



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE  
MATEMATICHE

Tesi di laurea:

**CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI MECCANICHE DI CAMPIONI IN  
MATERIALE PLASTICO RINFORZATO CON FIBRA DI CARBONIO  
PRODOTTI CON L'ADDITIVE MANUFACTURING**

**COMPARE MECHANICAL PRESTATION OF PLASTIC SAMPLES  
REINFORCED WITH CARBON FIBER PRODUCT WITH ADDITIVE  
MANUFACTURING**

**Relatore:**

Prof. Sasso Marco

**Correlatore:**

Prof. Mancini Edoardo

**Tesi di:**

Ferri Alessandro

Anno Accademico

2019/2020

*Alla mia famiglia,  
alla mia fidanzata Chiara  
e all'azienda Microcarbon.*

# INDICE

<b>1. Introduzione</b> . . . . .	4
<b>2. Fibra di carbonio</b> . . . . .	7
2.1. <i>Caratteristiche meccaniche della fibra di carbonio</i> . . . . .	9
<b>3. Nylon PA66</b> . . . . .	11
3.1. <i>Caratteristiche meccaniche nylon PA66</i> . . . . .	12
<b>4. Costruzione di provini carbon PA</b> . . . . .	13
<b>5. Stampaggio per iniezione plastica</b> . . . . .	14
<b>6. Stampa 3D</b> . . . . .	18
<b>7. Prove distruttive</b> . . . . .	21
7.1. <i>Prova di trazione</i> . . . . .	21
7.1.1. <i>Analisi dati prova di trazione</i> . . . . .	23
7.2. <i>Prova di compressione statica</i> . . . . .	28
7.2.1. <i>Analisi dati prova di compressione statica</i> . . . . .	32
7.3. <i>Prova di compressione dinamica</i> . . . . .	39
7.3.1. <i>Analisi dati prova di compressione dinamica</i> . . . . .	43
<b>8. Conclusioni</b> . . . . .	47
<b>9. Ringraziamenti</b> . . . . .	48
<b>10. Riferimenti.</b> . . . . .	49

# 1. INTRODUZIONE

La seguente tesi ha come obiettivo quello di spiegare il lavoro svolto durante l'esperienza di tirocinio all'interno dell'Università Politecnica delle Marche.

Il lavoro compiuto con la collaborazione del Prof. Sasso Marco, il Prof. Mancini Edoardo e il Dottorando Utzeri Mattia, aveva come obiettivo quello di studiare il comportamento meccanico di alcuni provini in materiale plastico, caricato con fibra di carbonio a fibra corta e prodotti con due diverse tecnologie:

- stampaggio per iniezione
- stampa 3D,

e confrontare le loro prestazioni meccaniche rispetto a quelle di provini in sola plastica.

## **Obiettivi di tale esperienza:**

1. Costruzione di provini in plastica caricati in fibra di carbonio tramite stampaggio ad iniezione e stampa 3D.
2. Analizzare dati ottenuti dalle varie prove distruttive.
3. Dimostrare che i provini in plastica caricati con fibra di carbonio abbiano caratteristiche meccaniche migliori rispetto ai provini in PA66.

Nel seguito della tesi verranno introdotti dei cenni riguardanti la fibra di carbonio come materiale, la sua composizione e la sua creazione con relativi approfondimenti riguardanti le sue caratteristiche meccaniche e i campi di utilizzo.

Verranno inoltre fornite informazioni riguardo ai vari processi di costruzione dei provini e verranno spiegate le varie prove distruttive fatte per ottenere i dati da cui derivano le caratteristiche meccaniche.

La produzione di provini tramite l'iniezione plastica non è stata effettuata in quanto c'è stata difficoltà nel reperire il materiale da inserire nella tramoggia per effettuare la stampa per iniezione.

Il testo che seguirà andrà a comprendere quali operazioni logiche e pratiche sono state effettuate per la produzione di provini in plastica caricati in fibra di carbonio e per l'ottenimento di dati accettabili dalle varie prove distruttive effettuate.

L'esperienza di tirocinio è stata effettuata nel laboratorio di costruzione meccaniche dell'Università Politecnica delle Marche.

### **Che cosa intendiamo quando parliamo di confronto di prestazioni meccaniche?**

Per prima cosa dobbiamo spiegare cosa si intende per prestazioni meccaniche.

Le **prestazioni meccaniche** indicano l'attitudine di un materiale a resistere a sollecitazioni esterne che tendono a deformarlo.

Quest'ultime vengono utilizzate dagli ingegneri quando loro vogliono progettare delle componenti meccaniche per far sì che non si rompano se sottoposte ad un determinato carico.

Il modo per ottenere questi dati dai materiali è tramite **le prove meccaniche** che possono essere **distruttive e non distruttive**, cioè posso portare alla rottura del provino oppure no.

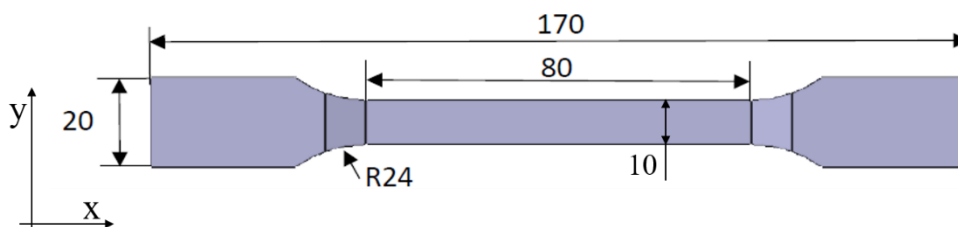
Per effettuare queste prove è necessario creare un provino del materiale che si vuole analizzare; ogni prova meccanica ha il suo provino e per la sua realizzazione bisogna attenersi a determinate dimensioni che vengono fornite da tabelle standardizzate.

Le **prove effettuate in laboratorio** sono di varia natura:

La **prima prova** distruttiva è stata quella a trazione.

Essa è di natura statica e consiste nell'inserire il provino in un'apposita macchina, la quale con delle griffe lo va ad afferrare negli estremi e gli applica una forza crescente a trazione fino a portare alla deformazione dello stesso e successivamente alla sua rottura.

In foto (*figura 1*) è rappresentato un provino per prova a trazione.



*Figura 1 - Provino prova trazione*

La **seconda prova** distruttiva è stata quella di compressione statica.

In essa si utilizza lo stesso macchinario per la prova a trazione, invertendo però le forze.

In questo caso il provino viene compresso lentamente fino a portarlo ad una deformazione plastica e poi a rottura.

La **terza prova** distruttiva è stata quella di compressione dinamica.

Essa consiste nel posizionare il provino tra due barre in alluminio o acciaio per poi andare a creare un urto che va a deformare lo stesso.

Tutto viene ripreso tramite una telecamera che permetterà in seguito di vedere e analizzare la deformazione a rallentatore al computer.

In foto (*figura2*) sono rappresentati i provini sia per prova a compressione statica che dinamica.

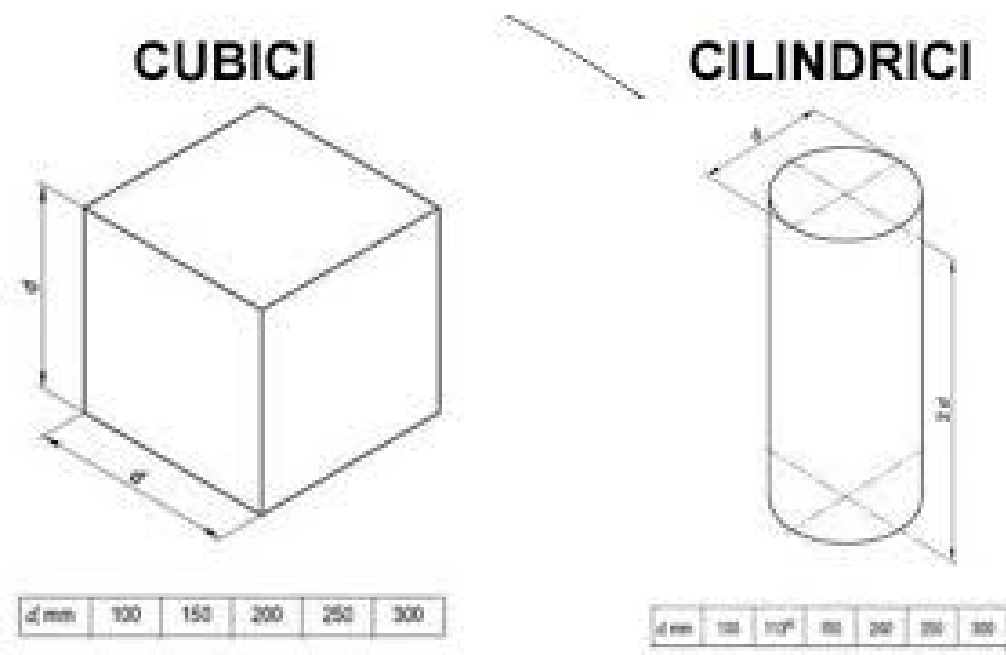
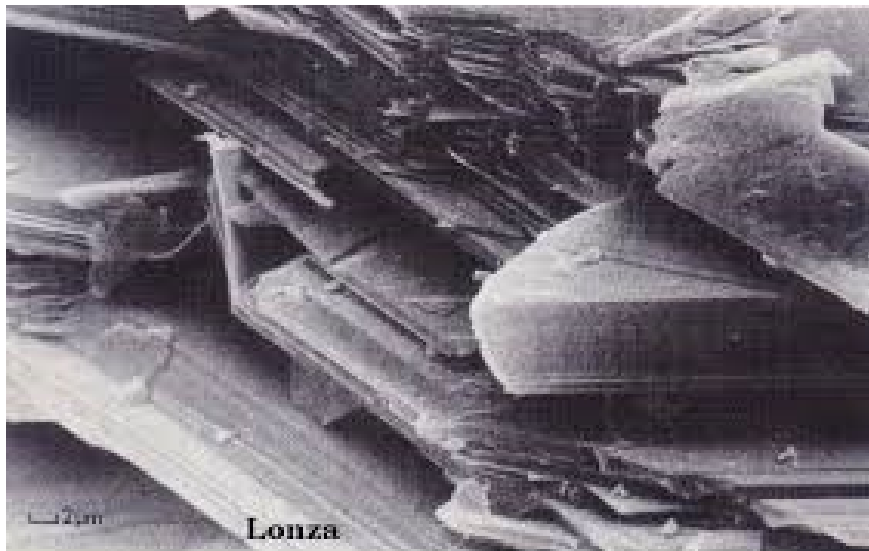


Figura 2 - Provini

## 2. FIBRA DI CARBONIO

Nella tecnologia dei materiali, la fibra di carbonio è un materiale composto da polimeri di atomi di carbonio strutturato in forma grafiteca (*figura 3*) ovvero da esagoni legati tra loro in modo da formare dei piani di carbonio grafiteco.



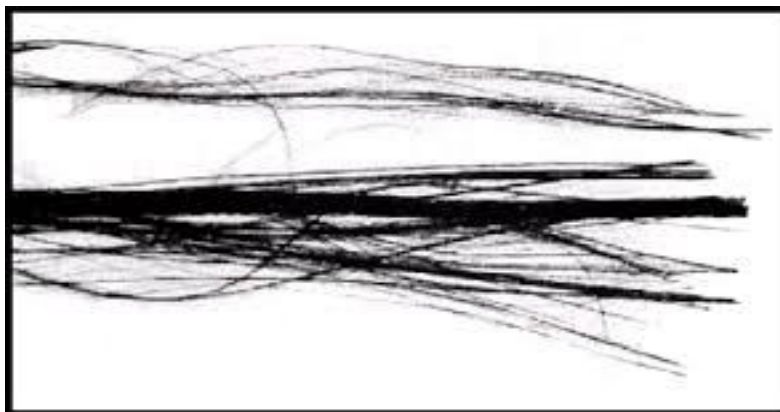
*Figura 3 – Struttura Grafiteca*

Le fibre sintetiche sono ottenute da composti chimici di sintesi derivanti dal carbone e dal petrolio e ridotti in filamenti più o meno lunghi.

Si distinguono in base alle materie prime di partenza che possono essere organiche e inorganiche, e dai processi di fabbricazione.

Esse possono essere prodotte per modificazione di fibre organiche (**PAN**) oppure per distillazione del petrolio o catrame (**PITCH**).

La fibra di carbonio si presenta come dei filamenti (*figura 4*) di diametro compresi tra 5 e 15 μm.



*Figura 4 - Filamenti di carbonio*

La fibra di carbonio possiede elevata conducibilità termica ed elettrica, e ottime caratteristiche meccaniche come modulo di elasticità e resistenza alle sollecitazioni.

Difatti, viene largamente utilizzata in ambito aerospaziale, aeronautico e nel motorsport, dove vi è necessità di materiali leggeri e molto resistenti.

I filamenti di carbonio si possono dividere in due tipologie:

1. **Fibre corte** (con cui si sono realizzati i provini) che hanno due possibilità di disposizione di fibre:
  - a. **Random:** le fibre sono disposte in maniera casuale per cercare di avere la stessa resistenza in tutte le direzioni.
  - b. **Unidirezionale:** le fibre sono posizionate lungo la stessa direzione per privilegiare la resistenza lungo una sola direzione.
2. **Fibre lunghe** che sono largamente utilizzate e possono essere disposte in maniera:
  - a. **unidirezionale**
  - b. **bidirezionale** per avere ottima resistenza in due direzioni.
  - c. **multidirezionale** per avere resistenza in tutte le direzioni.



*Figure 5 e 6 - Tessuto in fibra di carbonio*



La fibra di carbonio ha un comportamento anisotropo, al contrario dell'acciaio, cioè a seconda di dove si ha lo sforzo, il materiale ha un comportamento diverso.

Spesso la fibra di carbonio viene utilizzata come materiale aggiuntivo per migliorare le caratteristiche meccaniche e si aggrega alla resina creando materiali compositi.

## 2.1. CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA FIBRA DI CARBONIO

La fibra di carbonio ha caratteristiche meccaniche molto migliori rispetto a quelle dell'acciaio o l'alluminio.

A differenza dell'acciaio nel diagramma sforzo-deformazione la fibra di carbonio ha un elevato modulo di Young ma una piccola, quasi inesistente, fase elastoplastica.

In *figura 7* possiamo vedere il suo diagramma mentre in *figura 8* sono riassunte nella tabella le sue caratteristiche meccaniche.

