

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INNOVAZIONE DEL PRODOTTO

Stampa multimateriale di strutture polimeriche per l'assorbimento degli urti

Relatore

Prof. Biasetto Lisa

Laureando

Forti Leonardo

Matricola: 2122782

Anno accademico 2025 – 2026

Sommario

Introduzione	15
Capitolo 1	18
Sicurezza Passiva nell'Ingegneria dei Trasporti: il Ruolo del Paraurti	18
1.1 Introduzione alla Sicurezza Veicolare.....	18
1.2 La Sicurezza Passiva: Origini e Sviluppo Storico	19
1.3 Il Paraurti: Funzione, Evoluzione e Dati.....	20
1.4 Autovetture Stradali e Vetture da Competizione: una Prima Distinzione	21
1.5 Il Paraurti nelle Autovetture Stradali di Serie	22
1.5.1 Composizione del Sistema Paraurti.....	22
1.5.2 Principio di Funzionamento	23
1.5.3 Materiali Attualmente Impiegati	23
1.6 Il Paraurti nelle Vetture da Competizione: il Caso Formula 1.....	24
1.6.1 Principio di Funzionamento	24
1.6.2 Materiali Utilizzati	25
1.6.3 Test di Laboratorio e Requisiti FIA.....	26
1.7 Il Progetto AMAX-C: Strutture Ausetliche Composite per l'Assorbimento di Energia	27
1.8 Geometrie Ausetliche e Strutture Ausetliche Filled.....	29
1.8.1 Le Geometrie Ausetliche: Definizione e Principali Tipologie	29
1.8.2 Strutture Ausetliche Filled: Materiali e Produzione.....	30
1.8.3 Vantaggi Rispetto alle Strutture Monomateriale e Prestazioni Meccaniche	31
1.9 La Stampa Bimateriale	33
1.9.1 Principi Generali e Classificazione	33
1.9.2 MEX per la Stampa Bimateriale: da FDM a GEM	33
Capitolo 2	36
Selezione dei Materiali Polimerici per la Geometria Ausetliche.....	36
2.1 Introduzione alla Selezione dei Materiali.....	36
2.2 Coppie di Materiali Selezionate per la Sperimentazione	38
2.2.1 Prima Coppia: PLA e TPU.....	38
2.2.2 Seconda Coppia: HIPS e TPU	38
2.2.3 Combinazioni con TPE: HIPS-TPE e PLA-TPE	39

2.2.4 Analisi Calorimetrica Differenziale (DSC) dei Materiali.....	39
2.3 Il Provino di Compatibilità Bimateriale.....	44
2.4 Prima Coppia Testata: HIPS e TPU	46
2.4.1 Prima Stampa: Parametri e Risultato	47
2.4.2 Ottimizzazione dei Parametri e Risultato Finale	48
2.5 Seconda Coppia Testata: PLA e TPU	51
2.5.1 Affinità Chimica tra PLA e TPU: un Approfondimento	51
2.5.2 Struttura Chimica del PLA e del TPU	52
2.5.3 Meccanismi di Interazione Interfacciale.....	52
2.5.4 Il Ruolo della Temperatura e dell'interdiffusione durante la Stampa MEX.....	54
2.5.5 Prima Stampa: Parametri e Risultato	55
2.5.6 Ottimizzazione dei Parametri e Risultato Finale	55
2.6 Terza Coppia Testata: HIPS e TPE	58
2.6.1 Prima Stampa: Parametri e Risultato	58
2.6.2 Tentativi di Ottimizzazione e Conclusioni.....	59
2.7 Quarta Coppia Testata: PLA e TPE	60
2.7.1 Prima Stampa: Parametri e Risultato	60
2.7.2 Tentativi di Ottimizzazione e Conclusioni.....	61
2.7.3 Conclusioni sulla Selezione delle Coppie di Materiali.....	61
2.9 Prime Tower nella Stampa Bimateriale	63
Capitolo 3	65
Caratterizzazione Meccanica delle Coppie Selezionate: Provini Dog-Bone.....	65
3.1 Introduzione e Obiettivi del Capitolo	65
3.2 Verifica sui Provini Monomateriale di PLA.....	68
3.2.1 Provini Tipo 1 (Grande) e Tipo 2 (Piccolo): Confronto.....	69
3.2.2 Misura della Densità dei Provini.....	70
3.2.3 Risultati e Confronto con la Letteratura.....	73
3.2.4 Essiccazione del pellet e ripetizione delle prove	78
3.3 Modellazione 3D dei Provini Dog-Bone bimateriale.....	81
3.3.1 Modello A: Estremità Separate con Zona Centrale a Layer Alternati	81
3.3.2 Modello B: Layer Alternati sull'Intero Provino.....	82
3.4 Stampa Configurazione A – Coppia HIPS–TPU.....	83
3.5 Stampa Configurazione A – Coppia PLA–TPU.....	85

3.5.1 Prove di Trazione sui Provini Bimateriale – Configurazione A.....	87
3.5.2 Analisi della Modalità di Rottura al Microscopio Elettronico	90
3.5.3 Prove di Trazione sui Provini Bimateriale – Configurazione B.....	92
Capitolo 4	97
Prove a Compressione: Caratterizzazione Statica e Dinamica.....	97
4.1 Introduzione	97
4.2 Prima Geometria per le Prove Statiche: Cubo 20×20×20 mm e Cubo 10×10×10 mm	99
4.3 Prove di Compressione Statica	102
4.3.1 Prove sui Cubi 20×20×20 mm	102
4.3.2 Cambio Macchina e Limitazioni per le Prove Dinamiche	104
4.3.3 Prove sui Cubi 10×10×10 mm	106
4.3.4 Risultati delle Prove di Compressione Statica	106
4.4 Prove di Compressione Dinamica.....	119
.....	122
4.4.1 Riprogettazione della Geometria per le Prove Dinamiche.....	122
4.4.2 Misura della Densità dei Provini.....	124
Capitolo 5	139
Prime geometrie honeycomb e sviluppi futuri del progetto.....	139
5.1 Introduzione.....	139
5.2 Ottimizzazione dei Parametri di Stampa per le Geometrie honeycomb	140
5.4 Modellazione 3D del Provino honeycomb per le Prove Meccaniche	143
5.5 Estensione ai Materiali Ceramici e Metallici	145
5.6 Obiettivo Finale: il Paraurti per Formula SAE	146

Indice delle figure

Figure 1.1: Sistema di un paraurti	22
Figure 1.2: Componenti della struttura anteriore F1	24
Figure 1.3: Fibra di carbonio	25
Figure 1.4: Setup crash test frontale	26
Figure 1.5: Esempio geometria ausetica.....	29
Figure 1.6: Geometria ausetica "Filled"	31
Figure 1.7: Funzionamento estrusore Pollen HT.....	34
Figure 2.1: DSC PLA essiccato	40
Figure 2.2: DSC PLA non essiccato.....	41
Figure 2.3: DSC TPU essiccato.....	41
Figure 2.4: DSC TPU non essiccato.....	42
Figure 2.5: DSC HIPS	42
Figure 2.6: DSC TPE.....	43
Figure 2.7: Dettaglio della parte centrale	44
Figure 2.8: Modello della basetta	44
Figure 2.9: Basetta HIPS - TPU	50
Figure 2.10: Legame PLA - TPU	53
Figure 2.11: PLA – TPU basetta	57
Figure 2.12: PLA - TPU dettaglio layer	57
Figure 2.13: Prime tower.....	64
Figure 3.1: Misure per la norma EN ISO 20753	65
Figure 3.2: Dettaglio infill.....	68
Figure 3.3: Provino PLA tipo 1	71
Figure 3.4: Provino PLA tipo 2	71
Figure 3.5: Calcolo del volume	71
Figure 3.6: Grafico sforzo - deformazione PLA tipo 1	74
Figure 3.7: Foto provini PLA tipo 1 dopo il test di trazione	75
Figure 3.8: Grafico sforzo - deformazione PLA tipo 2	76
Figure 3.9: Foto provini PLA tipo 2 dopo il test di trazione	76
Figure 3.10: Grafici sforzo - deformazione PLA essiccato	80

Figure 3.11: Dog bone una estremità	81
Figure 3.12: Dettaglio layer (una metà).....	82
Figure 3.13: Provino HIPS - TPU	883
Figure 3.14: Provino HIPS - TPU rotto.....	84
Figure 3.15: provino HIPS - TPU dettaglio.....	84
Figure 3.16: Provino PLA - TPU tipo 1	85
Figure 3.17: Provino PLA - TPU tipo 2	85
Figure 3.18: Dettagli al microscopio del PLA tipo 2	86
Figure 3.19: Dettagli al microscopio del PLA tipo 2	86
Figure 3.20: Grafici sforzo - deformazione PLA - TPU tipo 1	88
Figure 3.21: Provini PLA - TPU tipo 1 post prova	90
Figure 3.22: Grafici sforzo - deformazione PLA - TPU tipo 2	90
Figure 3.23: Provini PLA - TPU tipo 2 post prova	91
Figure 3.24: Dettaglio della metà del TPU.....	92
Figure 3.25: Dettaglio della metà del PLA.....	92
Figure 3.26: Provini con layer alternati.....	93
Figure 3.27: Grafici sforzo deformazione PLA - TPU.....	94
Figure 3.28: Provini PLA - TPU post prova.....	95
Figure 4.1: modello 3D (una metà)	99
Figure 4.2: 2D sketch	100
Figure 4.3: Cubo di TPU	101
Figure 4.4: Cubi PLA -TPU 0.4	101
Figure 4.5: Cubo di PLA	101
Figure 4.6: Cubi PLA - TPU 1.6	101
Figure 4.7: Cubi PLA - TPU 0.2	101
Figure 4.8: Grafico e relativo provino di PLA della prova a compressione statica	103
Figure 4.9: Grafico e relativo provino di TPU della prova a compressione statica	104
Figure 4.10: Grafico e relativo provino di PLA - TPU 0.2 della prova di compressione statica.....	104
Figure 4.11: Grafico e relativo provino di PLA di compressione statica con il secondo macchinario	104

Figure 4.12: Grafico e relativo provino di TPU di compressione statica con il secondo macchinario	105
Figure 4.13: Grafico e relativo provino di PLA - TPU 0.2 di compressione statica con il secondo macchinario	105
Figure 4.14: Curve sforzo - deformazione provini PLA orientamento parallelo	107
Figure 4.15: Provini PLA post prova.....	107
Figure 4.16: Curve sforzo - deformazione provini PLA orientamento perpendicolare	108
Figure 4.17: Provini PLA post prova.....	108
Figure 4.18: Provino di TPU dopo la prova	110
Figure 4.19: Curve sforzo - deformazione provini TPU orientamento parallelo	110
Figure 4.20: Provino di TPU durante la prova	110
Figure 4.21: Curve sforzo - deformazione provini TPU orientamento perpendicolare	112
Figure 4.22: Curve sforzo - deformazione provini PLA – TPU 0.2 orientamento perpendicolare	114
Figure 4.23: Provini PLA - TPU 0.2 orientamento perpendicolare dopo la prova.....	114
Figure 4.24: Separazione dei layer	114
Figure 4.25: Provini PLA - TPU 0.2 orientamento parallelo dopo la prova	115
Figure 4.26: Curve sforzo - deformazione provini PLA – TPU 0.2 orientamento parallelo	115
Figure 4.27: Curve sforzo - deformazione provini PLA – TPU 0.4 orientamento parallelo	116
Figure 4.28: Provini PLA - TPU 0.4 orientamento perpendicolare dopo la prova.....	117
Figure 4.29: Curve sforzo - deformazione provini PLA – TPU 0.4 orientamento perpendicolare	117
Figure 4.30: Provini PLA - TPU 0.4 orientamento perpendicolare dopo la prova.....	118
Figure 4.31: Prima prova a compressione dinamica.....	119
Figure 4.32: Provino dopo la prima prova.....	120
Figure 4.33: Seconda prova a compressione dinamica	120
Figure 4.34: Provino dopo la prova.....	121
Figure 4.35: Prova a compressione dinamica con due cubi	122
Figure 4.36: Geometria del provino per le prove a compressione dinamica.....	123
Figure 4.37: Provini di PLA	125

Figure 4.38: Provini TPU	126
Figure 4.39: Provini PLA - TPU	127
Figure 4.40: Curve forza-spostamento dei provini in PLA monomateriale	129
Figure 4.41: Curve forza-spostamento dei provini in TPU monomateriale	130
Figure 4.42: Curve forza-spostamento dei provini bimateriale PLA-TPU	131
Figure 4.43: Provino PLA - TPU alla fine della prova di compressione statica	132
Figure 4.44: Curve forza-spostamento delle tre prove con provino fissato mediante nastro adesivo	131
Figure 4.45: Provino 5 post test di compressione.....	132
Figure 4.46: Provino 7 post test di compressione.....	131
Figure 5.1: Geometria honeycomb	132
Figure 5.2: Geometria esterna	131
Figure 5.3: Geometria interna	132
Figure 5.4: Prima prova di stampa	131
Figure 5.5: Dettaglio al microscopio	132
Figure 5.6: Prova ottimizzata flow PLA	131
Figure 5.7: Provino completo	132
Figure 5.8: Modello con dimensioni 10 x10 x 20 mm	131

Indice delle tabelle

Table 2.1: Parametri DSC	40
Table 2.2: Valori DSC PLA	41
Table 2.3: Valori DSC HIPS TPE	43
Table 2.4: Caratteristiche HIPS	46
Table 2.5: Caratteristiche TPE	46
Table 2.6: Parametri di stampa utilizzati nella prima prova (HIPS - TPU)	47
Table 2.7: Parametri modificati per la coppia HIPS-TPU	49
Table 2.8: Caratteristiche PLA	51
Table 2.9: Caratteristiche TPU	51
Table 2.10: Parametri di stampa utilizzati nella prima prova (coppia PLA-TPU) ...	55
Table 2.11: Parametri modificati per la coppia PLA-TPU	56
Table 2.12: Parametri di stampa utilizzati nella prima prova (coppia HIPS-TPE) ..	58
Table 2.13: Parametri modificati per la coppia HIPS-TPE	59
Table 2.14: Parametri di stampa utilizzati nella prima prova (coppia PLA-TPE) ...	61
Table 2.15: Parametri modificati per la coppia PLA-TPE.....	62
Table 2.16: Parametri principali della prime tower.....	64
Table 3.1: Dimensioni provino dog-bone Tipo 1 – Grande.....	67
Table 3.2: Dimensioni provino dog-bone Tipo 2 – Piccolo.....	66
Table 3.3: Parametri di stampa per i provini monomateriale PLA.....	70
Table 3.4: Densità provini Tipo A (misura geometrica)	72
Table 3.5: Densità provini Tipo B	72
Table 3.6: Dimensioni provini tipo A	72
Table 3.7: Dimensioni provini tipo B	73
Table 3.8: Dettagli macchina per le prove a trazione	73
Table 3.9: Risultati prove di trazione PLA tipo 1.....	74
Table 3.10: Risultati prove di trazione PLA tipo 2 (*outlier).....	75
Table 3.11: Dati letteratura. I dati sono la media dei risultati riportati negli articoli (*75% infill)	77
Table 3.12: Misura della densità del PLA essiccato	78

Table 3.13: Confronto risultati PLA non essiccato e PLA essiccato.....	80
Table 3.14: Densità provini bimatereiale Tipo 1 e 2	87
Table 3.15: Risultati prove di trazione PLA – TPU tipo 1.....	88
Table 3.16: Risultati prove di trazione PLA – TPU tipo 2.....	90
Table 3.17: Densità provini bimatereiale Configurazione B	92
Table 3.18: Risultati prove trazione	93
Table 4.1: Serie di provini cubici 20×20×20 mm stampati	99
Table 4.2: Serie di provini cubici 10×10×10 mm stampati per le prove statiche..	102
Table 4.3: Specifiche tecniche della macchina di compressione	103
Table 4.4: Specifiche tecniche della macchina di compressione	1045
Table 4.5: Specifiche tecniche della macchina di compressione	106
Table 4.6: Risultati della prova a compressione PLA parallelo.....	108
Table 4.7: Risultati della prova a compressione PLA perpendicolare.....	109
Table 4.8: Risultati della prova a compressione TPU parallelo	112
Table 4.9: Risultati della prova a compressione TPU perpendicolare	113
Table 4.10: Risultati della prova a compressione PLA – TPU 0.2 perpendicolare	114
Table 4.11: Risultati della prova a compressione PLA – TPU 0.2 parallelo.....	116
Table 4.12: Risultati della prova a compressione PLA – TPU 0.4 parallelo.....	117
Table 4.13: Risultati della prova a compressione PLA – TPU 0.4 perpendicoale	118
Table 4.14: Specifiche tecniche della macchina di compressione.....	119
Table 4.15: Densità provini PLA monomateriale 10×10×20 mm	125
Table 4.16: Densità provini TPU monomateriale 10×10×20 mm.....	126
Table 4.17: Densità provini bimatereiale PLA-TPU 10×10×20 mm.....	127
Table 4.18: Specifiche tecniche della macchina di compressione.....	128
Table 4.19: Risultati della prova a compressione PLA.....	129
Table 4.20: Risultati della prova a compressione PLA.....	130
Table 4.21: Risultati della prova a compressione PLA – TPU.....	131
Table 4.22: Risultati delle prove a compressione dinamica con provino vincolato mediante nastro adesivo	135

Introduzione

La sicurezza dei veicoli rappresenta oggi uno dei principali motori dell'innovazione nell'ingegneria dei trasporti. Accanto ai sistemi di sicurezza attiva, che intervengono per prevenire l'incidente, la sicurezza passiva ha il compito di proteggere gli occupanti e ridurre i danni quando l'urto è ormai inevitabile. In questo ambito assumono un ruolo centrale le strutture ad assorbimento di energia, chiamate a dissipare in modo controllato l'energia cinetica sviluppata durante la collisione. Il paraurti, con i suoi elementi collassabili (crash box), costituisce la prima linea di difesa del veicolo: è il componente che, deformandosi, converte l'energia dell'impatto in lavoro di deformazione plastica, limitando le decelerazioni trasmesse alla scocca e agli occupanti.

La ricerca di strutture sempre più leggere, ma capaci di assorbire una quantità crescente di energia per unità di massa, ha spinto l'attenzione verso soluzioni geometriche e materiali innovativi. Tra queste, le geometrie ausettiche – caratterizzate da un coefficiente di Poisson negativo, che le porta a contrarsi trasversalmente quando compresse – offrono vantaggi peculiari in termini di densificazione localizzata, resistenza all'indentazione e capacità di assorbimento specifico dell'energia. Il loro potenziale cresce ulteriormente quando la struttura ausettica viene riempita con un secondo materiale (strutture ausettiche filled): la sinergia tra telaio e riempimento consente di assorbire un'energia sistematicamente superiore alla somma dei contributi dei singoli costituenti.

La realizzazione pratica di questi compositi è resa possibile dai progressi della produzione additiva multi-materiale, e in particolare delle tecnologie a estrusione di materiale (MEX). La stampa bimatereiale permette infatti di combinare, in un'unica sessione di stampa e senza fasi di assemblaggio, un telaio rigido e un riempimento a comportamento più cedevole, controllando geometria e interfaccia tra le fasi. È in questo scenario che si inserisce il presente lavoro di tesi, sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca AMAX-C (Extrusion Additive Manufacturing of AuXetic Composite structures), dedicato allo studio di strutture ausettiche composite per l'assorbimento di energia realizzate mediante manifattura additiva.

L'obiettivo della tesi è gettare le basi sperimentali per la progettazione di un assorbitore ausettico bimateriale, affrontando in modo sistematico i nodi che precedono la realizzazione della geometria finale. Il percorso muove dalla selezione di coppie di materiali polimerici compatibili con la stampa bimateriale, ne verifica l'adesione interfacciale e la stampabilità, e prosegue con la caratterizzazione meccanica delle combinazioni più promettenti attraverso prove di trazione e prove di compressione, sia statiche sia dinamiche. Le informazioni così ottenute costituiscono il presupposto per la definizione delle prime geometrie ausettiche e, in prospettiva, per la realizzazione di un paraurti destinato a una vettura di tipo Formula SAE.

Il lavoro è organizzato in cinque capitoli. Il primo capitolo inquadra il tema della sicurezza passiva nell'ingegneria dei trasporti, descrivendo la funzione e l'evoluzione del paraurti nelle vetture di serie e da competizione, e introducendo il progetto AMAX-C, le strutture ausettiche filled e i principi della stampa bimateriale. Il secondo capitolo affronta la selezione dei materiali polimerici, illustrando le coppie testate (PLA-TPU, HIPS-TPU, HIPS-TPE, PLA-TPE), i provini di compatibilità e l'ottimizzazione dei parametri di processo. Il terzo capitolo è dedicato alla caratterizzazione meccanica mediante provini dog-bone, con prove di trazione e analisi delle modalità di rottura al microscopio elettronico. Il quarto capitolo presenta le prove di compressione statica e dinamica sulle geometrie di prova. Il quinto capitolo, infine, discute le prime geometrie ausettiche realizzate e delinea gli sviluppi futuri del progetto, dall'estensione a materiali ceramici e metallici fino all'obiettivo del paraurti per Formula SAE.

Capitolo 1

Sicurezza Passiva nell'Ingegneria dei Trasporti: il Ruolo del Paraurti

1.1 Introduzione alla Sicurezza Veicolare

Nell'ingegneria dei trasporti la sicurezza veicolare è tradizionalmente suddivisa in tre grandi domini complementari. La sicurezza attiva comprende l'insieme dei sistemi progettati per prevenire l'incidente: sistemi antibloccaggio (ABS), controllo elettronico della stabilità (ESP), sistemi avanzati di assistenza alla guida (ADAS) e frenata automatica di emergenza rientrano tutti in questa categoria. La sicurezza passiva include invece le soluzioni strutturali e tecnologiche concepite per attenuare le conseguenze di un urto già avvenuto: cinture di sicurezza, airbag, zone deformabili e, naturalmente, il paraurti. Un terzo ambito, talvolta distinto con l'etichetta di sicurezza terziaria o post-incidente, riguarda invece la gestione del soccorso e la minimizzazione dei danni dopo l'evento (sistemi eCall, strutture di contenimento stradale, procedure di estricazione). Il presente capitolo si concentra sulla sicurezza passiva, con particolare attenzione al paraurti come componente strutturale fondamentale.

1.2 La Sicurezza Passiva: Origini e Sviluppo Storico

La nozione moderna di sicurezza passiva nasce a metà del Novecento, quando l'aumento della diffusione dell'automobile rese evidente l'insufficienza delle strutture rigide dell'epoca di fronte ai carichi impulsivi di un impatto. La svolta concettuale si deve a Béla Barényi, ingegnere austro-ungarico che nel 1952 brevettò per Daimler-Benz il principio della carrozzeria tripartita: un abitacolo rigido – la cosiddetta safety cell – circondato da zone anteriori e posteriori progressivamente deformabili, le crumple zones, capaci di assorbire l'energia cinetica dell'urto attraverso una deformazione plastica controllata [1]. Questo cambio di paradigma – dall'automobile intesa come struttura indeformabile all'automobile a collasso controllato – costituisce ancora oggi il principio operativo di ogni sistema di assorbimento di energia presente sui veicoli stradali e da competizione.

Negli anni Sessanta e Settanta l'attenzione si spostò anche sulla protezione dei pedoni e degli occupanti in caso di urto frontale a bassa velocità. Fu in questo periodo che i primi standard normativi iniziarono a regolamentare le prestazioni del paraurti: negli Stati Uniti la normativa FMVSS 581 (1973) impose ai costruttori di garantire l'assenza di danni strutturali a seguito di impatti a 8 km/h, mentre in Europa le direttive CEE e, successivamente, i regolamenti UN-ECE R42 e R94 definirono requisiti analoghi per gli urti frontali e laterali [1, 2]. A partire dagli anni Novanta, con l'introduzione dei crash test Euro NCAP (1997), la valutazione della sicurezza passiva è divenuta uno standard condiviso e riconoscibile dal grande pubblico, incentivando una progressiva evoluzione delle tecnologie di assorbimento dell'energia.

1.3 Il Paraurti: Funzione, Evoluzione e Dati

Il paraurti è l'elemento più avanzato della struttura del veicolo e svolge una duplice funzione ingegneristica. In condizioni di urto a bassa velocità – tipicamente al di sotto dei 15 km/h, come nelle manovre di parcheggio e nei tamponamenti leggeri – deve assorbire l'energia in modo elastico o con limitata deformazione plastica, proteggendo le componenti strutturali retrostanti (longheroni, crash box, radiatore, gruppi ottici) e contenendo i costi di riparazione [1]. In caso di urto ad alta velocità, invece, il paraurti agisce in sinergia con le crash box e i longheroni per dissipare grandi quantità di energia cinetica attraverso un collasso plastico controllato, mantenendo le decelerazioni trasmesse agli occupanti entro le soglie di tolleranza biomeccanica del corpo umano [1, 2].

Dal punto di vista storico, i primi paraurti automobilistici comparirono intorno al 1897 come semplici barre metalliche orizzontali, prive di qualsiasi funzione di assorbimento dell'energia. Per decenni rimasero elementi prevalentemente estetici, realizzati in acciaio cromato e dimensionati per resistere a urti a velocità molto ridotte. La vera evoluzione strutturale iniziò negli anni Settanta, quando le crisi petrolifere e le prime normative sulla sicurezza spinsero i costruttori a introdurre paraurti con elementi ammortizzanti a fluido o a gas. Con la diffusione dei materiali polimerici negli anni Ottanta e Novanta, la fascia esterna del paraurti passò dall'acciaio al polipropilene e alle sue varianti rinforzate, riducendo il peso del componente del 30–50 % rispetto alle soluzioni in metallo e consentendo geometrie molto più libere da vincoli di stampaggio. Oggi un sistema paraurti completo per un'autovettura di segmento C pesa tipicamente tra 8 e 15 kg e deve soddisfare simultaneamente requisiti di sicurezza attiva (sensori radar e LIDAR integrati nella fascia), protezione dei pedoni, resistenza agli urti a bassa velocità e minimizzazione del peso [1].

1.4 Autovetture Stradali e Vetture da Competizione: una Prima Distinzione

Sebbene il principio di assorbimento controllato dell'energia sia comune ad entrambi i contesti, le soluzioni adottate nelle autovetture stradali e nelle vetture da competizione differiscono sostanzialmente per materiali, geometrie e requisiti normativi. Le auto di serie devono coniugare prestazioni di sicurezza con costo industriale contenuto, riciclabilità e conformità a normative di protezione dei pedoni; di conseguenza, il paraurti stradale è tipicamente un sistema ibrido acciaio-polimero ottimizzato per la produzione in grande serie. Le vetture da competizione – e in particolare quelle di Formula 1 – operano invece in un contesto regolato dalla FIA, che impone strutture anteriori (nose cone) in composito a sandwich capaci di dissipare l'energia cinetica di un impatto frontale a 15 m/s mantenendo la decelerazione media al di sotto dei 40 g [3, 4]. Questa divergenza di requisiti ha generato un fecondo trasferimento tecnologico: materiali compositi, strutture cellulari e schiume ad alta efficienza energetica, nati nel contesto del motorsport, trovano oggi applicazione crescente nella produzione di serie. Il tema verrà approfondito nei paragrafi successivi.

1.5 Il Paraurti nelle Autovetture Stradali di Serie

1.5.1 Composizione del Sistema Paraurti

Il sistema paraurti di un'autovettura stradale moderna non è un componente singolo, ma un'architettura stratificata composta da tre elementi principali che collaborano in sequenza durante un impatto [Figura 1]. La fascia esterna (outer cover) è la superficie a vista, realizzata quasi universalmente in polipropilene (PP) o in miscele PP-EPDM-talco: ha funzione estetica e aerodinamica, ma contribuisce anche all'assorbimento di energia negli urti a velocità molto bassa. Dietro di essa si trova l'assorbitore di energia (energy absorber), tipicamente in schiuma di polipropilene espanso (EPP) o in polipropilene stampato a iniezione con geometria a nido d'ape; il suo compito è assorbire elasticamente i micro-urti e attivare la deformazione controllata nei colpi a bassa velocità, riducendo i costi di riparazione. Il terzo elemento è la trave di rinforzo (bumper beam o bumper reinforcement), la componente strutturale principale: è una trave a sezione cava (tipicamente a profilo B, C o hat) collegata ai longheroni del telaio tramite le crash box. Le crash box – dette anche deformation elements o progressive crush tubes – sono elementi tubolari a parete sottile progettati per collassare in modo progressivo e prevedibile, dissipando la massima quantità di energia cinetica per unità di massa prima che il carico si trasmetta ai longheroni e all'abitacolo [1].

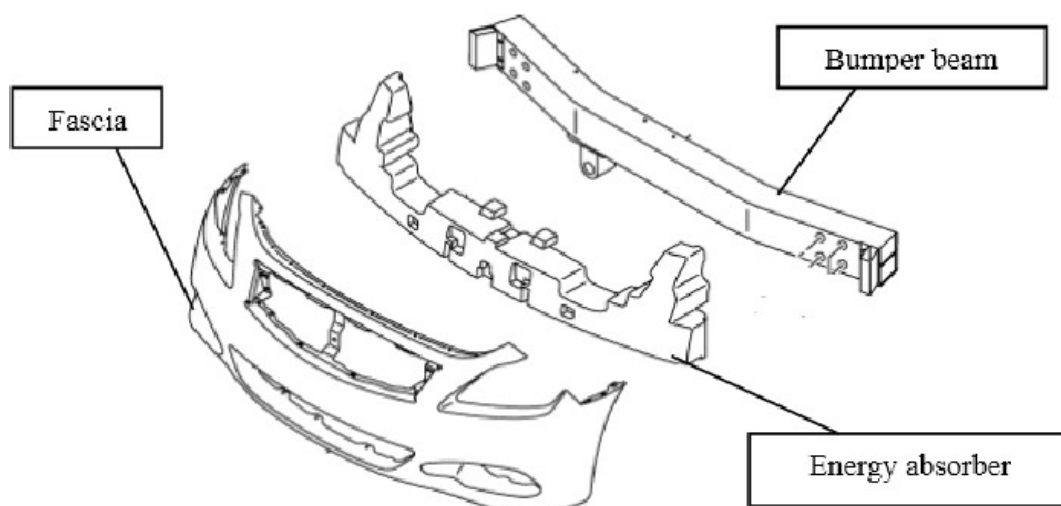


Figura 1.0.1: Sistema di un paraurti

1.5.2 Principio di Funzionamento

Il sistema risponde agli impatti con una logica a due fasi. Negli urti a bassa velocità (fino a circa 15 km/h, regolati dalla norma UN-ECE R42 e dai test RCAR), la fascia esterna e l'assorbitore in EPP si deformano senza coinvolgere la trave né le crash box, consentendo una riparazione a costi contenuti. Negli urti a velocità maggiore – come quelli dei crash test frontali Euro NCAP a 56 km/h o ODB (Offset Deformable Barrier) a 64 km/h – la trave di rinforzo si flette e le crash box collassano plasticamente, trasferendo il carico ai longheroni in modo distribuito. L'obiettivo progettuale è mantenere i picchi di decelerazione trasmessi agli occupanti entro i limiti di tolleranza biomeccanica, generalmente espressi come Head Injury Criterion (HIC) e accelerazione toracica inferiore a 60 g [1, 3]. La geometria delle crash box – spessore della parete, presenza di trigger (incisioni o rientranze che avviano il collasso), sezione trasversale circolare, quadrata o poligonale – è ottimizzata per garantire un plateau di forza il più uniforme possibile durante l'assorbimento, evitando picchi che potrebbero trasmettere carichi eccessivi alla struttura secondaria.

1.5.3 Materiali Attualmente Impiegati

La selezione dei materiali è il risultato di un compromesso tra resistenza specifica, capacità di assorbimento energetico, costo di produzione e requisiti di riciclabilità. Per la trave di rinforzo si impiegano principalmente acciai alto-resistenziali (AHSS – Advanced High-Strength Steel, con resistenza a snervamento fino a 1500 MPa) nelle applicazioni di massa, e leghe di alluminio della serie 6xxx (AA6061, AA6082) nei segmenti premium, con un risparmio di peso del 40–50 % rispetto all'acciaio a parità di prestazione energetica [1]. Le crash box sono realizzate con le stesse famiglie di materiali, oppure – in applicazioni sportive – in laminati di fibra di carbonio o fibra di vetro in resina epossidica, che offrono un'energia assorbita specifica (Specific Energy Absorption, SEA) superiore a 80 kJ/kg contro i 20–40 kJ/kg degli acciai convenzionali [4]. La fascia esterna e l'assorbitore rimangono prevalentemente in materiali polimerici: il PP-EPDM rappresenta la soluzione di riferimento per la fascia in virtù della sua stampabilità e resilienza, mentre per l'assorbitore l'EPP sta progressivamente cedendo spazio a strutture reticolari stampate in 3D in TPU (poliuretano termoplastico), che consentono di modulare localmente la rigidità del componente in funzione delle zone di impatto più critiche [1].

