



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**Stampa 3D di Materiali Polimerici
Conduttivi e Prove Meccaniche**

**3D Printing of Conductive Polymeric
Materials and Mechanical Tests**

Candidato:
Simone Cariello

Relatore:
Prof. Marco Sasso

Correlatore:
Dott. Mattia Utzeri

Anno Accademico 2022/2023



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Stampa 3D di Materiali Polimerici Conduttivi e Prove Meccaniche

3D Printing of Conductive Polymeric Materials and Mechanical Tests

Candidato:
Simone Cariello

Relatore:
Prof. Marco Sasso

Correlatore:
Dott. Mattia Utzeri

Anno Accademico 2022/2023

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brecce Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione, vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che hanno reso possibile il raggiungimento di questo traguardo tanto importante. Ringrazio il mio relatore Prof. Marco Sasso per avermi proposto un argomento di grande interesse e per essere stato presente nel momento più importante del mio corso di studi.

Grazie anche al mio correlatore Dott. Mattia Utzeri che mi ha trasmesso un valido ed efficace *modus operandi* per la preparazione e la raccolta dei dati sperimentali.

Infine, una menzione particolare va alla mia famiglia che mi ha sempre supportato in tutte le scelte della vita, e alla mia fidanzata Adele, persona la quale mi è sempre stata accanto in tutte le scelte della vita dal giorno che ci siamo incontrati e più di tutti mi ha sempre sostenuto e motivato ad andare avanti.

Ancona, Ottobre, 2023

Simone Cariello

Sommario

La ricerca e lo sviluppo di materiali sempre più economici e allo stesso tempo con elevate prestazioni, è un tema molto dibattuto negli ultimi anni. Le tecnologie di fabbricazione additive, come la stampa 3D, rappresentano il futuro nel settore industriale. Questa metodologia infatti, ha aperto nuove prospettive per la realizzazione di componenti elettronici leggeri e flessibili, adatti a una vasta gamma di applicazioni, dalla robotica all'Internet delle Cose (IoT). Lo scopo di questa tesi è quello di effettuare uno studio riguardante i materiali polimerici conduttivi, in particolare l'acido polilattico (PLA), una macromolecola biodegradabile, sintetizzata a partire dal mais o altre materie a base di amido. Dalla sua stampa 3D, utilizzando una stampante di tipo FDM, alla caratterizzazione del comportamento meccanico e piezoresistivo, sono state descritte tutte le tappe in maniera dettagliata. La tesi è stata strutturata nel seguente modo: nel primo capitolo è stata fatta un'introduzione alla stampa 3D dei polimeri conduttivi e ai suoi principali utilizzi; nel secondo capitolo è stato trattato in dettaglio il PLA, dalla produzione al riciclo; il terzo capitolo affronta le metodologie, i parametri di stampa adottati e le successive prove meccaniche presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM); mentre nell'ultimo capitolo vengono analizzati e confrontati i risultati delle prove effettuate.

Indice

1	Introduzione alla Stampa 3D e ai Materiali Conduttivi	1
1.1	L'evoluzione nel tempo	1
1.2	Principali tecnologie di stampa	2
1.2.1	La modellazione a deposizione fusa	3
1.2.2	La stereolitografia	4
1.2.3	Confronto tra le tecnologie di stampa 3D FDM e SLA	5
1.3	Applicazioni e settori della stampa 3D	6
1.4	Introduzione alla stampa 3D dei polimeri conduttivi	7
1.4.1	I polimeri più utilizzati	7
2	Il PLA: un polimero biodegradabile	9
2.1	Sintesi del PLA	9
2.1.1	La produzione di acido lattico	11
2.2	Proprietà del PLA	12
2.2.1	Il PLA conduttivo	13
2.3	Principali utilizzi	14
2.4	Sostenibilità ambientale	14
2.4.1	Breve accenno allo smaltimento	15
3	Stampa 3D dei provini, acquisizione ed elaborazione dei dati	17
3.1	Stampa 3D dei modelli	17
3.2	Allestimento per le prove statiche di trazione e compressione	19
3.2.1	Caratterizzazione comportamento piezoresistivo	20
3.3	Allestimento per le prove dinamiche	22
3.3.1	La barra di Hopkinson	22
3.4	Elaborazione dei dati	23
4	Analisi dei risultati ottenuti	25
4.1	Test di compressione provino cilindrico	25

Indice

4.2	Test di trazione provino osso di cane	26
4.3	Confronto trazione/compressione	27
4.4	Resistività	29
4.5	Strutture piezoresistive	30
4.5.1	Confronto a diverse velocità di deformazione	30
4.5.2	Confronto compressione e segnale elettrico	31
4.5.3	Confronto fra le diverse forme a elevata velocità di deformazione	32
4.5.4	Confronto fra le diverse forme a bassa velocità di deformazione	33
4.6	Sommario risultati ottenuti	34
	Conclusioni	34
	Bibliography	38

Elenco delle figure

1.1	Una stampante 3D nei primi anni 80	2
1.2	Le due tipologie di stampanti 3D più diffuse	3
1.3	Stampa 3D di tipo FDM	3
1.4	Stampa 3D di tipo SLA	5
1.5	Esempi di modelli 3D di cuore, cervello, mandibola, rene e colonna vertebrale	6
1.6	Applicazioni di stampa 3D nel settore industriale	7
2.1	Struttura chimica di base del PLA	10
2.2	Sintesi Acido Polilattico, sopra formazione del lattide, sotto polime- rizzazione	11
2.3	La produzione dell'acido lattico nel passato, presente e futuro.	12
2.4	Filamento di PLA usato per la stampa 3D dei provini	13
2.5	Applicazioni di PLA in vari settori	14
2.6	kg di CO ₂ equivalente per kg di polimero prodotto	15
2.7	Le tre tipologie di riciclo del PLA	16
3.1	La stampante 3D utilizzata	17
3.2	Forme di provini utilizzati	18
3.3	Setup utilizzato per le prove statiche	20
3.4	Si nota il nastro isolante, il cavo elettrico e il foglio di carta utilizzato per isolare il provino dal resto della macchina	21
3.5	Modello stilizzato per trovare la resistenza del provino	21
3.6	Allestimento prove dinamiche	22
3.7	Schema della barra di Hopkinson nei laboratori pesanti del DIISM	23
4.1	Confronto $\sigma - \varepsilon$ e $R - \varepsilon$	26
4.2	Il provino cilindrico soggetto a compressione in presenza di attrito si deforma disomogeneamente.	26

Elenco delle figure

4.3	La prova di trazione mostra un andamento lineare con la resistenza .	27
4.4	Il PLA a trazione si comportanda come un materiale fragile rompendosi di schianto.	28
4.5	Il PLA a compressione si deforma ma non si rompe evidenziando la sua duttilità.	28
4.6	Confronto trazione/compressione.	29
4.7	Resistività in relazione alla σ	30
4.8	Resistenza a compressione a due $\dot{\epsilon}$	31
4.9	31
4.10	Relazione tra comoressione e resistenza elettrica.	32
4.11	Relazione tra compressione e resistenza elettrica a $600mm/min$. . .	33
4.12	Relazione tra compressione e resistenza elettrica a $3mm/min$	34

Elenco delle tabelle

2.1	Principali proprietà fisico-chimiche del PLA	13
3.1	Parametri di stampa 3D utilizzati	19
3.2	Dimensioni dei provini	19
4.1	Valori ottenuti dalle analisi sperimentali	35

Capitolo 1

Introduzione alla Stampa 3D e ai Materiali Conduttivi

La stampa 3D rappresenta una tecnologia innovativa che consente di creare oggetti tridimensionali strato dopo strato, partendo da un modello digitale. Questo processo è noto anche come fabbricazione additiva ed è in contrasto con i metodi tradizionali di produzione sottrattiva, come la lavorazione dei metalli o la scultura. La stampa 3D offre la possibilità di creare oggetti personalizzati, prototipi rapidi e componenti complessi con una precisione sempre più elevata. I materiali utilizzati variano dalle plastiche ai metalli, consentendo una grande versatilità nella produzione. Vediamo nel dettaglio alcuni aspetti chiave di questa tecnologia.

1.1 L'evoluzione nel tempo

Sin dalla sua invenzione, avvenuta nel 1986, la tecnologia alla base della stampa 3D si è evoluta rapidamente, andando a condizionare profondamente il settore industriale. A partire dalla stereolitografia, tecnica che permette di realizzare modelli tridimensionali impiegando resine solidificate mediante una sorgente a raggi ultravioletti[1], la stampa 3D ha conosciuto una rapida espansione in tutti i settori, soprattutto grazie alla tecnologia SLA che ha dato inizio all'industria della stampa 3D. Nel corso degli anni '90, sono stati sviluppati altri processi di stampa 3D, come il fused deposition modeling (FDM) e il selective laser sintering (SLS), che hanno reso la tecnologia più accessibile.[2].



Figura 1.1: Una stampante 3D nei primi anni 80

1.2 Principali tecnologie di stampa

Lo standard ISO/ASTM52900:2021 raggruppa i principali metodi di stampa[3] basati su:

- **Sinterizzazione:** utilizza un laser ad alta potenza per fondere piccole particelle di polvere termoplastica.
- **Ripporto:** utilizza un filamento per realizzare i diversi layer e rendere tridimensionale l'oggetto.
- **Resina:** utilizza una vasca riempita di resina che viene solidificata strato dopo strato.

Nei polimeri termoplastici (TPU, PET, PLA, SPLA, TPE, ...) si utilizza una sottocategoria del metodo *ripporto*, chiamata modellazione a deposizione fusa (FFF o FDM in breve) che verrà utilizzata per stampare i provini di PLA. La stereolitografia (SLA), invece, rappresenta una sottocategoria del metodo *resina*.

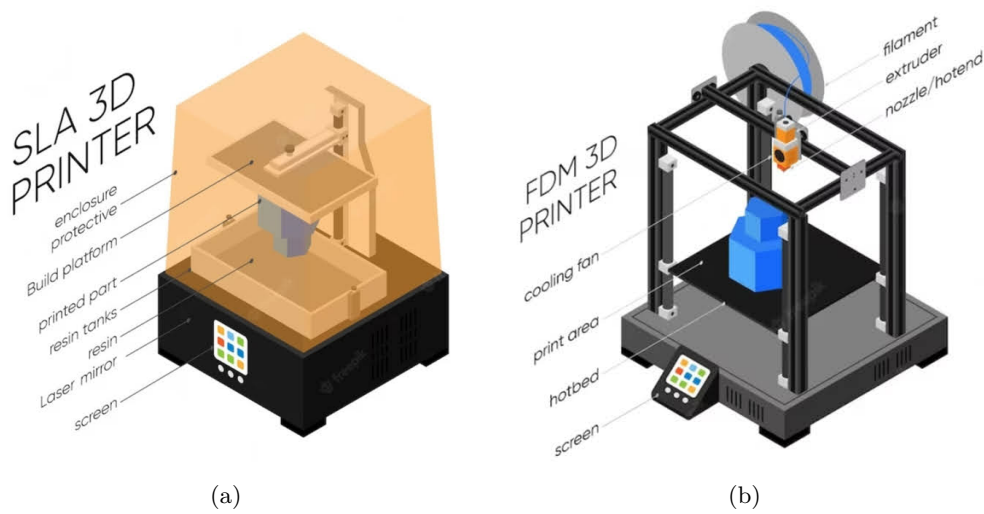


Figura 1.2: Le due tipologie di stampanti 3D più diffuse

1.2.1 La modellazione a deposizione fusa

In inglese chiamata *Fused Filament Fabrication* o *Fused deposition modeling*, da cui l'acronimo **FFF** o **FDM**, è una tecnologia di produzione additiva usata per modellare e produrre una vasta gamma di materiali consentendo una elevata flessibilità nella scelta dei materiali in base alle esigenze del progetto. A partire da un file CAD, la stampante di tipo FDM lavora rilasciando diversi strati di materiale. Una volta posizionato il filamento termoplastico, questo è spinto verso una testina mobile riscaldata che fonde il filamento depositandolo nella forma desiderata layer su layer. Per migliorare l'adesione di determinati materiali al piano di stampa, è comune utilizzare piani riscaldati o additivi, che mitigano la contrazione causata dal raffreddamento del materiale.[4] Tra le varie tecniche, rappresenta ad oggi l'unica scelta economica rendendo la tecnologia accessibile a un'ampia gamma di utenti.