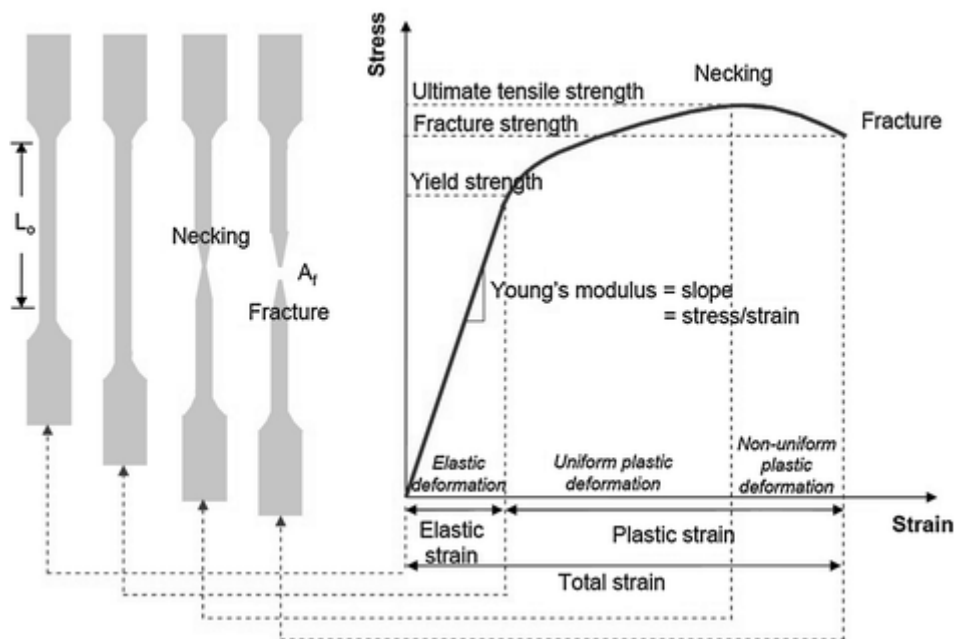


Figura 7 - Diagramma prova a trazione in generale

		Carbonio ad alta resistenza (HS)	Carbonio ad alto modulo (HM)	Carbonio ad altissimo modulo (UHM)	Acciaio FeB 44K
densità	kg/m <sup>3</sup>	1800	1850	2100	7850
modulo elastico E	GPa	230	400	700	210
resistenza meccanica a trazione	MPa	5000	3000	1500	540
deformazione a rottura	%	2.0	0.9	0.3	20
resistenza specifica	MPa/kg	2.78	1.62	0.71	0.07

Figura 8 - Tabella caratteristiche fibra di carbonio

Dai seguenti dati possiamo confrontare come la fibra di carbonio ha migliori caratteristiche meccaniche rispetto all'acciaio.

### 3. NYLON 66 PA

Il **PA66** (*figura 9*) è un materiale termoplastico tecnico che viene ottenuto dalla polimerizzazione di esametildiammina e acido adipico.

Rispetto al PA6, il PA66 presenta una rigidità superiore ma una resilienza inferiore.

Il PA66, inoltre, è un materiale semicristallino-cristallino che presenta uno dei punti di fusione più elevati tra le poliammidi disponibili in commercio. Il materiale presenta qualità di rigidità e consistenza anche a temperature elevate.

Il PA66 non assorbe umidità dopo lo stampaggio, ma la ritenzione non è elevata come per il PA6.

L'assorbimento di umidità dipende dalla composizione del materiale, dallo spessore delle pareti e dalle condizioni ambientali.

La quantità di assorbimento di umidità influisce sulla stabilità dimensionale e sulle proprietà da prendere in considerazione per la progettazione del prodotto.

Per migliorare le proprietà meccaniche possono essere aggiunti vari agenti modificatori, un esempio è il vetro che è uno dei filler più comunemente utilizzati.

La possibile aggiunta di elastomeri, ad esempio EPDM o SBR, vanno a migliorare la resilienza.

Il PA66 è resistente alla maggior parte dei solventi, ma non ad agenti ossidanti o acidi forti.



*Figura 9 - Nylon 66 PA*

## 3.1 CARATTERISTICHE MECCANICHE NYLON PA66

Il Nylon PA66 è caratterizzato da ottime proprietà meccaniche: buona resistenza all'usura, basso coefficiente d'attrito, elevato punto di fusione, buona resistenza all'urto ed elevata resistenza alla fatica.

Possiede anche un'ottima resistenza ai solventi organici con alcune eccezioni come l'acido formico.

Altre sue caratteristiche sono la facile stampabilità, l'elevata gamma di polimeri colorati e l'ottima brillantezza delle superfici.

I polimeri rinforzati con fibra di vetro o carbonio sono caratterizzati da elevata rigidità, buona stabilità dimensionale, ottima resistenza termica, buona resistenza all'usura e basso coefficiente d'attrito.

Il Nylon PA66 ha cicli di stampaggio molto rapidi grazie a un punto di fusione più alto ( $255\div 260^{\circ}\text{C}$ ), una durezza superiore, una buona resistenza all'abrasione, e facilità nello stampaggio di particolari molto sottili.

Il Nylon 6, al contrario, è più economico, di maggiore lavorabilità ma ha un punto di fusione più basso di  $217\div 223^{\circ}\text{C}$ .

Possiede però un'ottima resistenza all'urto, in particolare su pezzi condizionati ed è più morbido rispetto al Nylon 66.

Però i valori del Nylon PA66 come durezza, resistenza alla trazione, compressione, torsione, abrasione ed urto delle poliammidi raggiungono livelli che non si trovano contemporaneamente in altre materie plastiche.

La classe chimica di appartenenza, le diverse tecniche di fabbricazione, il contenuto in monomeri (specie nel caso della poliammide 6) fanno sì che le caratteristiche possono variare entro limiti abbastanza ampi.

Inoltre, va sempre tenuta presente la grande influenza esercitata dal tenore di umidità, e per questo motivo si usa riportare per la maggior parte delle determinazioni i valori che si riferiscono al materiale allo stato secco, e quelli relativi allo stesso materiale con contenuto in umidità all'equilibrio con l'atmosfera al  $50\div 60\%$  di UR.

Nella poliammide 66 i moduli elastici a  $20^{\circ}\text{C}$  e con tenore di umidità del 2.5% e 8.5% sono rispettivamente del 60% e del 20% ca. del modulo del materiale allo stato secco.

Inoltre, il decremento del modulo per effetto della temperatura è tanto più sensibile quanto più alto è il contenuto in acqua.

## 4. COSTRUZIONE DI PROVINI IN CARBON PA

Per la produzione di questi provini abbiamo utilizzato come materiale il nylon 66 caricato con fibra di carbonio a fibra corta denominato **CARBON PA**.

La **costruzione di provini** è avvenuta tramite due processi differenti:

- **Stampaggio 3D** verticale.
- **Stampaggio 3D** orizzontale.

Per le varie prove sono necessari differenti provini, infatti per la prova a trazione è necessario costruire un provino secondo determinati standard imposti a forma di rettangolo come in *figura 1*, invece per la prova di compressione sia dinamica che statica la forma del provino è anch'essa determinata da standard che implicano la costruzione di cilindri di dimensione (8x8) (6x6) come in *figura 2*.

L'obiettivo originale era costruire i provini sia per stampaggio 3D che per iniezione plastica ma quest'ultimo procedimento non è stato possibile realizzarlo come indicato precedentemente nella prefazione. Si presenta comunque tale metodo di costruzione.

## 5. STAMPAGGIO A INIEZIONE PLASTICA

Lo **stampaggio a iniezione** è un processo di produzione industriale in cui il materiale plastico viene fuso (plastificato) e iniettato ad elevata pressione all'interno di uno stampo chiuso, che viene aperto dopo la solidificazione del manufatto.

Generalmente, l'iniezione avviene a pressioni e temperature abbastanza elevate tali da consentire lo scorrimento del materiale fuso all'interno del macchinario e dello stampo.

Il principio di funzionamento dello stampaggio a iniezione è simile alla pressofusione e da essa derivato.

Il macchinario, detto **pressa ad iniezione**, (*figure 10 e 11*) che permette l'operazione di stampaggio a iniezione è costituito da un "gruppo iniezione" collegato a un "gruppo chiusura".

Il gruppo iniezione ha il compito di riscaldare fino a fusione e quindi plastificare il materiale e spingerlo poi all'interno dello stampo (grazie all'azione di un pistone o di una vite mobile, detta anche **vite punzonante**), mentre il gruppo chiusura ha il compito di tenere chiuso lo stampo (idraulicamente o meccanicamente) durante la fase di iniezione, contrastando l'alta pressione generata dal gruppo iniezione, che tenderebbe ad aprire le due metà dello stampo.

I **costituenti principali** delle presse per iniezione sono:

- **un piano fisso**, al quale si fissa un semi-stampo (normalmente il semi-stampo femmina, o matrice);
- **un piano mobile**, al quale si fissa l'altro semi-stampo (punzone) e che si apre alla fine del processo di raffreddamento per permettere la fuoriuscita del pezzo stampato;
- un **sistema di supporto e guida del piano mobile** (generalmente 4 colonne a sezione cilindrica);
- un **meccanismo di chiusura dello stampo** (generalmente una ginocchiera azionata da pistoni idraulici);
- un **gruppo di plastificazione ed iniezione**, costituito da una vite senza fine, a profilo e sezione variabile, contenuta in un cilindro riscaldato elettricamente; la vite ha la possibilità di ruotare intorno al proprio asse (caricamento e fusione del materiale), retrocedendo durante la fase di

caricamento del granulo, e di spostarsi assialmente in avanti, agendo da pistone, durante la fase di iniezione.

- la **testa del cilindro** porta un ugello che, attraverso un foro nel piano fisso della pressa, è mantenuto a contatto del foro di iniezione dello stampo;
- una **piastra di estrazione**, che permette il distacco del pezzo sformato dallo stampo;
- una **centralina oleodinamica**, che fornisce l'energia per gli azionamenti;
- un **basamento di supporto**;
- un'unità di **governo elettronica**, assistita da calcolatori.

Diverse sono le tipologie di **presse ad iniezione**: da quelle ad azionamento totalmente idraulico alle più moderne con azionamento elettrico, le quali consentono grazie all'impiego di servomotori e controlli numerici un più veloce ed accurato controllo del processo nonché un risparmio energetico di circa il 20-30%; esistono anche presse "ibride" con gruppo chiusura idraulico e gruppo di plastificazione/iniezione elettrico, oppure gruppo chiusura e plastificazione elettrici, e piastra di estrazione e movimenti ausiliari idraulici.

La disposizione più diffusa è quella orizzontale (movimento di apertura degli stampi orizzontale), ma per lavorazioni particolari si utilizzano presse verticali.

All'inizio di un ciclo di stampaggio a iniezione i granuli del polimero plastico da stampare, contenuti nella tramoggia, vengono fatti cadere all'interno del cilindro della vite di alimentazione e plastificazione, che, posta in rotazione, porta i granuli, fondendoli, fino alla parte anteriore. Quì, per reazione, la vite punzonante arretra fino al raggiungimento della quota definita da programma come "dosatura".

Dalla zona iniziale (alimentazione) fino alla zona finale (fusione) all'interno del cilindro, i granuli vengono riscaldati da una serie di resistenze elettriche fino oltre la loro temperatura di fusione e "plastificati" dalla rotazione della vite seguendo il programma preimpostato dall'operatore in funzione del tipo di materiale, della grammatura del pezzo e della compattezza richiesta dal pezzo finito.

La pressa ha nel contempo provveduto alla chiusura dello stampo e può quindi iniziare la fase di iniezione rapida del materiale fino a circa il 98% del peso del pezzo.

Il completamento al 100% del pezzo avviene con la seconda fase (fase di "compattamento" o "mantenimento"), mantenendo il materiale in pressione fino a quando il pezzo stampato non si solidifica.

Questa seconda fase realizza la "compensazione" del ritiro volumetrico che la materia plastica, raffreddandosi naturalmente, subisce.

A questo punto la logica di gestione della pressa, una volta terminato l'eventuale tempo aggiuntivo di raffreddamento necessario, dà il via all'apertura dello stampo per permettere l'estrazione del pezzo stampato.

Questa può avvenire:

- con un sistema a punzone meccanico,
- con martinetto idraulico,
- mediante estrazione pneumatica,
- svitamento elettrico o idraulico.

Quindi il pezzo espulso dallo stampo cade in un canale sottostante che lo fa depositare in un idoneo contenitore da dove verrà prelevato per le successive fasi di selezione, controllo ed eventuale successiva rifinitura del pezzo.

Nelle aziende ad elevata automazione, per aumentare la produzione e permettere il lavoro continuo h 24/24, si ricorre a robot cartesiani o a manipolatori antropomorfi che prelevano il pezzo o più pezzi e li pallettizzano secondo uno specifico programma di lavoro.

Può iniziare quindi un nuovo ciclo, con una nuova fase di alimentazione del materiale.

I pezzi ottenuti richiedono in certi casi operazioni accessorie come l'asportazione del materiale degli attacchi di iniezione (materozze), la sbavatura, l'esecuzione di fori ecc., ma spesso sono perfettamente finiti.

È possibile realizzare il co-stampaggio di inserti metallici filettati o particolari in acciaio che, alla fine del processo, risulteranno saldamente inglobati al manufatto.

Negli ultimi anni si assiste al graduale inserimento di presse da iniezione di tipo elettrico, che permettono velocità di movimento dei piani elevate, silenziosità, e bassa manutenzione, pulizia ed elevata ripetibilità dei cicli.

Ulteriori ampliamenti del processo di iniezione sono raggiunti mediante la costruzione di presse con più gruppi di iniezione, capaci di iniettare due o più materiali contemporaneamente, oppure presse con più gruppi chiusura che permettono di realizzare fasi di stampaggio multiple su stampi rotanti.

Il concetto di funzionamento rimane però lo stesso appena descritto, con l'aggiunta dell'eventuale sovrapposizione di movimenti.

L'alto costo delle attrezzature necessarie alla produzione di particolari plastici (gli stampi) ha richiesto la creazione di software dedicati alla pre-progettazione del manufatto, simulando il processo di stampaggio con algoritmi estremamente complessi.



Il risultato di queste elaborazioni può essere utilizzato per progettare lo stampo in modo semi-definitivo.

Solitamente sono sempre necessarie messe a punto in macchina del processo simulato, in quanto la simulazione teorica fornisce indicazioni valide quanto i dati immessi mentre la costruzione reale comporta tolleranze e precisione di lavorazione spesso non analizzabili dal software.