1.6 Il Paraurti nelle Vetture da Competizione: il Caso Formula 1

1.6.1 Principio di Funzionamento

Nelle vetture di Formula 1 la funzione del paraurti stradale è svolta dalla struttura anteriore di impatto, comunemente denominata nose cone, composta dal nose box, dal nose tip e dai piloni dell'ala anteriore [Figura 2]. La filosofia progettuale alla base di questi sistemi è quella della survival cell: il pilota è protetto all'interno di un monoscocca rigida circondata da strutture sacrificali anteriori, posteriori e laterali progettate per assorbire l'energia cinetica dell'impatto prima che questa raggiunga l'abitacolo [4]. A differenza dei metalli, che dissipano energia attraverso la deformazione plastica, i materiali compositi lo fanno mediante frantumazione e frammentazione: nel corso di un impatto frontale ad alta velocità il nose box si trasforma letteralmente in una nuvola di frammenti nel giro di un decimo di secondo, con rottura delle fibre, fessurazione della matrice e delaminazione che contribuiscono congiuntamente all'assorbimento energetico [4]. Questo meccanismo, pur rendendo la struttura non riparabile, garantisce un'energia assorbita specifica (SEA) superiore a 80 kJ/kg – ben oltre i 20–40 kJ/kg ottenibili con le strutture metalliche – per un'energia cinetica iniziale coinvolta nel test FIA pari a circa 88 kJ [4]

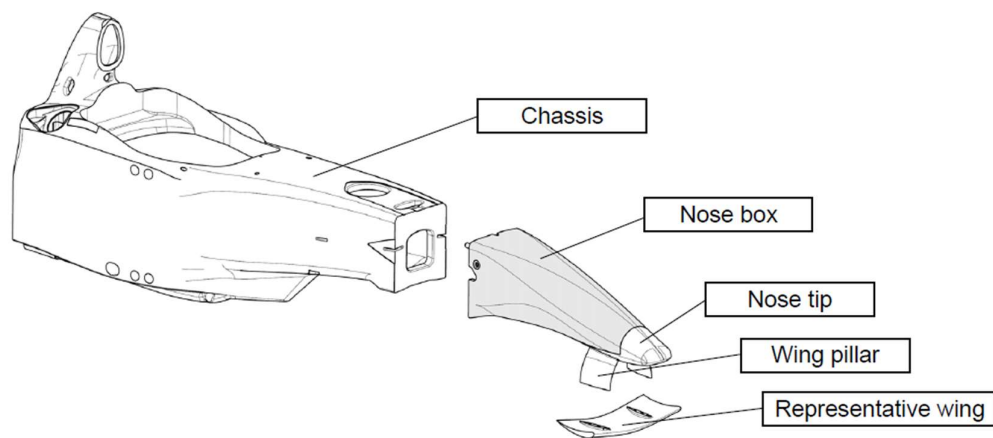


Figure 1.1: Componenti della struttura anteriore F1 [4]

1.6.2 Materiali Utilizzati

La quasi totalità della vettura di Formula 1, comprese le strutture di assorbimento, è realizzata in materiali compositi leggeri [4]. Il nose box e il nose tip sono costruiti con una struttura sandwich: pelli esterne in laminato di fibra di carbonio/resina epossidica (CFRP) e nucleo in nido d'ape di alluminio o Nomex® (aramide espansa). Le pelli in CFRP garantiscono elevata rigidità specifica e resistenza a trazione e compressione, mentre il nucleo honeycomb assorbe i carichi di taglio e contribuisce alla stabilità durante il collasso assiale. L'orientazione delle lamine – definita dal lay-up del laminato – viene ottimizzata per ogni campagna di sviluppo al fine di massimizzare l'energia assorbita e garantire un andamento del plateau di forza il più uniforme possibile. L'impiego di fibre di carbonio ad alto modulo (HM) o ad alta resistenza (HS) in matrice epossidica consente di ottenere componenti con rapporto resistenza/peso fino a cinque volte superiore rispetto all'acciaio, nel rispetto dei severi vincoli di peso imposti dal regolamento tecnico FIA [4, 5].

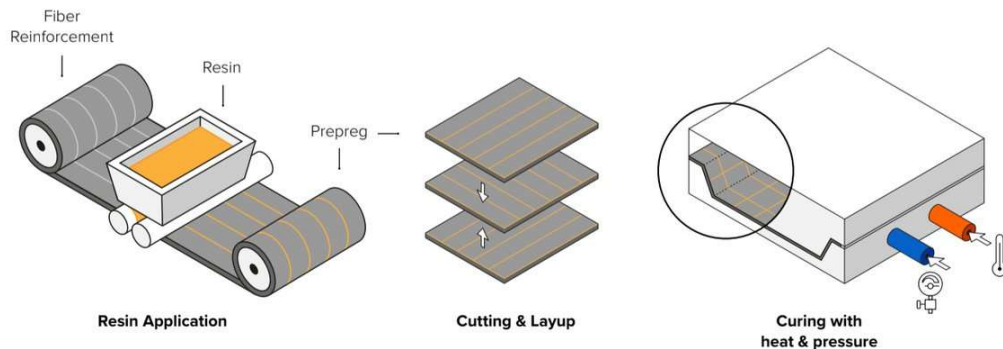


Figure 1.2: Fibra di carbonio

1.6.3 Test di Laboratorio e Requisiti FIA

La FIA aggiorna ogni stagione il regolamento tecnico che definisce i requisiti di crashworthiness per le strutture di sicurezza passiva delle vetture di F1 [5]. I test si dividono in due categorie principali. I test statici comprendono il nose push-off test (verifica della tenuta dell'attacco del nose box al monoscocca) e il side intrusion test (resistenza alla penetrazione laterale). I test dinamici includono il frontal impact test, il rear impact test, il side impact test e il test del piantone dello sterzo [4]. Il test di impatto frontale – il più critico per il nose cone – viene eseguito presso centri omologati come il Cranfield Impact Centre (UK): l'insieme chassis più dummy (75 kg) è montato su uno sled per una massa totale di 780 kg, accelerato a 15 m/s contro una piastra d'acciaio ancorata a un blocco di calcestruzzo. Il regolamento impone il soddisfacimento simultaneo di tre soglie cinematiche, misurate mediante accelerometri posizionati sullo *sled*. Con questo termine (o slitta d'impatto) si identifica la piattaforma mobile guidata su binari utilizzata nei test dinamici per replicare l'impulso di accelerazione o decelerazione di un crash test reale (*full-scale*) su singoli componenti o sistemi di ritenuta, evitandone la distruzione complessiva. Decelerazione di picco sui primi 150 mm di deformazione non superiore a 10 g; decelerazione di picco sui primi 60 kJ di energia assorbita non superiore a 20 g; decelerazione media del telaio non superiore a 40 g [4]. A monte dei test fisici full-scale, le squadre conducono prove su campioni elementari (drop tower test su provini cilindrici, rettangolari o conici) per caratterizzare il comportamento del laminato composito, e simulazioni FEM con il codice esplicito LS-DYNA per ottimizzare il design prima della produzione del componente finale, ferma restando l'obbligatorietà del test fisico per l'omologazione [4].

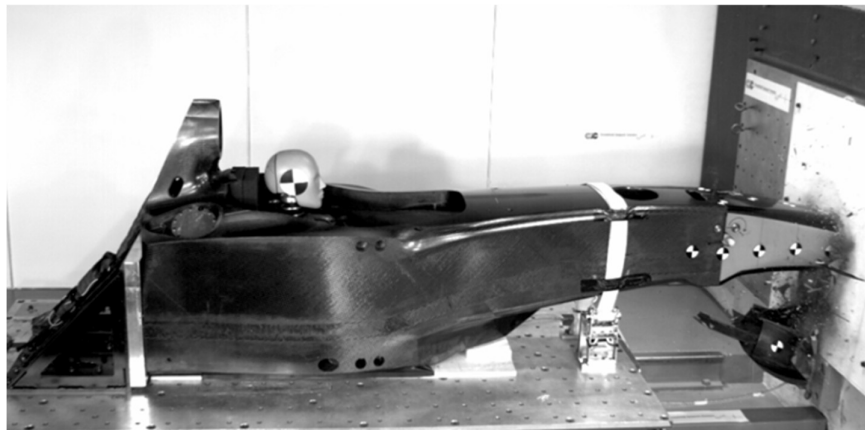


Figure 1.3: Setup crash test frontale [4]

1.7 Il Progetto AMAX-C: Strutture Ausettiche Composite per l'Assorbimento di Energia

Il progetto AMAX-C (Extrusion Additive Manufacturing of AuXetic Composite structures), finanziato dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, si inserisce direttamente nel filone di ricerca sull'evoluzione dei sistemi di assorbimento di energia per applicazioni automotive e motorsport. L'obiettivo centrale del progetto è lo sviluppo di una nuova classe di strutture composite ausettiche prodotte mediante stampa additiva multi-materiale a estrusione (Granular Extrusion Modeling, GEM), con l'ambizione di superare le prestazioni delle soluzioni attualmente impiegate in termini di energia assorbita specifica (SEA) [6].

Le strutture ausettiche sono materiali e metamateriali caratterizzati da un coefficiente di Poisson negativo (NPR): al contrario dei materiali convenzionali, si contraggono lateralmente sotto compressione assiale e si espandono sotto trazione. Questa peculiare cinematica di deformazione conferisce loro proprietà meccaniche superiori rispetto ai materiali tradizionali a parità di peso, tra cui maggiore resistenza all'indentazione, migliore resistenza a taglio, tenacità a frattura aumentata e, soprattutto, una capacità di assorbimento energetico particolarmente elevata [6, 7]. Il limite principale delle strutture ausettiche pure è l'elevata porosità, che riduce la resistenza meccanica complessiva: per superarlo, AMAX-C propone di riempire il reticolo ausettico con un infill cellulare di secondo materiale, creando un composito bimateriale in un unico step di stampa. Studi preliminari presenti in letteratura hanno dimostrato che la combinazione telaio ausettico–infill produce un effetto sinergico significativo sulla SEA, specialmente quando i due materiali sono chimicamente compatibili e adesi all'interfaccia [7].

Il progetto si sviluppa in due fasi principali. Nella prima fase (anno I) vengono studiate combinazioni di materiali polimerici: telai in PEEK o simili polimeri elastoplastici abbinati a infill in TPU (elastomerico) o PA, selezionati sulla base della compatibilità chimica e del comportamento meccanico (rigidezza, tensione di snervamento, duttilità). Le strutture vengono prodotte con la stampante a doppio estrusore Pollen HT disponibile nel laboratorio CerAMglass e caratterizzate sia a livello microstrutturale (DSC, XRD, micro-trazione) sia meccanico, con prove quasi-statiche e dinamiche condotte dal gruppo COSTRMAC. Nella seconda fase (anno II) il progetto si

sposta verso compositi metallo-ceramica: telai in acciaio inossidabile 316L o lega di titanio stampati via GEM e poi de-legati e sinterizzati, con infill in Al_2O_3 o ZrO_2 , per massimizzare le prestazioni anche in applicazioni ad alta temperatura. Il bersaglio quantitativo dichiarato è superare i valori SEA delle strutture honeycomb in alluminio attualmente di riferimento (8–12 KJ/Kg) [6].

L'obiettivo tecnologico finale del progetto è la realizzazione di un Proof of Concept (PoC): un componente in scala destinato ad applicazioni di resistenza agli impatti nel contesto Formula SAE, la competizione universitaria di progettazione automobilistica a cui il Dipartimento di Ingegneria Industriale di Padova partecipa dal 2006 [6]. Il lavoro presentato in questa tesi si colloca all'interno di questo framework: a partire dalle linee guida numeriche e sperimentali di AMAX-C, si indaga il potenziale delle strutture ausettiche composite come elemento attivo nel sistema paraurti, sia in sostituzione delle tradizionali crash box metalliche sia in integrazione con esse, con l'obiettivo di incrementare l'energia assorbita specifica minimizzando il peso e garantendo un comportamento di collasso controllato e ripetibile.

1.8 Geometrie Ausettiche e Strutture Ausettiche Filled

1.8.1 Le Geometrie Ausettiche: Definizione e Principali Tipologie

I materiali ausettici sono una classe di metamateriali caratterizzati da un coefficiente di Poisson negativo (Negative Poisson's Ratio, NPR): diversamente dai materiali convenzionali, che si espandono trasversalmente sotto compressione assiale, le strutture ausettiche si contraggono lateralmente, convogliando massa verso la zona di impatto. Il fenomeno fu osservato per la prima volta su schiume poliuretaniche rielaborate nel 1987 [7], e il termine ausettico (dal greco $\alpha\upsilon\tilde{\xi}\eta\sigma\iota\varsigma$, accrescimento) fu coniato nel 1991. Questa peculiare cinematica di deformazione non è una proprietà del materiale costituente, bensì della topologia della struttura, e può essere ottenuta in un'ampia varietà di materiali e scale dimensionali.

Le principali famiglie geometriche studiate in letteratura sono quattro. La re-entrant honeycomb è la topologia ausettica più consolidata: le celle esagonali vengono invertite con le pareti inclinate che puntano verso l'interno della cella, generando il comportamento a NPR. La geometria chirale (hexa-chiral, tetra-chiral) è composta da nodi circolari o esagonali collegati da legamenti tangenziali: la rotazione dei nodi sotto carico produce l'effetto ausettico e garantisce un plateau di forza più uniforme [7]. Le strutture double-arrow e star honeycomb rappresentano varianti con geometrie concave, particolarmente efficienti sotto carichi dinamici ad alta velocità. Infine, le superfici TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces) – Gyroid, Primitive, Diamond – sono geometrie a curvatura

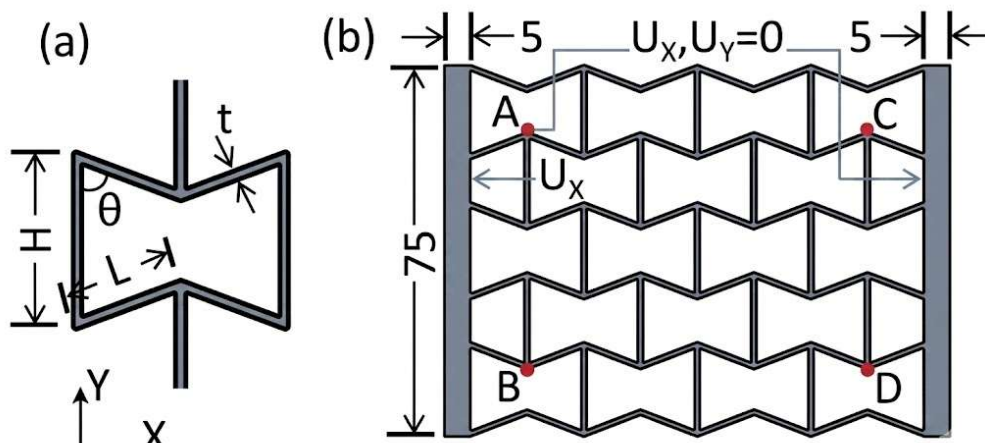


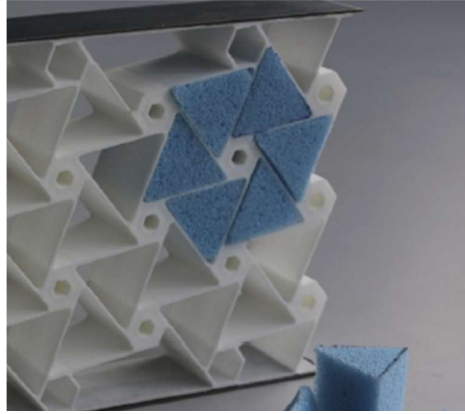
Figure 1.4: Esempio geometria ausettica

media nulla progettabili con NPR che presentano eccellente connettività tridimensionale, rendendole ideali per compositi a fase interpenetrante [8].

Le proprietà meccaniche superiori delle strutture ausettiche rispetto ai materiali convenzionali derivano direttamente dall'NPR. La resistenza all'indentazione è proporzionale a $E/(1-\nu^2)$: al diminuire di ν verso valori negativi il denominatore aumenta, con un beneficio diretto sulla durezza superficiale [10]. Il modulo di taglio $G = E/[2(1+\nu)]$ cresce anch'esso al calare di ν , migliorando la resistenza a carichi di taglio. La tenacità a frattura risulta aumentata per il meccanismo di addensamento di materiale attorno alla punta di una cricca sotto carico. La capacità di assorbimento energetico (SEA) è superiore a quella di strutture convenzionali a pari densità relativa, in quanto il collasso avviene con un meccanismo di addensamento locale piuttosto che con un collasso esteso e incontrollato [7, 9]. Il principale limite rimane l'elevata porosità: la relativa bassa rigidità assoluta e la ridotta resistenza a compressione ne limitano l'impiego nelle applicazioni strutturali dove sono richieste prestazioni meccaniche elevate a bassa deformazione.

1.8.2 Strutture Ausettiche Filled: Materiali e Produzione

Per superare il limite della porosità, è stato proposto il riempimento delle celle ausettiche con un secondo materiale (filler), creando un composito bimateriale detto struttura ausettica filled. I materiali impiegati come telaio (frame) comprendono: poliammide PA 2200 stampata via Selective Laser Sintering (SLS), polimeri rigidi stampati via Polyjet (modulo ~ 1.5 GPa), PEEK e polimeri tecnici prodotti via FDM o GEM; sul versante metallico, alluminio 1060 ottenuto per taglio laser e acciaio inossidabile 316L prodotto per Powder Bed Fusion (PBF). Come filler si utilizzano schiume poliuretaniche a celle aperte (densità ~ 96 kg/m³), elastomeri morbidi come silicone (modulo ~ 0.77 MPa), resine epossidiche, schiume di alluminio (densità ~ 660 kg/m³) e, nelle frontiere più avanzate della ricerca, ceramici come Al₂O₃ e ZrO₂ [7, 8, 9].



**Figure 1.5: Geometria ausettica
"Filled" [7]**

I metodi di produzione variano in funzione della combinazione di materiali. L'approccio più semplice consiste nel tagliare il filler nella forma delle celle e inserirlo manualmente nel telaio pre-stampato, senza adesivo: tecnica applicata sia con schiume poliuretaniche in telai chirali in PA [7] sia con schiume di alluminio in telai re-entrant metallici [9]. Una maggiore adesione interfacciale si ottiene con la stampa multi-materiale diretta: sistemi Polyjet stampano simultaneamente telaio rigido e filler elastomerico sullo stesso strato, garantendo un'interfaccia perfetta senza post-processing [10]. Per i compositi metallo-polimero a fase interpenetrante su architetture TPMS, il telaio metallico viene prodotto via PBF e successivamente infiltrato con polimero tramite centrifuga o camera a vuoto, ottenendo una piena impregnazione della struttura [8]. L'approccio del progetto AMAX-C punta a superare questi metodi multi-step adottando la co-estrusione bimateriale via GEM, producendo in un unico processo il telaio ausettico e l'infill cellulare con un'adesione interfacciale superiore a quella del riempimento manuale [6].

1.8.3 Vantaggi Rispetto alle Strutture Monomateriale e Prestazioni Meccaniche

Il principale vantaggio delle strutture filled rispetto a quelle monomateriale è l'effetto sinergico: l'energia assorbita dal composito è sistematicamente superiore alla somma delle energie assorbite dai due costituenti testati separatamente. Su telai chirali in PA riempiti con schiuma poliuretanica, è stato riscontrato che la forza di plateau durante l'indentazione superava significativamente la somma delle contribuzioni individuali: il filler impediva il mutuo contatto dei nodi durante il collasso e supportava i legamenti nella fase finale di buckling, mantenendo un comportamento più uniforme e controllato [7].

Su strutture re-entrant in alluminio riempite con schiuma di alluminio è stato misurato un incremento del modulo elastico da 63.96 MPa a 285.67 MPa (+347 %) e dell'energia assorbita da 530 J a 2852 J (+438 %) rispetto alla struttura vuota [9]. Un ulteriore effetto positivo riguarda la stabilità dell'ausetticità: la struttura vuota perdeva progressivamente l'NPR a causa della deformazione asimmetrica, mentre nella versione filled l'interazione con la schiuma stabilizzava il modo di collasso, rendendo l'effetto ausettico più persistente e riproducibile alle grandi deformazioni. I meccanismi responsabili del miglioramento nei compositi a reticolo-matrice elastomerica sono stati identificati in due effetti complementari: il telaio a NPR pone la matrice in uno stato di compressione biassiale durante l'impatto, aumentandone la durezza locale; contestualmente, l'NPR del composito nel suo insieme genera una zona di materiale addensato proprio nel punto di impatto, incrementando ulteriormente la resistenza all'indentazione [10].

Prove su compositi in acciaio 316L, condotte a velocità di impatto comprese tra 0.1 mm/s e 250 m/s, hanno evidenziato che l'impiego di epossidica come filler produce un incremento di SEA del 38 % rispetto alla struttura metallica vuota, attribuito al meccanismo di interlocking tra le due fasi; il silicone, per contro, pur aumentando la rigidezza, non ha migliorato l'SEA per un rapporto di rigidezza filler/telaio non ottimale [8]. Questo risultato evidenzia come la selezione del rapporto di rigidezza tra i due materiali sia un parametro progettuale critico, e motiva direttamente l'approccio parametrico di AMAX-C, che prevede uno studio sistematico delle combinazioni telaio–infill al variare di rigidezza, topologia e densità relativa per massimizzare la SEA del composito finale [6].

1.9 La Stampa Bimateriale

1.9.1 Principi Generali e Classificazione

La produzione additiva multi-materiale (Multi-Material Additive Manufacturing, MMAM) è un insieme di tecniche che consentono di costruire un componente depositando due o più materiali diversi all'interno della stessa sessione di stampa, senza interruzioni o assemblaggio manuale. L'interesse verso questo approccio è cresciuto in modo significativo nell'ultimo decennio, come dimostrato dalla costante crescita delle pubblicazioni scientifiche nel settore [11]. Il vantaggio fondamentale rispetto alla produzione monomateriale è la possibilità di attribuire proprietà meccaniche, termiche, elettriche o chimiche differenti a zone distinte dello stesso componente, realizzando strutture a gradiente funzionale (Functionally Graded Materials, FGM) o compositi con interfaccia progettata.

Le sette famiglie di processi AM definite dagli standard ASTM si differenziano notevolmente nella loro capacità di gestire materiali multipli. Le tecniche di fotopolimerizzazione (VPP) supportano la multi-materialità solo in modo limitato, mentre Powder Bed Fusion (PBF) e Binder Jetting (BJ) consentono al più la miscelazione omogenea di polveri. Le tecniche di Material Jetting (MJT), come il Polyjet, permettono la deposizione simultanea di più materiali con eccellente risoluzione ma sono limitate ai polimeri fotopolimerizzabili. La Deposizione ad Energia Diretta (DED) è adatta a gradienti compositivi in metalli, con zone di transizione dell'ordine di 500 μm tra le due fasi [11]. La famiglia MEX (Material Extrusion), che comprende FDM/FFF e la variante a granuli GEM/FGF, si distingue per la sua flessibilità: con due o più estrusori indipendenti è possibile depositare materiali con proprietà meccaniche molto diverse – rigido e morbido, metallico e ceramico, strutturale e sacrificale – all'interno dello stesso layer, rendendola la tecnologia di riferimento per la produzione di compositi ausettici bimateriale [6].

1.9.2 MEX per la Stampa Bimateriale: da FDM a GEM

Nella famiglia MEX, la stampa bimateriale si realizza tipicamente con sistemi a doppio estrusore indipendente (IDEX – Independent Dual Extruder), in cui ciascuna testa di stampa gestisce un materiale distinto e si attiva alternativamente seguendo le istruzioni del G-code. Nel processo FDM/FFF tradizionale i materiali vengono forniti sotto forma

di filamenti termoplastici; i principali parametri di processo che influenzano la qualità dell'interfaccia bimateriale sono: la temperatura di estrusione di ciascun materiale, la velocità di deposizione, il diametro del nozzle (tipicamente 0.4 mm) e il ritardo di commutazione tra le due teste. La compatibilità chimica e termica tra i due materiali è un prerequisito fondamentale: il legame all'interfaccia dipende dalla capacità del materiale appena estruso di diffondersi parzialmente nello strato precedente prima di solidificarsi [11].

La variante a granuli GEM (Granular Extrusion Modeling), impiegata nel progetto AMAX-C con la stampante Pollen HT, sostituisce il filamento con pellet commerciali o appositamente formulati, fusi da una vite di estrusione. Questo approccio offre vantaggi significativi rispetto all'FFF: elimina la fase di produzione del filamento (con conseguente riduzione dei costi e possibilità di lavorare materiali fragili o altamente caricati), consente l'impiego diretto di granulati da iniezione commerciali e permette di processare materiali con percentuali di carica fino all'80 % in volume, come nel caso dei feedstock metallici e ceramici [6]. Per i compositi metallo-ceramica, il processo MEX si articola in cinque fasi: fabbricazione del feedstock caricato, stampa additiva, essiccazione, debinding (rimozione del legante polimerico, per via termica, catalitica o con solvente) e sinterizzazione. Il contenuto di polvere nel feedstock varia tipicamente dal 50 % al 65 % in volume: una percentuale maggiore produce componenti più densi dopo sinterizzazione ma può compromettere la stampabilità.

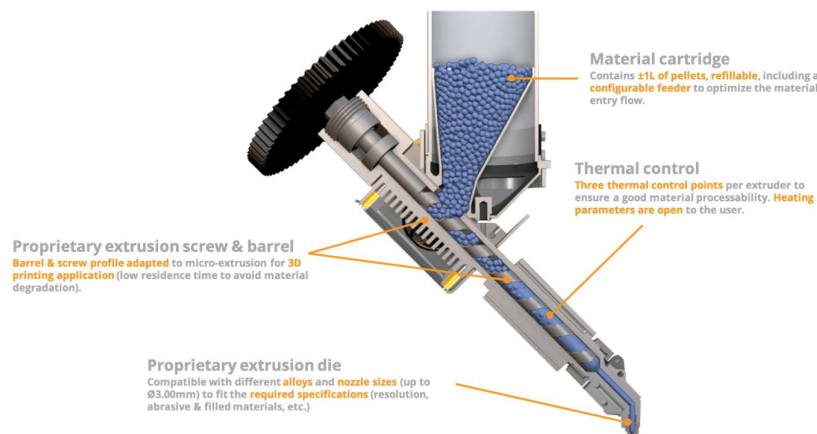


Figure 1.6: Funzionamento estrusore Pollen HT

Capitolo 2

Selezione dei Materiali Polimerici per la Geometria Ausetica

2.1 Introduzione alla Selezione dei Materiali

La scelta dei materiali costituisce una fase fondamentale e tutt'altro che banale nel processo di progettazione e realizzazione di strutture ausettiche bimateriale. Una selezione errata o superficiale dei materiali può compromettere irrimediabilmente le prestazioni meccaniche del componente finale, rendere impossibile la stampa oppure causare delaminazione e cedimento all'interfaccia tra i due materiali. Per questo motivo, la selezione deve essere condotta secondo criteri precisi e ben definiti, che tengano conto tanto delle proprietà meccaniche richieste quanto della compatibilità con il processo di produzione adottato.

Il concetto alla base della struttura in esame prevede la coesistenza di due materiali con comportamento meccanico distinto: un materiale flessibile, destinato a costituire la matrice della geometria ausettica, e un materiale rigido, impiegato per riempire le celle vuote della matrice stessa. Questa combinazione consente di sfruttare il cosiddetto effetto sinergico bimateriale, in cui la rigidità del riempimento e la deformabilità controllata della matrice cooperano per massimizzare l'energia specifica assorbita durante un evento d'urto [6][7].

Poiché l'intero processo produttivo si basa sulla stampa 3D multimateriale mediante estrusione di materiale (MEX), i due polimeri selezionati devono soddisfare una serie di requisiti di compatibilità tecnica con il processo stesso. In particolare, è essenziale che i due materiali presentino parametri di stampa simili, con particolare attenzione alla temperatura del piano di stampa (bed temperature): una differenza eccessiva in questo parametro renderebbe impossibile la co-stampa in un'unica sessione senza compromettere l'adesione degli strati o causare deformazioni termiche differenziali. Analogamente, le temperature di estrusione devono essere compatibili con le specifiche dell'estrusore e non causare degradazione del materiale più sensibile al calore.

Oltre alla compatibilità di processo, è necessario che i due materiali siano chimicamente affini, ovvero che presentino una buona adesione interfacciale quando depositati l'uno a contatto con l'altro durante la stampa. L'affinità chimica garantisce che all'interfaccia tra matrice e riempimento si instauri una giunzione sufficientemente robusta da resistere agli sforzi di taglio e trazione che si sviluppano durante la deformazione della struttura. In assenza di tale affinità, il cedimento si localizzerebbe prematuramente all'interfaccia, annullando i vantaggi della configurazione bimateriale.

In questa fase preliminare dello studio, l'approccio adottato prevede la realizzazione di provini geometricamente semplici – quali campioni a doppia linguetta o geometrie elementari – stampati con coppie di materiali candidati. Questi provini hanno lo scopo di verificare empiricamente la compatibilità tra i materiali, valutando visivamente e meccanicamente la qualità dell'interfaccia, la presenza di difetti di adesione e il comportamento complessivo durante la stampa. Una volta identificata la coppia di materiali che meglio soddisfa i criteri di compatibilità e che fornisce i risultati più promettenti in termini di adesione e stampabilità, si procederà con una caratterizzazione più approfondita, comprendente prove meccaniche standardizzate e la realizzazione delle geometrie ausettiche definitive.

2.2 Coppie di Materiali Selezionate per la Sperimentazione

Sulla base dei criteri esposti nel paragrafo precedente, sono state individuate due coppie principali di materiali da sottoporre a caratterizzazione preliminare, a cui si affiancano due combinazioni secondarie ottenute sostituendo, in ciascuna coppia, unicamente la componente flessibile. L'obiettivo è quello di esplorare un ampio spazio di possibilità, distinguendo tra coppie già note in letteratura e combinazioni del tutto inedite, per le quali l'unico strumento valutativo disponibile è la sperimentazione diretta.

2.2.1 Prima Coppia: PLA e TPU

Il Polilattide (PLA) è uno dei materiali più diffusi nella stampa 3D FDM/FFF grazie alla sua facilità di lavorazione, all'ottima qualità superficiale dei pezzi stampati e alla rigidità meccanica relativamente elevata. Presenta una temperatura di estrusione tipicamente compresa tra 190 °C e 220 °C e non richiede necessariamente un piano riscaldato, rendendolo compatibile con la maggior parte delle stampanti 3D da banco. Nel contesto di questa ricerca, il PLA viene impiegato come materiale rigido destinato al riempimento delle celle della geometria ausettica.

Il Poliuretano Termoplastico (TPU) è un elastomero termoplastico caratterizzato da un'elevata flessibilità, buona resistenza all'abrasione e comportamento gommoso a temperatura ambiente. Grazie alla sua natura poliuretanica, il TPU presenta una discreta affinità chimica con il PLA, e la coppia PLA-TPU è riportata in letteratura come una delle combinazioni bimateriale più promettenti per applicazioni di stampa multimateriale MEX, con valori di adesione interfacciale accettabili e buona compatibilità dei parametri di processo. La temperatura di stampa del TPU si attesta generalmente tra 200 °C e 220 °C, compatibile con le finestre operative del PLA. Nel sistema bimateriale, il TPU costituisce il materiale flessibile della matrice ausettica.

2.2.2 Seconda Coppia: HIPS e TPU

Il Polistirene ad Alto Impatto (HIPS) è un copolimero antiurto che combina la rigidità della matrice polistirenica con l'elevata tenacità conferita dalla fase elastomerica in polibutadiene. Sebbene nel campo dell'additive manufacturing sia storicamente impiegato come materiale di supporto solubile, le sue proprietà meccaniche — tra cui un favorevole connubio tra resistenza a trazione e modulo elastico — lo rendono un candidato idoneo all'utilizzo come costituente strutturale rigido. La temperatura di

estrusione tipica si colloca tra 220 °C e 240 °C, con piano riscaldato generalmente intorno a 70 – 80 °C.

