche quando l’utente ha necessità di variare le dimensioni degli anelli, questi ultimi rimangono sempre connessi tra loro senza problemi di disallineamento o compenetrazione.

Il secondo passo è la generazione di una griglia di punti sulla superficie dell’ortesi.

Questa operazione è stata eseguita mediante la funzione “Surface Distance”, che permette di creare una griglia di punti sulla superficie suddividendola lungo le direzioni U e V. Le distanze tra i punti lungo U e V sono state parametrizzate in funzione del diametro dell’anello e del diametro della sezione circolare dell’anello, in modo tale che al variare di tali parametri sia sempre assicurata la corretta interconnessione degli anelli nella struttura.

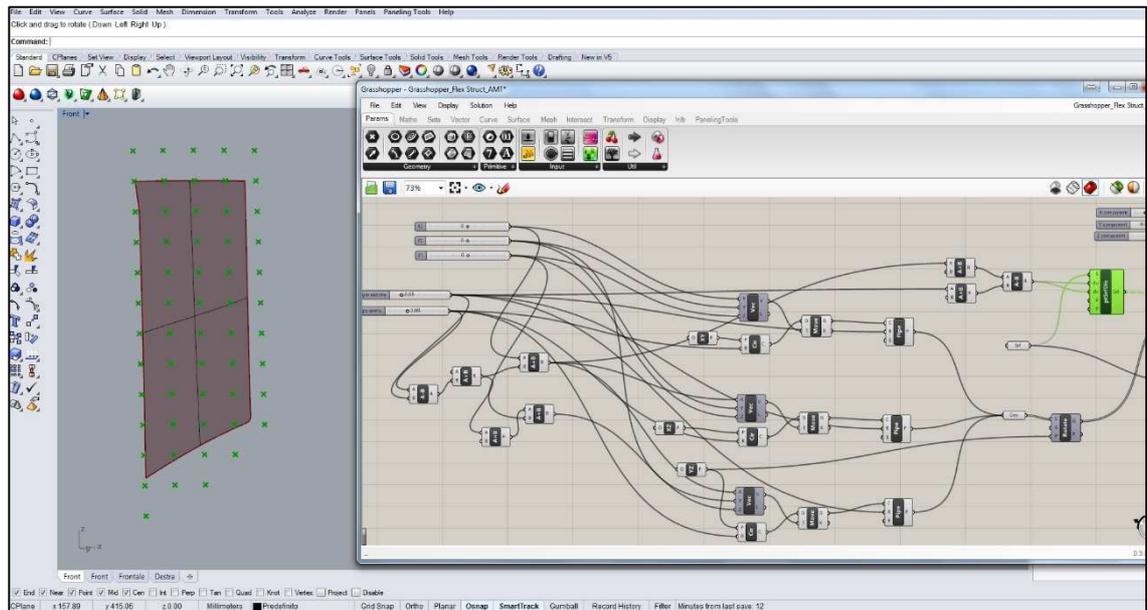


Figura 5.57 – Griglia di punti sulla superficie

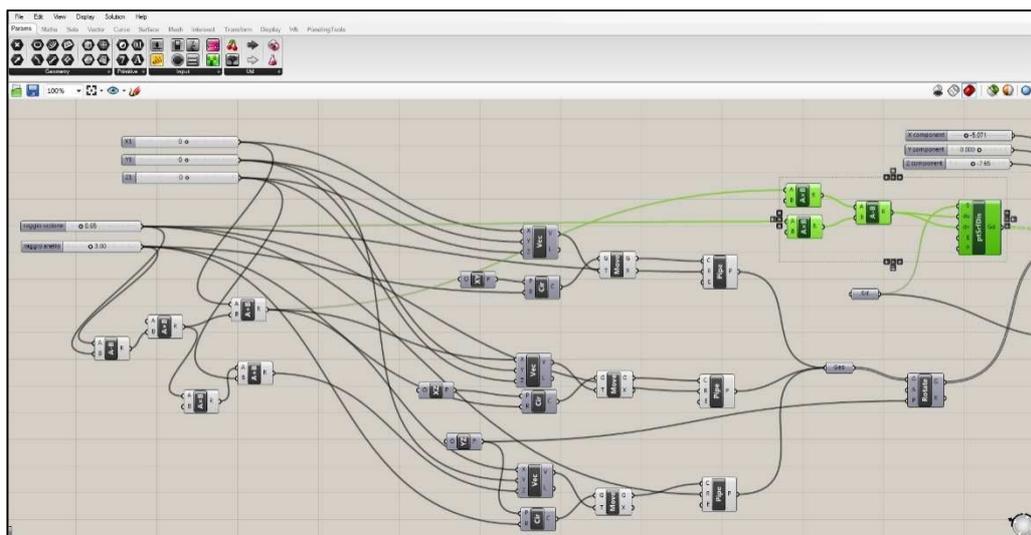


Figura 5.58 – Parametrizzazione delle distanze dei punti della griglia

Per “pannellizzare” il modulo base nella griglia di punti sulla superficie è stata utilizzata la funzione “Orient to Grid”, che permette di orientare e mappare un oggetto rispetto ad una griglia su una superficie (Fig. 5.59).

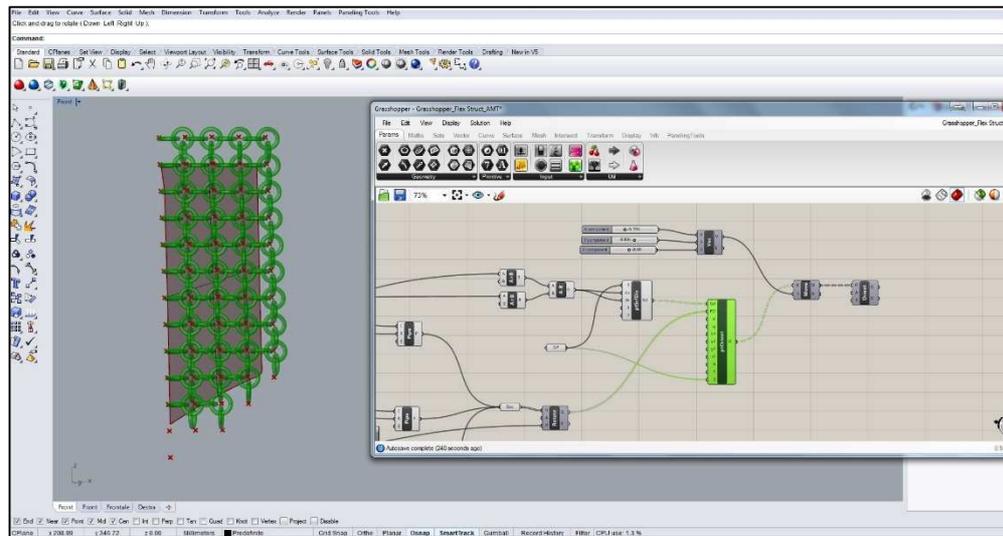


Figura 5.59 – Pannellizzazione degli anelli sulla superficie

Successivamente la struttura è stata adattata perfettamente alla superficie attraverso delle funzioni di spostamento (Fig. 5.60).

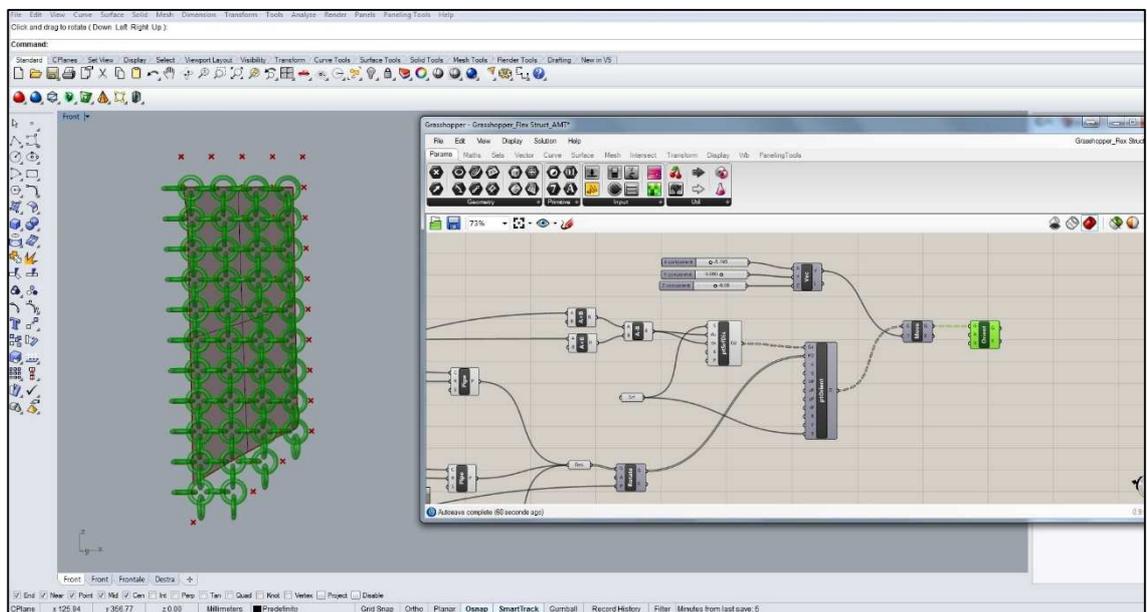


Figura 5.60 – Struttura finale adattata sulla superficie

In figura 5.61 è presentato lo schema a blocchi dell'algoritmo generativo sviluppato.

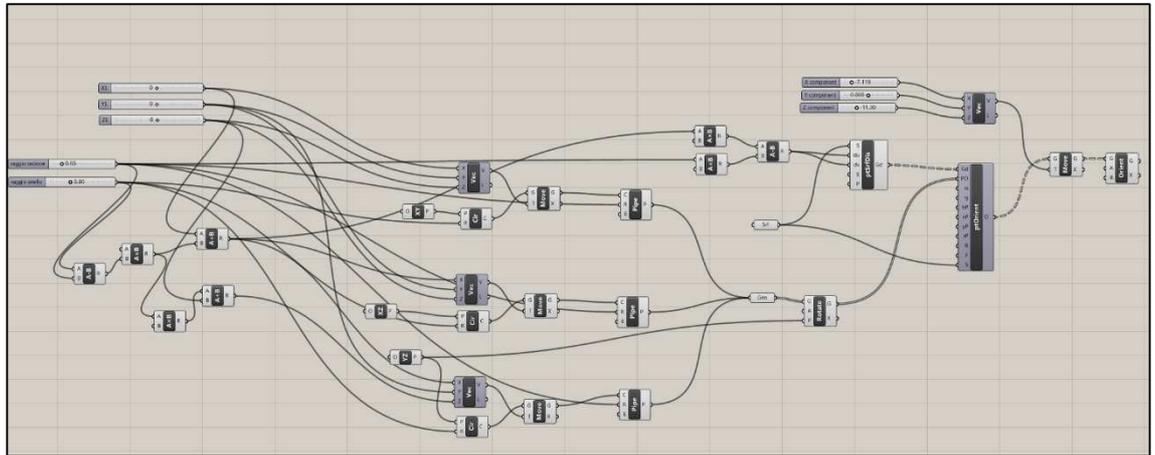


Figura 5.61 – Schema a blocchi dell'algoritmo generativo sviluppato

La struttura flessibile finale composta da anelli è riportata nell'immagine seguente.

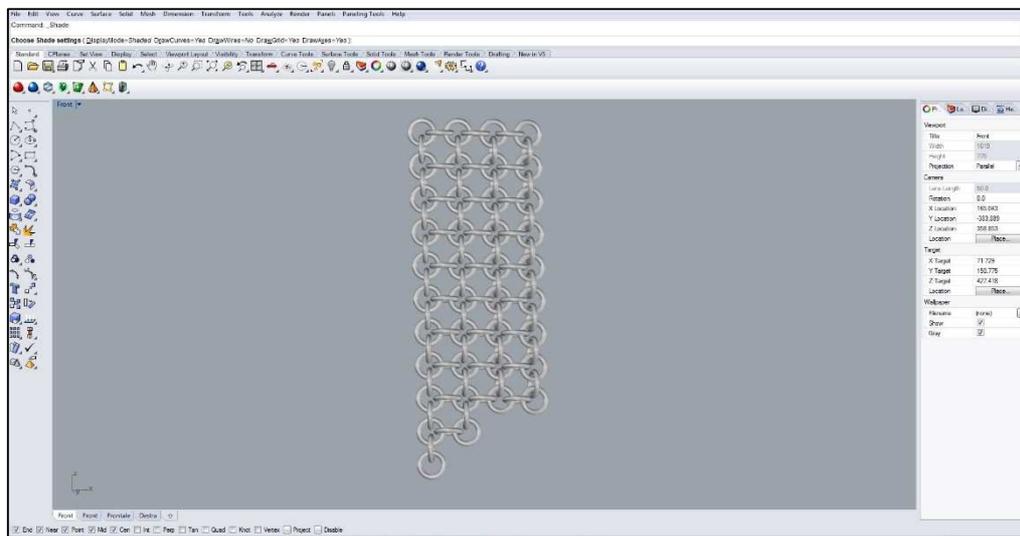


Figura 5.62 – Struttura flessibile finale

Nelle immagini che sono riportate di seguito è possibile osservare come tutti i problemi riscontrati durante la modellazione della struttura con software convenzionale, ovvero deformazione degli anelli e possibili disallineamenti, siano stati tutti completamente risolti grazie all'algoritmo generativo sviluppato.