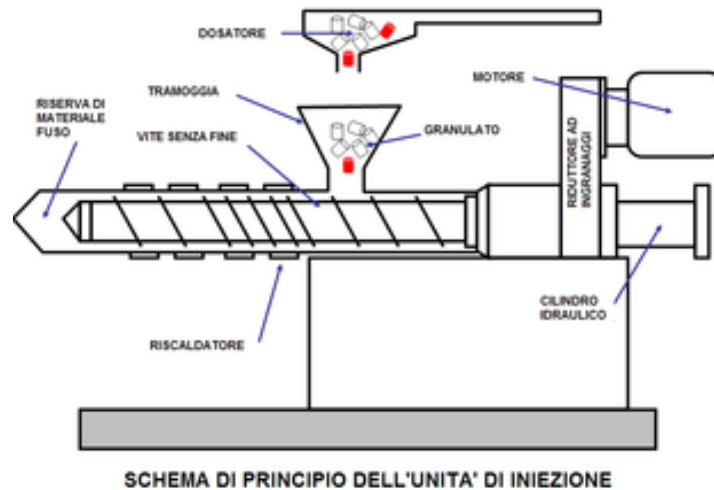


Figure 10 e 11 - Macchinario per iniezione

## 6. STAMPA 3D

Con **stampa 3D** si intende la realizzazione di oggetti tridimensionali mediante produzione additiva, partendo da un modello 3D digitale.

Il modello digitale viene prodotto con programmi dedicati e successivamente elaborato per essere poi realizzato con diverse tecnologie, tra cui anche quella che costruisce prototipi strato dopo strato, attraverso una stampante 3D.

Le **stampanti 3D**:

- sono generalmente più veloci, più affidabili e più semplici da usare rispetto ad altre tecnologie per la produzione sottrattiva.
- offrono la possibilità di stampare e assemblare parti composte da diversi materiali con diverse proprietà fisiche e meccaniche in un singolo processo di costruzione.
- le tecnologie di stampa 3D avanzate creano modelli che emulano molto da vicino l'aspetto e le funzionalità dei prototipi.

Una stampante tridimensionale (*figura 12*) lavora prendendo un file 3D da un computer e utilizzandolo per fare una serie di porzioni in sezione trasversale. Ciascuna porzione è poi stampata l'una in cima all'altra per creare l'oggetto 3D. Un **metodo di stampa 3D** consiste in un sistema di stampa ad **estrusione di materiale**: la stampante crea il modello uno strato alla volta, depositando un filamento di plastica. Il processo viene ripetuto finché non è stampato ogni strato. Questa tecnologia è l'unica che consente la stampa di prototipi interamente a colori.

Questo metodo permette anche di realizzare sporgenze e inoltre è riconosciuto come il processo più veloce.

All'interno delle tecnologie di stampa 3D per estrusione di materiale si trova la FDM (Fused Deposition Modelling) o anche chiamata FFF (Fused Filament Fabrication) ed è una delle tecnologie più diffuse e più vecchie per la produzione di componenti termoplastici. L' FDM si basa su un ugello che deposita un polimero fuso strato dopo strato per creare la geometria del pezzo. I polimeri più conosciuti che vengono utilizzati col metodo FDM sono il PLA e l'ABS.

- Il PLA viene estruso normalmente a una temperatura di fusione variabile fra i 180 °C e i 220 °C, mentre l'ABS fra i 220 °C e i 250 °C.
- Al contrario dell'ABS il PLA non emette fumi potenzialmente dannosi quando viene fuso ed estruso.
- Gli oggetti stampati in ABS sono meno fragili, maggiormente resistenti alle alte temperature e più flessibili degli oggetti stampati in PLA.

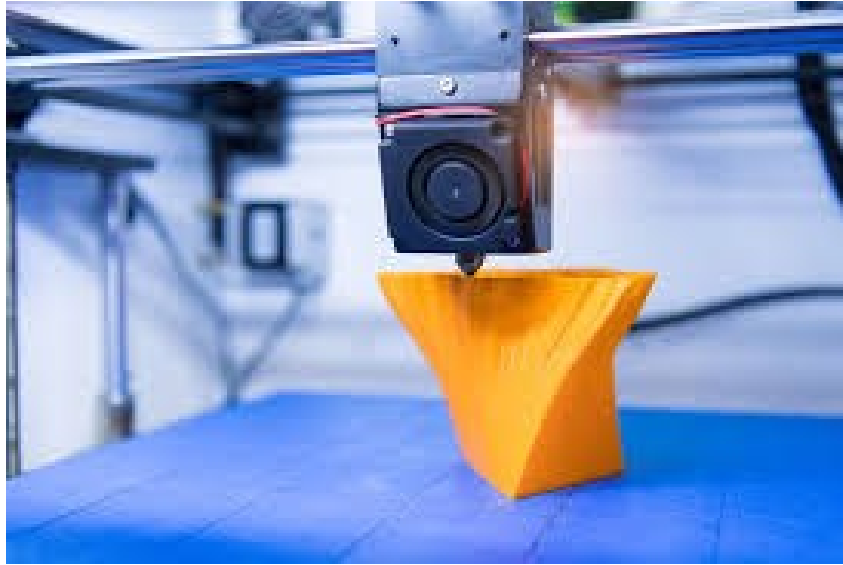


Figura 12 - Stampante 3D

Durante il tirocinio abbiamo potuto utilizzare la stampante ROBOZE 3D 400 + (figura 14) con un fornello in cui scaldare la bobina di Carbon PA per facilitare la stampa ed evitare uno shock termico.

Alcune caratteristiche di stampa (figura 13):

- preriscaldamento della bobina a 120° per 4 ore.
- mantenimento temperatura della bobina a 70° durante lo stampaggio.
- temperatura del letto di stampa 45°.
- temperatura dell'estrusore in fase di stampa 240°.

Gcode	Nozzle diameter	Layer height	Infill angle	Infill density	Infill pattern	Top /Bottom	n. Outer shell	Raft – Infill	Printing speed
Simplify 3D	0,6 mm	0,2 mm	0° respect to X axis – all layer	100% - all layer	Zig-Zag	Same Infill and layer height	1	2 Layer - 40% Infill	3000 mm/min

Figura 13- caratteristiche di stampa

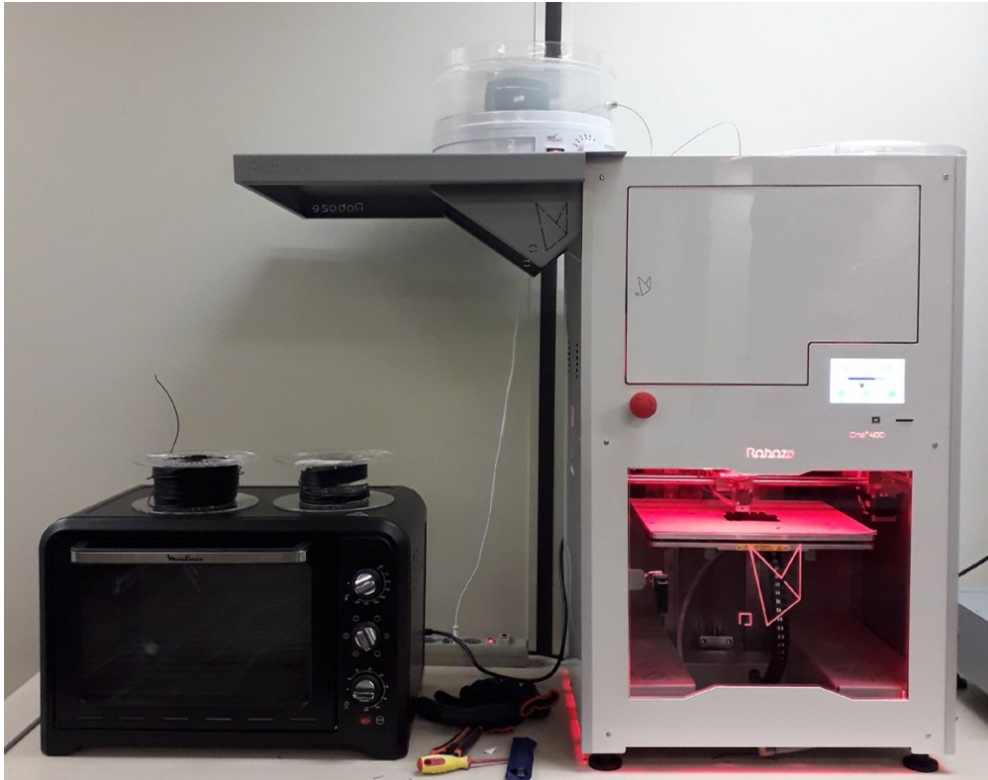


Figura 14 - stampante ROBOZE 400 +

## 7. PROVE DISTRUTTIVE

Le **prove meccaniche distruttive** sono prove effettuate per ricavare le caratteristiche meccaniche di ogni materiale, creando provini e utilizzandoli in determinate prove dove vengono stressati e portati a rottura mediante l'utilizzo di forze di trazione, compressione e impatto.

Da queste prove vengono ottenuti dei risultati che elaborati ci portano ad ottenere le caratteristiche di ogni materiale che noi esaminiamo.

Le prove devono essere effettuate a determinate temperature per evitare che la composizione chimica del materiale venga modificata.

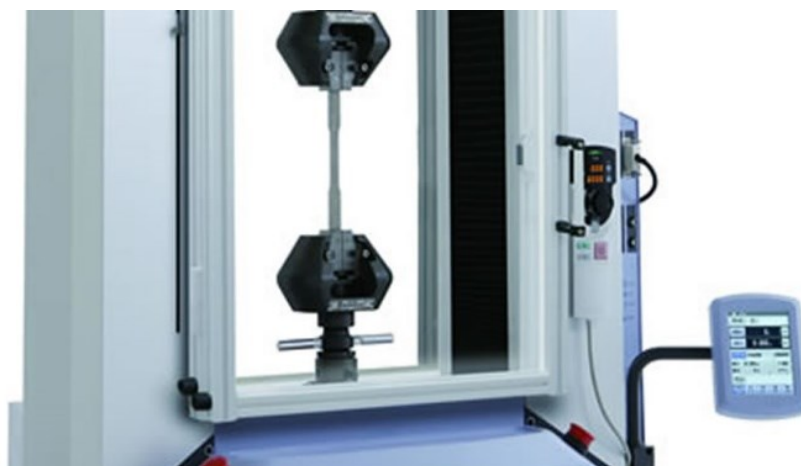
In questa tesi verranno analizzate le **prove a trazione compressione statica e a compressione dinamica**.

### 7.1 PROVA DI TRAZIONE

La **prova di trazione**, definita dalla norma UNI EN 10002 è la più importante tra le prove meccaniche distruttive.

Consiste nel sottoporre un provino del materiale, opportunamente prelevato e preparato, ad uno sforzo di trazione che si prolunga fino alla rottura, allo scopo di determinare una serie di caratteristiche meccaniche.

La macchina (*figura 15*) presenta due afferraggi per poter bloccare il provino, la parte sottostante resta ferma mentre la parte soprastante inizia ad allontanarsi molto lentamente.



*Figura 15 - Macchina prova a trazione*

La sua forza di trazione viene misurata tramite una cella di carico posta sopra, mentre all'interno, degli estensimetri, misurano l'allungamento del provino in funzione della forza per poi descrivere un grafico.

Il tutto è ripreso da una telecamera per vedere l'allungamento nell'arco del tempo e la rottura del provino.

In seguito, analizziamo un diagramma (figure 16 e 17) di una prova a trazione effettuata su un provino in metallo.

Il diagramma presenta:

- Un **primo tratto rettilineo**, durante il quale il provino ha comportamento elastico.  
Ciò equivale a dire che se il carico viene rimosso, il provino ritorna esattamente alla forma e alla dimensione iniziali.
- Un **tratto curvo** (la concavità è verso il basso) in cui il comportamento è ancora elastico (si parla di elasticità non lineare).  
Questo tratto però è difficilmente rilevabile e non ha importanza ai fini dell'accettazione del materiale.
- Lo **snervamento**, ossia una rapida riduzione del carico, che, giunto alla tensione di snervamento superiore bruscamente cade alla tensione di snervamento inferiore, e successivamente rimane quasi stazionario attorno a questo valore, mentre la deformazione cresce notevolmente.
- La **zona delle grandi deformazioni**, ossia quella in cui il carico raggiunge un massimo e poi decresce fino alla rottura finale.

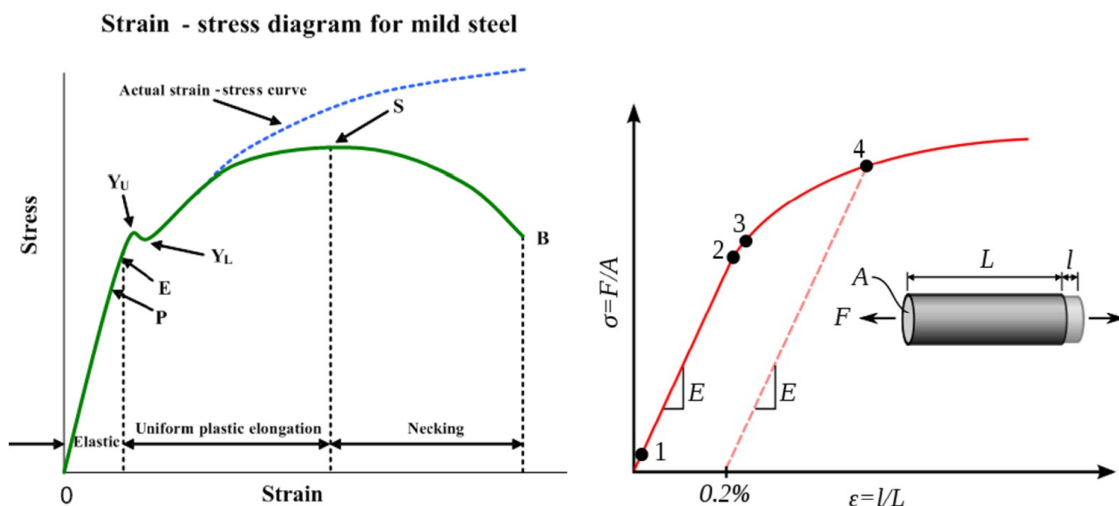


Figure 16 e 17- Grafici sforzo/deformazione

## 7.1.1 ANALISI DATI PROVA DI TRAZIONE

Durante i test alla macchina per prova a trazione sono state effettuate **sette prove** sui provini ma solo quattro hanno dato dati interessanti.

In seguito, verranno analizzati i dati tramite il programma Excel e verranno esaminati due tipi di curve: quella **ingegneristica** con tensione e deformazione e quella **vera** con tensione vera e deformazione vera.

Si può notare che nel primo tratto, quello elastico, le due curve si eguagliano, mentre appena si esce dalla zona elastica la curva ingegneristica cresce di più rispetto a quella vera.