2.2.3 Combinazioni con TPE: HIPS–TPE e PLA–TPE

Il Poliestere Termoplastico Elastomerico (TPE) è una famiglia di materiali polimerici che combina le proprietà elastiche della gomma con la processabilità tipica dei termoplastici. Presenta un modulo elastico molto basso, un'elevata capacità di allungamento a rottura e una buona resistenza all'abrasione. La temperatura di estrusione è tipicamente compresa tra 190 e 210 °C, con piano di stampa a 50 – 60 °C.

Oltre alle due coppie principali, sono state previste due combinazioni aggiuntive ottenute abbinando ciascun materiale rigido con il materiale flessibile alternativo. Le coppie risultanti sono HIPS–TPE, in cui il materiale rigido della seconda coppia viene abbinato al materiale flessibile alternativo TPE, e PLA–TPE, in cui il materiale rigido della prima coppia viene abbinato allo stesso TPE. Queste combinazioni consentono di valutare in modo sistematico l'influenza specifica del materiale flessibile sull'adesione interfacciale e sulle prestazioni meccaniche del provino bimateriale.

In sintesi, le quattro coppie sottoposte a valutazione preliminare sono: PLA–TPU, coppia principale caratterizzata da elevata affinità chimica e documentata in letteratura; HIPS–TPU, seconda coppia principale scelta per compatibilità di processo; HIPS–TPE, prima combinazione con TPE; PLA–TPE, seconda combinazione con TPE. Tutte e quattro le coppie sono state testate con i provini di compatibilità descritti nel paragrafo successivo, e le coppie più promettenti sono poi avanzate alla fase di caratterizzazione meccanica completa.

2.2.4 Analisi Calorimetrica Differenziale (DSC) dei Materiali

Per completare la caratterizzazione preliminare dei materiali, sono stati prelevati alcuni campioni di ciascun polimero e sottoposti ad analisi calorimetrica differenziale a scansione (DSC, Differential Scanning Calorimetry). Questa tecnica consente di individuare le principali transizioni termiche del materiale – temperatura di transizione vetrosa (T_g), temperatura di fusione (T_f) e relativa entalpia di fusione (ΔH_f) – e di stimarne il grado di cristallinità. Poiché l'umidità assorbita dai filamenti può influenzare

sia la stampabilità sia le proprietà finali del componente, per il PLA e il TPU le prove sono state ripetute prima e dopo un ciclo di essiccazione, così da valutarne l'effetto; per l'HIPS e il TPE è stata invece condotta un'unica prova.

Condizione	[°C/min]	Tmax [°C]	Atm
Non essiccato	10	200	Aria
Essiccato	10	600	Aria

Tabella 2.1: Parametri DSC

Nel caso del PLA la differenza tra il campione non essiccato e quello essiccato è risultata marcata: il PLA essiccato presenta un picco alla temperatura di fusione a un'entalpia di fusione (ΔH_f) minore, indice di una struttura più cristallina. Una maggiore cristallinità si traduce, come confermato dalle prove meccaniche riportate nei capitoli successivi, in una resistenza meccanica più elevata del materiale. L'essiccazione del PLA prima della stampa si conferma quindi un passaggio determinante per ottenere componenti dalle prestazioni ottimali.

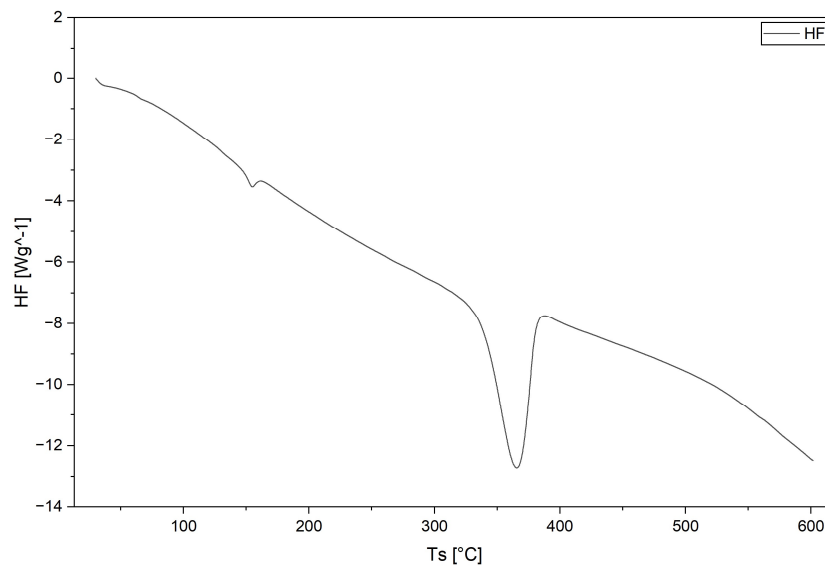


Figura 2.1: DSC PLA essiccato

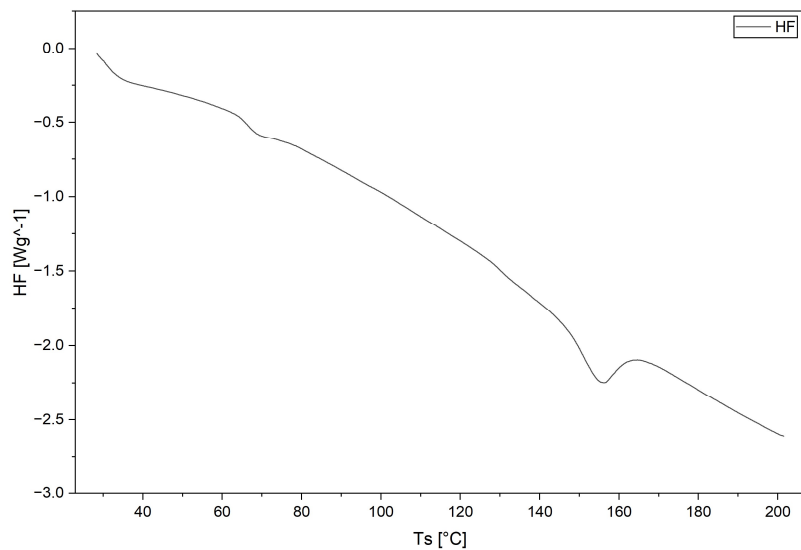


Figura 2.2: DSC PLA non essiccato

Condizione	Tg [$^{\circ}C$]	Tm [$^{\circ}C$]	Td [$^{\circ}C$]
Non essiccato	55	150	-
Essiccato	55	155	330

Tabella 2.2: Valori DSC PLA

Per il TPU, al contrario, il confronto tra campione essiccato e non essiccato non ha evidenziato differenze rilevanti nei termogrammi: le transizioni termiche restano pressoché invariate, a indicare una minore sensibilità del comportamento calorimetrico del materiale al contenuto di umidità.

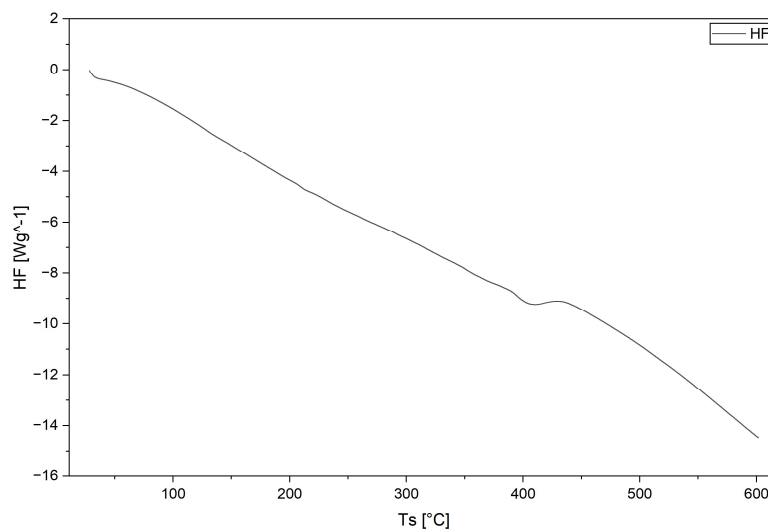


Figura 2.3: DSC TPU non essiccato

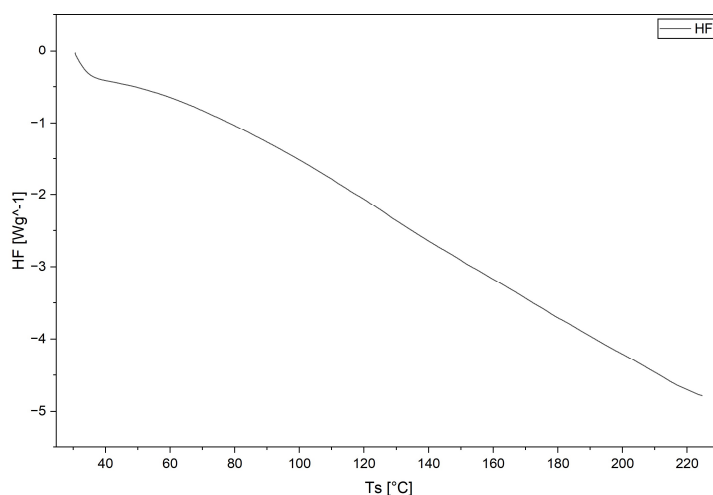


Figura 2.4: DSC TPU non essiccato

Nella prima regione del grafico non è stato possibile rilevare la transizione vetrosa (T_g) del materiale. Tale evento si colloca infatti a temperature inferiori allo zero termico, un intervallo non accessibile a causa dei limiti operativi della strumentazione utilizzata. Per quanto riguarda invece la degradazione termica del polimero, il fenomeno si manifesta in modo evidente nell'intervallo compreso tra 340 °C e 350 °C, segnando l'inizio della decomposizione strutturale.

Per l'HIPS e il TPE, come anticipato, è stata eseguita una sola prova DSC, finalizzata a determinarne le transizioni termiche caratteristiche di riferimento. I relativi termogrammi e i valori misurati sono riportati di seguito.

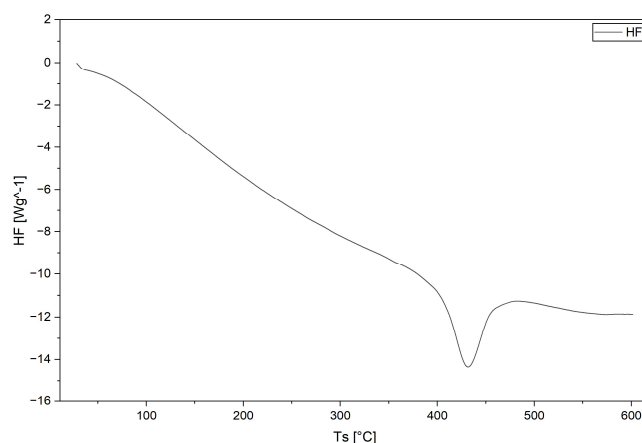


Figura 2.5: DSC HIPS

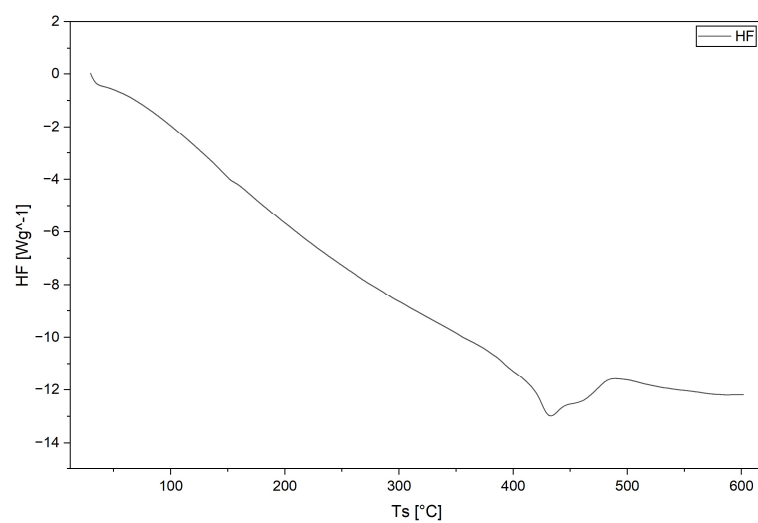


Figura 2.6: DSC TPE

Materiale	Tg [$^{\circ}\text{C}$]	Tm [$^{\circ}\text{C}$]	Td [$^{\circ}\text{C}$]
HIPS	55	Non visibile	400
TPE	50	Non visibile	430

Tabella 2.3: Valori DSC dell'HIPS e del TPE

2.3 Il Provino di Compatibilità Bimateriale

Per valutare empiricamente la compatibilità tra le coppie di materiali selezionate, è stato progettato un provino di geometria volutamente semplice, concepito non per misurare prestazioni meccaniche quantitative ma per osservare qualitativamente il comportamento dell'interfaccia bimateriale nelle condizioni reali di stampa. La semplicità geometrica del provino è una scelta deliberata: in questa fase preliminare, l'obiettivo non è riprodurre la complessità della struttura ausettica finale, bensì isolare la variabile critica dell'interfaccia tra i due materiali, eliminando il rumore introdotto da geometrie complesse.

Il provino consiste in una basetta rettangolare le cui due estremità sono realizzate ciascuna con uno dei due materiali della coppia. La zona centrale del provino costituisce la regione di giunzione: in quest'area i due materiali vengono depositati in layer alternati, secondo uno schema a strati sovrapposti che ricorda la struttura di un panino [Figura 8]. Un layer del primo materiale viene depositato sopra un layer del secondo, e così via per un certo numero di strati, in modo da massimizzare la superficie di contatto tra i due polimeri e favorire l'interdiffusione molecolare durante la co-stampa. In Figura 8 è riportato uno schema della zona di giunzione a layer alternati mentre in Figura 9 si può visualizzare il modello del provino.

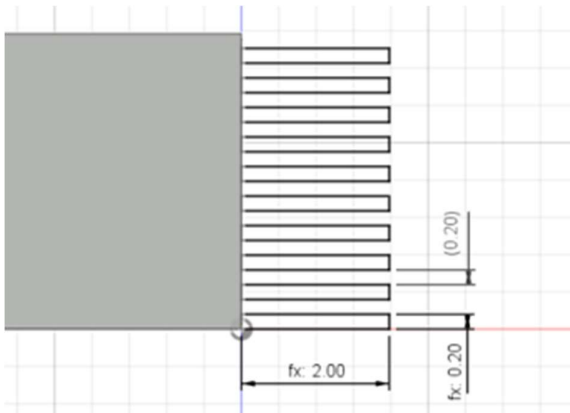


Figure 2.7: Dettaglio della parte centrale

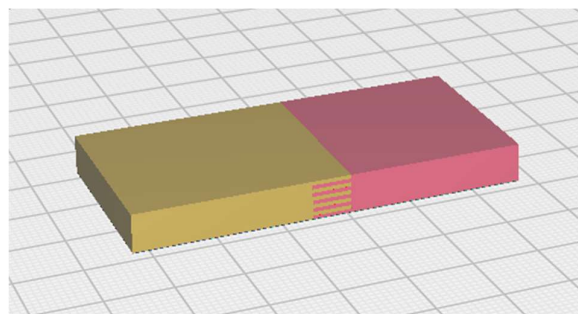


Figure 2.8: Modello della basetta

L'osservazione del provino stampato consente di ricavare informazioni qualitative fondamentali: la presenza o meno di delaminazione all'interfaccia già nelle fasi di stampa e raffreddamento, la continuità visiva tra le due metà, l'assenza di distorsioni termiche dovute a differenti coefficienti di ritiro, e la qualità superficiale generale del pezzo. Una semplice prova di flessione manuale o un test di trazione a strappo permettono inoltre di ottenere un giudizio di prima approssimazione sulla resistenza dell'interfaccia, senza richiedere attrezzatura di laboratorio dedicata.

Durante la campagna di stampa dei provini, alcuni parametri di processo vengono intenzionalmente variati per valutarne l'influenza sulla qualità dell'interfaccia. I principali parametri oggetto di ritocco sono: la temperatura di estrusione di ciascun materiale, la temperatura del piano di stampa, la velocità di deposizione nelle zone prossime all'interfaccia e il numero di perimetri di contatto tra i due materiali. Agire su questi parametri consente di favorire la diffusione molecolare tra i due polimeri al momento della deposizione, che è il principale meccanismo responsabile dell'adesione interfacciale nella stampa MEX. I risultati di questa fase esplorativa costituiranno la base decisionale per la selezione della coppia di materiali da adottare nella realizzazione delle geometrie ausettiche definitive. Solo le coppie che superano positivamente la valutazione qualitativa dei provini semplici verranno considerate per la fase successiva, nella quale si procederà con una caratterizzazione meccanica più rigorosa e con la stampa delle strutture ausettiche filled.

2.4 Prima Coppia Testata: HIPS e TPU

La prima coppia sottoposta a verifica sperimentale è quella composta da HIPS, nel ruolo di materiale rigido, e TPU, come materiale flessibile. Come anticipato nel paragrafo 2.2.2, non esistono in letteratura riferimenti su questa combinazione, rendendo la presente sperimentazione del tutto esplorativa. Di seguito sono riportate le principali caratteristiche dei due materiali, seguite dalla descrizione delle prove di stampa condotte.

Parametro	HIPS
Tensile strength [MPa]	35
Elongation a break [%]	40
T _m [°C]	220
Density [g/cm ³]	1.04

Table 2.4: Caratteristiche HIPS

Parametro	TPE
Tensile strength [MPa]	9
Elongation a break [%]	850
T _m [°C]	120
Density [g/cm ³]	0.89

Table 2.5: Caratteristiche TPE

2.4.1 Prima Stampa: Parametri e Risultato

La prima sessione di stampa è stata condotta utilizzando i parametri di default suggeriti dai rispettivi produttori del pellet. I valori utilizzati sono riportati nella tabella seguente.

Parametro	HIPS	TPU
Extruder temperature (°C)	160	178
Head temperature (°C)	225	208
Cold temperature (°C)	65	65
Bed temperature (°C)	70	70
Flow (%)	37	43
Printing speed (mm/s)	20	20
Merged mesh overlap (mm)	0	0
Infill (%)	100	100

Table 2.6: Parametri di stampa utilizzati nella prima prova (HIPS - TPU)

Prima di analizzare i risultati ottenuti, è opportuno descrivere il processo di messa a punto dell'adesione dei materiali al piatto di stampa, che ha richiesto una fase preliminare di sperimentazione. In una prima prova condotta senza alcun ausilio adesivo, nessuno dei due materiali è riuscito ad aderire stabilmente al piano, rendendo impossibile portare a termine la stampa.

Sono state quindi testate diverse tipologie di prodotti per l'adesione superficiale. In primo luogo, è stato impiegato il nastro adesivo di carta (comunemente noto come nastro da carrozziere): la sua superficie ruvida aumenta il grip meccanico tra il piano e il primo layer del materiale estruso, favorendo l'ancoraggio iniziale. È stato testato anche il nastro da imballaggio (nastro marrone per pacchi), che in alcuni contesti offre una maggiore affinità chimica con determinati polimeri. Entrambe le soluzioni si sono tuttavia rivelate insufficienti, non garantendo un'adesione stabile durante la stampa.

Sono state quindi testate due tipologie di colla specifica, una formulata per il TPU e una per l'HIPS. Anche in questo caso i risultati non sono stati pienamente soddisfacenti; tuttavia, con la colla dedicata all'HIPS sono stati ottenuti risultati leggermente migliori rispetto a tutti i tentativi precedenti, offrendo una base più promettente su cui intervenire.

A partire da questa configurazione sono stati modificati alcuni parametri di stampa con l'obiettivo di migliorare ulteriormente l'adesione al piatto. I principali interventi riguardano: l'aumento del flow del primo layer, in modo da depositare una maggiore quantità di materiale e incrementare così la superficie di contatto con il piano; la riduzione dell'altezza del primo layer, che aumenta la pressione di deposizione favorendo una migliore fusione superficiale del polimero; e un incremento di 5 °C della temperatura del piano riscaldato, che facilita l'ancoraggio termico del materiale. La combinazione di questi tre accorgimenti ha permesso di ottenere un'adesione stabile di entrambi i materiali al piatto di stampa. L'unica controindicazione riscontrata è un leggero overflow del primo layer, dovuto all'eccesso di materiale depositato; tale fenomeno è tuttavia circoscritto al solo primo layer e non compromette in alcun modo la qualità complessiva del provino stampato.

Il risultato della prima stampa è stato negativo: i due materiali non hanno mostrato alcuna adesione reciproca nella zona di giunzione centrale. Già durante la fase di raffreddamento, prima ancora della rimozione dal piano di stampa, era visibile una separazione netta tra i layer alternati dei due polimeri. Una volta rimosso il pezzo, le due estremità si sono staccate con estrema facilità, senza opporre alcuna resistenza apprezzabile alla separazione: i singoli layer si dividevano l'uno dall'altro come le pagine di un libro, a indicare l'assenza di qualsiasi legame chimico o meccanico tra HIPS e TPU nelle condizioni di stampa iniziali. La superficie di ciascun layer si è presentata liscia e priva di segni di fusione o interdiffusione, confermando la scarsa affinità chimica tra i due materiali.

2.4.2 Ottimizzazione dei Parametri e Risultato Finale

A fronte del fallimento della prima stampa, sono stati modificati i parametri di processo descritti nella sezione precedente, relativi all'adesione al piatto. I valori ottimizzati adottati per la seconda sessione di stampa sono riportati nella seguente tabella.

Parametro	HIPS	TPU
Extruder temperature (°C)	170	178
Head temperature (°C)	225	208
Cold temperature (°C)	65	65
Bed temperature (°C)	75	75
Flow (%)	37	43
Printing speed (mm/s)	15	15
Merged mesh overlap (mm)	1	1
Infill (%)	100	100

Table 2.7: Parametri modificati per la coppia HIPS-TPU

Con i parametri ottimizzati è stata ottenuta un'adesione soddisfacente tra i due costituenti. I provini bimateriale HIPS-TPU hanno evidenziato un'ottima tenuta a trazione all'interfaccia, riscontrata preliminarmente attraverso prove empiriche di sollecitazione manuale. A differenza delle configurazioni testate nelle fasi precedenti, i due polimeri sono rimasti saldamente coesi senza manifestare cricche o fenomeni di delaminazione, anche a fronte di un'elevata forza di trazione applicata manualmente alle estremità del provino. Tale comportamento macroscopicamente osservato attesta lo sviluppo di un legame meccanico stabile tra la fase rigida e quella flessibile. Sulla base di questi risultati positivi, la coppia HIPS-TPU è ritenuta pienamente idonea a procedere alla successiva fase di caratterizzazione quantitativa e sperimentazione formale.



Figure 2.9: Basetta HIPS - TPU

2.5 Seconda Coppia Testata: PLA e TPU

La seconda coppia esaminata è composta da PLA, nel ruolo di materiale rigido, e TPU, come materiale flessibile per la matrice. A differenza della coppia precedente, questa combinazione è già documentata in letteratura come compatibile per la co-stampa MEX, e i risultati sperimentali hanno confermato fin dalla prima prova un comportamento significativamente più promettente. Di seguito sono riportate le descrizioni delle sessioni di stampa condotte.

Parametro	PLA
Tensile strength [MPa]	53
Elongation a break [%]	6
T _m [°C]	210
Density [g/cm ³]	1.24

Table 2.8: Caratteristiche PLA

Parametro	TPU
Tensile strength [MPa]	26
Elongation a break [%]	65
T _m [°C]	216
Density [g/cm ³]	1.19

Table 2.9: Caratteristiche TPU

2.5.1 Affinità Chimica tra PLA e TPU: un Approfondimento

I risultati sperimentali descritti nei sottocapitoli precedenti hanno evidenziato una netta superiorità della coppia PLA–TPU rispetto a tutte le altre combinazioni testate, sia in termini di adesione interfacciale che di qualità complessiva della co-stampa. Per comprendere le ragioni di questa compatibilità, è necessario analizzare le strutture chimiche dei due polimeri e i meccanismi di interazione molecolare che si instaurano all'interfaccia durante il processo di stampa.

2.5.2 Struttura Chimica del PLA e del TPU

Il PLA è un poliestere alifatico ottenuto dalla policondensazione o dalla polimerizzazione per apertura d'anello dell'acido L-lattico. La sua unità ripetitiva è caratterizzata dalla presenza di un legame estere ($-\text{COO}-$) lungo la catena principale, che conferisce al polimero un carattere fortemente polare. Il gruppo carbonilico ($\text{C}=\text{O}$) del legame estere rappresenta un accettore di legame a idrogeno particolarmente attivo, mentre il gruppo metilico laterale ($-\text{CH}_3$) contribuisce alla rigidità della catena e al relativo elevato modulo elastico. La temperatura di transizione vetrosa del PLA si colloca intorno a $55\text{--}65\text{ }^\circ\text{C}$, mentre la temperatura di fusione è di circa $150\text{--}180\text{ }^\circ\text{C}$ a seconda del grado di cristallinità.

Il TPU è un copolimero a blocchi composto da segmenti alternati rigidi (hard segment) e flessibili (soft segment). I segmenti rigidi sono formati da unità diisocianato legate a corto-catena di estensori di catena (tipicamente dioli o diammine), e contengono il gruppo uretanico ($-\text{NH}-\text{COO}-$), caratterizzato dalla presenza sia di un gruppo carbonilico ($\text{C}=\text{O}$) che di un gruppo amminico secondario ($\text{N}-\text{H}$). I segmenti flessibili sono costituiti da macropolioli di natura poliestera o polieterea. Nella variante poliestera del TPU – la più comune nella stampa 3D – i soft segment contengono anch'essi legami estere ($-\text{COO}-$), aumentando ulteriormente la compatibilità strutturale con il PLA. La natura anfifilica del TPU, con zone polari (hard segment) e zone apolari (soft segment), gli conferisce una notevole versatilità di interazione con altri polimeri.

2.5.3 Meccanismi di Interazione Interfacciale

L'elevata affinità tra PLA e TPU è riconducibile a tre principali categorie di interazione molecolare che si instaurano all'interfaccia tra i due materiali durante la co-stampa.

Il primo e più rilevante meccanismo è la formazione di legami a idrogeno intermolecolari. Il gruppo $\text{N}-\text{H}$ dei segmenti uretanici del TPU agisce da donatore di legame a idrogeno, mentre il gruppo $\text{C}=\text{O}$ del legame estere del PLA funge da accettore. Questa interazione è energeticamente favorevole e si instaura in modo spontaneo non appena i due polimeri si trovano a contatto in fase fusa durante la deposizione dei layer. I legami a idrogeno $\text{PLA}\cdots\text{TPU}$ sono stati documentati spettroscopicamente attraverso analisi FTIR, che mostrano la presenza del picco caratteristico $\text{N}-\text{H}$ del TPU (intorno a

3332 cm^{-1}) e lo spostamento del picco di assorbimento del carbonile del PLA (intorno a 1740 cm^{-1}) in presenza di TPU, a conferma dell'interazione diretta tra le catene dei due polimeri [12].

Il secondo meccanismo è l'interazione dipolo–dipolo tra i gruppi polari dei due polimeri. Sia il PLA che il TPU presentano momenti di dipolo significativi lungo le rispettive catene, legati alla presenza di legami estere e uretanici. La compatibilità polare tra le due strutture favorisce la miscibilità parziale nelle zone interfacciali, consentendo alle catene macromolecolari di interpenetrarsi reciprocamente durante la fase di deposizione ad alta temperatura.

Il terzo contributo è legato alla similarità dei parametri di solubilità di Hansen dei due polimeri. Il parametro di solubilità totale del PLA (circa 19–21 $\text{MPa}^{0.5}$) e quello del TPU (circa 18–22 $\text{MPa}^{0.5}$ a seconda della formulazione) ricadono in un intervallo molto simile, indicando una compatibilità termodinamica di base tra le due fasi [12]. Secondo la teoria di Flory–Huggins, un basso valore del parametro di interazione χ tra due polimeri – favorito dalla somiglianza dei parametri di solubilità – promuove la miscibilità e riduce la tensione interfacciale, rendendo più efficace l'interdiffusione molecolare.

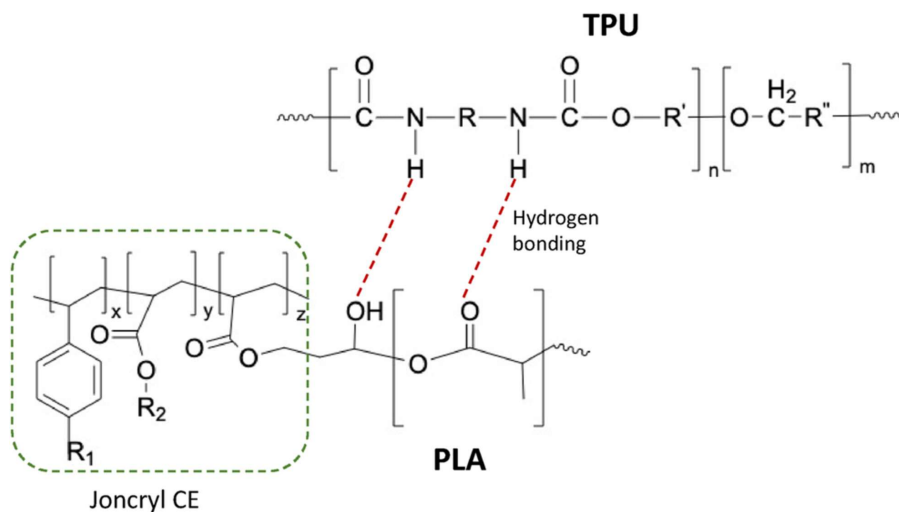


Figure 2.10: Legame PLA - TPU

2.5.4 Il Ruolo della Temperatura e dell'interdiffusione durante la Stampa MEX

Nella stampa MEX, l'adesione tra layer adiacenti di materiali diversi è governata principalmente dal fenomeno dell'interdiffusione molecolare: durante la deposizione di un nuovo layer, il calore trasferito dal materiale appena estruso porta parzialmente in fusione la superficie del layer sottostante, creando una finestra temporale in cui le catene polimeriche dei due materiali possono diffondere attraverso l'interfaccia e dare origine a un network interpenetrato. La qualità dell'adesione risultante dipende sia dalla profondità di questa interdiffusione che dalla densità di interazioni molecolari che si stabiliscono nella zona mista.

Nel caso PLA–TPU, la combinazione di legami a idrogeno, interazioni dipolo–dipolo e parametri di solubilità compatibili crea condizioni termodinamicamente favorevoli per una rapida e profonda interdiffusione già nei tempi brevi tipici della stampa MEX. È stato inoltre osservato che la qualità dell'adesione interfacciale dipende in modo significativo dai parametri di processo: altezze di layer ridotte e larghezze di linea maggiori aumentano l'area di contatto tra i due materiali, migliorando la consistenza dell'adesione. A temperature di estrusione superiori a 200 °C possono inoltre avvenire reazioni di transesterificazione parziale all'interfaccia PLA–TPU, con formazione di legami covalenti tra le catene dei due polimeri, che contribuiscono ulteriormente a consolidare la giunzione.

Questo insieme di fattori – interazioni a idrogeno, compatibilità polare, similarità dei parametri di solubilità e possibili reazioni interfacciali – costituisce la base chimica dell'elevata affinità tra PLA e TPU [12][13] e giustifica la scelta di questa coppia come sistema bimateriale di riferimento per la realizzazione della geometria ausettica oggetto della presente ricerca.

2.5.5 Prima Stampa: Parametri e Risultato

La prima sessione di stampa è stata condotta utilizzando i parametri standard suggeriti dai produttori del pellet. I valori impiegati sono riportati nella tabella seguente.

Parametro	PLA	TPU
Extruder temperature (°C)	170	178
Head temperature (°C)	212	208
Cold temperature (°C)	67	65
Bed temperature (°C)	60	60
Flow (%)	88	43
Printing speed (mm/s)	25	25
Merged mesh overlap (mm)	0	0
Infill (%)	100	100

Table 2.9: Parametri di stampa utilizzati nella prima prova (coppia PLA-TPU)

Il risultato della prima stampa è stato positivo: i layer alternati nella zona centrale del provino hanno mostrato una buona coesione reciproca già nelle condizioni di default. Dopo la rimozione dal piano di stampa, le due estremità del provino sono rimaste solidalmente unite, e l'interfaccia a layer alternati ha resistito senza cedimenti a una manipolazione manuale ordinaria. La superficie di contatto tra i due materiali ha evidenziato segni visibili di fusione e compenetrazione. Questo risultato è coerente con quanto riportato in letteratura riguardo alla compatibilità chimica tra PLA e TPU.