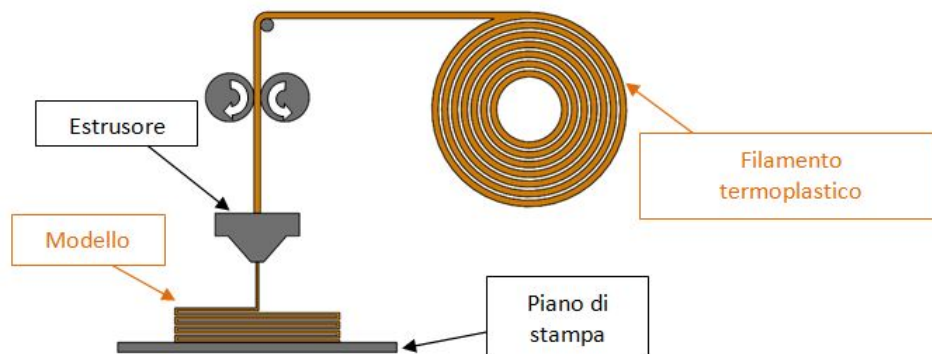


Figura 1.3: Stampa 3D di tipo FDM

Come ogni tecnologia, l'FDM presenta alcuni svantaggi. Tra i tanti, i principali problemi riguardano la disomogeneità e l'anisotropia mano a mano che gli spessori dei singoli layer diminuiscono. Un'ulteriore difficoltà si riscontra nella realizzazione di parti con sottosquadro: in questo caso, devono essere utilizzati appositi supporti per evitare il cedimento della struttura in fase di stampa.[4]

1.2.2 La stereolitografia

Come citato nella sezione 1.1, la stereolitografia, da cui l'acronimo **SLA**, ha rappresentato la prima tecnologia di stampa 3D ad essere commercializzata nei primi anni 80. Tecnica ancora oggi ampiamente utilizzata e apprezzata soprattutto per l'elevato grado di precisione e accuratezza, che consente di realizzare parti con forma complesse e gradi di finitura e tolleranza impossibili da ottenere con qualsiasi altro processo di produzione additiva. Grazie alla sua capacità di produrre pezzi di alta qualità, la SLA è particolarmente preziosa per la creazione di modelli di fusione altamente accurati, necessari in applicazioni come la stampa ad iniezione, la pressofusione e la fusione sottovuoto. Inoltre, la tecnologia SLA è ideale per la realizzazione di prototipi funzionali e modelli di presentazione, nonché per eseguire prove di forma e adattamento.[5] Per produrre gli oggetti desiderati, il file CAD del prodotto viene memorizzato nel software della stampante. A questo punto la piattaforma di stampa viene immersa in una vasca contenente della resina liquida. Successivamente un raggio laser viene diretto su due galvanometri, che orientano la luce verso le coordinate xy apposite. Il polimero, sensibile ai raggi ultravioletti, solidifica formando un primo strato di materiale[6]. Il ciclo è ripetuto fino alla realizzazione dell'intero oggetto.

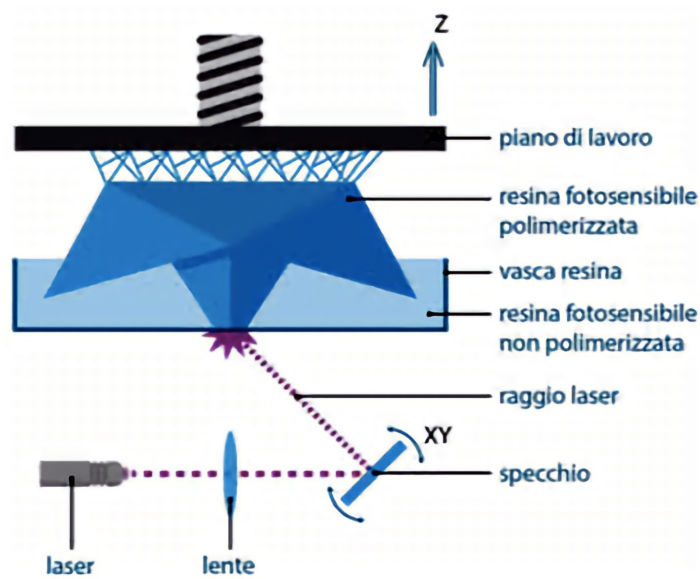


Figura 1.4: Stampa 3D di tipo SLA

1.2.3 Confronto tra le tecnologie di stampa 3D FDM e SLA

	FDM	SLA
Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Ampia scelta di materiali • Elevata velocità di stampa • Costi accessibili 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevata precisione • Ottimo grado di finitura superficiale • Elevata risoluzione di stampa
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Precisione limitata • Utilizzo di supporti di stampa • Finitura superficiale ruvida 	<ul style="list-style-type: none"> • Costi elevati • Bassa velocità di stampa • Dimensione massima limitata

1.3 Applicazioni e settori della stampa 3D

Come già accennato nella sezione 1.1, le applicazioni e i settori dove la stampa 3D trova impiego sono vari. In ambito medico ad esempio, è utilizzata nella creazione di dispositivi medici impiantabili, con un particolare interesse verso la realizzazione di parti del corpo da trapiantare direttamente nel paziente utilizzando materiale biologico a partire dalle cellule del soggetto ricoverato.[7] In figura 1.5 sono rappresentati alcuni modelli di tessuti e organi che è possibile realizzare al giorno d'oggi.

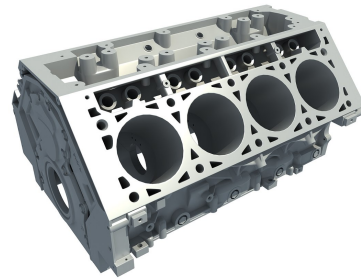


Figura 1.5: Esempi di modelli 3D di cuore, cervello, mandibola, rene e colonna vertebrale

Nel settore industriale si utilizza maggiormente per componenti automobilistiche, in ambito aeronautico e aerospaziale (Figure 1.6a, 1.6b). In questi anni, ad esempio, nel jet militare F-18, è stato introdotto un sistema di controllo ambientale che è stato fabbricato utilizzando la tecnologia di stampa 3D. Quest'innovazione ha notevolmente semplificato il processo di assemblaggio dell'aereo, riducendo il numero di componenti da inserire nel aeromobile da sedici a soltanto uno.[8]



(a) La startup Relativity Space è pronta a lanciare nello spazio il primo razzo al mondo stampato in 3D.



(b) Blocco motore stampato in 3D.

Figura 1.6: Applicazioni di stampa 3D nel settore industriale

1.4 Introduzione alla stampa 3D dei polimeri conduttivi

I polimeri conduttivi sono una classe di polimeri con proprietà conduttive intrinseche. Il loro utilizzo permette di sfruttare tutti i vantaggi dei polimeri, come l'elevata resistenza alla corrosione e la buona lavorabilità, con l'aggiunta della conducibilità elettrica. Per diversi anni, la produzione dei polimeri conduttivi ha fatto affidamento a tecnologie convenzionali come la stampa a getto d'inchiostro, la litografia e la serigrafia. Queste tecniche di produzione sono limitate principalmente dal costo molto elevato e dalla sola fabbricazione di modelli bidimensionali. La stampa 3D, invece, permette di evitare o quantomeno limitare tali problematiche.[9]

1.4.1 I polimeri più utilizzati

Di seguito vengono illustrati i principali polimeri utilizzati per la stampa 3D di tipo FDM.[10]

- **Acrinolitrite butadiene stinere (ABS):** è un polimero termoplastico molto resistente utilizzato per creare oggetti leggeri come tubi o parti di strumenti musicali.
- **Acido polilattico (PLA):** è un polimero biodegradabile inodore con una buona rigidità, ma scarsa resistenza al calore. È il più semplice da stampare tra i materiali FDM.
- **Polietilene tereftalato glicole (PETG):** è un polimero molto utilizzato nell'industria alimentare in quanto adatto al contatto con gli alimenti.

- **Polistirene antiurto (HIPS):** è un materiale termoplastico utilizzato per la fabbricazione di imballaggi, elettrodomestici, giocattoli.
- **Nylon:** fa parte di una classe particolare di polimeri, detti poliammidi. Il nylon è largamente impiegato come fibra tessile e per produrre piccoli manufatti.

Nel capitolo successivo sarà approfondito l'acido polilattico (PLA), con particolare enfasi alla sua variante conduttiva.

Capitolo 2

Il PLA: un polimero biodegradabile

L'acido polilattico (PLA) rappresenta un poliestere termoplastico, di origine naturale e alifatica, noto per la sua compostabilità. Esso viene ottenuto attraverso due principali processi: la condensazione diretta dell'acido lattico (conosciuto anche come acido 2-idrossipropionico) e la polimerizzazione di apertura dell'anello (ROP - *Ring Opening Polymerization* in inglese) del dimero ciclico noto come lattide.

Questo materiale ha suscitato un notevole interesse negli ultimi anni, in virtù della sua versatilità e delle sue proprietà uniche. Da un lato, può essere utilizzato come alternativa sostenibile alle tradizionali termoplastiche nell'ambito dell'industria del packaging, contribuendo così a ridurre l'impatto ambientale. Dall'altro lato, si rivela essere un materiale biocompatibile e bioassorbibile, rendendolo prezioso nel settore medico.[11] Vediamo in dettaglio come viene prodotto e sintetizzato.

2.1 Sintesi del PLA

Ci sono tre linee guida principali per ottenere PLA utilizzabile (ad elevato peso molecolare), tra queste entreremo in dettaglio nella tecnica più utilizzata a livello industriale, il ROP (*Ring Opening Polymerization* in inglese). La metodologia consiste nell'eseguire la polimerizzazione ad apertura dell'anello del lattide con diversi catalizzatori metallici in soluzione solido-liquido. La scelta del catalizzatore è fondamentale per minimizzare il fenomeno di racemizzazione, con la conseguente formazione di un prodotto enantiomericamente non puro, influenzando negativamente sulle proprietà chimico-fisiche del materiale.[12]

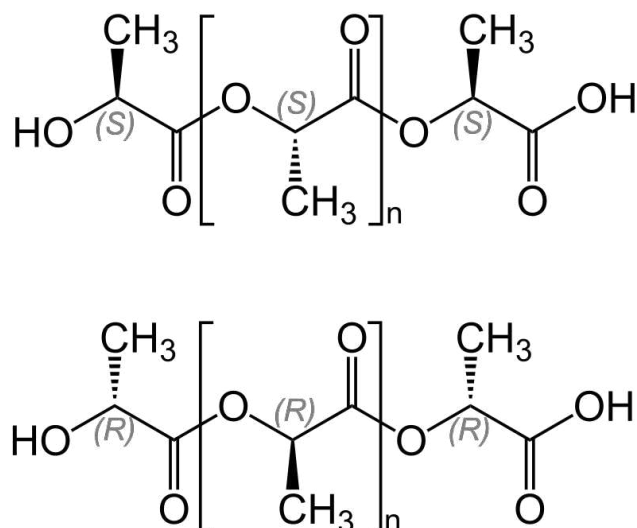


Figura 2.1: Struttura chimica di base del PLA

La materia prima per la sintesi del PLA viene prodotta dalla fermentazione e dalla sintesi chimica da carboidrati che da luogo all'acido lattico. L'acido lattico è una molecola organica composta da un atomo di carbonio centrale asimmetrico, che può esistere in due forme enantiomeriche: L(+) e D(-). Queste due forme sono gli isomeri otticamente attivi dell'acido lattico. Gli isomeri enantiomerici sono immagini speculari l'uno dell'altro e non possono sovrapporsi se ruotati nello spazio tridimensionale. Il processo di fermentazione è uno dei metodi utilizzati per la produzione di acido lattico. Durante questo processo, i batteri (generalmente i *Lactobacillus*) convertono i carboidrati in acido lattico. È interessante notare che il processo di fermentazione produce esclusivamente l'isomero L(+) dell'acido lattico. Questo è importante perché l'isomero L(+) è in grado di formare un polimero cristallino noto appunto come PLA. La capacità di ottenere l'isomero L(+) in modo puro attraverso la fermentazione è cruciale per la produzione di PLA di alta qualità. [11]

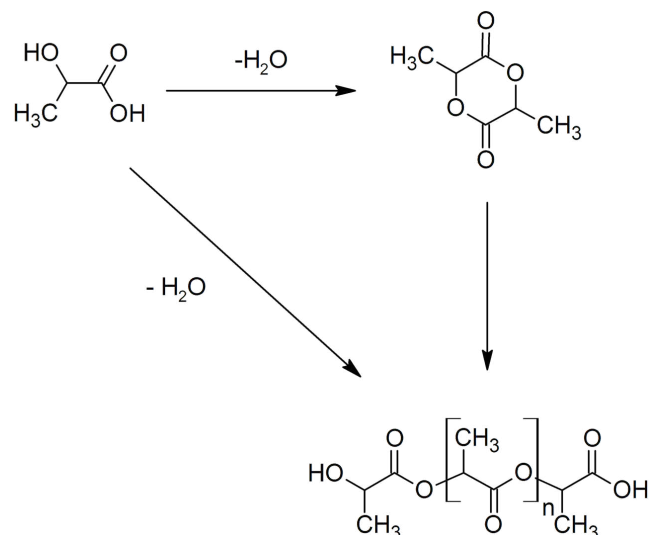


Figura 2.2: Sintesi Acido Polilattico, sopra formazione del lattide, sotto polimerizzazione

2.1.1 La produzione di acido lattico

Abbiamo già descritto come l'acido lattico sia un pilastro cardine per la sintesi di PLA. L'azienda italiana Galatea Bio Tech Srl specializzata nella produzione delle bioplastiche, specificatamente di PLA, ha catalogato la produzione dell'acido lattico nel corso del tempo.[13] In *passato* l'acido lattico veniva prodotto principalmente per sintesi chimica a partire da risorse fossili. Questa procedura comportava un inquinamento atmosferico elevato e peggiori proprietà chimico-fisiche a causa della miscela racemica. Nei giorni *odierni* l'acido lattico viene prodotto anche attraverso la fermentazione di microrganismi col vantaggio di avere un minor impatto ambientale. In *futuro* il PLA potrà essere prodotto direttamente da fermentazioni microbiche a partire da scarti e sottoprodotti agroindustriali.

