



# **POLITECNICO DI TORINO**

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

## **Riprogettazione di un attrezzo di sollevamento realizzato in Additive Manufacturing**

**Relatore:**

Prof. Paolo Fino

**Candidato:**

Matteo Mameli

**Correlatore:**

Prof.ssa Mariangela Lombardi

**Tutor:**

Francesco Salierno

Ottobre 2019



# Indice

Introduzione.....	3
Abstract.....	6
1 Additive Manufacturing .....	7
1.1 La base dell'Additive Manufacturing .....	7
1.2 Tecnologie Additive Manufacturing polimerico .....	9
1.2.1 Stereolitografia .....	9
1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS) .....	10
1.2.3 Three Dimensional Printing (3DP).....	11
2 Processo di stampa .....	13
2.1 Fused Deposition Modeling.....	13
2.2 Markforged X7 .....	14
2.3 Eiger.....	20
2.3.1 Selezione dei parametri di Eiger: Parametri Standard.....	21
2.3.2 Selezione dei parametri in Eiger: Parametri di Rinforzo.....	25
2.3.3 Selezione dei parametri in Eiger: Internal View Settings.....	29
3 Il Lifting Tool .....	30
3.1 Design originale .....	31
3.2 Design Markforged .....	32
4 Caratterizzazione del materiale .....	34
4.1 Materiale e metodi .....	34
4.1.1 Test di trazione .....	39
4.1.1.1 Provini Onyx® .....	40
4.1.1.2 Provini Onyx® rinforzati con fibre di carbonio.....	41
4.1.2 Test di compressione .....	42
4.1.2.1 Provini Onyx®: resistenza a compressione .....	44
4.1.2.2 Provini Onyx®: modulo elastico.....	44
4.1.2.3 Provini Onyx® rinforzati con fibre di carbonio: modulo elastico .....	45
4.1.3 Test di flessione a tre punti.....	46
4.1.3.1 Provini Onyx® .....	49
4.1.3.2 Provini Onyx® rinforzati con fibre di carbonio.....	50
4.2 Risultati.....	52
4.2.1 Risultati delle prove di trazione.....	52

4.2.2	Risultati delle prove di compressione.....	56
4.2.3	Risultati delle prove di flessione .....	60
4.2.4	Confronto dei risultati con i valori proposti da Markforged .....	63
5	Fem e redesign.....	65
5.1	Modello .....	66
5.2	Test.....	68
5.3	Primo FEM .....	70
5.4	Secondo FEM .....	73
5.5	Test estensimetrato .....	75
5.6	Risultati test estensimetrato .....	77
5.6.1	Definizione modulo elastico.....	77
5.6.2	Redesign .....	78
5.7	Design definitivo validato.....	80
5.8	Analisi FEM validata .....	81
5.9	Test validato.....	85
6	Conclusioni.....	88
6.1	Sviluppi futuri .....	89
A.	Lista figure.....	92
B.	Lista tabelle.....	95
C.	Bibliography .....	96

# Introduzione

L'Additive Manufacturing è una delle più importanti tecnologie emergenti degli ultimi anni e si sta affermando anche in ambito industriale, diventando uno dei pilastri della rivoluzione industriale 4.0.

La caratteristica sostanziale che lo differenzia dalle tecnologie tradizionali è la realizzazione del componente strato per strato aggiungendo materiale e non sottraendolo. Ciò conferisce la costruzione di componenti geometricamente complessi, più leggeri e più performanti strutturalmente.

I campi in cui l'Additive Manufacturing può essere applicato sono diversi e numerosi, dal medicale al civile e strutturale, ma la tecnologia solitamente viene utilizzata per la prototipazione rapida [1]. Questo progetto vuole invece dimostrare come attraverso questa tecnologia si possano realizzare componenti finiti e pronti all'utilizzo, più specificatamente in campi difficili come quello degli attrezzi di sollevamento.

Il seguente lavoro di tesi si è focalizzato sulla caratterizzazione del materiale composito rinforzato con fibre di carbonio e sulla conseguente riprogettazione di un attrezzo di sollevamento.

Sono stati eseguiti test di trazione, compressione e flessione su provini realizzati solamente col materiale Onyx® e su provini composti da matrice polimerica rinforzata con fibre di carbonio. A tal proposito, sono stati analizzati a fondo i risultati cercando di comprendere appieno il comportamento del materiale e l'influenza che la fibra di rinforzo ha sui componenti realizzati con questa tecnologia. Sono stati definiti inoltre dei range di parametri in modo da stimare l'effettiva resistenza meccanica del materiale ed avere una base da cui partire per la progettazione dell'attrezzo.

Nonostante l'approfondita ricerca in letteratura di un modello FEM da utilizzare per le analisi matematiche, non è stata trovata alcuna linea guida in campo industriale su cui basarsi. Perciò è stato necessario assumere delle ipotesi ed eseguire alcune semplificazioni che hanno permesso di definire un modello ad hoc basato sulla caratterizzazione del materiale e su un test preliminare eseguito su un prototipo dell'attrezzo, anch'esso realizzato con la tecnologia Additive Manufacturing. Ogni analisi FEM è stata poi validata da test

sperimentali i quali inoltre sono stati necessari a definire più in dettaglio il modello FEM, avvicinando sempre più i risultati ottenuti da software a quelli reali.

Sulla base delle analisi matematiche e dei test intermedi eseguiti, è stato realizzato un redesign dell'attrezzo: sono state apportate modifiche sia sulla geometria dei componenti sia sulla loro struttura interna con l'obiettivo di aumentare la resistenza meccanica sotto carico.

Questa tesi è stata sviluppata in collaborazione con Wärtsilä, la quale ha in seguito revisionato ed approvato il materiale presente nell'elaborato.



Wärtsilä è un'azienda finlandese leader nello sviluppo e nella fornitura di tecnologie per la generazione di energia, realizzate per impianti utilizzati nel settore marino e terrestre. Essa conta 18000 dipendenti e opera in oltre 80 paesi in tutto il mondo. Wärtsilä arriva in Italia nel 2000, anno in cui viene fondata Wärtsilä Italia S.p.a.. Nella sede di Trieste, l'organo maggiore in territorio italiano, vengono sviluppati, prodotti e commercializzati un'ampia gamma di motori con range di potenza da 1.9 MW a 23 MW. Oggi l'impianto è un moderno stabilimento multi prodotto, uno dei più grandi del gruppo per la realizzazione di motori. Wärtsilä Italia ad oggi conta 1300 dipendenti, di cui 1100 si trovano a Trieste e i restanti sono distribuiti nelle sedi che svolgono attività di Service di Taranto, Genova e Napoli. Ad oggi l'1% dell'energia mondiale è prodotta da centrali elettriche Wärtsilä ed una nave su tre è alimentata da motori Wärtsilä [2].

Il progetto è stato sviluppato in collaborazione anche con Bureau Veritas, società che ha permesso di giungere alla certificazione dell'attrezzo.



Nata nel 1828 in Francia, Bureau Veritas è leader a livello mondiale nei servizi di ispezione, verifica di conformità e certificazione. Essa offre servizi di supporto ai clienti al fine di raggiungere obiettivi finalizzati a certificare che i loro prodotti, strutture o processi rispondano a standard in ambito di qualità, salute, sicurezza, ambiente e responsabilità sociale. Offre servizi sia di valutazione di conformità e certificazione di beni, impianti, prodotti, sistemi, sia di analisi dei rischi. L'azienda è inoltre membro dell'Associazione Internazionale delle Società di Classificazione (IACS) [3].

# Abstract

The aim of this work is to study and redesign a lifting tool that was originally made of steel. The tool has been rethought, redesigned, produced using composite materials and tested it. This project focuses on the lifting tool and on the technology with which it has been made: Fused Deposition Modeling.

The first part of the thesis provides an introduction of additive manufacturing, starting from the history, describing the fundamental steps that characterize this technology and listing and describing the main techniques that deal with polymeric materials.

In the second chapter Eiger, Markforged slicing software, and Markforged X7 printer are presented in detail, describing all the advantages and disadvantages of both and illustrating all the parameters that can be modified before printing any component.

In the third chapter the lifting tool is illustrated. The case study is presented, describing both the old and the new design and also how the actual lifting tool works. In this chapter some details on the very first test done on the AM printed lifting tool are also described.

In the fourth chapter the characterization of the Onyx® material is presented. Tensile, compression, flexural tests on specimens reinforced with carbon fibres and specimens made only with polymeric matrix are described in detail, also illustrating all the results obtained and comparing these with the Markforged datasheet.

The last part of this work provides a detailed overview on the FEM analysis done on the lifting tool 3D model and on the experimental test done on the printed tool, describing step by step all the design modification made that made possible the reaching of the target load and the tool certification.

# 1 Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM) nasce nel 1984, durante il quale Charles Hull brevetta il primo schema per una nuova tecnologia, la Stereolitografia (SLA). È la prima tecnica che ha permesso la produzione di componenti "layer by layer".

Nel 1987 3D Systems commercializza la prima stampante 3D al mondo che sfrutta la tecnologia SLA: la macchina SLA-1. È l'inizio della commercializzazione di una serie di nuove tecnologie [4, 5, 6].

Nel 1991 vengono commercializzate tre nuove tecnologie additive: Fused Deposition Modeling (FDM) da Stratasys, Solid Ground Curing (SGC) da Cubital e Laminated Object Manufacturing (LOM) da Helisys [4].

Nel 1992 viene prodotta la prima macchina al mondo che sfrutta la tecnologia denominata Selective Laser Sintering (SLS) da una start up, DTM (ora facente parte di 3D Systems).

Nel 1993 al Massachusetts Institute of Technology (MIT) viene inventata e brevettata una nuova tecnologia: la Three Dimensional Printing (3DP) [5, 6].

Solo nel 1994 vengono introdotte tre nuove tecnologie [4]. Durante il ventunesimo secolo vengono introdotti approssimativamente 100 nuovi processi nel campo dell'Additive Manufacturing e la maggior parte dei loro nomi è associata a marche di produttori di stampanti.

## 1.1 La base dell'Additive Manufacturing

Al giorno d'oggi esistono moltissimi processi diversi nel campo dell'AM. Ognuno di loro ha i propri vantaggi e svantaggi, tratta materiale in forme diverse, tratta tipologie di materiale differenti. Ma tutte queste tecnologie, a differenza di quelle tradizionali, realizzano componenti aggiungendo materiale strato per strato e non più rimuovendolo [7]. La tecnica del layer by layer conferisce numerosi vantaggi a questa tecnologia, tra i quali libertà di design e livelli superiori di complessità geometrica con poche o addirittura una sola fase di lavorazione, riduzione o assenza di post lavorazioni, cicli di lavoro molto corti sia per design che per produzione, possibilità di lavorare con più materiali contemporaneamente [6].

Inoltre tutte le tecnologie AM, polimeriche e metalliche, operano con lo stesso principio di base rimasto immutato nel tempo (Figura 1.1).

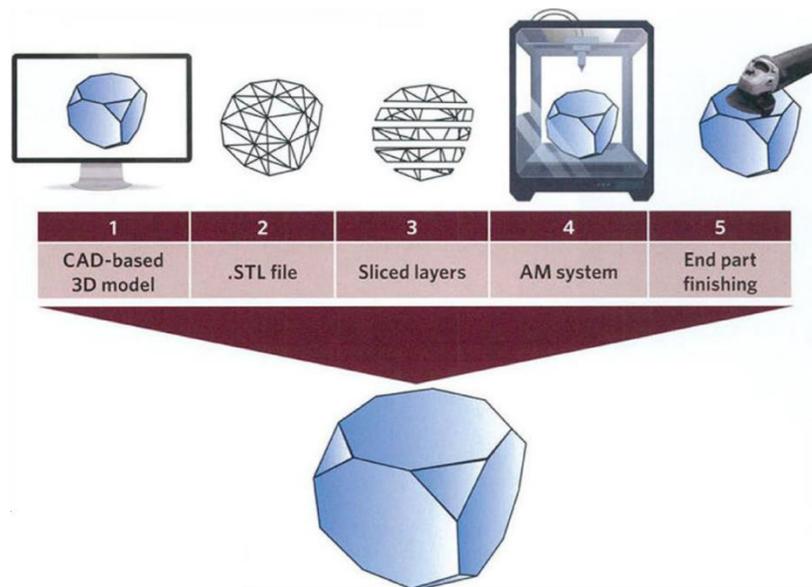


Figura 1.1 – Processo caratteristico dell'Additive Manufacturing [7].

Per prima cosa deve essere realizzato un modello virtuale CAD 3D del componente finito desiderato. In seguito il file CAD deve essere convertito nel formato “.stl”, sigla che sta per Standard Triangle Language. Questa tipologia di file approssima la superficie di un componente tridimensionale senza alcuna rappresentazione di colore, struttura o altre caratteristiche di un file CAD. Vengono solamente definite le coordinate dei vertici delle superfici triangolari approssimanti e la loro normale secondo un sistema di coordinate cartesiano. Difficilmente però questa approssimazione risulta perfetta, causa presenza di spazi vuoti, triangoli con normale invertita oppure superfici imperfette. È necessario a volte trovare un compromesso tra grandezza del file, quindi numero di forme geometriche approssimanti, e qualità di superficie approssimata, oppure riparare il file “.stl” [6].

Una volta creato il file “.stl”, esso deve essere importato in un software di messa in stampa in cui è possibile correggere eventuali errori di approssimazione, definire la quantità e la posizione delle strutture di supporto, se necessarie, e definire la quantità di materiale da utilizzare per la stampa del componente. Infine è necessario creare il file di stampa, ovvero avviare il processo di “slicing”, suddividendo il componente in sezioni (più comunemente conosciuti come “layers”) che verranno poi realizzate fisicamente dalla stampante [6, 7].

Fin dalle origini l'Additive Manufacturing, soprattutto l'AM polimerico, è stato associato al Rapid Prototyping, ovvero la realizzazione rapida di prototipi [8]. Per la prototipazione questa tecnologia è applicata in numerosi campi, quali medico, automotive, biomedicale,

dentistico, aerospaziale. Il termine prototipazione, però, al giorno d'oggi risulta inappropriato date le recenti applicazioni di questa tecnologia. Nonostante venga sfruttata ancora per realizzare prototipi, è ora possibile produrre componenti finiti e pronti all'uso [8]. È ormai una tecnologia che può competere con le tecnologie tradizionali.

Ci sono campi però ancora poco esplorati, in cui le tecnologie additive devono trovare il proprio spazio. Uno di questi campi è il mondo dell'attrezzatura di sollevamento, il quale verrà esplorato in questo progetto.

## **1.2 Tecnologie Additive Manufacturing polimerico**

Mentre la maggior parte delle industrie e l'interesse scientifico hanno l'attenzione rivolta verso l'additive manufacturing metallico per le sue possibili applicazioni tecnologiche, l'Additive basato sui polimeri è diventata ormai una tecnologia matura ed affermata. Il catalogo di materiali polimerici è molto vasto, includendo termoplastici, termoindurenti, idrogel, elastomeri, miscele di polimeri, polimeri compositi [5].

I campi di applicazione in cui viene utilizzato l'additive polimerico sono numerosi ma, come detto precedentemente, per la maggior parte dei casi viene utilizzato come tecnologia per la prototipazione rapida [1, 5]. In questo progetto verrà invece realizzato un attrezzo finito e pronto all'uso.

Essendo stata la prima tecnologia additive inventata, l'AM polimerico è sul campo da più di 20 anni [4]. È stata maturata una certa esperienza e sono state introdotte numerose tecniche differenti tra cui: Stereolitografia (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Three Dimensional Printing (3DP), Fused Deposition Modeling (FDM). Queste tecnologie verranno brevemente descritte nelle seguenti sezioni (per quanto riguarda la tecnica FDM fare riferimento al capitolo 2.1 in cui verrà descritta in dettaglio).

### **1.2.1 Stereolitografia**

La Stereolitografia è stato il primo processo Additive brevettato e messo in commercio. Consiste nell'utilizzo di un contenitore di resina fotopolimerica liquida che solidifica quando entra in contatto con luce ultravioletta (UV). Utilizzando quindi un laser UV il modello viene solidificato strato dopo strato all'interno del bagno di resina: il laser viene indirizzato sul

bagno per mezzo di uno specchio ed una volta completato un layer il piano di lavoro viene abbassato, la superficie del bagno viene appiattita ed inizia ad essere processato il layer successivo. Una schematizzazione di una macchina che utilizza la tecnica della Stereolitografia è rappresentata in Figura 1.2.

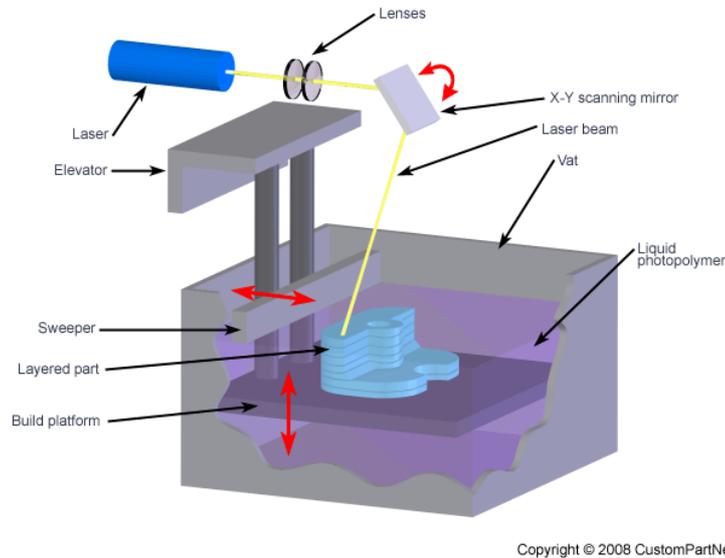


Figura 1.2 - Schematizzazione della tecnologia di stampa Stereolitografia [9].

I componenti realizzati con questa tecnica presentano un elevato livello di dettaglio, un'alta qualità superficiale e la velocità con la quale vengono prodotti è molto elevata. Questa tecnica però è limitata nell'uso dei materiali, in quanto sono necessari polimeri che risultano liquidi a temperatura ambiente e che solidificano una volta esposti a luce ultravioletta. Inoltre il costo delle resine è abbastanza elevato [1, 5, 6, 7, 9, 10, 11]

### 1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

È una tecnica che sfrutta una fonte di energia molto alta come il laser per sinterizzare del materiale sottoforma di polvere. Diversamente rispetto alle altre tecnologie Additive, la sinterizzazione laser permette di processare quasi ogni materiale che viene consolidato col calore. In questa sezione ci si concentrerà solamente sul materiale polimerico.

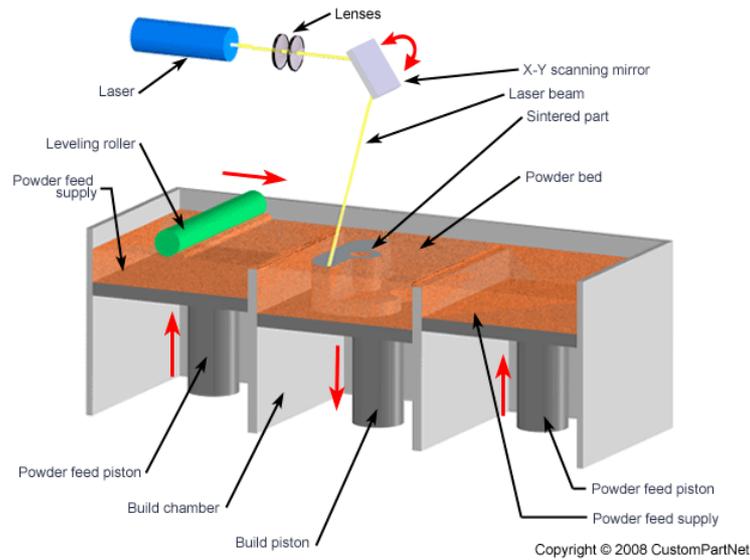


Figura 1.3 - Schematizzazione della tecnologia di stampa SLS [9].

Una macchina SLS consiste in un contenitore con all'interno materiale sottoforma di polvere, un contenitore che raccoglie la polvere non sinterizzata ed un laser ad anidride carbonica atto a sinterizzare. Una schematizzazione della macchina SLS è illustrata in Figura 1.3. Il volume di lavoro è preriscaldato in modo da minimizzare il ritiro dovuto alla solidificazione e solitamente è riempito di azoto per evitare l'ossidazione della polvere.

Il processo incomincia distribuendo un layer di polvere sul letto di lavoro. A questo punto il laser scioglie e fonde selettivamente la polvere in base al modello da realizzare. Una volta concluso un layer, il piano di lavoro scende automaticamente di una quantità pari allo spessore del layer selezionato: a questo punto viene ridistribuita la polvere tramite l'utilizzo di una lama o di un cilindro rotante e il laser ricomincia a sinterizzare. Questo processo viene ripetuto fino al completamento dell'ultimo layer. In seguito il componente viene lasciato raffreddare in modo da evitare deformazioni.

Due vantaggi di questa tecnologia rispetto alle altre: non sono necessari supporti e non sono necessari post-trattamenti se non la pulizia del componente dalla polvere residua [1, 5, 6, 7, 8, 9].

### 1.2.3 Three Dimensional Printing (3DP)

Come accennato in precedenza, la tecnica 3DP è stata sviluppata dal Massachusetts Institute of Technology nel 1993. Il processo è simile a quello SLS, ma in questo caso non viene utilizzato un laser per sinterizzare il materiale, bensì una testina di stampa che deposita un

liquido adesivo che funge da legante per il materiale. La velocità di stampa è molto elevata, ma la qualità superficiale e le caratteristiche meccaniche sono limitate. Questa tecnologia è normalmente utilizzata per il Rapid Prototyping.

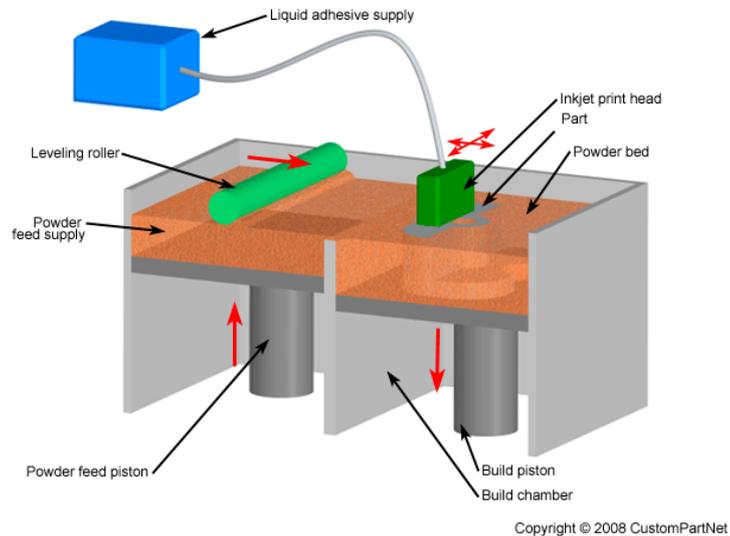


Figura 1.4 - Schematizzazione della tecnologia di stampa 3DP [9].

La polvere viene distribuita sul piano di lavoro con la stessa metodologia sfruttata dalla tecnologia SLS. La testina a quel punto ricopre gradualmente le zone interessate del letto di polvere con la sostanza adesiva: queste zone vengono legate assieme e formano il layer completo. La restante quantità di polvere funge da supporto per la struttura del componente durante la stampa, quindi non sono necessarie strutture aggiuntive. Una volta completato un layer, la piattaforma viene abbassata e ricomincia il processo appena descritto. Solitamente il componente finito viene trattato successivamente per migliorare la qualità superficiale e la resistenza meccanica [5, 6, 7, 9].

## 2 Processo di stampa

### 2.1 Fused Deposition Modeling

La tecnica denominata Fused Deposition Modeling (FDM) è una delle più comuni tecniche 3D utilizzate per la produzione di componenti polimerici. I materiali trattati con questa tecnica sono i materiali termoplastici, più comunemente ABS [12], PLA [13], PC [5], Nylon [14]. I materiali vengono forniti sotto forma di bobine di filamento. Nella Figura 2.1 è illustrata una schematizzazione del processo FDM.

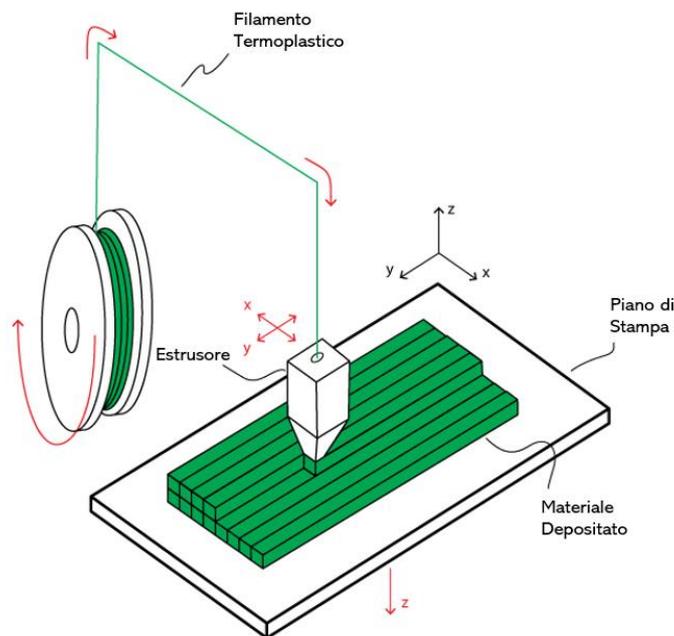


Figura 2.1 - Schematizzazione del processo FDM.

Il filamento viene guidato da un tubo in teflon verso la testina di stampa, dove viene portato ad una temperatura poco superiore a quella di fusione. All'uscita dell'ugello, il materiale si presenta molto viscoso e può quindi essere depositato sotto forma di "strisce" sul piano di lavoro. Comunemente, il piano di lavoro, che può essere riscaldato o meno, viene ricoperto da uno strato di colla o sostanze simili in modo da facilitare l'adesione del primo layer sul piano di lavoro e, in seguito, permettere una facile rimozione del componente dal piatto [6].

La testina di stampa può muoversi solamente lungo gli assi X e Y, il piatto invece lungo Z. Una volta che un layer viene completato, il piano di lavoro si abbassa in modo da permettere

la stampa del layer successivo. Questo processo viene ripetuto fino al termine della creazione del componente.

I parametri principali che caratterizzano il processo di stampa FDM sono la temperatura di estrusione del materiale, la velocità di movimento sul piano X-Y della testina di stampa, il minimo spostamento consentito al piano di lavoro lungo la direzione Z [7].

La temperatura di stampa viene impostata in base al tipo di materiale trattato. Se la massima temperatura raggiungibile dalla stampante è minore della temperatura di fusione di un materiale, quest'ultimo non può essere utilizzato dalla macchina.

La combinazione tra temperatura di stampa e velocità di movimento della testina determina la qualità del componente finito. Se la temperatura è troppo elevata, il materiale solidificherà in ritardo e la dimensione del pezzo risulterà alterata. Se la velocità di stampa è troppo elevata, la deposizione del materiale sarà discontinua e le caratteristiche meccaniche e la qualità superficiale non saranno delle migliori. Al contrario, se la velocità di stampa è troppo bassa il materiale potrebbe solidificarsi sull'ugello, causando deposizione discontinua ed eventualmente l'arresto del processo di stampa.

Il minimo spostamento consentito al piano di lavoro lungo la direzione Z determina lo spessore minimo possibile del layer. Un minor spessore comporta l'incremento della durata del processo, ma allo stesso tempo più accuratezza dimensionale. Lo spessore del layer è comunemente riferito alla risoluzione della stampante [1, 6].

Per questo progetto è stata utilizzata la Markforged X7, una stampante FDM capace di rinforzare, durante il processo, i componenti con fibre continue.

## **2.2 Markforged X7**

Nel 2015 Markforged, azienda con base negli USA (Cambridge, Massachusetts), lancia sul mercato la prima stampante che sfrutta la tecnologia FDM capace di rinforzare i componenti stampati in Nylon con fibre di carbonio e di vetro, la Mark One. Markforged ha nominato la sua tecnologia di stampa CFF (Continuous Filament Fabrication) in quanto mentre un estrusore stampa materiale termoplastico, l'altro depone filamenti continui di materiale rinforzante [15].

Dato il grande successo riscosso, nei successivi due anni è stato migliorato il software di messa in stampa, Eiger, è stata rilasciata la stampante Mark Two, versione più veloce e più precisa del suo predecessore, ed inoltre ha allargato la sua gamma di materiali. Sono stati introdotti nuove fibre di rinforzo, Kevlar e HSHT Fiberglass (High-Strength, High-Temperature), ed è stato introdotto un nuovo materiale composito, Nylon con aggiunta di fibre corte di carbonio, l'Onyx® [15].