2.5.6 Ottimizzazione dei Parametri e Risultato Finale

Partendo dal buon risultato iniziale, sono stati modificati alcuni parametri di stampa con l'obiettivo di migliorare ulteriormente la qualità dell'adesione nella zona di giunzione. Le variabili modificate sono state selezionate in quanto rappresentano i fattori principali

responsabili della forza di legame e dell'affinità superficiale tra i materiali. Le modifiche apportate sono indicate nella tabella seguente.

Parametro	PLA	TPU
Extruder temperature (°C)	170	178
Head temperature (°C)	212	208
Cold temperature (°C)	67	65
Bed temperature (°C)	65	65
Flow (%)	88	43
Printing speed (mm/s)	20	20
Merged mesh overlap (mm)	0.01	0.01
Infill (%)	100	100

Table 2.10: Parametri modificati per la coppia PLA-TPU

Le modifiche ai parametri di processo hanno prodotto un ulteriore miglioramento dell'adesione interfacciale: i layer alternati nella zona centrale mostrano ora una coesione sensibilmente più robusta, esibendo una resistenza meccanica all'interfaccia significativamente maggiore rispetto a quella riscontrata nei provini della configurazione di stampa iniziale.. Il provino si comporta come un pezzo unitario, senza cedimenti visibili o delaminazioni anche sotto sollecitazione manuale più decisa. La qualità complessiva del risultato è considerata soddisfacente e in linea con le aspettative per questa fase preliminare. La coppia PLA-TPU si candida pertanto come la combinazione di materiali più promettente per la realizzazione della geometria ausettica definitiva, e sarà oggetto della caratterizzazione meccanica approfondita nelle fasi successive della sperimentazione.

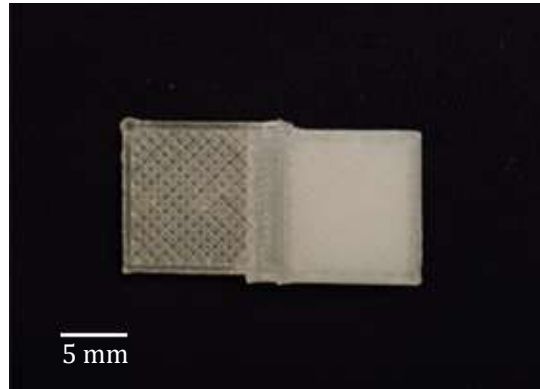


Figure 2.11: PLA - TPU Basetta

La figura evidenzia un difetto di coassialità tra le due porzioni, causato da un posizionamento imperfetto degli estrusori in fase di setup. Questa problematica è stata corretta in un secondo momento attraverso una procedura di allineamento più precisa e accurata.



Figure 2.12: PLA - TPU dettaglio layer

2.6 Terza Coppia Testata: HIPS e TPE

La terza coppia analizzata è composta da HIPS e TPE. Si tratta di una combinazione priva di riferimenti in letteratura, per la quale ci si aspetta un comportamento incerto. I risultati sperimentali hanno tuttavia superato in negativo le attese, evidenziando una totale incompatibilità tra i due materiali già nelle prime fasi della stampa.

Di seguito si riportano i parametri di stampa impiegati e i risultati ottenuti.

2.6.1 Prima Stampa: Parametri e Risultato

La prima sessione di stampa è stata condotta con i parametri standard dei due materiali. I valori utilizzati sono riportati nella tabella seguente.

Parametro	HIPS	TPE
Extruder temperature (°C)	160	130
Head temperature (°C)	225	200
Cold temperature (°C)	65	40
Bed temperature (°C)	60	60
Flow (%)	37	45
Printing speed (mm/s)	20	20
Merged mesh overlap (mm)	0	0
Infill (%)	100	100

Table 2.11: Parametri di stampa utilizzati nella prima prova (coppia HIPS-TPE)

Il risultato è stato completamente negativo fin dai primi layer. I due materiali non hanno mostrato alcuna adesione reciproca: il TPE, privo di qualsiasi ancoraggio all'HIPS sottostante, veniva trascinato dall'ugello durante la deposizione anziché restare nella posizione di stampa. Questo fenomeno ha generato un progressivo accumulo di materiale fuori posizione, con conseguente formazione di sbavature, depositi irregolari e intasamento della zona di stampa. La qualità del pezzo è degenerata rapidamente già nei layer iniziali, rendendo impossibile portare a termine la stampa in maniera accettabile. Il provino risultante è apparso gravemente difettoso, con le due metà completamente separate e il materiale distribuito in modo caotico sulla superficie del piano.

2.6.2 Tentativi di Ottimizzazione e Conclusioni

A fronte del fallimento totale della prima stampa, sono stati modificati diversi parametri nel tentativo di ottenere almeno una coesione minima tra i due materiali. Le variazioni apportate sono riportate nella tabella seguente.

Parametro	HIPS	TPE
Extruder temperature (°C)	160	130
Head temperature (°C)	225	200
Cold temperature (°C)	65	40
Bed temperature (°C)	70	70
Flow (%)	40	45
Printing speed (mm/s)	10	10
Merged mesh overlap (mm)	0.2	0.2
Infill (%)	100	100

Table 2.12: Parametri modificati per la coppia HIPS–TPE

Nonostante le modifiche apportate, nessuna delle configurazioni testate ha prodotto un risultato accettabile. In tutti i tentativi il TPE ha continuato a non aderire all'HIPS, venendo sistematicamente trascinato dall'ugello e compromettendo l'integrità della stampa già nei primissimi layer. A causa del prematuro e sistematico fallimento del processo nei primi istanti di deposizione, non è stato possibile produrre campioni completi né raccogliere documentazione fotografica significativa delle prove. Il problema non è riconducibile a una scelta errata dei parametri di processo, ma appare piuttosto legato a una fondamentale incompatibilità chimica tra i due polimeri, che presentano polarità e strutture chimiche molto distanti, tali da non consentire alcuna interdiffusione molecolare significativa nelle condizioni tipiche della stampa MEX.

La coppia HIPS–TPE viene pertanto scartata definitivamente dalla sperimentazione. Non sarà presa in considerazione per le fasi successive della ricerca, in quanto l'incompatibilità rilevata è di natura intrinseca e non superabile attraverso la sola ottimizzazione dei parametri di stampa.

2.7 Quarta Coppia Testata: PLA e TPE

L'ultima coppia sottoposta a verifica sperimentale è quella composta da PLA, nel ruolo di materiale rigido, e TPE come materiale flessibile. Si tratta della seconda combinazione con TPE prevista nel piano sperimentale, anch'essa priva di riferimenti in letteratura. A differenza della coppia HIPS–TPE analizzata nel sottocapitolo precedente, in questo caso la stampa è stata portata a termine senza interruzioni critiche; tuttavia, i risultati ottenuti non sono sufficienti a qualificare questa coppia come candidata per le fasi successive della sperimentazione.

2.7.1 Prima Stampa: Parametri e Risultato

La prima sessione di stampa è stata condotta con i parametri standard dei due materiali, riportati nella tabella seguente.

Parametro	PLA	TPE
Extruder temperature (°C)	170	130
Head temperature (°C)	212	200
Cold temperature (°C)	67	65
Bed temperature (°C)	60	60
Flow (%)	88	45
Printing speed (mm/s)	20	20
Merged mesh overlap (mm)	0	0
Infill (%)	100	100

Table 2.13: Parametri di stampa utilizzati nella prima prova (coppia PLA–TPE)

A differenza di quanto osservato con la coppia HIPS–TPE, in questo caso il TPE non viene trascinato dall'ugello durante la deposizione: entrambi i materiali vengono depositi regolarmente nelle rispettive zone del provino e la stampa procede fino al completamento senza interruzioni. Tuttavia, nell'esaminare il provino terminato, la zona centrale a layer alternati presenta una qualità di adesione insufficiente: i layer dei due materiali risultano accostati ma non legati, con evidenti discontinuità all'interfaccia e una coesione meccanica molto scarsa. Separando manualmente le due estremità, la zona di giunzione

cede senza opporre resistenza apprezzabile, confermando l'assenza di un'interdiffusione molecolare efficace tra PLA e TPE.

2.7.2 Tentativi di Ottimizzazione e Conclusioni

Sono stati effettuati alcuni tentativi di ottimizzazione dei parametri di stampa con l'obiettivo di migliorare l'adesione nella zona di giunzione. Le modifiche apportate sono indicate nella tabella seguente.

Parametro	PLA	TPE
Extruder temperature (°C)	170	130
Head temperature (°C)	212	200
Cold temperature (°C)	67	65
Bed temperature (°C)	65	65
Flow (%)	88	45
Printing speed (mm/s)	15	15
Merged mesh overlap (mm)	0.2	0.2
Infill (%)	100	100

Table 2.14: Parametri modificati per la coppia PLA-TPE

Le modifiche ai parametri non hanno prodotto miglioramenti significativi. La stampa si completa regolarmente in tutte le configurazioni testate, ma la zona centrale del provino presenta in ogni caso una giunzione insoddisfacente: i layer alternati di PLA e TPE rimangono scarsamente coesi, con difetti visibili e una resistenza alla separazione del tutto insufficiente per un'applicazione strutturale. Il problema appare riconducibile alla limitata affinità chimica tra il PLA, polimero polare a base di acido lattico, e il TPE, elastomero a base poliestera con caratteristiche di superficie differenti, che non favoriscono l'interdiffusione molecolare necessaria a formare un'interfaccia resistente.

2.7.3 Conclusioni sulla Selezione delle Coppie di Materiali

Sulla base delle prove empiriche condotte sulle quattro coppie di materiali, è stato possibile formulare un giudizio definitivo in merito alla compatibilità di stampa e all'adesione interfacciale di ciascuna combinazione. Le coppie HIPS-TPE e PLA-TPE

sono state scartate: la prima ha mostrato problemi critici già nella fase di deposizione, con il materiale flessibile trascinato dall'ugello e un'adesione reciproca del tutto assente; la seconda, pur completando la stampa in modo regolare, non ha evidenziato un'adesione interfacciale sufficiente a garantire le prestazioni meccaniche richieste, nemmeno a seguito dell'ottimizzazione dei parametri.

Le coppie PLA-TPU e HIPS-TPU sono invece risultate compatibili con il processo di stampa bimateriale e sono state confermate come scelte per le fasi successive della sperimentazione. Entrambe hanno dimostrato un'adesione interfacciale adeguata e una resistenza soddisfacente nell'interfaccia tra i due materiali, a seguito dell'ottimizzazione dei parametri di stampa. La successiva sperimentazione, in termini di proprietà meccaniche del materiale è stata condotta sulla coppia PLA – TPU.

2.9 Prime Tower nella Stampa Bimateriale

Nella stampa MEX bimateriale, ogni qualvolta si verifica un cambio di materiale attivo, l'ugello che era rimasto in posizione di attesa ha avuto il tempo di raffreddarsi parzialmente. Al momento della riattivazione, i primi millimetri di estrusione risultano irregolari a causa della viscosità non ancora stabilizzata del fuso: il materiale può fuoriuscire in modo discontinuo, con sotto-estrazione iniziale seguita da un eccesso di flusso man mano che la temperatura risale al valore nominale.

Per eliminare questo difetto dal pezzo finale si utilizza la prime tower, nota anche come purge tower o wipe tower. Si tratta di una struttura ausiliaria stampata a lato del pezzo principale: ogni volta che l'ugello viene riattivato, prima di depositare materiale sul provino esegue una o più passate su questa torretta. In questo modo il flusso viene omogeneizzato e la temperatura dell'ugello si stabilizza, garantendo che la prima passata sul pezzo reale abbia già le caratteristiche geometriche e meccaniche desiderate.

La prime tower introduce un consumo aggiuntivo di materiale e aumenta leggermente il tempo di stampa, ma è indispensabile per ottenere interfacce bimateriali pulite e ripetibili.

Prime tower size

Prime tower minimum volume

Nozzle switch retraction distance

Nozzle switch extra prime amount

Prime tower flow

Table 2.15: Parametri principali della prime tower

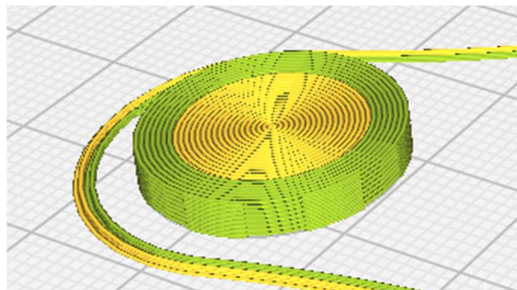


Figure 2.13: Prime tower

Capitolo 3

Caratterizzazione Meccanica delle Coppie Selezionate: Provini Dog-Bone

3.1 Introduzione e Obiettivi del Capitolo

A seguito della fase di selezione preliminare descritta nel Capitolo 2, due coppie di materiali hanno superato la valutazione dei provini di compatibilità: la coppia PLA–TPU, che ha dimostrato fin dalla prima stampa una buona adesione interfacciale e risultati ulteriormente migliorati dopo l'ottimizzazione dei parametri, e la coppia HIPS–TPU, che pur non avendo fornito un risultato del tutto soddisfacente ha comunque raggiunto una coesione sufficiente a procedere con la fase successiva. Entrambe le coppie vengono pertanto sottoposte a una caratterizzazione meccanica più approfondita attraverso la stampa e il test di provini geometricamente standardizzati di tipo dog-bone.

A tal fine sono stati adottati provini di tipo dog-bone, la cui geometria è dettata dalla norma EN ISO 20753 per la caratterizzazione a trazione dei materiali polimerici. La forma a osso di cane consente di concentrare le sollecitazioni nella sezione centrale del provino durante la prova di trazione, garantendo che la rottura avvenga nella zona utile e che i risultati siano confrontabili e ripetibili. Le dimensioni adottate sono state ricavate da una norma di riferimento per la stampa monomateriale, i cui valori sono riportati nella Tabella 3.1.

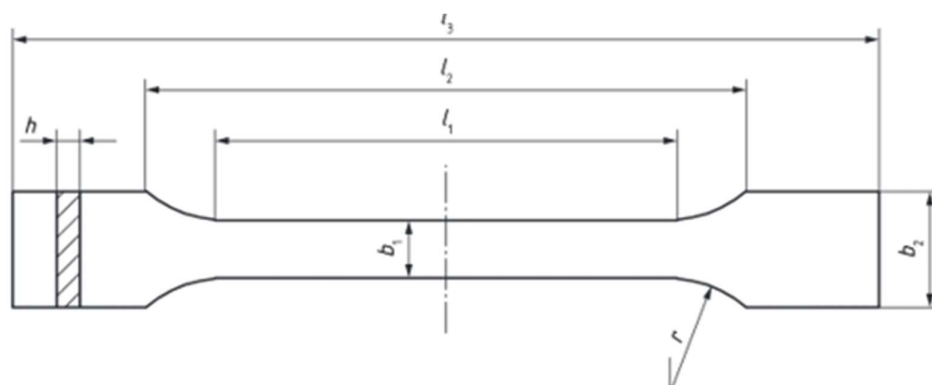


Figure 3.1: Misure per la norma EN ISO 20753

Parametro	[mm]
L3	150
L2	109
L1	80
R	24
b2	20
b1	10
h	4

Table 3.1: Dimensioni provino dog-bone Tipo 1 - Grande

Parametro	[mm]
L3	50
L2	36
L1	26.5
R	8
b2	6.7
b1	3.3
h	2

Table 3.2: Dimensioni provino dog-bone Tipo 2 - Piccolo

È importante sottolineare che non esiste ad oggi una normativa specifica per la caratterizzazione meccanica di provini stampati in modalità bimatereiale mediante tecnologia MEX. La norma di riferimento adottata è stata originariamente concepita per materiali monomateriale ed è stata adattata per consentire la valutazione dell'interfaccia bimatereiale. Sono state progettate due configurazioni di stampa distinte, che differiscono nel modo in cui i due materiali sono distribuiti all'interno del provino: nella prima configurazione un'estremità è un materiale e l'altra il secondo materiale con la zona

centrale a layer alternati; nella seconda configurazione i layer alternati si estendono su tutta la lunghezza del provino.

3.2 Verifica sui Provini Monomateriale di PLA

Prima di procedere alla caratterizzazione meccanica dei provini bimatériauale, è stato deciso di condurre una fase preliminare di verifica sui provini monomateriale di PLA. Questa scelta è motivata da due esigenze distinte: da un lato, testare e consolidare l'intera procedura sperimentale — dalla stampa alla prova di trazione — in assenza delle complessità aggiuntive introdotte dalla combinazione di due materiali; dall'altro, verificare se esistesse una differenza significativa di comportamento meccanico tra le due geometrie previste dalla norma di riferimento, ossia il Tipo 1 (provino grande) e il Tipo 2 (provino piccolo). Tale confronto è necessario per stabilire quale geometria adottare nelle fasi successive, assicurando risultati affidabili e coerenti con i valori presenti in letteratura per il PLA stampato tramite MEX.

Per quanto riguarda il pattern di riempimento (infill), la scelta è ricaduta sull'orientazione a $\pm 45^\circ$ rispetto all'asse longitudinale del provino. È stato riscontrato in letteratura che questa configurazione produce, tra le diverse orientazioni di stampa testate, i valori più elevati di resistenza a trazione e modulo elastico, grazie alla migliore distribuzione delle tensioni lungo le linee di deposizione e alla riduzione dell'anisotropia meccanica rispetto alle orientazioni a 0° o 90° [13].

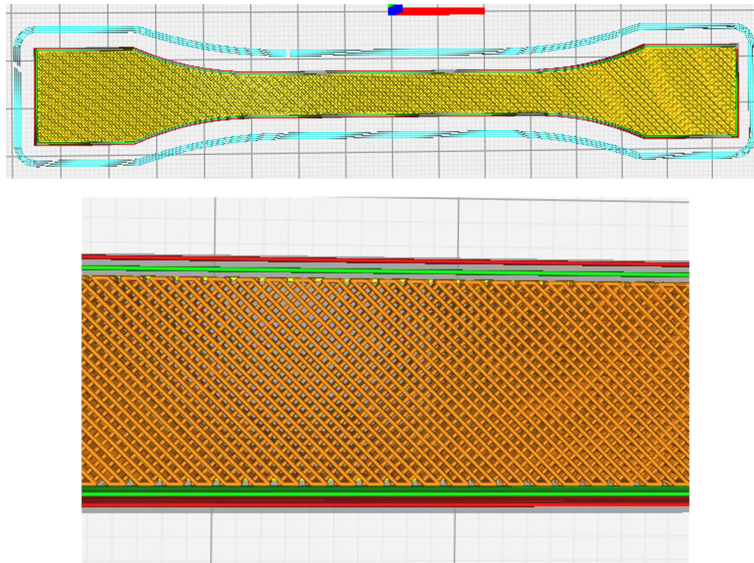


Figure 3.2: Dettaglio infill

3.2.1 Provini Tipo 1 (Grande) e Tipo 2 (Piccolo): Confronto

Sono stati stampati e testati provini di entrambe le dimensioni previste dalla norma: il Tipo 1 (grande) e il Tipo 2 (piccolo), le cui quote sono riportate nelle Tabelle 3.1 e 3.2. L'obiettivo di questo confronto è verificare se i due formati forniscono risultati meccanici equivalenti: in caso affermativo, sarà possibile condurre tutta la sperimentazione successiva utilizzando esclusivamente i provini di dimensioni ridotte, con un risparmio significativo di tempo di stampa e di materiale.

I parametri di stampa adottati per entrambe le tipologie sono riportati nella tabella seguente.

Parametro	Valore
Materiale	PLA
Extruder temperature (°C)	170
Head temperature (°C)	212
Cold temperature (°C)	67
Bed temperature (°C)	65
Flow (%)	88
Printing speed (mm/s)	25
Infill (%)	100
Pattern infill	±45°
Wall number	2

Table 3.3: Parametri di stampa per i provini monomateriale PLA

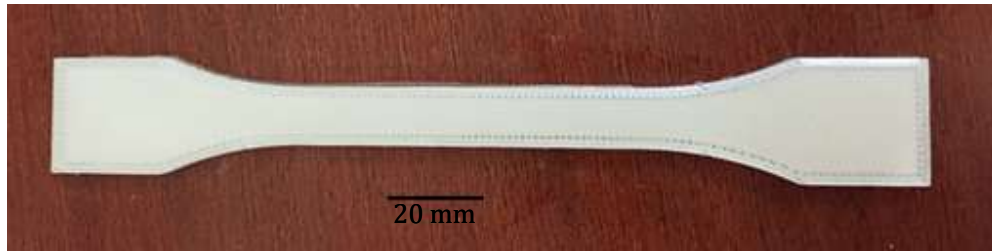


Figure 3.3: Provino PLA tipo 1

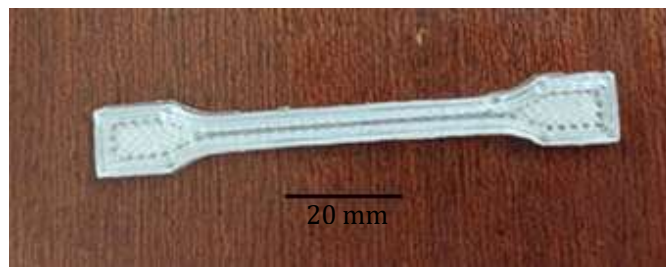


Figure 3.4: Provino PLA tipo 2

3.2.2 Misura della Densità dei Provini

Prima di procedere con le prove di trazione, è stata misurata la densità dei provini stampati al fine di verificare la qualità della stampa e rilevare eventuali porosità interne. La densità è stata determinata con due metodi distinti a seconda del formato del provino.

Per i provini di formato Tipo 1 (grande), la densità è stata calcolata misurando geometricamente il volume del provino tramite calibro e pesandolo su bilancia di precisione. Il volume è ottenuto dalle dimensioni nominali della geometria dog-bone, e la densità è ricavata come rapporto tra massa e volume misurato. Il volume è stato calcolato come la differenza tra il volume delimitato dalla zona rossa e il volume occupato dalla

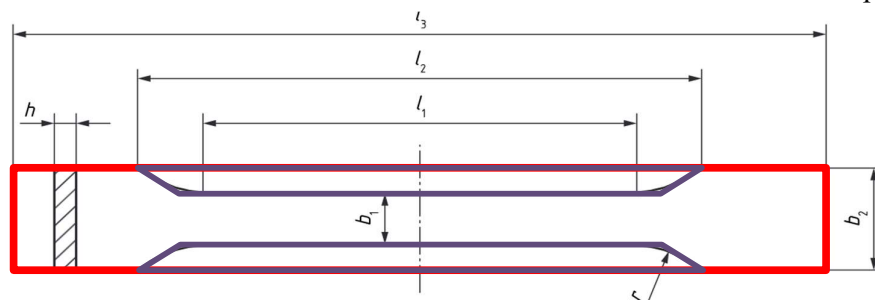


Figure 3.5: Calcolo del volume

zona blu. In particolare, al volume totale racchiuso dal contorno rosso è stato sottratto il volume corrispondente alla regione blu, ottenendo così il volume netto della struttura in esame.

Per i provini di formato Tipo 2 (piccolo), oltre alla misura geometrica del volume, è stato applicato anche il metodo di Archimede mediante la bilancia Mettler Toledo modello ML104/01 tipo: NewClassic MF. Il metodo di Archimede consente di misurare il volume del provino per sostituzione idrostatica: il campione viene pesato prima in aria e poi immerso in un liquido di densità nota (acqua distillata), e il volume è ricavato dalla differenza di peso secondo il principio di Archimede con la seguente formula:

$$\rho = \frac{m_{aria}}{m_{aria} - m_{acqua}} * (\rho_{acqua} - \rho_{aria}) + \rho_{aria}$$

Il confronto tra i due metodi consente di valutarne la coerenza e di stimare il grado di porosità dei provini stampati.

Formula per calcolare la porosità:

$$P\% = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{th}}\right) * 100$$

Tenendo in considerazione che per il PLA la densità teorica è di $1,24 \text{ g/cm}^3$ mentre per il TPU è di $1,19 \text{ g/cm}^3$. Dati forniti direttamente dal produttore del pellet

Provino	Massa [g]	Volume geometrico [cm ³]	Densità [g/cm ³]	Porosità [%]
1	11.42	9.73	1.17	5.6
2	10.15	9.14	1.11	10.5
3	10.82	9.07	1.19	4.0
AV.	10.80 ± 0.52	9.31 ± 0.29	1.16 ± 0.03	6.7 ± 2.77

Table 3.4: Densità provini Tipo A (misura geometrica)

Provino	Massa [g]	Volume geometrico [cm ³]	Densità geometrica [g/cm ³]	Densità Archimede [g/cm ³]	Porosità [%]
1	0.6132	519	1.18	1.21	2.4
2	0.6118	517.7	1.18	1.23	0.8
3	0.6144	520.1	1.18	1.20	3.2
AV.	0.613 ± 0.001	517.77 ± 1.88	1.18 ± 0	1.21 ± 0.012	2.13 ± 0.99

Table 3.5: Densità provini tipo B

Provino	L1 [mm]	b1 [mm]	h [mm]	Area di sezione [mm ²]
1	81.80	10.45	4.31	42.03
2	81.24	10.44	4.17	45.53
3	81.01	10.24	4.13	42.29

Table 3.6: Dimensioni provini tipo A

Provino	L1 [mm]	b1 [mm]	h [mm]	Area di sezione [mm ²]
1	26.32	3.48	2.19	7.62
2	26.12	3.53	2.38	8.40
3	26.17	3.66	2.26	8.27

Table 3.7: Dimensioni provini tipo B

I risultati ottenuti con i due metodi sono tra loro comparabili, confermando la coerenza delle misure e la buona qualità dimensionale dei provini stampati.

3.2.3 Risultati e Confronto con la Letteratura

Le prove di trazione sono state condotte mediante la macchina riportata in tabella. La misura della deformazione è stata eseguita tramite estensometro, i cui dettagli tecnici (modello, base di misura, corsa) sono riportati nella tabella seguente insieme agli altri parametri di prova.

Parametro	Valore
Modello macchina	STEP Lab EA05 AXIAL
Forza massima (kN)	5
Velocità di prova (mm/min)	1
Estensometro	MTS Extensometer Model 634.12F-24
Lunghezza utile dell'estensometro (mm)	25

Table 3.8: Dettagli macchina per le prove a trazione

I provini stampati sono stati sottoposti a prova di trazione secondo la norma di riferimento. I risultati ottenuti per entrambe le dimensioni sono riportati nella tabella seguente, insieme ai valori tipici del PLA stampato FDM presenti in letteratura.

PLA – A	$\sigma_R [MPa]$	$\varepsilon_R [\%]$	$E [GPa]$
1	33.95	1.72	1.97
2	29.99	1.09	2.75
3	30.78	1.14	2.70
AV.	31.57 ± 1.71	1.32 ± 0.29	2.47 ± 0.36

Table 3.9: Risultati prove di trazione PLA tipo 1

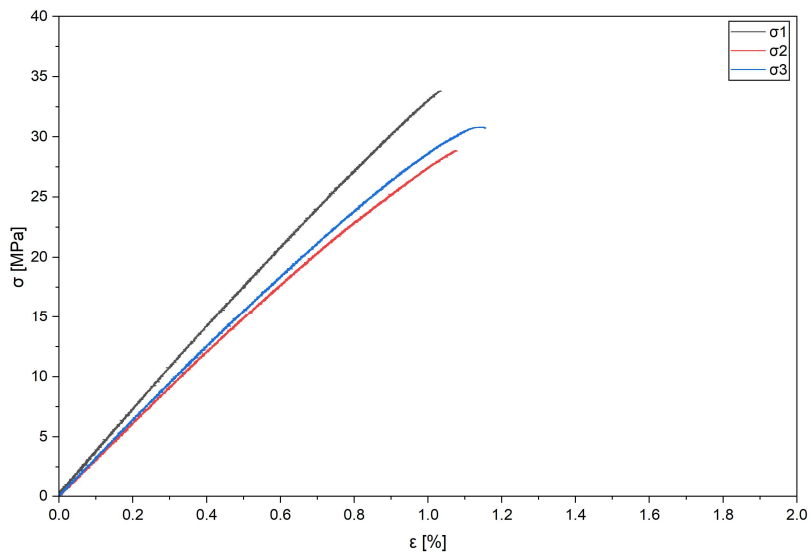


Figure 3.6: Grafico sforzo - deformazione PLA tipo 1



Figure 3.7: Foto provini PLA tipo 1 dopo il test di trazione

PLA – B	$\sigma_R [MPa]$	$\epsilon_R [\%]$	$E [GPa]$
1	31.45	1.11%	2.83 GPa
2*	16.98	0.48%	3.54 GPa
3	33.18	1.03%	3.22 GPa
AV	31.57 ± 1.71	1.07 ± 0.04	3.025 ± 0.20

Table 3.10: Risultati prove di trazione PLA tipo 2 (*outlier)

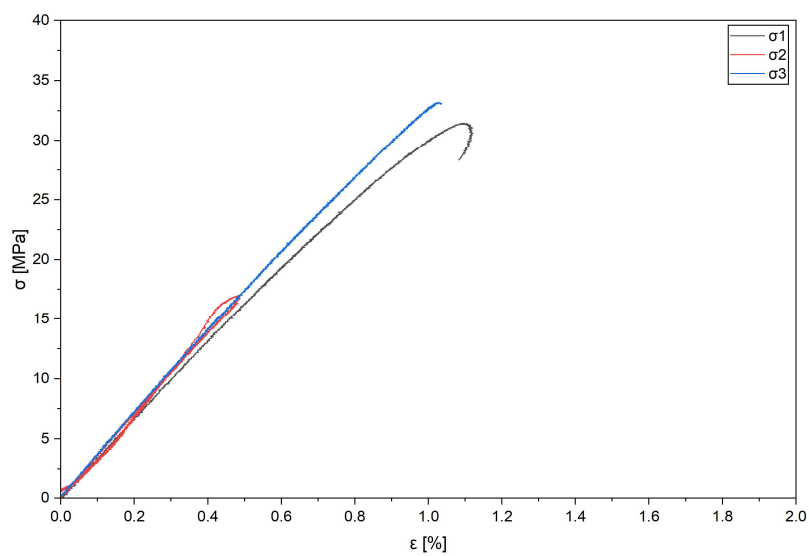


Figure 3.8: Grafico sforzo - deformazione PLA tipo 2



Figure 3.9: Foto provini PLA tipo 2 dopo il test di trazione

Il secondo dato riportato nella Tabella precedente mostra un andamento anomalo a causa di un errore sistematico nella fase di serraggio del provino. Un'eccessiva pressione esercitata dal morsetto inferiore della macchina di prova ha generato uno stato di sollecitazione localizzato, inducendo una rottura prematura del componente prima del raggiungimento del reale carico di snervamento.

I risultati ottenuti non coincidono con i valori attesi dalla letteratura: i valori di resistenza a trazione e modulo elastico misurati sui provini stampati sono significativamente inferiori rispetto a quelli tipicamente riportati per il PLA processato mediante FDM/FFF come si può vedere dai dati riportati nella tabella successiva.

PLA – Lit	$\sigma_R [MPa]$	$\varepsilon_R [\%]$	$E [GPa]$	Infill type	Speed [mm/min]
[14]	33.3*	1.02	3.26	$\pm 45^\circ$	5
[15]	64.0	2.50	2.56	$\pm 45^\circ$	5
[15]	54.0	4.14	3.49	$\pm 90^\circ$	5
[16]	52.0	5.7	0.913	$\pm 45^\circ$	5

Table 3.11: Dati letteratura. I dati sono la media dei risultati riportati negli articoli (*75% infill)

Questo scostamento è riconducibile all'umidità assorbita dal pellet durante lo stoccaggio: il PLA è un materiale igroscopico e, in assenza di un'adeguata essiccazione preventiva, l'umidità residua attiva ad alta temperatura una reazione di idrolisi che taglia le catene polimeriche, abbassandone il peso molecolare. Questo fenomeno genera bolle e discontinuità all'interno dei filamenti depositati, degradando le proprietà meccaniche del pezzo e rendendo necessaria un'essiccazione prima di ripetere la sperimentazione.

Si precisa che i provini monomateriale di TPU non vengono inclusi in questa fase di caratterizzazione. Il TPU è un elastomero con un allungamento a rottura che può superare il 300–600%, un valore incompatibile con la corsa utile della macchina di trazione disponibile: il provino non verrebbe portato a rottura entro i limiti di spostamento della

macchina, rendendo la prova non significativa. La caratterizzazione del TPU monomateriale viene pertanto esclusa, e il suo comportamento meccanico sarà valutato indirettamente attraverso i provini bimateriale PLA-TPU.