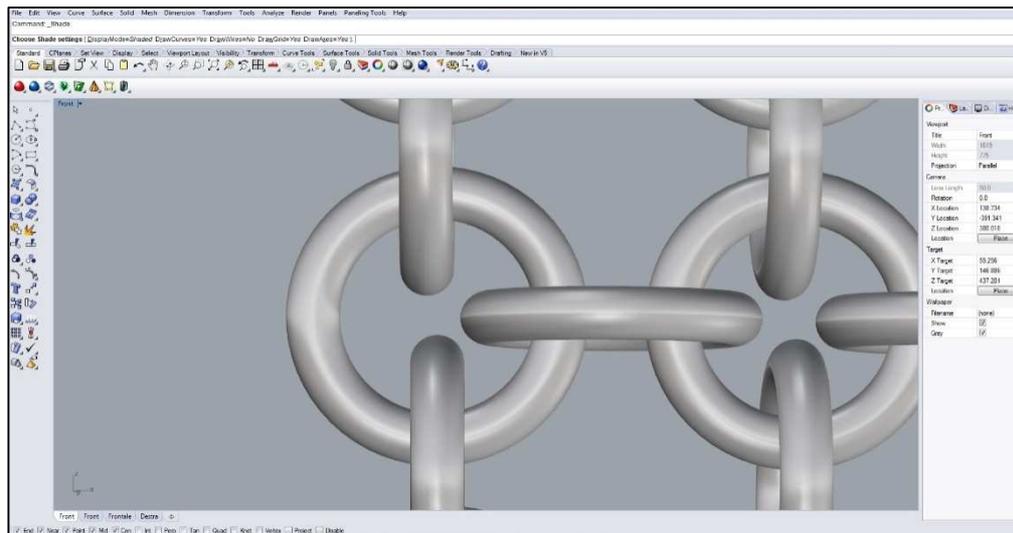


Figura 5.63 – Particolare struttura flessibile finale

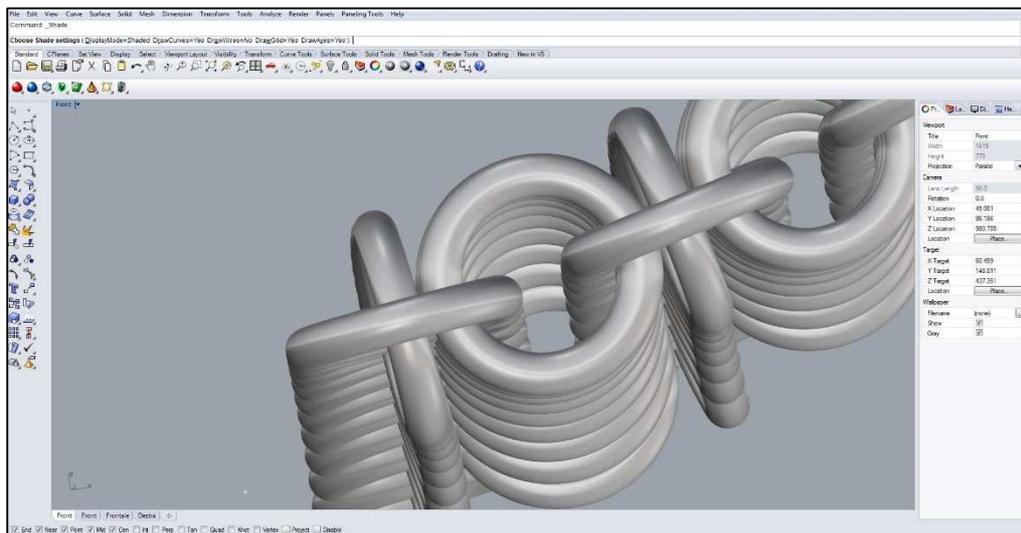


Figura 5.64 – Particolare struttura flessibile finale

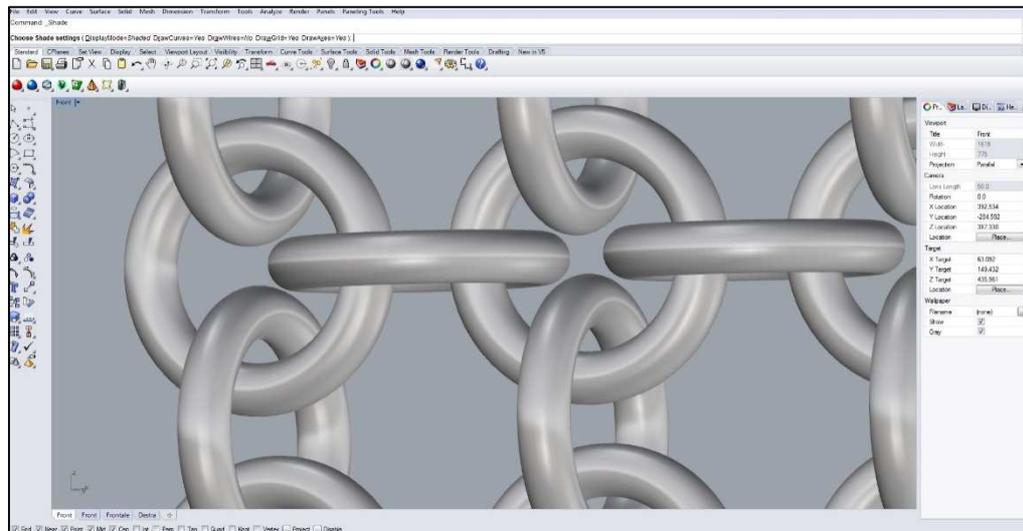


Figura 5.65 – Particolare struttura flessibile finale

L'algoritmo generativo è stato applicato a tutte le superfici dell'ortesi personalizzando il dispositivo ed aumentando la capacità di adattarsi alle variazioni di forma del braccio durante i movimenti.

Di seguito è riportato il modello finale dell'ortesi.



Figura 5.66 – Modello CAD finale dell'ortesi di gomito

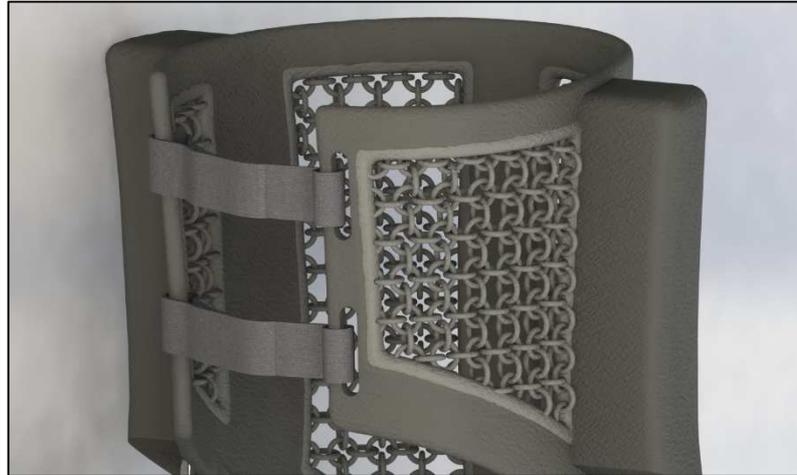


Figura 5.67–Particolare del modello CAD finale dell’ortesi di gomito

#### **5.4. Studio dell’influenza dei parametri di processo in Additive Manufacturing**

Prima di procedere alla realizzazione dell’ortesi con tecniche di AM, è stato condotto uno studio sull’influenza dei parametri di processo su prodotti ottenuti con tecniche additive.

In particolare, è stata studiata l'influenza dello spessore del layer sull'accuratezza di forma e dimensionale nel processo FDM (Fused Deposition Modeling), essendo quest’ultimo uno dei processi più diffusi anche tra le stampanti di uso domestico [14, 53,54].

Sfortunatamente, le stampanti 3D FDM a basso costo hanno una bassa produttività e, di solito, producono oggetti con bassa accuratezza dimensionale e geometrica [55]. Questi limiti sono dovuti alle soluzioni hardware e software, ma anche ai componenti meccanici che, a causa del ridotto costo della stampante, non possono avere prestazioni elevate. Ad ogni modo, alcuni di questi effetti collaterali possono essere effettivamente limitati scegliendo i parametri del processo di stampa adatti [56-59].

Lo studio è stato condotto su campioni cilindrici creati con una stampante 3D, mentre la verifica dimensionale e di forma dei componenti stampati è stata eseguita seguendo un tipico approccio di reverse engineering. In particolare, le nuvole di punti delle superfici dei diversi campioni sono state acquisite tramite uno scanner laser 3D. Successivamente, le nuvole di punti acquisite sono state post-processate, convertite in modelli 3D e analizzate per rilevare gli scostamenti di forma e dimensionale rispetto ai modelli CAD iniziali.

#### 5.4.1. Realizzazione dei campioni cilindrici

I prototipi analizzati sono stati costruiti utilizzando una stampante 3D, la Da Vinci 1.0A (Fig. 5.68). Questa stampante può utilizzare sia filamenti in ABS che in PLA, ha un volume di costruzione massimo di 200x200x200 mm ed è gestita dal software proprietario "XYZware". Sfortunatamente, questo software non consente di modificare singolarmente e con precisione i parametri di stampa. A tale scopo sono stati utilizzati i software "Slic3r" e "Simplify3D". I file ".gcode" creati con questi software, contenenti il set di parametri di stampa imposto, sono stati importati sul software XYZware per avviare la fase di stampa.



Figura 5.68 – Stampante Da Vinci 1.0A

Come detto in precedenza, la qualità dei prototipi AM può dipendere fortemente da una serie di parametri di processo.

In questo studio è stata analizzata l'influenza dello spessore del layer sulla forma e sull'accuratezza dimensionale degli oggetti stampati.

L'indagine è stata condotta sui campioni cilindrici le cui dimensioni sono riportate in figura 5.69.

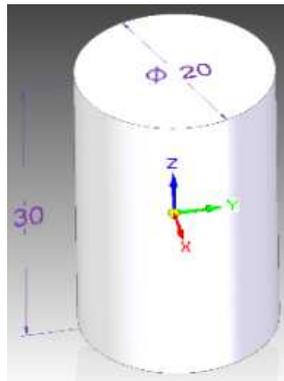


Figura 5.69 –Dimensioni del cilindro analizzato

Sono stati analizzati sei prototipi realizzati con stessi parametri di stampa ma con due valori diversi (tre con 0,2 mm e tre con 0,05 mm) dello spessore dello strato (figura 5.70). Per quanto riguarda gli altri parametri di stampa, sono stati utilizzati i valori predefiniti della stampante Da Vinci (tabella 1) e la direzione di slicing è stata imposta lungo l'asse z.



Figura 5.70 – Prototipi stampati con valori di spessore dello strato di 0,2 mm (a sinistra) e 0,05 mm (a destra)

<i>Parametri</i>	<i>Valore</i>
Diametro ugello	0.4 mm
Velocità di stampa	5 mm/s
Temperatura del piatto	90°
Temperatura ugello	210°
Densità di riempimento	25%
Spessore bordo	0.7 mm

Tabella 1 – Parametri di processo

Sono stati fatti anche alcuni tentativi per valutare direzioni di slicing. Sfortunatamente, in nessun caso è stato ottenuto alcun prototipo accettabile (figura 5.71). Questi errori di stampa rivelano un notevole limite tecnico della stampante.



Figura 5.71– Campioni cilindrici ottenuti con direzione di slicing lungo l'asse x

Tutti i prototipi sono stati acquisiti con uno scanner laser 3D a triangolazione della Hexagon Metrology (Fig. 5.72). Questo sistema, già presentato in precedenza, ha lunghezze di linea regolabili ed è in grado di acquisire nuvole di punti ad alta velocità (150000 punti al secondo) con un buon livello di precisione (0,013 mm).



Figura 5.72 – Sistema di scansione HP-L-20.8

Le nuvole di punti acquisite sono state post-processate e convertite in superfici NURBS ottenendo modelli che differiscono meno di 0,035 mm dalle nuvole di punti. Nella fase finale del processo, le superfici NURBS sono state convertite in modelli solidi CAD (Fig. 5.73).



Figura 5.73– Provino cilindrico: modello CAD

Successivamente, ogni prototipo di modello CAD è stato allineato con il modello nominale CAD (Fig.5.74).

L'allineamento è stato ottenuto utilizzando algoritmi iterativi per minimizzare la distanza tra i punti di confronto. A questo scopo sono stati usati due approcci diversi in sequenza: inizialmente, usando un numero ridotto di punti di confronto,

i modelli sono stati approssimativamente allineati; successivamente, l'allineamento dei modelli è stato ottimizzato utilizzando un numero maggiore di punti di confronto.

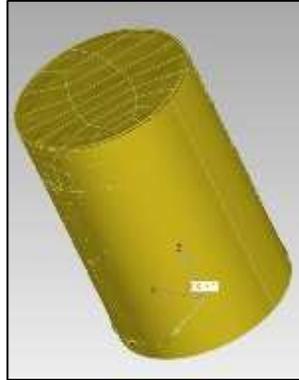


Figura 5.74 – Modelli CAD allineati (acquisito e nominale)

### 5.4.2. Analisi dimensionale

L'ispezione dimensionale è stata implementata misurando i valori di deviazione, considerati come la distanza più piccola tra il modello acquisito e qualsiasi punto del modello CAD nominale. Sono stati anche stimati gli errori quadratici medi (RMSE) per raccogliere informazioni sulla precisione dimensionale dell'oggetto stampato.

I risultati ottenuti sono riassunti nella tabella 2.