Tutto ciò pone le basi per la Mark X7, illustrata in Figura 2.2: una macchina che sfrutta la tecnologia CFF capace di assicurare la finitura superficiale, la qualità di controllo, la ripetibilità necessarie per una produzione in serie.



*Figura 2.2 - La stampante 3D Mark X7 di Markforged.*

Possiede il volume di lavoro più grande di tutta la gamma di stampanti Markforged, pari a 330 mm x 270 mm x 200 mm, dimensioni che le permettono di stampare componenti molto grandi, o addirittura piccoli lotti.

La testina di stampa ha due estrusori, uno per la matrice polimerica e uno per la fibra di rinforzo. La bobina di Onyx® consiste in 800  $cm^3$  di filamento ed è montata al di sotto del volume di lavoro in una dry box. La ragione per cui la bobina è situata in un contenitore impermeabile è che il Nylon assorbe l'umidità molto facilmente, e ciò può causare svariati

problemi quando il materiale viene scaldato a 265 °C, quali porosità nel componente stampato, estrusione difficoltosa, arresto del processo di stampa [15].

Come accennato in precedenza, ad oggi sul mercato sono disponibili svariate tipologie di filamenti di fibre, ma in questo progetto è stata utilizzata solamente la fibra di carbonio, la più performante e resistente.

La gestione dei materiali durante il processo di stampa è schematizzata in Figura 2.3. La bobina di Onyx® e la bobina di fibra di carbonio vengono guidate fino ai rispettivi estrusori da due tubi di teflon differenti. È importante sottolineare il fatto che nelle stampanti Markforged la testina di stampa deposita solamente un materiale alla volta, mai due contemporaneamente [1, 16, 17].

I sistemi di feeding di Nylon e fibre sono praticamente gli stessi, l'unica differenza è la presenza di un cutter nel sistema della fibra rinforzante che taglia il filamento alla lunghezza richiesta.

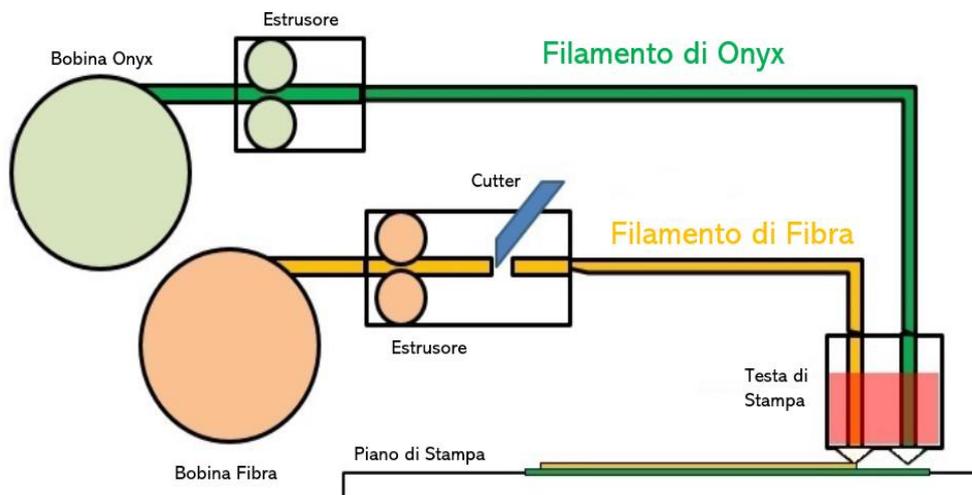


Figura 2.3 - Schematizzazione del processo di stampa CFF Markforged..

Il filamento di Nylon viene portato all'estrusore e spinto attraverso il tubo di teflon fino alla testina di stampa. A questo punto il Nylon viene riscaldato fino a 265°C, temperatura poco al di sopra della fusione, e viene poi depositato.

Il filamento di fibra viene portato alla testina di stampa da un altro estrusore attraverso un secondo tubo di teflon, differente da quello del polimero. Quando è necessario il rinforzo di un componente, la testina di stampa distende prima la matrice polimerica del layer, ed in

seconda battuta la fibra [16, 17]. Il filamento di rinforzo viene anch'esso portato a 265 °C in modo da fondere la resina presente nel filamento, la quale fungerà da legante tra fibra e matrice polimerica. Quando viene raggiunta la quantità esatta di fibra destinata al layer, il “cutter” viene automaticamente azionato, tagliando il filamento di fibra ed evitando spreco di materiale.

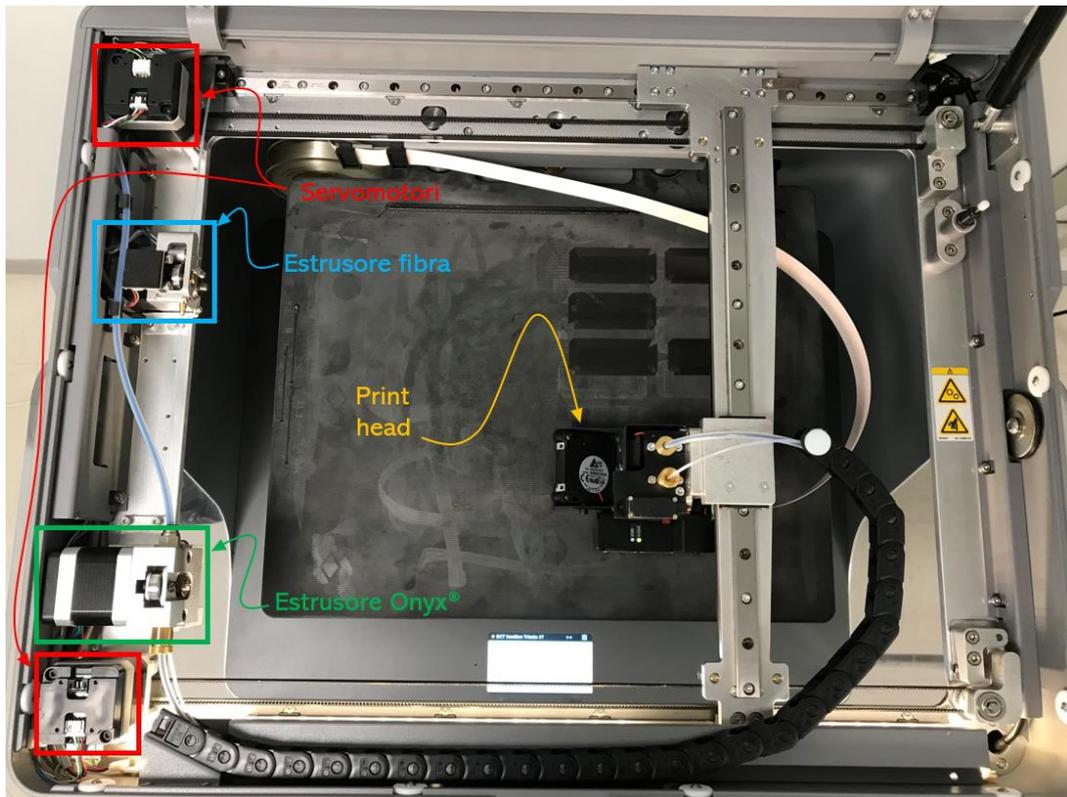


Figura 2.4 - Vista dall'alto del volume di lavoro della Markforged X7.

Durante la stampa di un layer, il letto di stampa è fermo e la testina si muove sul piano orizzontale XY. Essa è controllata da due servomotori, evidenziati in Figura 2.4.

Una volta concluso il processo per un layer, la testina di stampa smette di muoversi e il letto trasla lungo l'asse Z, mettendosi in posizione in modo da permettere l'inizio del layer successivo. Tutti questi movimenti durante il processo di stampa vengono eseguiti automaticamente. Il piatto di stampa si muove lungo un mandrino ed i suoi movimenti sono fissati e pari all'altezza del layer prefissata [17].

A differenza dei suoi predecessori, la Markforged X7 monta sulla testina di stampa un laser, con risoluzione lungo Z pari a 1 micron e su XY pari a 50 micron, che scansiona le parti

durante il processo di stampa. Permette quindi un controllo dimensionale e di qualità di stampa in tempo reale e consente all'utente il confronto tra il componente sotto processo e il file CAD originale [15].

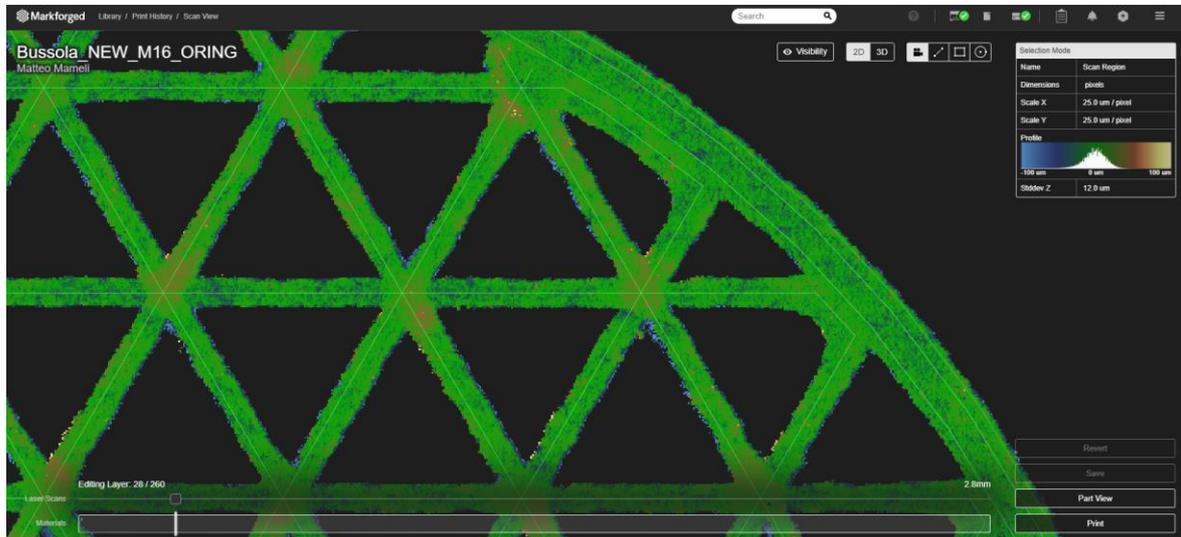


Figura 2.5 - Esempio del laser scan di un layer.

In Figura 2.5 è raffigurata una scansione laser durante una stampa di un pezzo senza fibre di rinforzo. Le linee bianche rappresentano la traiettoria ideale che la testina avrebbe dovuto percorrere durante l'estrusione della matrice polimerica, calcolata dal software di messa in stampa. La zona verde è la zona in cui la plastica è stata effettivamente depositata. Le aree blu rappresentano le aree 10 micron sopra la vista corrente, quelle rosse 10 micron sotto.

La Markforged ha reso pubblici i data sheet contenenti le caratteristiche meccaniche di ogni suo materiale, sia rinforzato con fibre continue che non. Sul documento illustrato in Figura 2.6, a piè di pagina, viene sottolineato che i valori pubblicati non devono essere presi in considerazione per stabilire design o controlli qualitativi e non devono essere sostitutivi a risultati ottenuti da una caratterizzazione interna. I valori forniti dalla casa madre, presentati nelle tabelle sottostanti, verranno quindi confrontati con i risultati ottenuti dai test per la caratterizzazione del materiale.

# Composites



Plastic Matrix	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Nylon W	Dimensions and Construction of Plastic Test Specimens:
Tensile Modulus (GPa)	D638	1.4	1.3	1.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tensile test specimens: ASTM D638 type IV Beams</li> <li>Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)</li> <li>Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)</li> </ul>
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	36	29	51	
Tensile Strain at Yield (%)	D638	25	33	4.5	
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	30	31	36	<p>All Markforged composite machines are equipped to print Onyx, Nylon White is available on the Mark Two and X7. Onyx FR is available on X3, X5, and X7.</p> <p>Markforged parts are primarily composed of plastic matrix. Users may add one type of fiber reinforcement in each part, enhancing its material properties.</p>
Tensile Strain at Break (%)	D638	58	58	150	
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	81	79	50	<p>1. Measured by a method similar to ASTM D790. Thermoplastic-only parts do not break before end of flexural test.</p> <p>2. Onyx FR at a thickness of 3mm achieves UL94 V-0 rating from a third-party lab.</p>
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	3.6	4.0	1.4	
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	41	
Flame Resistance	UL94	—	V-0 <sup>2</sup>	—	
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	110	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.2	1.2	1.1	
Fiber Reinforcement	Test (ASTM)	Carbon	Kevlar*	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	2.7	3.8	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	540	240	200	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	51	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 <sup>1</sup>	1.2	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	320	97	140	192
Compressive Modulus (MPa)	D6641	54	28	21	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	1.5	—	—
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105	150
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	2000	2600	3100
Density (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.4	1.2	1.5	1.5

This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

Dimensions and Construction of Fiber Composite Test Specimens:

- Test plaques used in these data are fiber reinforced unidirectionally (0° Plies)
- Tensile test specimens: 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.048 in (W) (CF composites), 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.08 in (W) (GF and Kevlar\* composites)
- Compressive test specimens: 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.085 in (W) (CF composites), 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.12 in (W) (Kevlar\* and FG composites)
- Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

Tensile, Compressive, Strain at Break, and Heat

Deflection Temperature data were provided by an accredited 3rd party test facility. Flexural data was prepared by Markforged, Inc. These represent typical values.

Markforged tests plaques are uniquely designed to maximize test performance. Fiber test plaques are fully filled with unidirectional fiber and printed without walls. Plastic test plaques are printed with full infill. To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative. All customer parts should be tested in accordance to customer's specifications.

Part and material performance will vary by fiber layout design, part design, specific load conditions, test conditions, build conditions, and the like.

This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

Figura 2.6 - Datasheet Markforged con dettaglio su responsabilità.

## 2.3 Eiger

Le stampanti Markforged hanno il proprio software di messa in stampa con sui si elaborano i file “.stl” per poi inviarli alla macchina. Il software, denominato Eiger, offre diverse opzioni che consentono la modifica del file .stl, in accordo con le specifiche desiderate dall’utente. Un esempio dell’interfaccia del software è riportato in Figura 2.7. È possibile inoltre avere una vista interna del componente, come si potrà vedere in seguito.

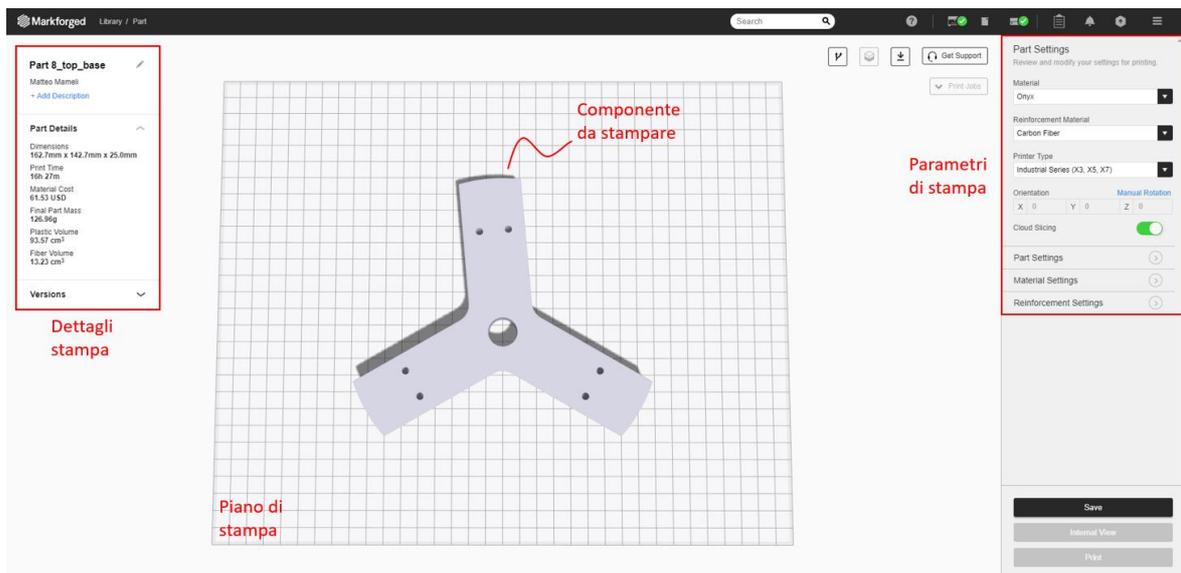


Figura 2.7 - Interfaccia utente di Eiger.

Prima di procedere con la descrizione dettagliata dei parametri modificabili, è importante sottolineare che il software impone dei vincoli non poco rigidi in fase di messa in stampa. Appena ci si discosta dai parametri preimpostati dal software, viene visualizzato un messaggio di avviso con indicati i valori consigliati da utilizzare. In numerose situazioni invece alcuni parametri non possono proprio essere modificati, i comandi risultano non selezionabili.

Detto ciò, vanno tenuti in considerazione i seguenti aspetti:

- La temperatura, la velocità della testina di stampa e il “flow rate” sono predeterminate e non possono essere modificate dall’utente.
- Se il componente da stampare è realizzato solamente con matrice polimerica, l’altezza del layer è modificabile (0.100/0.125/0.200 mm). Al contrario, se sono

previsti dei layer rinforzati con fibra continua, il layer viene fissato dal software a seconda della tipologia di fibra [18]:

- Fibra di carbonio: 0.125 mm
  - Fibra di vetro / HSHT glass: 0.1 mm
  - Fibra di Kevlar: 0.1 mm
- 
- Non è permesso né iniziare né finire la stampa con layer rinforzati, i layers di “roof” e “floor” devono essere stampati esclusivamente con matrice polimerica (da un minimo di 1 a un massimo di 10 layers per zona nominata).
  - Il software impone 1 floor layer e 1 roof layer con infill al 100% (a prescindere dalla percentuale di riempimento imposta dall’utente) prima e dopo la stesura del layer rinforzato in modo da compattare la fibra.
  - Il software impone di avere almeno 1 wall layer di puro Onyx® attorno alla fibra di rinforzo (da un minimo di 1 a un massimo di 4 layers).
  - Il programma considera un valore di superficie minima per la quale è possibile depositare il materiale di rinforzo. Per valori inferiori Eiger annulla automaticamente l’inserimento di fibre (è possibile verificare ciò nella sezione “internal view”).
  - La disposizione e la quantità dei supporti non è modificabile in alcun modo.

### **2.3.1 Selezione dei parametri di Eiger: Parametri Standard**

Le immagini seguenti illustrano l’interfaccia utente in cui si possono modificare i parametri di stampa. Questi vengono visualizzati all’importazione del file del componente da stampare.

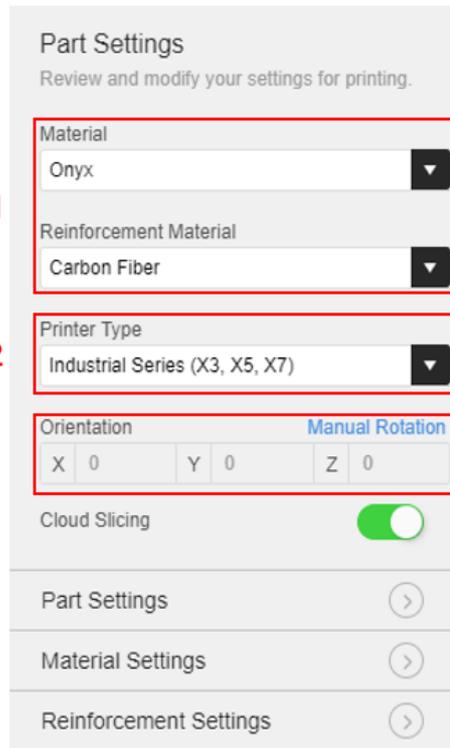


Figura 2.8 - Parametri di stampa iniziali.

In Figura 2.8 viene raffigurata l'interfaccia dei parametri base modificabili dall'utente.

Nel primo riquadro (1 in Figura 2.8) vengono elencate delle opzioni che permettono di scegliere il materiale della matrice polimerica e la fibra di rinforzo con cui stampare il proprio componente.

Nel riquadro numero 2 (2 in Figura 2.8) è raffigurata l'opzione con cui è possibile scegliere la macchina su cui stampare. Tutte le stampanti Markforged acquistate sono collegate all'account Eiger del proprietario in modo da dover caricare il file “.stl” solamente una volta. Nel terzo riquadro (3 in Figura 2.8) è presente l'opzione per la rotazione manuale. Questa opzione solitamente viene utilizzata per orientare il componente in modo da minimizzare la quantità di supporti, oppure, in caso di elevate dimensioni del pezzo, per rendere semplicemente possibile la stampa. Inoltre può essere sfruttata per ottimizzare la disposizione delle fibre di rinforzo.

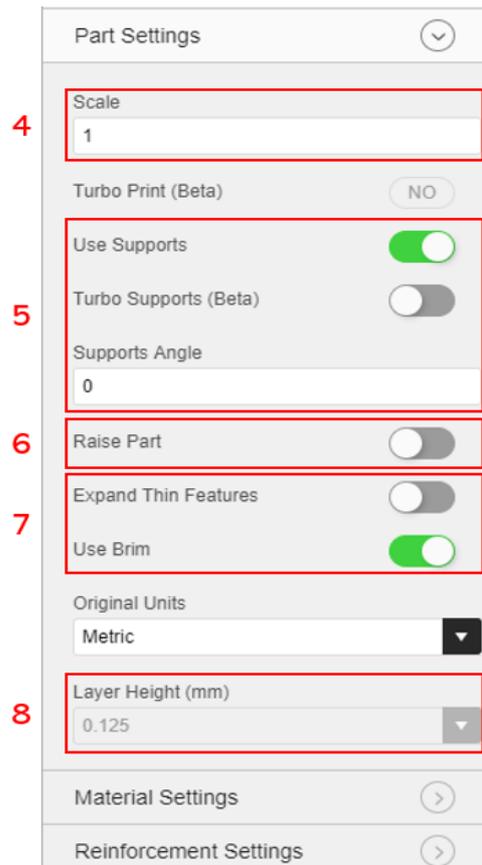


Figura 2.9 - Part settings.

In Figura 2.9 viene illustrata l'interfaccia del gruppo di impostazioni riguardanti il componente da stampare.

Con l'opzione visualizzabile nel primo riquadro (4 in Figura 2.9) è possibile scalare le dimensioni del componente in modo da adeguarlo al piano di lavoro.

Nel secondo e terzo riquadro (5 e 6 in Figura 2.9) vengono elencate le opzioni riguardanti i supporti. Si può evitare di utilizzarli se si ritiene che la struttura del componente possa sorreggersi autonomamente [19]. Si può inoltre selezionare l'angolo di stampa dei supporti (0° lungo l'asse X, 90° lungo Y), opzione necessaria per facilitare la loro rimozione. Il software inoltre offre la possibilità di incominciare la stampa del componente su uno strato di 20 layers di supporto. Ciò viene utilizzato per facilitare la rimozione dei supporti, che a volte potrebbero essere troppo piccoli e difficili da gestire.

Nel quarto riquadro (7 in Figura 2.9) vengono elencate due opzioni utili per la buona riuscita della stampa. La prima opzione viene utilizzata quando sono presenti delle parti del

componente troppo sottili. Attivandola, queste sezioni verranno leggermente sovradimensionate.

Il Brim è un' "ancora" che mantiene saldamente in contatto il componente al piano di stampa e viene utilizzato in caso di warping prevedibile, oppure quando il componente da stampare ha pochi punti di contatto con il piano di stampa.

L'ultimo riquadro (8 in Figura 2.9) è la sezione in cui è possibile selezionare l'altezza del layer. Se viene utilizzata della fibra di rinforzo, questa opzione non è selezionabile: il software impone l'altezza in base alla tipologia di fibra utilizzata in quanto ogni materiale ha un proprio diametro di filamento [18].

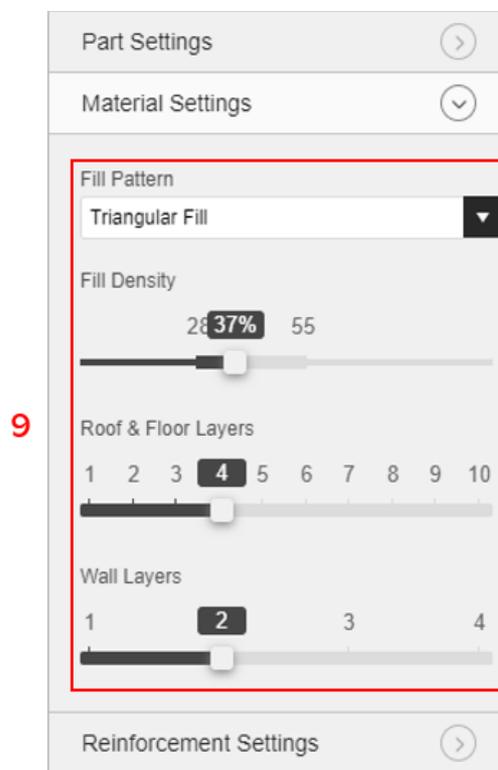


Figura 2.10 - Material settings.

In Figura 2.10 vengono elencate le opzioni legate al pattern della matrice polimerica. Ogni layer non rinforzato che non sia di floor, roof o wall verrà riempito come selezionato in questa sezione. Sono disponibili 3 differenti infill pattern:

- Riempimento Triangolare
- Riempimento Esagonale
- Riempimento Rettangolare

ed essi possono essere visualizzati nella Figura 2.11 sottostante.

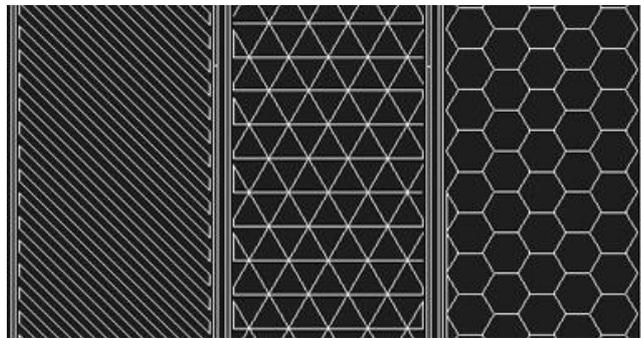


Figura 2.11 - Pattern di riempimento della matrice polimerica. Da sinistra: riempimento rettangolare, riempimento triangolare, riempimento esagonale.

I layer di roof e floor sono sempre riempiti secondo una disposizione isotropica, ovvero vengono completamente riempiti alternando l'angolo di disposizione tra  $45^\circ$  e  $-45^\circ$ .

Fill density indica quanto denso sarà il pattern geometrico selezionato. Incrementando questo parametro aumenteranno anche la quantità di materiale utilizzato, il tempo di stampa, ma anche le proprietà meccaniche del componente finito.

### 2.3.2 Selezione dei parametri in Eiger: Parametri di Rinforzo

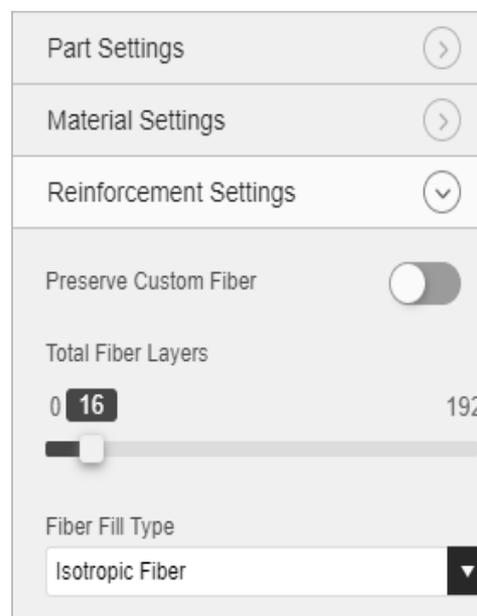


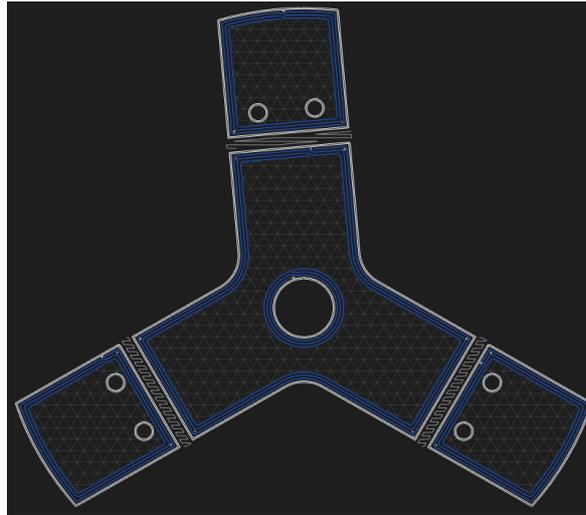
Figura 2.12 - Reinforcement settings.