Successivamente abbiamo isolato la parte di curve rettilinee della fase elastica per poter ricavare il **modulo di elasticità**, tramite il comando aggiungi trend line. Il modulo di elasticità è una grandezza, caratteristica di un materiale, che esprime il rapporto tra tensione e deformazione nel caso di condizioni di carico mono-assiale ed in caso di comportamento di tipo "elastico" del materiale. È definito come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione.

I provini analizzati seguono la norma ASTM D638 con le misure indicate nella *figura 1*.

### Legenda:

- **S** = spessore
- **L** = lunghezza iniziale
- **W** = larghezza
- **E** = modulo di elasticità

### **Test 3:**

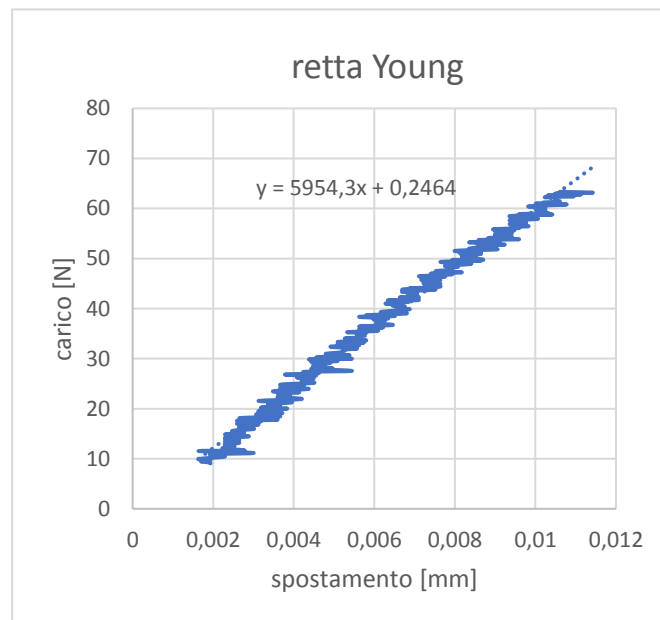
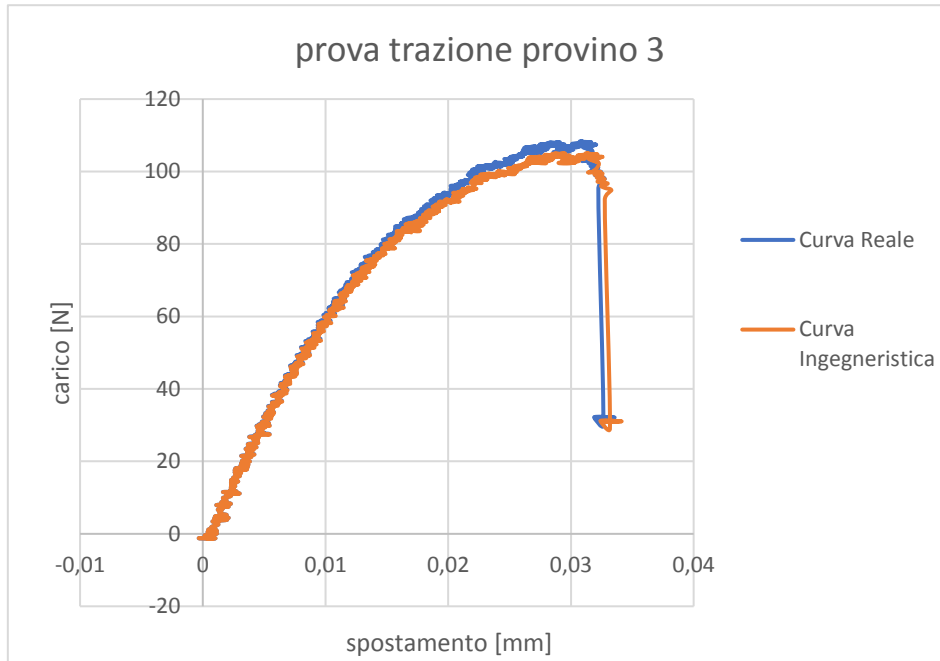
Dimensioni provino:

S = 6,5 mm

L = 55 mm

W = 10 mm

E = 5954MPa





## Test 5:

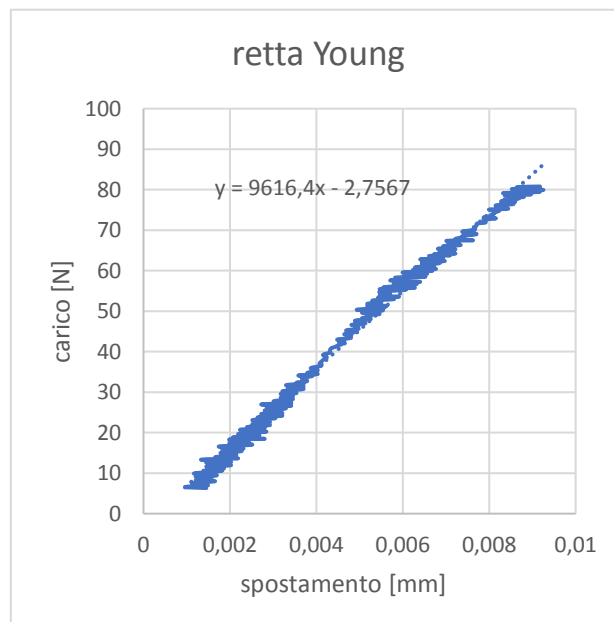
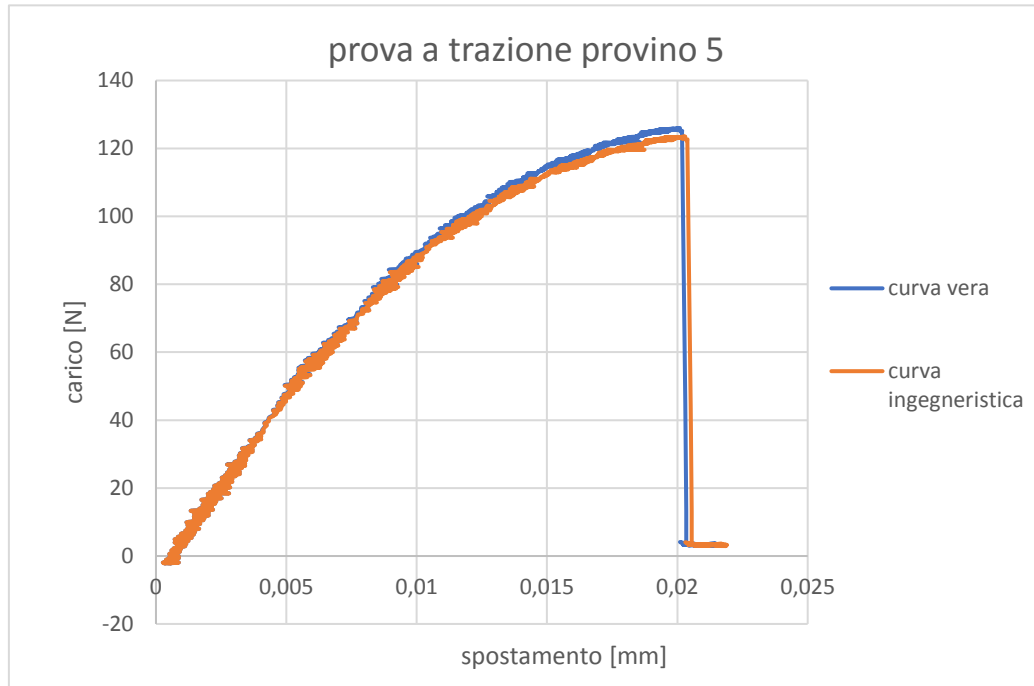
dimensioni provino:

$S = 4,5 \text{ mm}$

$L = 80 \text{ mm}$

$W = 10 \text{ mm}$

$E = 9616 \text{ MPa}$



## Test 6:

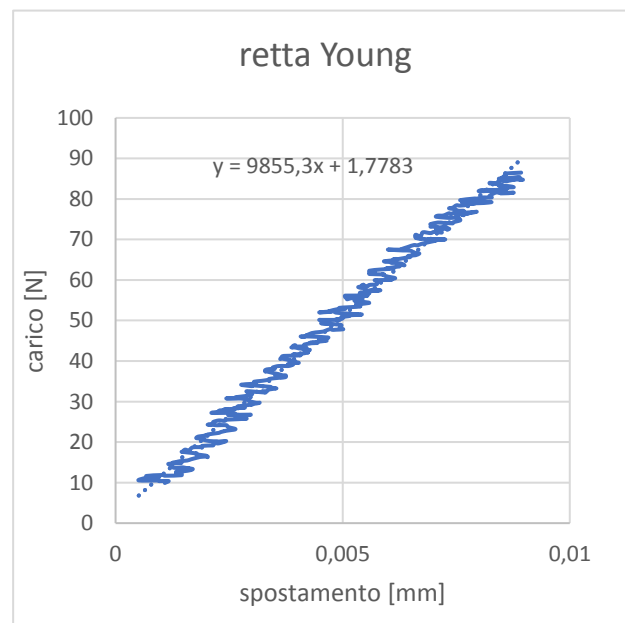
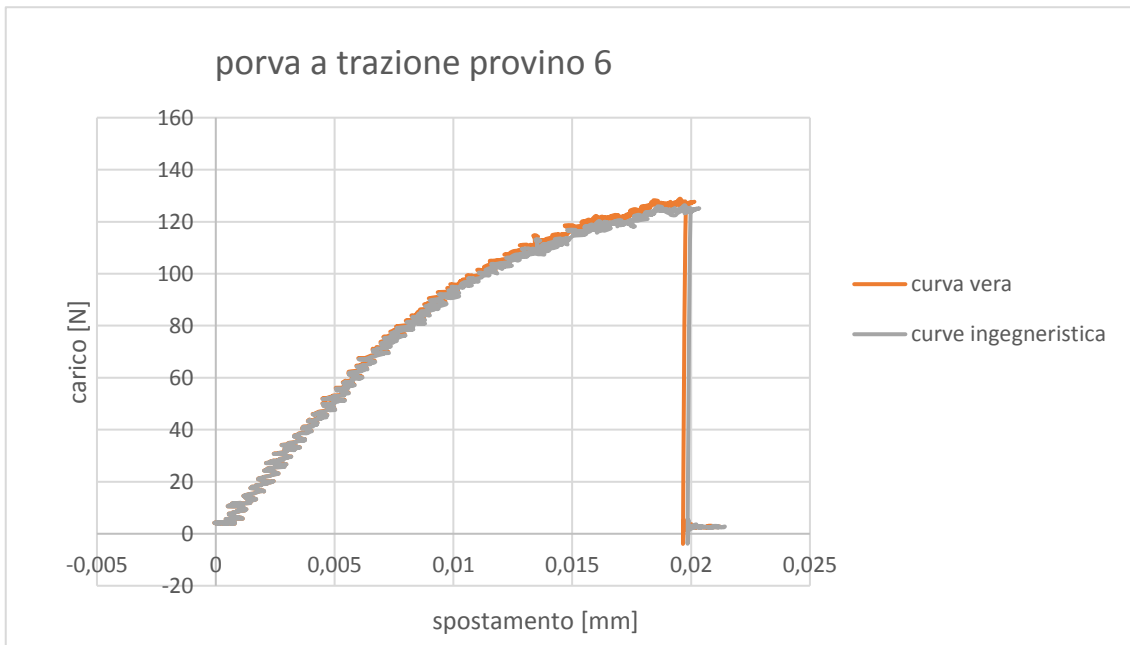
dimensioni provino:

S = 4,5 mm

L = 80 mm

W = 10 mm

E = 9855MPa



## Test 7:

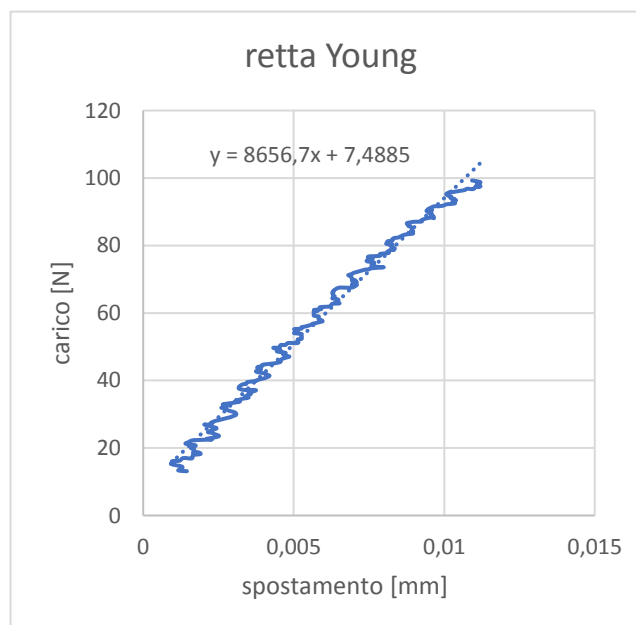
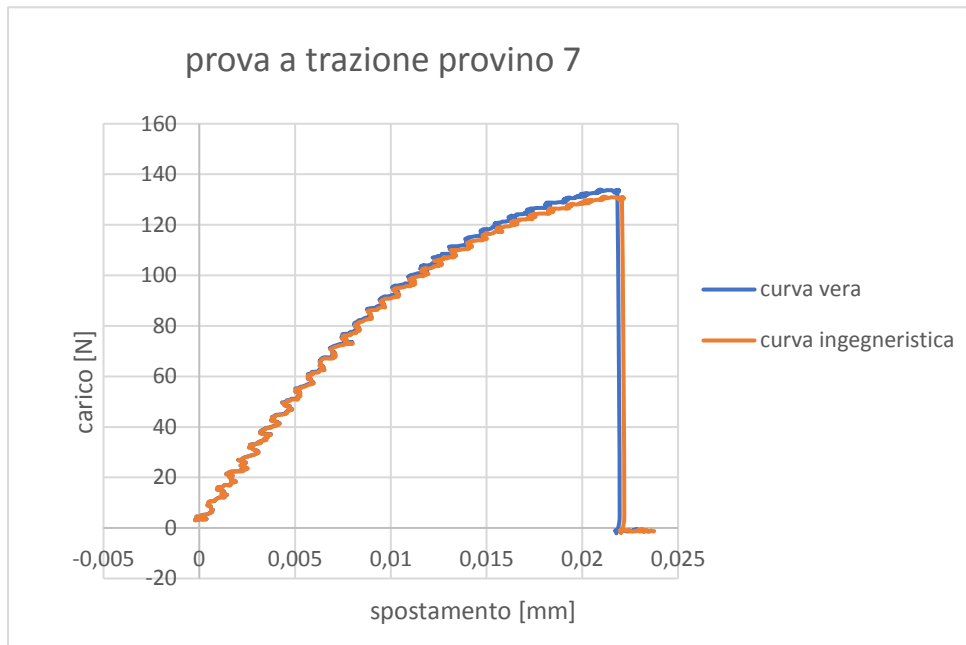
dimensioni provino:

$S = 4,3 \text{ mm}$

$L = 80 \text{ mm}$

$W = 10,3 \text{ mm}$

$E = 8656 \text{ Mpa}$



Dopo l'analisi delle quattro prove possiamo dedurre che tutti i provini analizzati hanno sviluppato comportamenti abbastanza simili tra loro nel limite dello sforzo a rottura.