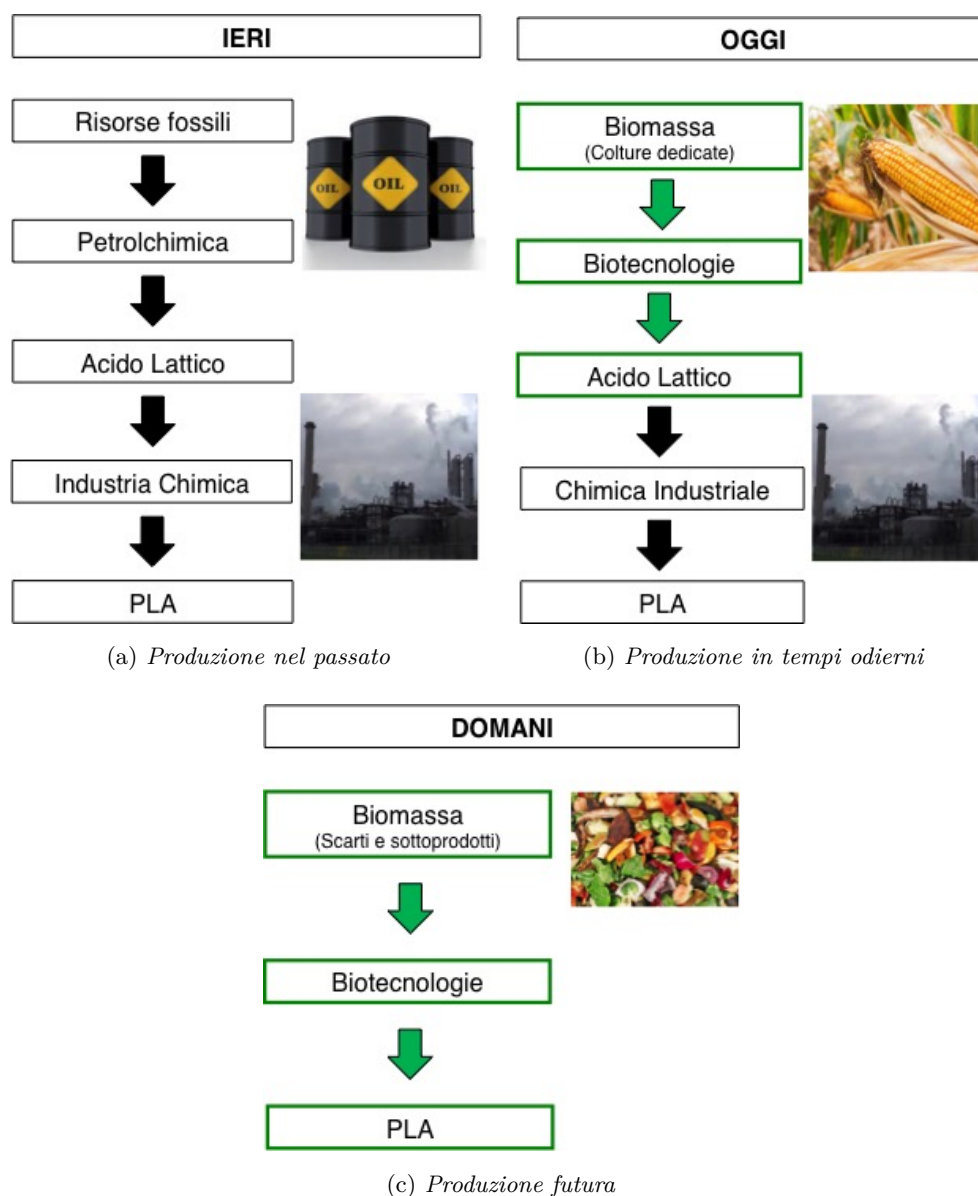


Figura 2.3: La produzione dell'acido lattico nel passato, presente e futuro.

2.2 Proprietà del PLA

Le proprietà del PLA possono essere racchiuse in proprietà *reologiche*, *meccaniche* e di *biodegradabilità*. In tabella 2.1 sono elencate alcune proprietà chimico-fisiche del PLA. Le caratteristiche *fisiche* del materiale dipendono da aspetti molecolari chiave, quali lo spessore dei cristalliti, il grado di cristallinità, le dimensioni degli sferuliti, la morfologia e l'orientamento delle catene molecolari. Le proprietà *meccaniche* invece, possono variare da quelle di un polimero amorfo a quelle di un polimero semicristallino.[11] Infine, per quanto riguarda la *biodegradabilità*, il PLA di per sé

non risulta biocompostabile. Lo diventa solo in seguito al processo di idrolisi a temperatura maggiore di $60^{\circ}C$ e a umidità assoluta maggiore di 20 %. [14]

Tabella 2.1: Principali proprietà fisico-chimiche del PLA

Proprietà	Unità di misura	Valore
Densità	g/cm^3	1.21 - 1.43
Temperatura di fusione	$^{\circ}C$	130 - 180
Modulo di Young	MPa	350 - 2800
Resistenza a Trazione	MPa	10 - 60
Assorbimento di acqua	%	0.5 - 5

2.2.1 Il PLA conduttivo

Come accennato nella sezione 1.4, è possibile additare il PLA, e più in generale la maggior parte dei polimeri, con appositi elementi a media-alta conducibilità elettrica. La bobina mostrata in figura 2.4 è stata utilizzata per la stampa 3D di provini in PLA che sono stati descritti e analizzati in dettaglio nel capitolo successivo. Il filamento conduttivo contiene una base al 80% di PLA ed un 20% di polvere di carbonio in nanotubi che ne conferisce la massima conducibilità elettrica possibile.[15] Secondo il sito web FILOPRINT, un piccolo pezzo di $1,5\text{ cm}^2$ possiede una resistenza di $600\ \Omega$. Dopo la stampa, una piastrina di $1,5\text{ cm} \times 0,8\text{ cm} \times 0,12\text{ cm}$ ha una resistenza di $3,3\text{ k}\Omega$.



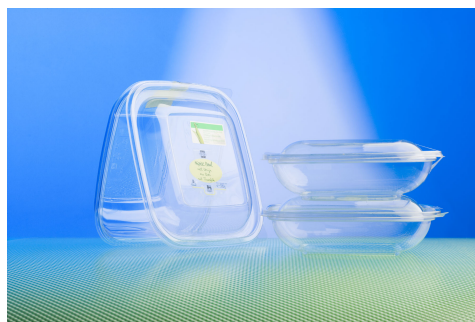
Figura 2.4: Filamento di PLA usato per la stampa 3D dei provini

2.3 Principali utilizzi

Le applicazioni del PLA sono innumerevoli (Figura 2.5) e in letteratura si trovano approfondimenti su vari settori. Circa il 70% del PLA è utilizzato per il *packaging* di sostanze alimentari, bottiglie e tazze. In *agricoltura e giardinaggio* è utilizzato per la semina e per vasi di piante direttamente piantabili nel terreno. Nel settore *automobilistico* l'impiego di PLA è ancora allo stadio di ricerca e sviluppo. Molto probabilmente sarà impiegato come alternativa più economica alla fibra di carbonio, ad oggi utilizzata per alleggerire le vetture e ridurre quindi i consumi. In *medicina*, infine, è usato come volumizzante e stimolante della produzione di collagene trovando ampio uso nella medicina estetica. Con il PLA sono prodotte anche protesi e altri dispositivi utilizzati nella chirurgia protesica.[16]



(a) Prototipi di automobili



(b) Packaging alimentare



(c) Bottiglie e bicchieri



(d) Strati di pacciame

Figura 2.5: Applicazioni di PLA in vari settori

2.4 Sostenibilità ambientale

Il PLA e più in generale le plastiche bio-compostabili, ossia provenienti da materia prima vegetale, rappresentano un'alternativa sostenibile alle cosiddette "plastiche

convenzionali", prodotte a partire dal petrolio. In un'epoca dove la salvaguardia dell'ambiente ha assunto particolare importanza, l'impronta carbonica (in inglese *carbon footprint*), ossia il parametro che stima le emissioni di CO₂ causate da un prodotto, un'organizzazione, da un individuo[17], deve essere tenuto il più possibile sotto controllo. Le plastiche bio-compostabili non solo riescono a contrastare l'effetto serra ma riescono addirittura a ridurlo.(il bilancio della CO₂ rilasciata nell'ambiente dal prodotto rispetto a quella assorbita dalle foglie è positivo.)[16] La Wintersun Co., un'azienda cinese fondata nel 2015, fornitore leader di soluzioni per l'applicazione di prodotti avanzati nel campo delle plastiche a base biologica, in particolare a base di PLA, ha già confezionato e venduto quasi 2000 tonnellate di manufatti a base di PLA. Così facendo è riuscita a ridurre le emissioni di CO₂ di oltre 2300 tonnellate salvaguardando decine di foreste.[18] In figura 2.6 è rappresentata l'emissione di CO₂ generata dalla produzione dei comuni polimeri.

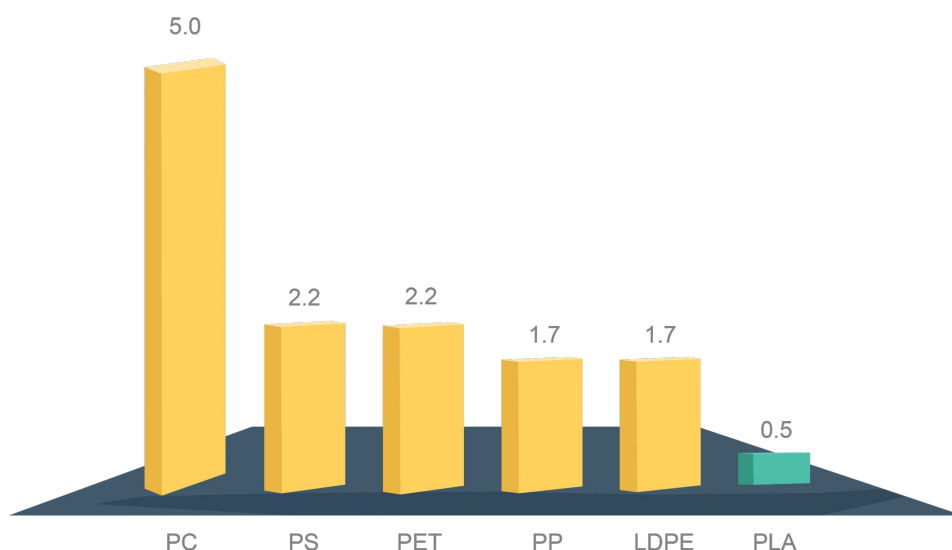


Figura 2.6: kg di CO₂ equivalente per kg di polimero prodotto

2.4.1 Breve accenno allo smaltimento

Vista la crescente applicazione del PLA su larga scala, nei prossimi anni si prevede un accumulo di rifiuti non trascurabile. Risulterà quindi fondamentale mantenere un equilibrio tra produzione e smaltimento del polimero. Le principali metodologie di riciclo dei polimeri sono due, a cui va aggiunta una terza propria dei polimeri biodegradabili. Il riciclo *meccanico* è ad oggi l'unica tecnologia impiegata industrialmente, permette di conservare le proprietà meccaniche del PLA originale. Il riciclo *chimico* è il più costoso ed è ancora allo stadio sperimentale, dato che non vi sono

applicazioni su scala industriale. Dei due appena elencati, dal punto di vista dell'impatto ambientale, il riciclo meccanico registra il minor impatto, in quanto si utilizza meno energia. Infine il *compostaggio* che risulta essere la via più semplice tra quelle descritte, ma è anche quella che non permette un riutilizzo del prodotto.[19]