<i>Prototipo</i>	<i>Spessore del Layer [mm]</i>	<i>Deviazione (mm)</i>	<i>RMSE (mm)</i>
1	0.2	-0.589	0.324
2	0.2	-0.550	0.254
3	0.2	-0.641	0.318
4	0.05	-0.524	0.298
5	0.05	-0.663	0.297
6	0.05	-0.609	0.324

Tabella 2–Valori dello spessore del layer e risultati di confronto dei prototipi

La Figura 5.75 mostra le mappe relative alle distribuzioni dei valori di deviazione rispetto ai modelli CAD dei prototipi. Grazie a queste mappe si può notare che le

principali differenze dimensionali tra i modelli acquisiti e quelli nominali CAD si verificano lungo l'asse z. Tutti i prototipi, infatti, risultano più corti del cilindro nominale.

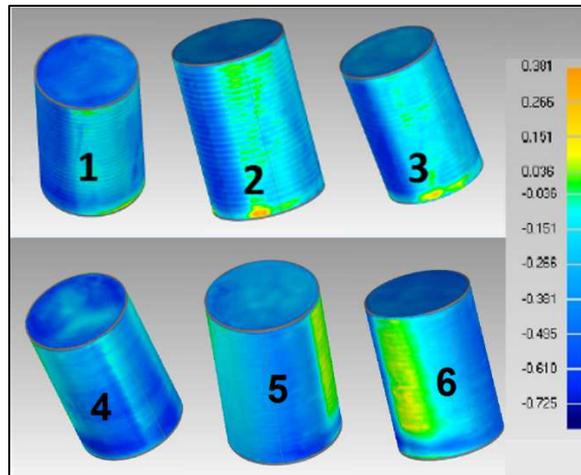


Figura 5.75 – Mappe della deviazione (mm) dei cilindri stampati

I risultati ottenuti mostrano che il valore di deviazione massima (assoluto) varia da 0,524 mm a 0,663 mm, mentre il valore RMSE varia tra 0,254 mm e 0,324 mm. Il prototipo 4 ha i valori più bassi di deviazione, mentre il RMSE più basso è stato stimato per il prototipo 2.

Successivamente, seguendo la procedura di allineamento descritta in precedenza, è stata effettuata anche un'indagine comparativa tra i prototipi per valutare la ripetibilità dei risultati. In particolare, i prototipi 1-2-3 (prototipi con spessore del layer di 0,2 mm) sono stati confrontati due a due. I risultati del confronto sono riassunti nelle mappe delle deviazioni di figura 5.76.

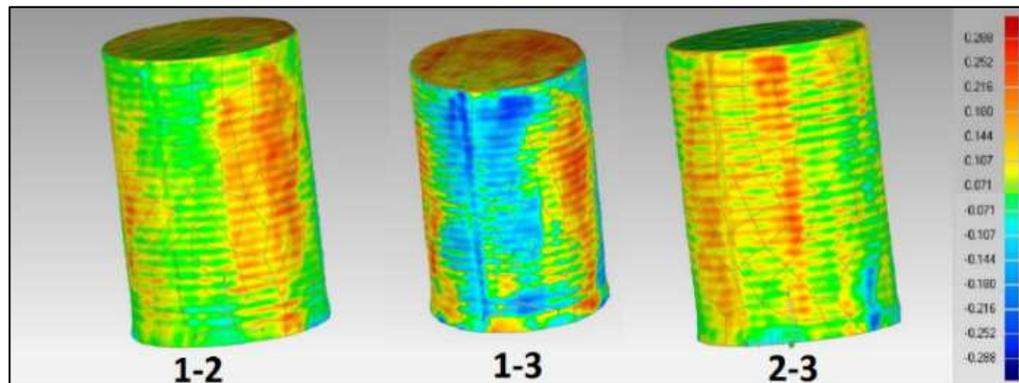


Figura 5.76 – Confronto tra i cilindri stampati: mappe delle deviazioni (mm)

Valori simili (circa 0,280 mm) della deviazione massima sono stati misurati per le tre analisi comparative. Il valore di deviazione massimo, pari a 0,288 mm, è stato trovato tra i prototipi 1 e 2.

Questi risultati dimostrano una qualità moderata della stampante per quanto riguarda la ripetibilità degli oggetti prodotti.

### 5.4.3. Controllo della circolarità e della cilindricità

Sono stati anche eseguiti controlli della circolarità e cilindricità dei campioni.

Per quanto riguarda la circolarità, è stata effettuata un'analisi qualitativa. In particolare, le sezioni trasversali (lungo il piano x-y di figura 5.69) a metà altezza dei cilindri sono state estratte e confrontate con la sezione circolare nominale.

La figura 5.77 mostra i risultati ottenuti. Si può notare che le sezioni trasversali di tutti i prototipi non sono perfettamente circolari ma hanno una forma pseudo-ellittica, dimostrando così un errore di circolarità ripetitivo.

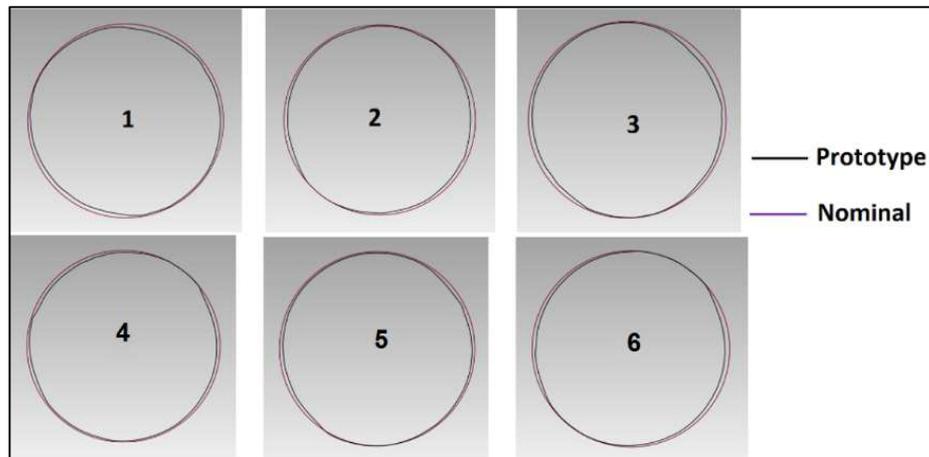


Figura 5.77 – Confronto tra le sezioni trasversali (piano x-y)

Il controllo di cilindricità è stato effettuato individuando, per ciascun campione, la regione di tolleranza, ovvero la zona delimitata da due cilindri concentrici ("interno" ed "esterno") all'interno dei quali si trovano tutti i punti della superficie cilindrica (Fig.5.78).

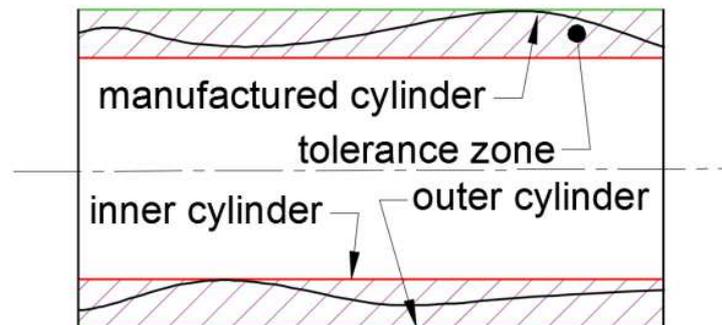


Figura 5.78 – Zona di tolleranza della cilindricità

Per ogni prototipo sono stati trovati i cilindri interno ed esterno e il loro diametro valutato per calcolare la zona di tolleranza cilindrica come:

$$T_c = \frac{(D_e - D_i)}{2}$$

I dati di controllo della cilindricità sono riepilogati nella tabella 3. I migliori risultati, in termini di tolleranza più bassa, sono stati trovati per i prototipi 4 e 5, stampati usando uno spessore dello strato di 0,05 mm. Tutti i dati ottenuti dimostrano una scarsa qualità della stampante riguardo all'accuratezza geometrica.

Prototipo	Diametro cilindro esterno (mm)	Diametro cilindro interno (mm)	Tolleranza cilindricità $T_c$ (mm)
1	20.130	18.727	0.702
2	20.370	18.808	0.781
3	20.242	18.673	0.785
4	20.180	18.834	0.673
5	20.238	18.908	0.665
6	20.238	18.804	0.717

Tabella 3 – Risultati del controllo della cilindricità (diametro nominale = 20 mm)

Dallo studio svolto è emerso che, per il caso studio analizzato, i migliori risultati sono ottenuti con uno spessore del layer pari a 0,05 mm.

I risultati ottenuti hanno dimostrato che, utilizzando stampanti a basso costo, l'accuratezza geometrica e dimensionale ottenibile è piuttosto scarsa. Inoltre, è stato osservato che la scelta appropriata dei parametri di stampa potrebbe modificare in modo significativo la qualità dell'oggetto stampato.

## **5.5. Realizzazione dell'ortesi mediante tecniche di Additive Manufacturing**

Altro aspetto fondamentale del lavoro è stata la realizzazione di tre prototipi di ortesi di gomito mediante tecniche di AM al fine di valutare le differenti scelte progettuali effettuate.

### **5.5.1. Tecniche di AM impiegate**

Per la realizzazione dei prototipi di ortesi di gomito sono state impiegate due tecnologie di AM già presentate nei capitoli precedenti:

- PolyJet;
- Selective laser sintering (SLS).

Si tratta di due processi differenti di AM che consentono la realizzazione di prototipi con caratteristiche diverse e, nel caso del processo PolyJet, l'uso di più materiali contemporaneamente.

### **5.5.2. Stampanti 3D impiegate**

Per la realizzazione dei tre modelli di ortesi di gomito sono state impiegate due differenti stampanti 3D:

- Connex 500 della Stratasys per processo PolyJet;
- FORMIGA P100 della EOS per processo SLS.

#### **5.5.2.1. Stampante 3D Connex 500**

La Connex 500 è il primo sistema di stampa 3D che genera modelli con più materiali contemporaneamente. Questa stampante permette di produrre parti e

assiemi costituiti da più materiali con diverse proprietà meccaniche o fisiche, il tutto in un'unica costruzione.

Inoltre, consente di risparmiare costi e tempi per la simulazione e preparazione di stampi complessi e costosi per la doppia iniezione e per le applicazioni che di solito comportano l'incollaggio di parti separate costituite da materiali diversi.

Di seguito si riportano due immagini della stampante Connex 500.



Figura 5.79 – Stampante 3D Connex 500



Figura 5.80 – Stampante 3D Connex 500

Le principali specifiche tecniche della Connex 500 sono riportate in figura 5.81.

Technical Specifications	
<b>Layer Thickness (Z-axis)</b> Horizontal build layers down to 16-micron	<b>Digital Materials</b> Wide range of composite materials fabricated on the fly
<b>Tray Size (XxYxZ)</b> 500x400x200 mm (19.7x15.7x7.9 inch)	<b>Support Type</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• FullCure®705 Support</li><li>• Non-toxic gel-like photopolymer support easily removed by WaterJet</li></ul>
<b>Net Build Size (XxYxZ)</b> 490x390x200 mm (19.3x15.4x7.9 inch)	<b>Materials Cartridges:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Four sealed 3.6 kg (7.9 lb) cartridges</li><li>• Tango family and DurusWhite also available as 1.44kg (3.17 lb) net weight in 3.6 kg casing</li><li>• Two different model materials loaded</li><li>• Front loading for quick replacement</li></ul>
<b>Build Resolution</b> X-axis: 600 dpi Y-axis: 600 dpi Z-axis: 1600 dpi	<b>Power Requirements</b> 110–240 VAC 50/60 Hz 1.5 KW single phase
<b>Printing Modes</b> Digital Material (DM): 30-micron (0.001 inch) High Quality (HQ): 16-micron (0.0006 inch) High Speed (HS): 30-micron (0.001 inch)	<b>Machine Dimensions (WxDxH)</b> 1420x1120x1130 mm (55.9x44.1x44.5 inch)
<b>Typical Accuracy</b> 20-85um for features below 50mm Up to 200um for full model size (for rigid materials only, depending on geometry, build parameters and model orientation)	<b>Machine Weight</b> Net 500kg (Net 1102 lb)
<b>Supported Model Materials</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• FullCure®720 General Purpose, transparent material</li><li>• Vera Family opaque materials</li><li>• DurusWhite Polypropylene-like material</li><li>• Tango Family rubber-like flexible material</li></ul>	<b>Operational Environment</b> 18°C to 22°C (64.5°F to 71.5°F) Relative Humidity 30 – 70%
	<b>Compatibility</b> Windows XP, Windows Vista

Figura 5.81 – Specifiche tecniche della stampante 3D Connex 500

Le stampanti 3D PolyJet permettono di lavorare con una vasta gamma di materiali ed anche con numerose combinazioni di essi in uno stesso modello 3D.

### 5.5.2.2. Stampante 3D FORMIGA P100

La stampante FORMIGA P100 produce prodotti in plastica da poliammide o polistirene in poco tempo e direttamente da modelli CAD.

Questa stampante è ideale per la produzione di piccole serie e prodotti personalizzati con geometria complessa completamente funzionali.

La FORMIGA P100 è perfetta per i componenti piccoli, filigranati e prototipi in cui vi sono dettagli molto piccoli.

Di seguito si riporta un'immagine della stampante FORMIGA P100.



Figura 5.82 – Stampante 3D FORMIGA P100

In figura 5.83 vengono riportate le specifiche tecniche della FORMIGA P100.