La Figura 2.12 raffigura la sezione dedicata ai parametri della fibra di rinforzo. L'opzione "Preserve Costum Fiber" può essere attivata dopo aver definito tutti i dettagli riguardanti la

fibra e permette di bloccare l'ulteriore modifica dei parametri. La seconda opzione permette di decidere la quantità di layer da rinforzare.

È necessario in seguito scegliere il pattern di deposizione della fibra:

- Riempimento Concentrico



*Figura 2.13 - Esempio di rinforzo utilizzando l'opzione riempimento concentrico.*

La testina di stampa percorre i contorni del componente e deposita il filamento di fibra lungo i “wall layer”. Come si può notare dalla Figura 2.13 di esempio, con questo tipo di deposizione si vanno a creare degli anelli concentrici attorno a tutti i perimetri dell'elemento, che siano interni o esterni.

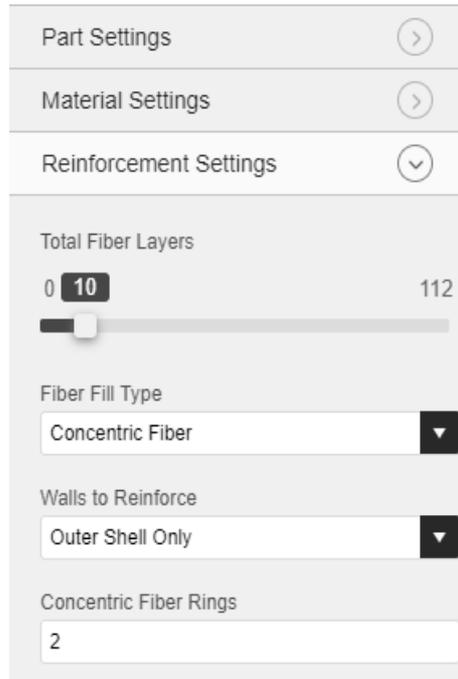


Figura 2.14 - Impostazioni per Concentric fill.

Quando viene scelta la disposizione “concentric fill”, risultano modificabili due parametri elencati in Figura 2.14. Il primo indica quali “wall layer” rinforzare: qui si può optare per rinforzare solamente i wall esterni, solamente i wall interni oppure entrambi. Il secondo permette di modificare la quantità di anelli concentrici da depositare su ogni layer, da un minimo di 1 a un massimo che dipende dalla geometria del componente.

- Riempimento Isotropico

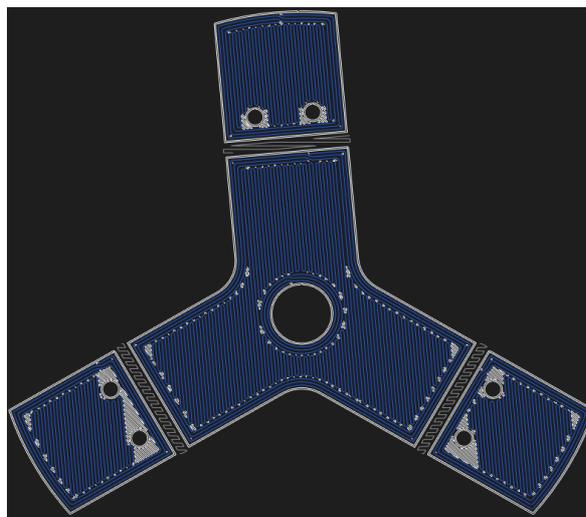


Figura 2.15 - Esempio di rinforzo utilizzando l'opzione riempimento isotropico.

La fibra viene depositata su ogni layer selezionato in una singola direzione, come si può notare dall'esempio in Figura 2.15. Ogni layer può avere la propria orientazione, non è necessario che essa sia uguale per ogni strato del componente.

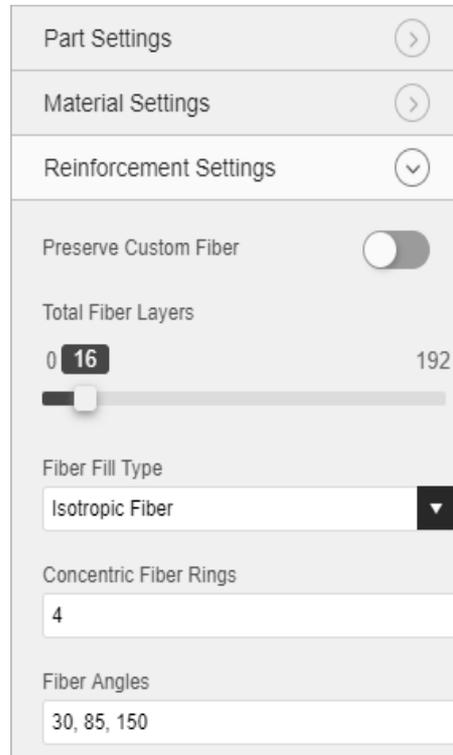


Figura 2.16 - Impostazioni per Isotropic fill.

Come si può notare dalla Figura 2.16, diventa in questo caso selezionabile un'ulteriore opzione che permette di settare, in accordo con la scelta dell'asse X del componente, l'orientazione delle fibre in gradi.

Come in precedenza, l'utente deve indicare la quantità di anelli concentrici. La componente isotropica verrà depositata all'interno degli anelli concentrici, come si può notare dall'esempio in Figura 2.15.

### 2.3.3 Selezione dei parametri in Eiger: Internal View Settings

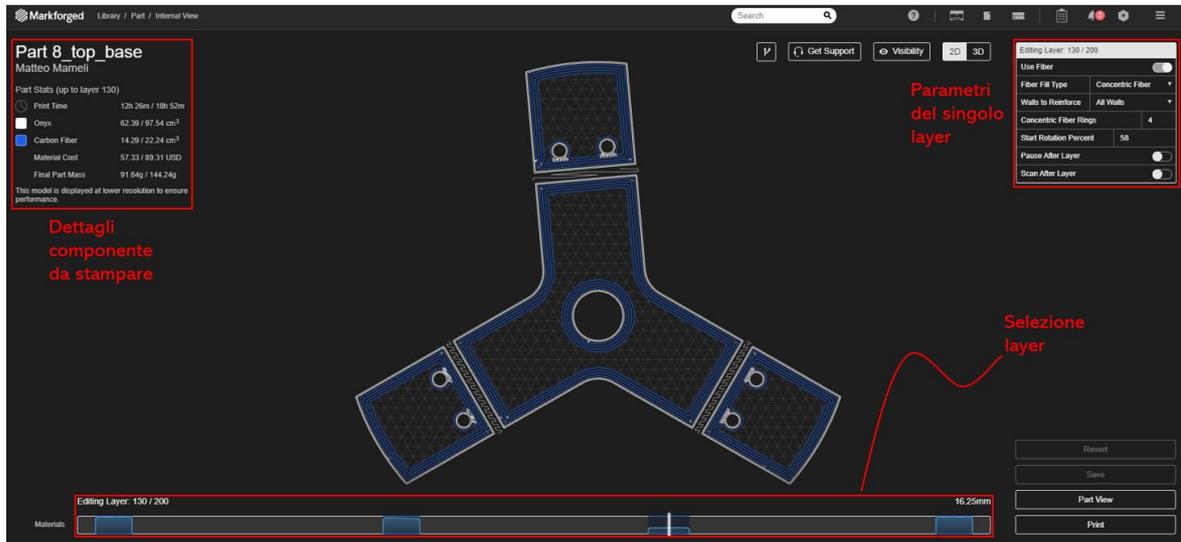
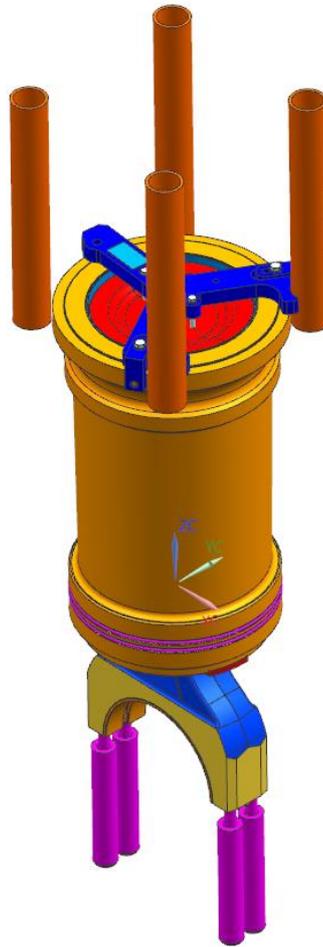


Figura 2.17 - Interfaccia Internal view.

In questa sezione, illustrata in Figura 2.17, oltre che poter visualizzare la geometria di ogni singolo layer del componente, si possono modificare i parametri per la fibra di rinforzo visti in precedenza. Inoltre sono presenti due opzioni aggiuntive:

- **Pause after layer:** è possibile arrestare momentaneamente la stampa dopo il completamento di un layer prestabilito. Ciò permette all'utente di controllare visivamente l'andamento della stampa ed eventualmente inserire un elemento esterno durante il processo di stampa (come ad esempio un dado) da "affogare" nel componente.
- **Scan after layer:** la macchina eseguirà una scansione laser al termine del layer indicato. Potrà quindi essere analizzato l'andamento della stampa via software. Una volta terminato il processo di scansione, i dati potranno essere visualizzati direttamente su Eiger.

### 3 Il Lifting Tool



*Figura 3.1 - Assieme Lifting Tool e sistema biella-pistone-camicia.*

L'attrezzo riprogettato in questo elaborato è uno strumento atto a sollevare il sistema camicia-pistone-biella di un motore navale (peso complessivo 235 kg). È stato scelto internamente all'azienda come case study e dimostrazione delle potenzialità dell'additive manufacturing.

L'obiettivo è di realizzarlo servendosi della tecnologia FDM rinforzandolo con fibre di carbonio ed infine certificarlo.

Le motivazioni che hanno condotto alla scelta di riprogettare il tool sono le seguenti:

- Peso complessivo elevato. Il tool ora in uso è in acciaio e raggiunge un peso di 8 kg.

- Difficoltà di manipolazione e trasporto. Il tool viene utilizzato sia in produzione, sia sul campo. È previsto quindi un trasporto dalla sede aziendale al cliente e questo, attualmente, risulta complicato e costoso.
- Necessità di una produzione propria. Il tool viene prodotto da una ditta esterna e spedito in azienda e ciò comporta tempi di attesa lunghi e costi ingenti.

Il tool in acciaio prevede due modalità di sollevamento a due angolazioni differenti: sollevamento verticale e sollevamento inclinato. Il progetto di redesign dell'attrezzo verte solamente sul caso di sollevamento verticale.

### 3.1 Design originale



Figura 3.2 - Lifting Tool ora in utilizzo.

Agli estremi del tool sono montate tre spine cilindriche che permettono l'aggancio alla camicia. Il tool prevede due configurazioni differenti a seconda del pistone montato: una con due viti a  $120^\circ$  e una con due viti a  $180^\circ$  che collegano il tool al pistone.

I tre angoli che separano le braccia sono  $120^\circ$ ,  $125^\circ$  e  $115^\circ$ , come illustrato in Figura 3.2.

Oltre al corpo massivo del tool, si possono notare due elementi a "L" asolati agli estremi di due delle tre braccia. Questo sistema rende il montaggio e lo smontaggio veloce e poco faticoso: per montare il tool dalla camicia è necessario solamente chiudere a pacco gli

elementi a “L” e stringere i bulloni nella sede asolata. Procedimento uguale e inverso per lo smontaggio del tool.

I due cilindri evidenziati nell’assieme illustrato in Figura 3.1 vengono montati direttamente sull’engine block e fungono da protezione e da sistema di centraggio durante il posizionamento del tool e del suo carico. Sul tool sono state previste quindi due sedi semi cilindriche su cui andranno in appoggio le due colonne.

## 3.2 Design Markforged

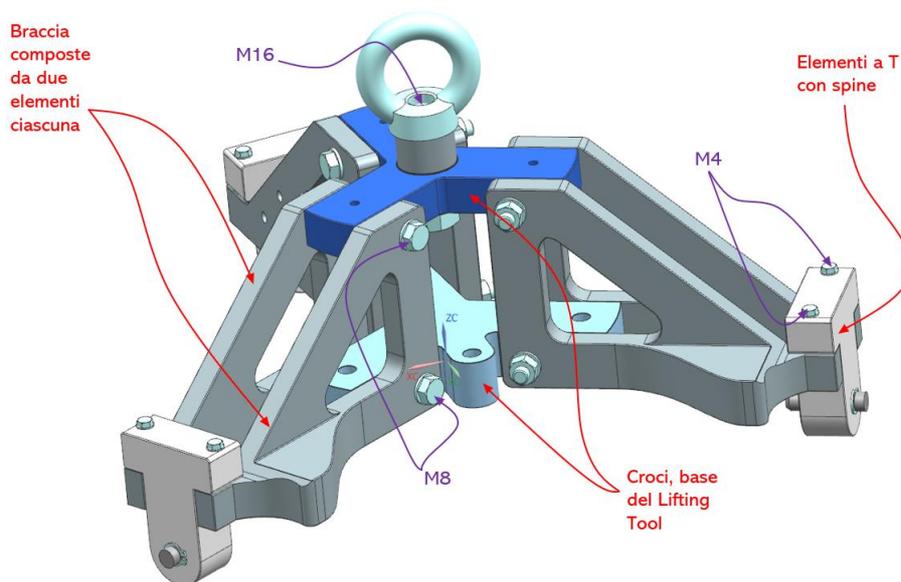


Figura 3.3 - Primo prototipo Lifting Tool AM.

Il design descritto qui di seguito ed illustrato in Figura 3.3 è stato proposto e stampato direttamente da Markforged. Ogni componente dell’attrezzo è stato stampato con una macchina Markforged X7 utilizzando Onyx® come matrice polimerica e fibra di carbonio come rinforzo.

Rispetto all’originale in acciaio, sono stati mantenuti sia l’aggancio alla camicia con le tre spine sia il sistema di accoppiamento tra tool e pistone. Lo stesso vale per l’appoggio alle due colonne di centraggio.

Il nuovo design è stato ripensato basandosi sulla possibilità di rinforzare i componenti con fibre di carbonio. Inoltre, avendo un volume di stampa limitato, si è dovuto scomporre il tool in più parti, 11 per l'esattezza.

Due elementi a croce vanno a comporre la base del tool. Su di essi vengono accoppiati 6 elementi triangolari, i quali a coppie formano delle braccia che allungano il tool fino al diametro massimo del sistema da sollevare. I tre elementi a "T", su cui sono montate tre spine, costituiscono il collegamento tra l'attrezzo e la camicia.

In questa configurazione sono montate 9 viti: sei viti M8 che collegano le braccia del tool alle due croci, sei viti M4 che agganciano gli elementi a T alle braccia del tool ed una vite M16 su cui è montato il golfare.

È importante notare che la vite M16 che collega il tool al golfare è montata sulla croce superiore.

Questo design è stato testato e portato a rottura in modo da rilevare il carico massimo. È stato scelto di incrementare il carico a step di 50 kg e ad ogni step il sistema veniva fermato mantenendo in trazione il tool per 60 secondi. Il target da raggiungere era di 1000 kg, approssimativamente 4 volte il carico nominale.

Il golfare accoppiato al tool è stato agganciato ad un carroponete su cui era montato un dinamometro che ha permesso di monitorare il carico in tempo reale. Un disco di acciaio, bloccato a terra, simulava l'accoppiamento dell'attrezzo con la camicia e il pistone.

Il dato rilevato dal dinamometro al momento della rottura è stato 850 kg, di cui 20 kg sono stati attribuiti alla piastra metallica. Dato l'elevato carico raggiunto, anche se fuori target, si è deciso di proseguire il progetto e intraprendere il percorso di certificazione.

## 4 Caratterizzazione del materiale

Il primo step da intraprendere per conseguire la certificazione è la caratterizzazione del materiale utilizzato per realizzare il Lifting Tool. Si andranno quindi ad eseguire test di:

- Trazione di provini in Onyx® rinforzati con fibre di carbonio e non.
- Compressione di provini in Onyx® rinforzati con fibre di carbonio e non.
- Flessione di provini in Onyx® rinforzati con fibre di carbonio e non.

Oltre a voler conoscere il comportamento meccanico del materiale composito in questione, l'obiettivo è di ottenere un range di valori in cui identificare il Modulo di Young. Ciò permetterà di eseguire delle analisi FEM (Finite Element Method) preliminari sul nuovo design del tool.

### 4.1 Materiale e metodi

I test sui provini sono stati conseguiti in sala metrologica e facendo sempre riferimento alle norme ISO, elencate nella Tabella 4.1. La matrice polimerica di ogni provini è composta da Onyx®, materiale fornito da Markforged. Le fibre di rinforzo sono fibre di carbonio, anch'esse fornite da Markforged.

Test	Materiale Testato	Normativa	Condizioni Test
Trazione	Onyx®	ISO 527-4:1997 [20]	20 °C, umidità 50%
	Onyx® rinforzato con fibre di carbonio	ISO 527-5:1997 [21]	
Compressione	Onyx®	ISO 604:2002 [22]	
	Onyx® rinforzato con fibre di carbonio	ISO 604:2002 [22]	
Flessione	Onyx®	ISO 178:2003 [23]	
	Onyx® rinforzato con fibre di carbonio	ISO 14125:1998 [24]	

*Tabella 4.1 - Elenco delle norme seguite per eseguire i test di caratterizzazione.*

I provini sono stati realizzati con un software CAD (NX SIEMENS) rispettando le dimensioni indicate dalla normativa. Per le dimensioni quotate fare riferimento al rispettivo paragrafo del test.

Tutti i provini sono stati stampati utilizzando la Markforged X7. La percentuale di riempimento della matrice polimerica è stata mantenuta sempre al 100% (percentuale ottenibile solamente selezionando rectangular fill come pattern di riempimento). La disposizione delle fibre di rinforzo è stata scelta in modo da avere un layout unidirezionale nelle aree interessate dalle singole prove. È stato previsto lo stesso orientamento sul piano di stampa per tutti i provini, ponendo la superficie più ampia di ogni componente sul piano XY. L'altezza del layer dei provini rinforzati con fibre è pre-impostata dal software, invece quella dei provini composti solamente da matrice polimerica è stata impostata a 0.1 mm.

La temperatura di estrusione e la velocità della testina di stampa non sono modificabili in alcun modo dall'utente e non vengono visualizzati su Eiger. La temperatura di stampa può

essere letta sul display incorporato nella stampante ed è pari a 265 °C. Invece l'esatta velocità della testina dipende dal materiale stampato e si aggira attorno ai 10 mm/s per il Nylon.

Tutti e tre i test sono stati eseguiti sia su provini composti solamente da Onyx® sia su provini rinforzati con fibre di carbonio.

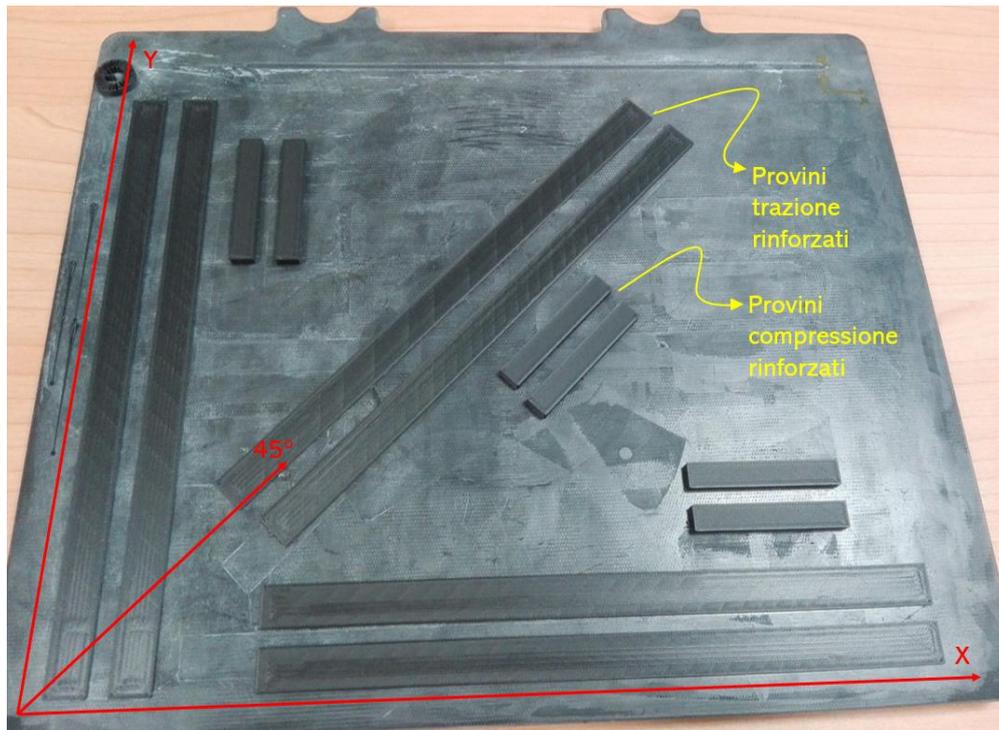


Figura 4.1 - Differenti orientazioni di stampa dei provini rinforzati.

La quantità di fibra depositata nei provini di compressione e flessione è la massima consentita dal programma mantenendo tutte le impostazioni (tranne quelle sopra citate) invariate da quelle di default di Eiger. È importante sottolineare che a seconda dello spessore del componente da stampare e dalla quantità di fibra in esso contenuta, il software modifica la quantità di roof, floor e wall layer autonomamente.

Per quanto riguarda i provini rinforzati per i test di trazione sono state scelte due configurazioni differenti:

- Provini con un solo layer di rinforzo.
- Provini rinforzati con la massima quantità di fibra consentita dal programma (mantenendo le impostazioni di default di Eiger).

Inoltre sono stati fatti dei test di trazione e compressione su provini rinforzati stampati con orientazioni differenti (lungo X, lungo Y, a 45° rispetto all'orizzontale), come raffigurato in Figura 4.1, per indagare sulle eventuali correlazioni tra proprietà meccaniche e orientazione sul piano di lavoro. Le caratteristiche dei provini su cui sono stati eseguiti i test sono elencate nella Tabella 4.2 sottostante.

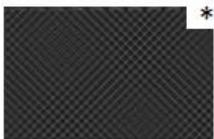
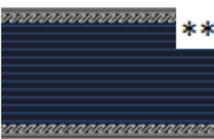
Test	Materiale	N° Provini	Riempimento	Altezza Layer	Sequenza Layer e Quantità di Fibra
Trazione	Onyx®	10	100%	0.1	 *
Trazione	Onyx® rinforzato con fibre di carbonio	9	100%	0.125	 ** 1 layer su 8
Trazione	Onyx® rinforzato con fibre di carbonio X, Y, 45°	9	100%	0.125	 ** 6 layers su 8
Compressione (modulo resistenza)	Onyx®	10 - 10	100%	0.1	 *
Compressione (modulo)	Onyx® rinforzato con fibre di carbonio X, Y, 45°	6	100%	0.125	 ** 24 layers su 32
Flessione	Onyx®	10	100%	0.1	 *
Flessione	Onyx® rinforzato con fibre di carbonio	10	100%	0.125	 ** 10 layers su 16

Tabella 4.2 - Caratteristiche di riempimento dei provini testati.

\* : nel caso di riempimento al 100% (rectangular fill) i layer sono sfasati uno ad uno di 45° rispetto al precedente.

\* \* : immagine che raffigura la disposizione delle fibre nelle zone interessate dai test. I layer di roof e floor hanno lo stesso pattern dei layer con riempimento al 100%.

È importante ricordare che la stampante Markforged X7 ha una precisione di  $\pm 0.1$  mm. Tale valore è minore delle tolleranze dimensionali richieste dalle norme consultate per questo progetto, quindi le dimensioni dei provini risultano tutte nei range richiesti.

#### 4.1.1 Test di trazione

I test di trazione sono stati condotti su una Galdabini Quasar 250 con sistema di afferraggio pneumatico. La programmazione delle prove e il monitoraggio dei risultati sono stati fatti tramite il software Labtest. La norma a cui si è fatto riferimento per i test è la ISO 527 [20, 21]. Tutti i test sono stati eseguiti in sala metrologica (20 °C, 50% umidità).

La velocità del test è stata mantenuta costante per tutti i provini, sia rinforzati che non, a 2 mm/min in accordo con la norma.

Di seguito la legenda dei risultati richiesti dall'utente e forniti dal software della macchina:

- Sezione (S) : indica la sezione minima resistente a trazione per ogni provino.
- $F_m$  : carico massimo rilevato dalla macchina durante il test.
- $R_m$  : tensione massima.
- $A_t$  : allungamento percentuale alla rottura del provino.
- $E$  : modulo elastico. Viene valutato direttamente dal software di elaborazione dati della macchina utilizzando la seguente formula:

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}$$

assumendo  $\varepsilon_1 = 0.0005$  e  $\varepsilon_2 = 0.0025$ , valori ricavati dalla norma ISO 527, ed essendo  $\sigma_1, \sigma_2$  i valori di tensione corrispondenti.

Una volta conclusosi il test, il software esegue un'analisi statistica dei dati relativi a tutta la

serie di provini.

Infine viene tracciato il grafico sforzo-deformazione per ogni provino testato. Le curve risultano traslate lungo l'asse delle ascisse solamente per facilitarne la consultazione.

#### 4.1.1.1 Provini Onyx®

I provini sono composti solamente da Onyx® con percentuale di riempimento pari al 100%. La geometria ad “osso di cane” consente un afferraggio facile da parte delle pinze sul provino. Non è stato utilizzato nessun altro tipo di supporto.

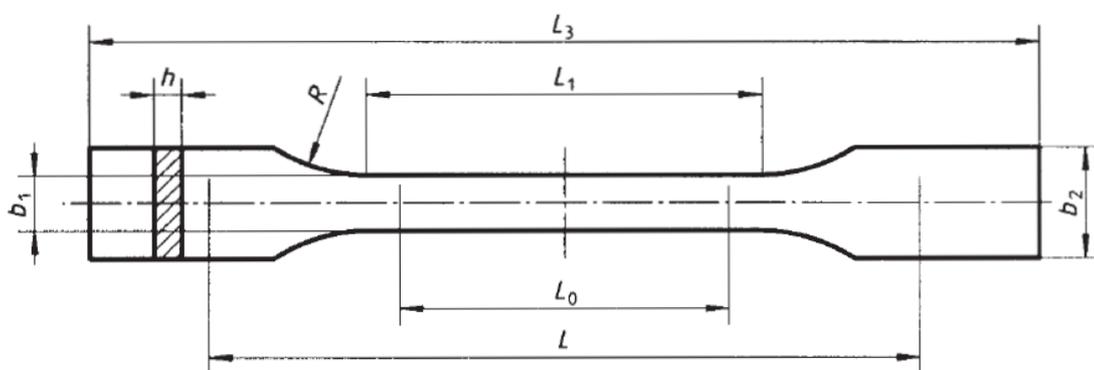


Figura 4.2 - Dimensioni di riferimento per provini 100% Onyx® senza rinforzo in riferimento alla norma ISO 527.

Le dimensioni adottate per i provini testati sono elencate nella Tabella 4.3. I parametri in essa elencati fanno riferimento alla raffigurazione schematica del provino in Figura 4.2.

Parametro	Unità di misura	Valore
$L_1$	mm	60
$L_3$	mm	170
$b_1$	mm	10
$b_2$	mm	20
R	mm	65
h	mm	4

Tabella 4.3 - Dimensioni dei provini di trazione senza fibre.

#### 4.1.1.2 Provini Onyx® rinforzati con fibre di carbonio

Agli estremi dei provini rinforzati con fibra vengono incollate delle placchette di protezione in modo da evitare qualsiasi danneggiamento da parte delle pinze di afferraggio della macchina.

Le “tabs” sono state realizzate anch’esse con la Markforged X7, utilizzando Onyx® e fibra di vetro in quanto la norma impone di utilizzare un materiale di rinforzo diverso da quello testato. Sono state stampate impostando una percentuale di riempimento pari al 100% e una disposizione delle fibre di vetro di tipo isotropico, alternando l’angolo di deposizione tra  $45^\circ$  e  $-45^\circ$ .