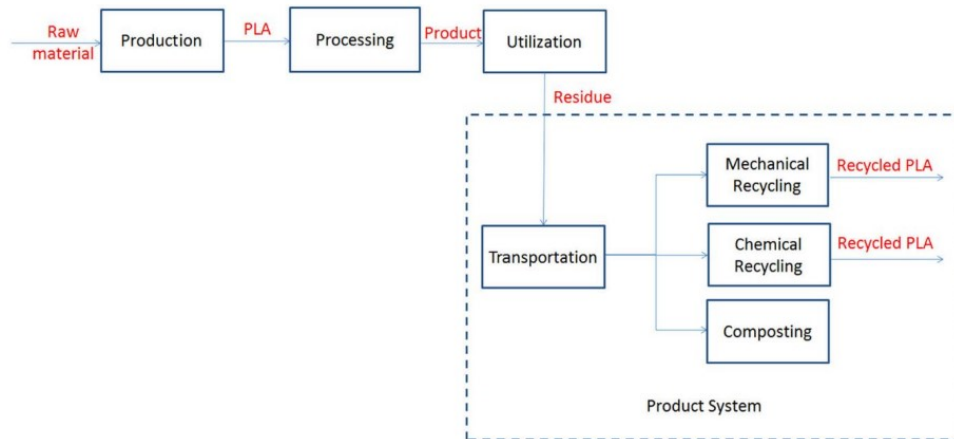


Figura 2.7: Le tre tipologie di riciclo del PLA

Capitolo 3

Stampa 3D dei provini, acquisizione ed elaborazione dei dati

In questo capitolo sono descritti dettagliatamente tutti i passaggi che hanno portato dalla stampa dei provini, all'acquisizione e all'elaborazione dei dati degli stessi. Di seguito sarà omessa la dicitura *conduttivo* quando si menzionerà il PLA per rendere più scorrevole la lettura.

3.1 Stampa 3D dei modelli

I modelli di PLA (le cui proprietà sono state descritte nella sezione 2.2) utilizzati nelle prove di caratterizzazione, sono stati ottenuti dalla stampante 3D modello Original Prusa i3 (Figura 3.1) presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica della Marche.

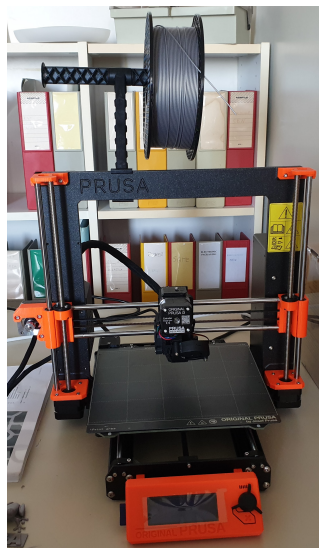
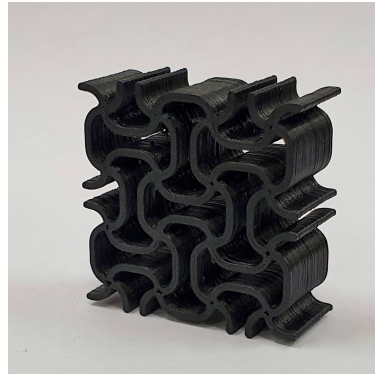
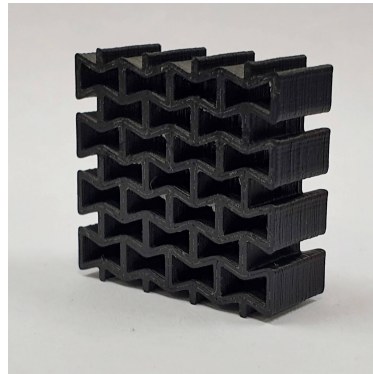


Figura 3.1: La stampante 3D utilizzata

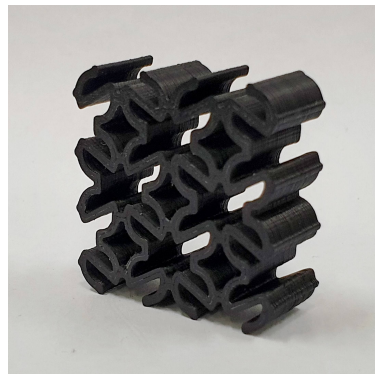
Tutti i provini (Figura 3.2), ad eccezione dell'osso di cane (e), sono stati sottoposti a prove di compressione statiche e dinamiche. Il provino (e) è stato sottoposto a prove di trazione statiche.



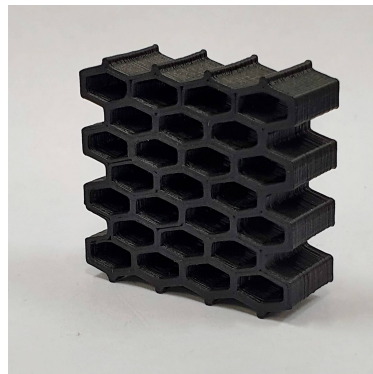
(a) *I Shape*



(b) *Re Shape*



(c) *S Shape*



(d) *Hex Shape*



(e) *Oso di Cane*



(f) *Cilindro*

Figura 3.2: Forme di provini utilizzati

I parametri di stampa impiegati sono descritti in tabella 3.1 mentre le dimensioni dei provini stampati si trovano in tabella 3.2.

Tabella 3.1: Parametri di stampa 3D utilizzati

	Unità di misura	Valore
Estrusore	$^{\circ}C$	225
Temperatura del letto di stampa	$^{\circ}C$	60
Velocità di stampa	mm/s	25
Moltiplicatore di portata/estrusione	%	100
Portata volumetrica	mm^3/s	2 - 3
Distanza di retrazione	mm/s	5

Tabella 3.2: Dimensioni dei provini

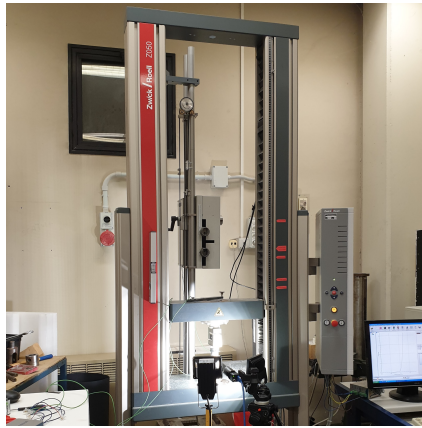
	Unità di misura	Height Width Depth
Cilindro	mm^3	10 · 10 · 10
Osso di cane (ASTM D638)	mm^3	35 · 5 ·
Strutture Piezoresistive	mm^3	32 · 32 · 12

3.2 Allestimento per le prove statiche di trazione e compressione

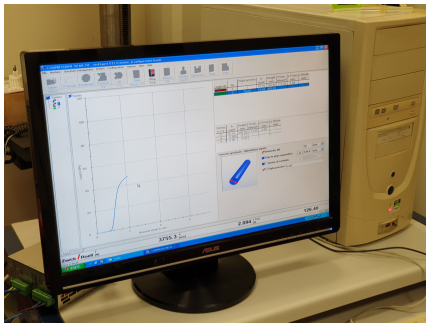
I provini sono stati sottoposti a prove di **trazione** e **compressione** statiche. Per le prove statiche, si è utilizzata la macchina Zwick Roell modello Z050 3.3b, situata presso il laboratorio di Meccanica Applicata e Costruzione di Macchine a quota 145 della facoltà di Ingegneria. Si è poi utilizzata una fotocamera con lente luminosa, affiancata da appositi faretti per avere una buona illuminazione 3.3d, al fine di catturare immagini in *burst mode* collegata a un primo computer (computer a destra di 3.3a). In figura 3.3c, infine, è rappresentato il computer utilizzato per l'acquisizione dei dati *stress-strain* rilevati dalla macchina in funzione del tempo, ottenuti a una velocità della stessa di $600\text{ mm}/\text{min}$ e $1\text{ mm}/\text{min}$ per i test di compressione mentre $0,5\text{ mm}/\text{min}$ per i test di trazione.



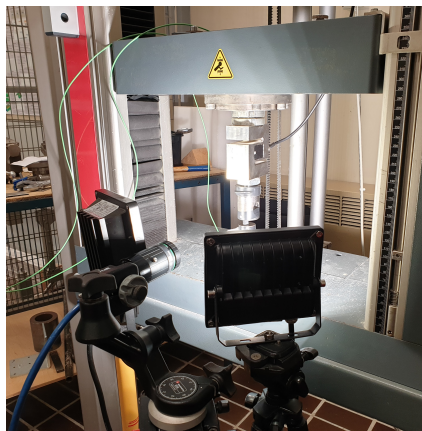
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.3: Setup utilizzato per le prove statiche

3.2.1 Caratterizzazione comportamento piezoresistivo

Il computer a sinistra della figura 3.3a, è stato utilizzato per definire il comportamento piezoresistivo del materiale. Quest'ultimo era collegato alla scheda di acquisizione National Instruments usb-6001. Per trovare la resistenza incognita del provino (Formula 3.2), abbiamo collegato in serie una resistenza nota del valore di $1\text{ k}\Omega$ creando un vero e proprio circuito elettrico.

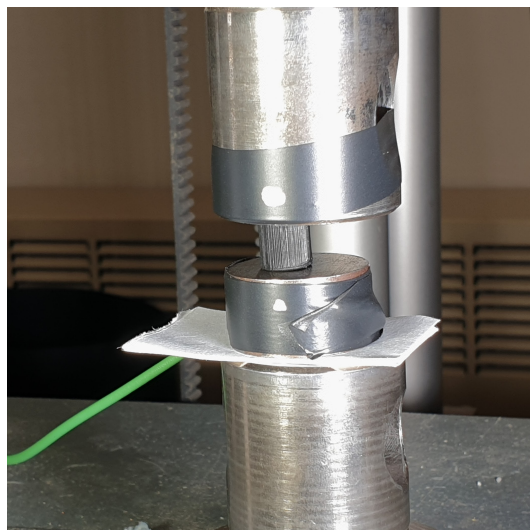


Figura 3.4: Si nota il nastro isolante, il cavo elettrico e il foglio di carta utilizzato per isolare il provino dal resto della macchina

Il circuito è stato alimentato da una batteria 9 V (Figura 3.5) ed isolato dal resto della macchina mediante nastro adesivo e fogli di carta posizionati al di sopra e al di sotto delle piastre. (Figura 3.4)

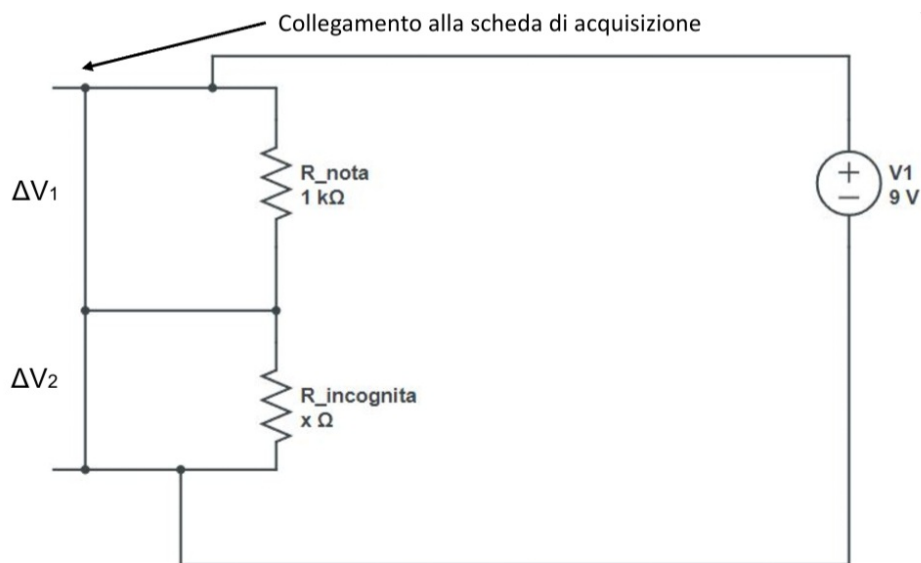


Figura 3.5: Modello stilizzato per trovare la resistenza del provino

Applicando la I legge di Ohm si ottiene:

$$\begin{cases} \Delta V_1 = R_{nota} \cdot I \\ \Delta V_2 = R_{incognita} \cdot I \end{cases} \implies \frac{\Delta V_1}{R_{nota}} = \frac{\Delta V_2}{R_{incognita}} \quad (3.1)$$

Da cui si ricava facilmente la resistenza incognita:

$$R_{\text{incognita}} = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \cdot R_{\text{nota}} \quad (3.2)$$

3.3 Allestimento per le prove dinamiche

Le prove dinamiche⁽¹⁾, invece, si sono svolte nei laboratori pesanti del DIISM dov'era presente la barra di Hopkinson, una termocamera modello "FLIR", per osservare come l'incremento di temperatura nei test dinamici fosse rilevante, e una videocamera ad alta velocità modello "Photron Sa4" per avere un riscontro visivo riguardo l'avanzamento della compressione istante per istante.