Technical Data	
Effective building volume	200 mm x 250 mm x 330 mm (7.9 x 9.8 x 13 in)
Building speed (material-dependent)	up to 24 mm height/h (0.94 in/h)
Layer thickness (material-dependent)	typically 0.1 mm (0.004 in)
Support structure	not necessary
Laser type	CO <sub>2</sub> , 30W
Precision optics	F-theta lens
Scan speed during build process	up to 5 m/s (16.4 ft/sec)
Power supply	16 A
Power consumption (nominal)	2 kW
Nitrogen generator	integrated (optional)
Compressed air supply	minimum 6,000 hPa; 10 m <sup>3</sup> /h (87 psi; 13.08 yd <sup>3</sup> /h)
Dimensions	
Machine with powder containers and touch screen	1,320 mm x 1,067 mm x 2,204 mm (51.97 x 42.01 x 86.77 in)
Recommended installation space	3.2 m x 3.5 m x 3 m (126 x 137.8 x 118.1 in)
Weight	ca. 600 kg (1,323 lb)
Powder mixing station	700 mm x 500 mm x 1,000 mm (27.56 x 19.69 x 39.37 in)
Unpacking and sieving station	1,200 mm x 700 mm x 1,500 mm (47.24 x 27.56 x 59.06 in)

Figura 5.83 – Specifiche tecniche della stampante 3D FORMIGA P100

Questa stampante permette di lavorare con una vasta gamma di materiali, come polimeri termoplastici, miscele di alluminio e nylon, elastomeri.

### 5.5.3. Materiali impiegati

I materiali impiegati per la realizzazione dell'ortesi sono stati scelti in funzione della tecnologia da impiegare e dalle caratteristiche desiderate. In particolare, per quando riguarda la tecnologia PolyJet sono stati impiegati due materiali per la realizzazione del prototipo, in modo da avere una struttura più rigida e le superfici dell'ortesi più morbide, ma anche una struttura più morbida nella giunzione del gomito.

Nello specifico sono stati impiegati i seguenti materiali:

- VEROCLEAR RGD 810 (per struttura più rigida);
- TANGO PLUS FLX 930 (per struttura più morbida).

Il VeroClear è un fotopolimero trasparente che consente di simulare otticamente termoplastiche trasparenti come il polimetilmetacrilato (PMMA). Presenta buone caratteristiche di resistenza, rigidità, allungamento e resistenza agli urti e la capacità di fondersi con altri materiali.

In figura 5.84 sono riportate le principali proprietà del VEROCLEAR RGD 810.

TRANSPARENT MATERIALS					
VEROCLEAR RGD810					
	ASTM	UNITS	METRIC	UNITS	IMPERIAL
Tensile strength	D-638-03	MPa	50-65	psi	7250-9450
Elongation at break	D-638-05	%	10-25	%	10-25
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	75-110	psi	11000-16000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2200-3200	psi	320,000-465,000
HDT, oC @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, oC @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.1-1.5	%	1.1-1.5
Tg	DMA, E <sub>2</sub>	°C	52-54	°F	126-129
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized density	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	1.18-1.19		
Ash content	USP281	%	0.02-0.06	%	0.02-0.06

Figura 5.84 – Principali proprietà del VEROCLEAR RGD 810

Il TANGO PLUS è un materiale fotopolimero Polyjet simil gomma traslucido è progettato per simulare materiali trasparenti simili al silicone con diversi livelli di durezza, allungamento e resistenza alla strappo.

E' impiegato per una vasta gamma di applicazioni che richiedono flessibilità e durata come la gomma, guarnizioni, tubi flessibili, calzature sportive, giocattoli e altro ancora.

Infine offre un'eccezionale resistenza al deterioramento, rendendolo ideale per i modelli che potrebbero essere esposti ad un uso prolungato.

In figura 5.85 sono riportate le principali Proprietà del TANGO PLUS FLX930.

RUBBER-LIKE MATERIALS					
TANGOBBLACKPLUS FLX980 AND TANGOPLUS FLX930					
	ASTM	UNITS	METRIC	UNITS	IMPERIAL
Tensile strength	D-412	MPa	0.8-1.5	psi	115-220
Elongation at break	D-412	%	170-220	%	170-220
Compressive set	D-395	%	4-5	%	4-5
Shore Hardness (A)	D-2240	Scale A	26-28	Scale A	26-28
Tensile Tear resistance	D-624	Kg/cm	2-4	Lb/in	18-22
Polymerized density	D792	g/cm <sup>3</sup>	1.12-1.13		

Figura 5.85 – Principali proprietà del TANGO PLUS FLX930

Per quanto riguarda la tecnologia SLS è stato impiegato un solo materiale, il PA 2200.

Si tratta di una polvere fine biancastra a base di poliammide. La polvere non esposta può essere riutilizzata e a questo scopo deve essere mescolata con polvere nuova in un rapporto minimo di 1:2 fino a 1:1 (nuovo:vecchio) per garantire parametri di lavorazione costanti e una qualità invariata dei pezzi.

Le applicazioni tipiche del materiale sono i pezzi completamente funzionali con qualità da design esposti ad elevate sollecitazioni termiche o meccaniche.

La biocompatibilità ne consente l'uso, ad esempio per le protesi o le ortesi, mentre l'elevata resistenza all'abrasione consente la realizzazione di connessioni mobili.

Nella figura seguente sono riportate le proprietà del PA 2200.

**Mechanical properties**

Tensile modulus	EN ISO 527	1700	MPa
	ASTM D638	247	ksi
Tensile strength	EN ISO 527	48	MPa
	ASTM D638	6962	psi
Elongation at break	EN ISO 527	24	%
Elongation at break	ASTM D638	24	%
Flexural modulus	EN ISO 178	1500	MPa
	ASTM D790	217	ksi
Flexural strength	EN ISO 178	58	MPa
	ASTM D790	8412	psi
Charpy - Impact strength	EN ISO 179	53	kJ/m <sup>2</sup>
Charpy - Notched impact strength	EN ISO 179	4.8	kJ/m <sup>2</sup>
Izod - Impact strength	EN ISO 180	32.8	kJ/m <sup>2</sup>
Izod - Notched impact strength	EN ISO 180	4.4	kJ/m <sup>2</sup>
Ball indentation hardness	EN ISO 2039	78	N/mm <sup>2</sup>
Shore D - hardness	ISO 868	75	-
	ASTM D2240	75	-

Figura 5.86 – Proprietà del PA 2200

## 5.5.4. Realizzazione dei prototipi

### 5.5.4.1. Realizzazione prototipo con tecnologia PolyJet

Il primo prototipo è stato realizzato mediante tecnologia PolyJet impiegando due materiali differenti contemporaneamente per creare parti con rigidità diversa.

L'idea alla base di questa scelta è stata quella di affidare la possibilità di movimento e quindi una maggiore deformabilità dell'ortesi in corrispondenza del gomito, al materiale più morbido.

Data la geometria complessa del modello dell'ortesi è stata necessaria la creazione di un sostegno per poter stampare i diversi strati. Questo supporto è stato generato automaticamente dal software di gestione della stampante mediante un fotopolimero simile ad un gel idrosolubile.

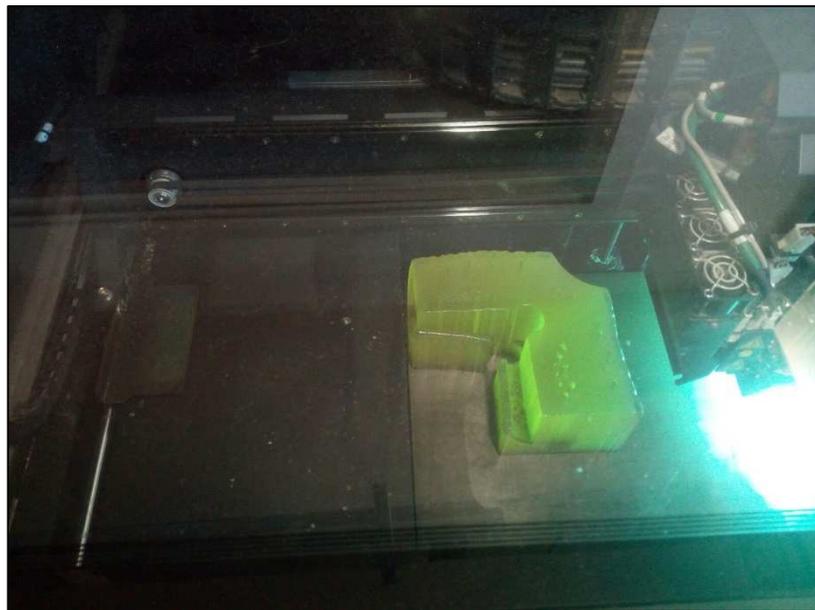


Figura 5.87 – Fase di stampa dell'ortesi

Il prototipo dopo la stampa si presenta completamente ricoperto dal materiale di supporto (Fig. 5.87 e Fig. 5.88).



Figura 5.87 – Prototipo stampato

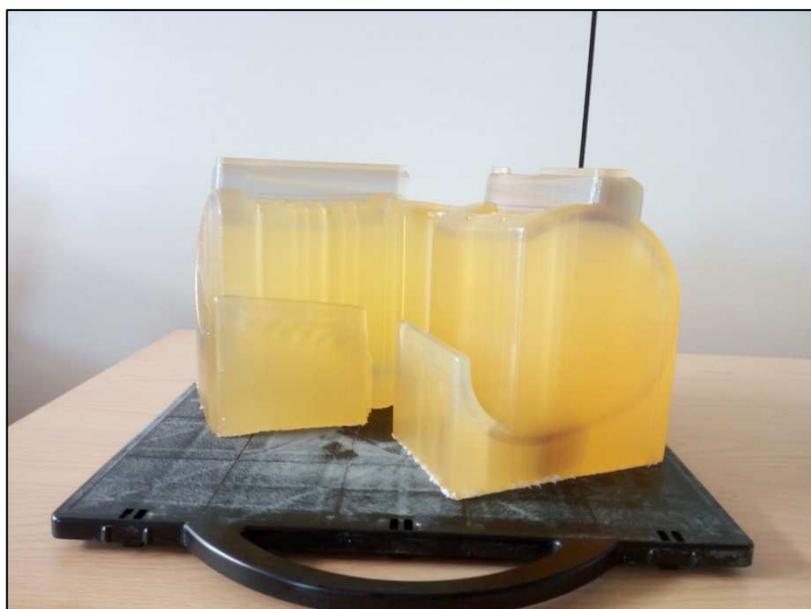


Figura 5.88 – Prototipo stampato

Alla fase di stampa è seguito un processo di pulizia dal materiale di supporto. Questa operazione è avvenuta mediante un macchinario dotato di ugelli che spruzzano acqua con pressione regolabile. Nelle immagini seguenti sono riportati il macchinario e le fasi di pulizia del prototipo.



Figura 5.89 – Prototipo stampato inserito nella macchina per la pulizia



Figura 5.90 – Fasi della pulizia dal materiale di supporto

Dopo questa fase di pulizia, il prototipo è stato lasciato ad asciugare.  
Di seguito si riportano alcune immagini del prototipo finale.



Figura 5.91 – Prototipo finale



Figura 5.92 – Prototipo finale

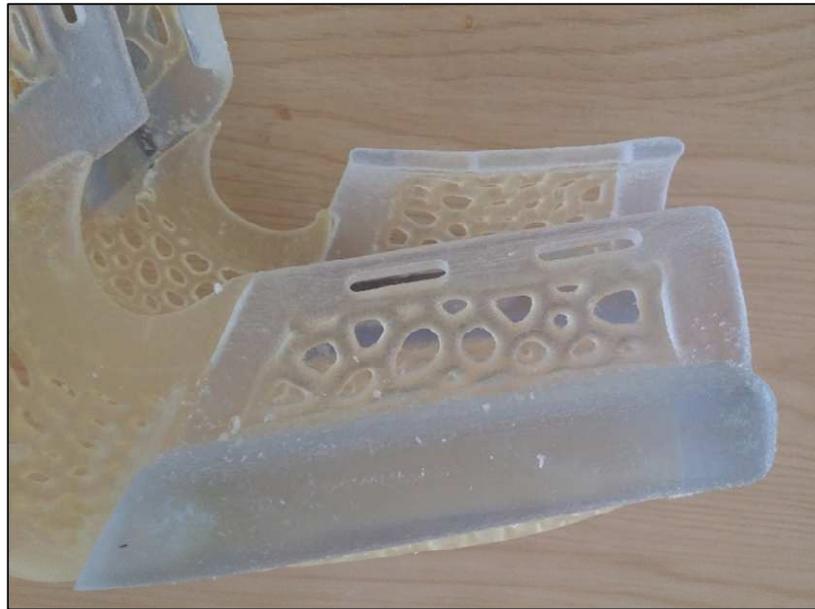


Figura 5.93 – Prototipo finale

Tuttavia, la realizzazione di questo prototipo mediante la tecnologia PolyJet ha mostrato alcuni difetti come rotture di parte della struttura realizzata con materiale più morbido e non perfetto incollaggio tra i due materiali in alcuni punti della giunzione del gomito, come è possibile osservare nelle figure seguenti.