3.2.4 Essiccazione del pellet e ripetizione delle prove

Per eliminare l'umidità in eccesso assorbita dal pellet di PLA, il materiale è stato sottoposto a un ciclo di essiccazione in forno a vuoto a 80 °C per una durata di 2 ore. L'utilizzo del vuoto favorisce la rimozione dell'umidità rispetto alla sola temperatura, riducendo la pressione parziale del vapore acqueo all'interno del forno e accelerando la diffusione dell'acqua dal bulk del materiale verso la superficie.

Sono stati quindi ristampati provini dog-bone di formato Tipo 2 (piccolo) con il materiale essiccato, mantenendo invariati tutti gli altri parametri di stampa. I nuovi provini sono stati sottoposti alle stesse prove di trazione descritte nel sottocapitolo precedente e i risultati sono riportati nelle tabelle seguenti.

PLA	M_{air} [g]	M_{wt} [g]	ρ [g/cm ³]	P [%]
1	0.5754	0.1019	1.2125	2.2200
2	0.5835	0.1055	1.2180	1.7742
3	0.5647	0.1018	1.2172	1.8387
AV	3.68 ± 0.070	0.103 ± 0,002	1.2159 ± 0.002	1.9443 ± 0.197

Table 3.12: Misura della densità del PLA essiccato

PLA	$\sigma_R [MPa]$	$\varepsilon_R [\%]$	$E [GPa]$
1	31.45	1.11	2.83
2*	16.98	0.48	3.54
3	33.18	1.03	3.22
AV	31.57 ± 1.71	1.07 ± 0.04	3.025 ± 0.20

PLA Dry	$\sigma_R [MPa]$	$\varepsilon_R [\%]$	$E [GPa]$
1	22.28	5.43	0.41
2	49.25	3.65	1.35
3	44.34	3.87	1.15
AV	38.62 ± 11.73	4.32 ± 0.79	0.97 ± 0.40

Table 3.13: Confronto risultati PLA non essiccato e PLA essiccato

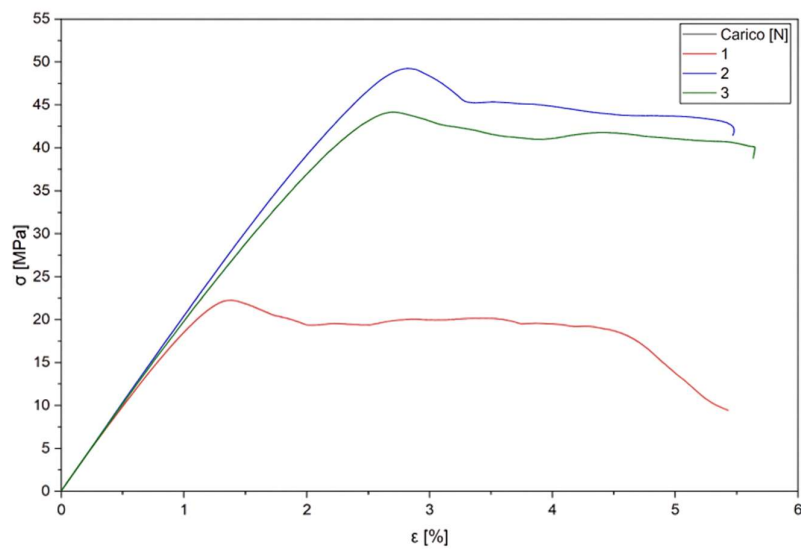


Figure 3.10: Grafici sforzo - deformazione PLA essiccato

Il primo valore in tabella mostra una resistenza significativamente inferiore rispetto ai successivi, in quanto derivante da una stampa preliminare di prova. Un'analisi a

posteriori del G-code ha evidenziato la mancata attivazione del sistema di raffreddamento (ventola), compromettendo la corretta solidificazione termica del polimero e indebolendo la struttura; tale problematica è stata risolta nelle due prove successive, che presentano un andamento nominale. Dai grafici si può anche notare come questi ultimi provini abbiano raggiunto la rottura in campo plastico, a differenza dei campioni precedenti il cui cedimento è avvenuto prematuramente in campo elastico.

I risultati ottenuti con il materiale essiccato sono soddisfacenti e in buon accordo con i valori di letteratura, confermando che il problema riscontrato nella prima campagna di prove era imputabile esclusivamente all'umidità del pellet e non a parametri di processo incorretti. Da questo momento in poi tutta la sperimentazione sarà condotta con materiale preventivamente essiccato secondo il protocollo descritto.

3.3 Modellazione 3D dei Provini Dog-Bone bimateriale

Prima di procedere con la stampa, i provini dog-bone sono stati modellati tridimensionalmente mediante il software di CAD parametrico Creo Parametric. La modellazione in ambiente CAD ha consentito di definire con precisione la geometria del provino rispettando le dimensioni previste dalla norma di riferimento e di impostare correttamente la distribuzione dei due materiali all'interno del volume, in modo da guidare il processo di slicing e di assegnazione dei materiali in fase di preparazione alla stampa.

Sono stati realizzati due modelli distinti, corrispondenti alle due configurazioni di stampa previste per la caratterizzazione bimateriale.

3.3.1 Modello A: Estremità Separate con Zona Centrale a Layer Alternati

Il primo modello riproduce la configurazione in cui le due estremità del provino sono assegnate ciascuna a uno dei due materiali: un'estremità è realizzata interamente in PLA, l'estremità opposta interamente in TPU. La zona centrale del provino – corrispondente alla sezione utile a sezione ridotta – è modellata come una regione a layer alternati, in cui strati del primo materiale si alternano a strati del secondo secondo uno schema periodico. Questa configurazione simula una giunzione localizzata tra due semipezzi monomateriale, concentrando l'interfaccia bimateriale nella zona più sollecitata durante la prova di trazione.

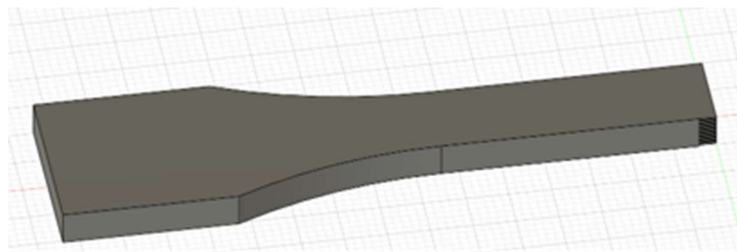


Figure 3.11: Dog bone una estremità

3.3.2 Modello B: Layer Alternati sull'Intero Provino

Il secondo modello prevede l'alternanza dei layer di PLA e TPU estesa a tutta la lunghezza del provino, dalle estremità fino alla sezione utile centrale, senza alcuna zona monomateriale. Il volume dell'intero provino è suddiviso in strati sovrapposti di spessore uniforme di 0,2 mm, assegnati alternativamente ai due materiali, consentendo di valutare il comportamento meccanico globale del composito a layer alternati sotto carico di trazione.

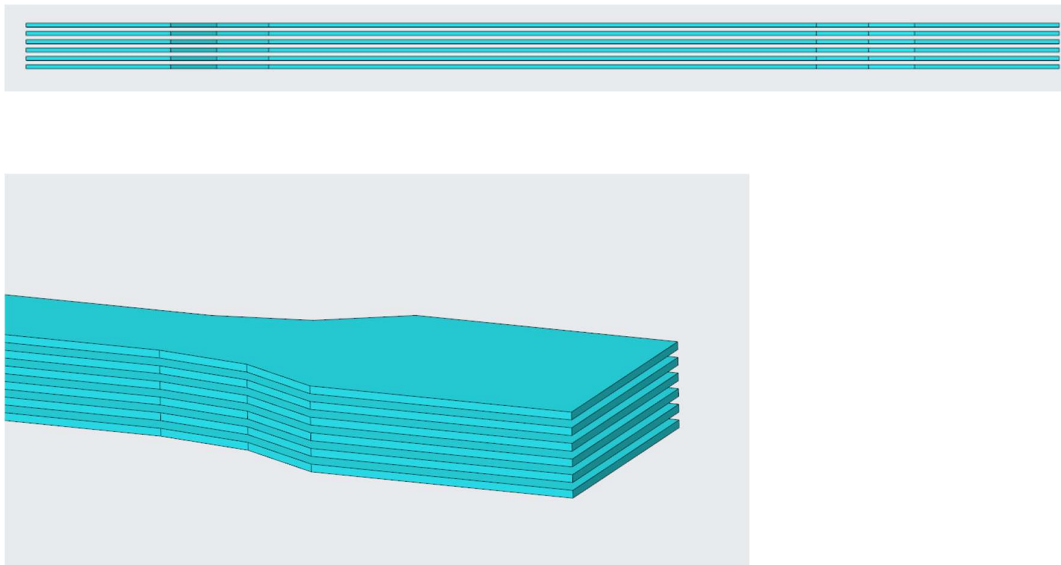


Figure 3.12: Dettaglio layer (una metà)

3.4 Stampa Configurazione A – Coppia HIPS–TPU

La prima coppia sottoposta a stampa nella Configurazione A è quella composta da HIPS e TPU. Il provino è stato stampato con le estremità nei rispettivi materiali monomateriale e la zona centrale a layer alternati, secondo il modello descritto nei sottocapitoli precedenti. A una prima osservazione visiva il provino appare ben riuscito: la geometria è rispettata, la superficie risulta continua e non si rilevano difetti macroscopici evidenti né distorsioni termiche. L'aspetto esteriore del pezzo non lascia presagire i problemi che emergono immediatamente alla prima verifica manuale.



Figure 3.13: Provino HIPS - TPU

Applicando una semplice trazione manuale alle due estremità del provino, le due metà si separano con estrema facilità, senza opporre alcuna resistenza apprezzabile. L'adesione nella zona centrale a layer alternati si rivela sensibilmente più debole rispetto a quanto osservato con il provino di compatibilità preliminare testato nel Capitolo 2. Questo peggioramento è direttamente riconducibile a due fattori geometrici: in primo luogo, la superficie di contatto tra i layer alternati dei due materiali nella zona utile del dog-bone è considerevolmente inferiore rispetto a quella della basetta di compatibilità, che presentava una sezione trasversale più ampia; in secondo luogo, lo spessore ridotto del provino dog-bone limita il numero di layer alternati presenti nella zona di giunzione, riducendo ulteriormente l'area totale di interfaccia disponibile per l'adesione.



Figure 3.14: Provino HIPS - TPU rotto

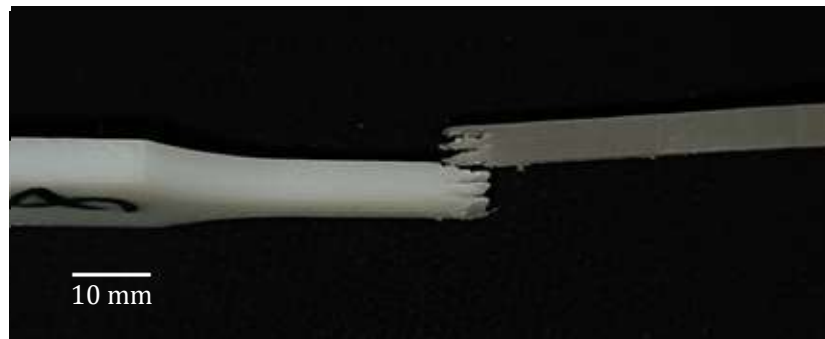


Figure 3.15: provino HIPS - TPU dettaglio

La combinazione di questi due fattori – minore area di contatto e minore altezza del provino – amplifica la debolezza intrinseca dell'adesione tra HIPS e TPU, già riconosciuta come limitata nella fase di selezione preliminare. Il risultato è un provino che, pur superando visivamente la stampa, non è in grado di resistere nemmeno alle sollecitazioni minime di una manipolazione manuale. La coppia HIPS–TPU viene pertanto scartata definitivamente anche in questa fase: non è ritenuta idonea a procedere con le prove di trazione strumentale né con la realizzazione della geometria ausettica.

3.5 Stampa Configurazione A – Coppia PLA–TPU

La seconda coppia testata nella Configurazione A è quella composta da PLA e TPU, già individuata nel Capitolo 2 come la combinazione più promettente tra quelle esaminate. Il provino è stato stampato secondo il modello descritto in precedenza, con le estremità nei rispettivi materiali monomateriale e la zona centrale a layer alternati di PLA e TPU.

Il risultato della stampa è positivo sia dal punto di vista visivo che meccanico. Il provino presenta una geometria corretta, superfici regolari e nessun difetto macroscopico visibile. A differenza di quanto osservato con la coppia HIPS–TPU, applicando una trazione manuale alle due estremità il provino non mostra alcuna tendenza alla separazione: le due metà rimangono solidalmente unite e l'interfaccia a layer alternati nella zona centrale resiste senza cedimenti alla sollecitazione applicata a mano. L'adesione tra PLA e TPU si conferma quindi robusta anche nella geometria più critica del dog-bone, dove la ridotta sezione trasversale della zona utile limita l'area di contatto disponibile.



Figure 3.16: Provino PLA - TPU tipo 1



Figure 3.17: Provino PLA - TPU tipo 2

Questo risultato conferma la scelta della coppia PLA–TPU come sistema bimateriale di riferimento per le fasi successive della ricerca. Il provino verrà ora sottoposto a caratterizzazione meccanica strumentale mediante prove di trazione, al fine di ottenere dati quantitativi sulla resistenza dell'interfaccia e sul comportamento meccanico complessivo del composito bimateriale.

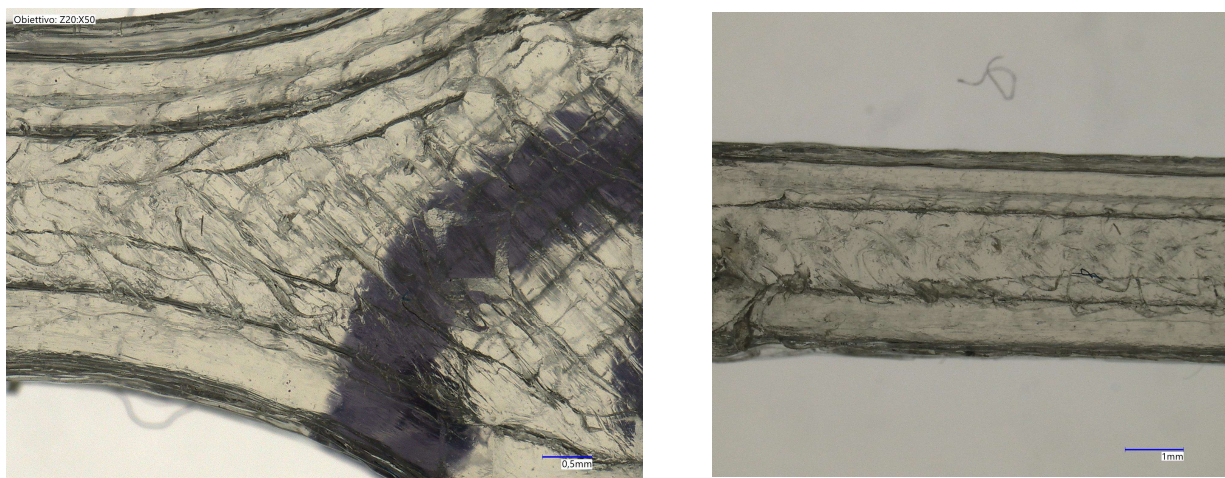


Figure 3.18: Dettagli al microscopio del PLA tipo 2

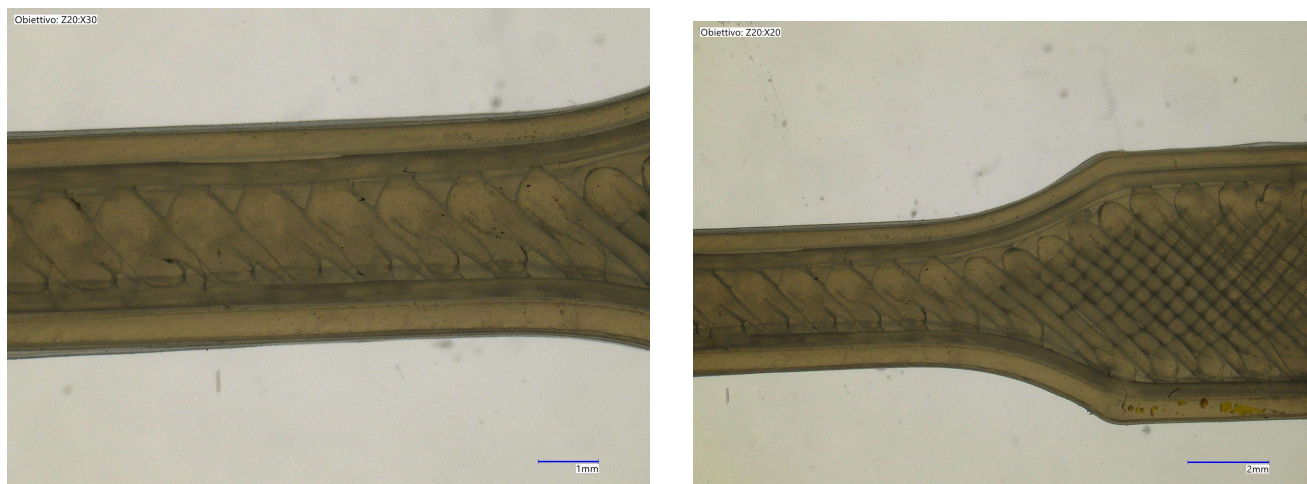


Figure 3.19: Dettagli al microscopio del PLA tipo 2

3.5.1 Prove di Trazione sui Provini Bimateriale – Configurazione A

Con il processo di stampa validato tramite i provini monomateriale di PLA, si procede alla stampa e alla caratterizzazione meccanica a trazione dei provini bimateriale PLA–TPU in Configurazione A – estremità separate con zona centrale a layer alternati. Anche in questa fase vengono stampati sia provini di formato Tipo 1 (grande) che Tipo 2 (piccolo), al fine di confrontare i risultati tra i due formati prima di stabilire quale adottare per la sperimentazione successiva.

A	Massa [g]	Volume geometrico [cm ³]	Densità geometrica [g/cm ³]
1	11.33	9.86	1.15
2	10.54	9.29	1.14
AV	10.935 ± 0.395	9.58 ± 0.285	1.15 ± 0.022

B	Massa [g]	Volume geometrico [cm ³]	Densità geometrica [g/cm ³]	Densità Archimede [g/cm ³]
1	0.6854	515.5	1.22	1.19
2	0.6639	535.5	1.20	1.19
3	0.6765	535.8	1.25	1.21
AV	0.6753 ± 0.011	528.93 ± 9.49	0.1105 ± 0.007	1.1967 ± 0.012

Table 3.14: Densità provini bimateriale Tipo 1 e 2

Al fine di verificare l'influenza dell'effetto scala e accertare che l'estensione dell'area di contatto non alteri i risultati sperimentali, sono stati realizzati due provini di dimensioni maggiori. Questi campioni verranno utilizzati come termine di paragone per verificare l'effettiva comparabilità dei valori rispetto ai provini a geometria ridotta.

I provini sono stati sottoposti a prova di trazione con la stessa macchina e gli stessi parametri di prova descritti nel sottocapitolo 3.5.3. I risultati ottenuti per i due formati sono riportati nella tabella seguente.

PLA – TPU – A	$\sigma_R [MPa]$	$\epsilon_R [\%]$	$E [GPa]$
1	4.51	23.2	0.019
2	3.19	12.8	0.024
AV	3.85 ± 0.66	18 ± 5.2	0.022 ± 0.003

Table 3.15: Risultati prove di trazione PLA – TPU tipo 1

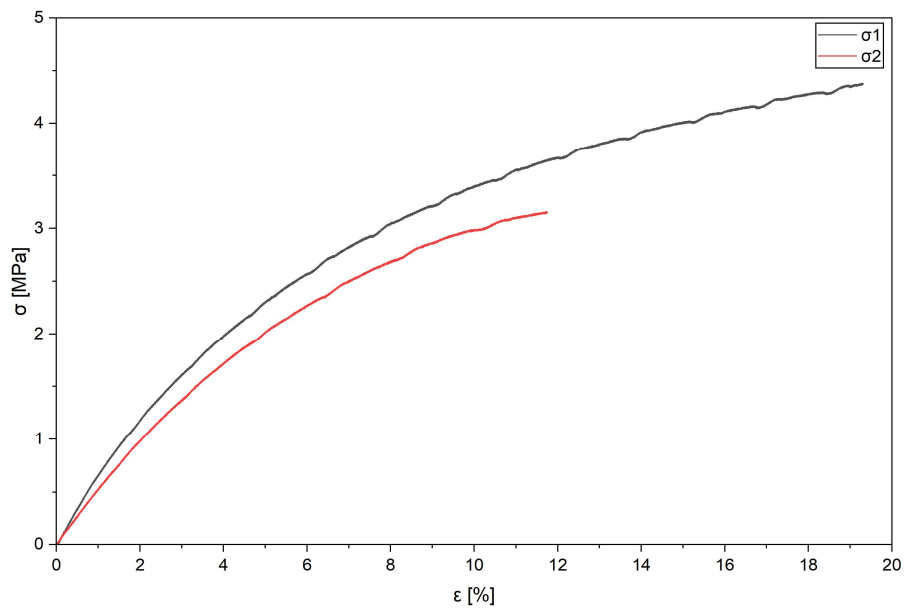


Figure 3.20: Grafici sforzo - deformazione PLA - TPU tipo 1

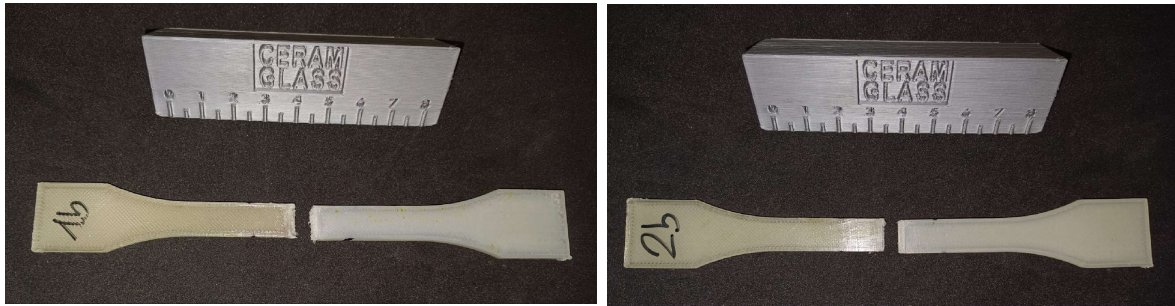


Figure 3.21: Provini PLA - TPU tipo 1 post prova

PLA – TPU – B	$\sigma_R [MPa]$	$\varepsilon_R [\%]$	$E [GPa]$
5	3.73	11.5	0.032
6	4.09	13.4	0.031
7	4.09	14.3	0.028
AV	3.97 ± 0.17	13.07 ± 1.17	0.03 ± 0.002

Table 3.16: Risultati prove di trazione PLA – TPU tipo 2

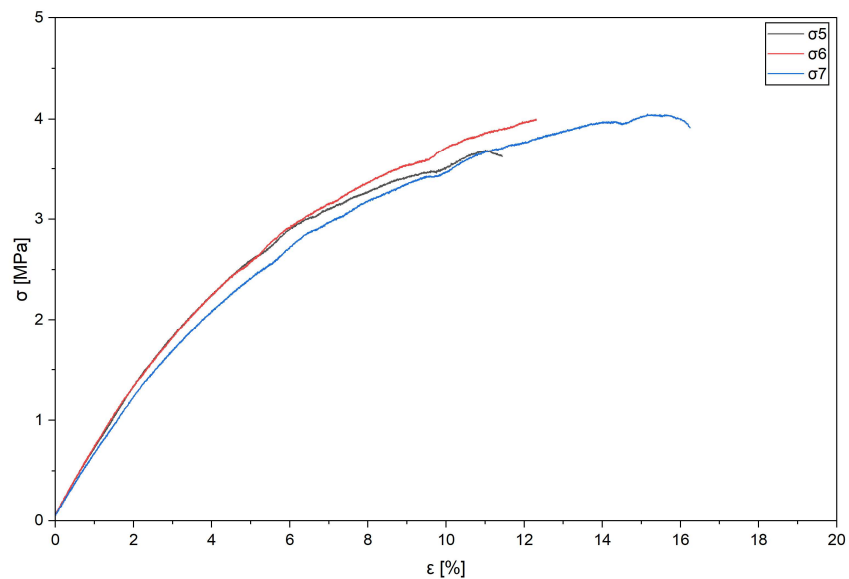


Figure 3.22: Grafici sforzo - deformazione PLA - TPU tipo 2



Figure 3.23: Provini PLA - TPU tipo 2 post prova

I risultati ottenuti con i due formati di provino sono tra loro comparabili, confermando che le dimensioni del campione non influenzano in modo significativo il comportamento meccanico misurato all'interfaccia bimateriale. Alla luce di questo esito, e considerando che il tempo necessario per la stampa del formato Tipo 2 è nettamente inferiore rispetto al Tipo 1, e che la misura della densità tramite metodo di Archimede sui provini più piccoli risulta più attendibile e più rapida, si decide di procedere da questo momento in poi esclusivamente con provini di formato Tipo 2 per tutta la sperimentazione successiva.

3.5.2 Analisi della Modalità di Rottura al Microscopio Elettronico

Come si può osservare dai risultati riportati nella Tabella 3.C, la resistenza a trazione massima dei provini bimateriale PLA-TPU è nettamente inferiore rispetto a quella dei corrispondenti provini monomateriale di PLA. Questo risultato era prevedibile: la presenza dell'interfaccia tra i due materiali costituisce inevitabilmente un punto di debolezza meccanica rispetto a un materiale omogeneo, e la resistenza del provino bimateriale è in larga misura governata dalla tenacità di questa giunzione piuttosto che dalle proprietà intrinseche dei singoli polimeri.

Per comprendere il meccanismo di cedimento, i provini bimateriale testati a trazione sono stati esaminati al microscopio ottico Keyence VHX – X1. Le immagini ottenute, riportate di seguito, rivelano che il cedimento non avviene per rottura del materiale nella

sezione utile, come ci si aspetterebbe in un provino monomateriale, bensì per sfilamento: i layer di PLA e i layer di TPU si separano scorrendo l'uno rispetto all'altro lungo la direzione di trazione, senza che si verifichi una frattura netta in nessuno dei due polimeri. Le superfici esposte dopo la prova si presentano lisce e prive di segni di strappo del materiale, confermando che il cedimento è localizzato interamente all'interfaccia di adesione tra i layer e non nel bulk dei singoli strati.

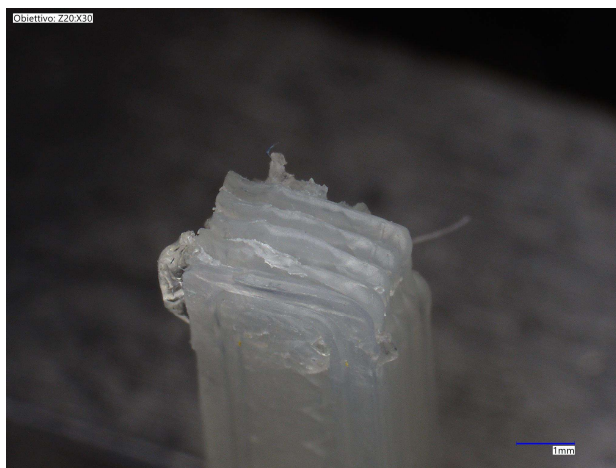


Figure 3.24: Dettaglio della metà del TPU



Figure 3.25: Dettaglio della metà del PLA

Questa modalità di cedimento per sfilamento è indicativa di una adesione interfacciale di tipo prevalentemente fisico, basata su forze di interdiffusione e legami secondari tra le catene polimeriche, senza una componente di ancoraggio meccanico significativa tra i layer. La superficie di scorrimento risultante è caratteristica di un cedimento di tipo adesivo, in cui la giunzione cede prima che i materiali raggiungano il loro limite di resistenza intrinseco.

3.5.3 Prove di Trazione sui Provini Bimateriale – Configurazione B

Sono stati stampati e testati a trazione i provini bimateriale PLA-TPU in Configurazione B, con layer alternati estesi su tutta la lunghezza del provino secondo il modello descritto nel sottocapitolo 3.2.2. Tutti i campioni sono di formato Tipo 2 (piccolo). La densità è stata misurata tramite metodo di Archimede con i risultati che riportano in tabella.

Provino	Massa in aria [g]	Massa in acqua [g]	Densità Archimede [g/cm ³]
A	0.7040	0.1203	1.2034
B	0.7291	0.1239	1.2020
C	0.7158	0.1225	1.2037
AV	3.68 ± 0.070	0.122 ± 0.001	1.203 ± 0.0007

Table 3.17: Densità provini bimateriale Configurazione B

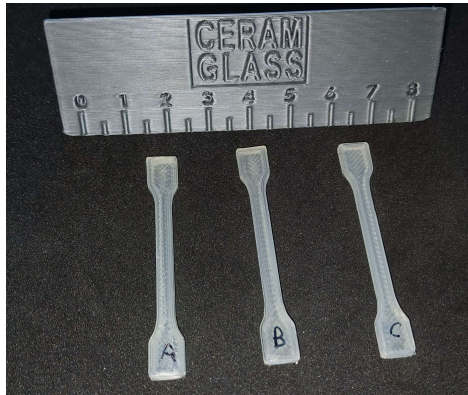


Figure 3.26: Provini con layer alternati

Le prove di trazione sono state condotte con la stessa macchina e i medesimi parametri di prova utilizzati nei sottocapitoli precedenti. I risultati sono riportati nella tabella seguente.

PLA - TPU	$\sigma_R [MPa]$	$\varepsilon_R [\%]$	$E [GPa]$
1	18.20	2.68	1.05
2	20.01	2.68	1.23
3	19.25	7.27	1.10
AV	19.15 ± 0.74	4.21 ± 2.16	1.13 ± 0.075

Table 3.18: Risultati prove trazione

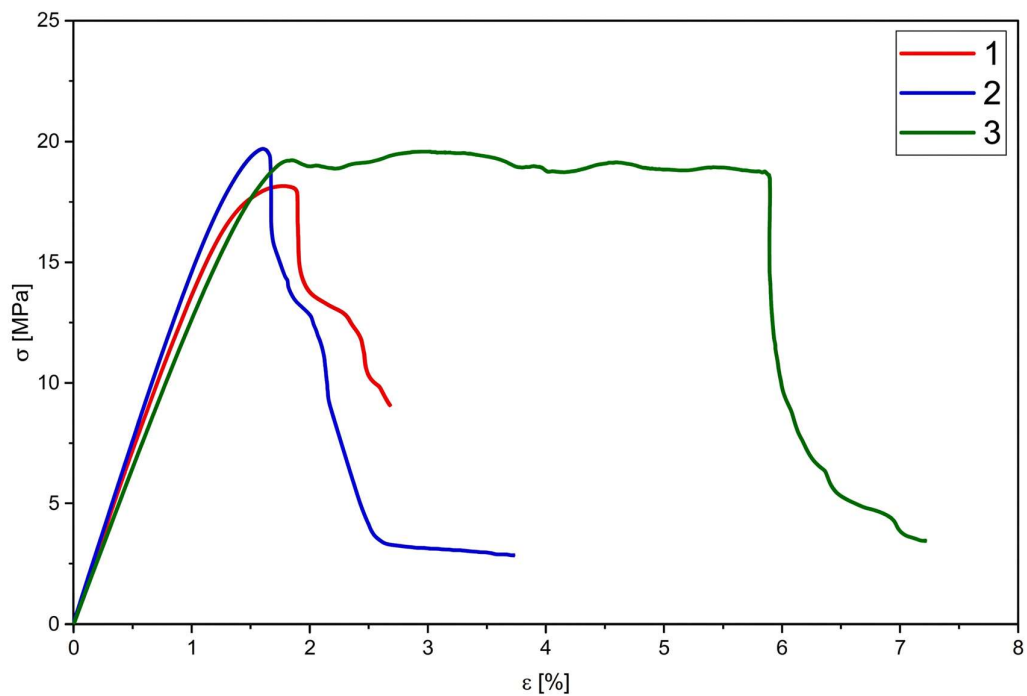


Figure 3.27: Grafici sforzo deformazione PLA - TPU

Come si può osservare dalle immagini riportate di seguito, la modalità di cedimento di questa configurazione è differente rispetto alla Configurazione A. Durante la prova, i layer di PLA raggiungono la loro resistenza limite e si fratturano, determinando il primo crollo del carico visibile nel grafico. Tuttavia, il test non è stato interrotto immediatamente dopo la rottura della fase in PLA; la sollecitazione è stata infatti prolungata per analizzare il comportamento residuo della struttura.