La situazione cambia quando analizziamo i moduli elastici, infatti nel test tre esso risulta molto più piccolo rispetto agli altri che hanno riportato valori simili tra loro.

Questa discrepanza nei risultati può essere dovuta a diverse cause, come la possibilità di aver disposto le fibre in maniera diversa nei provini oppure ad un'impresione di produzione dei provini tramite stampa 3D.

Queste non è dato saperlo in quanto non sono stato io ad effettuare le prove di trazione.

## 7.2 PROVA DI COMPRESSIONE STATICA

La **prova di compressione statica** viene eseguita comprimendo un provino di forma cilindrica fra due superfici piane e parallele.

In molte lavorazioni per deformazione plastica (stampaggio, laminazione, estrusione), la deformazione si ottiene principalmente tramite un'azione di compressione esercitata sul pezzo da deformare.

La prova di compressione (*figura 18*) riproduce uno stato di tensione paragonabile a quello impresso al pezzo durante le lavorazioni predette ed è perciò indicativa ai fini del comportamento del materiale.

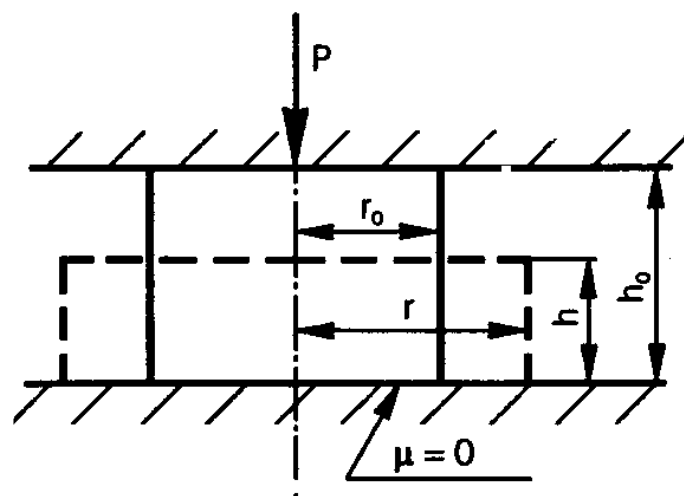


Figura 18 - Deformazione Provino

$$\varepsilon = \ln (h_0/h) = \ln (A/A_0)$$

A = area deformata

A<sub>0</sub> = area iniziale

h = altezza finale

h<sub>0</sub> = altezza iniziale

In generale sono prove molto complicate visto che tra il provino e i piatti della macchina l'attrito crea **tensioni tangenziali** che introducono uno stato di tensione tridimensionale (creando quindi il fenomeno di imbarilottamento o **barelling** (figura 19)).

Il valore in modulo della tensione di snervamento a trazione è simile a quello che si ottiene in compressione per i metalli.

La prova di compressione statica è composta da due piani (figura 20 e 21).

Il sottostante resta immobile mentre quello superiore si abbassa lentamente creando una compressione del provino e di conseguenza l'imbarilottamento dello stesso fino alla sua rottura.

Nei provini duttili il materiale si deforma costantemente e si abbassa, mentre nei provini di materiale fragile si rompe con una crepa a 45°.

Nel piano superiore vi è inserita una cella di carico per controllare la forza applicata mentre sul provino vengono messe due forchette con estensimetri (figura 22) per misurare l'abbassamento.

Il tutto è registrato da una telecamera (figura 25) che riprende la prova in modo da poter vedere successivamente la compressione più velocemente al computer.

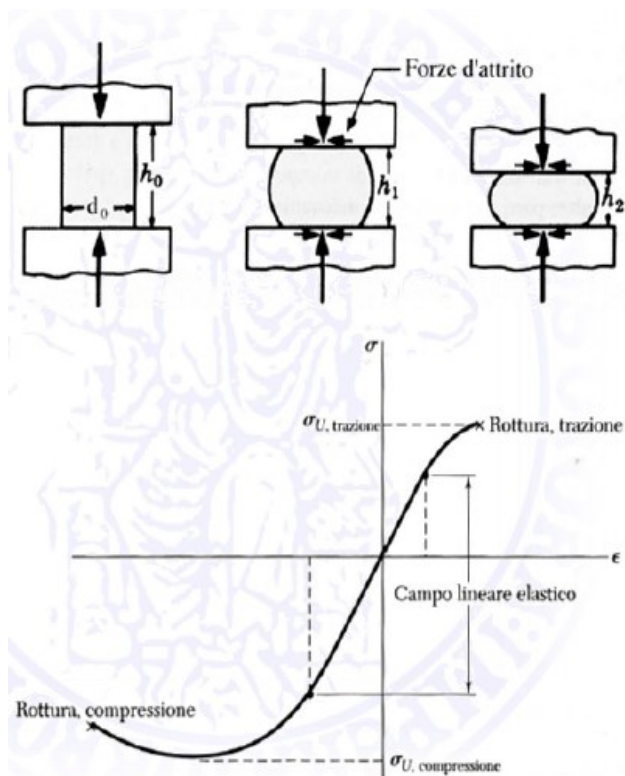


Figura 19 - Deformazione provino compressione

Il tempo della prova è di circa 15 minuti.



*Figura 20 e 21 - Macchina prova a compressione statica*



*Figura 22 - Estensimetri*

Si può osservare che, dopo la fase di compressione statica, il provino di diametro 8 mm e altezza 8mm ha riportato una rottura in diagonale di 45° e una riduzione della sua altezza di 5.5 mm (figura 23 e 24).

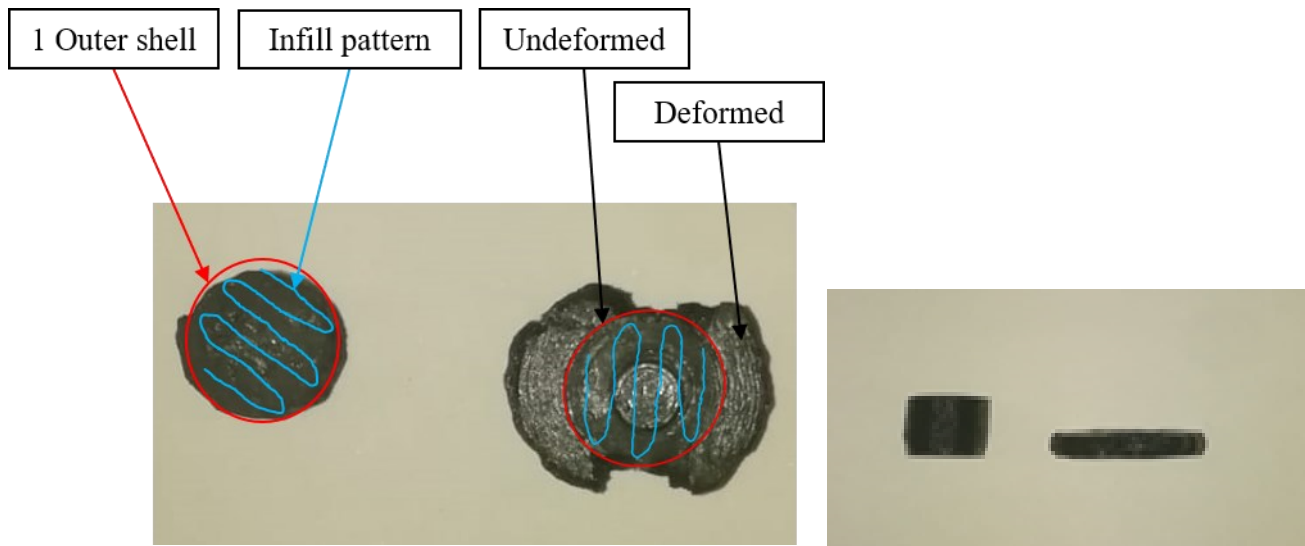


Figure 23 e 24 - Provino in Carbon PA deformato

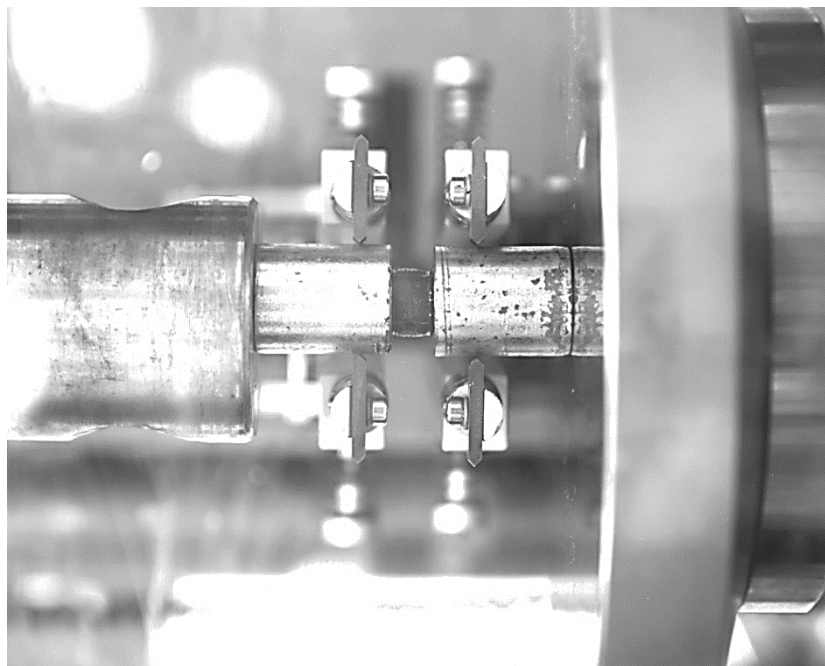


Figura 25 - Provino alla telecamera

## 7.2.1 ANALISI DATI PROVA COMPRESSIONE STATICA

Nella compressione statica sono stati analizzati i dati tramite il programma Excel e sono state ricavate:

- **la curva ingegneristica** con tensione e deformazione
- **la curva vera** con tensione vera e deformazione vera e sono state messe a confronto.

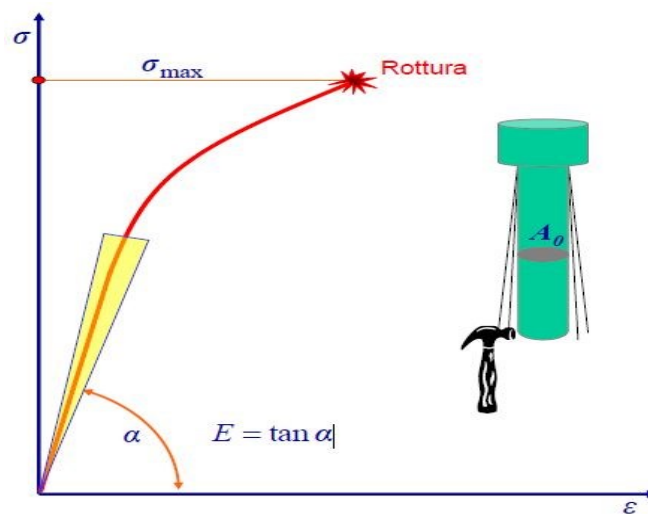


Figura 26 - Diagramma Compressione

Nella *figura 26* si può notare che nel primo tratto, quello elastico, le due curve si eguagliano, mentre appena si esce dalla zona elastica la curva ingegneristica cresce molto di più rispetto a quella vera.

Successivamente, abbiamo isolato la parte di curve rettilinee della fase elastica per poter ricavare il modulo di elasticità, tramite il comando aggiungi trend line. Il **modulo di elasticità** è una grandezza, caratteristica di un materiale, che esprime il rapporto tra tensione e deformazione nel caso di condizioni di carico mono-assiale ed in caso di comportamento di tipo "elastico" del materiale. È definito come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione.



$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ sigma massima}$$

$$F = \int_{A_0} \sigma dA \text{ forza}$$

$$\Delta l = l_f - l_0 \text{ delta spostamento}$$

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ deformazione ingegneristica}$$

$$\delta = \ln \frac{l_f}{l_0} = \ln (1 + \varepsilon) \text{ deformazione vera}$$

$$\sigma = E * \varepsilon \text{ relazione costitutiva}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ modulo di Young}$$

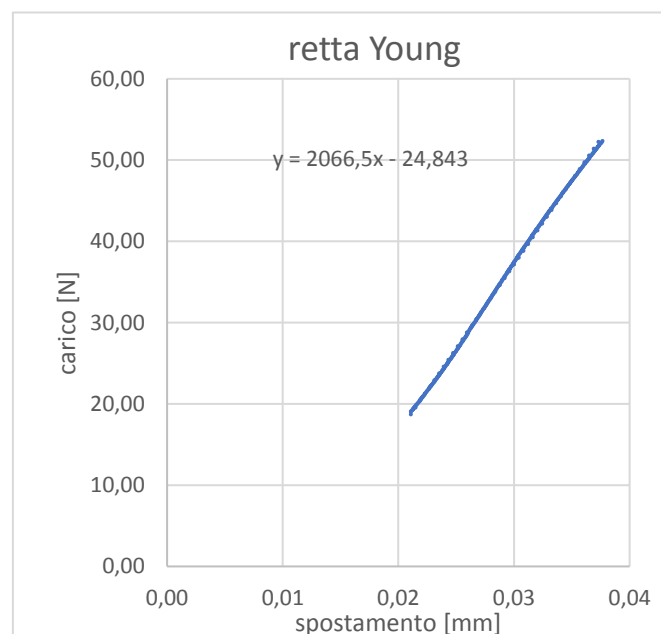
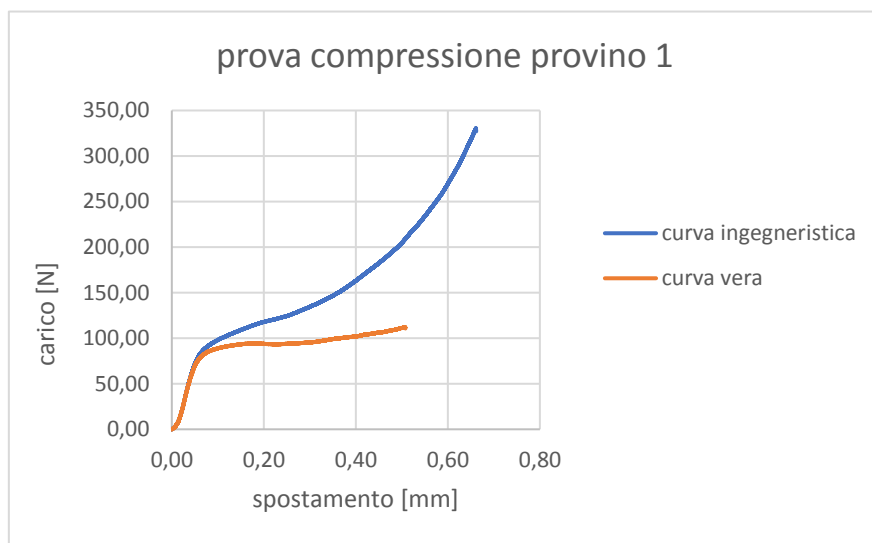
## Test 1

Nel primo test possiamo osservare come le due curve, quella vera e quella ingegneristica, coincidano per il primo tratto per poi dividersi.