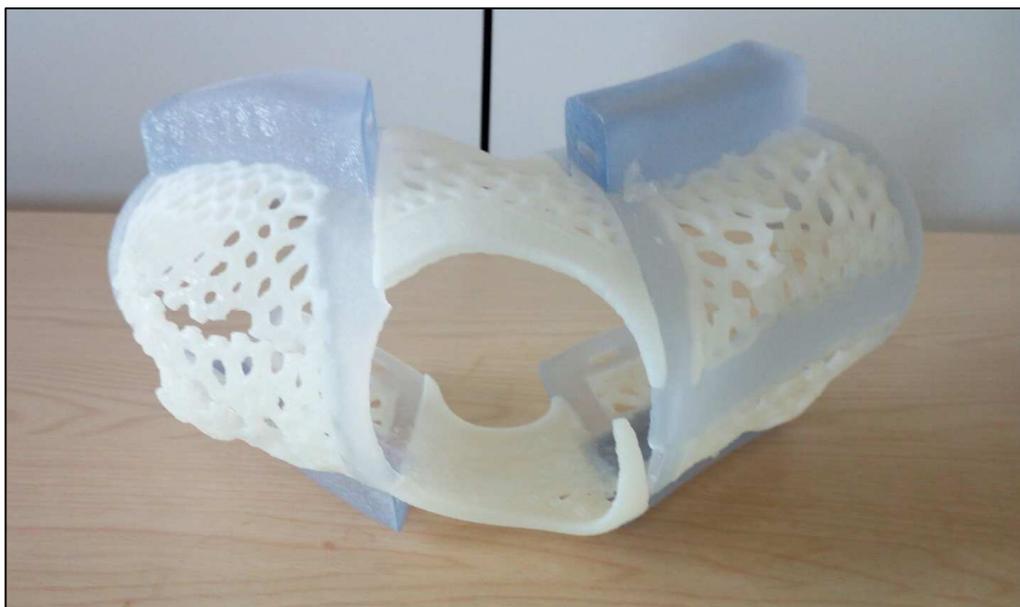


Figura 5.94 – Prototipo finale: particolare con difetto



Figura 5.95 – Prototipo finale: particolare con difetto



Figura 5.96 – Prototipo finale: particolare con difetto

Come anticipato, si è pensato quindi di ovviare a questi inconvenienti realizzando un modello di ortesi con cerniera.

### 5.5.4.2. Realizzazione prototipo con tecnologia SLS e tassellazione di Voronoi

Come già anticipato, per ovviare ai problemi riscontrati nella realizzazione del prototipo con due materiali, è stata progettata un'ortesi da realizzare con un solo materiale mediante processo di SLS e con una cerniera che garantisce la rotazione relativa fra braccio e avambraccio durante i movimenti di estensione e flessione.



Figura 5.97– Modello CAD del secondo prototipo con cerniera

Il primo prototipo è stato realizzato usando per le parti non strutturali una tassellazione di Voronoi.

Di seguito si riportano alcune immagini del prototipo stampato.

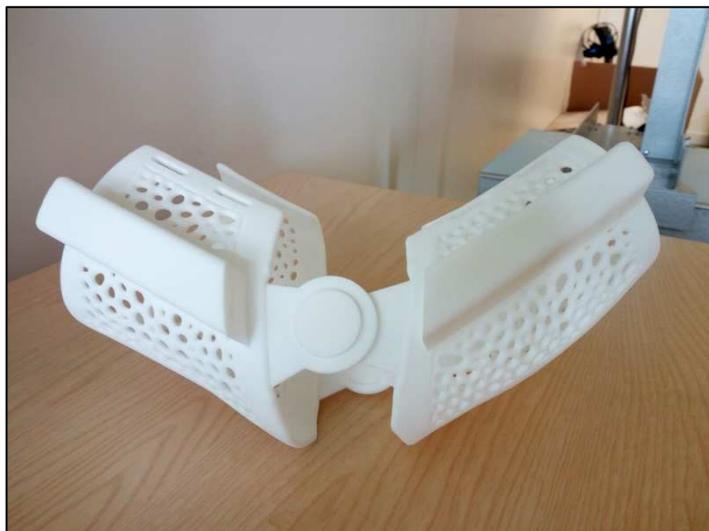


Figura 5.98– Prototipo finale



Figura 5.99 – Prototipo finale

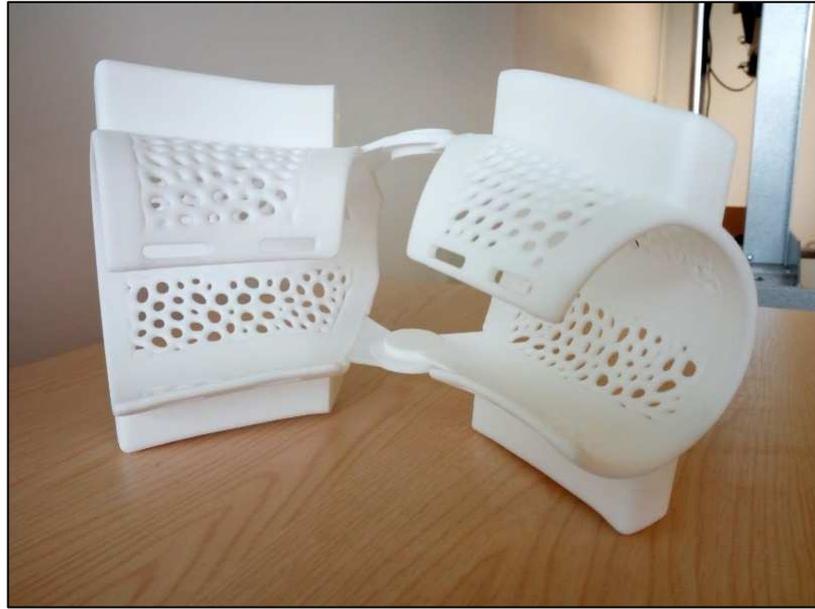


Figura 5.100 – Prototipo finale

Dalle immagini si può osservare il buon grado di finitura superficiale e la grande qualità dei dettagli dell'ortesi ottenuti con la tecnologia SLS.

#### **5.5.4.3. Realizzazione prototipo con tecnologia SLS e struttura flessibile in Additive Manufacturing Textile**

Il terzo prototipo realizzato è stato progettato utilizzando le tipiche soluzioni dell'Additive Manufacturing Textile che consentono sia di avere geometrie complesse ed esteticamente gradevoli, ma anche strutture flessibili in grado di potersi adattare perfettamente alle variazioni di forma del braccio durante i movimenti. Si tratta di strutture particolari in cui gioca un ruolo fondamentale la cura dei dettagli e la precisione di modellazione dei piccoli componenti della struttura.

Inoltre, durante la fase di progettazione, occorre prestare molta attenzione alla scelta delle dimensioni dei componenti della struttura, in quanto se troppo piccoli, rischiano di compromettere l'intera struttura flessibile realizzata.

Di seguito si riportano alcune immagini dell'ortesi realizzata.



Figura 5.101 – Prototipo finale



Figura 5.102– Prototipo finale

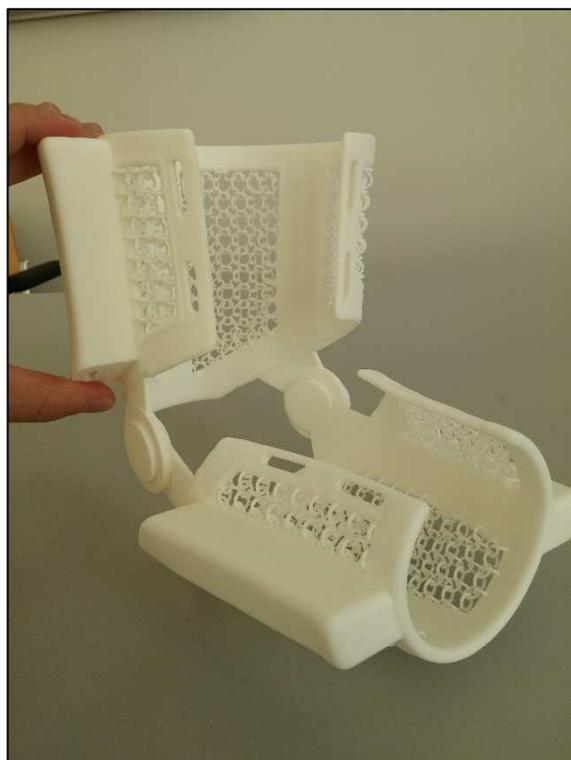


Figura 5.103 – Prototipo finale



Figura 5.104 – Prototipo finale: particolare della struttura

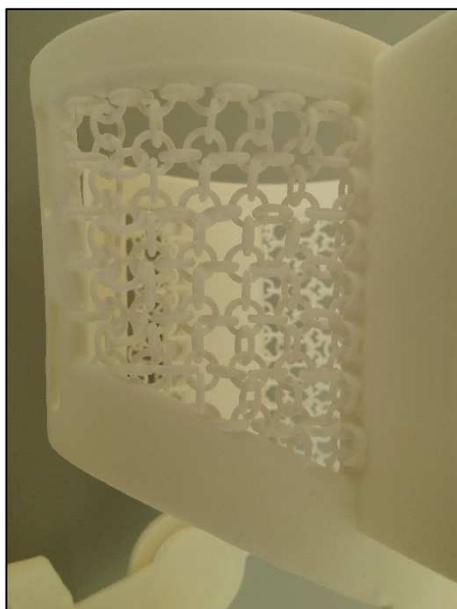


Figura 5.105 – Prototipo finale: particolare della struttura

Dalle immagini appena riportate, si osserva come l'applicazione dell'algoritmo generativo sviluppato, abbia permesso la realizzazione della struttura flessibile senza alcun problema e senza deformazioni degli anelli o rottura degli stessi. Infine, di seguito si riportano delle immagini relative all'ortesi completa di molle e fascette ed indossata dal paziente.



Figura 5.106 – Prototipo finale completo



Figura 5.107 – Prototipo finale completo



Figura 5.108 – Prototipo finale: particolare della struttura



Figura 5.109 – Prototipo finale indossato dal paziente: configurazione a 90°



Figura 5.110 – Prototipo finale indossato dal paziente: configurazione a 110°



Figura 5.111 – Prototipo finale indossato dal paziente: configurazione a 50°

## 5.6. Analisi agli elementi finiti (FEM) dell'ortesi di gomito

Nell'ultima parte del lavoro sono state condotte delle analisi agli elementi finiti (FEM) per verificare se le scelte progettuali relative a forma, spessore e dimensioni dell'ortesi effettuate durante la fase di modellazione garantiscono la resistenza strutturale del prototipo.

Le analisi sono state condotte sul modello dell'ortesi con cerniera, la quale garantisce una migliore mobilità dell'ortesi durante la flessione e l'estensione.

E' stata considerata solo la struttura dell'ortesi (Fig. 5.112), dal momento che le superfici non hanno funzione strutturale.



Figura 5.112– Modello ortesi per analisi FEM

Sono state eseguite simulazioni dinamiche esplicite per superare eventuali problemi di non convergenza (dovuti a grandi spostamenti) delle analisi statiche lineari o non lineari.

Le simulazioni sono state condotte per verificare lo stato di sollecitazione dell'ortesi durante la flessione e l'estensione, applicando un carico di 150 N.

Sebbene il carico massimo nelle normali condizioni di impiego di un'ortesi di gomito dovrebbe essere inferiore a 50 N, si è scelto un carico di prova molto più elevato (150 N) per simulare condizioni estreme di impiego.

Sono state effettuate diverse simulazioni considerando anche i due differenti materiali impiegati nella realizzazione dei prototipi.

Di seguito sono riassunte le principali caratteristiche dei due materiali.

	Tensione di rottura (MPa)	Allungamento a rottura (%)	Modulo di Young (Mpa)
Veroclear	50÷65	10÷25	2000÷3000
PA 2200	48	24	1700

Nella figura 5.113 è riportato il modello CAD dell'ortesi e del braccio importati in Ansys.

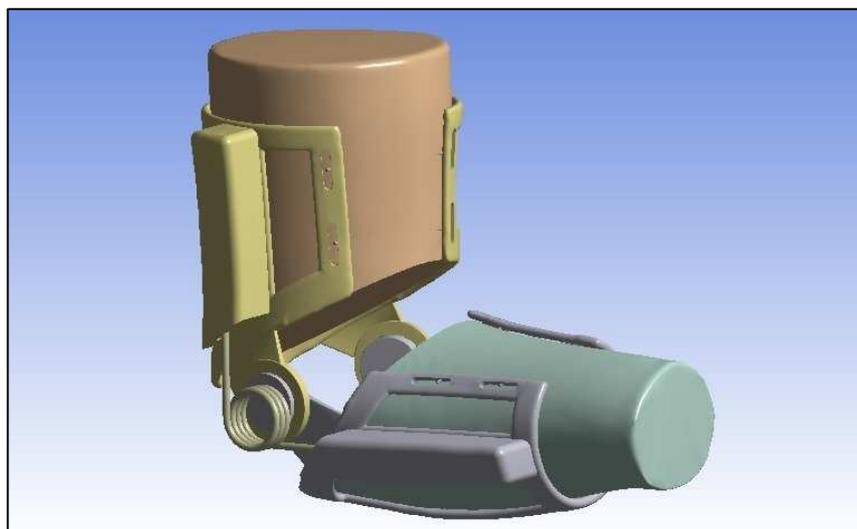


Figura 5.113 – Modello ortesi e braccio importato

Il braccio è stato considerato come corpo rigido ed è stato tagliato in corrispondenza del gomito solamente per alleggerire il modello, dal momento che occorre analizzare solamente l'ortesi.

L'ortesi è libera di muoversi sul braccio e, per completare lo schema funzionale della stessa, sono state modellate le fascette per la chiusura per mezzo di molle aventi rigidità elevata, ed in grado di simulare le caratteristiche reali del materiale delle fascette.

Nella figura 5.114 è raffigurato lo schema dell'ortesi in cui si osservano le molle.