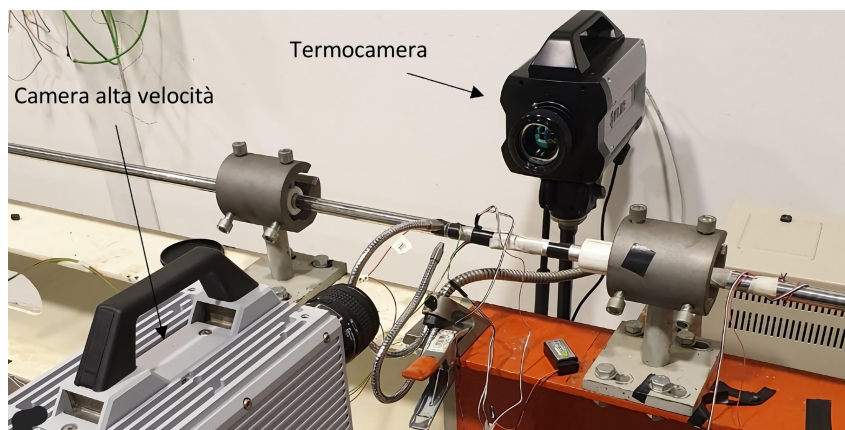


Figura 3.6: Allestimento prove dinamiche

3.3.1 La barra di Hopkinson

La prova con barra frazionata di Hopkinson, nota anche come split Hopkinson bar, è un metodo ampiamente verificato e collaudato utilizzato per la caratterizzazione dei materiali. Questa tecnica avanzata consente di determinare le proprietà dei materiali in condizioni dinamiche, fornendo informazioni preziose sulla loro risposta a carichi e tensioni ad alta velocità. Tra le informazioni che è possibile ottenere tramite questa tecnica, rientrano le costanti dei materiali, come il modulo elastico, che misura la capacità del materiale di deformarsi sotto l'azione di una forza, e la sollecitazione meccanica, che rappresenta il modo in cui il materiale reagisce alle sollecitazioni esterne.[20] La barra di Hopkinson utilizzata, progettata e realizzata dal Prof. Marco Sasso, è lunga 15 metri. È composta da una *Pre-stressed bar* che

⁽¹⁾I risultati delle prove dinamiche ottenuti sono stati acquisiti ma non elaborati. Nel successivo capitolo quindi, saranno analizzati in dettaglio solo i risultati delle prove statiche.

carica la *Input bar* a sua volta pretensionata da un martinetto che trancia a taglio l'elemento sacrificale (nel nostro caso anelli metallici di spessore variabile da 0,5 a 0,7 mm). L'*Output bar* è una barra rigida che riceve l'energia trasmessa dalla barra di trasmissione. Tra l'*Input bar* e la *Output bar* sono montati vari estensimetri che misurano l'onda trasmessa e quella riflessa.

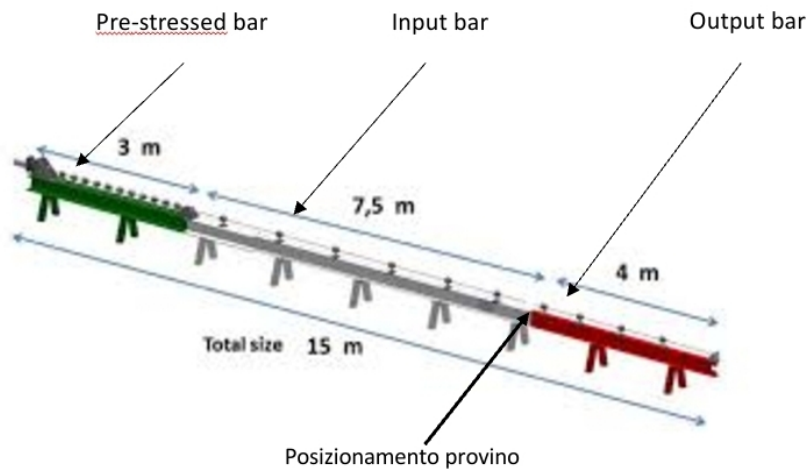


Figura 3.7: Schema della barra di Hopkinson nei laboratori pesanti del DIISM

3.4 Elaborazione dei dati

Tramite il programma MATLAB sono stati implementati dei codici di elaborazione dei dati registrati. È possibile reperire direttamente i codici MATLAB e visualizzare i grafici che saranno commentati nel capitolo 4 nel seguente *link web*. In linea di principio lo script utilizzato in tutte le strutture ha alcuni punti di somiglianza. Il primo passo è stato quello di importare i dati raccolti dalla macchina Zwick:

```
Ahex=importdata(file.txt);
```

Successivamente si è calcolati i valori di tensione e deformazione in ogni istante:

```
Spostamentohex = Ahex.data(:,1);  
Forzahex = Ahex.data(:,2);  
Area = 32*12;  
Altezza = 32;  
Tensionehex = Forzahex/Area;  
Deformazionehex = Spostamentohex/Altezza;
```

Si è poi impostato un valore soglia in modo tale da eliminare l'errore dovuto al mancato contatto della macchina col provino a inizio contatto:

```
thresholdhex = 0.015; % Valore di soglia  
startIndexhex = find(Tensionehex > thresholdhex,1,'first');
```

Quindi si è traslato il grafico tensione e deformazione in modo da adattare i valori al nuovo valore soglia:

```
Tensionetraslatahex = Tensionehex(startIndexhex:end);  
Deformazionetraslatahex = Deformazionehex(startIndexhex:end)  
- Deformazionehex(startIndexhex);
```

Per una migliore comprensione dello script e delle funzioni utilizzate si faccia riferimento direttamente alla guida ufficiale nel sito web⁽²⁾ di MATLAB.

⁽²⁾<https://it.mathworks.com/help/matlab/>

Capitolo 4

Analisi dei risultati ottenuti

Tramite il programma MATLAB è stato possibile analizzare e mettere a confronto i dati raccolti durante i test di trazione e compressione statici. In questo capitolo saranno trattati in dettaglio e commentati tutti i risultati ottenuti dai test sperimentali.

4.1 Test di compressione provino cilindrico

In figura 4.1, sono rappresentate le curve $\sigma - \varepsilon$ (in nero) e $R - \varepsilon$ (in blu) ricavate dalla compressione del provino cilindrico in condizioni statiche (velocità di deformazione pari a $3mm/min$). È interessante osservare come la curva $\sigma - \varepsilon$ ⁽¹⁾ abbia un andamento molto simile ai metalli soggetti a compressione con un primo tratto elastico (il tratto lineare) e il successivo tratto plastico (il tratto non lineare). Osservando le due curve, poi, si riscontra una qualche correlazione fra le stesse: fino al tratto lineare la R decresce per poi aumentare nel tratto non lineare. La resistenza elettrica del PLA diminuisce all'aumentare della deformazione elastica perché i percorsi di trasporto degli elettroni diventano più efficienti, cioè le molecole di PLA si allineano in una direzione più ordinata. Questo allineamento facilita il movimento degli elettroni, riducendo la resistenza. Nel tratto di deformazione plastica, il PLA inizia a deformarsi in modo permanente. Questo cambiamento nella struttura del materiale crea disordine e ostacola il movimento degli elettroni, aumentando la resistenza.

⁽¹⁾La curva è stata traslata su MATLAB rispetto a quella originale (curva azzurra) per evitare l'errore dovuto al contatto della macchina col provino.

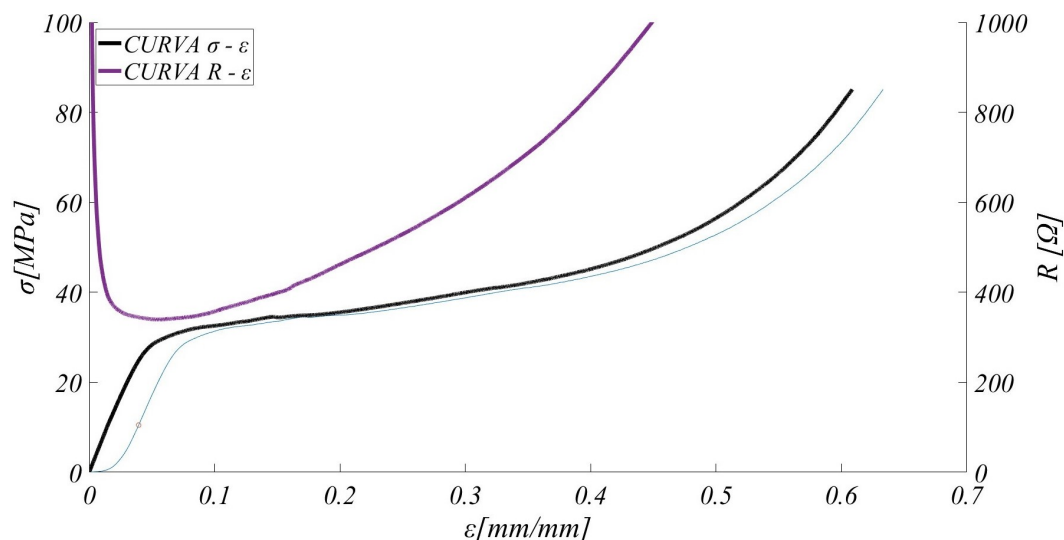


Figura 4.1: Confronto $\sigma - \varepsilon$ e $R - \varepsilon$

Il comportamento simile a quello dei metalli si osserva anche considerando il tratto in cui la resistenza alla deformazione aumenta in modo considerevole nel tratto plastico. Questo avviene perchè il provino cilindrico posto a compressione è soggetto a una forza d'attrito tra le piastre deformanti generando zone di deformazione non omogenee. Al contatto delle zone con ε bassa, la resistenza a compressione aumenta in modo considerevole. (Figura 4.2)

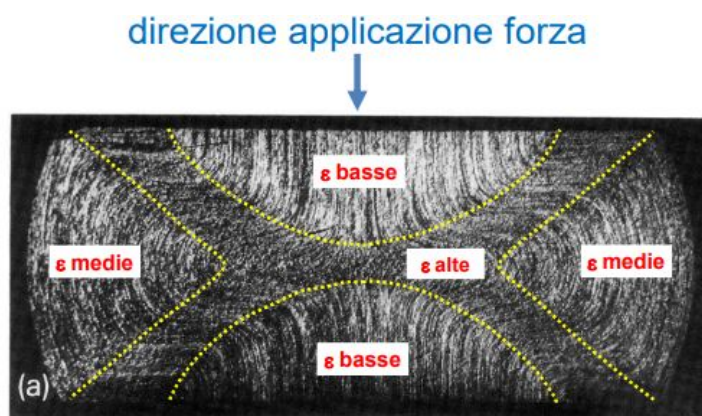


Figura 4.2: Il provino cilindrico soggetto a compressione in presenza di attrito si deforma disomogeneamente.

4.2 Test di trazione provino osso di cane

Nella prova di trazione effettuata a una velocità di $0,5\text{mm}/\text{min}$ il provino ha mostrato un comportamento fragile raggiungendo un valore di σ più basso rispetto a quanto visto nella compressione senza raggiungere elevate deformazioni. La resi-

stenza elettrica, poi, è aumentata in maniera proporzionale e quasi lineare con la tensione (figura 4.3) per la II legge di Ohm ($R = \rho \cdot \frac{Lunghezza}{Sezione}$, dove ρ è la resistività del materiale). Al progredire della prova, la sezione resistente infatti diminuisce e la lunghezza del provino aumenta.