Nell'immagine sottostante notiamo la retta estrapolata dalle due curve da cui otteniamo il modulo di Young del provino.

$$D = 8,20 \text{ mm} \quad L = 8,35 \text{ mm} \quad E = 2066 \text{ Mpa} \quad A_o = 52,85 \text{ mm}^2$$

Provino stampato **verticalmente**

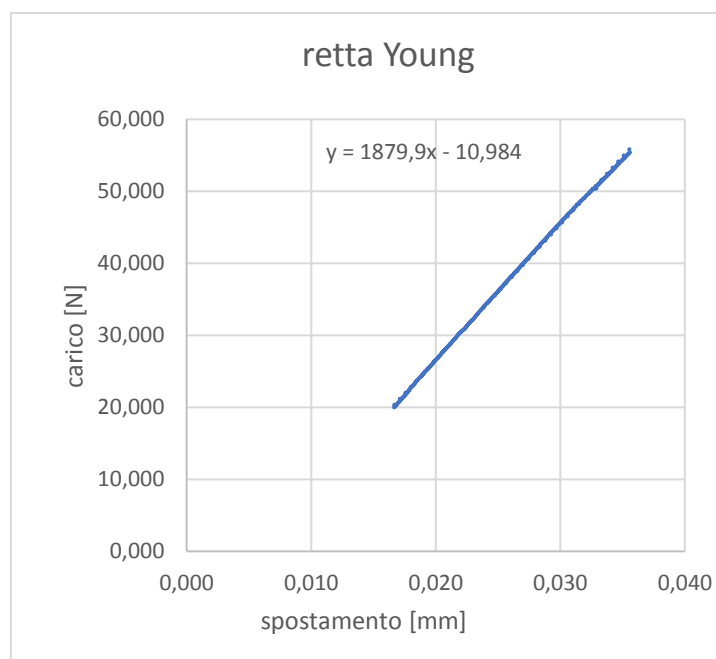
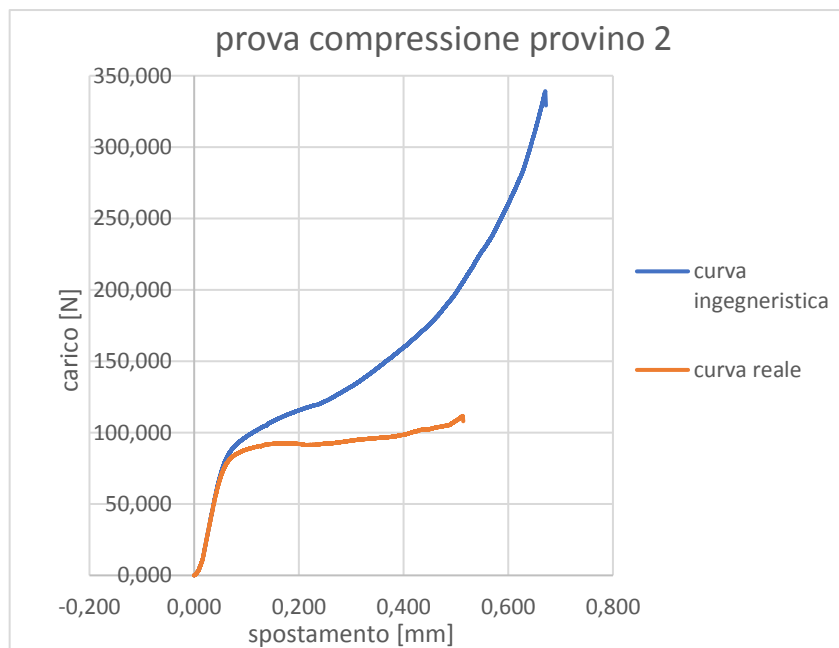


## Test 2:

Nel secondo test notiamo sempre le due curve, quella vera e quella ingegneristica, che coincidono nel primo tratto per poi dividersi, come nel test precedente, con la differenza che avendo dimensioni diverse del provino il modulo di Young risulta differente.

$$D = 8,19 \text{ mm} \quad L = 8,25 \text{ mm} \quad E = 1879 \text{ Mpa} \quad A_o = 52,68 \text{ mm}^2$$

Provino stampato **verticalmente**

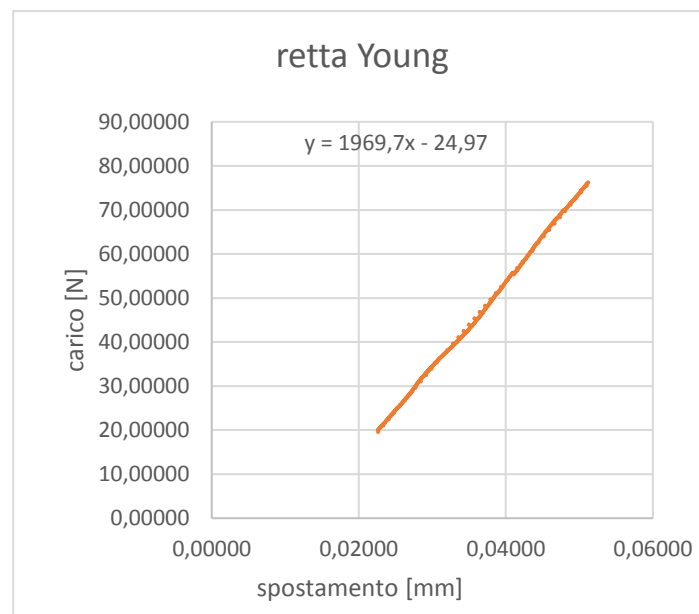
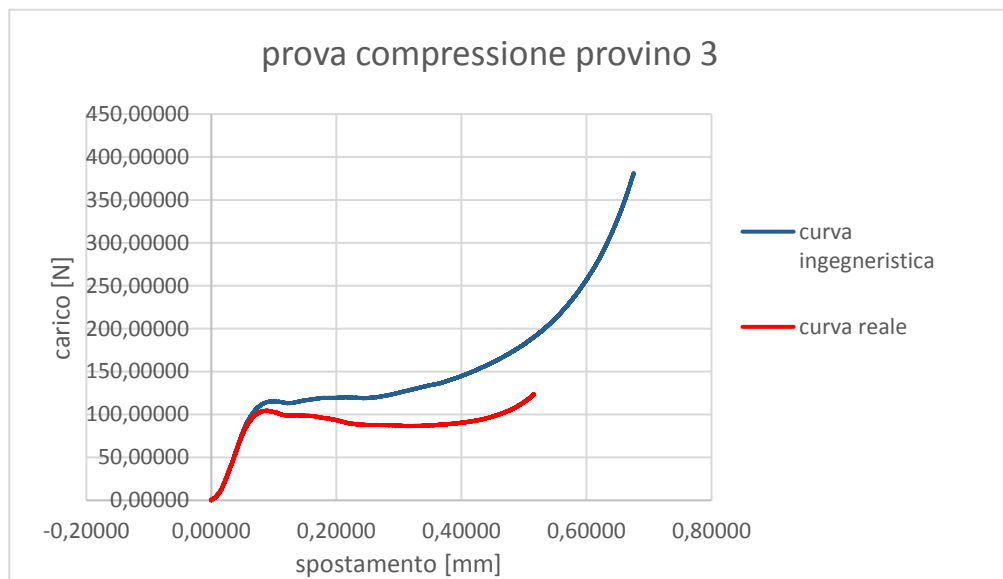


### Test 3:

Nel terzo test abbiamo sostituito il provino con uno stampato longitudinalmente cioè con le fibre disposte lungo la direzione del provino per notare le differenze, abbiamo potuto notare che il comportamento delle due curve è uguale ai test precedenti ed abbiamo ottenuto un modulo di elasticità simile.

$$D = 8,19 \text{ mm} \quad L = 8,25 \text{ mm} \quad E = 1969 \text{ Mpa} \quad A_o = 52,68 \text{ mm}^2$$

Provino stampato **longitudinalmente**

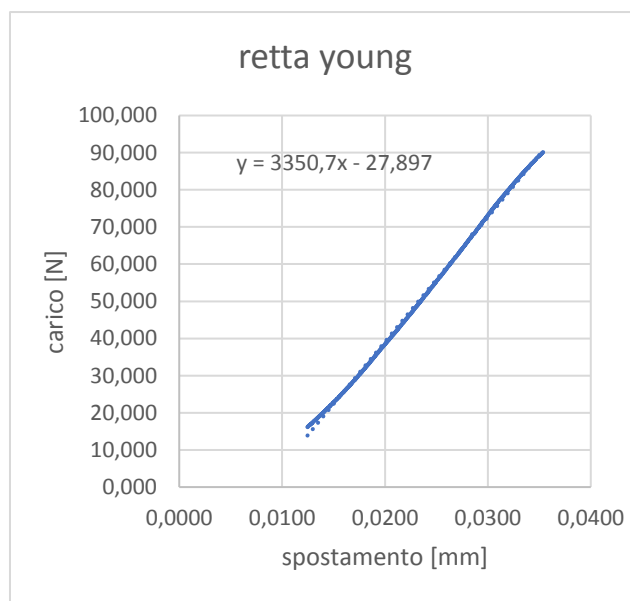
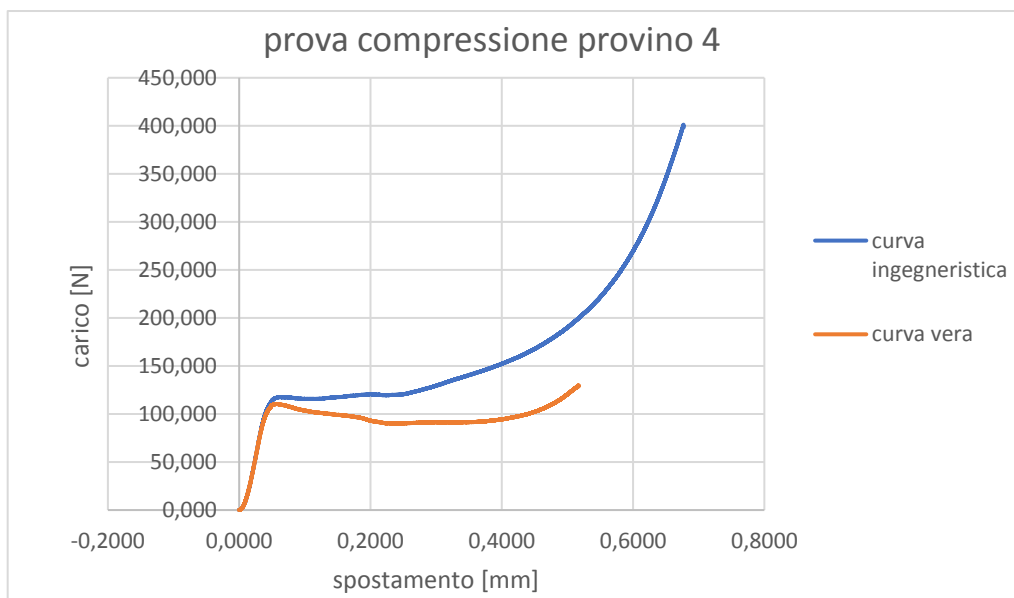


### Test 4:

Nel quarto test abbiamo utilizzato sempre un provino stampato longitudinalmente cioè con le fibre disposte lungo la direzione del provino, e abbiamo notato che il comportamento delle due curve è uguale ai test precedenti con una piccola differenza: è presente un'inclinazione più accentuata e questo va a modificare il modulo di elasticità che risulta maggiore delle prove precedenti.

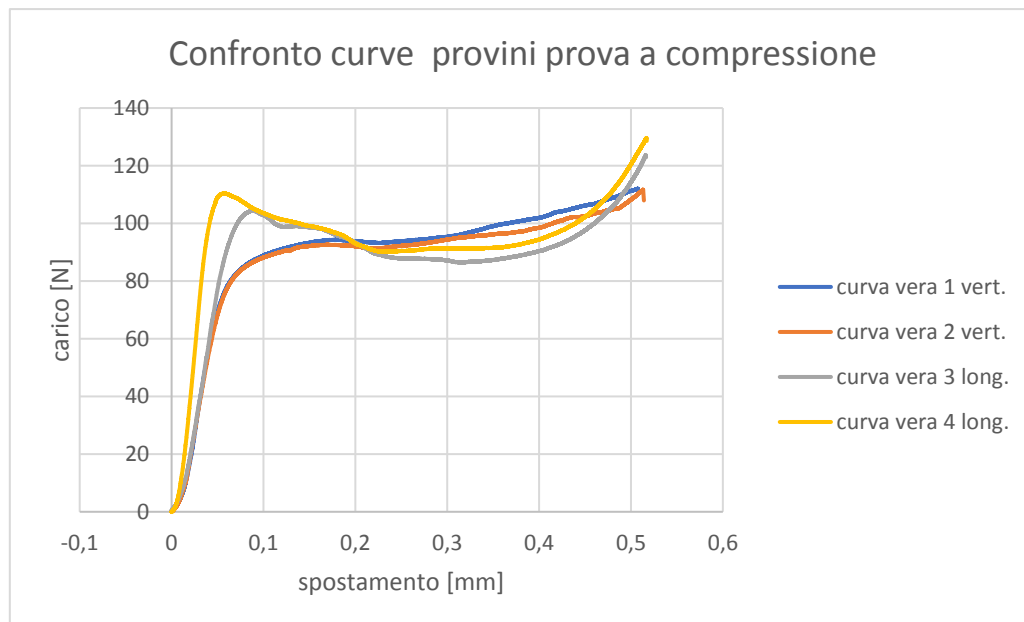
$$D = 8,21 \text{ mm} \quad L = 8,01 \text{ mm} \quad E = 3350 \text{ Mpa} \quad A_o = 50,47 \text{ mm}^2$$

provino stampato **longitudinalmente**



In conclusione, di questi test possiamo dire che dopo aver svolto le quattro prove, i dati raccolti sono abbastanza simili per quanto riguarda la tensione di rottura, invece per quanto riguarda i moduli di elasticità i test uno, due e tre risultano molto simili tra loro, mentre il test quattro ha un modulo molto maggiore. Questo può derivare da una non precisa produzione di provini causato dalla stampa 3D.