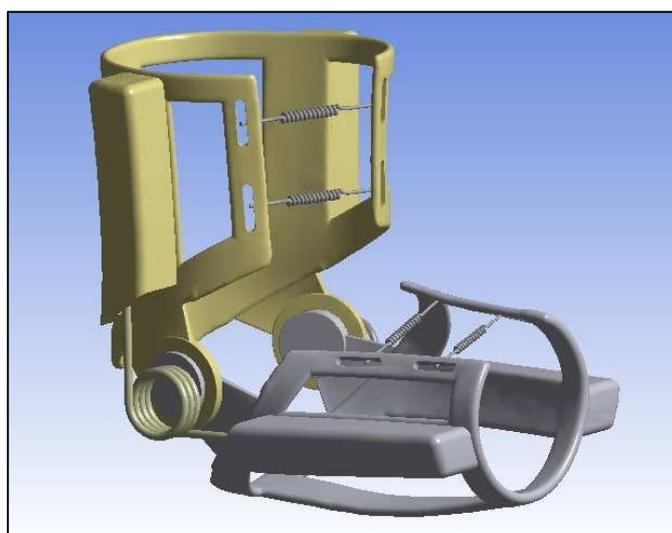


Figura 5.114 – Modello ortesi: particolare delle molle

Dopo aver preparato il modello, si è passati all'impostazione di tutti i parametri necessari per la messa a punto delle simulazioni FEM.

In particolare si è definito:

- il materiale dei componenti:
  1. PA 2200 o Veroclear per la struttura dell'ortesi;
  2. acciaio per le molle di torsione;
  
- il tipo di contatti:
  1. con attrito: nella cerniera dell'ortesi e tra braccio e ortesi; è stato impiegato un valore del coefficiente di attrito pari a 0,3, valore presente in letteratura e nei database relativi ai materiali impiegati [60].
  2. senza attrito: all'interfaccia tra le molle di torsione e i supporti delle stesse;
  
- la discretizzazione del modello in elementi finiti, poiché elementi shell di dimensioni pari a circa 1,5 mm su uno spessore di 4 mm avrebbero comportato un rapporto tra spessore e dimensione trasversale non ottimale, non avendo problemi di risorse computazionali, si è deciso di discretizzare tutto il modello con elementi solidi 3D. In particolare, è stato impiegato l'elemento Solid 164. Questo elemento viene utilizzato solo in analisi dinamiche esplicite per la modellazione 3D di strutture solide. L'elemento è utilizzabile in forma esaedrica con otto nodi o in forma tetraedrica con 4 nodi. Ogni nodo ha i seguenti gradi di libertà: traslazioni, velocità e accelerazioni nelle direzioni x, y e z. L'ordine degli elementi è lineare.

Il modello è stato discretizzato con 2.330.988 elementi usando la modalità di mesh automatica data la geometria variabile, impiegando elementi esaedrici e tetraedrici.

- il tipo di vincoli:
  - vincolo fisso: è applicato alle facce del braccio (nella parte superiore) ed impedisce a queste di spostarsi o deformarsi;
- il carico: è stata applicata una forza di 150 N lungo l'asse z verso l'alto o il basso rispettivamente per le analisi della flessione o dell'estensione.

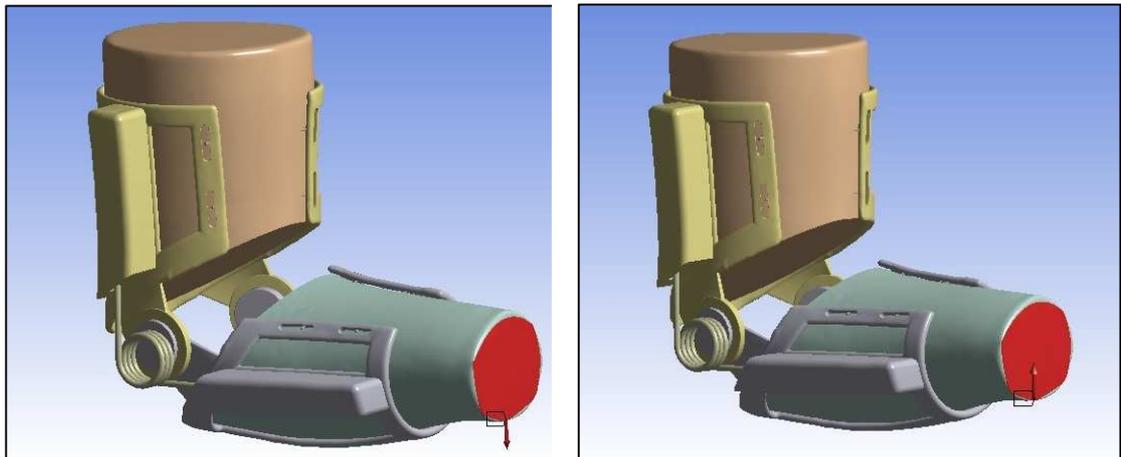


Figura 5.115 – Particolare del carico applicato (estensione a sinistra e flessione a destra)

## 5.6.1. Risultati

### 5.6.1.1. Ortesi di gomito in Veroclear

Di seguito vengono riportate le mappe degli spostamenti, delle deformazioni e delle tensioni di Von Mises.

#### Estensione

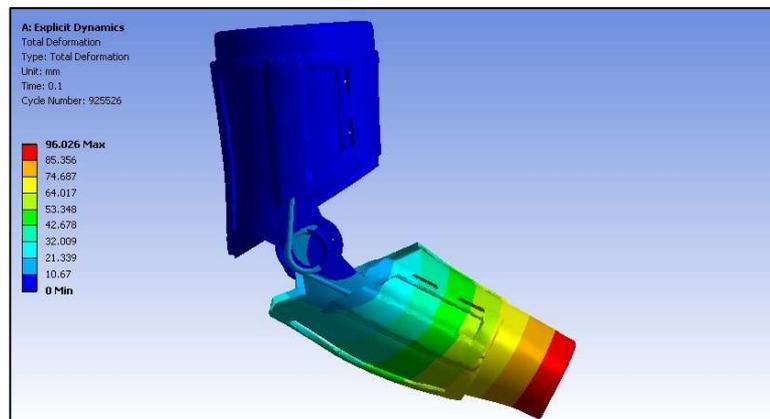


Figura 5.116 – Mappa degli spostamenti

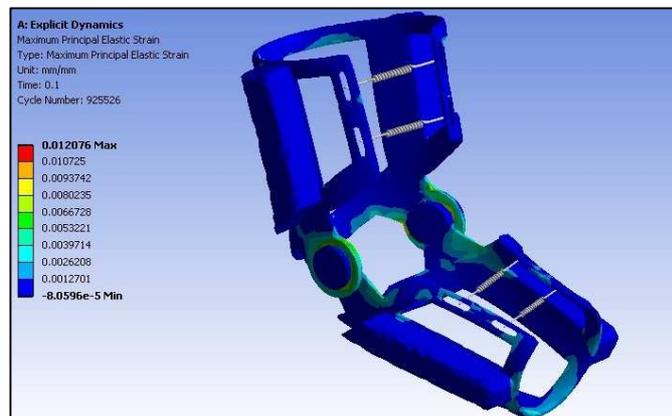


Figura 5.117 – Mappa delle deformazioni

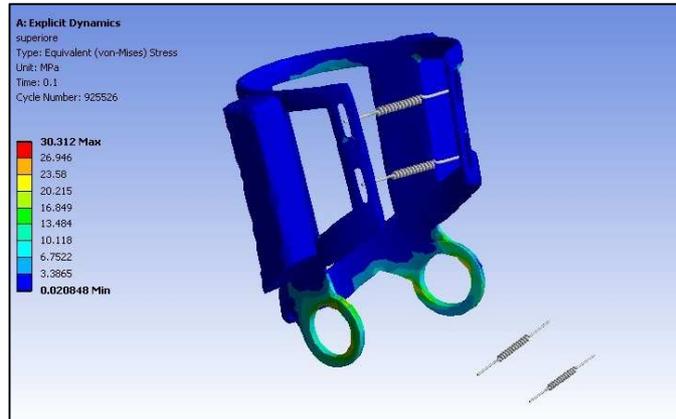


Figura 5.118 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

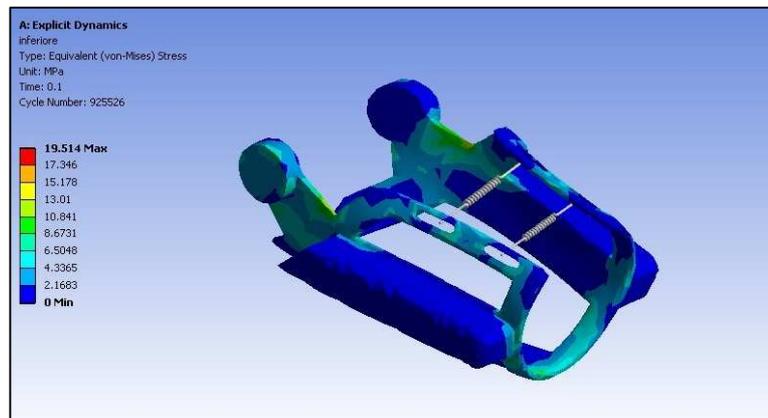


Figura 5.119 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

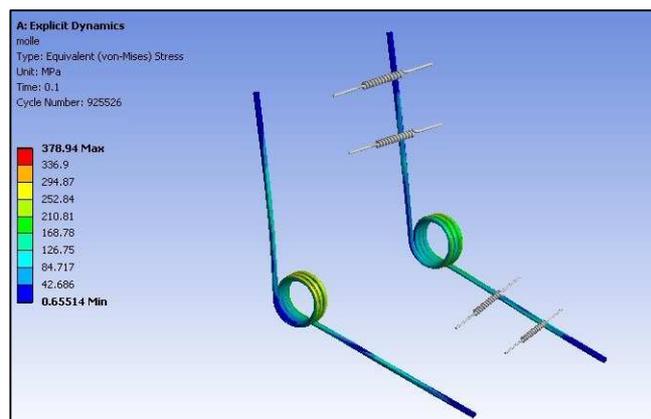


Figura 5.120 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

Dai risultati ottenuti dalle analisi FEM, si osserva come durante il movimento di estensione del braccio, l'ortesi di gomito realizzata in Veroclear risulta in sicurezza, essendo tutti i valori di deformazione e tensione al di sotto dei valori limite del materiale. In particolare sono stati ottenuti un valore dell'allungamento massimo di 1,2% e un valore massimo della tensione equivalente di Von Mises di 30,31 MPa a fronte di una tensione di rottura di 58 MPa.

### Flessione

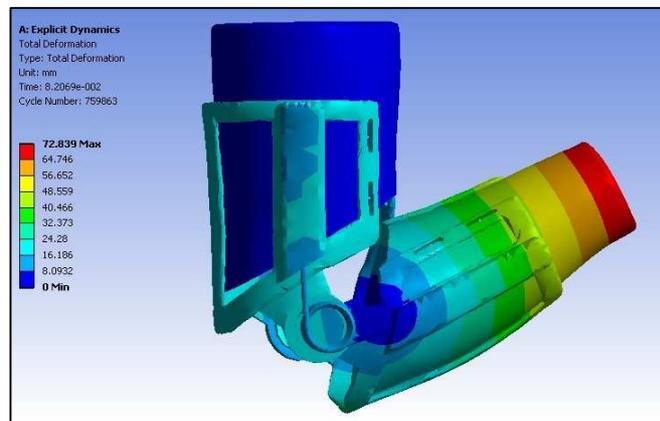


Figura 5.121 – Mappa degli spostamenti

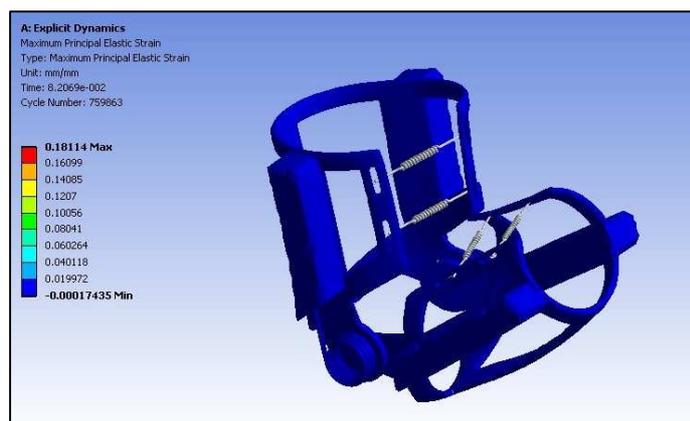


Figura 5.122 – Mappa delle deformazioni

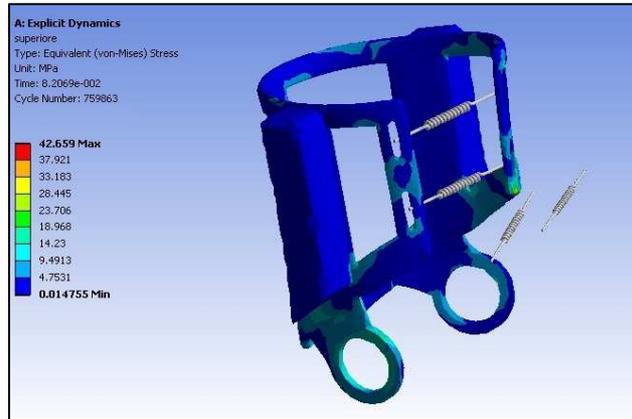


Figura 5.123 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

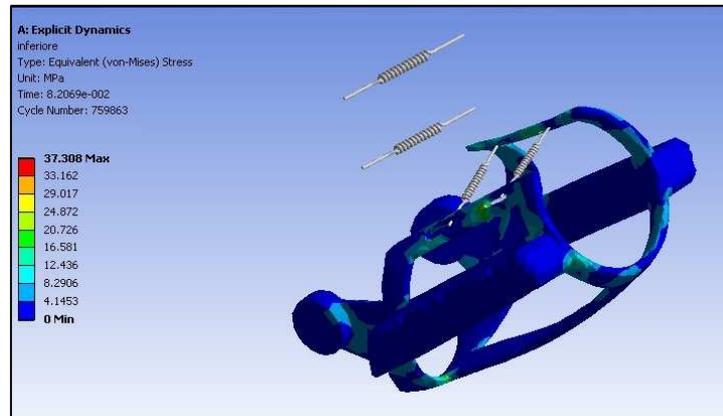


Figura 5.124 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

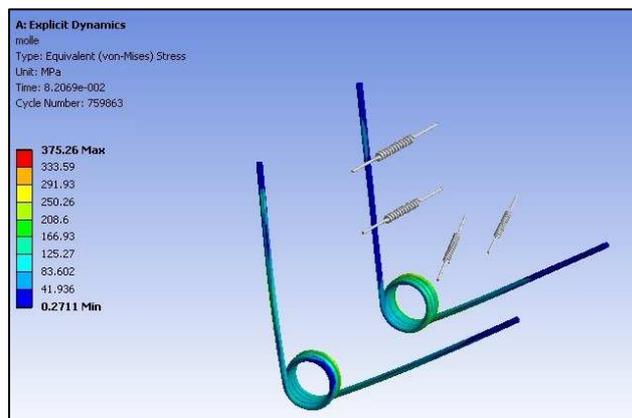


Figura 5.125 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

Dalle mappe riportate nelle figure precedenti si osserva come durante il movimento di flessione del braccio, l'ortesi di gomito realizzata in Veroclear risulta in sicurezza, essendo anche qui tutti i valori di deformazione e tensione al di sotto dei valori limite del materiale (allungamento massimo di 1,8% e valore massimo della tensione equivalente di Von Mises pari a 42,66 MPa).