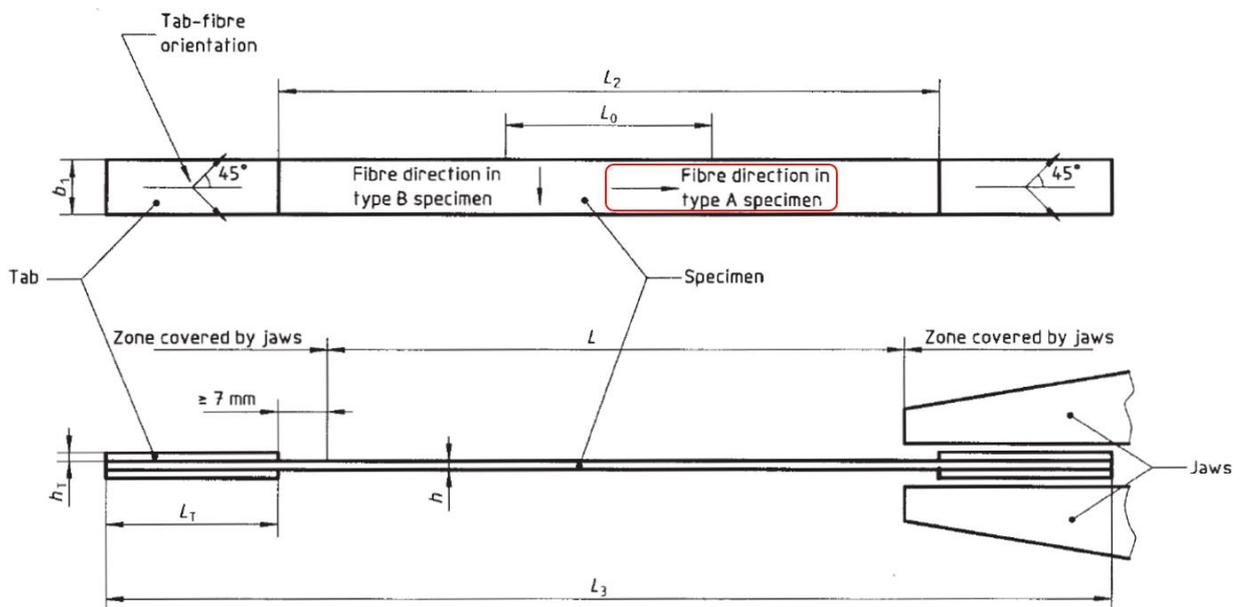


Figura 4.3 - Dimensioni di riferimento per provini rinforzati con fibre di carbonio in riferimento alla norma ISO 527 [21].

I test sono stati conseguiti su provini di tipo A (in riferimento alla Figura 4.3), ovvero provini rinforzati con fibra disposta lungo la direzione del carico. Nella Tabella 4.4 di seguito vengono elencate in dettaglio le dimensioni adottate per le placche di protezione ed i provini.

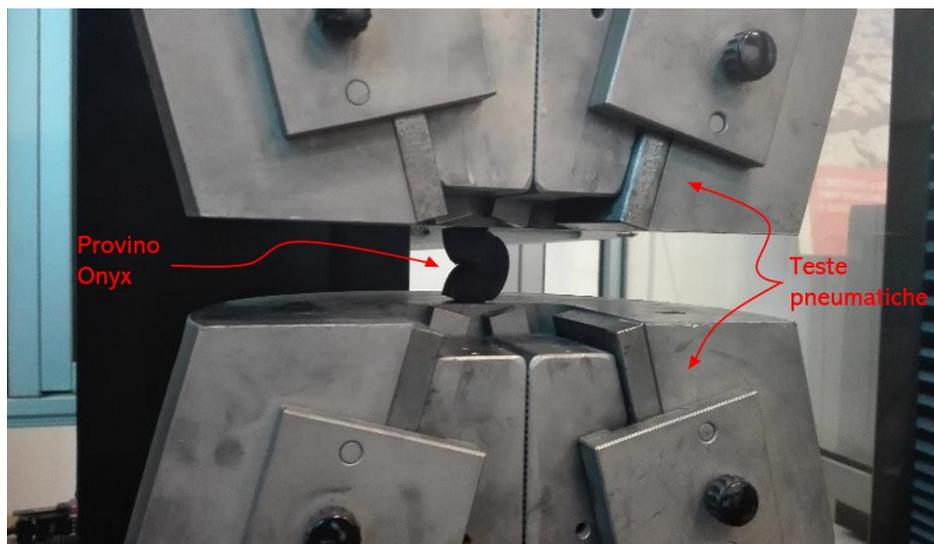
	Parametro	Unità di misura	Valore
Tabs	$L_T$	mm	50
	$h_T$	mm	1
Provini rinforzati	$b_1$	mm	15
	$L_2$	mm	150
	$L_3$	mm	250
	$h$	mm	1

Tabella 4.4 – Dimensioni dei provini di trazione rinforzati con fibre di carbonio.

#### 4.1.2 Test di compressione

I test di compressione sono stati condotti anch'essi sulla Galdabini Quasar 250 in sala metrologica, facendo però riferimento alla norma ISO 604 [22]. Anche in questo caso è stato utilizzato il software Labtest per la programmazione delle prove e il monitoraggio dei risultati. La velocità del test è stata mantenuta costante per tutti i provini a 1 mm/min in accordo con quanto dettato sulla norma.

I provini sono stati compressi sfruttando la parte piana delle due teste pneumatiche, come raffigurato in Figura 4.4. I provini sono stati posizionati in modo che la dimensione indicata con  $L$  in Figura 4.5 fosse perpendicolare al piano d'appoggio della testa e parallela alla direzione del carico.



*Figura 4.4 - Esempio dimostrativo di test di compressione. Il provino in figura non ha le dimensioni imposte dalla norma ISO 604.*

È importante sottolineare che per il calcolo del modulo e della resistenza vanno testate due tipologie di provini differenti (si faccia riferimento ai paragrafi corrispondenti per i dettagli sulle dimensioni).

La resistenza è stata calcolata solamente su provini non rinforzati, mentre il modulo è stato calcolato anche su provini rinforzati con fibre.

Di seguito la legenda dei risultati richiesti dall'utente e forniti dal software della macchina:

- Sezione (S) : indica la sezione minima resistente a compressione per ogni provino.
- $F_t$  : carico a rottura.
- $F_m$  : carico massimo rilevato dalla macchina durante il test.
- $R_m$  : tensione massima.
- $Def(F_t)$  : deformazione rilevata in corrispondenza del carico a rottura.
- $Def(F_m)$  : deformazione rilevata in corrispondenza del carico massimo.
- $E$  : modulo elastico. Il calcolo viene effettuato in modo analogo ai test di trazione (fare riferimento al paragrafo 4.1.1).

Anche in questo caso viene fornito il risultato dell'elaborazione statistica dei dati eseguita dal software e viene tracciato il grafico stress-deformazione.

#### 4.1.2.1 Provini Onyx®: resistenza a compressione

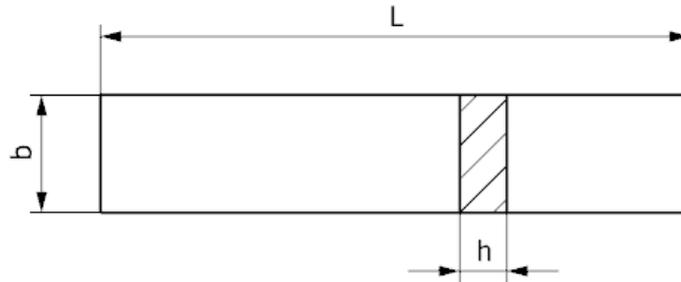


Figura 4.5 - Dimensioni di riferimento dei provini per i test di compressione.

Le dimensioni dei provini testati sono elencate nella Tabella 4.5 seguente in riferimento alla schematizzazione in Figura 4.5.

Parametro	Unità di misura	Valore
$L$	mm	10
$b$	mm	10
$h$	mm	2

Tabella 4.5 – Dimensioni dei provini atti al calcolo della resistenza a compressione.

Questo test è stato portato a termine al fine di conoscere solamente la resistenza del materiale a compressione.

#### 4.1.2.2 Provini Onyx®: modulo elastico

Le dimensioni dei provini non rinforzati utilizzati per valutare il modulo di elasticità sono elencate nella Tabella 4.6 seguente. I parametri della tabella fanno riferimento alla schematizzazione in Figura 4.5.

Parametro	Unità di misura	Valore
$L$	mm	50
$b$	mm	10
$h$	mm	2

Tabella 4.6 - Dimensioni dei provini atti al calcolo del modulo a compressione.

Dovendo valutare in questo caso solamente il modulo, il tratto d'interesse del grafico è quello compreso tra  $\varepsilon_1 = 0.0005$  e  $\varepsilon_2 = 0.0025$ . Gli altri risultati elencati e la restante parte di ogni curva devono essere considerati informazioni generali, non dati validi per la caratterizzazione del materiale.

#### 4.1.2.3 Provini Onyx® rinforzati con fibre di carbonio: modulo elastico

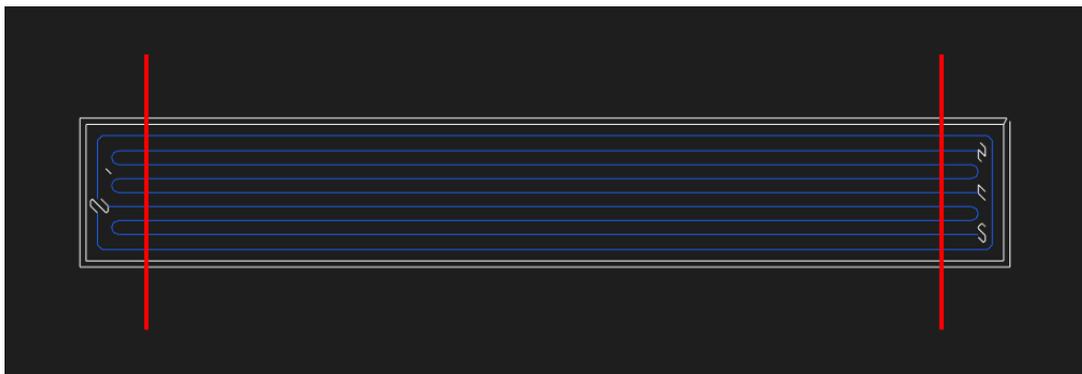


Figura 4.6 - Tagli su provini per ottenere unidirezionalità delle fibre.

I provini di compressione rinforzati sono stati stampati in tre direzioni diverse sul piano di lavoro (X, Y, 45° rispetto a X) e sovradimensionati di 10 mm per parte lungo la lunghezza rispetto a quanto imposto dalla norma. Prima di essere testati, sono stati tagliati con una sega circolare eliminando le due estremità. Come si può notare dall'illustrazione in Figura 4.6, in questo modo è stata eliminata la parte curva delle fibre, ottenendo una disposizione di fibre lineare e unidirezionale lungo la direzione del carico. Le superfici sezionate sono state poi trattate con della carta vetrata a grano molto fine in modo da renderle perfettamente piane. In seguito al processo di taglio sopra descritto le dimensioni dei provini rientrano nei range imposti dalla norma.

Facendo riferimento alla Figura 4.5, nella Tabella 4.7 sottostante sono elencate le dimensioni pre e post taglio dei provini testati.

Parametro	Unità di misura	Pre Taglio	Post Taglio
$L$	mm	70	50
$b$	mm	10	10
$h$	mm	4	4

Tabella 4.7 - Dimensioni dei provini rinforzati atti al calcolo del modulo a compressione.

### 4.1.3 Test di flessione a tre punti

I test di flessione sono stati condotti sulla Reicherter, macchina che normalmente viene utilizzata per valutare la curva caratteristica delle molle. Ha una precisione pari a  $\pm 50$  g e ha la possibilità di muovere manualmente la parte superiore, parte su cui è stato montato il componente che funge da punta di carico. Sulla parte inferiore, fissa, sono stati invece montati i supporti per sostenere il provino. Una raffigurazione del set up completo è illustrata in Figura 4.7.

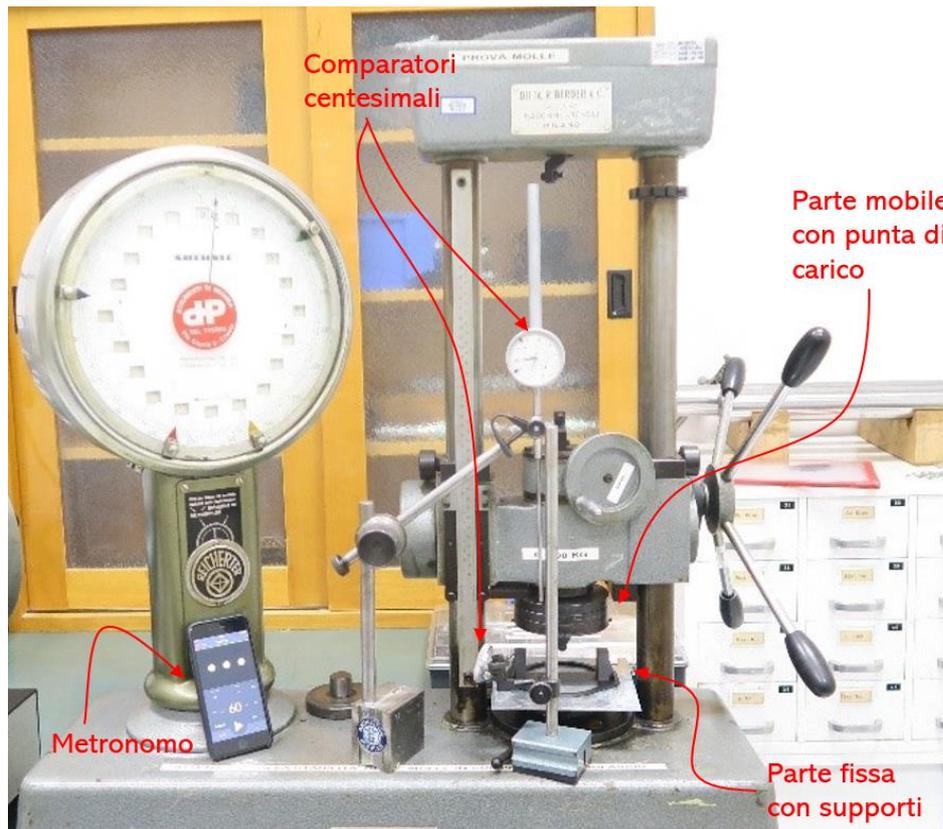


Figura 4.7 - Set up per i test di flessione.

I due componenti aggiuntivi utilizzati per i test, raffigurati in Figura 4.8, sono stati stampati in Onyx® con la Markforged X7, impostando la percentuale di riempimento a 100%. Il design dei componenti è stato realizzato in modo da garantire la massima rigidità possibile. Durante il test è stata misurata la deflessione massima dei supporti che non ha superato i 0.03 mm, valore considerato adeguato e non dannoso ai fini dei risultati ottenuti. È stato inoltre utilizzato, durante la fase di montaggio, un componente per centrare tra loro supporti e punta di carico.



Figura 4.8 - Tool utilizzato per test di flessione stampato in Onyx®.

Con l'utilizzo di un metronomo digitale e un comparatore montato sulla parte mobile della macchina, è stata raggiunta una velocità pari a 2 mm/min con tolleranza  $\pm 20\%$ , in accordo con le norme ISO 178 e ISO 1412 [23, 24]. Per tutte le prove si è scelto di adottare la configurazione a tre punti.

Il processo è stato interamente filmato. Ciò ha permesso la post-elaborazione dei dati andando a leggere il peso rilevato dalla macchina a step di 0.2 mm fino a raggiungere la deflessione target oppure la rottura del provino. Una volta ricavata la forza  $F$  impressa al provino è stato possibile calcolare la tensione flessionale corrispondente:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

con  $b$  = larghezza del provino in mm. Avendo a disposizione la progressione di deflessione, è stata calcolata la deformazione percentuale in corrispondenza di ogni step:

$$\varepsilon_f = \frac{600sh}{L^2} \%$$

con  $s$  = deflessione in mm.

Per determinare il modulo flessionale, è stato necessario calcolare le deflessioni  $S_1$  e  $S_2$  corrispondenti ai dati valori di deformazione flessionali  $\varepsilon_{f1} = 0.0005$  e  $\varepsilon_{f2} = 0.0025$  utilizzando la seguente equazione:

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} \quad (i = 1,2)$$

Individuate le tensioni flessionali  $\sigma_{f1}$  e  $\sigma_{f2}$  in corrispondenza delle deflessioni  $s_1$  e  $s_2$  rispettivamente, è stato infine calcolato il modulo flessionale:

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}$$

È stato possibile quindi tracciare sia il grafico tensione-deformazione, sia l'andamento del modulo flessionale.

#### 4.1.3.1 Provini Onyx®

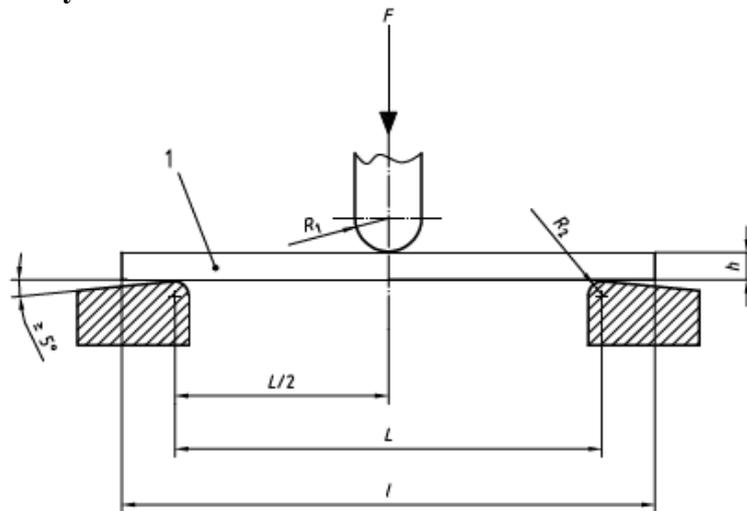


Figura 4.9 - Dimensioni di riferimento dei provini per test di flessione (ISO 178) [23].

Facendo riferimento alla Figura 4.9 soprastante tratta dalla norma ISO 178, nella Tabella 4.8 vengono elencate le dimensioni adottate per i provini e per i due componenti che vanno a comporre il tool utilizzato per i test.

	Parametro	Unità di misura	Valore	Condizione
Provino	$l$	mm	80	
	<i>Larghezza</i>	mm	10	$3 < h < 5mm$
	$h$	mm	4	
Supporti inferiori	$R_2$	mm	5	$h > 3mm$
	$L$	mm	70	
Punta di carico	$R_1$	mm	5	

Tabella 4.8 - Dimensioni dei provini a flessione.

#### 4.1.3.2 Provini Onyx® rinforzati con fibre di carbonio

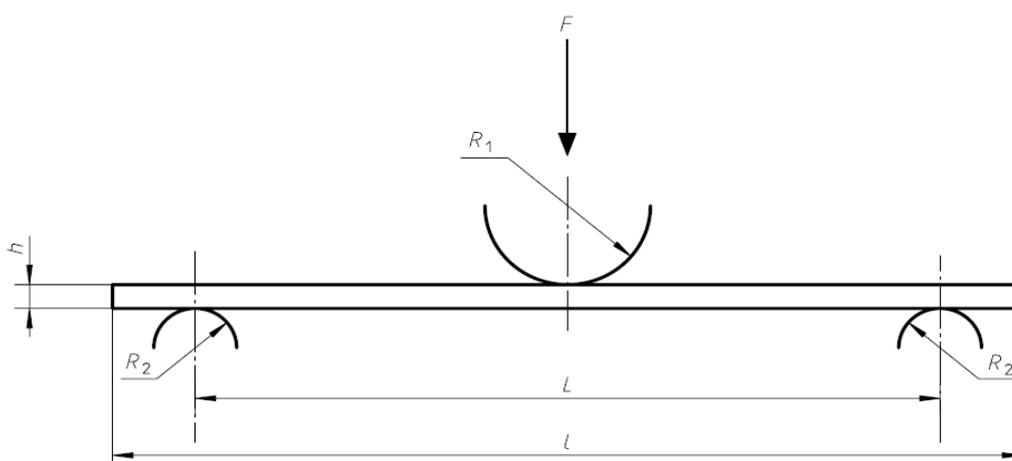


Figura 4.10 - Dimensioni di riferimento per test di flessione (ISO 14125) [24].

I test di flessione di provini rinforzati con fibre seguono la norma ISO 14125. Il raggio della punta di carico è fissata a prescindere da qualsiasi altro parametro, invece la dimensione dei supporti dipende dallo spessore dei provini da testare.

La scelta delle dimensioni dei provini, elencate in Tabella 4.9 facendo riferimento alla Figura 4.10, viene guidata dalla norma, la quale propone quattro classi differenti di materiale che si distinguono per la direzione di deposizione e la resistenza prevista della fibra.

Nel caso di Onyx® rinforzato con fibre di carbonio depositate unidirezionalmente, la classe più adeguata è la quarta. Per questa classe la normativa impone le seguenti dimensioni di provino e le conseguenti dimensioni dei supporti da utilizzare:

	Parametro	Unità di misura	Valore	Condizione
Provino	$l$	mm	100	
	<i>Larghezza</i>	mm	15	
	$h$	mm	2	
Supporti inferiori	$R_2$	mm	5	$h \leq 3mm$
	$L$	mm	80	
Punta di carico	$R_1$	mm	5	

Tabella 4.9 - Dimensioni dei provini rinforzati a flessione.

## 4.2 Risultati

### 4.2.1 Risultati delle prove di trazione

	Codice Provino	Sezione (S) (mm <sup>2</sup> )	Fm (N)	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	At (%)	E (N/mm <sup>2</sup> )	v
1	1	41.00	1552.5	37.87	25.50	803.72	0.58
2	2	42.00	1527.5	36.37	30.68	624.95	0.58
3	3	41.00	1605.0	39.15	37.09	771.21	0.58
4	4	42.00	1438.8	34.26	30.73	583.45	0.58
5	5	41.00	1580.0	38.54	30.20	675.25	0.58
6	6	41.00	1521.3	37.10	31.13	622.34	0.58
7	7	40.50	1651.3	40.77	35.06	724.62	0.58
8	8	42.00	1357.5	32.32	37.07	436.96	0.58
9	9	41.50	1505.0	36.27	30.34	736.12	0.58
10	10	41.00	1502.5	36.65	28.26	705.04	0.58
xm			1524.1	36.93	31.61	668.37	0.58
N. di prove			10	10	10	10	10
Dev. Stah.			83.4	2.41	3.74	106.88	0.00
Coeff. Var.			0.055	0.065	0.118	0.160	0.000
Lim. Inf. 95%			1464.6	35.21	28.93	591.98	0.58
Lim. Sup. 95%			1583.7	38.65	34.28	744.75	0.58
op							
cpk							
Minimo			1357.5	32.32	25.50	436.96	0.58
Massimo			1651.3	40.77	37.09	803.72	0.58

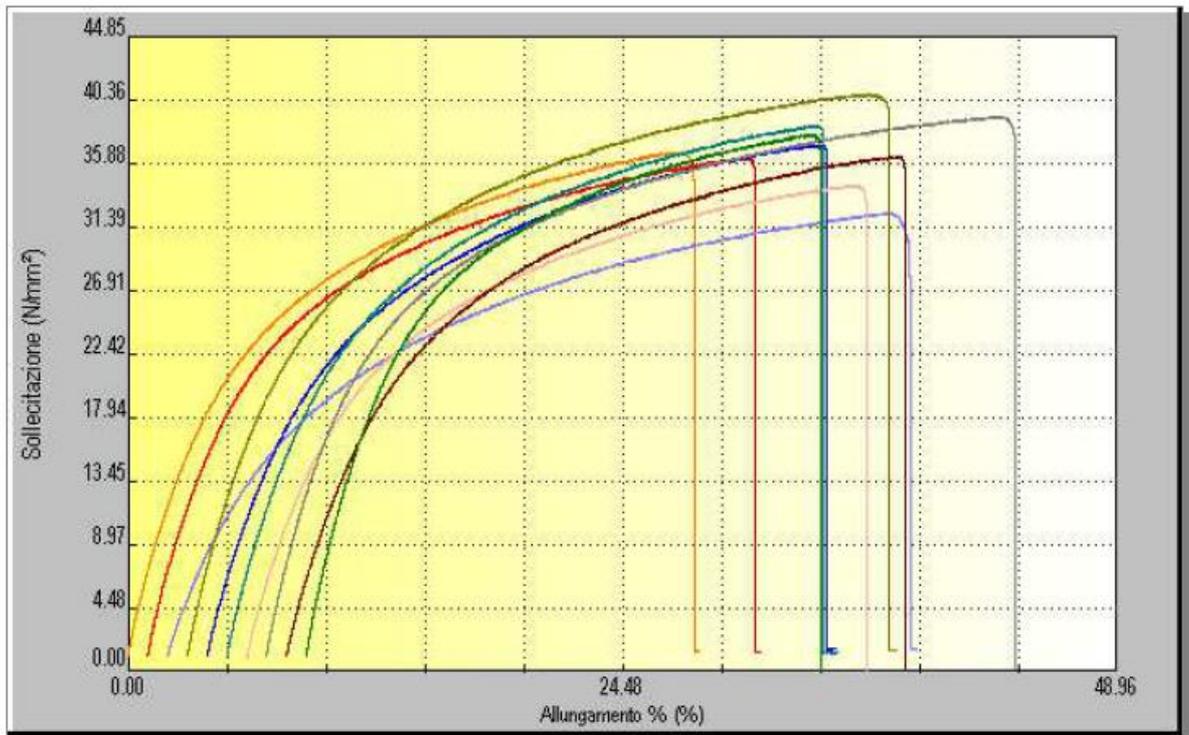


Figura 4.11 - Risultati prove trazione di provini non rinforzati.

	Codice Provino	Sezione (S) (mm <sup>2</sup> )	Fm (N)	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	At (%)	E (N/mm <sup>2</sup> )	v
1	T1F001	15.16	1218.8	80.39	1.59	5145.61	0.58
2	T1F002	14.95	1740.0	116.39	1.97	5930.54	0.58
3	T1F003	14.49	1670.0	115.28	1.95	5803.41	0.58
4	T1F004	15.62	1756.3	112.43	2.00	5430.85	0.58
5	T1F005	16.18	1753.8	108.40	1.97	5345.46	0.58
6	T1F006	15.85	1488.8	93.90	1.76	5288.08	0.58
7	T1F007	15.75	1333.8	84.68	1.55	5339.75	0.58
8	T1F008	16.39	1247.5	76.11	1.47	5277.39	0.58
9	T1F009	15.75	1433.8	91.03	1.65	5549.31	0.58
			1515.9	97.62	1.77	5456.71	0.58
	N. di prove		9	9	9	9	9
	Dev. Stdn.		220.6	15.75	0.21	259.18	0.00
	Coeff. Var.		0.146	0.161	0.118	0.047	0.000
	Lim. Inf. 95%		1346.0	85.50	1.61	5257.14	0.58
	Lim. Sup. 95%		1685.7	109.75	1.93	5656.28	0.58



Figura 4.12 - Risultati prove trazione di provini rinforzati con un solo layer di fibre.