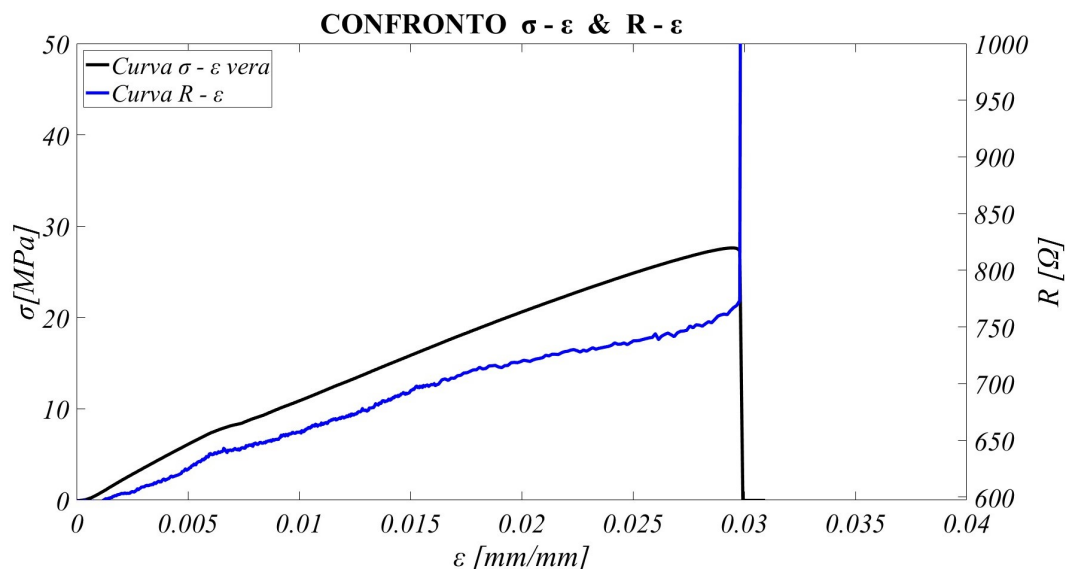
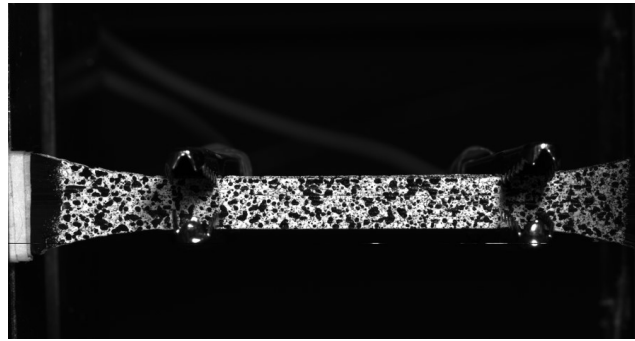


Figura 4.3: La prova di trazione mostra un andamento lineare con la resistenza

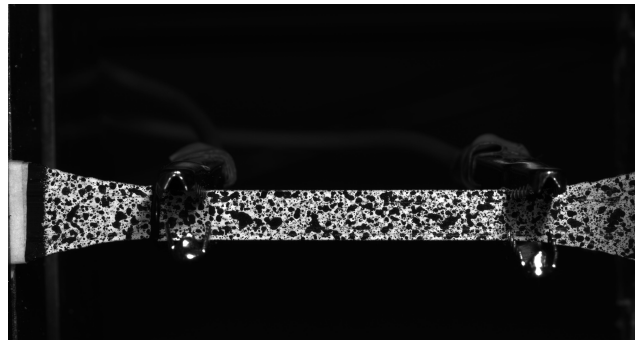
4.3 Confronto trazione/compressione

Abbiamo già osservato come le curve in figura 4.1 e 4.3 mostrano un comportamento del materiale differente se sollecitato a trazione o compressione. In figura 4.6 sono stati messi a confronto diretto le due curve. Il diverso comportamento del PLA nei due casi è da ricercarsi nella sua struttura interna:

Quando viene sottoposto a *trazione*, le catene polimeriche nel materiale sono soggette a tensioni. Poiché il PLA è una plastica termoplastica, le catene polimeriche sono disposte in modo disordinato e possono contenere imperfezioni o difetti. Questi difetti agiscono come punti deboli nella struttura del materiale. Sotto trazione, le tensioni agiscono per allontanare ulteriormente queste catene e accentuare i difetti, portando alla rottura del materiale in modo relativamente rapido, comportandosi quindi in modo fragile. (Figura 4.4)



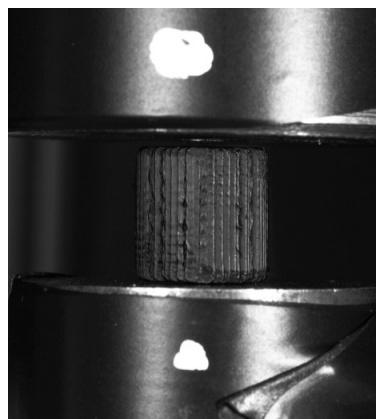
(a) *Inizio trazione*



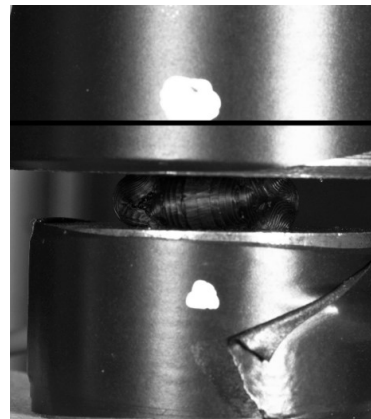
(b) *Fine trazione*

Figura 4.4: Il PLA a trazione si comporta come un materiale fragile rompendosi di schianto.

D'altra parte, quando il PLA è sottoposto a *compressione*, le catene polimeriche sono schiacciate insieme anziché allungate. In questa situazione, le tensioni tendono a stabilizzare la struttura e a ridurre l'effetto dei difetti, consentendo al materiale di deformarsi in modo duttile senza rompersi facilmente. (Figura 4.5)



(a) *Inizio compressione*



(b) *Fine compressione*

Figura 4.5: Il PLA a compressione si deforma ma non si rompe evidenziando la sua duttilità.

Sempre in figura 4.6 è stato possibile stimare graficamente il modulo elastico del materiale, chiamato modulo di Young, espresso come il coefficiente angolare del tratto lineare. Il valore trovato con MATLAB è stato all'incirca 2 GPa .

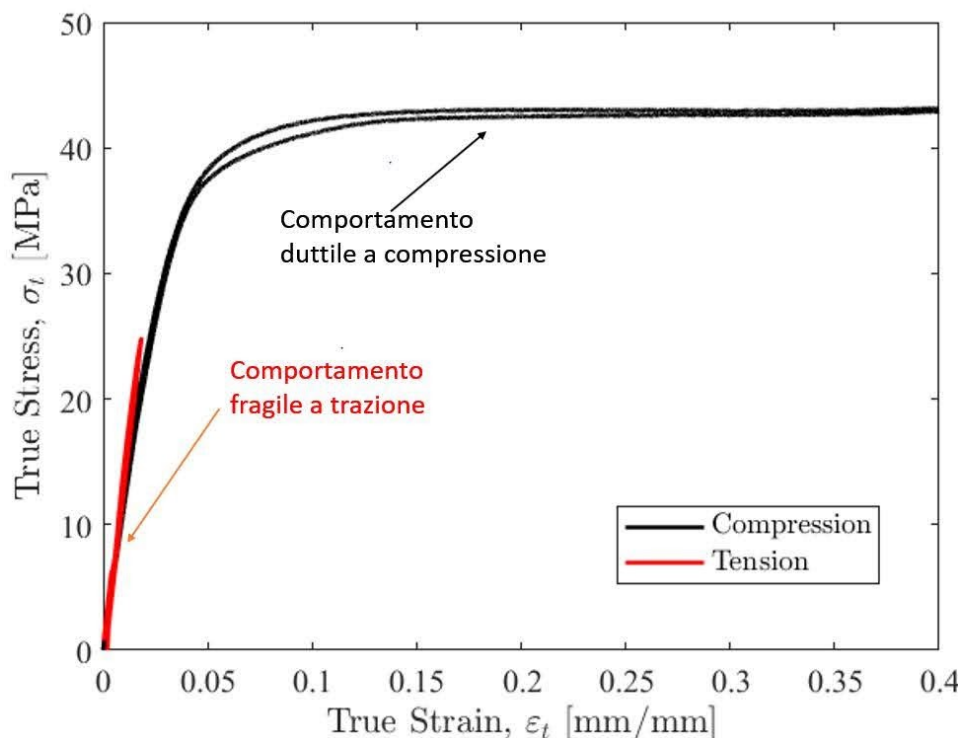


Figura 4.6: Confronto trazione/compressione.

4.4 Resistività

In figura 4.7, la resistività ($\rho = R \cdot \frac{\text{Sezione}}{\text{Lunghezza}}$) cresce linearmente al crescere del verso positivo della tensione. In generale, la resistività di un materiale è una misura di quanto sia difficile il passaggio della corrente elettrica attraverso di esso. Questa dipende dalla disposizione delle particelle conduttive all'interno del materiale. Quando si applica compressione, le particelle conduttive all'interno del materiale vengono spinte più vicine l'una all'altra. Tale contatto tra le particelle crea un percorso migliore per il flusso di elettroni, riducendo la resistività complessiva del materiale. D'altra parte quando si applica trazione le particelle conduttive vengono allontanate l'una dall'altra. Questa separazione tra le particelle aumenta la distanza che gli elettroni devono percorrere per attraversare il materiale, rendendo più difficile il loro passaggio. Di conseguenza, l'aumento della trazione rende più alta la resistività del materiale. Questo fenomeno prende il nome di effetto piezoresistivo.[21]

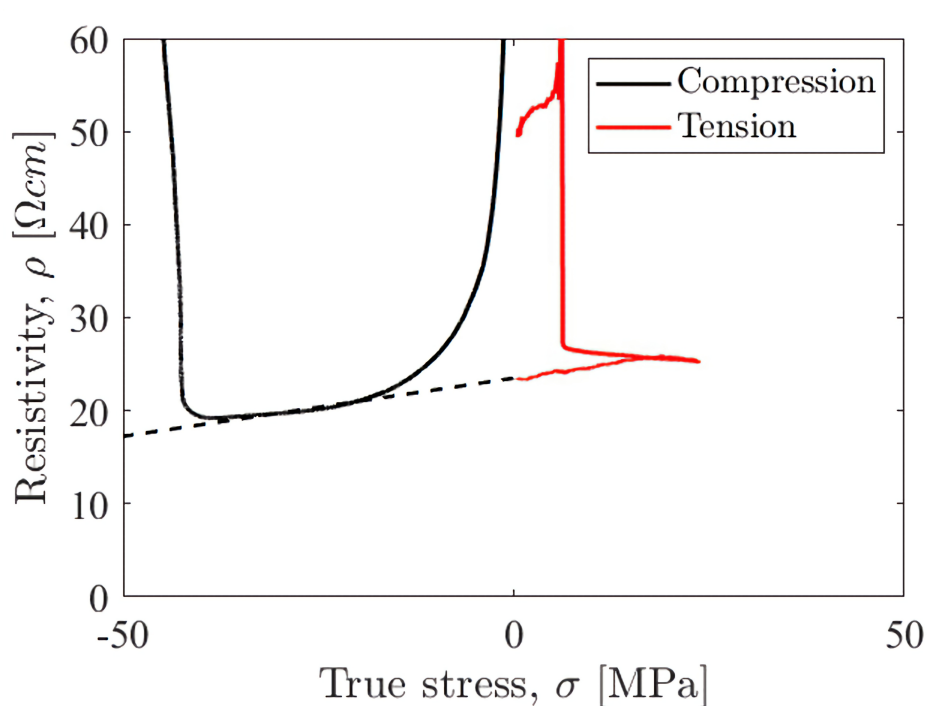


Figura 4.7: Resistività in relazione alla σ

4.5 Strutture piezoresistive

Le strutture piezoresistive hanno evidenziato come differenti pattern equivalgono a una resistenza diversa. Non solo, parametri di esecuzione delle prove differenti hanno resistito valori di resistenza diversi. Nei paragrafi successivi saranno analizzati in dettaglio i risultati del pattern HEX. Tutta l'analisi sottostante potrà essere applicata liberamente alle altre strutture.