Questo ha generato il plateau orizzontale visibile nella terza curva sperimentale: i layer di TPU, grazie alla loro elevata elasticità, sono rimasti intatti e hanno continuato a deformarsi progressivamente anche dopo il collasso del PLA, come documentato nella foto seguente. La prova è stata infine interrotta prima del cedimento completo del TPU in quanto l'attuatore della macchina di trazione ha raggiunto il proprio finecorsa geometrico. La deformazione a rottura del materiale elastomerico non costituisce in ogni caso un dato di interesse ai fini della presente ricerca.

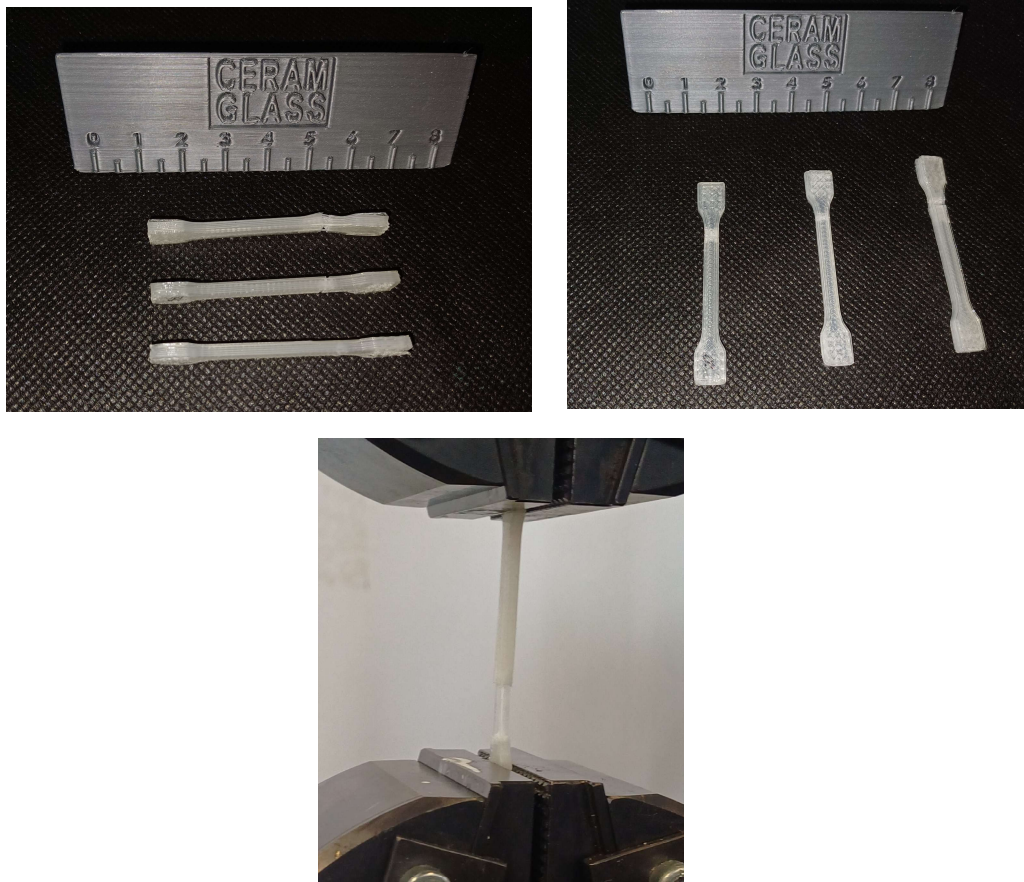


Figure 3.28: Provini PLA - TPU post prova

Capitolo 4

Prove a Compressione: Caratterizzazione Statica e Dinamica

4.1 Introduzione

Dopo la caratterizzazione a trazione descritta nel Capitolo 3, la fase successiva della sperimentazione prevede l'esecuzione di prove a compressione sui provini bimateriale PLA-TPU. Questo capitolo è dedicato alla descrizione e all'analisi di due tipologie di prova: la compressione statica, condotta a velocità di deformazione quasi-statica, e la compressione dinamica, eseguita a velocità significativamente più elevate per simulare condizioni di impatto.

Le prove a compressione rivestono un ruolo centrale in questa ricerca e rappresentano forse la tipologia di caratterizzazione più rilevante tra quelle condotte. La ragione è diretta: l'obiettivo finale del progetto è la realizzazione di una struttura ausettica bimateriale destinata all'assorbimento di energia in caso di impatto – un paraurti o un elemento protettivo che deve essere in grado di dissipare energia meccanica in modo controllato durante una collisione. In questo contesto, la risposta a compressione del materiale – e in particolare la sua capacità di assorbire energia sotto carico assiale – è molto più rappresentativa delle condizioni operative reali rispetto a una prova di trazione.

La prova di compressione statica fornisce il comportamento del materiale a basse velocità di deformazione, restituendo parametri fondamentali come il modulo di compressione, il carico di plateau e l'energia specifica assorbita. La prova di compressione dinamica, condotta a velocità di impatto controllata, consente invece di valutare come le proprietà del composito bimateriale si modifichino al variare della velocità di sollecitazione, un aspetto critico per applicazioni in cui l'evento di carico è impulsivo e di breve durata, come avviene in un urto veicolare.

Il confronto tra i risultati statici e dinamici permetterà di valutare la sensibilità alla velocità di deformazione del sistema bimateriale PLA-TPU e di determinare se le

prestazioni di assorbimento energetico del materiale si mantengono adeguate anche nelle condizioni più severe tipiche di un impatto reale.

4.2 Prima Geometria per le Prove Statiche: Cubo 20×20×20 mm e Cubo 10×10×10 mm

Il primo modello geometrico realizzato per le prove a compressione è un cubo di 20 mm di lato e 20 mm di altezza, modellato in Creo Parametric. La geometria cubica è stata scelta per la sua semplicità e per la facilità di confronto tra le diverse configurazioni di materiale: la sezione trasversale costante garantisce una distribuzione uniforme del carico durante la compressione e semplifica il calcolo delle grandezze meccaniche di interesse.

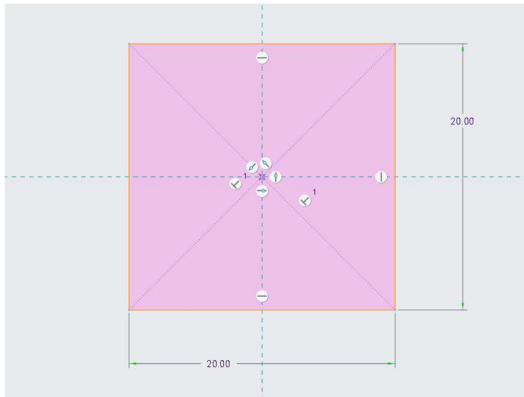


Figure 4.1: 2D sketch

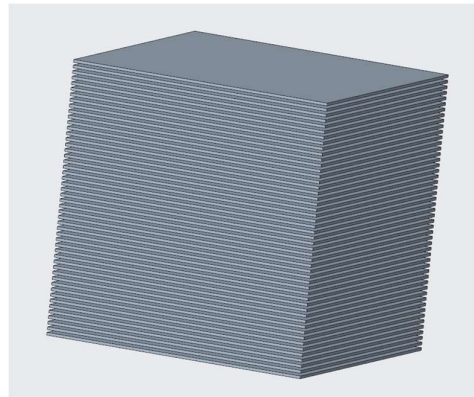


Figure 4.2: modello 3D (una metà)

Sono state stampate quattro serie di provini, ciascuna composta da tre campioni, per un totale di dodici provini:

Serie	Configurazione	Materiale / Struttura dei layer	N° provini
1	Monomateriale	PLA	3
2	Monomateriale	TPU	3
3	Bimateriale – layer 0.2 mm	PLA e TPU alternati ogni 0.2 mm (1 layer per materiale)	3
4	Bimateriale – layer 0.4 mm	PLA e TPU alternati ogni 0.4 mm	3
5	Bimateriale – layer 1.6 mm	PLA e TPU alternati ogni 1.6 mm	3

Table 4.1: Serie di provini cubici 20×20×20 mm stampati

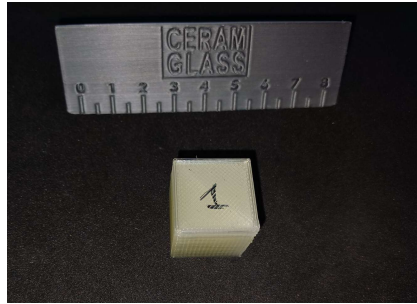


Figure 4.3: Cubo di PLA

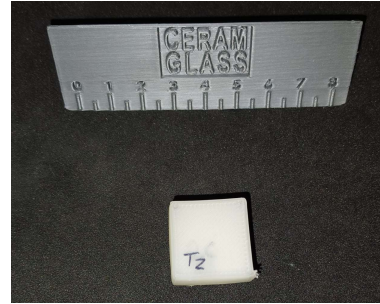


Figure 4.4: Cubo di TPU



Figure 4.5: Cubi PLA - TPU 0.2

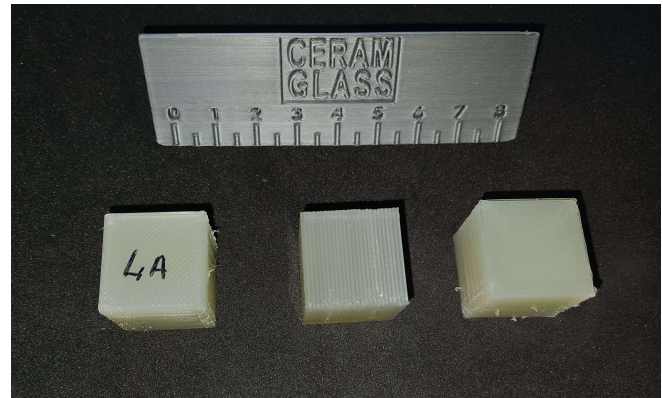


Figure 4.6: Cubi PLA -TPU 0.4



Figure 4.7: Cubi PLA - TPU 1.6

Nelle configurazioni bimateriale, i layer alternati di PLA e TPU sono orientati perpendicolarmente alla direzione di compressione, in modo che il carico agisca trasversalmente all'interfaccia tra i due materiali. La serie con layer da 0.2 mm prevede un'alternanza al livello del singolo layer di stampa, ovvero ogni strato depositato cambia materiale; la serie con layer da 1.6 mm raggruppa invece otto layer consecutivi dello

stesso materiale prima di passare al successivo, ottenendo pacchetti più spessi e una struttura a sandwich più marcata.

Come verrà descritto nel capitolo successivo, le prove di compressione condotte su questa geometria non hanno fornito risultati soddisfacenti: il macchinario disponibile non era in grado di esercitare una forza sufficiente a deformare e rompere i provini nelle condizioni di prova adottate. La sezione di 20×20 mm richiedeva un carico troppo elevato per la portata della macchina, rendendo impossibile raggiungere livelli di deformazione significativi e ottenere una curva sforzo–deformazione completa.

Si è quindi deciso di ridurre le dimensioni del cubo della metà, passando a una geometria di 10 mm di lato e 10 mm di altezza. Riducendo la sezione trasversale di un fattore quattro, il carico necessario per raggiungere la stessa pressione di compressione si riduce proporzionalmente, rientrando nella capacità operativa del macchinario. Per la geometria ridotta sono state stampate tre serie di provini, ciascuna composta da tre campioni:

Serie	Configurazione	Materiale / Struttura dei layer	N° provini
1	Monomateriale	PLA	6
2	Monomateriale	TPU	6
3	Bimateriale – layer 0.2 mm	PLA e TPU alternati ogni 0.2 mm	6

Table 4.2: Serie di provini cubici 10×10×10 mm stampati per le prove statiche

4.3 Prove di Compressione Statica

Le prove di compressione statica sono state condotte inizialmente mediante la macchina STEP lab UD040 AXIAL – BV200 TORSIONAL, le cui caratteristiche tecniche principali sono riportate nella tabella seguente.

Parametro	Valore
Forza massima [kN]	30
Velocità di prova [mm/min]	1
Frequenza di campionamento [Hz]	50

Table 4.3: Specifiche tecniche della macchina di compressione

4.3.1 Prove sui Cubi 20×20×20 mm

Le prime prove sono state eseguite sui provini cubici di 20×20×20 mm descritti nel sottocapitolo 4.2. Come anticipato, le prove non sono state portate a termine: la forza massima erogabile dalla macchina si è rivelata insufficiente a deformare i provini in modo significativo, in particolare quelli monomateriale in PLA, che presentano una rigidità elevata. La curva sforzo–deformazione registrata risulta quindi incompleta e non rappresentativa del comportamento a collasso del materiale.

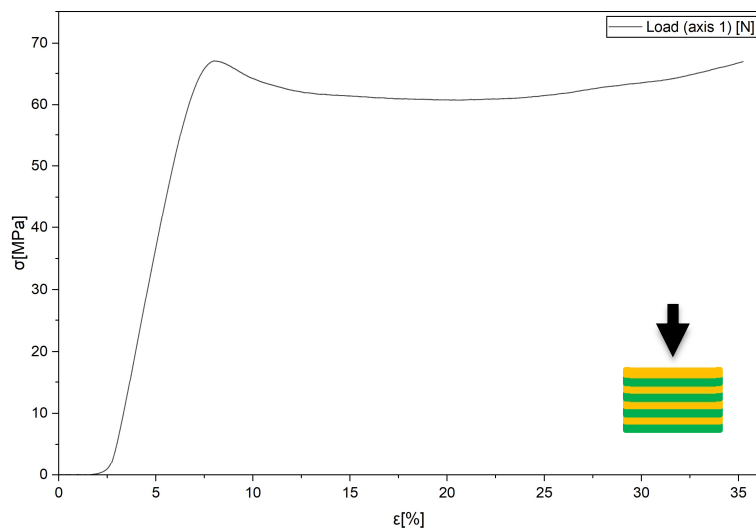


Figure 4.8: Grafico e relativo provino di PLA della prova a compressione statica



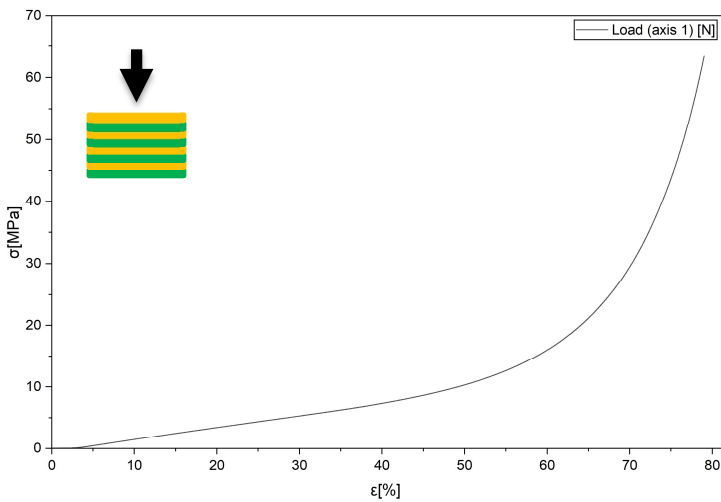


Figure 4.9: Grafico e relativo provino di TPU della prova a compressione statica

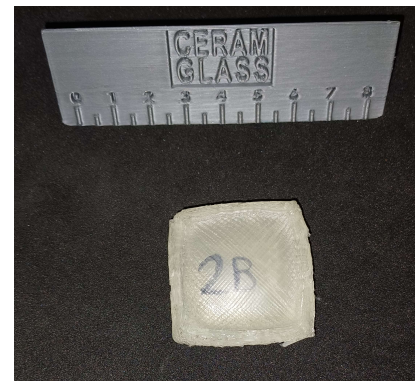
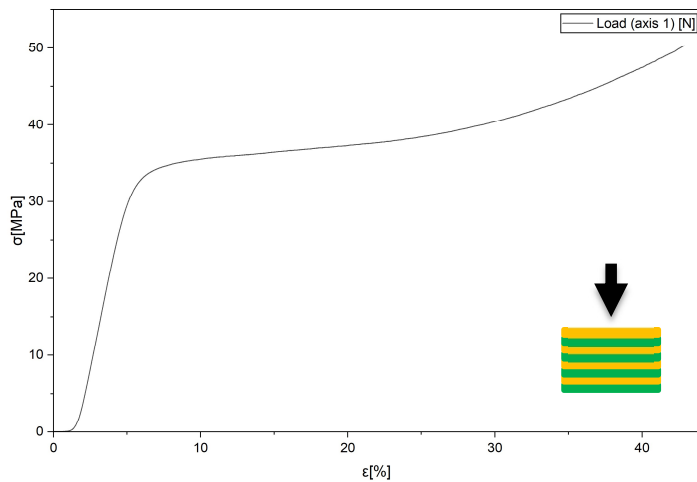


Figure 4.10: Grafico e relativo provino di PLA - TPU 0.2 della prova di compressione statica

Sebbene le presenti prove di compressione statica risultino incomplete a causa dell'impossibilità di raggiungere la massima deformazione dei provini, è possibile delineare un chiaro andamento nel comportamento dei materiali. In condizioni statiche, il PLA mostra la maggiore capacità di assorbimento energetico, mentre il TPU presenta i valori più contenuti; il provino a strati alternati evidenzia una risposta cinematica di tipo

misto, senza tuttavia mostrare alcun vantaggio effettivo in termini di energia assorbita rispetto alla configurazione in puro PLA.

4.3.2 Cambio Macchina e Limitazioni per le Prove Dinamiche

A fronte dell'insufficienza della macchina utilizzata fino ad ora, si è optato per l'utilizzo di un secondo macchinario, denominato MFL SYSTEM PRUF UND MESS, dotato di una maggiore capacità di forza. Le specifiche tecniche di questa macchina sono riportate nella tabella seguente.

Parametro	Valore
Forza massima [kN]	250
Velocità di prova [mm/min]	1
Frequenza di campionamento [Hz]	50

Table 4.4: Specifiche tecniche della macchina di compressione

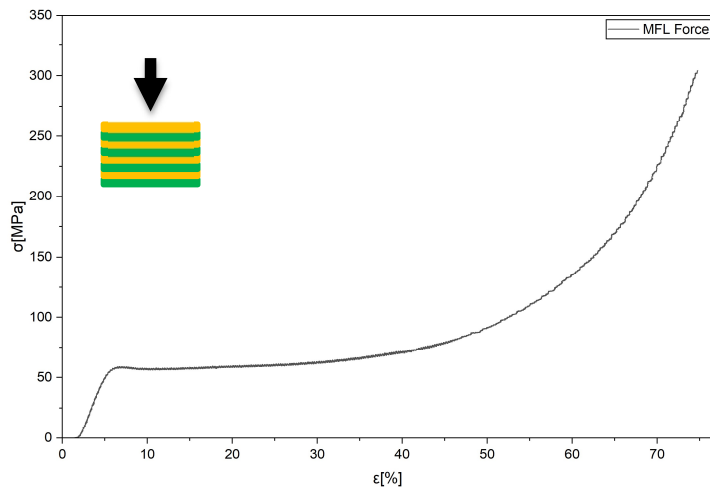


Figure 4.11: Grafico e relativo provino di PLA di compressione statica con il secondo macchinario

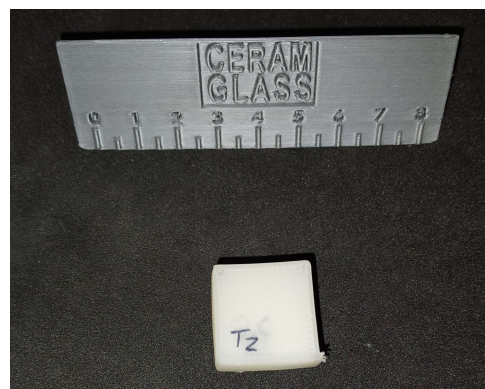
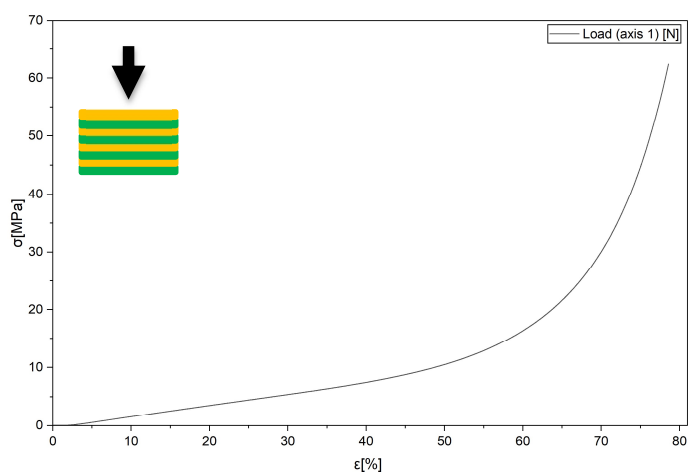


Figure 4.12: Grafico e relativo provino di TPU di compressione statica con il secondo macchinario

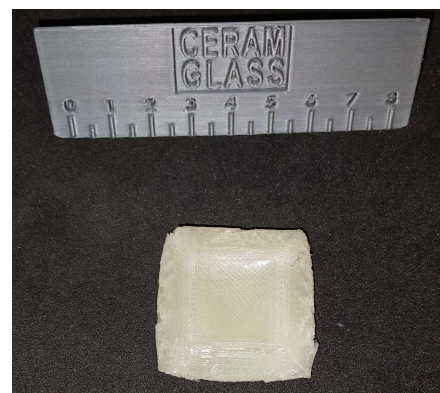
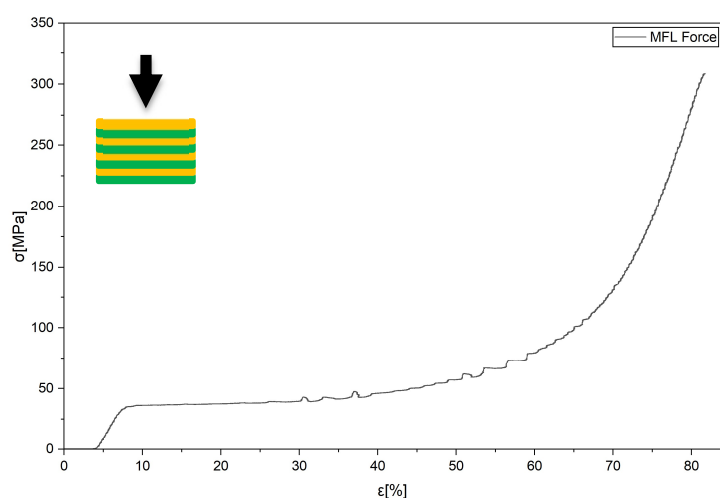


Figure 4.13: Grafico e relativo provino di PLA - TPU 0.2 di compressione statica con il secondo macchinario

A differenza delle precedenti sessioni, questa nuova serie di prove di compressione statica è stata eseguita impiegando un macchinario in grado di raggiungere la massima deformazione dei provini, consentendo così il completamento dei test. I risultati ottenuti confermano integralmente l'andamento riscontrato in precedenza: in condizioni statiche, il PLA si attesta come il materiale con il maggiore assorbimento energetico, il TPU mostra la capacità inferiore, mentre la configurazione a strati alternati presenta una risposta cinematica intermedia, confermando l'assenza di un reale vantaggio incrementale rispetto al solo PLA in condizioni statiche.

La nuova macchina come detto consente di esercitare una forza sufficiente per le prove statiche, ma presenta un limite significativo: non è in grado di operare alle velocità di deformazione elevate richieste dalle prove dinamiche. Questa limitazione ha imposto, come già descritto nel sottocapitolo 4.2, di adottare provini di dimensioni ridotte (10×10×10 mm) per la campagna di prove dinamiche, che saranno condotte con un macchinario dedicato. Per garantire la confrontabilità dei risultati tra prove statiche e dinamiche, si è scelto di ripetere le prove statiche anch'esse sui provini di formato ridotto, come descritto nel sottocapitolo seguente.

4.3.3 Prove sui Cubi 10×10×10 mm

Sono stati sottoposti a prova di compressione statica con la macchina STEP lab UD040 AXIAL – BV200 TORSIONAL, i provini cubici di 10×10×10 mm nelle tre configurazioni: PLA monomateriale, TPU monomateriale e bimateriale PLA–TPU con layer alternati da 0.2 mm e da 0.4 mm. Per ciascuna configurazione sono stati testati sei provini, per un totale di ventiquattro prove. I campioni sono stati suddivisi in due gruppi di tre in base all'orientazione del piano dei layer rispetto alla direzione di applicazione del carico: nel primo gruppo il piano dei layer è parallelo alla pressa, nel secondo gruppo è perpendicolare. Questo confronto consente di valutare l'anisotropia meccanica del materiale stampato e l'influenza dell'orientazione dell'interfaccia bimateriale sulla risposta a compressione.

Parametro	Valore
Forza massima [kN]	30
Velocità di prova [mm/min]	1
Frequenza di campionamento [Hz]	50

Table 4.5: Specifiche tecniche della macchina di compressione

4.3.4 Risultati delle Prove di Compressione Statica

Di seguito vengono analizzati i risultati delle prove di compressione statica condotte sui provini cubici 10×10×10 mm nelle diverse configurazioni e orientazioni. Il confronto tra le curve sforzo–deformazione ottenute consente di evidenziare le differenze di comportamento tra i materiali e di valutare l'influenza dell'orientazione dei layer sulla risposta meccanica. I provini monomateriale di PLA sono quelli che hanno fatto registrare

i valori più elevati di energia assorbita durante la compressione. La curva sforzo-deformazione mostra una fase elastica seguita da un picco di carico ben definito, dopo il quale il materiale subisce un danneggiamento progressivo e significativo. Come si può osservare dalle immagini dei provini dopo la prova, i campioni presentano fratture e deformazioni marcate, indicative di un cedimento fragile tipico del PLA. La differenza di comportamento tra l'orientazione parallela e quella perpendicolare è trascurabile per questa configurazione.

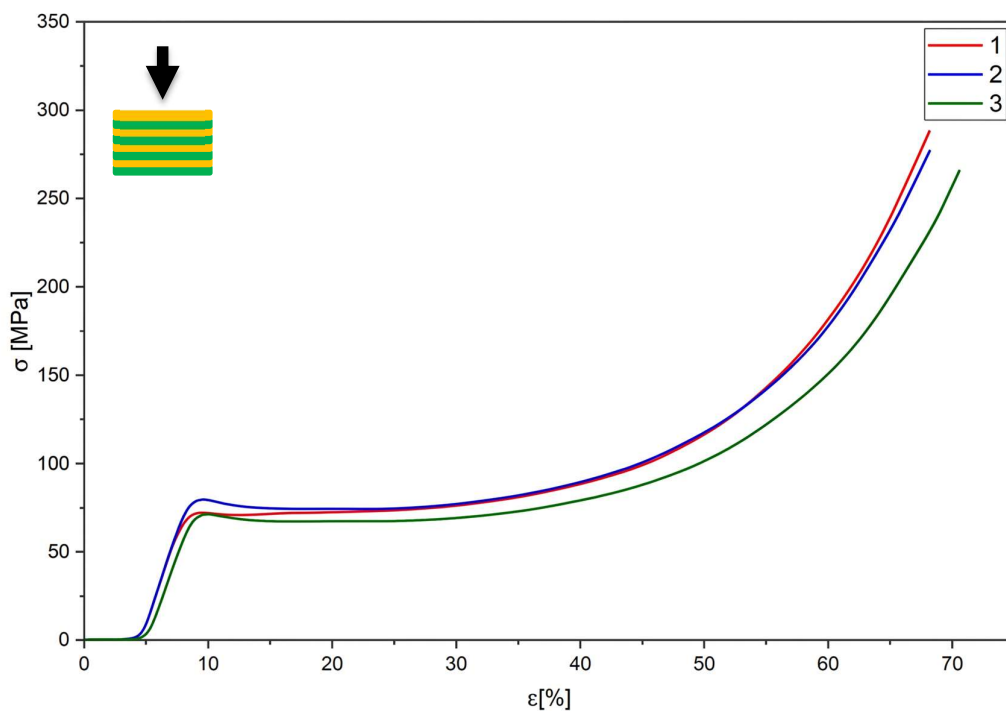


Figure 4.14: Curve sforzo - deformazione provini PLA orientamento parallelo



Figure 4.15: Provini PLA post prova

PLA PARALLELO	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	71.89	0.94	24.21
2	79.60	0.84	23.32
3	71.40	0.71	22.71

Table 4.6: Risultati della prova a compressione PLA parallelo

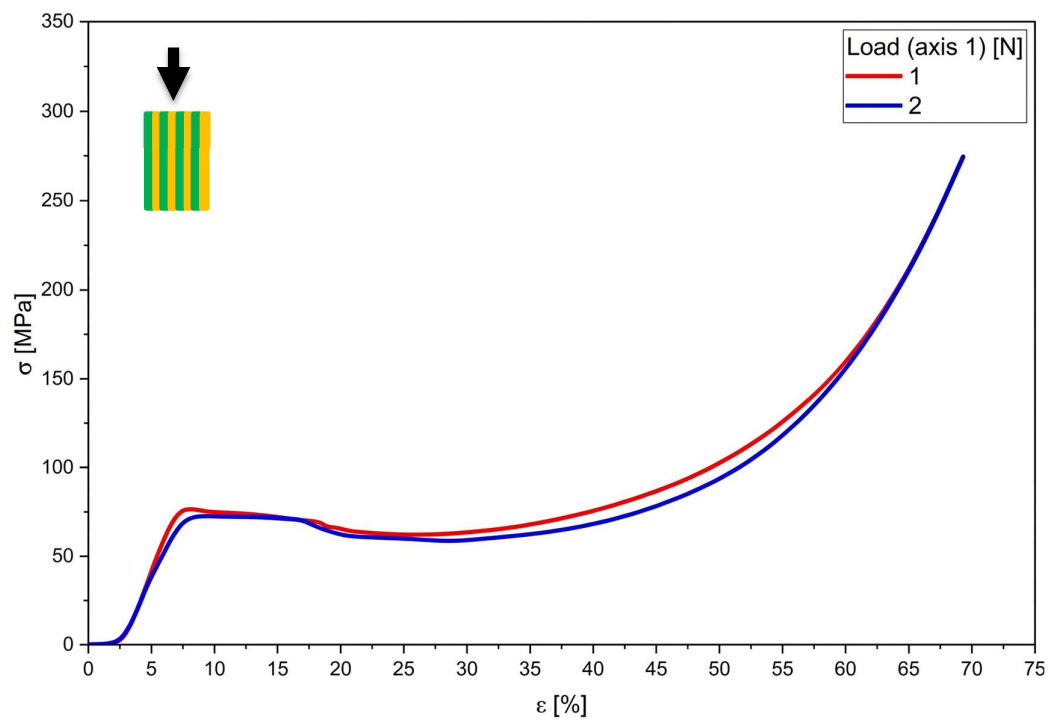


Figure 4.16: Curve sforzo - deformazione provini PLA orientamento perpendicolare

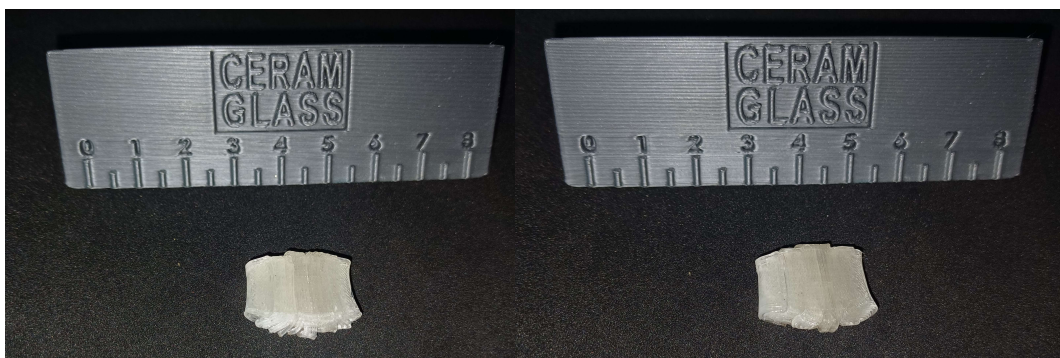


Figure 4.17: Provini PLA post prova

Il terzo provino è stato escluso dall'analisi in quanto una calibrazione non corretta dei settaggi della macchina non ha consentito di rilevare dati attendibili o qualitativamente soddisfacenti per la caratterizzazione del materiale. L'energia specifica assorbita (SEA) è stata determinata quantificando l'area sottesa alla curva forza-spostamento mediante l'integrazione numerica del diagramma sperimentale, dividendo successivamente il valore energetico ottenuto per la massa complessiva del rispettivo campione.