	Codice Provino	Sezione (S) (mm <sup>2</sup> )	Fm (N)	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	At (%)	E (N/mm <sup>2</sup> )	v
1	TFX001	15.32	8162.5	532.79	2.65	15735.81	0.58
2	TFX002	15.72	8623.8	548.42	2.74	16541.54	0.58
3	TFX003	15.45	8662.5	560.68	2.77	17993.08	0.58
4	TFZ001	15.91	8695.0	546.60	2.71	15379.27	0.58
5	TFZ002	15.67	7732.5	493.37	2.55	14175.03	0.58
6	TFZ003	16.14	8580.0	531.74	2.87	15244.15	0.58
7	TF45001	15.47	8246.3	533.03	2.60	18117.39	0.58
8	TF45002	15.85	8763.8	552.74	2.74	15098.28	0.58
9	TF45003	16.06	8635.0	537.65	2.63	15355.74	0.58
.xm			8455.7	537.45	2.70	15960.03	0.58
N. di prove			9	9	9	9	9
Dev. Stdn.			339.8	19.35	0.10	1337.89	0.00
Coeff. Var.			0.040	0.036	0.036	0.084	0.000
Lim. Inf. 95%			8194.1	522.55	2.62	14929.85	0.58
Lim. Sup. 95%			8717.3	552.34	2.77	16990.21	0.58

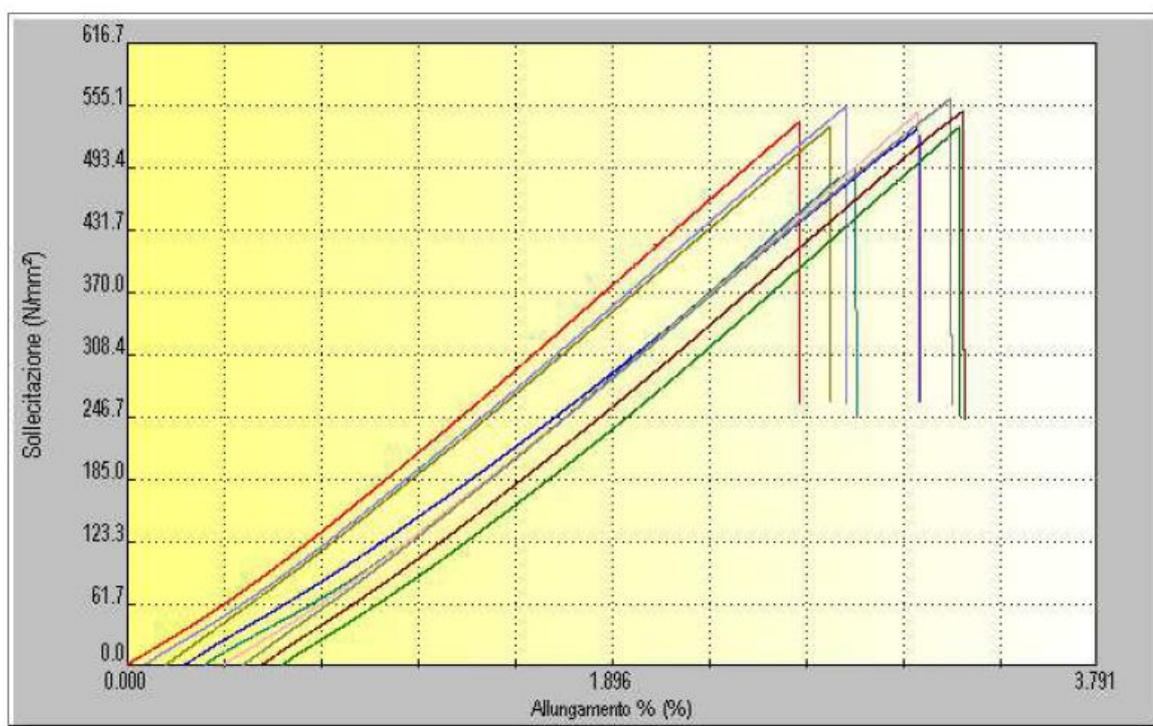


Figura 4.13 - Risultati prove trazione di provini rinforzati stampati lungo tre direzioni differenti.

Analizzando i risultati ed i grafici stress-strain si può notare come le prestazioni dei provini rinforzati sono di gran lunga superiori rispetto ai provini in Onyx®, sotto ogni punto di vista.

I provini composti solamente da Onyx® hanno avuto un comportamento estremamente duttile: osservando le curve stress-strain nel grafico illustrato in Figura 4.11 si può osservare come esse perdano dopo poco linearità, plasticizzando continuamente fino a rompersi. Il carico è un'ordine di grandezza in meno rispetto ai provini rinforzati. Al contrario, la

percentuale di allungamento a rottura è risultata essere dieci volte superiore rispetto ai provini con fibra.

La fibra di carbonio essendo molto rigida, conferisce un comportamento fragile al materiale, infatti la percentuale di allungamento a rottura è bassa. Il carico a rottura è elevato, paragonabile ad una lega di alluminio ad alte prestazioni.

Le curve dei provini rinforzati, presentate in Figura 4.13, presentano una linearità pressoché costante, ad eccezione del primo tratto. Numerose ipotesi sono state fatte per giustificare questo andamento, il quale è stato infine attribuito a due fattori: incollaggio tabs-provini e assestamento sotto carico di fibre e matrice polimerica. È necessaria comunque un'analisi più approfondita che verrà eseguita in futuro.

I provini rinforzati con un solo layer di fibra presentano lo stesso comportamento dei provini rinforzati, come si può notare dal grafico in Figura 4.12, quindi la componente fibra di carbonio prevale sulla componente Onyx®. Nonostante ciò non viene mantenuta una proporzionalità, soprattutto nel caso del modulo elastico il quale risulta inferiore rispetto alle previsioni considerando il caso con più layer di rinforzo. Si possono fare varie ipotesi per giustificare tale comportamento, ad esempio lo scorrimento relativo tra i vari layer di carbonio, oppure la non perfetta adesione tra layer rinforzato e layer composto solamente da Onyx®. Bisogna tener conto inoltre del fatto che il modulo elastico, come da norma, deve essere ricavato dal primo tratto della curva, tratto, come accennato in precedenza, affetto da fenomeni non direttamente imputabili al comportamento del materiale.

## 4.2.2 Risultati delle prove di compressione

	Codice Provino	Sezione (S) (mm <sup>2</sup> )	Ft (N)	Fm (N)	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Def(Ft) (μm)	Def(Fm) (μm)	Defl Max (μm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	Def%(Fm) (%)
1	1	40.30	59081.3	59081.3	1466.04	9845.89	9845.89			98.46
2	2	40.00	68361.3	68361.3	1709.03	9828.25	9828.00		216.92	98.28
3	3	39.70	68942.5	68942.5	1736.78	9805.91	9805.66		209.78	98.06
4	4	40.58	84798.8	84798.8	2089.62	9807.25	9807.25		223.05	98.07
5	5	40.44	72407.5	72407.5	1790.60	9808.35	9808.11		170.55	98.08
6	6	39.70	78452.5	78452.5	1976.36	9811.40	9811.40		119.17	98.11
7	7	40.20	80178.8	80178.8	1994.60	9807.56	9807.56		286.84	98.08
8	8	40.20	75565.0	75565.0	1879.82	9806.27	9806.27		197.22	98.06
9	9	40.19	63337.5	63337.5	1575.80	9804.87	9804.87		189.91	98.05
10	10	40.30	79426.3	79426.3	1971.00	9799.62	9799.62		215.72	98.00
xm			73055.1	73055.1	1818.97	9812.54	9812.46		203.24	98.13
N. di prove			10	10	10	10	10		9	10
Dev. Stab.			8122.3	8122.3	199.73	13.90	13.89		44.89	0.14
Coeff. Var.			0.111	0.111	0.110	0.001	0.001		0.221	0.001
Lim. Inf. 95%			67250.3	67250.3	1676.22	9802.60	9802.53		168.68	98.03
Lim. Sup. 95%			78860.0	78860.0	1961.71	9822.47	9822.39		237.80	98.22
cp										
cpk										
Minimo			59081.3	59081.3	1466.04	9799.62	9799.62		119.17	98.00
Massimo			84798.8	84798.8	2089.62	9845.89	9845.89		286.84	98.46

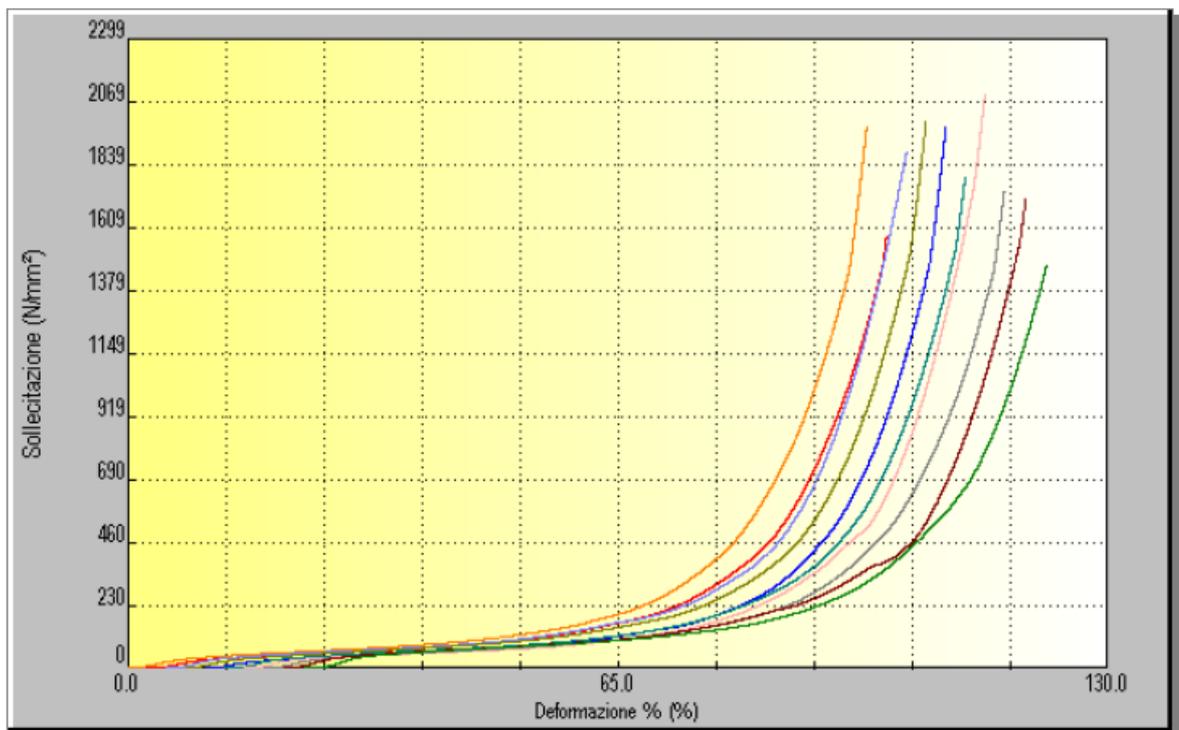


Figura 4.14 - Risultati prove di compressione su provini atti al calcolo della resistenza.

	Codice Provino	Sezione (S) (mm <sup>2</sup> )	Ft (N)	Fm (N)	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Def(Ft) (μm)	Def(Fm) (μm)	Def1 Max (μm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	Def%(Fm) (%)	
1	1	40.10	221.3	442.5	11.04	1582.34	1016.97		489.81	2.03	
2	2	40.70	208.8	417.5	10.26	1325.32	991.21		407.34	1.98	
3	3	41.20	215.0	431.3	10.47	1302.43	881.59	0.12	568.58	1.76	
4	4	40.40	270.0	540.0	13.37	1501.89	952.21		658.10	1.90	
5	5	41.00	233.8	468.8	11.43	1246.40	931.46		603.72	1.86	
6	6	41.20	232.5	466.3	11.32	1276.67	892.21		591.68	1.78	
7	7	40.79	202.5	406.3	9.96	1486.82	967.83		325.25	1.94	
8	8	40.96	221.3	445.0	10.86	1574.89	959.66		322.46	1.92	
9	9	41.20	191.3	383.8	9.31	1354.13	907.41		468.41	1.81	
10	10	40.00	181.3	365.0	9.13	1403.75	906.13		320.64	1.81	
xm			217.8	436.6	10.71	1405.46	940.67	0.12	475.60	1.88	
N. di prove			10	10	10	10	10		10	10	
Dev. Stab.			24.9	49.4	1.22	123.59	44.51		127.73	0.09	
Coeff. Var.			0.114	0.113	0.114	0.088	0.047		0.269	0.048	
Lim. Inf. 95%			200.0	401.4	9.84	1317.14	908.86		384.32	1.81	
Lim. Sup. 95%			235.6	471.9	11.59	1493.79	972.48		566.88	1.94	
cp											
cpk											
Minimo				181.3	365.0	9.13	1246.40	881.59	0.12	320.64	1.76
Massimo				270.0	540.0	13.37	1582.34	1016.97	0.12	658.10	2.03

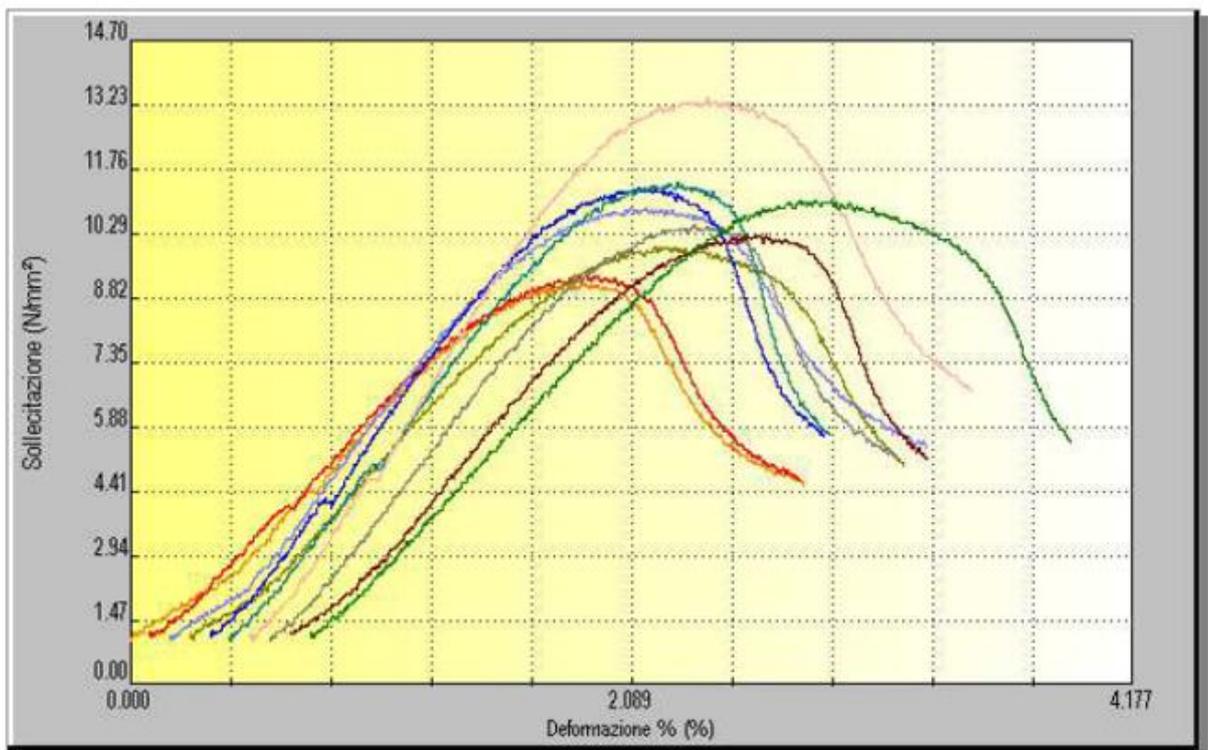


Figura 4.15 - Risultati prove compressione modulo su provini non rinforzati.

	Codice Provino	Sezione (S) (mm <sup>2</sup> )	Ft (N)	Fm (N)	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Def(Ft) (µm)	Def(Fm) (µm)	Def1 Max (µm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	Def%(Fm) (%)
1	CFZ001	39.86	3420.0	7003.8	175.71	435.55	430.36		507.05	4.30
2	CFZ002	40.48	3242.5	5827.5	143.96	666.08	338.20		1492.58	3.38
3	CF45001	41.55	3161.3	5976.3	143.83	434.45	349.18		1551.25	3.49
4	CF45002	41.69	3482.5	6966.3	167.08	831.48	417.91		1398.26	4.18
5	CFX001	40.90	4311.3	7352.5	179.75	555.18	450.62		755.06	4.51
6	CFX002	41.25	4905.0	7583.8	183.86	518.19	411.25		1812.54	4.11
x <sub>m</sub>			3753.8	6785.0	165.70	573.49	399.59		1252.79	4.00
N. di prove			6	6	6	6	6		6	6
Dev. Stdn.			697.6	722.7	17.78	152.90	45.46		506.94	0.46
Coeff. Var.			0.186	0.107	0.107	0.267	0.114		0.405	0.114
Lim. Inf. 95%			3021.8	6026.7	147.05	413.07	351.89		720.91	3.52
Lim. Sup. 95%			4485.7	7543.3	184.35	733.91	447.28		1784.67	4.47



Figura 4.16 - Risultati prove compressione di provini rinforzati con fibre di carbonio.

Facendo riferimento ai risultati dei test atti a calcolare il modulo del materiale a compressione, si può notare come le fibre di carbonio aumentino le proprietà meccaniche dei provini: il modulo risulta tre volte superiore nel caso di provini rinforzati e la resistenza a rottura risulta due volte superiore.

Nel caso di provini rinforzati le curve, illustrate in Figura 4.16, sono caratterizzate da un andamento crescente pressoché lineare fino a raggiungere un certo valore dopo il quale un evento fragile fa crollare il carico. Nel caso di provini stampati solamente con Onyx®, il

materiale è risultato più duttile, deformandosi plasticamente in modo importante fin da subito. Questo andamento può essere osservato dalle curve caratteristiche risultate dai test raffigurate in Figura 4.15.

Osservando le curve dei provini per modulo senza fibre (Figura 4.14) si possono notare dei tratti brevi ripetuti non lineari, attribuiti alla planarità non perfetta delle superfici dei provini in contatto con le teste pneumatiche della macchina.

Nel caso di provini per il calcolo della resistenza si ha un esempio eclatante di deformazione plastica. Il provino subisce una continua plasticizzazione fino ad avere una forma che non è più vagamente parente della forma iniziale, tutto ciò senza presentare una vera e propria rottura. Non è possibile soffermarsi sui valori calcolati dal software, i quali si basano sul calcolo della superficie compressa, ma si può solamente discutere l'elevata deformazione plastica. Il provino si va a deformare completamente e la prova viene interrotta per evitare che le piastre di acciaio vadano in contatto. Tutti i test sono stati interrotti al raggiungimento del 98% di deformazione del provino.

### 4.2.3 Risultati delle prove di flessione

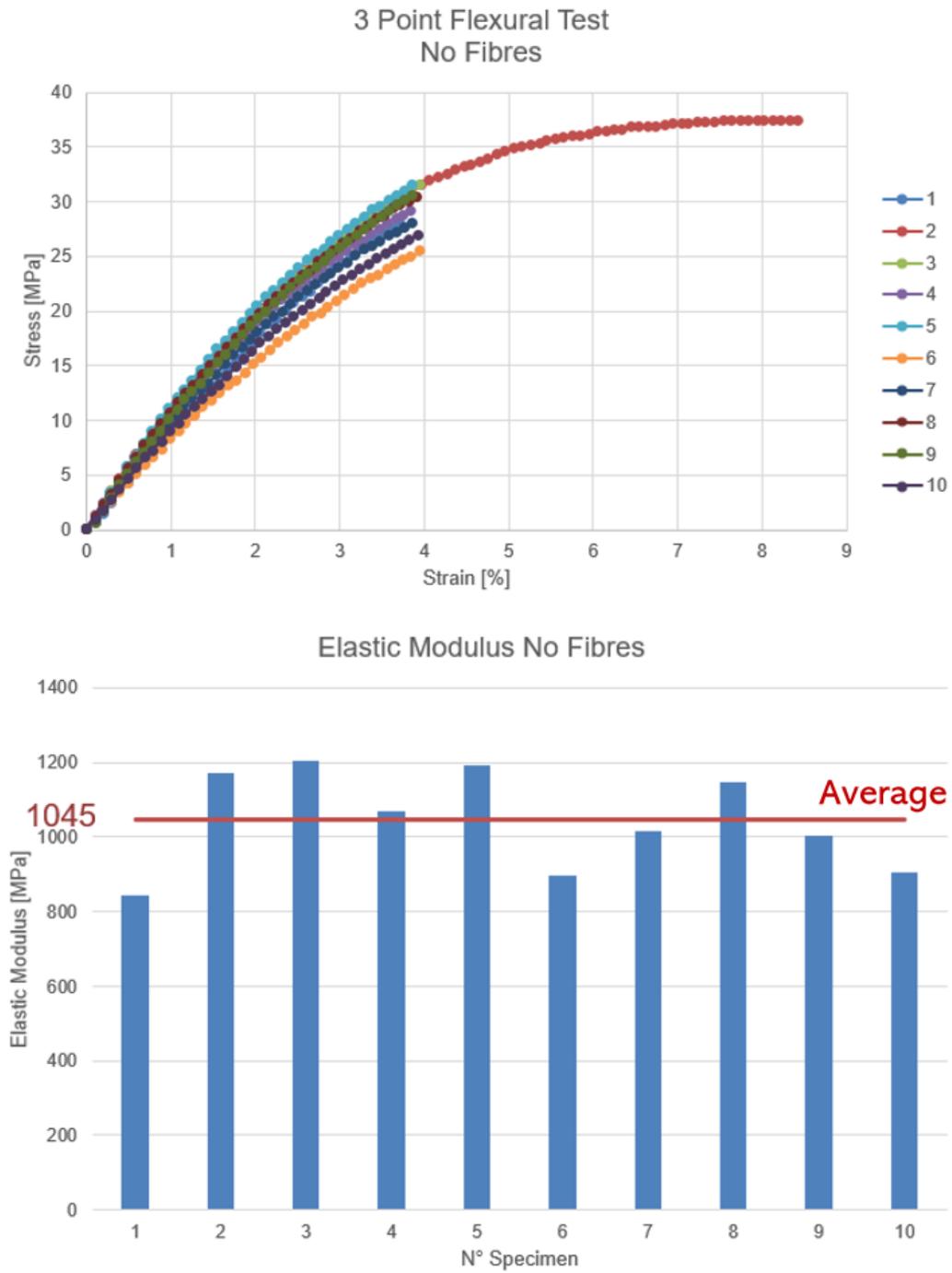


Figura 4.17 - Sopra: Grafico tensione-deformazione risultato dai test di flessione su provini Onyx®. Sotto: Andamento dei moduli elastici risultati dai test di flessione su provini non rinforzati.

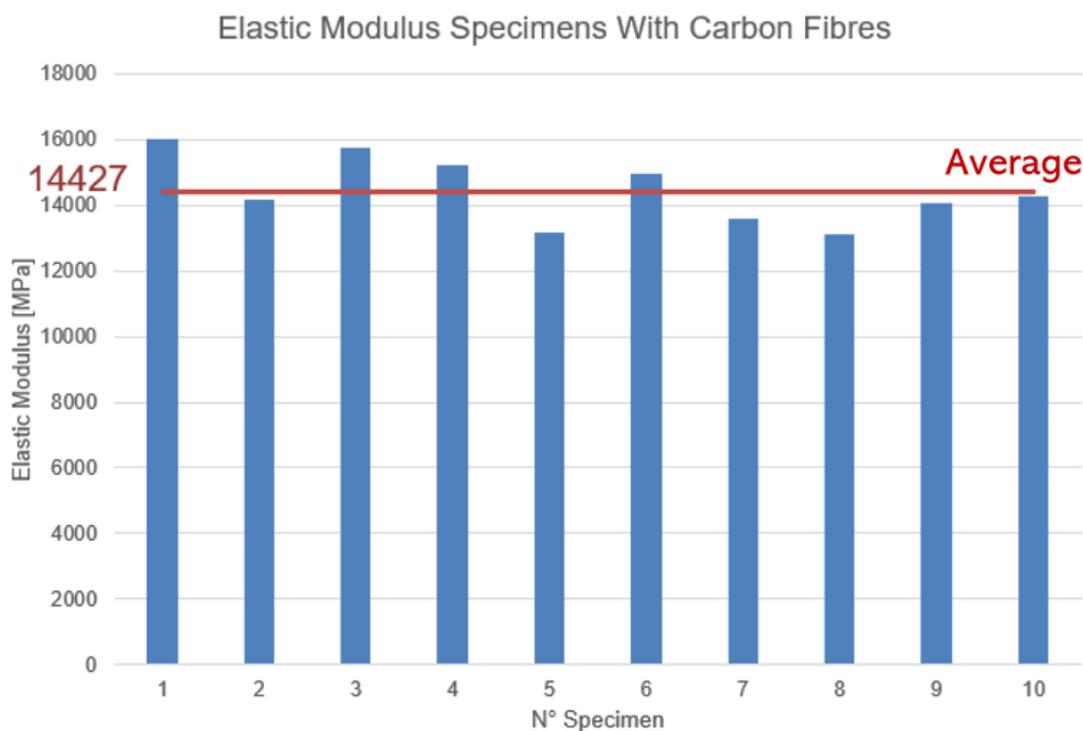
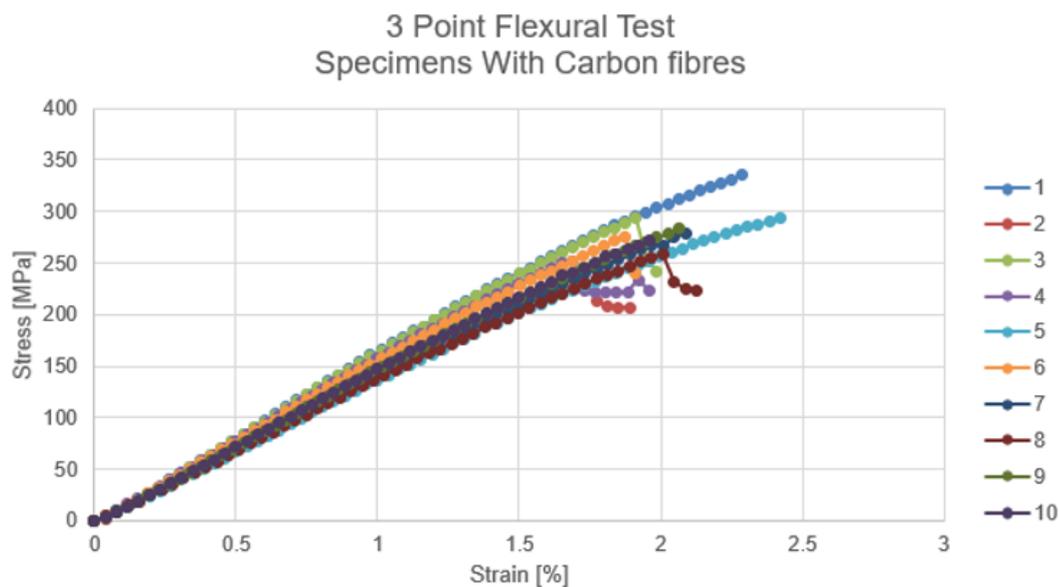


Figura 4.18 - Sopra: Grafico tensione-deformazione risultato dai test di flessione su provini rinforzati con fibre di carbonio. Sotto: Andamento dei moduli elastici risultati dai test di flessione su provini rinforzati con fibre di carbonio.

I provini composti solamente da Onyx® non hanno raggiunto la rottura, bensì si sono deformati fino a raggiungere un moto rigido, scorrendo lungo i due supporti. Ciò è descritto dalla curva numero 2 nel grafico di Figura 4.17, in cui si può notare come dopo un certo

valore di spostamento sia presente un “plateau” della forza applicata, tratto durante il quale il provino stava traslando.

Essendo a conoscenza della possibile presenza del fenomeno appena descritto, i test sono stati interrotti in corrispondenza di uno spostamento pari a 8 mm, spostamento ampiamente sufficiente a ricavare tutti i dati necessari alla caratterizzazione.

Anche in questo caso, come i precedenti test di trazione e compressione, si ha una continua deformazione plastica.

Nel caso di provini rinforzati con fibra, si raggiungono carichi di un ordine di grandezza superiore rispetto al caso senza fibre con deformazioni percentuale dimezzate. Osservando l'andamento delle curve (Figura 4.18) si può osservare come alcuni provini abbiano subito un primo cedimento prima di raggiungere la rottura vera e propria.

In ogni caso, tutti provini rinforzati hanno sempre raggiunto la rottura fragile, come ci si poteva aspettare.

Nonostante il numero maggiore di layer rinforzati, si ha un modulo elastico ed una resistenza in proporzione inferiore rispetto al caso di trazione. Risultato prevedibile, in quanto le fibre di carbonio hanno un comportamento più performante in trazione rispetto a qualsiasi altra direzione di carico.

Accade invece il contrario osservando i valori ottenuti dalle prove eseguite su provini composti solamente da Onyx®. Il modulo elastico è risultato infatti maggiore durante i test di flessione. Ciò può essere attribuito oltre che all'anisotropia del materiale, al pattern di disposizione del materiale lungo i layer che compongono i provini: ogni layer infatti è depositato sfasato di 90° rispetto al precedente. La geometria interna risultante potrebbe quindi favorire il comportamento a flessione rispetto a quello a trazione.

È importante sottolineare che questi risultati non sono direttamente comparabili a quelli ottenuti dalle le prove di trazione su provini rinforzati a causa della differente densità di fibra di carbonio per millimetro di spessore. Nonostante ciò, si può affermare dai dati rilevati che il materiale ha un ottimo comportamento a flessione.

#### 4.2.4 Confronto dei risultati con i valori proposti da Markforged

	Unità di misura	Markforged Onyx®	Wartsila Onyx®	Markforged Fibre di carbonio	Wartsila Fibre di carbonio
Modulo elastico trazione	MPa	1400	666	60000	15960
Resistenza a trazione (rottura)	MPa	30	37	800	537
Modulo elastico compressione	MPa	/	476	54	1253
Resistenza a compressione (rottura)	MPa	/	/	320	/
Modulo elastico flessione	MPa	2900	1045	51000	14427
Resistenza a flessione (rottura)	MPa	81	/	470	277

Figura 4.19 - Confronto tra valori elencati nel datasheet Markforged e valori ottenuti dalla caratterizzazione materiale.