### 5.6.1.2. Ortesi di gomito in PA 2200

Di seguito vengono riportate le mappe degli spostamenti, delle deformazioni e delle tensioni di Von Mises

#### Estensione

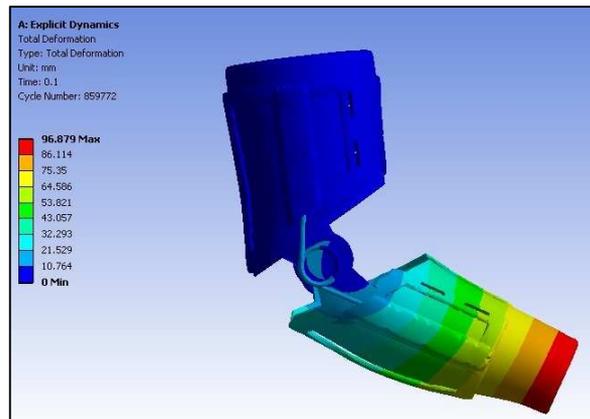


Figura 5.126 – Mappa degli spostamenti

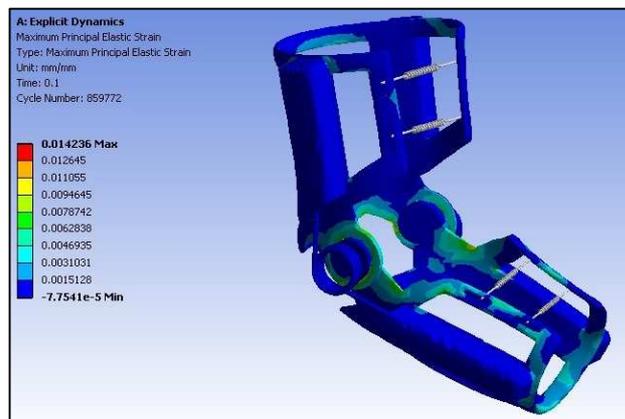


Figura 5.127 – Mappa delle deformazioni

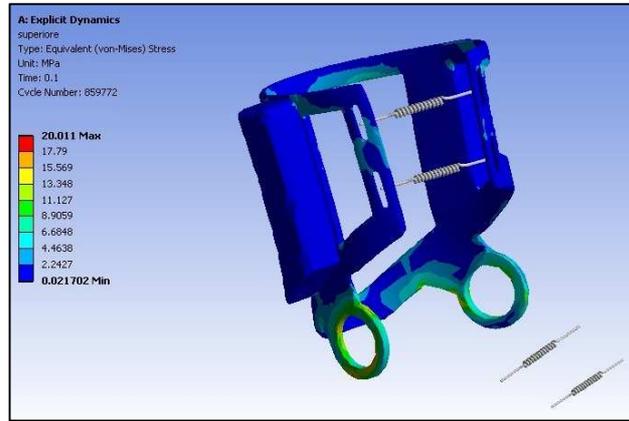


Figura 5.128 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

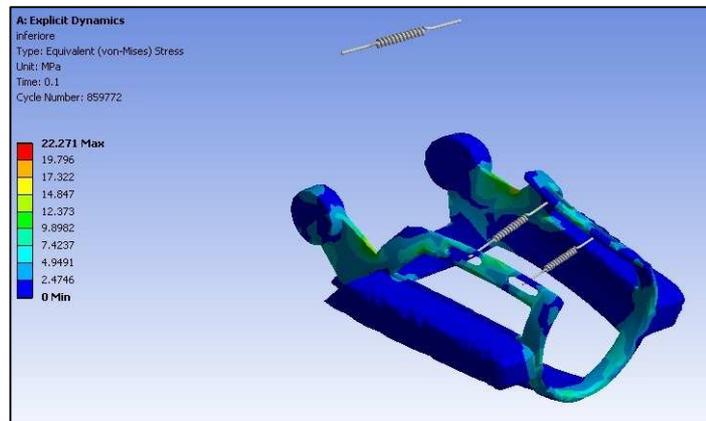


Figura 5.129 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

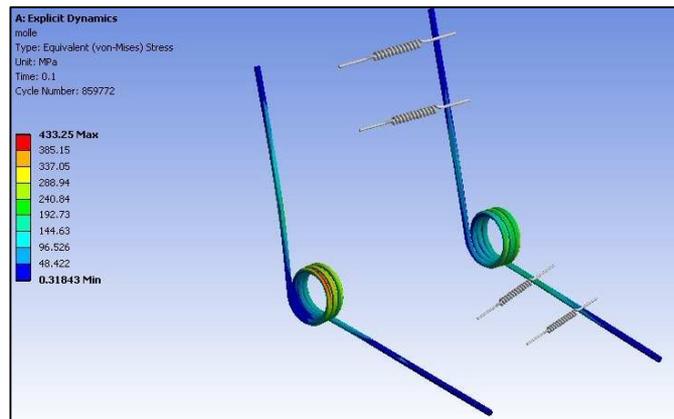


Figura 5.130 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

I risultati ottenuti dalle analisi FEM condotte sull'ortesi realizzata in PA 2200, mostrano che tutti i valori di deformazione e tensioni relative all'ortesi sono inferiori ai corrispondenti valori limite del materiale, garantendo la corretta funzionalità del dispositivo senza problemi di danneggiamento o rottura. In particolare sono stati ottenuti un valore dell'allungamento massimo di 1,4% ed un valore massimo della tensione equivalente di Von Mises di 22,27 MPa a fronte di un valore della tensione di rottura di 48 MPa.

### Flessione

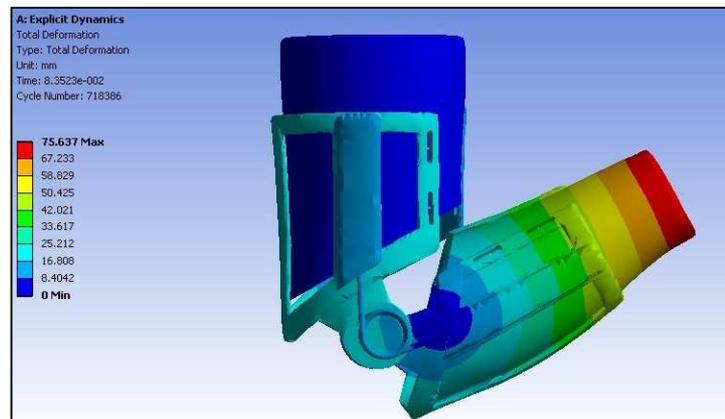


Figura 5.131 – Mappa degli spostamenti

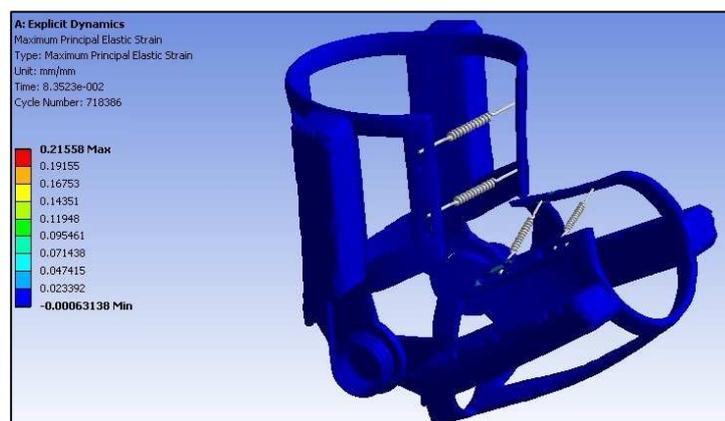


Figura 5.132 – Mappa degli spostamenti

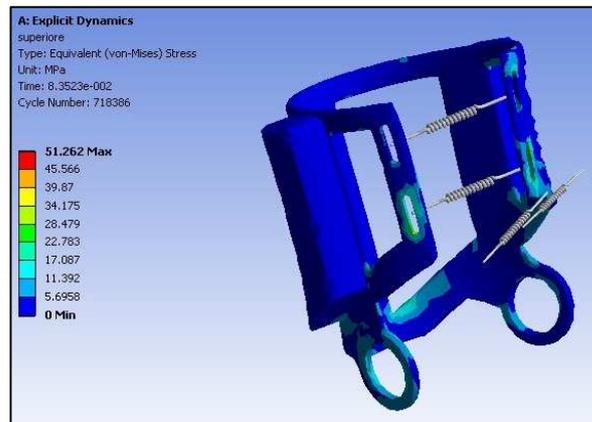


Figura 5.133 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

Si può osservare una singolarità nella zona di vincolo della molla a causa del carico concentrato. Nella realtà il carico della fascetta è distribuito, pertanto questa situazione non costituisce un problema nella determinazione della resistenza dell'ortesi. Infatti, il resto del modello mostra sollecitazioni inferiori alla tensione di rottura e quindi questa singolarità può essere trascurata.

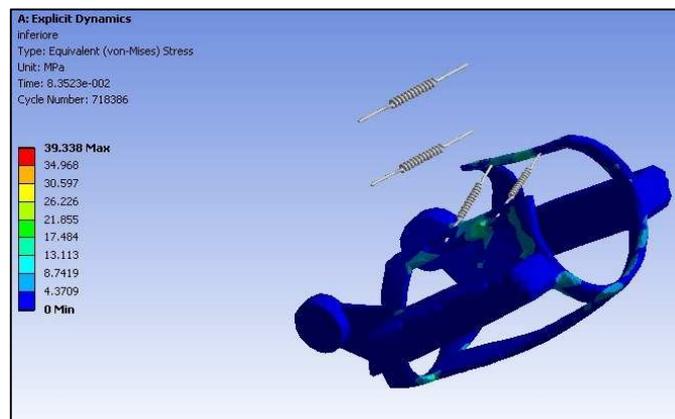


Figura 5.134 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

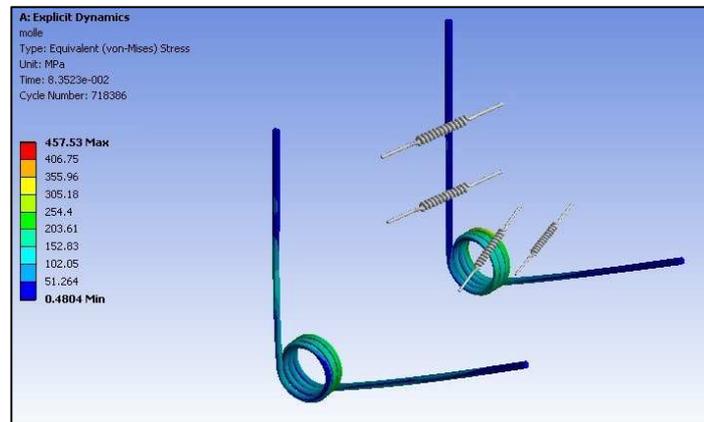


Figura 5.135 – Mappa della sollecitazione equivalente (Von Mises)

Dai risultati ottenuti dalle analisi condotte sull'ortesi realizzata in PA 2200, anche nel caso di movimento di flessione, si osserva che i valori di deformazione e tensioni sono inferiori ai valori limite del materiale (valore dell'allungamento massimo di 2,1% e valore massimo della tensione equivalente di Von Mises pari a 41 MPa).

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è perfezionato un metodo per la progettazione e la realizzazione di un'ortesi di gomito personalizzata fabbricata interamente con tecniche di Additive Manufacturing. A tal fine, sono stati anche sviluppati algoritmi generativi per la modellazione parametrica e creazione di pattern 3D e strutture flessibili che possono consentire di risolvere alcune delle problematiche tipiche della modellazione per l'Additive Manufacturing.