Detto questo possiamo dedurre che il carbon PA può cambiare le sue proprietà a seconda di come vengono disposte le fibre nel provino durante la sua produzione.



	<b>Modulo young ( MPa )</b>	<b>Sigma massima ( MPa )</b>	<b>Allungamento massimo ( mm )</b>
<b>Test 3 <u>trazione</u></b>	5954	105	0.032
<b>Test 5 <u>trazione</u></b>	9616	124	0.021
<b>Test 6 <u>trazione</u></b>	9855	124	0.020
<b>Test 7 <u>trazione</u></b>	8656	138	0.023
<b>Test 1 <u>compressione</u></b>	2066	112	0.52
<b>Test 2 <u>compressione</u></b>	1879	115	0.50
<b>Test 3 <u>compressione</u></b>	1969	120	0.52
<b>Test 4 <u>compressione</u></b>	3350	125	0.51

*Tabella 1 - Risultati Prove*

## **7.3 PROVA DI COMPRESSIONE DINAMICA**

La **prova a compressione** dinamica viene effettuata con barra di Hopkinson (split Hopkinson bar) (*figure 27 e 28*) ed è un metodo di prova dei materiali verificato e collaudato.

A differenza delle macchine di prova quasi statiche, la barra Hopkinson consente di determinare le proprietà dei materiali in condizioni dinamiche.

Il metodo che utilizza la barra gode di crescente popolarità in molte applicazioni grazie alla sempre più potente tecnologia di misura e prova.

Esso viene usato per determinare dinamicamente le costanti dei materiali, ad esempio il modulo elastico o la sollecitazione meccanica.

Il **modulo elastico** è una costante del materiale che fornisce la misura di quanto si deforma un componente quando ad esso viene applicata una forza. L'ingegnere elettrico inglese Bertram Hopkinson propose per primo tali misurazioni nel 1914.

La configurazione utilizzata oggi giorno si basa su una modifica sviluppata da Herbert Kolsky a Londra nel 1949.

Per questo, essa è talvolta denominata anche barra frazionata Hopkinson Kolsky.

Il campione di materiale è posizionato fra due barre nella barra di Hopkinson: la barra incidente e la barra trasmittente.

Il suo funzionamento consiste nel montaggio di un anello sacrificale temprato tra la barra di percussione ed un motore elettrico.

Il motore inizia a tirare indietro la barra di percussione ma poiché quest'ultima è bloccata, tutto il movimento va a deformare l'anello sacrificale fino alla sua rottura. In tale momento viene rilasciata tutta l'energia accumulata dall'anello che va a percuotere la barra incidente provocando un impulso d'urto. Quest'ultimo corre lungo la prima barra: una parte dell'impulso viene riflesso dall'estremità della barra, l'altra parte attraversa il campione di materiale e la barra trasmittente.

Gli **estensimetri (ER)** installati sulle superfici della barra incidente e della barra trasmittente misurano le deformazioni provocate dall'impulso d'urto e consentono di determinare le ampiezze dell'impulso d'urto applicato alla barra incidente, dell'impulso riflesso e dell'impulso trasmesso.

Vi è posizionata anche una telecamera di fronte al provino che permette di riprendere la deformazione e successivamente di rivedere tale prova a rallentatore sul computer.

La differenza fra l'impiego della barra di Hopkinson e quello di una macchina prova materiali statica è il comportamento del materiale che viene usualmente determinato dalla curva sollecitazione / deformazione rilevata con una macchina di prova in condizioni quasi statiche - cioè con ratei di deformazione (molto) piccoli.

Tuttavia, con carichi dinamici la risposta del materiale può essere sostanzialmente diversa.

In questo caso il progettista deve conoscere anche le proprietà dinamiche del materiale.



Normalmente, una semplice macchina di prova materiali non è in grado di applicare gli alti ratei di deformazione richiesti.

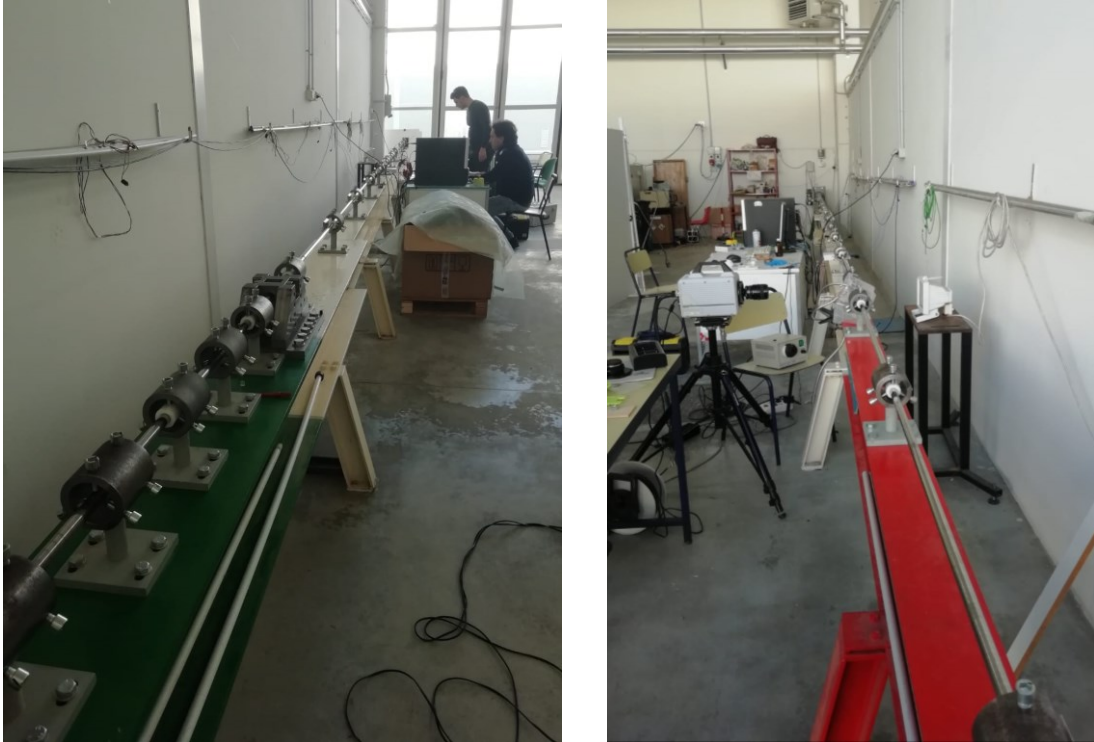


Figura 27 e 28 - Barra di Hopkinson

La prova di compressione dinamica è stata effettuata in laboratorio, ma visto che il nostro provino era in Carbon PA e, non essendo resistente come l'acciaio, abbiamo dovuto adottare delle modifiche alla barra di Hopkinson per poter avere uno spettro di segnale ampio e pulito.

Per iniziare, abbiamo sostituito la barra di output, che in precedenza era in acciaio, con una in alluminio.

Questa infatti si deformava, assorbiva maggiormente l'urto e ci dava anche l'opportunità di acquisire il segnale in maniera migliore riducendo la velocità dell'urto.

Un'altra modifica che abbiamo inserito è stata quella del **pulse shape** (figure 29 e 30): è un filtro che viene inserito tra le barre di input quando avviene la spinta, questo si deforma e attenuisce l'onda d'urto quando è troppo forte.

Può essere fatto di diversi materiali più o meno resistenti, quelli che abbiamo usato noi erano in alluminio di diverse dimensioni.

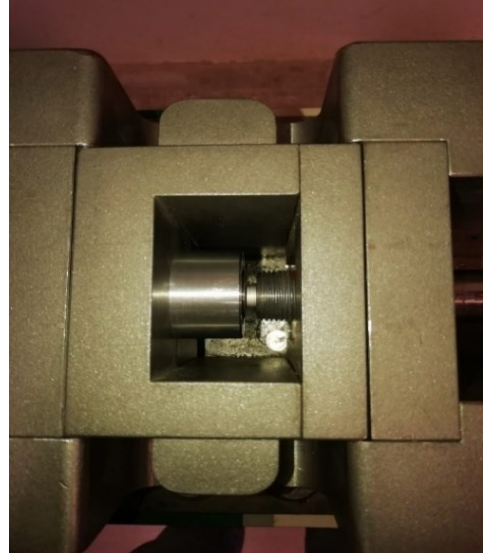
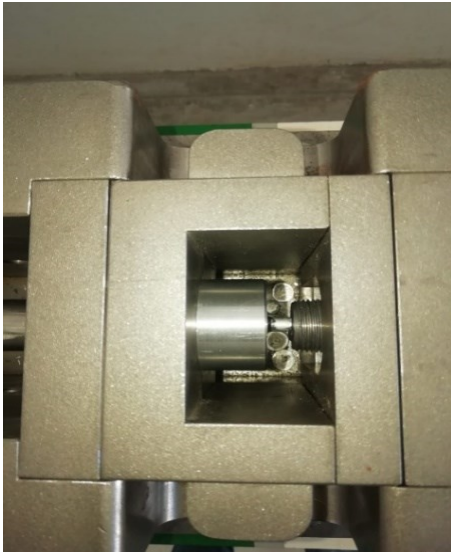


Figure 29 e 30 – pulse-shape alluminio

Successivamente abbiamo posizionato delle celle di carico per misurare la velocità della forza, e degli estensimetri (figura 32) con configurazione a ponte intero di Wheatstone (figura 31) sulla barra di output per misurare la deformazione dopo che l'urto è passato attraverso il provino.

In questo modo, possiamo analizzare il comportamento del materiale quando è sottoposto ad una deformazione di compressione dinamica.

Infine, sempre per poter ottenere un segnale pulito, il computer per analizzare i dati è stato collegato ad un gruppo di continuità, che funge sia da filtro per eventuali interferenze nella rete di alimentazione elettrica, sia da batteria in caso di mancata elettricità per il funzionamento del tutto.

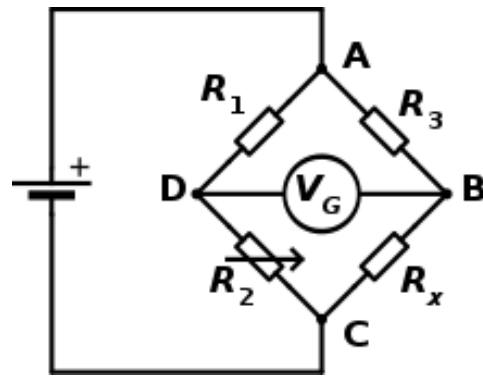


Figura 31 - schema ponte di wheatstone

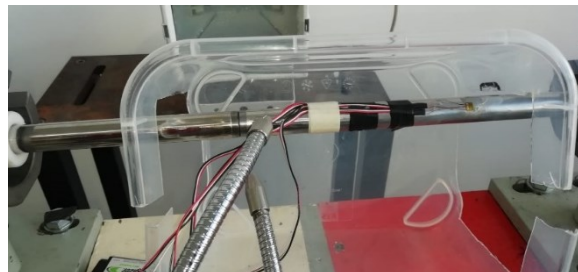


Figura 32 - Estensimetri posizionati sulla barra di output

## 7.3.1 ANALISI DATI PROVA DI COMPRESSIONE DINAMICA

Nell'analisi della prova a compressione dinamica abbiamo effettuato diversi test sia su provini stampati longitudinalmente sia su provini stampati verticalmente.

Tramite l'utilizzo della videocamera abbiamo potuto catturare l'impatto e la deformazione ad alta velocità del provino e tramite l'analisi su Matlab ed Excel siamo riusciti a sviluppare le curve di rottura del materiale.

Tutti i provini durante l'impatto con la barra sono esplosi però hanno avuto comportamenti differenti nel deformarsi e distruggersi.

Analizzando le immagini abbiamo notato che:

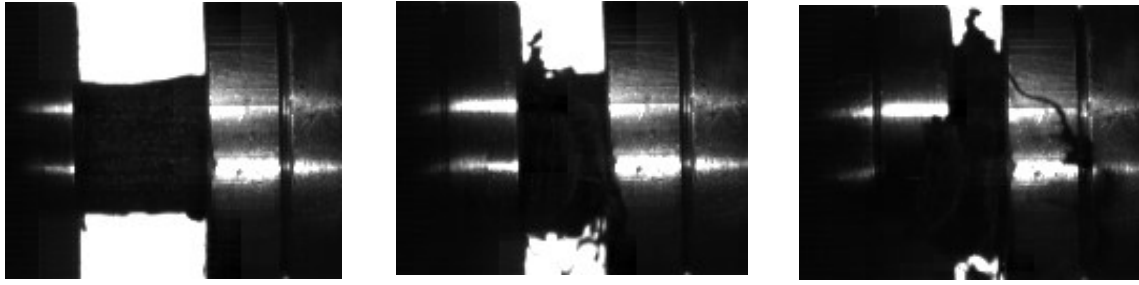
- Alcuni si sono subito rotti con crepe a 45° lungo tutto il provino. Questa rottura è definita **immediata**.
- Altri si sono sfogliati perdendo la parte esterna e quindi rimanendo solo con un nucleo interno più piccolo che ha continuato a resistere alla forza fino a distruggersi. Questa rottura è definita **a due stadi**.
- Infine, alcuni si sono sgretolati in maniera omogenea durante l'impatto sgretolandosi in minuscoli pezzi.

In seguito, possiamo vedere l'analisi delle diverse prove effettuate sia sui provini stampati longitudinalmente sia su quelli stampati verticalmente e le immagini delle diverse rotture del provino.