4.5.1 Confronto a diverse velocità di deformazione

Come accade in quasi tutti i materiali, il PLA mostra differenze di resistenza (σ) a seconda della velocità di deformazione ($\dot{\epsilon}$). Nel corso delle prove sperimentali, tutte le strutture sono state testate a due velocità di deformazione ($3\text{mm}/\text{min}$ e $600\text{mm}/\text{min}$). In figura 4.8, è stato preso in esame il comportamento della struttura Hex-Shape che ha mostrato una resistenza a compressione maggiore nel caso di $\dot{\epsilon}$ pari a $600\text{mm}/\text{min}$ rispetto a $3\text{mm}/\text{min}$. Oltre a questo, la resistenza alla deformazione è risultata più omogenea ad alti valori di $\dot{\epsilon}$.

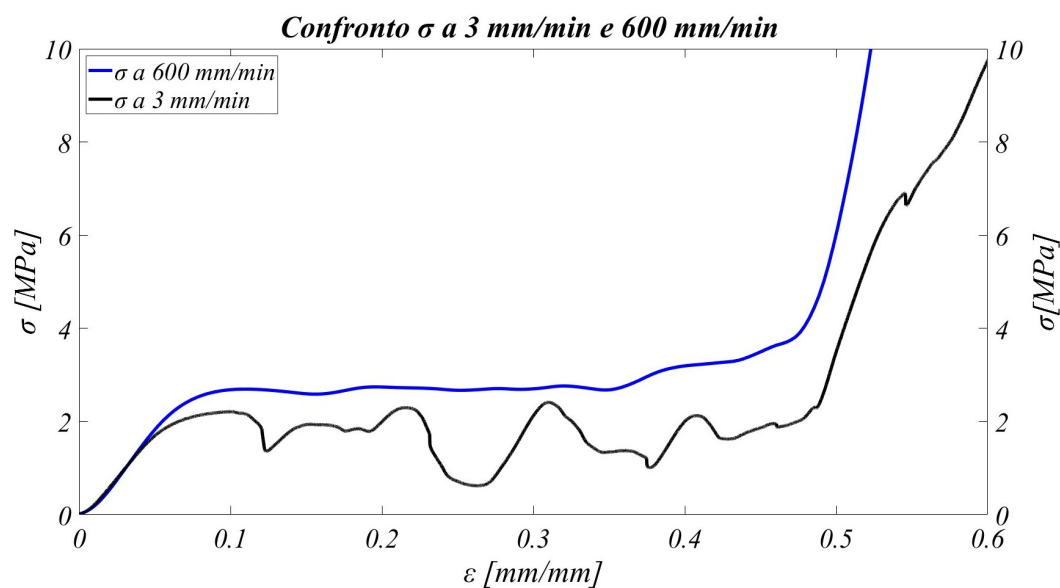


Figura 4.8: Resistenza a compressione a due $\dot{\varepsilon}$.

Questo risultato può essere spiegato in figura 4.9a: la struttura infatti collassa su se stessa in maniera quasi pressochè omogenea. L'elevata $\dot{\varepsilon}$ non consente al materiale di adattarsi al carico incrementale. Diversamente, in figura 4.9b la struttura cede nei punti di debolezza. La bassa $\dot{\varepsilon}$ permette infatti alla struttura di adagiarsi gradualmente su se stessa finchè la configurazione trovata risulta insufficiente a resistere al progressivo aumento di carico di compressione. Queste fasi proseguono fino alla completa compressione del materiale.

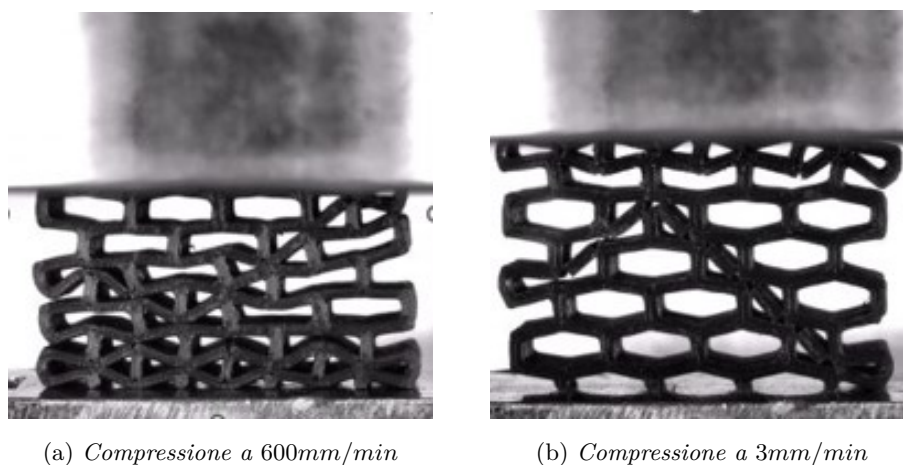


Figura 4.9

4.5.2 Confronto compressione e segnale elettrico

Lo stesso andamento si osserva confrontando le proprietà meccaniche e quelle piezoresistive; in particolare esiste una forte correlazione tra le proprietà elettriche e

quelle meccaniche. Ogni riduzione della resistenza meccanica a compressione, infatti, è accompagnata da un aumento della resistenza elettrica. Come già menzionato in 4.5.1, il materiale si adagia deformandosi, aumentando così la sua resistenza a compressione, la resistenza elettrica invece diminuisce per il maggior contatto del circuito elettrico. Seguono quindi cadute di resistenza a compressione per la rottura della struttura provvisoriamente presa dal materiale. (Figura 4.10)

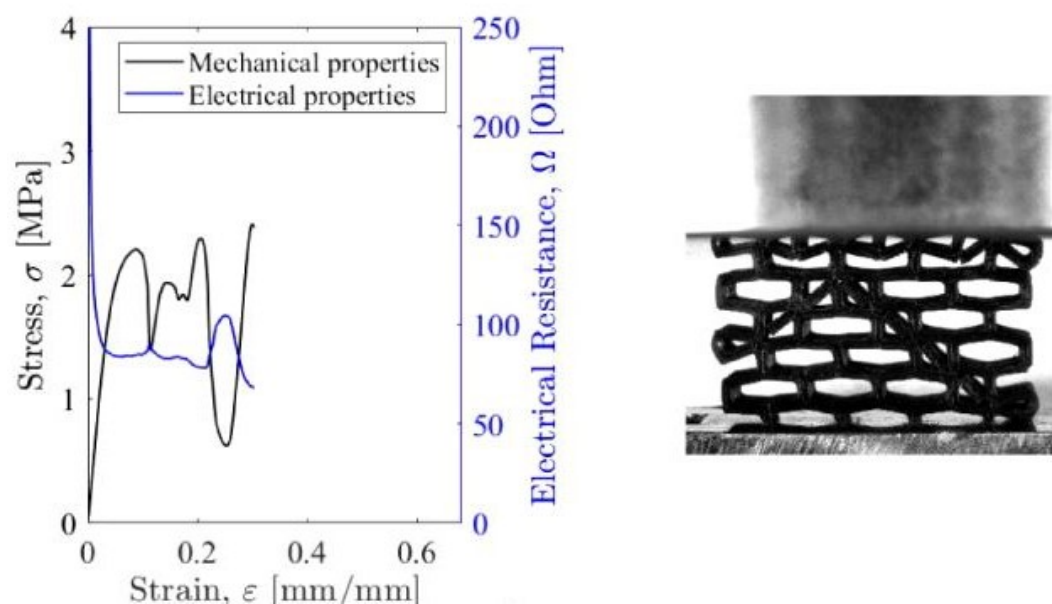


Figura 4.10: Relazione tra compressione e resistenza elettrica.

4.5.3 Confronto fra le diverse forme a elevata velocità di deformazione

In figura 4.11 sono rappresentate le curve di σ e R in funzione della deformazione per le diverse forme a $\dot{\epsilon}$ elevata. Le curve σ - ϵ sono differenti per ciascuna struttura. Nelle prove effettuate la forma più resistente è stata Re Shape; quella meno resistente invece è stata I Shape. Analogamente a quanto menzionato in 4.5.2, il segnale elettrico è risultato più basso in Re Shape, più elevato in I Shape.

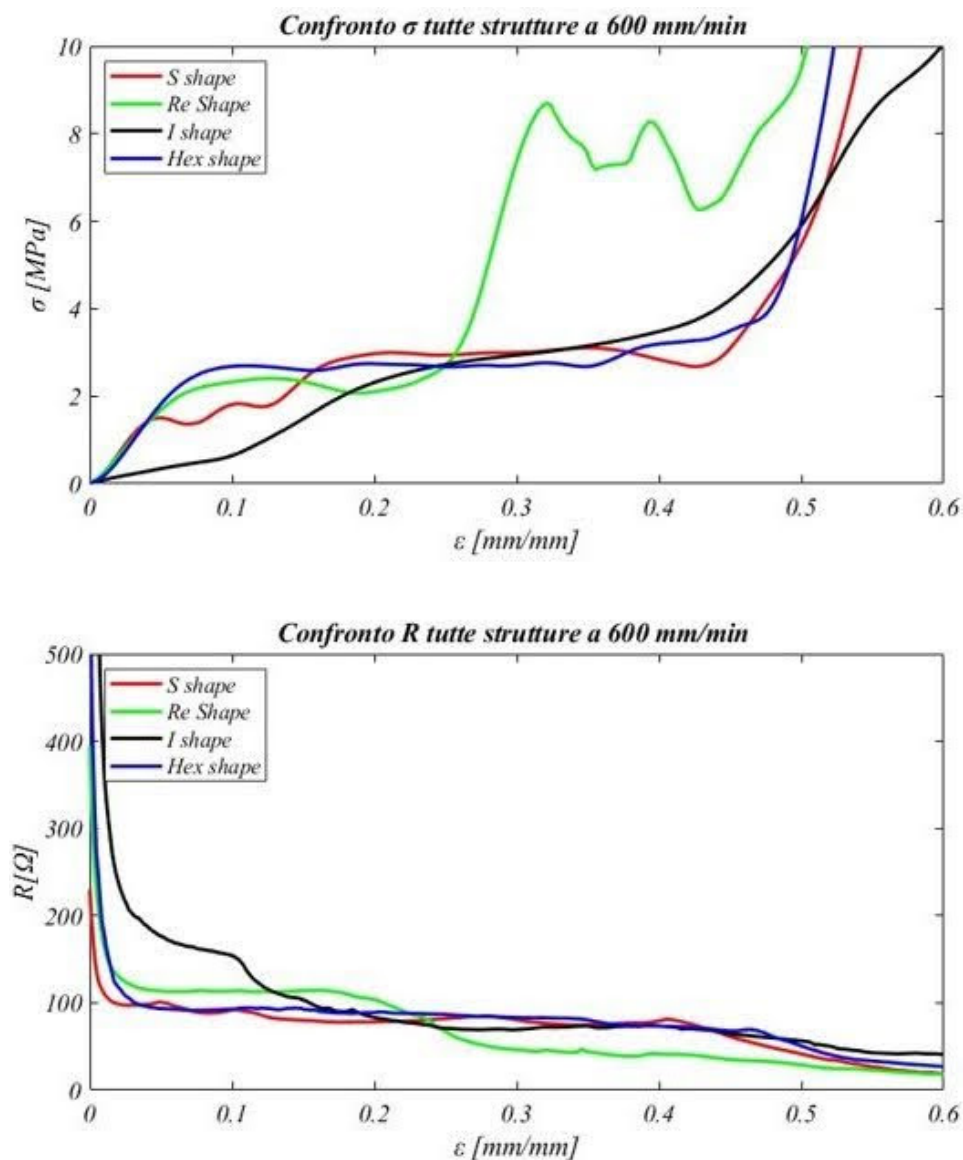


Figura 4.11: Relazione tra compressione e resistenza elettrica a $600\text{mm}/\text{min}$

4.5.4 Confronto fra le diverse forme a bassa velocità di deformazione

In figura 4.12 sono rappresentate le curve di σ e R in funzione della deformazione per le diverse forme a $\dot{\epsilon}$ bassa. In questo caso la curva σ - ϵ più omogenea, senza cioè fluttuazioni, è stata quella di I Shape: ciò consente di prevedere con maggior facilità il comportamento della struttura consentendo anche di estrapolare la curva dai valori di partenza.