Importante ricordare che Markforged ha basato i propri test su norme ASTM, diverse dalle ISO adottate per la caratterizzazione interna del materiale.

Come accennato in precedenza, non è stato possibile stimare la resistenza flessionale nel caso di provini composti solamente da Onyx® in quanto essi non hanno mai raggiunto il punto di rottura. Lo stesso vale per la resistenza a compressione.

I test per il calcolo della resistenza a compressione nel caso di provini rinforzati non è stato effettuato in quanto la norma impone delle dimensioni ristrette sui provini. Non è stato quindi ritenuto prioritario eseguire il test, che verrà proposto per analisi future.

Come citato nel datasheet Markforged in Figura 2.6, i provini da loro utilizzati sono stati modellati e rinforzati con fibre di carbonio al fine di massimizzare le performance dei test, cercando di ottenere valori più alti possibili. La caratterizzazione da noi eseguita ha invece l'obiettivo di comprendere il comportamento effettivo del materiale ed i provini da noi testati risultano di conseguenza diversi e meno performanti. Ciò spiega la disparità tra i valori messi a confronto nella Tabella 4.10.

## 5 Fem e redesign

La stampa 3D applicata ai polimeri rinforzati con fibra è una tecnologia di produzione piuttosto nuova ed inesplorata, anche dal punto di vista delle simulazioni ad elementi finiti [25, 26]. Se molto si sta facendo a livello accademico, da un punto di vista industriale non è stata trovata in fase di pre-analisi una modellazione adatta alla validazione del design di componenti prodotti con questo metodo.

In particolare, l'aspetto più critico riscontrato durante la scelta del modello FEM da utilizzare per le analisi è la struttura interna generata dalla stampa 3D, la quale ha un comportamento ben lontano dall'isotropia. La disposizione del polimero e la geometria di riempimento scelta, assieme alla complessa disposizione delle fibre di carbonio, sono i fattori principali che influenzano il comportamento del materiale [27, 28]. Non è stato trovato alcun modello di materiale che fosse adatto allo scopo, considerando la natura industriale e non accademica del progetto.

Per questi motivi, è stato adottato un modello semplificato, validato poi dall'azienda di certificazione Bureau Veritas che ci ha seguiti durante tutto il percorso di certificazione.

Le ipotesi principali riguardanti le proprietà del materiale sono:

- La struttura interna calcolata è riempita al 100%: non è stata considerata né la struttura reticolare né la presenza del filamento di fibra di carbonio. È da ricordare che la geometria della struttura adottata per fibre di carbonio e matrice polimerica non è disponibile nel modello CAD. Di conseguenza il riempimento al 100% è l'unica opzione "semplice" ottenibile da modello CAD realizzato con NX.
- Il comportamento del materiale è considerato isotropo, con due proprietà elastiche definite (modulo di Young e coefficiente di Poisson).

Tutte le analisi, eseguite col software Siemens NX utilizzando il modulo di simulazione FEM, sono poi state validate da un test sperimentale sul tool.

Per determinare un modulo elastico medio che descriva l'interezza della struttura complessa si è partiti dai test di trazione, compressione e flessione su provini rinforzati e non, i quali

hanno permesso di definire un range di valori da cui partire. In seguito ad una prima modifica del design e ad analisi preliminari, è stato portato a termine un test sul lifting tool equipaggiato con degli estensimetri atto ad individuare un unico modulo elastico e a valutare la deformazione delle zone interessate.

Sono state fatte ulteriori analisi e modifiche al design a seguito di un collasso inaspettato del tool ad un carico ancora inferiore a quello target.

Si è giunti infine al modello definitivo, il quale è stato testato e poi certificato.

È stato deciso inoltre di impostare inizialmente il modello senza l'aggiunta delle viti M8 a 180° e 120° per velocizzare la fase di pre-settaggio del test. Una volta giunti al modello finale, si sono andate a confrontare entrambe le configurazioni, sia sperimentalmente che virtualmente.

Il lifting tool nonostante ciò viene verificato in completa sicurezza in quanto in un primo momento sono state sovraccaricate le spine, in un secondo momento verrà sovraccaricato tutto il sistema di aggancio alla piastra di acciaio.

È importante sottolineare che le analisi riportate hanno lo scopo di simulare il test sperimentale più che il sollevamento del sistema camicia-pistone-biella. È da tener presente che comunque i test portati a termine sono una buona approssimazione del sollevamento vero e proprio.

## **5.1 Modello**

Come accennato in precedenza, nonostante la forte anisotropia dei componenti stampati in 3D, il materiale è stato considerato isotropo. La geometria della matrice polimerica e la disposizione di fibre non sono stati presi in considerazione in quanto sul software non è disponibile alcuna funzione “ad hoc” per simulare delle strutture di questo tipo. La struttura interna dei componenti è assunta e simulata piena.

Si ricorda che il design è stato semplificato. In particolare le viti sono state descritte come cilindri aventi lo stesso diametro del loro foro.

Nell' analisi è stata utilizzata la mesh 3D tetraedrica con elementi tetra(10) aventi le seguenti dimensioni, riportate inoltre in Figura 5.1:

- Viti M4, M8: 1 mm
- Spine cilindriche aventi diametro pari a 10 mm: 2 mm
- Altri componenti del tool: 3 mm

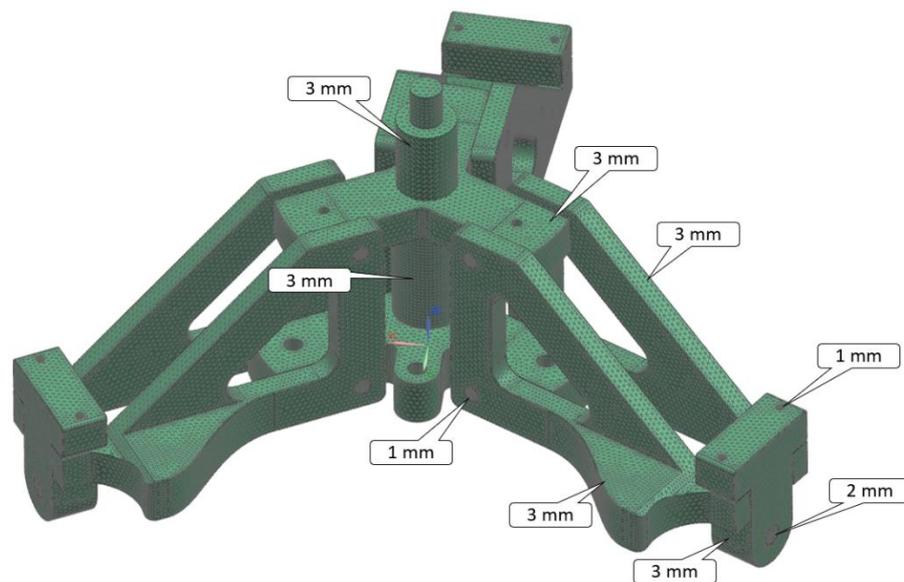


Figura 5.1 - Mesh applicata al Lifting Tool per le analisi FEM.

Tutti gli elementi in acciaio sono stati descritti con il materiale acciaio standard tratto dalla libreria del software NX.

I contatti tra i differenti corpi sono stati assunti come “Surface to surface gluing” [29], ovvero contatti lineari. Solamente in seguito verranno presi in considerazione alcuni contatti non lineari in precisi punti critici.

Il vincolo (tutti i gradi di libertà bloccati) è stato applicato ad un solo nodo. Ad esso sono state vincolate diverse connessione RBE2: in principio le connessioni RBE2 interesseranno le connessioni tra spine cilindriche e nodo centrale, in seguito verranno prese in considerazione anche le viti M8 corrispondenti alle configurazioni di aggancio al pistone a 120° e a 180°.

Le spine e le viti collegate al nodo vincolato simulano la connessione tra tool e piastra d'acciaio nel test sperimentale (test che verrà descritto in seguito).

Per quanto riguarda il carico, è stata seguita una “guide line” proposta dall'azienda di certificazione Bureau Veritas basata sulla direttiva macchine: per certificare l'attrezzo è necessario rispettare un coefficiente di sicurezza almeno pari a 4, quindi 4 volte il WLL (Working Load Limit). Il carico applicato nelle analisi FEM è verticale con un valore pari a 5 volte il WLL, ovvero 11527N, valore scelto in modo da essere cautelativi sul design ed avere un maggior margine di sicurezza.

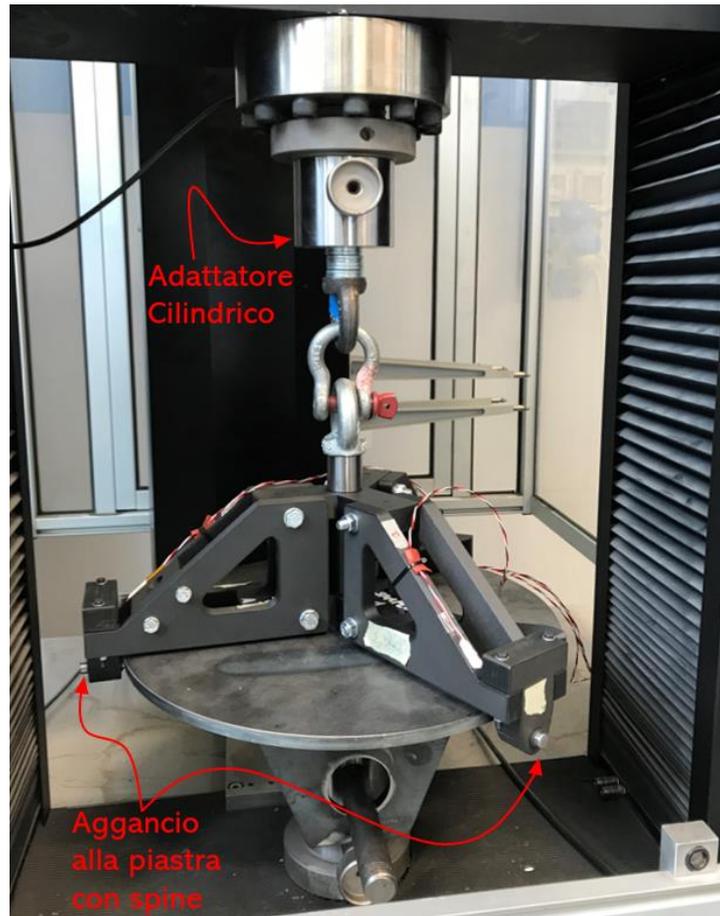
Nelle FEM il carico è stato applicato al golfare per semplicità. In questo modo i carichi seguono la rigidità del sistema (non controllato) e non viene tenuto conto del moto relativo tra camicia e pistone-biella. Si ricorda comunque che, come accennato in precedenza, questa configurazione di carico e vincoli mira a simulare il test sperimentale più che la situazione reale.

Il coefficiente di Poisson è stato assunto pari a 0.3, valore trovato in letteratura [30]: sarebbero necessarie altre analisi, ma il coefficiente di Poisson sembra non avere grandi influenze sui risultati delle analisi FEM. A conferma di ciò, sono state fatte delle analisi preliminari di sensibilità assumendo valori compresi tra 0.2 e 0.4 ed i risultati erano pressoché gli stessi.

## **5.2 Test**

I test sui modelli del Lifting Tool sono stati condotti internamente a Wärtsilä.

È stata utilizzata la macchina Galdabini Quasar 250, stessa macchina con cui sono stati testati i provini per la caratterizzazione del materiale. La temperatura dell'ambiente è stata mantenuta costante a 20 °C.



*Figura 5.2 - Set up per testare sperimentalmente il Lifting Tool.*

Come si può osservare in Figura 5.2, sulla parte superiore del Lifting tool è montato un golfare il quale è collegato alla traversa mobile della macchina sfruttando un cilindro adattatore disegnato ad hoc per i test.

La parte inferiore del tool è invece collegata ad una piastra di acciaio, opportunamente lavorata e forata, attraverso tre spine cilindriche d'acciaio: questo collegamento simula l'aggancio del tool alla camicia.

In seguito al montaggio del tool sulla macchina, è necessario traslare la traversa mobile fino ad azzerare qualsiasi gioco, assicurandosi che le tre spine siano ben fisse sulla piastra d'acciaio. Conseguentemente verrà registrato un precarico di 120 N, attribuito al peso della piastra e al peso stesso del Lifting Tool.

La procedura utilizzata per i test è stata la seguente:

- Fase 1: raggiungere 500 N di carico alla velocità di 50 N/s.
- Fase 2: stoppare la traversa mobile della macchina per 60 secondi (il carico in questa condizione varierà).
- Fase 3: partire dal valore iniziale della forza della fase 2 e raggiungere un valore 500 N superiore con la stessa velocità della fase 1.
- Iterare le fasi 2 e 3 fino al raggiungimento del carico target 4 per WLL, ovvero 9222 N. Una volta raggiunto questo valore, passare alla fase 4.
- Fase 4: mantenere il carico target 9222 N per 60 secondi (lo spostamento in questa condizione varierà).
- Fase 5: diminuire il carico fino al termine del test con una velocità pari a 100 N/s.

In seguito verranno apportate delle modifiche sul collegamento tra attrezzo e piastra d'acciaio dovute all'introduzione delle due configurazioni con le viti M8 a 180° e 120° che simulano i due possibili agganci tra attrezzo e pistone nel caso reale.

### **5.3 Primo FEM**

La prima analisi si è basata sul design proposto da Markforged, testato e portato a rottura. Da un punto di vista delle simulazioni, è stato utile per trovare un valore di stress critico nell'area di collasso del tool. Questo valore verrà poi usato come riferimento: ogniqualvolta sul modello analizzato comparirà una zona confrontabile con quella di rottura in cui la tensione risulta maggiore o uguale a quella critica, ad essa verrà associata una rottura.

Durante queste prime analisi sono stati utilizzati due moduli di elasticità differenti, unici valori disponibili in quel momento, ottenuti dalle prove conseguite per la caratterizzazione del materiale. Sono state quindi eseguite due analisi in parallelo (i dettagli sui valori utilizzati sono elencati nella Tabella 5.1):

- Analisi sul modello più rigido in cui il modulo elastico era pari a quello ottenuto dalle prove di trazione su provini rinforzati con fibre di carbonio.
- Analisi sul modello più flessibile in cui il modulo elastico era pari a quello ottenuto dalle prove di trazione su provini composti solamente da matrice polimerica Onyx®.

Tipo di modello	Modulo Elastico [MPa]	Coefficiente di Poisson
Rigido	11500	0.3
<i>Flessibile</i>	670	0.3

*Tabella 5.1 - Valori di modulo elastico e coefficiente di Poisson utilizzati nelle analisi FEM.*

È importante sottolineare che da delle analisi preliminari fatte su provini a trazione con fibre di carbonio, senza velleità di essere a norma, sono stati rilevati dei valori di modulo elastico medi attorno a 11500 MPa. Durante il periodo di analisi FEM e test, questo era l'unico dato sperimentale relativo al materiale rinforzato a disposizione. Solamente in seguito, in presenza di Bureau Veritas, sono stati eseguiti i test a norma. Ciò spiega il perché è stato usato questo valore come modulo elastico per il modello rigido. Inoltre, come si potrà vedere nei paragrafi successivi, il valore di modulo elastico definito per il modello FEM in seguito al test sul lifting tool equipaggiato con gli estensimetri è inferiore a 11500 MPa, quindi il range considerato per le FEM è risultato appropriato.

Nella Tabella 5.2 seguente vengono riportati i risultati delle prime analisi.

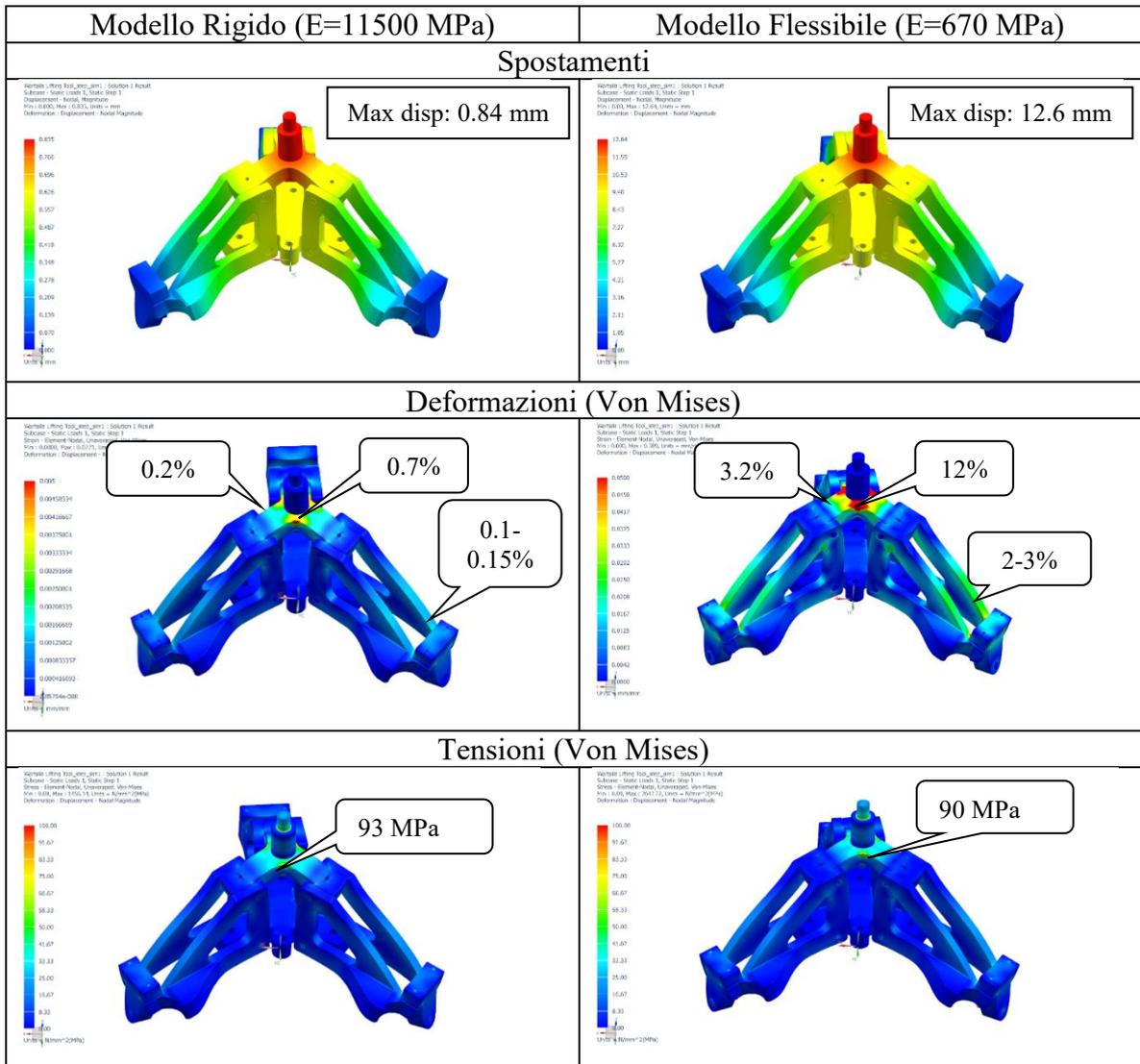


Tabella 5.2 - Risultati prima analisi FEM con due moduli elastici differenti.

Come si può notare, e come ci si poteva aspettare, ci sono enormi differenze tra i due modelli sul fronte di spostamenti massimi e deformazione percentuale. Per quanto riguarda le tensioni massime, in entrambe le analisi il valore attorno al quale ci si aggira è 90 MPa, valore da ora in poi considerato critico ed associato al collasso del tool in zone geometricamente “simili” e con pari caratteristiche del materiale a quelle riscontrate nella rottura sperimentale (vedi Tabella 5.3).

Importante sottolineare il fatto che, come si può notare dalle illustrazioni in Tabella 5.3, la zona di tensione massima risultata dalle analisi corrisponde al punto di rottura del primo test sperimentale fatto sul Lifting Tool.

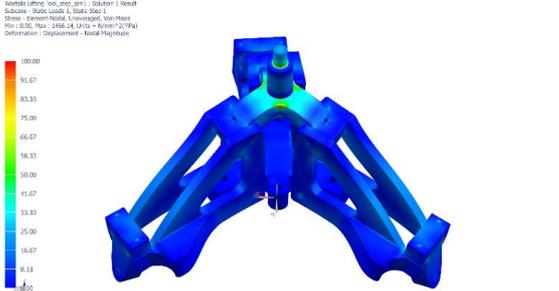
FEM	Test sperimentale (Croce Superiore)
	

Tabella 5.3 - Confronto dei punti critici dell'analisi FEM e del test sperimentale.

Questa corrispondenza è stato ottenuta nonostante le incertezze sul modulo elastico, le semplificazioni del modello e le ipotesi assunte. Il risultato quindi conferma la validità del modello, il quale è stato utilizzato come base per i modelli successivi.

## 5.4 Secondo FEM

Come si è visto i picchi di tensione si sono concentrati sulla croce superiore, la quale durante il primo test è collassata sui tre raggi di raccordo. Come primo step del re design si è andati quindi a scaricare questo componente del tool, cercando di ridistribuire al meglio gli sforzi. Le modifiche apportate al componente sono illustrate in Figura 5.3.

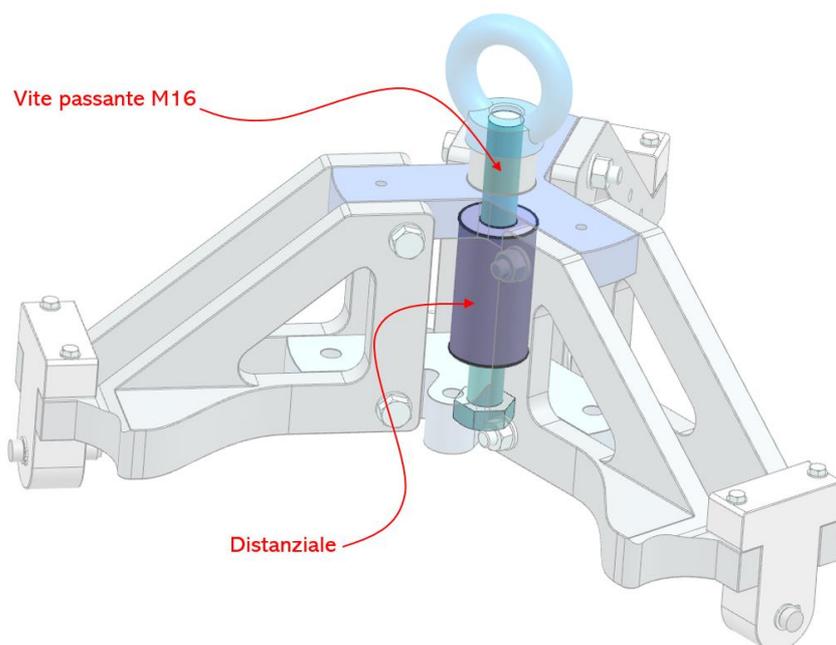


Figura 5.3 - Modifiche al design del Lifting Tool.

La vite M16 montata direttamente sulla croce superiore comportava una distribuzione degli sforzi limitata a solamente una parte del tool. Infatti la zona inferiore dell'attrezzo era quasi completamente scarica. È stato scelto quindi di montare la vite sulla parte inferiore del tool, prevedendo un foro passante anche nella croce inferiore. Per favorire la distribuzione del carico è stato introdotto inoltre un distanziale cilindrico forato dimensionato in modo che le due superfici piane vadano perfettamente in battuta sulle due croci di base. La vite M16 quindi passa attraverso le due croci ed il distanziale.

Il nuovo componente aggiunto è stato stampato con la stampante Markforged X7, utilizzando una percentuale di riempimento del 100% e non prevedendo alcun tipo di rinforzo con fibre.

La simulazione è stata eseguita come il caso precedente, quindi analizzando due modelli in parallelo con due moduli elastici differenti. Il modello è lo stesso ad eccezione dell'aggiunta del distanziale e della diversa zona di battuta della testa della vite. È stato mantenuto lo stesso carico e la stessa disposizione dei vincoli. Nella Tabella 5.4 sottostante vengono elencati i risultati delle analisi.

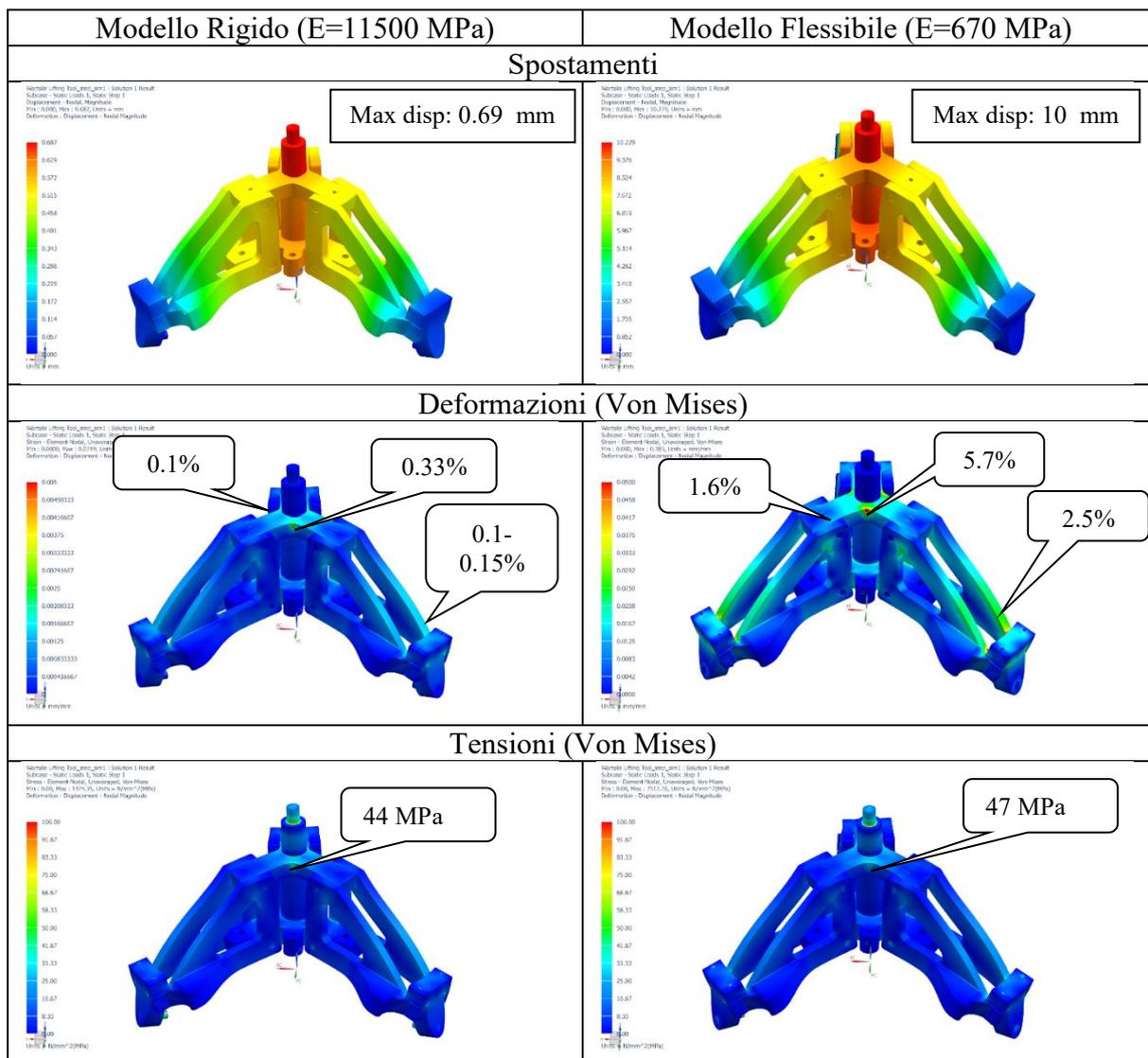


Tabella 5.4 - Risultati analisi FEM secondo design.

Rispetto al caso precedente lo spostamento massimo è stato ridotto del 20%, la deformazione massima riscontrata precedentemente sulla croce superiore è stata ridotta del 53% e la tensione massima del 50%.

Dal confronto tra il caso precedente e quello appena analizzato si può notare come l'ammontare di riduzione in termini di tensione è molto sensibile alla modifica del design e poco sensibile al modulo elastico adottato.