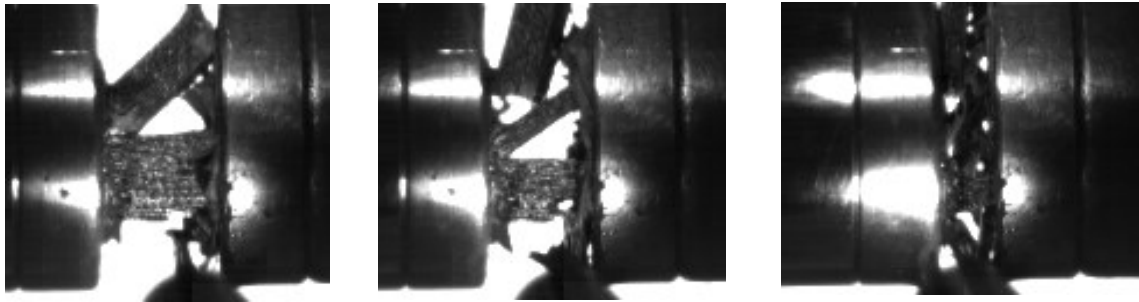
Ricordiamo che l'analisi è su due tipi di rotture: quelle istantanee e quelle progressive



*Figure 33-34-35 immagini provino rottura istantanea*



*Figure 36-37-38 immagini rottura progressiva del provino*

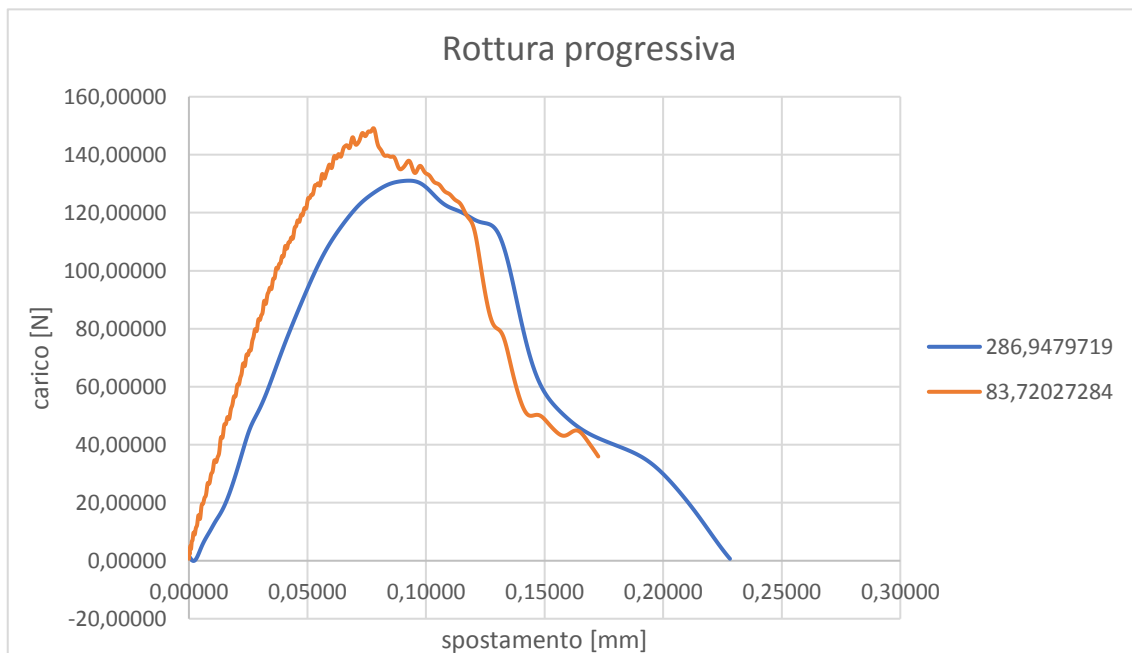
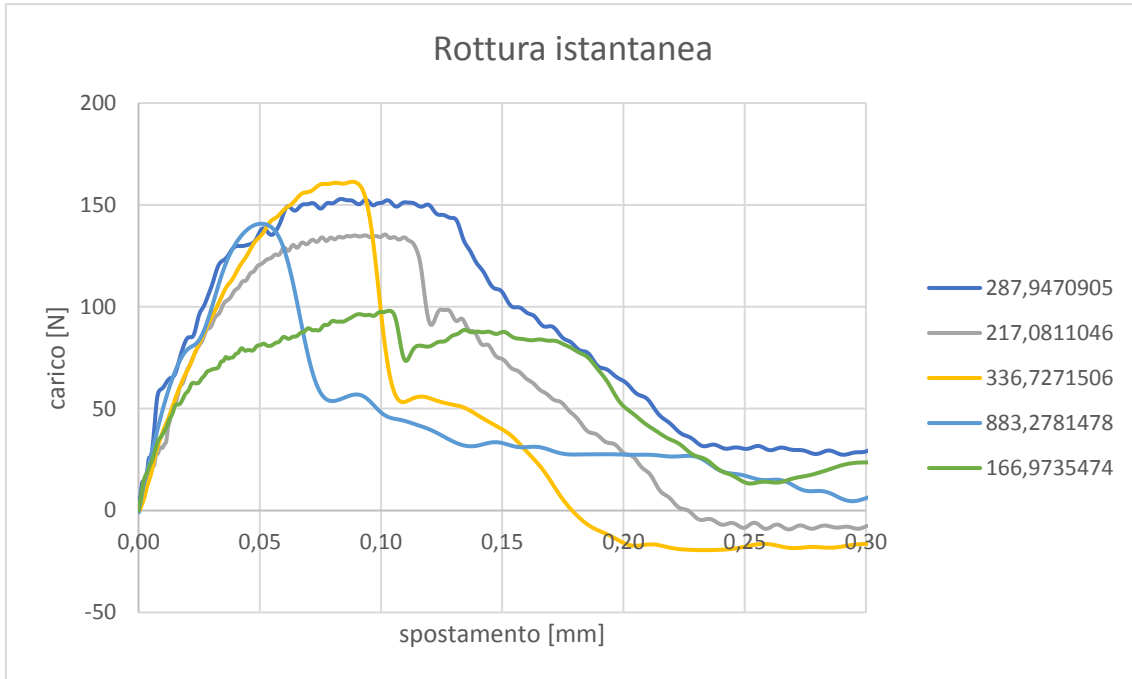


*Figura 39-40-41 immagini rottura del provino per distacco parte esterna*

### *Confronto curve provini stampati longitudinalmente*

In questi grafici vengono analizzati i provini stampati longitudinalmente, cioè stampati in verticale con il posizionamento delle fibre lungo la lunghezza del provino.

Possiamo notare che nelle curve della rottura istantanea le curve blu, azzurra e gialla sia avvicinano ai 150Mpa di tensione di rottura, mentre le altre due curve verde e grigia hanno tensione di rottura minori ma tutte e cinque hanno fase iniziale e un modulo di Young molto simile.



Per quanto riguarda le curve nella rottura progressiva, sviluppano dei dati interessanti ma sono l'una diversa dall'altra.

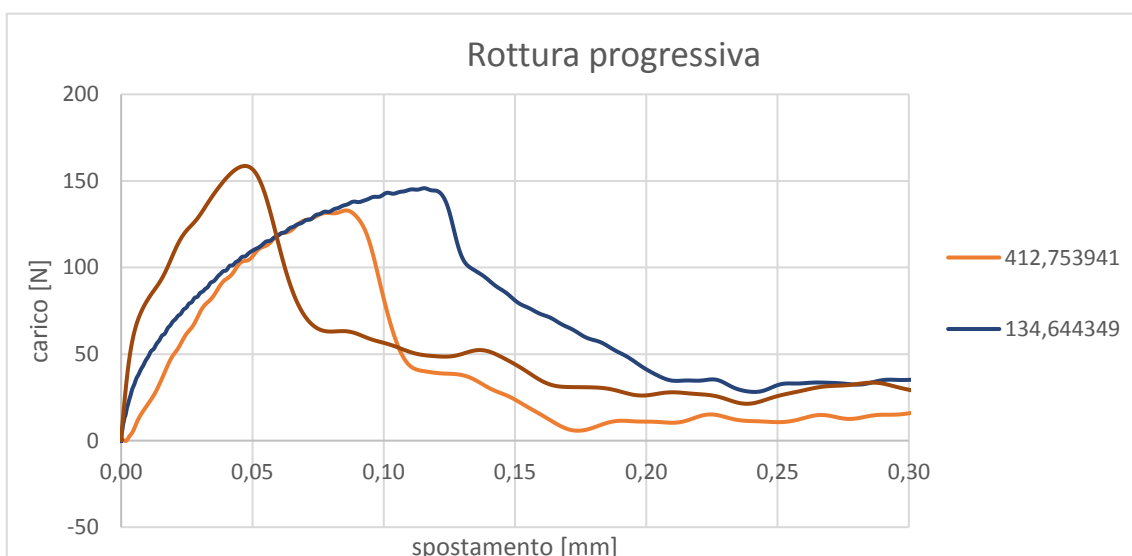
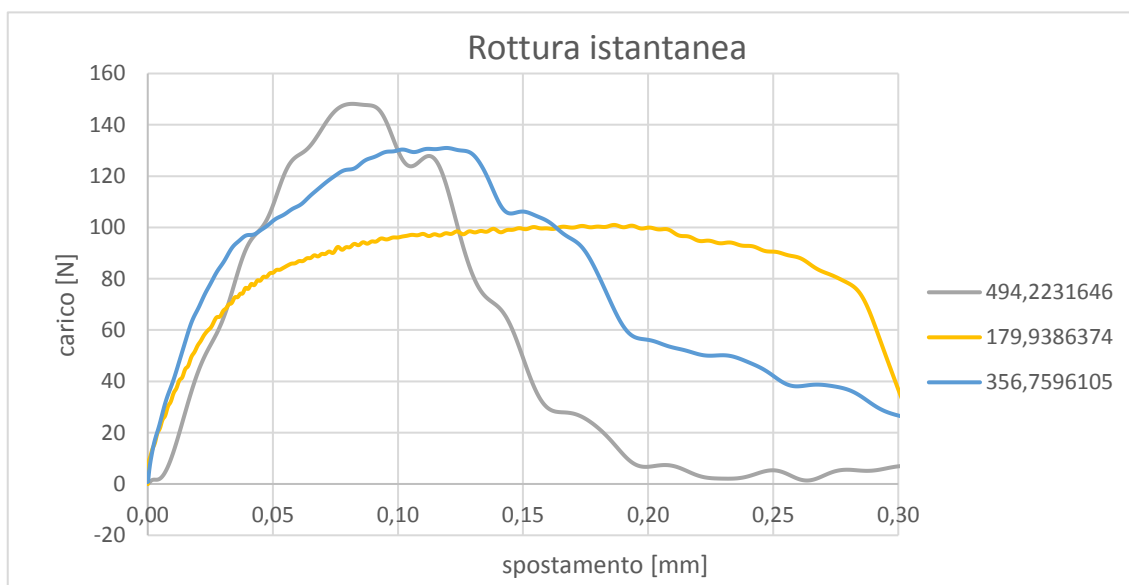
### Confronto curve provini stampati verticalmente

In questi grafici invece analizziamo i provini stampati verticalmente con le fibre disposte perpendicolarmente alla lunghezza del provino.

Tre di essi sviluppano una rottura istantanea, mentre gli altri due sviluppano una rottura progressiva.

Nelle curve della rottura istantanea notiamo che la curva grigia raggiunge i 150 Mpa di rottura mentre l'azzurra si ferma ai 130 Mpa. La terza curva gialla ha un andamento molto particolare ossia sviluppa una gobba su tutta la curva di deformazione del provino per poi cedere ad una maggiore compressione a 100 Mpa.

Nel grafico delle rotture progressive abbiamo tre curve abbastanza diverse tra loro con differenti moduli elastici e tensione di rottura.



## 8. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto l'obiettivo di costruire tramite stampa 3D dei provini in carbon PA per poi effettuare prove distruttive come prova di trazione, di compressione statica e dinamica per ottenere dati riguardanti al comportamento sotto sforzo.

Grazie alle prove svolte in laboratorio abbiamo trovato la tensione ingegneristica e la tensione vera, abbiamo anche reperito il modulo di elasticità e abbiamo studiato il comportamento del materiale su deformazioni quasi statiche e dinamiche.

Abbiamo notato che con l'aggiunta del carbonio a fibra corta nel nylon PA66 si ottengono miglioramenti a livello di resistenza meccanica e questi possono differirsi a seconda di come vengono disposte le fibre durante la produzione.

Grazie a questi test abbiamo sviluppato nuove competenze per quando riguarda le prove su questi tipi di materiali meno tenaci degli acciai, adattando gli strumenti di misura per ottenere dati utili.

Detto questo, si può concludere che il carbon PA è un materiale innovativo con caratteristiche migliori rispetto ad altri polimeri e la sua capacità di poter essere stampato in 3D ne facilita l'utilizzo in prototipi.

## 9. RINGRAZIAMENTI

Tengo a ringraziare innanzitutto la mia *famiglia*, la mia *fidanzata Chiara* e la sua *famiglia* per avermi supportato in questo percorso universitario difficile ma interessante.

Ringrazio a *Prince e la Musa* per avermi aiutato nei momenti difficili a scaricare lo stress con le coccole e carezze.

Ringrazio all'azienda *Microcarbon* e al mio socio *Stefano* per avermi fatto appassionare ai materiali compositi e per aver dato inizio alla costruzione del mio sogno.

Ringrazio il dottorando *Mattia Utzeri*, il Prof. *Sasso* e Prof. *Mancini* per avermi dato la possibilità di svolgere questa tesi e per il supporto offerto.



## 10. RIFERIMENTI

Le informazioni riguardanti i materiali, prove meccaniche, formule e le immagini sono stati consultati dai seguenti siti:

- [1] [https://it.wikipedia.org/wiki/Fibra\\_di\\_carbonio](https://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_di_carbonio)
- [2] Tecnologie mecc. di proc. e prod. - Appunti dalle lezioni del prof. Di Cara Nicola - ITIS "Galilei"
- [3] Tecnologia Meccanica Proff. Luigi Carrino – Antonio Formisano
- [4] Seminario barra di Hokpinson (Prof. Edoardo Mancini )
- [5] <http://www.resinfloor.it/fibra-di-carbonio/caratteristiche-tecniche>
- [6] <https://www.plasticfinder.it/pa/pa66-polyamide-nylonMar-gom>
- [7] <http://www.demezzi.it/plastiche/pa66n.php>Radici group
- [8] [http://www.margom.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4365&Itemid=7161&lang=it](http://www.margom.com/index.php?option=com_content&view=article&id=4365&Itemid=7161&lang=it)
- [9] Radici\_Plastics\_Poliammidi\_Feb2014\_web.pdf
- [10] Magazine Dario Flaccovio
- [11] [https://it.wikipedia.org/wiki/Stampa\\_3D](https://it.wikipedia.org/wiki/Stampa_3D)
- [12] [https://it.wikipedia.org/wiki/Stampaggio\\_a\\_iniezione](https://it.wikipedia.org/wiki/Stampaggio_a_iniezione)
- [13] [https://it.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_di\\_Wheatstone](https://it.wikipedia.org/wiki/Ponte_di_Wheatstone)