PLA PERPENDICOLARE	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	75.31	0.79	23.42
2	72.19	0.86	21.48
3	-	-	-

Table 4.7: Risultati della prova a compressione PLA perpendicolare

I provini monomateriale di TPU mostrano un comportamento opposto: l'energia assorbita è nettamente inferiore rispetto al PLA e la deformazione raggiunta è molto elevata, coerentemente con la natura elastomerica del materiale. La curva sforzo-deformazione è priva di picchi netti e presenta un andamento più morbido e progressivo, tipico di un elastomero. I provini non mostrano danneggiamento strutturale visibile dopo la prova, pur avendo subito grandi deformazioni. Anche in questo caso la differenza tra le due orientazioni dei layer – parallela e perpendicolare alla pressa – risulta minima, confermando l'isotropia quasi-totale del TPU nelle condizioni di stampa adottate.

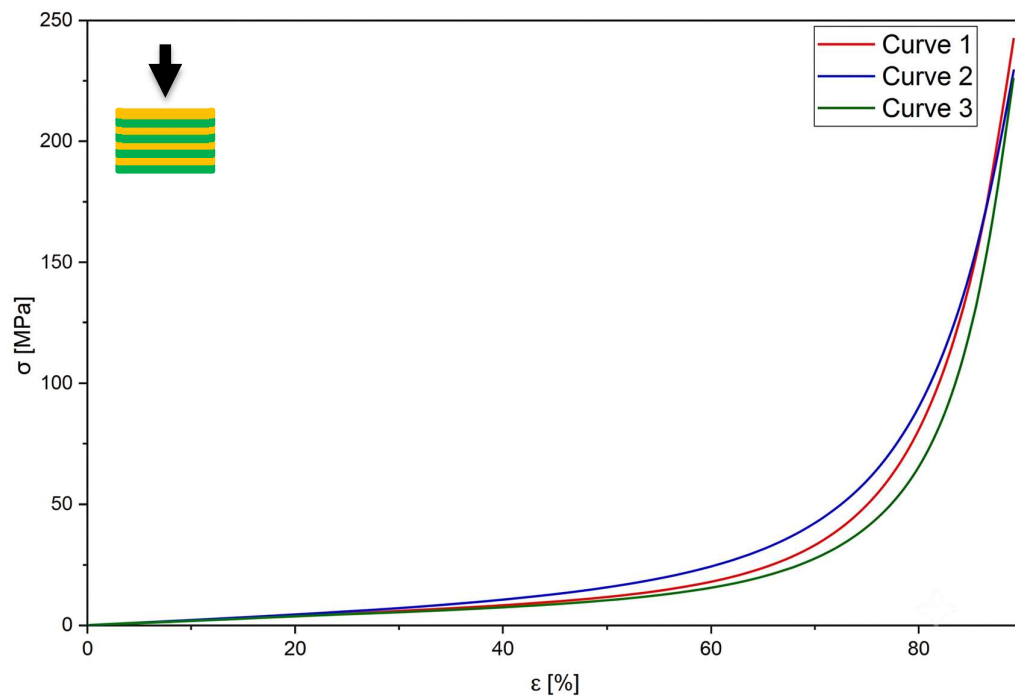


Figure 4.18: Curve sforzo - deformazione provini TPU orientamento parallelo

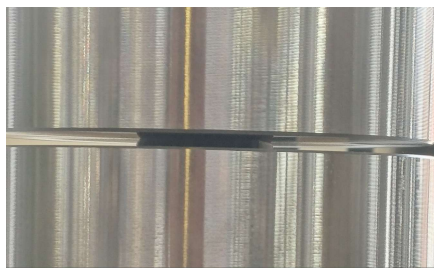


Figure 4.19: Provino di TPU durante la prova



Figure 4.20: Provino di TPU dopo la prova

TPU PARALLELO	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	22.15	0.034	5.35
2	25.26	0.038	5.52
3	23.15	0.035	4.86

Table 4.8: Risultati della prova a compressione TPU parallelo

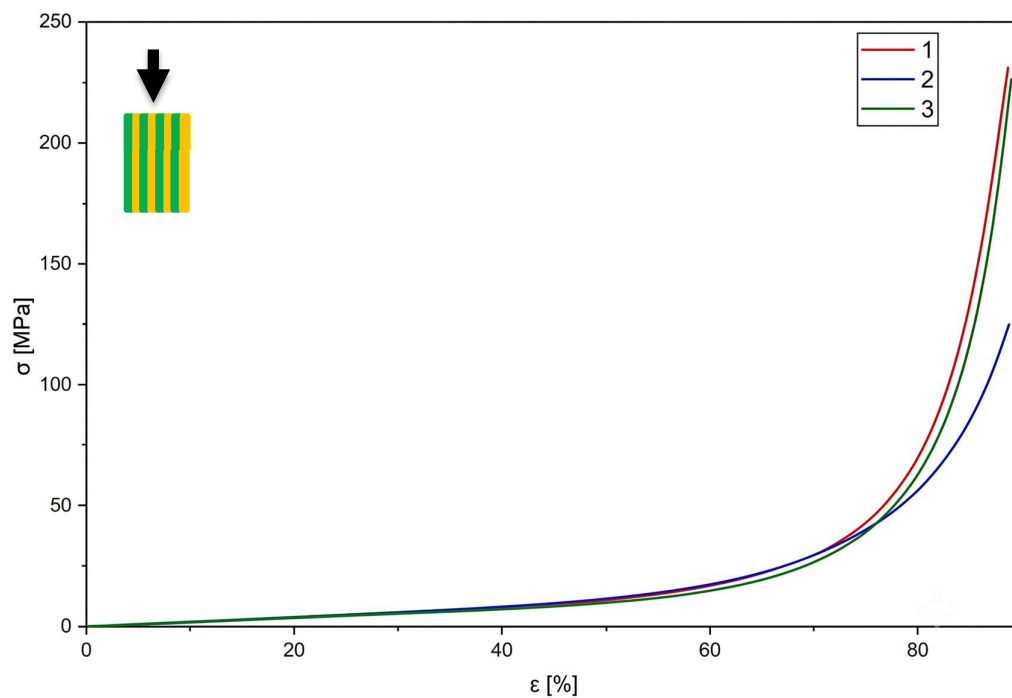


Figure 4.21: Curve sforzo - deformazione provini TPU orientamento perpendicolare

TPU PERPENDICOLARE	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	22.35	0.033	4.49
2	23.00	0.036	4.38
3	21.21	0.035	4.50

Table 4.9: Risultati della prova a compressione TPU perpendicolare

Le immagini precedenti evidenziano il comportamento marcatamente elastico dei campioni in TPU, caratterizzati da grandi deformazioni e da un completo ripristino della forma iniziale una volta rimosso il carico. Di contro, la minima forza resistente sviluppata durante la compressione comporta un contributo trascurabile in termini di energia dissipata o assorbita.

I provini bimateriali con i layer perpendicolari alla direzione di compressione mostrano un calo drastico dell'energia assorbita rispetto alle configurazioni monomateriale. Il meccanismo di cedimento dominante è la delaminazione all'interfaccia tra i layer di PLA e quelli di TPU: poiché il carico agisce direttamente sulla direzione normale all'interfaccia, le tensioni di distacco vengono massimizzate e i layer tendono a separarsi prematuramente. Questo fenomeno è chiaramente visibile nelle curve sforzo–deformazione, che presentano un picco iniziale seguito da un calo brusco: il picco

corrisponde al momento in cui i layer iniziano a staccarsi, dopo di che la resistenza del provino cade significativamente. L'energia totale dissipata risulta pertanto molto limitata.

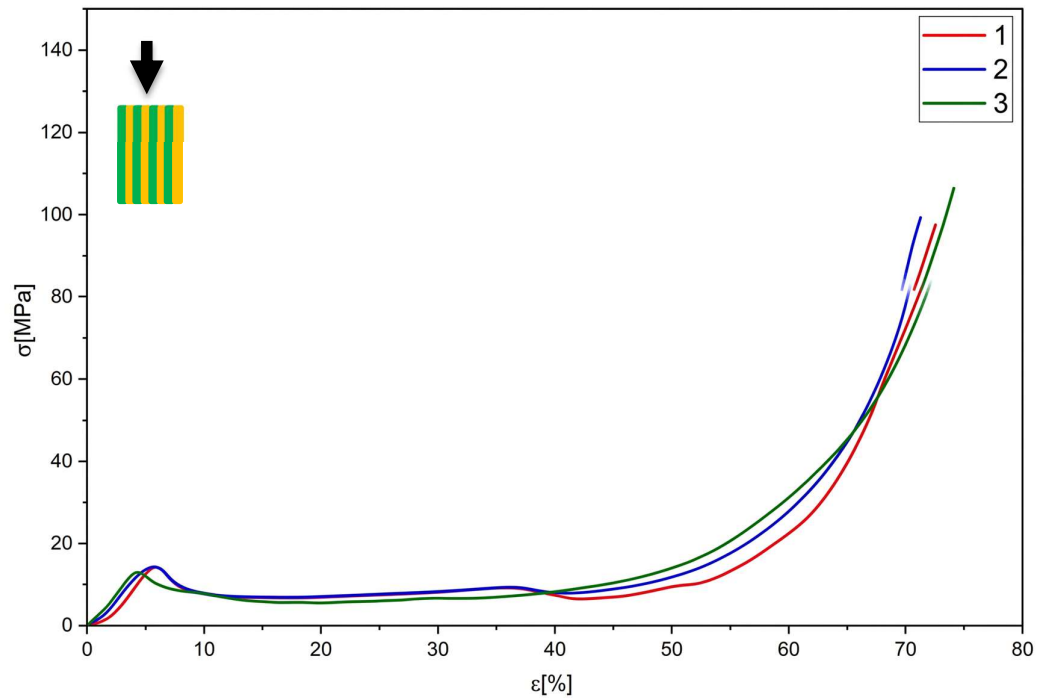


Figure 4.22: Curve sforzo - deformazione provini PLA - TPU 0.2 orientamento perpendicolare



Figure 4.23: Provini PLA - TPU 0.2 orientamento perpendicolare dopo la prova

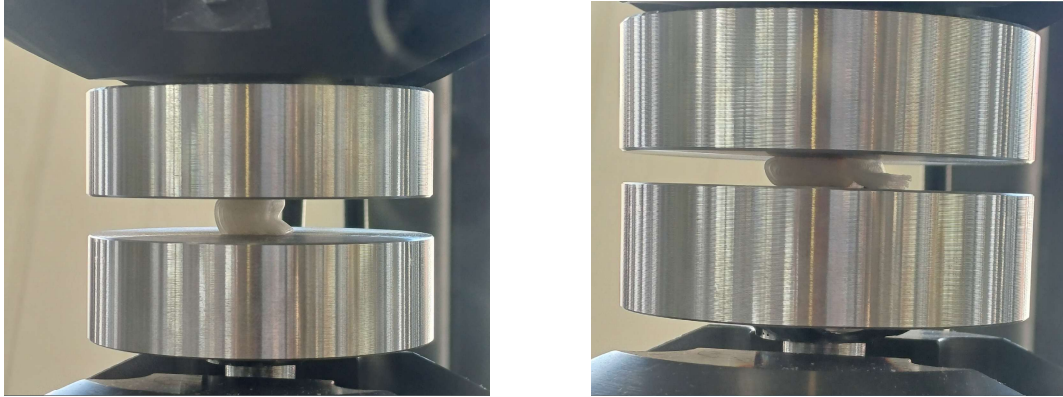


Figure 4.24: Separazione dei layer

PLA - TPU 0.2 PERPENDICOLARE	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	11.74	0.31	2.86
2	14.15	0.25	3.52
3	13.10	0.28	3.66

**Table 4.10: Risultati della prova a compressione PLA – TPU 0.2
perpendicolare**

I provini bimalteriali con i layer paralleli alla direzione di compressione forniscono il risultato più interessante della campagna statica: l'energia assorbita si colloca a un livello intermedio tra quella del PLA monomateriale e quella del TPU monomateriale, con una tendenza più marcata verso il comportamento del TPU. Questa affinità con il TPU è confermata dall'analisi delle curve sforzo–deformazione: analogamente ai provini di TPU puro, le curve dei bimalteriali con layer paralleli sono prive di picchi netti, mostrando un andamento progressivo e graduale senza cedimenti improvvisi. In questa configurazione il carico di compressione agisce parallelamente all'interfaccia tra i layer, eliminando le tensioni di distacco che causano la delaminazione precoce osservata nella configurazione perpendicolare. Il risultato suggerisce che la coppia di materiali PLA–TPU in configurazione parallela è in grado di sfruttare la complementarità meccanica dei due

polimeri in modo efficace, combinando la rigidità del PLA con la capacità di deformazione del TPU senza compromettere l'integrità dell'interfaccia.

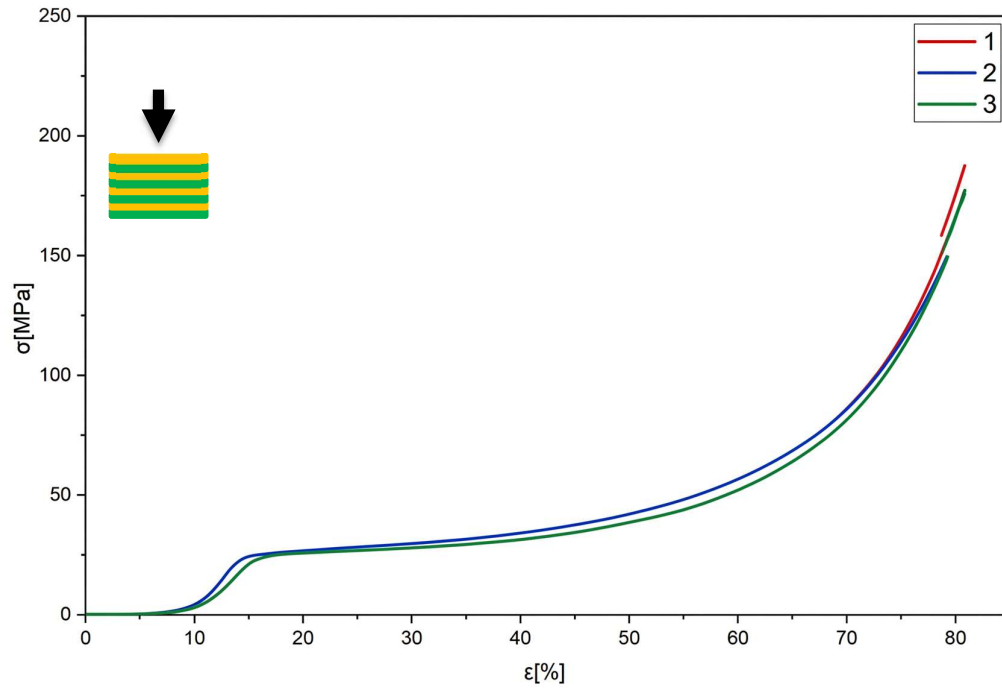


Figure 4.25: Curve sforzo - deformazione provini PLA - TPU 0.2 orientamento parallelo



Figure 4.26: Provini PLA - TPU 0.2 orientamento parallelo dopo la prova

PLA - TPU 0.2 PARALLELO	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	27.78	0.18	12.68
2	27.94	0.17	12.43
3	28.64	0.18	12.35

Table 4.11: Risultati della prova a compressione PLA - TPU 0.2 parallelo

I provini realizzati con strati alternati da 0.4 mm hanno mostrato risultati pressoché sovrapponibili a quelli con spessore da 0.2 mm, non evidenziando variazioni significative nella risposta meccanica complessiva. Di conseguenza, le considerazioni precedentemente esposte riguardo al comportamento cinematico e alla capacità di assorbimento energetico rimangono valide anche per questa seconda configurazione geometrica.

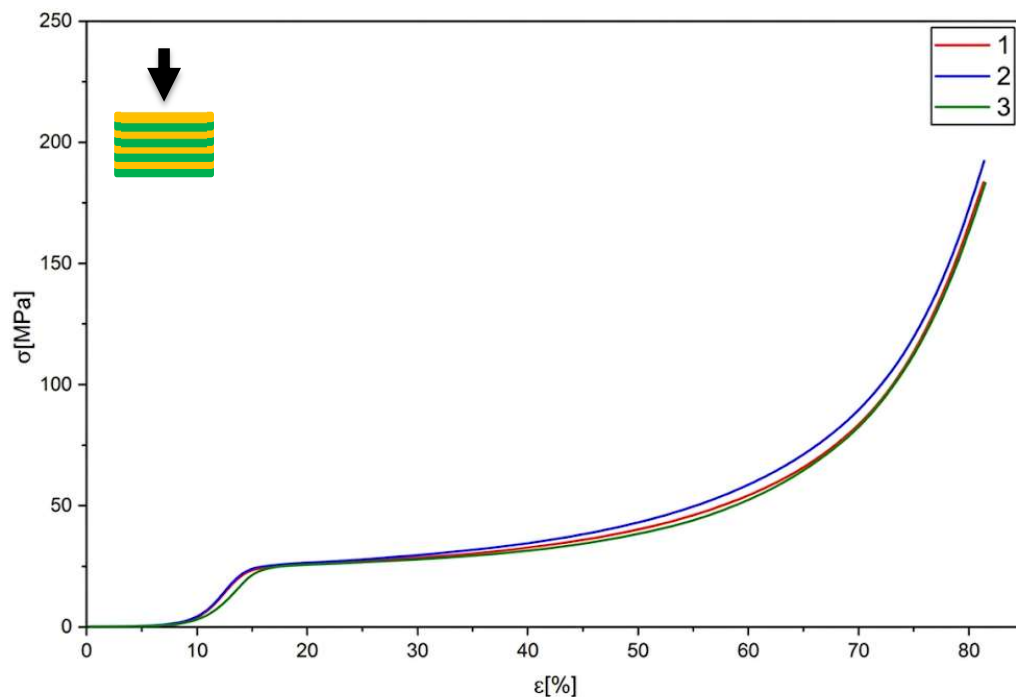


Figure 4.27: Curve sforzo - deformazione provini PLA - TPU 0.4 orientamento parallelo

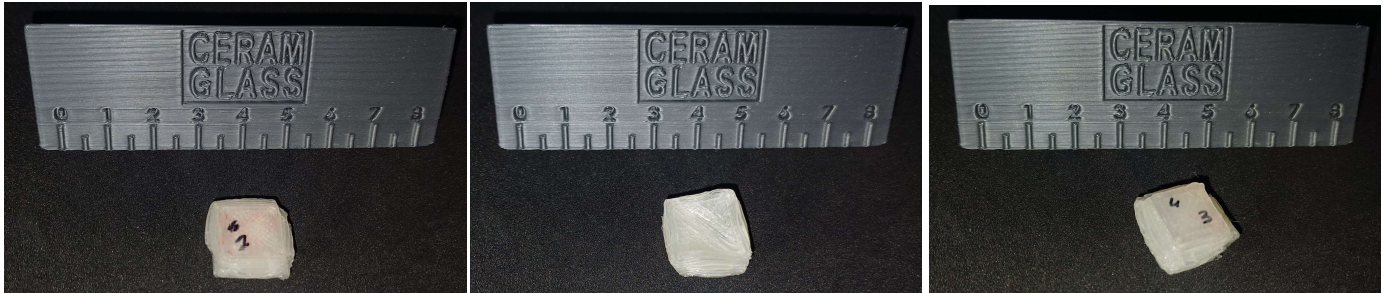


Figure 4.28: Provini PLA - TPU 0.4 orientamento perpendicolare dopo la prova

PLA - TPU 0.4 PARALLELO	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [J/g]
1	27.57	0.15	11.87
2	25.98	0.15	11.87
3	25.84	0.14	11.11

Table 4.12: Risultati della prova a compressione PLA - TPU 0.4 parallelo

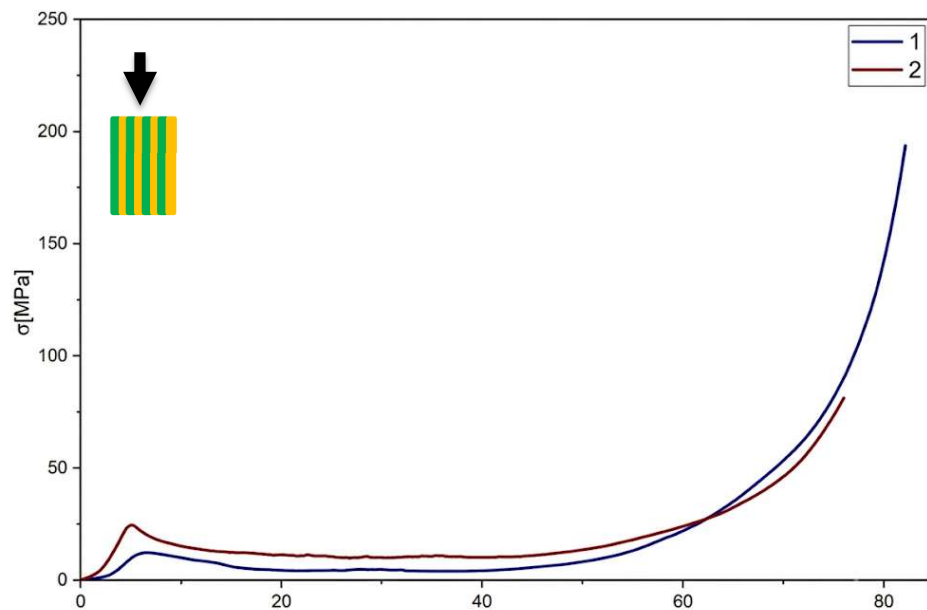


Figure 4.29: Curve sforzo - deformazione provini PLA - TPU 0.4 orientamento perpendicolare

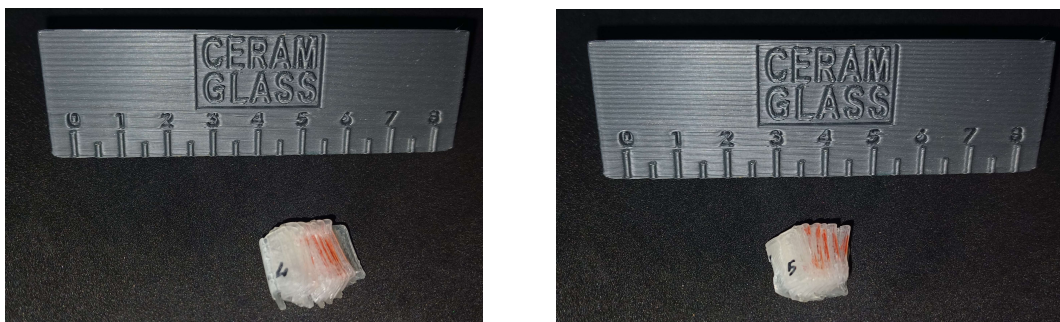


Figure 4.30: Provini PLA - TPU 0.4 orientamento perpendicolare dopo la prova

PLA - TPU 0.4 PERPENDICOLARE	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	12.27	0.21	3.12
2	19.87	0.32	4.02
3	-	-	-

Table 4.13: Risultati della prova a compressione PLA - TPU 0.4 perpendicoale

Si specifica che il terzo campione non è stato sottoposto a caratterizzazione meccanica in quanto il relativo processo di stampa 3D non è andato a buon fine, presentando difetti strutturali macroscopici che ne hanno compromesso l'integrità prima del test.

4.4 Prove di Compressione Dinamica

A seguito delle prove di compressione statica, si è proceduto con la fase di caratterizzazione dinamica dei provini. Per le prime prove dinamiche sono stati utilizzati provini di PLA monomateriale con le medesime dimensioni adottate nelle prove statiche, ovvero cubi di $10 \times 10 \times 10$ mm.

Le prove di compressione statica sono state condotte inizialmente mediante la macchina STEP lab UD040 AXIAL – BV200 TORSIONAL, le cui caratteristiche tecniche principali sono riportate nella tabella seguente.

Parametro	Valore
Forza massima [kN]	30
Velocità di prova [m/s]	1
Frequenza di campionamento [Hz]	4000

Table 4.14: Specifiche tecniche della macchina di compressione

Durante i test è emerso un problema di natura meccanica: la macchina non riusciva a colpire il provino alla velocità massima disponibile. Come si può osservare dal grafico riportato di seguito, la curva di velocità registrata durante l'impatto risulta significativamente inferiore al valore nominale impostato, indicando che il martello non aveva ancora raggiunto la velocità di picco nel momento del contatto con il provino.

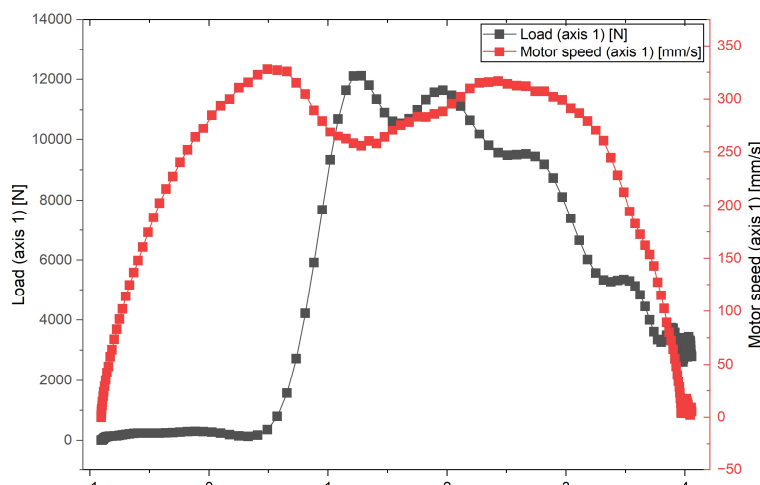


Figure 4.31: Prima prova a compressione dinamica



Figure 4.32: Provino dopo la prima prova

Come evidenziato dal grafico, la velocità di impatto registrata si attesta a soli 300 mm/s a fronte del valore nominale programmato di 1 m/s. L'andamento cinematico mostra come la velocità massima non riesca in alcun punto a raggiungere il target impostato, confermando che l'attuatore della macchina non dispone di una corsa sufficiente a completare la fase di accelerazione.

Per risolvere il problema è stato in primo luogo tentato di allungare la corsa della macchina di 20 mm, in modo da consentire al martello di accelerare su un tratto maggiore prima del contatto. Questo tentativo non ha tuttavia prodotto risultati positivi: la causa risiede nell'altezza ridotta del provino (10 mm), che non lascia alla macchina il tempo sufficiente per decelerare in modo controllato al termine dell'impatto. Tale condizione

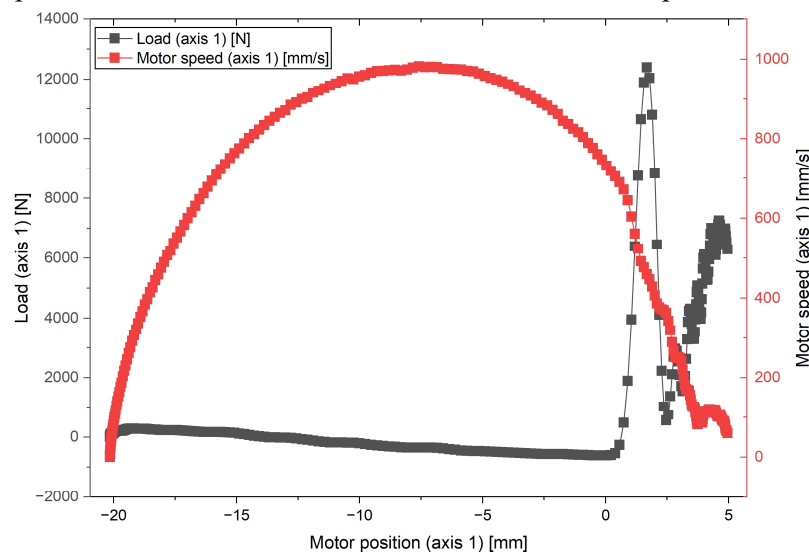


Figure 4.33: Seconda prova a compressione dinamica

avrebbe esposto la macchina a rischi di danneggiamento, rendendo impraticabile l'utilizzo di una corsa estesa con provini di questa altezza.

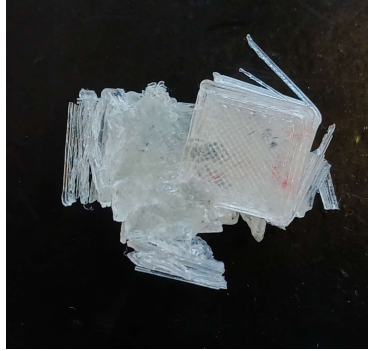


Figure 4.34: Provino dopo la prova

Al fine di verificare in modo rapido se l'aumento dell'altezza del provino fosse sufficiente a risolvere il problema, è stato condotto un test preliminare incollando due cubi tra loro, ottenendo così un campione di dimensioni $10 \times 10 \times 20$ mm. Questa soluzione, seppur di natura prettamente esplorativa, ha permesso di valutare la fattibilità dell'approccio senza dover riprogettare immediatamente la geometria dei provini.

Il test con i due cubi incollati ha dato esito positivo: la macchina ha raggiunto la velocità massima disponibile prima del contatto, confermando che l'altezza del campione era il fattore limitante. I risultati ottenuti hanno quindi indicato la necessità di riprogettare la geometria per le prove dinamiche, incrementando l'altezza dei provini al fine di garantire condizioni di prova corrette e ripetibili.

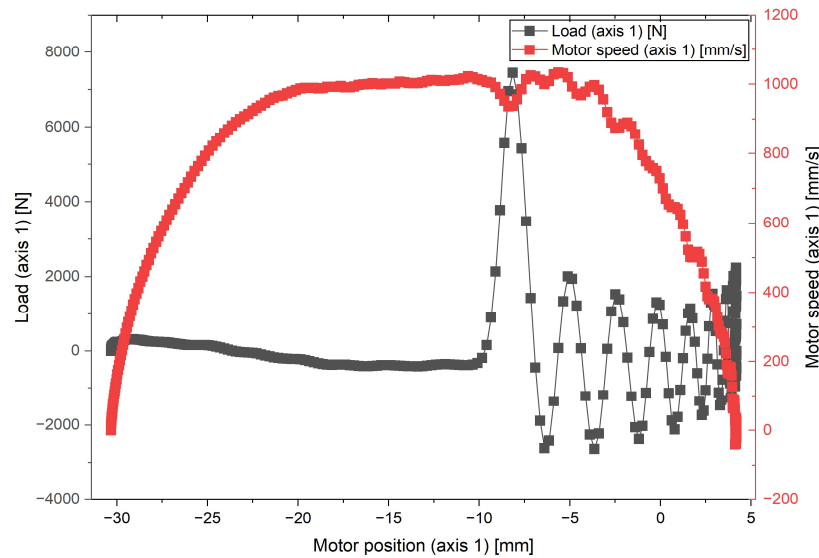


Figure 4.35: Prova a compressione dinamica con due cubi

4.4.1 Riprogettazione della Geometria per le Prove Dinamiche

I risultati del test preliminare descritto nel sottocapitolo precedente hanno dimostrato chiaramente che la geometria cubica $10 \times 10 \times 10$ mm non era compatibile con i requisiti cinematici della macchina di prova dinamica. La limitazione principale è riconducibile all'altezza eccessivamente ridotta del provino, che impedisce al sistema di raggiungere la velocità di impatto desiderata prima del contatto e, al contempo, non consente una decelerazione sicura del martello al termine della prova. È stato pertanto necessario riprogettare la geometria dei provini in modo da soddisfare entrambi i vincoli.

La nuova geometria è stata definita tenendo conto di due criteri fondamentali. Il primo riguarda la corsa disponibile nella macchina: l'altezza del provino deve essere sufficientemente elevata da permettere al martello di accelerare fino alla velocità massima prima dell'impatto, mantenendo al contempo un margine di frenata adeguato al termine della corsa utile. Il secondo criterio riguarda la coerenza con le prove statiche: si è scelto di mantenere invariata la sezione trasversale (10×10 mm) per poter confrontare direttamente i risultati dinamici con quelli statici, limitando le variazioni al solo parametro dell'altezza.