## 5.5 Test estensimetrato

Nonostante la congruenza riscontrata tra modello FEM e risultati sperimentali, è stato deciso di proseguire le analisi con un solo modulo elastico, sia per un fattore di velocità di calcolo

e ottenimento di risultati, sia per un fattore di correttezza progettuale. È stato quindi testato sperimentalmente l'ultimo design descritto, equipaggiando l'attrezzo con degli estensimetri.

Dalle analisi precedenti, si è visto che la zona più critica dell'attrezzo è situata sulla croce superiore. Posizionare gli estensimetri in quella zona avrebbe comportato un incollaggio molto complesso e l'utilizzo di sensori pluridirezionali, rendendo quindi complicata la lettura ed il post-process dei dati in output.



*Figura 5.4 - Lifting Tool equipaggiato con tre estensimetri.*

Si è scelto quindi di posizionare tre estensimetri monodirezionali sulle braccia dell'attrezzo, come illustrato in Figura 5.4. Ciò ha permesso un posizionamento ed un incollaggio semplice dei sensori. Lo stato tensionale in quelle zone è prevalentemente di trazione, quindi un estensimetro monodirezionale riesce a descrivere adeguatamente l'andamento del carico. Questa configurazione permette inoltre di monitorare la simmetria di sforzi del tool, evidenziando quale braccio lavora maggiormente rispetto agli altri due.

Il test è stato eseguito sulla macchina Galdabini seguendo gli stessi step descritti precedentemente nel paragrafo 5.2.

## 5.6 Risultati test estensimetrato

In questa sezione è necessario affrontare due aspetti differenti: il processo di elaborazione dei dati ottenuti dagli estensimetri e la rottura anomala dell'attrezzo.

### 5.6.1 Definizione modulo elastico

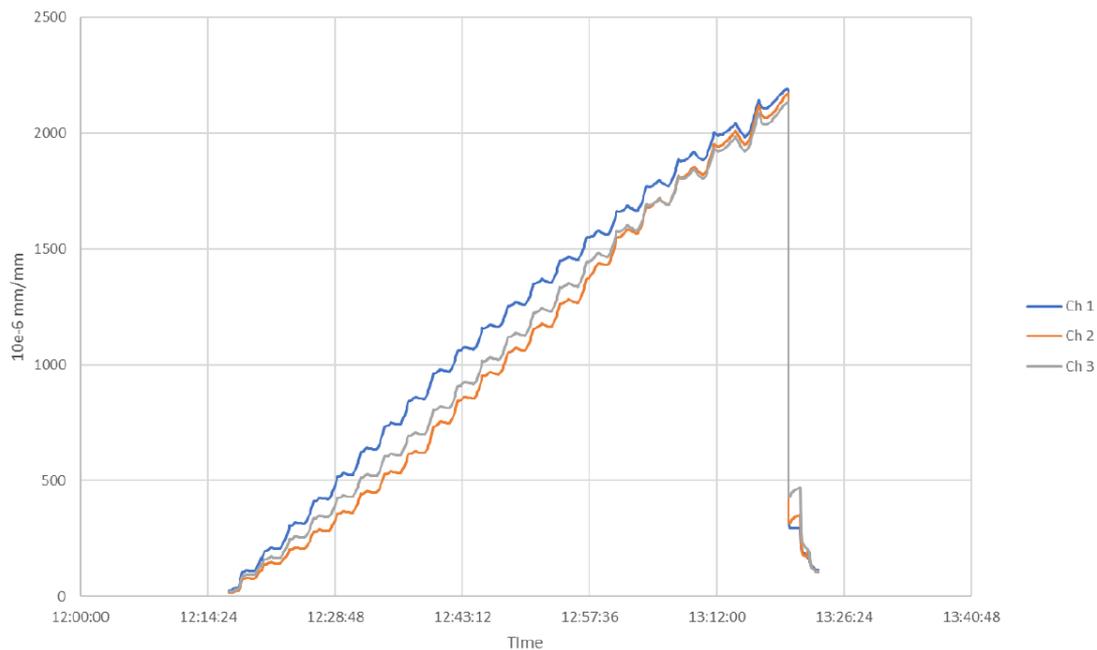


Figura 5.5 - Grafico dell'andamento delle risposte degli estensimetri.

Il grafico illustrato in Figura 5.5 descrive il comportamento delle tre braccia che compongono il tool in funzione di tempo e deformazione. Si può osservare come i tre componenti all'aumentare della sollecitazione, lavorino sempre più simmetricamente, infatti le tre curve convergono prima di arrivare al punto di rottura e ciò potrebbe essere dovuto alla redistribuzione graduale del carico nel tool.

Il carico raggiunto in questo test è stato 9953N, poco più di quattro volte il carico nominale (WLL).

Il modulo elastico unico è stato calcolato combinando i risultati ottenuti dagli estensimetri con le analisi FEM eseguite sul modello rigido ( $E = 11500 \text{ MPa}$ ), modello che, secondo le previsioni, era quello che meglio descriveva la situazione reale, come confermato poi dai valori degli estensimetri.

È stato assunto come riferimento il massimo carico raggiunto durante la prova e dal grafico è stata ricavata la deformazione media corrispondente dettata dagli estensimetri. È stata quindi eseguita un'analisi FEM sul modello rigido, inserendo come carico il valore massimo sopra citato: andando ad analizzare le zone dei componenti che compongono le braccia corrispondenti alle posizioni degli estensimetri, sono stati riscontrati dei valori di deformazione inferiori in quanto il modulo elastico assunto era troppo elevato. Sono state eseguite delle iterazioni sul modello abbassando gradualmente il modulo elastico affinché le deformazioni combaciassero, fino a giungere a convergenza. Il valore finale ottenuto è stato 6500 MPa.

Il modulo elastico è stato tarato sul comportamento delle tre braccia e non di tutto l'attrezzo. Si è visto precedentemente però che le tensioni si mantengono pressoché costanti al variare del modulo elastico. Si è deciso quindi di mantenere 6500 MPa come valore unico.

## 5.6.2 Redesign

Osservando i risultati delle analisi FEM, come accennato in precedenza, le zone più critiche risultano essere i raccordi della croce superiore, i quali presentano un picco di tensioni che si aggira attorno ai 45 MPa. Nonostante ciò la rottura del Lifting Tool questa volta è avvenuta nella zona di connessione tra la croce superiore e due componenti che compongono un braccio, come raffigurato in Figura 5.6.

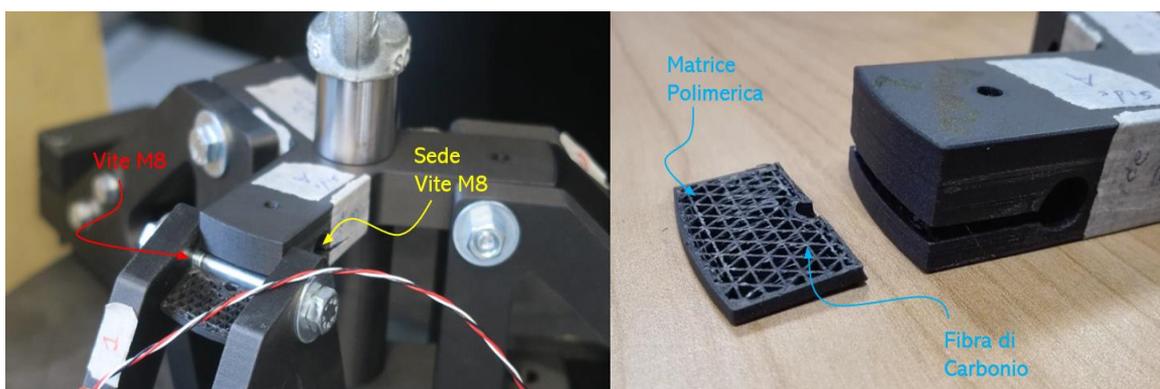


Figura 5.6 - Sinistra: Rottura dell'attrezzo durante il test. Destra: Dettaglio rottura a taglio della croce superiore.

Questa tipologia di rottura è stata attribuita alla debolezza di incollaggio tra layer rinforzato con fibra e layer composto solamente da matrice polimerica che potrebbe causare una

discontinuità tra layer, e ad una concentrazione di sforzi non pervenuta durante le analisi precedentemente eseguite.

La mancanza di picchi di tensione in quella zona è dovuta alla semplicità del modello adottato per le analisi FEM. Si è scelto quindi di introdurre nel modello dei contatti non lineari “Surface to surface contact” [29] tra viti M8 e la loro sede nonché tra braccia e croce, in modo da comprendere appieno la natura del collasso dell’attrezzo.

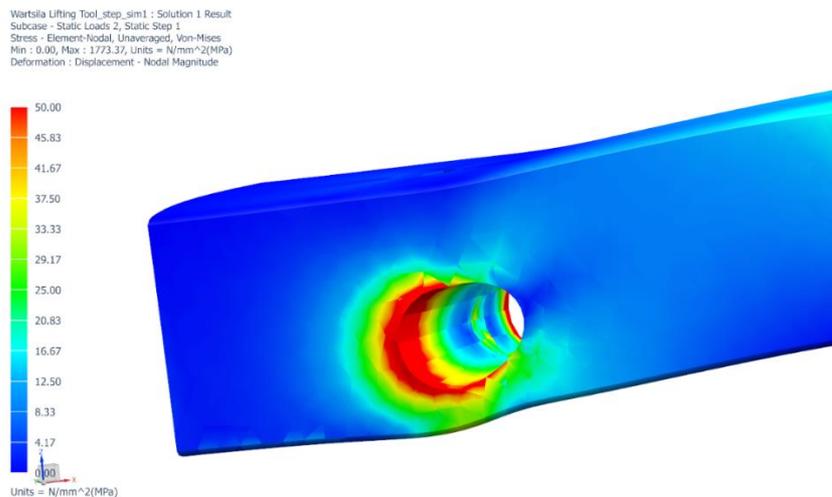


Figura 5.7 - Sede di una vite M8 situata nella croce superiore, analizzata utilizzando un contatto non lineare.

Modificando la tipologia di contatto è stato riscontrato infatti un picco su tutta la zona, come si può osservare in Figura 5.7. La sede della vite M8 risulta soggetta a un carico di taglio, il quale ha causato il principio di cricca che ha portato alla rottura della croce superiore.

Per ovviare a questo problema e per diminuire le tensioni che caratterizzano questo componente sono state apportate numerose modifiche al design, elencate qui di seguito e raffigurate in Figura 45:

- I tre fori di diametro 5 mm sono stati rimossi e sostituiti con sei fori di diametro 4 mm. Dal momento che le circonferenze, anche se interne al componente, vengono catalogate come perimetri dal software Eiger, attorno ad esse viene aggiunto del materiale in base al numero di wall layers selezionati. I fori presenti nel primo design proposto, necessari a conferire resistenza a taglio alla zona, sono risultati troppo vicini alle sedi delle viti M8 in quanto l’aggiunta di materiale era minima e la zona non ha resistito al picco di tensione di taglio. Perciò si è scelto di introdurre sei nuovi

fori di diametro minore, posizionandoli in modo da massimizzare l'aggiunta di materiale attorno ad essi.

- Sono state introdotte sei viti M4, inserite nei sei fori appena descritti in modo da evitare che le aree attorno alle sedi delle M8 siano soggette a sforzi di puro taglio. I perni delle viti M8 comprimono il materiale aggiunto attorno ai fori, situazione non ritenuta a rischio visti i risultati dei test di caratterizzazione precedentemente descritti. Le viti M4 sono sollecitate quindi da uno sforzo flessionale: ciò permette la redistribuzione delle tensioni, le quali coinvolgeranno pesantemente anche i layer rinforzati con fibre situati nelle zone soprastanti e sottostanti alla sede delle viti M8. I layer rinforzanti appena citati sono soggetti quindi a trazione, situazione ottimale per le fibre di carbonio.
- È stato aumentato il raggio di raccordo tra le estremità delle croci in quanto, osservando i risultati delle analisi FEM, la zona risultava ancora la più critica dell'attrezzo.

## **5.7 Design definitivo validato**

Prima di eseguire l'analisi FEM sul modello finale con l'introduzione delle due ulteriori configurazioni di aggancio alla piastra metallica con viti a 180° e 120°, è stata apportata un'ulteriore modifica al design.

Considerando i risultati FEM ottenuti durante lo sviluppo finale del design, è stato deciso di introdurre dei raccordi a raggi variabili sugli spigoli della croce inferiore in corrispondenza della zona di raccordo tra le tre estremità. Questa modifica ha permesso di ridurre le tensioni non andando ad intaccare la zona di appoggio tra braccia e croce.

Le modifiche alle croci di base dell'attrezzo sono illustrate nella Figura 5.8 seguente.

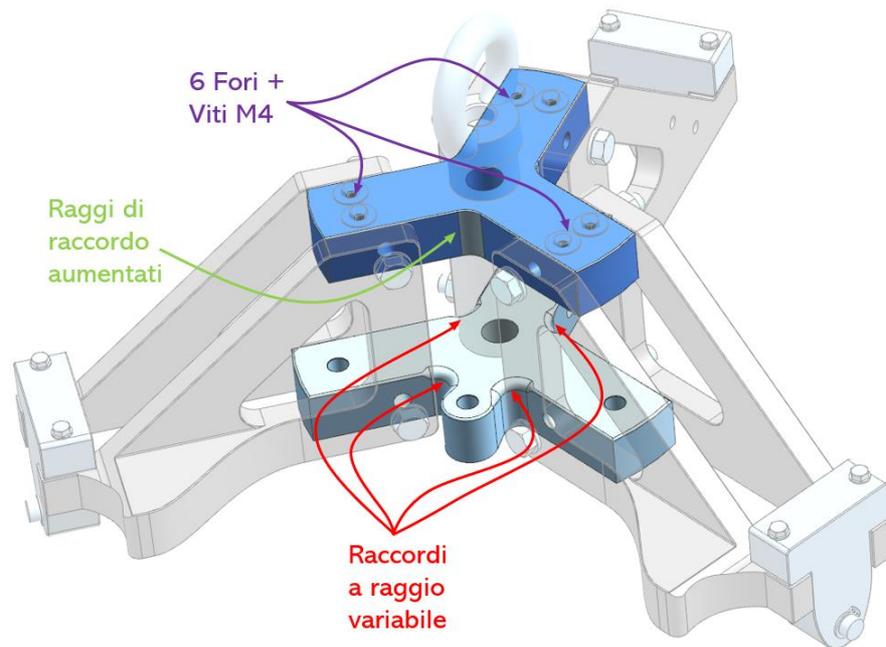


Figura 5.8 - Modifiche del design delle croci di base del Lifting Tool.

È stata infine fatta un'analisi congiunta tra design, distribuzione di tensioni nell'attrezzo e costo. Sulla base di ciò, è stata modificata la disposizione delle fibre all'interno dei componenti rispetto al primo design proposto. Si è giunti ad una disposizione ottimale alternando layer rinforzati con geometrie di riempimento differenti, facendo combaciare, quando possibile, l'angolo di orientazione delle fibre di carbonio con la direzione delle estremità delle croci.

È stato eseguito quindi un test intermedio sull'attrezzo adottando la configurazione di aggancio alla piastra d'acciaio con le sole tre spine metalliche. La prova ha avuto lo scopo di testare il nuovo design e rilevare il carico massimo raggiungibile dal Lifting Tool in questa configurazione di aggancio. L'attrezzo è collassato al raggiungimento di un carico pari a 12753 N.

## 5.8 Analisi FEM validata

Il modello utilizzato per la seguente analisi FEM è lo stesso rispetto a quello descritto in precedenza, ad eccezione della presenza sulla croce inferiore di quattro viti M8 (Tabella 5.5) che simulano l'aggancio dell'attrezzo col pistone, della conseguente disposizione dei vincoli e della presenza dei contatti non lineari.

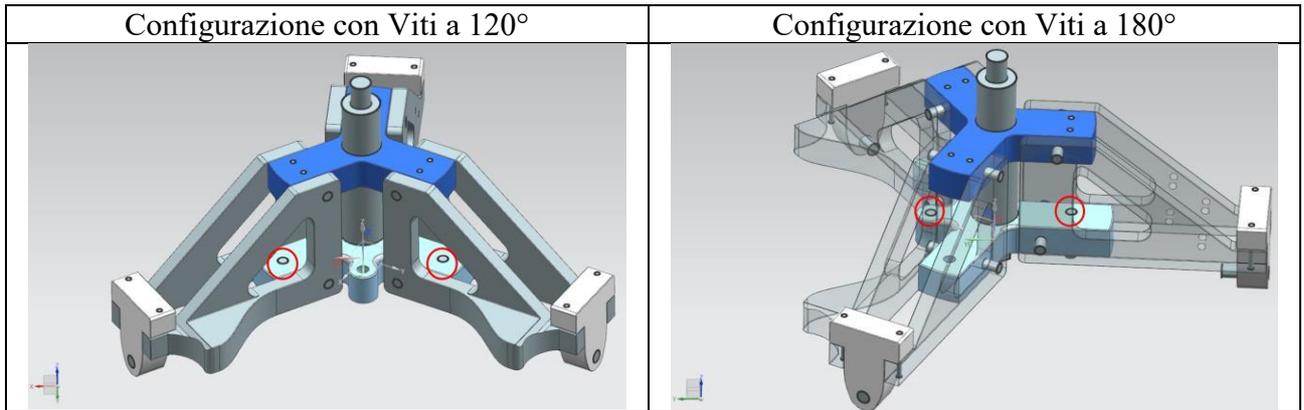


Tabella 5.5 - Rappresentazione sul software NX delle configurazioni con viti a 120° e 180°. In rosso sono evidenziate le posizioni delle viti.

Il vincolo (tutti i gradi di libertà bloccati) è anche in questo caso applicato ad un solo nodo. Le connessioni RBE2 ad esso collegate invece variano a seconda della configurazione analizzata (Figura 5.9 e Figura 5.10).

- Configurazione con viti M8 a 120°: una connessione RBE2 che collega il nodo alle tre spine cilindriche e un'altra che collega il nodo alle viti poste a 120° l'una dall'altra.

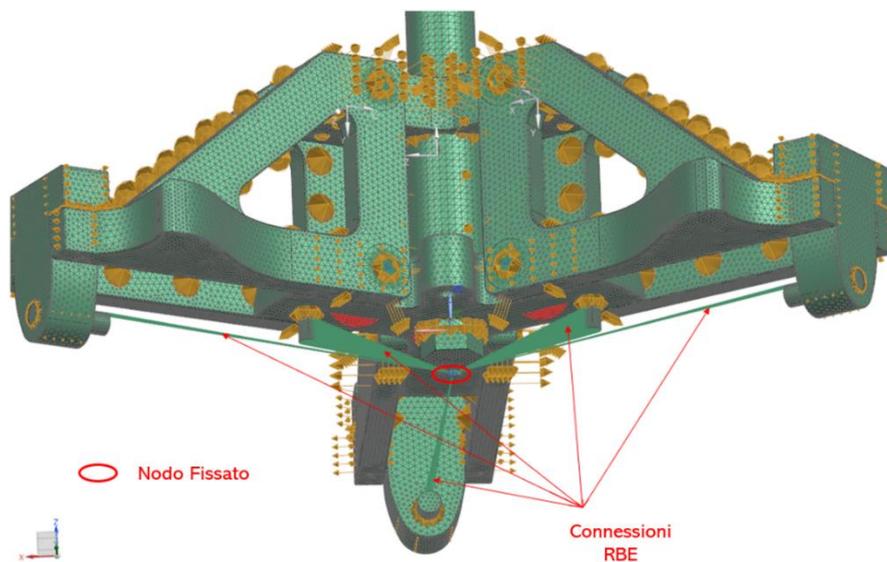
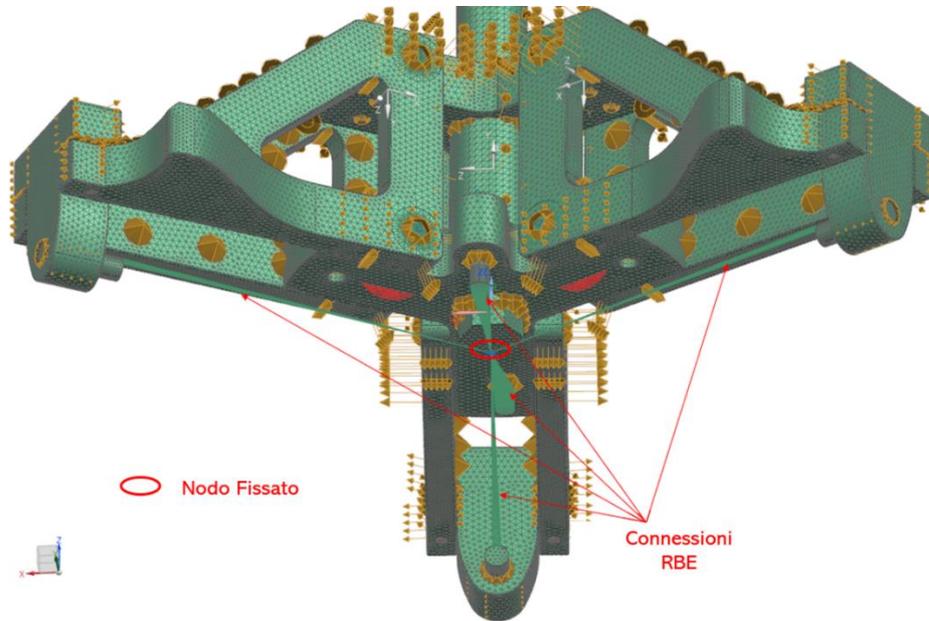


Figura 5.9 - Modello per analisi FEM, configurazione con viti di aggancio al pistone a 120°.

- Configurazione con viti M8 a 180°: una connessione RBE2 che collega il nodo alle tre spine cilindriche un'altra che collega il nodo alle viti poste a 180° l'una dall'altra.



*Figura 5.10 - Modello per analisi FEM, configurazione con viti di aggancio al pistone a 180°.*

I contatti non lineari, come accennato in precedenza, sono stati applicati lungo le sedi delle viti M8 che collegano le croci di base ai componenti che compongono le braccia dell'attrezzo e sui contatti tra braccia e croci.

Anche in questo caso il carico applicato durante l'analisi FEM è verticale ed è pari a cinque volte il WLL (11527 N). È stato usato un unico modulo elastico, pari a 6500 MPa.

Di seguito (Tabella 5.6) sono illustrate i risultati delle analisi FEM di entrambe le configurazioni.

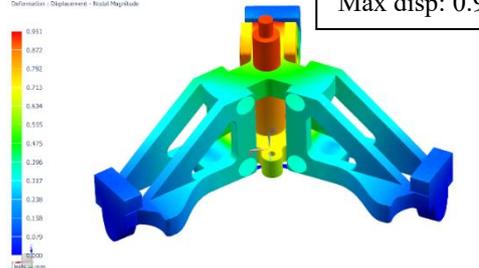
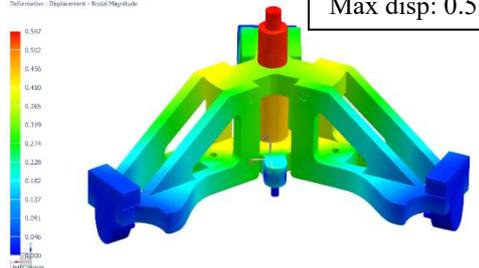
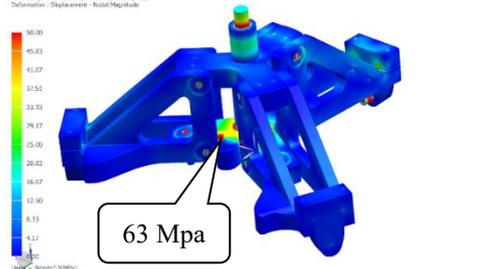
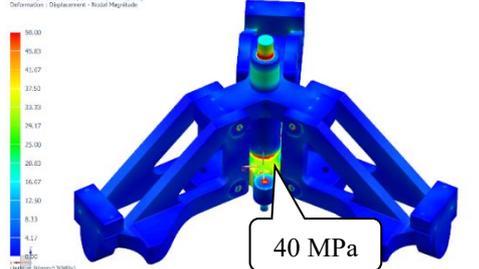
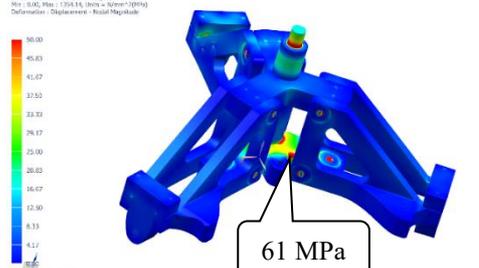
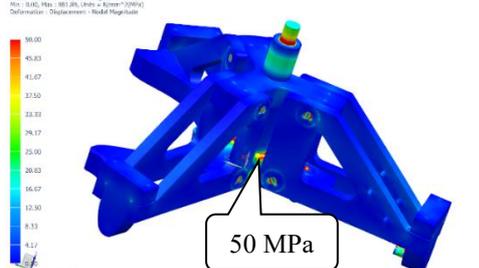
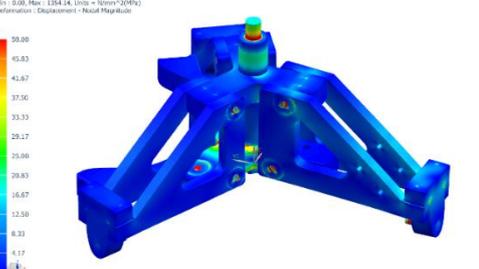
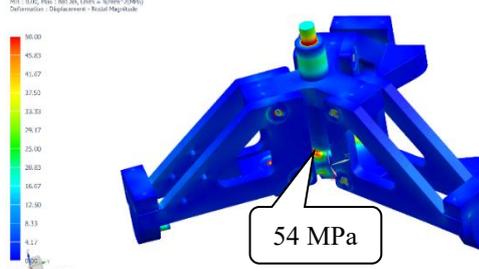
Configurazione con Viti a 120°	Configurazione con Viti a 180°
<b>Spostamenti</b>	
 <p>Max disp: 0.95 mm</p>	 <p>Max disp: 0.55 mm</p>
<b>Tensioni (Von Mises)</b>	
 <p>63 MPa</p>	 <p>40 MPa</p>
 <p>61 MPa</p>	 <p>50 MPa</p>
 <p>61 MPa</p>	 <p>54 MPa</p>

Tabella 5.6 - Risultati analisi FEM ultimo design, due configurazioni d'aggancio col pistone.

I picchi di tensione osservati in prossimità dei raccordi a raggio variabile hanno un massimo di 63 MPa nella configurazione con viti a 120° e 54 MPa nella configurazione con viti a 180°. Considerando che in un'area pressoché analoga precedentemente era stato riscontrato un valore critico di 90 MPa, a posteriori di queste analisi la geometria è stata considerata sottoponibile a test sperimentale. Le deformazioni verranno monitorate con gli estensimetri durante la prova.

## 5.9 Test validato

L'ultima versione dell'attrezzo descritta nel capitolo 5.6 è stata testata sotto la supervisione di Bureau Veritas col fine di certificare il processo della prova e il funzionamento del Lifting Tool.

La piastra di acciaio, che simula l'aggancio col sistema camicia-pistone-biella, è stata opportunamente forata in modo da permettere l'introduzione delle viti M8. Anche in questo caso l'attrezzo è stato equipaggiato con tre estensimetri monodirezionali nelle stesse posizioni del test precedente. È stata montata inoltre una cella di carico in serie con quella della macchina al fine di ottenere il segnale del carico in fase col segnale degli estensimetri (Figura 5.11).

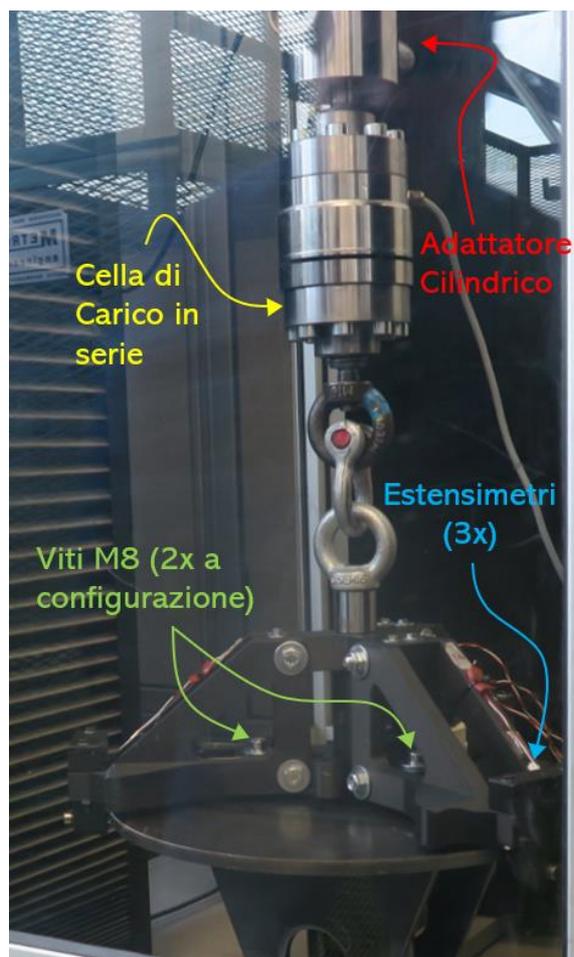


Figura 5.11 - Set up ultimo test realizzato sul Lifting Tool.