Il primo passo del lavoro è stato relativo alla modellazione, tramite tecniche di reverse engineering, del braccio di un paziente e la successiva modellazione CAD della struttura dell'ortesi di gomito customizzata.

In seguito, per migliorare l'aspetto estetico dell'ortesi, si è realizzata una tassellazione di Voronoi nelle parti non strutturali. La modellazione di queste parti è stata realizzata inizialmente con un software commerciale e, successivamente, attraverso un algoritmo generativo sviluppato a tale scopo.

Nella terza parte sono state applicate le soluzioni dell'Additive Manufacturing Textile nella modellazione della parti non strutturali dell'ortesi di gomito, creando una struttura flessibile che apporta un contributo estetico ma allo stesso tempo ha la possibilità di adattarsi meglio alle deformazioni del braccio durante i movimenti in fase riabilitativa. Tale struttura è stata inizialmente modellata mediante software commerciale e, successivamente, per ovviare a problematiche riscontrate durante la modellazione, è stato sviluppato un algoritmo generativo per la modellazione di strutture flessibili.

Gli algoritmi generativi sviluppati sono stati testati e si sono dimostrati robusti, efficienti ed in grado di superare alcuni inconvenienti presenti nei software commerciali. Essi sono stati impiegati per la modellazione delle parti non strutturali dei diversi prototipi di ortesi progettati.

Un'altra parte del lavoro è stata dedicata allo studio dell'influenza di alcuni parametri di processo dell'Additive Manufacturing per valutare come essi possano influenzare il prodotto finito in termini di accuratezza dimensionale e di

forma. I risultati di tale studio hanno permesso di ottenere interessanti linee guida per la progettazione e realizzazione di oggetti stampati con processi basati su tecnologia FDM.

Successivamente sono stati confrontati i risultati di due differenti processi di stampa 3D utilizzati per la realizzazione di diversi prototipi di ortesi. In particolare, sono stati confrontati i risultati ottenuti con tecnologia PolyJet e SLS. Sono stati realizzati tre prototipi: uno composto da due materiali differenti mediante tecnologia PolyJet, uno con tassellazione di Voronoi mediante SLS ed un terzo con struttura flessibile mediante SLS.

L'ultima parte è stata dedicata alla verifica strutturale tramite simulazioni FEM dei prototipi di ortesi progettati. Le analisi sono state effettuate considerando i movimenti di flessione ed estensione del braccio.

In definitiva, grazie ai diversi studi condotti, sia per quanto concerne gli aspetti di ricostruzione 3D che di produzione attraverso tecniche di AM, è stato possibile perfezionare un approccio metodologico che può essere generalizzato e utilizzabile per applicazioni simili.

# BIBLIOGRAFIA

1. Yoshio Koga, Three-dimensional motion analysis and its application in total knee arthroplasty: what we know, and what we should analyze, *J Orthop Sci* (2015) 20:239–249 DOI 10.1007/s00776-014-0681-5.
2. Joshua W. Giles PhD, G. Daniel G. Langohr MASC, James A. Johnson PhD, George S. Athwal MD, Implant Design Variations in Reverse Total Shoulder Arthroplasty Influence the Required Deltoid Force and Resultant Joint Load, *Clin Orthop Relat Res* (2015) 473:3615–3626 DOI 10.1007/s11999-015-4526-0.
3. David C Ackland, Minoo Patel, David Knox, Prosthesis design and placement in reverse total shoulder arthroplasty, Ackland et al. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* (2015) 10:101 DOI 10.1186/s13018-015-0244-2.
4. Roseline Bénéière, Gérard Subsol, Gilles Gesquière, François Le Breton, William Puech, A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models, *Computer-Aided Design* 45 (2013) 1382–1393
5. Jack Szu-Shen Chen · Hsi-Yung Feng, Idealization of scanning-derived triangle mesh models of prismatic engineering parts, *Int J Interact Des Manuf* DOI 10.1007/s12008-015-0262-7
6. Teodor Tóth\*, Jozef Živčák, A Comparison of the Outputs of 3D Scanners, *Procedia Engineering* 69 ( 2014 ) 393 – 401
7. Basilio Ramos Barbero a,\*, Elena Santos Ureta, Comparative study of different digitization techniques and their accuracy, *Computer-Aided Design* 43 (2011) 188–206
8. Massimo Martorelli, Pietro Ausiello, Renato Morrone, A new method to assess the accuracy of a Cone Beam Computed Tomography scanner by using a non-contact reverse engineering technique, *journal of dentistry* 42 ( 2014 ) 460 – 465
9. Francesco Di Paola, Tommaso Ingrassia, Mauro Lo Brutto, Antonio Mancuso, A reverse engineering approach to measure the deformations of a sailing yacht, Springer International Publishing AG (2017) *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, DOI 10.1007/978-3-319-45781-9\_56
10. Suchada Rianmora, Pisut Koomsap, Structured light system-based selective data acquisition, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27 (2011) 870–880
11. Roland K. Chen, Yu-an Jin, Jeffrey Wensman, Albert Shih, Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses—A review, *Additive Manufacturing* 12 (2016) 77–89

12. Wei Gao, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramanian, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C.L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang, Pablo D. Zavattieri, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design* 69 (2015) 65–89.
13. Samuel H. Huang, Peng Liu, Abhiram Mokasdar, Liang Hou, Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *Int J Adv Manuf Technol* (2013) 67:1191–1203 DOI 10.1007/s00170-012-4558-5.
14. H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris, Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-015-7576-2
15. Martin Baumann, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague, The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push, *Technological Forecasting & Social Change* (2015).
16. Cauê G. Mançanares, Eduardo de S. Zancul, Juliana Cavalcante da Silva, Paulo A. Cauchick Miguel, Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria, *Int J Adv Manuf Technol* (2015) 80:1007–1014 DOI 10.1007/s00170-015-7092-4.
17. Guido A.O. Adam, Detmar Zimmer, Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 7 (2014) 20–28.
18. Saigopal Nelaturi, Vadim Shapiro, Representation and analysis of additively manufactured parts, *Computer-Aided Design* 67–68 (2015) 13–23.
19. Daniel R. Evers, Andrew T. Potter, Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective, *Computers in Industry* 92 (2017) 208–218.
20. Asger Nyman Christiansen, Ryan Schmidt, J. Andreas Bærentzen, Automatic balancing of 3D models, *Computer-Aided Design* 58 (2015) 236–241.
21. H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris, Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-015-7576-2.
22. Fabrizio Fina, Alvaro Goyanes, Simon Gaisford, Abdul W. Basit, Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines, *International Journal of Pharmaceutics* 529 (2017) 285–293.
23. Ferry P.W. Melchels, Jan Feijen, Dirk W. Grijpma, A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, *Biomaterials* 31 (2010) 6121e6130

24. Lawrence E. Murr, Sara M. Gaytan, Diana A. Ramirez, Edwin Martinez, Jennifer Hernandez, Krista N. Amato, Patrick W. Shindo, Francisco R. Medina, Ryan B. Wicker, Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2012, 28(1), 1–14.
25. William E. Frazier, Metal Additive Manufacturing: A Review, *JMEPEG* (2014) 23:1917–1928 DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z.
26. David Bourell, Jean Pierre Kruth, Ming Leu, Gideon Levy. David Rosen Allison M. Beese, Adam Clare, Materials for additive manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66 (2017) 659–681.
27. Sunpreet Singh, Seeram Ramakrishna, Rupinder Singh, Material issues in additive manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing Processes* 25 (2017) 185–200
28. JA Slotwinski, EJ Garboczi, PE Stutzman, CF Ferraris, SS Watson, and MA Peltz, Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing, *J Res Natl Inst Stand Technol.* 2014; 119: 460–493.
29. Nahum Travitzky, Alexander Bonet, Benjamin Dermeik, Tobias Fey, Ina Filbert-Demut, Lorenz Schlier, Tobias Schlordt ,Peter Greil, Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials, DOI: 10.1002/adem.201400097.
30. Andrea Zocca, Paolo Colombo, Cynthia M. Gomes, Jens Gunster, Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities, *J. Am. Ceram. Soc.*, 98 [7] 1983–2001 (2015) DOI: 10.1111/jace.13700.
31. Gururaja Udupa, S. Shrikantha Rao, K. V. Gangadharan, Functionally graded Composite materials: An overview, *Procedia Materials Science* 5 (2014) 1291-1299.
32. Mino Naebe, Kamyar Shirvanimoghaddam, Functionally graded materials: A review of fabrication and properties, *Applied Materials Today* 5 (2016) 223–245.
33. T.H.J. Vaneker, The role of Design for Additive Manufacturing in the successful economical introduction of AM, *Procedia CIRP* 60 ( 2017 ) 181 – 186.
34. Christoph Klahn, Bastian Leutenecker, Mirko Meboldt, Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing, *Procedia CIRP* 36 ( 2015 ) 230 – 235.
35. Sebastian Hällgren, Lars Pejryd, Jens Ekengren, (Re)Design for Additive Manufacturing, *Procedia CIRP* 50 ( 2016 ) 246 – 251
36. M.Srinivas, B.Sridhar Babu, A Critical Review on Recent Research Methodologies in Additive Manufacturing, *Materials Today: Proceedings* 4 (2017) 9049–9059
37. Mary Kathryn Thompson, Michael Mischkot, Design of test parts to characterize micro additive manufacturing processes, *Procedia CIRP* 34 ( 2015 ) 223 – 228

38. Konstantinos Salonitis, Saeed Al Zarban, Redesign Optimization for Manufacturing Using Additive Layer Techniques, *Procedia CIRP* 36 ( 2015 ) 193 – 198.
39. Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhriagu Ahuja, Filomeno Martina, Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2016) .
40. Guido A.O. Adam, Detmar Zimmer, Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 7 (2014) 20–28.
41. Neil Vaughan, Venketesh N. Dubey, Thomas W. Wainwright, Robert G. Middleton, A review of virtual reality based training simulators for orthopaedic surgery, *Medical Engineering and Physics* 000 (2015) 1–13
42. Junning Chen, Rohana Ahmad, Hanako Suenaga, Wei Li, Keichi Sasaki, Michael Swain, Qing Li, Shape Optimization for Additive Manufacturing of Removable Partial Dentures - A New Paradigm for Prosthetic CAD/CAM, *PLOS ONE* | DOI:10.1371/journal.pone.0132552 July 10, 2015.
43. Xiaoying Zhang • Yangde Zhang, Tissue Engineering Applications of Three-Dimensional Bioprinting, *Cell Biochem Biophys* (2015) 72:777–782 DOI 10.1007/s12013-015-0531-x.
44. Mohd. Javaid, Abid Haleem, Additive manufacturing applications in medical cases: A review literature based, *Alexandria Journal of Medicin* (2017).
45. Sunpreet Singh, Seeram Ramakrishna, Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future, *Current Opinion in Biomedical Engineering* 2017, 2:105–115.
46. G. A. BINGHAM, R. J. M. HAGUE, C. J. TUCK, A. C. LONG, J. J. CROOKSTON, M. N. SHERBURN, Rapid Manufactured Textiles, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 20, No. 1, January – February 2007, 96 – 105.
47. G. A. Bingham, Efficient Three Dimensional Modelling of Additive Manufactured Textile Structures.
48. R Melnikova, A Ehrmann , K Finsterbusch, 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 62 (2014) 012018 doi:10.1088/1757-899X/62/1/012018.
49. Savio, Gianpaolo; Gaggi, Flavio; Meneghello, Roberto; Concheri, Gianmaria , DESIGN METHOD AND TAXONOMY OF OPTIMIZED REGULAR CELLULAR STRUCTURES FOR ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES, *INTERNATIONAL*

CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED15 27-30 JULY 2015,  
POLITECNICO DI MILANO, ITALY .

50. Zhenzhen Quan, Zachary Larimore, Amanda Wu, Jianyong Yu, Xiaohong Qin, Mark Mirotznik, Jonghwan Suhr, Joon-Hyung Byun, Youngseok Oh , Tsu-Wei Chou, Microstructural design and additive manufacturing and characterization of 3D orthogonal short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene preform and composite, *Composites Science and Technology* 126 (2016) 139e148.
51. ZUBIN KHABAZI, ALGORITMI GENERATIVI con GRASSHOPPER.
52. Sivam Krish, A practical generative design method.
53. Ingrassia, T., Nalbone, L., Nigrelli, V., Pisciotta, D., Ricotta, V., Process parameters influence in additive manufacturing, Springer International Publishing AG (2017) *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, DOI 10.1007/978-3-319-45781-9\_27.
54. Lanzotti, A., Del Giudice, D.M., Lepore, A., Staiano, G., Martorelli, M., On the geometric accuracy of RepRap open-source three-dimensional printer, 2015, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 137 (10), art. no. 101703.
55. Boschetto, A., Bottini, L., Accuracy prediction in fused deposition modelling, 2014, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73 (5-8), pp. 913-928.
56. Lanzotti, A., Martorelli, M., Staiano, G., Understanding process parameter effects of rewrap open-source three-dimensional printers through a design of experiments approach, 2015, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 137 (1), art. no. 011017.
57. Boschetto, A., Bottini, L., Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling, 2016, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, art. no. 1357, pp. 103-114.
58. Vaezi, M., Chua, C.K., Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process, 2011, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53 (1-4), pp. 275-284.
59. Dai, X., Xie, H., Constitutive parameter identification of 3D printing material based on the virtual fields method, 2015, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 59, pp. 38-43.
60. Ali Entezari, Jianguang Fang, Andrian Sue, Zhongpu Zhang, Michael V. Swain, Qing Li, Yielding behaviors of polymeric scaffolds with implications to tissue engineering, *Materials Letters* 184(2016)108–111.