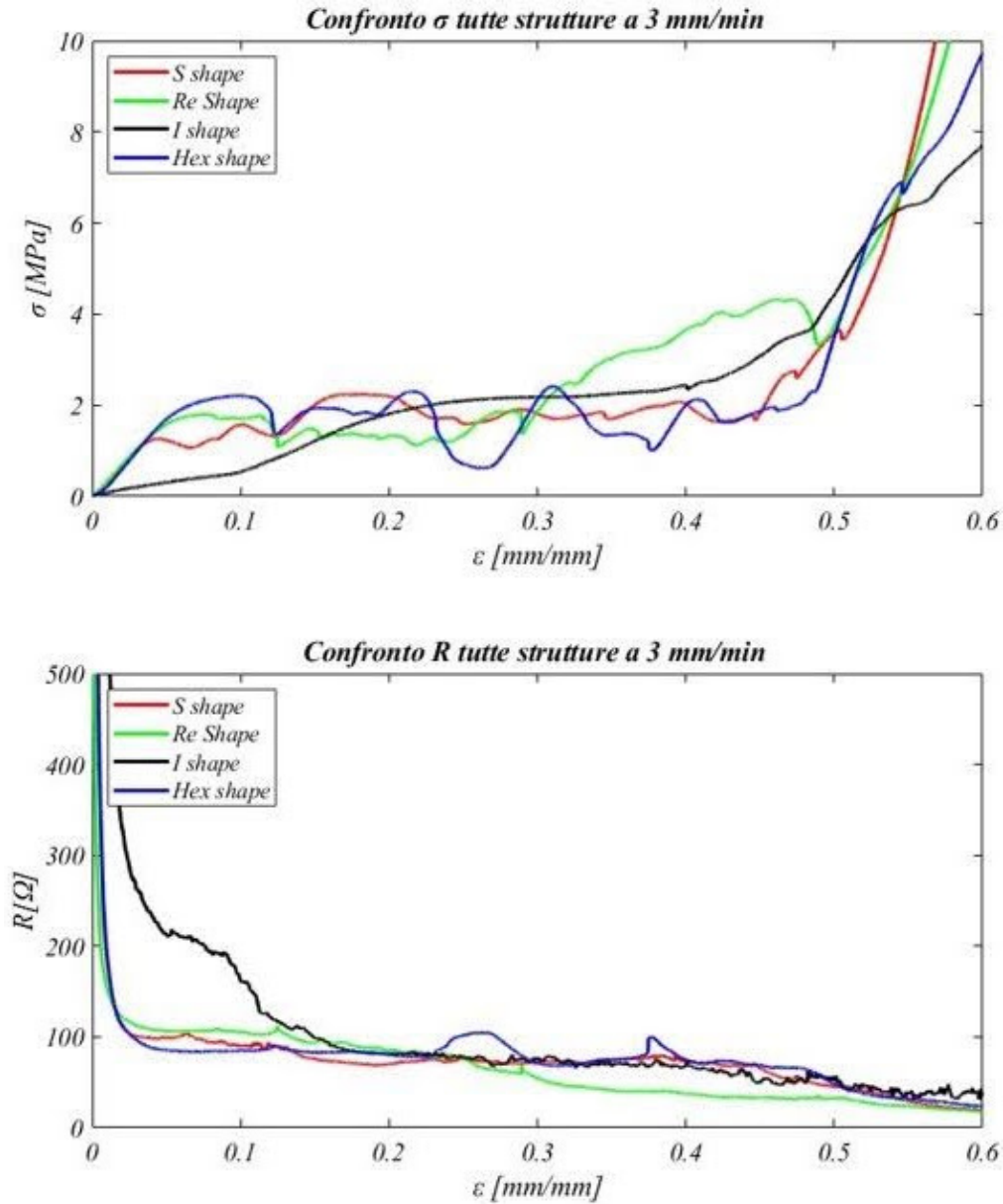


Figura 4.12: Relazione tra compressione e resistenza elettrica a $3\text{mm}/\text{min}$

4.6 Sommario risultati ottenuti

In questa sezione è presente una tabella rappresentante tutti i valori ottenuti dalle analisi sperimentali delle diverse strutture.

Tabella 4.1: Valori ottenuti dalle analisi sperimentali

	Struttura	σ_{\max}	σ per $\varepsilon = 0.5$ (=0.01 per trazione)	R per $\varepsilon = 0.5$ (=0.01 per trazione)
Bassa $\dot{\varepsilon}$	Osso di cane	27.6 MPa	10.8 MPa	657.7 Ω
	Cilindro	60.1 MPa	42.5 MPa	2844.3 Ω
	HEX_Shape	20.3 MPa	3.4 MPa	48.2 Ω
	S_Shape	20.1 MPa	4.4 MPa	44.9 Ω
	I_Shape	10.1 MPa	7.6 MPa	54.1 Ω
	RE_Shape	20.1 MPa	3.8 MPa	32.4 Ω
Elevata $\dot{\varepsilon}$	Osso di cane	\	\	\
	Cilindro	85.1 MPa	56.7 MPa	1219.7 Ω
	HEX_Shape	57.9 MPa	6.2 MPa	49.8 Ω
	S_Shape	61.7 MPa	5.4 MPa	41.8 Ω
	I_Shape	47.8 MPa	6.1 MPa	56.4 Ω
	RE_Shape	72.2 MPa	9.7 MPa	28.3 Ω

Conclusioni

Nella presente tesi si è studiato il comportamento del PLA conduttivo; si è visto che è un materiale biodegradabile e biocompatibile, ottenuto dalla fermentazione dell'amido di mais. Il PLA conduttivo è stato ottenuto aggiungendo al PLA standard delle nanoparticelle di grafene, che conferiscono al materiale una maggiore conducibilità elettrica. Si sono effettuati dei test sperimentali per valutare le proprietà meccaniche e piezoresistive del polimero conduttivo su provini di varie forme e dimensioni utilizzando una stampante 3D a filamento. Nel corso delle analisi dei dati ottenuti, si è visto in modo evidente come il PLA è un materiale che mostra differenti proprietà meccaniche a seconda che lo si sottoponga a trazione o a compressione. È emerso che il materiale mostra un comportamento simile a quello dei metalli in compressione dove risulta duttile mentre è fragile se sottoposto a trazione. Dalle analisi effettuate, poi, è emerso che l'elevata velocità di deformazione aumenta la resistenza meccanica. I test effettuati hanno riguardato anche la caratterizzazione del comportamento piezoresistivo del PLA: è stato constatato che la resistività di questo materiale aumenta con l'incremento della trazione e diminuisce con l'aumentare della compressione. Questo fornisce informazioni preziose sulla capacità del polimero di funzionare come sensore piezoresistivo, in quanto la sua resistività può essere utilizzata per rilevare la deformazione subita. In generale l'applicazione dei polimeri conduttivi sta conoscendo una rapida diffusione per la realizzazione di dispositivi meccanici ed elettronici, con applicazioni in diversi settori, come l'ingegneria biomedica, l'elettronica flessibile e la robotica. Dai risultati emersi, è raccomandabile in futuro una ricerca approfondita in settori dove esiste ancora margine di miglioramento:

- **Miglioramento delle proprietà meccaniche:** È necessario sviluppare nuovi metodi per migliorare le proprietà meccaniche del PLA conduttivo, in particolare la resistenza alla trazione. Ciò potrebbe essere ottenuto aggiungendo nanomateriali conduttivi o modificanti chimiche al PLA.

- **Studi su nuove applicazioni:** È necessario condurre studi su nuove applicazioni del PLA conduttivo in settori come l'elettronica, la medicina e l'ingegneria. Ciò potrebbe aiutare a identificare nuove opportunità di mercato per questo materiale.
- **Sviluppo di nuovi metodi di stampa 3D:** È necessario sviluppare nuovi metodi di stampa 3D per la stampa di oggetti complessi e funzionali in PLA conduttivo. Ciò potrebbe essere ottenuto utilizzando tecniche di stampa 3D additiva multimateriale o 3D printing diretto su substrato.

Bibliografia

- [1] Stereolitografia - Wikipedia — [it.wikipedia.org, https://it.wikipedia.org/wiki/Stereolitografia](https://it.wikipedia.org/wiki/Stereolitografia), [Accessed 21-08-2023].
- [2] A. Su, S. J. Al'Aref, Chapter 1 - history of 3d printing, in: S. J. Al'Aref, B. Mosadegh, S. Dunham, J. K. Min (Eds.), 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine, Academic Press, Boston, 2018, pp. 1–10. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128039175000018>
- [3] Wikipedia, Stampa 3D — Wikipedia, the free encyclopedia, <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Stampa%203D&oldid=134950665>, [Online; accessed 21-August-2023] (2023).
- [4] Wikipedia, Modellazione a deposizione fusa — Wikipedia, the free encyclopedia, <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Modellazione%20a%20deposizione%20fusa&oldid=128446384>, [Online; accessed 21-August-2023] (2023).
- [5] Stereolitografia | 3D Systems — [it.3dsystems.com, https://it.3dsystems.com/stereolithography](https://it.3dsystems.com/stereolithography), [Accessed 05-09-2023].
- [6] B. D. S. F. V. G., Stampanti 3D SLA-DLP, conosciamole! — [3dbiomodel.it, https://www.3dbiomodel.it/post/stampanti-3d-sladlp-conosciamole](https://www.3dbiomodel.it/post/stampanti-3d-sladlp-conosciamole), [Accessed 05-09-2023].
- [7] M. L. Rizzo, M. Giacomello, La sanità elettronica in una prospettiva rivoluzionaria: gli aspetti legali della stampa 3d in medicina, in: Strumenti, diritti, regole e nuove relazioni di cura. Il paziente europeo protagonista nell'eHealth, Giappichelli, 2015, pp. 335–344.
- [8] A. Moretto, Strategie sostenibili nell'industria 4.0.

Bibliografia

- [9] H. Yuk, B. Lu, S. Lin, K. Qu, J. Xu, J. Luo, X. Zhao, 3d printing of conducting polymers, *Nature communications* 11 (1) (2020) 1604.
- [10] Guida ai materiali di stampa 3D: tipologie, applicazioni e proprietà — formlabs.com, <https://formlabs.com/it/blog/materiali-stampa-3d/>, [Accessed 22-08-2023].
- [11] S. Rossini, *Acido polilattico (pla): miglioramento delle proprietà barriera e sviluppo di compositi ecosostenibili* (2014).
- [12] D. M. Frediani, D. L. Rosi, G. Mencherini, *Stereocomplessi di pla contenenti pt: sintesi, caratterizzazione ed applicazioni in catalisi*.
- [13] Processo di produzione del PLA — web.galateabiotech.com, <https://web.galateabiotech.com/processo-di-produzione-del-pla/>, [Accessed 24-08-2023].
- [14] Wikipedia, *Acido polilattico* — Wikipedia, the free encyclopedia, <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Acido%20polilattico&oldid=131964193>, [Online; accessed 22-August-2023] (2023).
- [15] *pla carbonio conduttivo elettronico telecomunicazioni arduino* — filoprint.it, https://www.filoprint.it/pla-carbonio-conduttivo/210-99676-pla-carbonio-conduttivo.html#/159-dimensioni-500_gr160_mt/173-colori-nero, [Accessed 24-08-2023].
- [16] F. Maccaferri, *Nuovi copolimeri triblocco biodegradabili a base di pla per imballaggi alimentari*.
- [17] Wikipedia, *Carbon footprint* — Wikipedia, the free encyclopedia, <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Carbon%20footprint&oldid=134497895>, [Online; accessed 23-August-2023] (2023).
- [18] *Why PLA? x2013; WINTERSUN* — iwintersun.com, <http://www.iwintersun.com/pla/?lang=en>, [Accessed 23-08-2023] (2015).
- [19] L. Franzini, *Studio dell'utilizzo del pla nel settore automobilistico in sostituzione dei polimeri tradizionali= study of the use of pla in the automotive sector to replace traditional polymers*, Ph.D. thesis, Politecnico di Torino (2022).

Bibliografia

- [20] A. DI FELICE, Progetto di un sistema di calettamento e arresto per barra di hopkinson a trazione e torsione (2022).
- [21] B. Landoni, Piezoelettricità e piezoresistività - TipsTricks — ei.futuranet.it, [https://ei.futuranet.it/2021/08/18/piezoelettricit%C3%A0-e-piezoresistivit%C3%A0-tipstricks/#:~:text=Quanto%20all%27effetto%20piezoresistivo%2C%20consiste,di%20carico\)%20e%20di%20forza.](https://ei.futuranet.it/2021/08/18/piezoelettricit%C3%A0-e-piezoresistivit%C3%A0-tipstricks/#:~:text=Quanto%20all%27effetto%20piezoresistivo%2C%20consiste,di%20carico)%20e%20di%20forza.), [Accessed 29-08-2023].