La guida lineare basata sulla direttiva macchine e proposta da Bureau Veritas a cui si è fatto riferimento considera un coefficiente di sicurezza pari a quattro per l'utilizzo. Sono state quindi testate entrambe le configurazioni di connessione tra viti M8 e piastra di acciaio (Tabella 5.5), una di seguito all'altra, seguendo la procedura descritta nel capitolo 5.2, fino ad arrivare ad un carico pari a 9222 N e mantenendolo per 60 s. L'obiettivo è di concludere le prove non riscontrando alcuna deformazione plastica.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dagli estensimetri e dalla cella di carico.

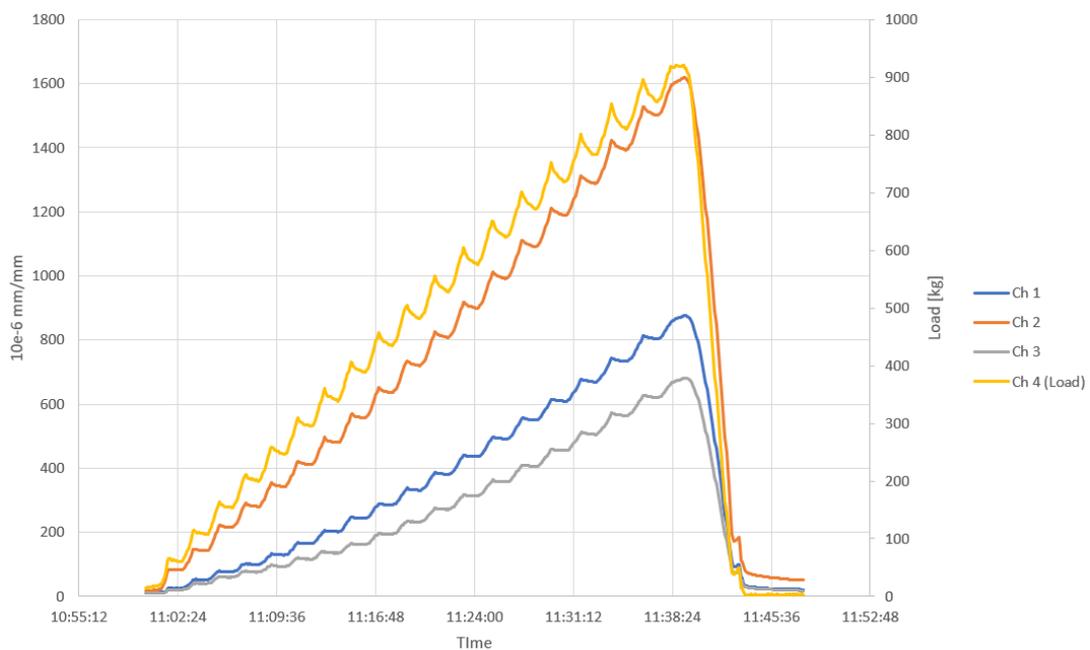


Figura 5.12 - Configurazione con viti a  $120^\circ$ : grafico dell'andamento delle risposte degli estensimetri.

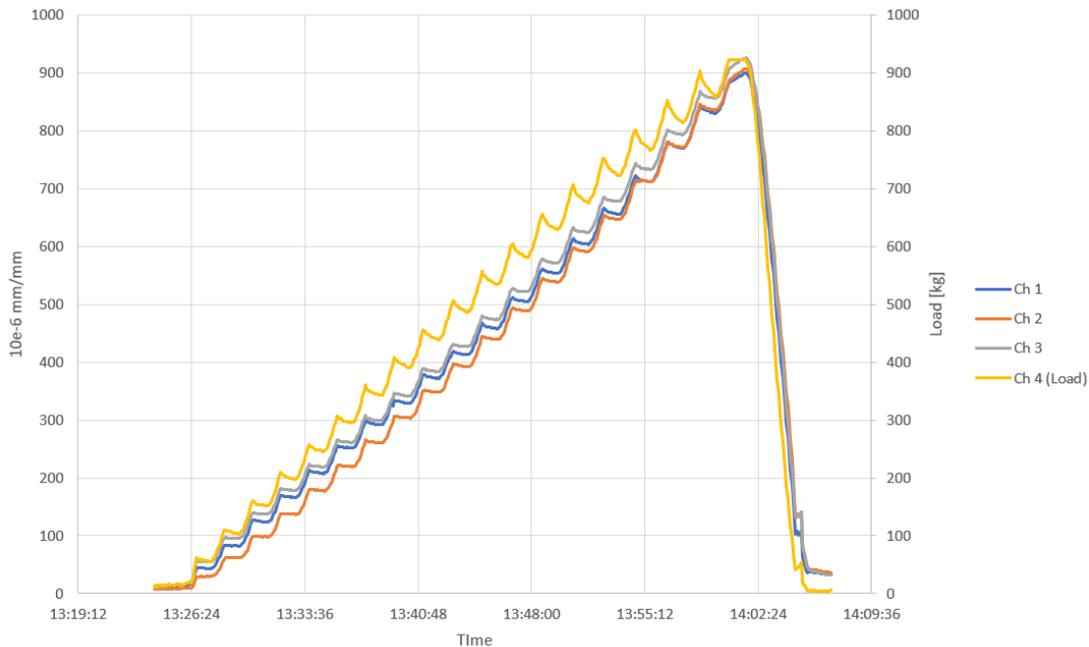


Figura 5.13 - Configurazione con viti a 180°: grafico dell'andamento delle risposte degli estensimetri.

Come si può notare osservando i grafici in Figura 5.12 e Figura 5.13, la differenza fra le due configurazioni è netta e rilevante.

Nel caso di configurazione con viti a 180°, il comportamento qualitativo (ma non quantitativo) delle tre braccia riscontrato è pressoché lo stesso del caso descritto nel capitolo 5.6, ovvero il caso con aggancio alla piastre di acciaio solamente con le tre spine. Il risultato era prevedibile in quanto le sedi delle viti sono posizionate lungo la bisettrice dell'angolo a 120° e ciò comporta una buona distribuzione del carico e una conseguente riduzione di deformazioni.

Osservando invece il grafico illustrato in Figura 5.12, si può osservare come un braccio si deformi maggiormente rispetto agli altri due. Ciò è dovuto alla posizione delle viti M8: come si può notare dall'illustrazione in Tabella 5.5 le viti sono posizionate in corrispondenza di due delle tre braccia e ciò comporta l'alleggerimento di carico delle due braccia appena citate e il conseguente sovraccarico del terzo.

Nonostante ciò, il carico target è stato raggiunto e mantenuto per 60 s. Durante l'esecuzione di entrambi i test non è stata riscontrata alcuna deformazione plastica e nessun segno di cedimento. L'attrezzo si è deformato elasticamente ma fino al raggiungimento di 2 volte il Working Load le deformazioni non erano evidenti ad un controllo visivo e considerate trascurabili.

## 6 Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi sono state testate le potenzialità della fabbricazione additiva e della produzione di componenti finiti realizzati con la tecnica FDM rinforzati con fibre di carbonio. Il progetto si è concentrato sulla realizzazione di un attrezzo di sollevamento, il cui funzionamento e scopo ha messo a dura prova la resistenza del materiale.

La prima parte del progetto verte sulla caratterizzazione del materiale. Sono stati testati provini composti solamente da Onyx® e provini composti da matrice polimerica rinforzati con fibre di carbonio. Sono state portate a termine prove di trazione, compressione e flessione seguendo le norme UNI.

In seguito è stato realizzato un modello CAD 3D su cui sono state eseguite le analisi FEM. Ogni analisi è stata validata da un test sperimentale. Parallelamente a ciò, sono state apportate numerose modifiche al design in modo da raggiungere il carico target.

Una volta definito il design definitivo e dopo aver eseguito su di esso l'analisi FEM, l'attrezzo è stato testato in tutte le sue configurazioni.

Dai test sui provini si è potuto osservare come le fibre di carbonio aumentino notevolmente le proprietà meccaniche del materiale: la resistenza a trazione nel caso di provini rinforzati è di un ordine di grandezza superiore rispetto ai provini non rinforzati e lo stesso vale per la resistenza a compressione e la resistenza a flessione. È inoltre evidente come le fibre di rinforzo conferiscano al materiale un comportamento molto fragile.

Il modello adottato per le analisi FEM è risultato adatto agli scopi. Nonostante le ipotesi fatte e nonostante l'anisotropia del materiale, i risultati ottenuti hanno rispecchiato adeguatamente il comportamento reale dell'attrezzo. Ciò è stato confermato dai test sperimentali eseguiti dopo ogni modifica al design.

Una volta confermato il design definitivo dell'attrezzo, esso è stato testato in presenza di due rappresentanti dell'azienda di certificazione Bureau Veritas, i quali ci hanno accompagnato durante tutto il periodo del progetto. Il lifting tool, testato in tutte e tre le sue

configurazioni, non ha presentato alcuna deformazione plastica e nessun accenno di cedimento a 4 volte il suo working load (9222 N).

Il processo descritto in questo elaborato è stato infine validato da un ente internazionale di certificazione, Bureau Veritas, il quale ha emesso un Type Approval Certificate sull'accessorio di sollevamento [31].

## 6.1 Sviluppi futuri

Oltre all'approfondimento della caratterizzazione del materiale, all'indagine sulla precisa influenza del numero di layer rinforzati (argomenti già citati in precedenza), un altro sviluppo futuro di questo progetto sarà l'evoluzione dell'attrezzo, conferendogli la possibilità di supportare sia il sollevamento verticale che quello inclinato. A tal proposito, è stata eseguita un'ottimizzazione topologica utilizzando il software Altair Inspire sulla quale si potrà basare il nuovo design del Lifting Tool.

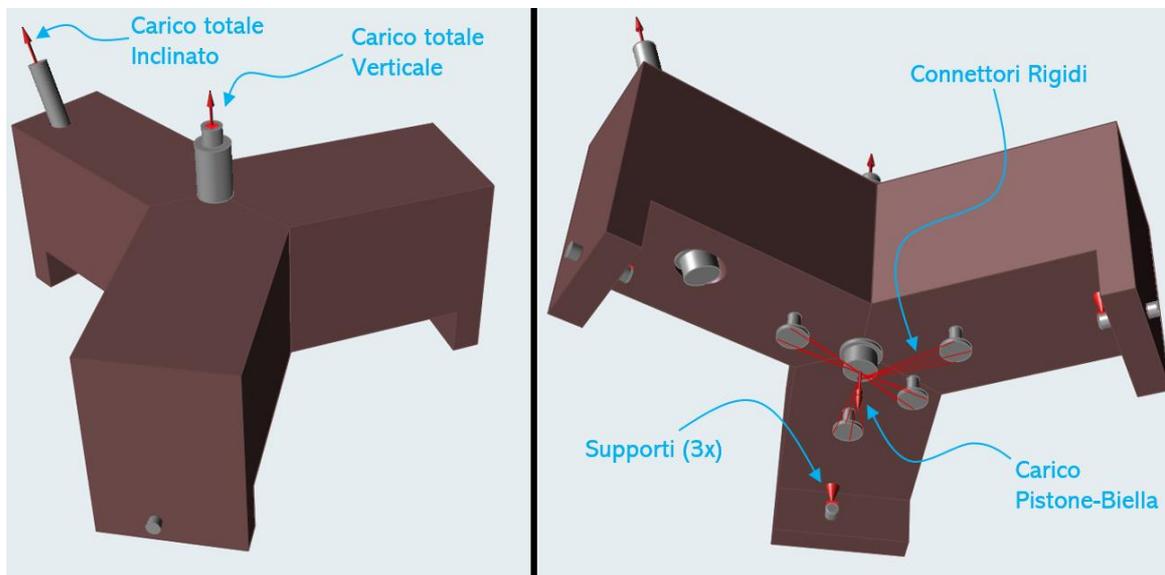


Figura 6.1 - Modello di partenza per ottimizzazione topologica. A sinistra: vista dall'alto. A destra: vista dal basso.

Il modello su cui è stata eseguita l'ottimizzazione è raffigurato in Figura 6.1. Il concetto di tre componenti separati è stato mantenuto: in questo caso le braccia sono state dimensionate in modo da massimizzare lo spazio di design e riempire quasi completamente il volume di lavoro della stampante Markforged X7. Agli estremi delle tre braccia sono state inserite le

tre spine cilindriche e sulla base inferiore sono stati introdotti dei componenti che simulano le viti M8. Ciò è stato fatto affinché la connessione tra tool e sistema camicia-pistone-biella rimanga la stessa. Sono stati introdotti inoltre due cilindri, uno verticale al centro del modello ed uno inclinato posizionato su una delle tre braccia che simulano le viti principali di sostegno.

Anche in questo caso, come nelle analisi FEM descritte in precedenza, è stato simulato il test sperimentale e non l'effettivo funzionamento dell'attrezzo. Nonostante ciò, la definizione dei vincoli e dei carichi è differente per motivi di corretta esecuzione dell'ottimizzazione.

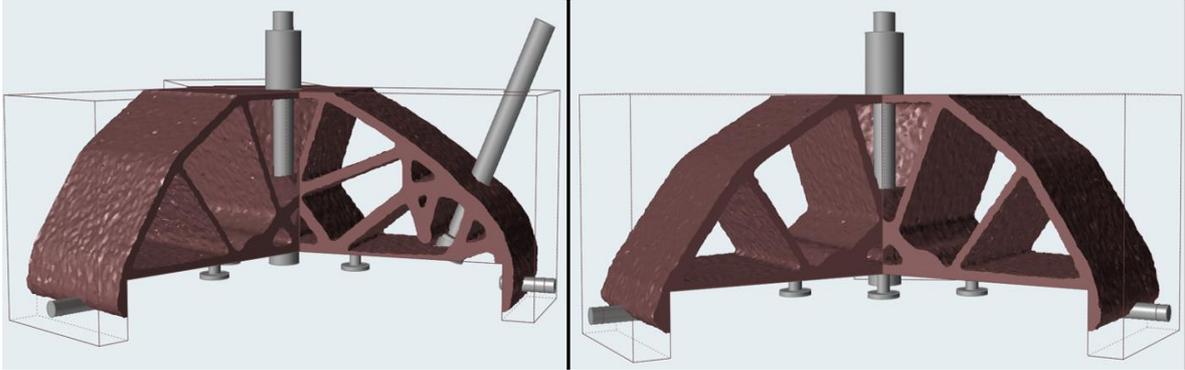
Sono state definite quattro condizioni di carico:

- Sollevamento verticale con viti M8 a 180°.
- Sollevamento verticale con viti M8 a 120°.
- Sollevamento inclinato con viti M8 a 180°.
- Sollevamento inclinato con viti M8 a 120°.

Il carico totale, assunto pari a cinque volte il Working Load (11527 N), è stato applicato nei primi due casi sulla vite centrale, nei secondi due sulla vite inclinata. A differenza delle analisi FEM, in questo caso è stato introdotto il carico di pistone e biella ed è stato applicato sulle viti M8 nella parte inferiore del modello: l'intenzione è quella di simulare il movimento relativo tra il sistema pistone-biella e la camicia, permettendo al software di distribuire il carico rimanente in modo ottimale. Per fare ciò sono stati realizzati due connettori rigidi, uno che collega le viti M8 a 180° e uno che collega le viti M8 a 120°. I vincoli sono stati posizionati sulle tre spine cilindriche.

Sono state eseguite numerose simulazioni sfruttando diverse opzioni e modificando di volta in volta i parametri di ottimizzazione. Alcuni risultati, anche se corretti dal punto di vista strutturale, sono stati omessi in quanto considerati non realizzabili. È stato scelto infine il design che meglio permette l'introduzione di fibre di rinforzo.

Oltre a vincoli e carichi, è stata introdotta un'ulteriore restrizione al modello che permette di definire la direzione ed il piano di stampa di ogni componente: Shape control – Extrusion [32]. Questa combinazione di opzioni rende il modello facilmente realizzabile, conferendo al design una forma adeguata in previsione di un rinforzo con fibre.



*Figura 6.2 - Risultato dell'ottimizzazione topologica.*

Il risultato dell'ottimizzazione topologica è illustrato in Figura 6.2. Questo design sarà la base della nuova versione del Lifting Tool, il quale in futuro verrà realizzato e testato.

## A. Lista figure

Figura 1.1 – Processo caratteristico dell'Additive Manufacturing [7].....	8
Figura 1.2 - Schematizzazione della tecnologia di stampa Stereolitografia [9].....	10
Figura 1.3 - Schematizzazione della tecnologia di stampa SLS [9].....	11
Figura 1.4 - Schematizzazione della tecnologia di stampa 3DP [9].....	12
Figura 2.1 - Schematizzazione del processo FDM.....	13
Figura 2.2 - La stampante 3D Mark X7 di Markforged.....	15
Figura 2.3 - Schematizzazione del processo di stampa CFF Markforged.....	16
Figura 2.4 - Vista dall'alto del volume di lavoro della Markforged X7.....	17
Figura 2.5 - Esempio del laser scan di un layer.....	18
Figura 2.6 - Datasheet Markforged con dettaglio su responsabilità.....	19
Figura 2.7 - Interfaccia utente di Eiger.....	20
Figura 2.8 - Parametri di stampa iniziali.....	22
Figura 2.9 - Part settings.....	23
Figura 2.10 - Material settings.....	24
Figura 2.11 - Pattern di riempimento della matrice polimerica. Da sinistra: riempimento rettangolare, riempimento triangolare, riempimento esagonale.....	25
Figura 2.12 - Reinforcement settings.....	25
Figura 2.13 - Esempio di rinforzo utilizzando l'opzione riempimento concentrico.....	26
Figura 2.14 - Impostazioni per Concentric fill.....	27
Figura 2.15 - Esempio di rinforzo utilizzando l'opzione riempimento isotropico.....	27
Figura 2.16 - Impostazioni per Isotropic fill.....	28
Figura 2.17 - Interfaccia Internal view.....	29
Figura 3.1 - Assieme Lifting Tool e sistema biella-pistone-camicia.....	30
Figura 3.2 - Lifting Tool ora in utilizzo.....	31
Figura 3.3 - Primo prototipo Lifting Tool AM.....	32
Figura 4.1 - Differenti orientazioni di stampa dei provini rinforzati.....	36
Figura 4.2 - Dimensioni di riferimento per provini 100% Onyx® senza rinforzo in riferimento alla norma ISO 527.....	40
Figura 4.3 - Dimensioni di riferimento per provini rinforzati con fibre di carbonio in riferimento alla norma ISO 527 [21].....	41

Figura 4.4 - Esempio dimostrativo di test di compressione. Il provino in figura non ha le dimensioni imposte dalla norma ISO 604. ....	43
Figura 4.5 - Dimensioni di riferimento dei provini per i test di compressione. ....	44
Figura 4.6 - Tagli su provini per ottenere unidirezionalità delle fibre. ....	45
Figura 4.7 - Set up per i test di flessione. ....	47
Figura 4.8 - Tool utilizzato per test di flessione stampato in Onyx®. ....	48
Figura 4.9 - Dimensioni di riferimento dei provini per test di flessione (ISO 178) [23]. ...	49
Figura 4.10 - Dimensioni di riferimento per test di flessione (ISO 14125) [24]. ....	50
Figura 4.11 - Risultati prove trazione di provini non rinforzati. ....	52
Figura 4.12 - Risultati prove trazione di provini rinforzati con un solo layer di fibre. ....	53
Figura 4.13 - Risultati prove trazione di provini rinforzati stampati lungo tre direzioni differenti. ....	54
Figura 4.14 - Risultati prove di compressione su provini atti al calcolo della resistenza. ...	56
Figura 4.15 - Risultati prove compressione modulo su provini non rinforzati. ....	57
Figura 4.16 - Risultati prove compressione di provini rinforzati con fibre di carbonio. ....	58
Figura 4.17 - Sopra: Grafico tensione-deformazione risultato dai test di flessione su provini Onyx®. Sotto: Andamento dei moduli elastici risultati dai test di flessione su provini non rinforzati. ....	60
Figura 4.18 - Sopra: Grafico tensione-deformazione risultato dai test di flessione su provini rinforzati con fibre di carbonio. Sotto: Andamento dei moduli elastici risultati dai test di flessione su provini rinforzati con fibre di carbonio. ....	61
Figura 4.19 - Confronto tra valori elencati nel datasheet Markforged e valori ottenuti dalla caratterizzazione materiale. ....	63
Figura 5.1 - Mesh applicata al Lifting Tool per le analisi FEM. ....	67
Figura 5.2 - Set up per testare sperimentalmente il Lifting Tool. ....	69
Figura 5.3 - Modifiche al design del Lifting Tool. ....	73
Figura 5.4 - Lifting Tool equipaggiato con tre estensimetri. ....	76
Figura 5.5 - Grafico dell'andamento delle risposte degli estensimetri. ....	77
Figura 5.6 - Sinistra: Rottura dell'attrezzo durante il test. Destra: Dettaglio rottura a taglio della croce superiore. ....	78
Figura 5.7 - Sede di una vite M8 situata nella croce superiore, analizzata utilizzando un contatto non lineare. ....	79

Figura 5.8 - Modifiche del design delle croci di base del Lifting Tool.....	81
Figura 5.9 - Modello per analisi FEM, configurazione con viti di aggancio al pistone a 120°. .....	82
Figura 5.10 - Modello per analisi FEM, configurazione con viti di aggancio al pistone a 180°. .....	83
Figura 5.11 - Set up ultimo test realizzato sul Lifting Tool. ....	85
Figura 5.12 - Configurazione con viti a 120°: grafico dell'andamento delle risposte degli estensimetri.....	86
Figura 5.13 - Configurazione con viti a 180°: grafico dell'andamento delle risposte degli estensimetri.....	87
Figura 6.1 - Modello di partenza per ottimizzazione topologica. A sinistra: vista dall'alto. A destra: vista dal basso. ....	89
Figura 6.2 - Risultato dell'ottimizzazione topologica.....	91

## B. Lista tabelle

Tabella 4.1 - Elenco delle norme seguite per eseguire i test di caratterizzazione. ....	35
Tabella 4.2 - Caratteristiche di riempimento dei provini testati.....	38
Tabella 4.3 - Dimensioni dei provini di trazione senza fibre. ....	40
Tabella 4.4 – Dimensioni dei provini di trazione rinforzati con fibre di carbonio.....	42
Tabella 4.5 – Dimensioni dei provini atti al calcolo della resistenza a compressione. ....	44
Tabella 4.6 - Dimensioni dei provini atti al calcolo del modulo a compressione. ....	45
Tabella 4.7 - Dimensioni dei provini rinforzati atti al calcolo del modulo a compressione. .....	46
Tabella 4.8 - Dimensioni dei provini a flessione.....	50
Tabella 4.9 - Dimensioni dei provini rinforzati a flessione.....	51
Tabella 5.1 - Valori di modulo elastico e coefficiente di Poisson utilizzati nelle analisi FEM. .....	71
Tabella 5.2 - Risultati prima analisi FEM con due moduli elastici differenti. ....	72
Tabella 5.3 - Confronto dei punti critici dell'analisi FEM e del test sperimentale.....	73
Tabella 5.4 - Risultati analisi FEM secondo design. ....	75
Tabella 5.5 - Raffigurazione sul software NX delle configurazioni con viti a 120° e 180°. In rosso sono evidenziate le posizioni delle viti. ....	82
Tabella 5.6 - Risultati analisi FEM ultimo design, due configurazioni d'aggancio col pistone. .....	84

## C. Bibliography

- [1] G. D. Goh, Y. L. Yap, S. Agarwala and W. Y. Yeong, "Recent progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite," *Advanced Materials Technologies*, pp. 1-28, 2018.
- [2] "wartsila.com," Wärtsilä, [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/ita>.
- [3] "bureauveritas.com," Bureau Veritas, [Online]. Available: <https://www.bureauveritas.com>.
- [4] T. Wohlers and T. Gornet, "Wohlers Report 2014 - History of additive manufacturing," 2014.
- [5] I. Jasiuk, D. W. Abueidda, C. Kozuch, S. Pang, F. Y. Su and J. Mckittrick, "An Overview on Additive Manufacturing of Polymers," *JOM*, 2018.
- [6] D. Devine, *Polymer-Based Additive Manufacturing*, Springer International Publishing, 2019.
- [7] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr., Q. Chen and R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers," *Additive Manufacturing*, 2017.
- [8] A. Mokrane, M. Boutaous and S. Xin, "Process of selective laser sintering of polymer powders: Modeling, simulation, and validation," *Comptes Rendus Mecanique*, 2018.
- [9] "custompart.net," [Online]. Available: <https://www.custompartnet.com/>.
- [10] B. Nagarajan, M. Arshad, A. Ullah, P. Mertiny and A. J. Qureshi, "Additive manufacturing ferromagnetic polymers using stereolithography – Materials and process development," *Manufacturing Letters*, vol. 21, 2019.
- [11] D. Kochan, *Solid Freeform Manufacturing*, Volume 19, Elsevier Science, 1993.
- [12] K. Al-Ghamdi, "Sustainable FDM additive manufacturing of ABS components with emphasis on energy minimized and time efficient lightweight construction," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2019.
- [13] M. Heidari-Rarani, M. Rafiee-Afarani and A. M. Zahedi, "Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 175, 2019.

- [14] K. G. Mostafa, C. Montemagno and A. J. Qureshi, "Strength to cost ratio analysis of FDM Nylon 12 3D Printed Parts," *Procedia Manufacturing*, vol. 26, 2018.
- [15] "markforged.com," Markforged, [Online]. Available: <https://markforged.com>.
- [16] H. Prüß and T. Victor, "Design for Fiber-Reinforced Additive Manufacturing," *Journal of Mechanical Design*, 2015.
- [17] T. A. Dutra, R. T. L. Ferreira, H. Borelli Resende and A. Guimarães, "Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019.
- [18] L. G. Blok, M. L. Longana and B. K. Woods, "An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites," *Additive Manufacturing*, vol. 22, 2018.
- [19] O. Diegel, A. Nordin and D. Motte, "DfAM Strategic Design Considerations," in *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, Springer, 2019, pp. 41-70.
- [20] ISO527-4, "Determination of tensile properties of plastics part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites," 1997.
- [21] ISO527-5, "Determination of tensile properties of plastics part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites," 1997.
- [22] ISO604, "Plastics - Determination of compressive properties," 2002.
- [23] ISO178, "Plastics - Determination of flexural properties," 2003.
- [24] ISO14125, "Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties," 1998.
- [25] W. E. Howard, R. Williams and S. C. Gurganus, "Using Additive Manufacturing and Finite Element Analysis in a Design-Analyze-Build-Test Project," in *2015 ASEE Annual Conference & Exposition*, Seattle, 2015.
- [26] S. Rashia Begum and G. Aramaikkannu, "Finite Element Analysis in Additive Manufactured Customised Bone Scaffold," *Biomedical Research*, 2015.
- [27] A. Cattenone, S. Morganti, G. Alaimo and F. Auricchio, "Finite element analysis of Additive Manufacturing based on Fused Deposition Modeling (FDM): distortion prediction and comparison with experimental data," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018.

- [28] A. Lundbäck and L.-E. Lindgren, "Finite Element Simulation to Support Sustainable Production by Additive Manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 7, 2017.
- [29] "Siemens NX 11 Guide," Siemens, [Online]. Available: [http://fis0687:8282/tdoc/nx/11/nx\\_help/#uid:index](http://fis0687:8282/tdoc/nx/11/nx_help/#uid:index).
- [30] F. van der Klift, Master Thesis: 3D Printed Unidirectional Carbon Fibre Reinforced Polymers for Aerospace Applications, University of Technology, 2017.
- [31] "Innovationpost.it," 2019. [Online]. Available: <https://www.innovationpost.it/2019/06/27/un-tool-compatto-di-sollevamento-wartsila-e-bureau-veritas-certificano-il-loro-progetto/>.
- [32] "Altair Inspire 2019 Help," Altair Inspire, 2019. [Online]. Available: [https://solidthinking.com/helpst/2019/inspire/en\\_us/index.html?welcome.htm](https://solidthinking.com/helpst/2019/inspire/en_us/index.html?welcome.htm).