Sulla base di queste considerazioni è stato definito un nuovo provino con sezione 10×10 mm e altezza aumentata a 20 mm, in linea con quanto verificato empiricamente attraverso il test con i due cubi incollati. Il modello tridimensionale è stato realizzato in ambiente Creo Parametric, adottando la medesima procedura di modellazione utilizzata per le geometrie precedenti. Sono state previste tre configurazioni analoghe a quelle delle prove statiche: PLA monomateriale, TPU monomateriale e bimateriale PLA-TPU con layer alternati di spessore 0,2 mm.

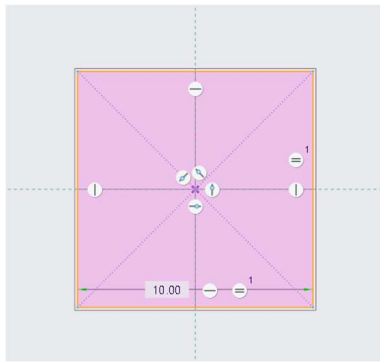
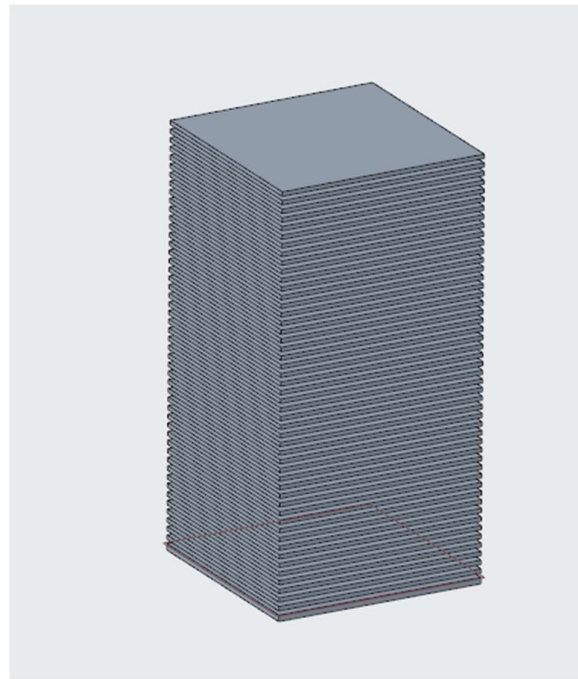


Figure 4.36: Geometria del provino per le prove a compressione dinamica



I provini sono stati stampati tramite tecnologia MEX bimateriale con le stesse impostazioni adottate nelle prove statiche, al fine di garantire la massima comparabilità tra le serie di dati. Per ciascuna configurazione sono stati prodotti nove esemplari: nove provini in PLA monomateriale, nove in TPU monomateriale e nove bimateriali PLA-TPU con layer alternati di spessore 0,2 mm. La scelta di realizzare nove campioni per ogni configurazione è motivata dalla necessità di eseguire le prove a velocità di impatto differenti, in modo da caratterizzare la risposta del materiale su un ampio intervallo di condizioni di carico dinamico.

4.4.2 Misura della Densità dei Provini

Prima di procedere con le prove di compressione dinamica, è stata misurata la densità dei provini stampati, allo scopo di verificare la qualità della stampa e di rilevare l'eventuale presenza di porosità interne. La caratterizzazione della densità riveste particolare importanza per i provini destinati alle prove dinamiche, poiché eventuali difetti di compattazione del materiale possono influenzare in modo significativo la risposta all'impatto e la ripetibilità dei risultati.

La densità è stata determinata con il metodo di Archimede, basato sulla pesata idrostatica mediante bilancia Mettler Toledo: il campione viene pesato prima in aria e poi immerso in acqua distillata, e la densità è calcolata secondo la seguente formula:

$$\rho = \frac{m_{aria}}{m_{aria} - m_{acqua}} * (\rho_{acqua} - \rho_{aria}) + \rho_{aria}$$

Il grado di porosità è stato quindi stimato confrontando la densità apparente con quella teorica del materiale, secondo la relazione:

$$P\% = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{th}}\right) * 100$$

Per il calcolo della porosità sono state assunte le densità teoriche dichiarate dal produttore del pellet, pari a 1,24 g/cm³ per il PLA e 1,19 g/cm³ per il TPU. I risultati delle misure sono riportati nelle tabelle seguenti, suddivise per configurazione.

PLA	M_{air} [g]	M_{wt} [g]	ρ [g/cm ³]	P [%]
1	2.5863	0.4973	1.234	0.4838
2	2.5874	0.4942	1.232	0.6452
3	2.5870	0.4890	1.229	0.8871
4	2.5872	0.4961	1.233	0.5645
5	2.5887	0.4910	1.230	0.8065
6	2.5864	0.4917	1.231	0.7258
7	2.5775	0.4902	1.231	0.7258
8	2.5844	0.4892	1.230	0.8065
9	2.5894	0.4899	1.231	0.7258
AV	2.586 ± 0.003	0.492 ± 0.003	1.231 ± 0.001	0.7079 ± 0.119

Table 4.15: Densità provini PLA monomateriale 10×10×20 mm



Figure 4.37: Provini di PLA

TPU	$M_{air} [g]$	$M_{wt} [g]$	$\rho [g/cm^3]$	$P [\%]$
1	2.3876	0.3180	1.150	3.3613
2	2.3890	0.3133	1.147	3.6134
3	2.3886	0.3135	1.148	3.5294
4	2.3610	0.2910	1.137	4.4538
5	2.3671	0.3088	1.147	3.6134
6	2.3757	0.3102	1.147	3.6134
7	2.3466	0.2746	1.129	5.1261
8	2.3693	0.3076	1.146	3.6975
9	2.3533	0.2857	1.135	4.6218
AV	2.371 ± 0.015	0.303 ± 0.014	1.179 ± 0.103	3.949 ± 0.518

Table 4.16: Densità provini TPU monomateriale 10×10×20 mm



Figure 4.38: Provini TPU

PLA – TPU	M_{air} [g]	M_{wt} [g]	ρ [g/cm ³]
1	2.5918	0.4367	1.199
2	2.5232	0.4129	1.192
3	2.5897	0.4245	1.192
4	2.6073	0.4247	1.191
5	2.6310	0.4390	1.197
6	2.5777	0.4239	1.193
7	2.6129	0.4344	1.196
8	2.7255	0.4481	1.193
9	2.7267	0.4417	1.191
AV	2.621 ± 0.063	0.432 ± 0.010	1.194 ± 0.003

Table 4.17: Densità provini bimateriale PLA-TPU 10×10×20 mm



Figure 4.39: Provini PLA - TPU

4.4.3 Esecuzione delle Prove di Compressione Dinamica

Completata la riprogettazione della geometria e la caratterizzazione della densità dei provini, si è proceduto con l'esecuzione delle prove di compressione dinamica. Le prove sono state condotte impiegando la stessa macchina utilizzata per le prove descritte nei capitoli precedenti, ovvero la STEP lab UD040 AXIAL – BV200 TORSIONAL, così da garantire la piena comparabilità tra i risultati ottenuti in regime statico e quelli in regime dinamico.

Le prove sono state eseguite sulle tre configurazioni di provini — PLA monomateriale, TPU monomateriale e bimatereale PLA-TPU con layer alternati di spessore 0,2 mm — sottoponendo ciascun campione a impatto alla velocità di 1 m/s, al fine di caratterizzare la risposta del materiale. Le caratteristiche tecniche principali della macchina sono riassunte nella tabella seguente.

Parametro	Valore
Forza massima [kN]	30
Velocità di prova [m/s]	1
Frequenza di campionamento [Hz]	4000

Table 4.18: Specifiche tecniche della macchina di compressione

I grafici riportati di seguito mostrano le curve ottenute dalle prove di compressione dinamica per ciascuna configurazione di provino, dalle quali sono stati analizzati l'andamento della forza, l'energia assorbita e la modalità di deformazione in regime dinamico.

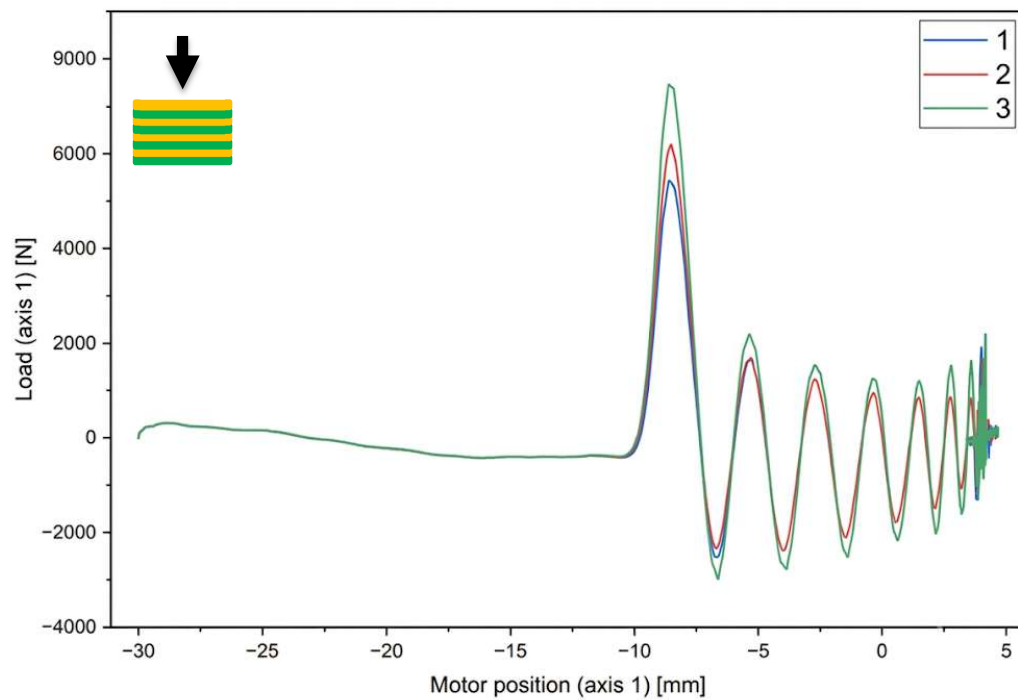


Figure 4.40: Curve forza-spostamento dei provini in PLA monomateriale

PLA	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	52.87	0.84	2.17
2	59.49	0.76	2.74
3	71.03	1.04	2.31

Table 4.19: Risultati della prova a compressione PLA

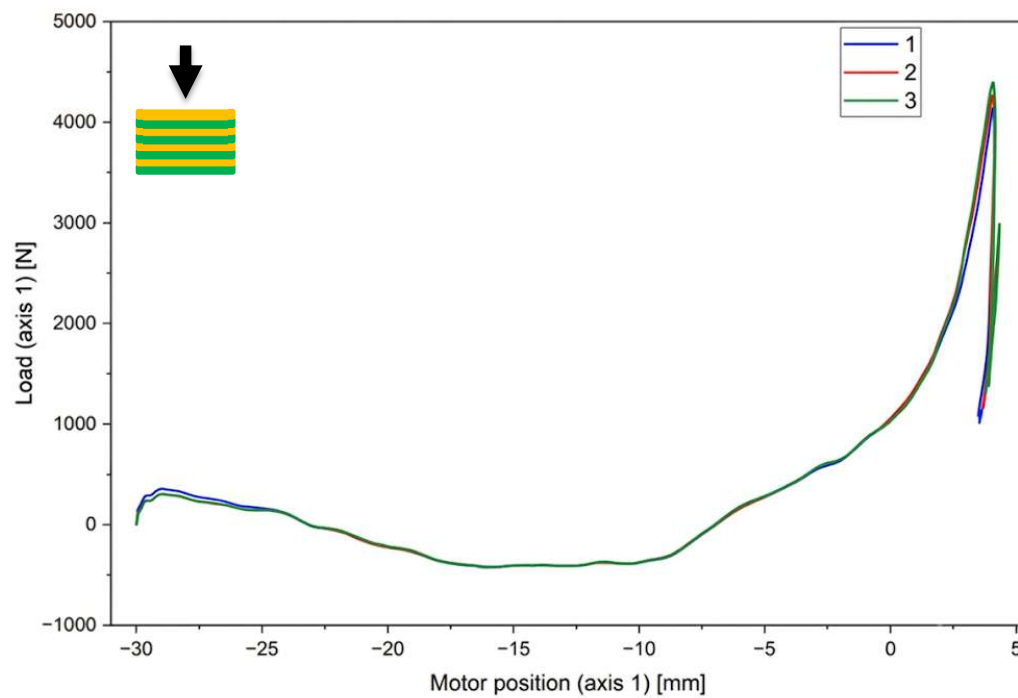


Figure 4.41: Curve forza-spostamento dei provini in TPU monomateriale

TPU	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	41.50	0.061	5.065
2	41.02	0.058	4.945
3	40.94	0.058	4.842

Table 4.20: Risultati della prova a compressione PLA

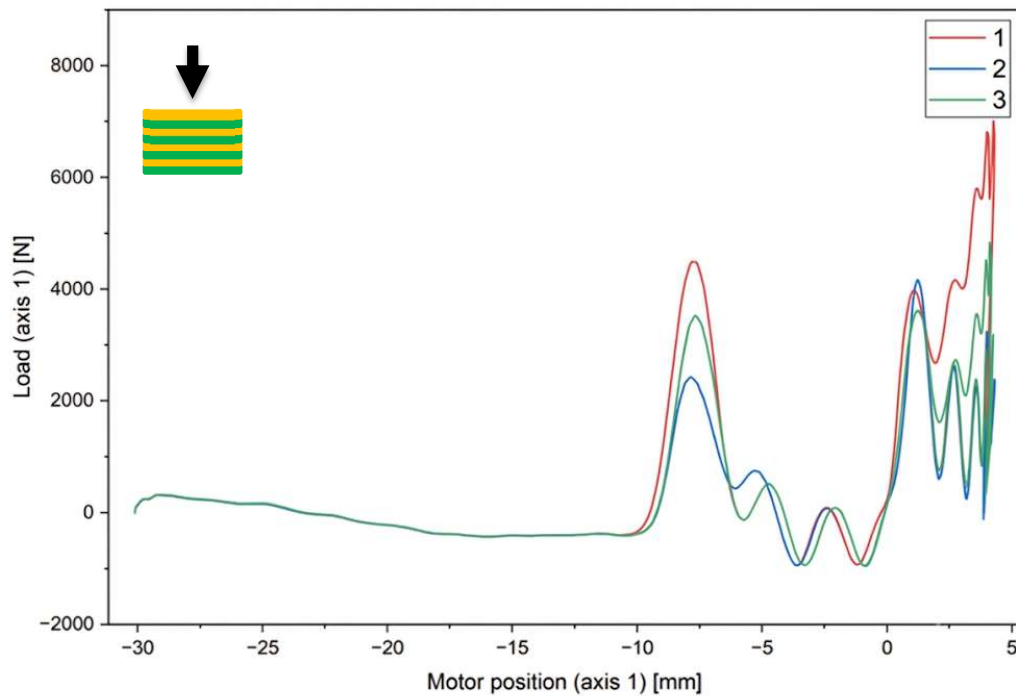


Figure 4.42: Curve forza-spostamento dei provini bimateriale PLA-TPU

PLA - TPU	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
1	43,47	0,38	9,947
2	22,91	0,21	4,761
3	31,58	0,28	5,922

Table 4.21: Risultati della prova a compressione PLA - TPU

Al termine del test, il provino è stato trovato sdraiato su un lato come visibile dalla foto riportata in seguito. Per evitare questo inconveniente, si potrebbe considerare un campione con una base più ampia; tuttavia, la capacità di carico del macchinario potrebbe essere insufficiente per testarlo, come già osservato in precedenza con i provini a base 20 x 20 mm. In alternativa, si potrebbe pensare di fissare questi provini al piatto per impedire al provino di spostarsi al momento del contatto con i piatti.



Figure 4.43: Provino PLA - TPU alla fine della prova di compressione statica

4.4.4 Ripetizione delle Prove con Fissaggio del Provino mediante Nastro Biadesivo

Alla luce dell'instabilità riscontrata nel corso delle prove descritte nei paragrafi precedenti — in cui il provino tendeva sistematicamente a sdraiarsi su un fianco al momento dell'impatto con i piatti della macchina — si è deciso di ripetere la campagna sperimentale adottando un sistema di vincolo del campione. Tale instabilità, già evidenziata in sede di analisi dei risultati, rappresentava infatti la principale fonte di incertezza nelle misure: lo spostamento laterale del provino comprometteva la corretta trasmissione del carico lungo l'asse di compressione e introduceva una componente di sollecitazione non assiale di difficile quantificazione, con il rischio di sottostimare l'effettiva capacità di assorbimento energetico della configurazione bimateriale.

Tra le possibili soluzioni individuate al termine del paragrafo precedente, si è scelto di percorrere la via del fissaggio diretto del provino al piatto inferiore della macchina, in quanto soluzione di più rapida ed economica attuazione rispetto alla riprogettazione della base del campione. A questo scopo è stato impiegato del nastro biadesivo, applicato sulla superficie di appoggio del provino, con l'obiettivo di mantenerlo in posizione verticale durante l'intera fase di schiacciamento e di impedirne il ribaltamento al primo contatto con il martello.

Il nastro biadesivo è stato preferito ad altri sistemi di ancoraggio in virtù della sua semplicità di applicazione e della pressoché totale assenza di interferenze con la geometria del provino: a differenza di morsetti o supporti meccanici, esso non introduce vincoli di rigidità aggiuntivi lungo i fianchi del campione, lasciando libera la superficie

laterale di deformarsi secondo la propria modalità naturale. È stata posta particolare attenzione nel garantire un'adesione uniforme su tutta la base, così da evitare distacchi parziali che avrebbero potuto falsare la misura o reintrodurre il fenomeno di instabilità che si intendeva eliminare.

Con questa configurazione sono state eseguite tre ulteriori prove di compressione dinamica, condotte alle medesime condizioni operative adottate in precedenza, ovvero impiegando la macchina STEP lab UD040 AXIAL – BV200 TORSIONAL ad una velocità di impatto di 1 m/s e con una frequenza di campionamento di 4000 Hz.

I grafici riportati di seguito mostrano le curve forza-spostamento in valore assoluto ottenute nelle tre prove eseguite con il provino vincolato mediante nastro biadesivo.

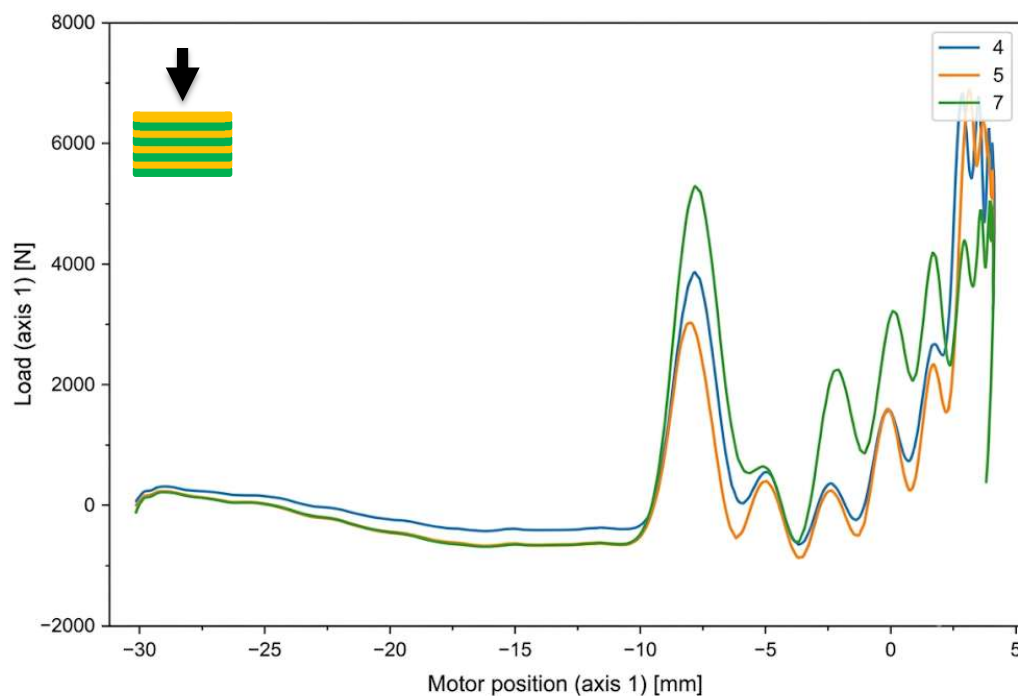


Figura 4.44: Curve forza-spostamento delle tre prove con provino fissato mediante nastro biadesivo

I valori caratteristici estratti dalle prove sono riassunti nella tabella seguente, in cui ciascuna riga corrisponde a una delle tre ripetizioni effettuate.

PLA - TPU	σ [MPa]	E [GPa]	SAE [j/g]
4	34.11	0.31	9.460
5	26.57	0.29	6.001
7	48.43	0.43	12.85

Tabella 4.22: Risultati delle prove a compressione dinamica con provino vincolato mediante nastro biadesivo

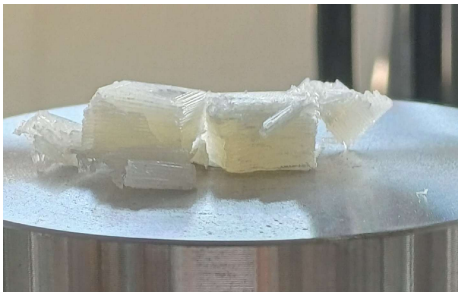


Figura 4.45: Provino 5 post test di compressione



Figura 4.46: Provino 5 post test di compressione

L'introduzione del nastro biadesivo ha effettivamente impedito il ribaltamento del provino, che al termine di ciascuna prova è stato ritrovato in posizione verticale, a conferma del corretto mantenimento della direzione di carico lungo l'asse di compressione. Tale accorgimento ha consentito di ottenere una deformazione più simmetrica e una distribuzione del carico più uniforme rispetto alla serie precedente, riducendo sensibilmente la dispersione dei valori misurati tra una prova e l'altra.

I risultati così ottenuti, pur dovendo essere interpretati con la cautela imposta dal numero contenuto di ripetizioni, confermano quanto previsto: una volta rimossa l'instabilità geometrica del provino, la configurazione bimateriale PLA-TPU evidenzia una capacità di assorbimento dell'energia superiore a quella dei rispettivi monomateriali, con valori di energia specifica assorbita coerenti con il comportamento sinergico atteso dalla combinazione della rigidità del PLA e della deformabilità del TPU. Il fissaggio

mediante nastro biadesivo si è pertanto rivelato un accorgimento sperimentale semplice ma efficace, che potrà essere adottato come prassi nelle successive campagne di prova dinamica.

Tra le tre prove eseguite, il provino 7 ha fatto registrare le prestazioni più elevate, presentando i valori più alti di tensione di picco, modulo ed energia specifica assorbita riportati nella tabella precedente. Tale risultato è riconducibile alla migliore qualità dell'adesione interfacciale: a differenza degli altri campioni, il provino 7 non ha manifestato alcun distacco tra i layer dei due materiali, come si può osservare anche dalle immagini riportate. Questo comportamento è attribuibile a un leggero incremento del flow di entrambi i materiali in fase di stampa. Per i provini in PLA, il flusso era stato impostato al 60% invece del 58%; mentre per il TPU era stato impostato al 45% invece del 40%. Sebbene a un primo esame il campione non apparisse riuscito, risultando poco uniforme e caratterizzato da numerose sbavature di materiale lungo i fianchi, proprio tale aumento di flusso ha fatto sì che i due materiali si attaccassero meglio, migliorandone la coesione interfacciale. Va precisato che di questa configurazione è stato realizzato e testato un solo provino, in quanto la stampa era stata concepita come prova preliminare per la messa a punto dei parametri; il campione è stato comunque sottoposto a prova per scrupolo.

4.4.5 Conclusione delle Prove di Compressione Dinamica

Le prove di compressione dinamica condotte sulle tre configurazioni PLA monomateriale, TPU monomateriale e bimateriale PLA-TPU hanno permesso di caratterizzare la risposta dei materiali in regime di impatto e di confermare con chiarezza la superiorità della configurazione bimateriale in termini di capacità di assorbimento dell'energia rispetto sia al PLA sia al TPU monomateriale. Sebbene la prima serie di prove sia stata condizionata dall'instabilità del provino che tendeva a sdraiarsi durante la compressione la successiva ripetizione con il provino vincolato mediante nastro biadesivo ha consentito di eliminare tale criticità e di consolidare i risultati ottenuti.

Tale divario prestazionale è riconducibile ai diversi meccanismi di cedimento dei due materiali. Il PLA, grazie alla sua elevata rigidità, raggiunge un carico di picco più alto, ma manifesta un cedimento fragile e improvviso: il collasso repentino della curva forza-spostamento si traduce in un'energia assorbita complessivamente ridotta. Il TPU, al contrario, sostiene deformazioni elevate senza giungere a rottura, ma oppone una resistenza limitata, con un carico di picco inferiore e una conseguente modesta dissipazione di energia.

La combinazione dei due materiali produce un effetto sinergico. La struttura bimateriale sfrutta l'elevata capacità di carico del PLA insieme alla deformazione progressiva del TPU: in condizioni di impatto ad alta velocità, tale combinazione consente di mantenere una forza più sostenuta durante lo schiacciamento, superando complessivamente le prestazioni di entrambi i monomateriali. Questo comportamento, inizialmente osservato pur in presenza dell'instabilità geometrica del provino, ha trovato piena conferma nelle prove eseguite con il fissaggio mediante nastro biadesivo: una volta garantita la corretta trasmissione del carico lungo l'asse di compressione, il contributo sinergico delle due fasi è risultato più evidente, più ripetibile e meno disperso tra una prova e l'altra.

L'ipotesi secondo cui la rimozione dell'instabilità strutturale del provino avrebbe condotto a risultati ancora più favorevoli ha trovato riscontro proprio nelle prove eseguite con il vincolo mediante nastro biadesivo. Eliminata la tendenza al ribaltamento, la deformazione è risultata più simmetrica e la dispersione dei valori misurati si è ridotta

sensibilmente, confermando la maggiore capacità di assorbimento energetico della configurazione bimateriale PLA-TPU. Il fissaggio del provino si conferma pertanto un accorgimento sperimentale semplice ma efficace, da adottare come prassi nelle successive campagne di prova dinamica.

Tra gli sviluppi futuri del progetto è prevista l'esecuzione di ulteriori prove di compressione dinamica, da condurre in collaborazione con il politecnico di Milano dipartimento di ingegneria aereospaziale, finalizzate a testare i provini a velocità di impatto notevolmente più elevate, dell'ordine dei 7 m/s. Tali prove consentiranno di estendere la caratterizzazione del comportamento dinamico della configurazione bimateriale PLA-TPU a regimi di sollecitazione più severi e più rappresentativi delle reali condizioni di impatto, permettendo di verificare se l'effetto sinergico osservato alle velocità finora indagate si mantenga anche in presenza di ratei di deformazione significativamente maggiori.

Capitolo 5

Prime geometrie honeycomb e sviluppi futuri del progetto

5.1 Introduzione

Il presente capitolo segna il passaggio dalla caratterizzazione dei provini elementari — cubi e dog-bone — alla realizzazione delle prime geometrie bimateriali più complesse. La scelta è ricaduta su una geometria a nido d'ape (honeycomb) convenzionale, in quanto già studiata in precedenti tesi del gruppo di ricerca e sulla quale è presente un know-how consolidato.

È importante sottolineare che le geometrie honeycomb presentate in questo capitolo non costituiscono la configurazione definitiva del componente. Quest'ultima sarà infatti progettata in una fase successiva, in modo più dettagliato e ottimizzato, sulla base dei dati sperimentali raccolti nei capitoli precedenti — in particolare le curve sforzo-deformazione, i valori di energia assorbita e le modalità di collasso delle coppie bimateriali caratterizzate. In questa fase, invece, la stampa delle geometrie honeycomb ha una finalità prettamente preliminare: mettere a punto i parametri di processo per la produzione di strutture ausettiche bimateriali ed effettuare i primi test funzionali, così da validare l'approccio adottato e individuare per tempo eventuali criticità di stampa.

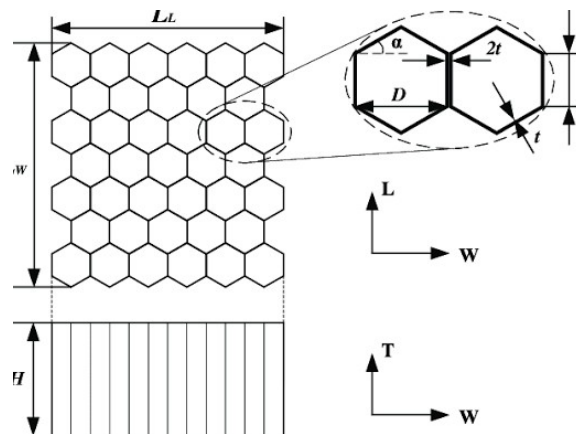


Figura 5.1: Geometria Honeycomb

5.2 Ottimizzazione dei Parametri di Stampa per le Geometrie honeycomb

La prima geometria realizzata è una struttura a nido d'ape, una configurazione già ampiamente analizzata e validata in precedenti lavori di tesi svolti all'interno dello stesso gruppo di ricerca. La cella è stata modellata in ambiente CAD parametrico, così da poter variare con facilità i principali parametri geometrici, spessore delle pareti, dimensione della cella e flow dei materiali, in funzione delle esigenze di stampa e di prova.

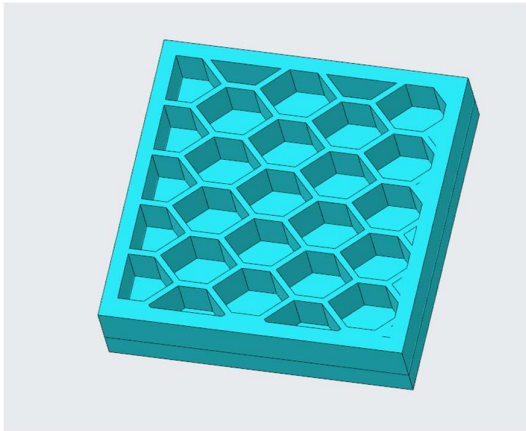


Figura 5.2: Geometria esterna

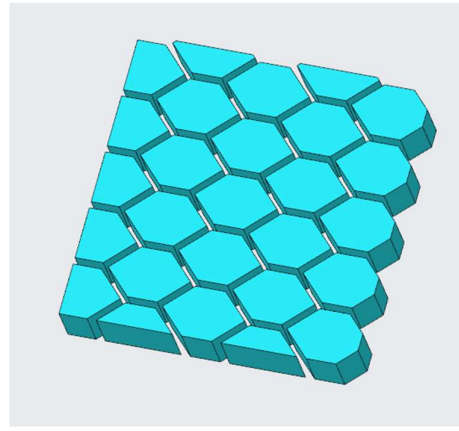


Figura 5.3: Geometria interna

Come punto di partenza per la taratura del processo sono stati adottati i parametri di stampa già identificati per la coppia PLA-TPU nei Capitoli 2 e 3, che ha mostrato la migliore compatibilità e le prestazioni meccaniche più elevate tra tutte le coppie testate. Su questa base si è proceduto alla stampa delle prime geometrie honeycomb, con l'obiettivo di verificare la corretta riproduzione delle pareti sottili e degli angoli rientranti, la qualità dell'interfaccia bimateriale e l'assenza di difetti macroscopici. I parametri di slicing più critici — velocità di stampa, temperatura degli ugelli, spessore del layer, percentuale e pattern di riempimento e configurazione della prime tower — sono stati progressivamente affinati a partire dai risultati di queste prime prove.

Si è scelto di procedere per gradi: stampare dapprima pochi layers, per valutare la fedeltà geometrica e l'adesione tra i due materiali, e successivamente strutture complete del componente finale.

5.3 Prima Stampa delle Geometrie honeycomb e Messa a Punto del Flusso

La realizzazione delle prime geometrie honeycomb è iniziata adottando integralmente i parametri di stampa già identificati nelle prove precedenti per la coppia PLA-TPU, descritti nei Capitoli 2 e 3. Questa scelta ha consentito di partire da una configurazione di processo già validata in termini di compatibilità bimateriale e qualità dell'interfaccia, riducendo il numero di variabili da controllare durante le prime stampe della struttura honeycomb.



Figura 5.4: Prima prova di stampa

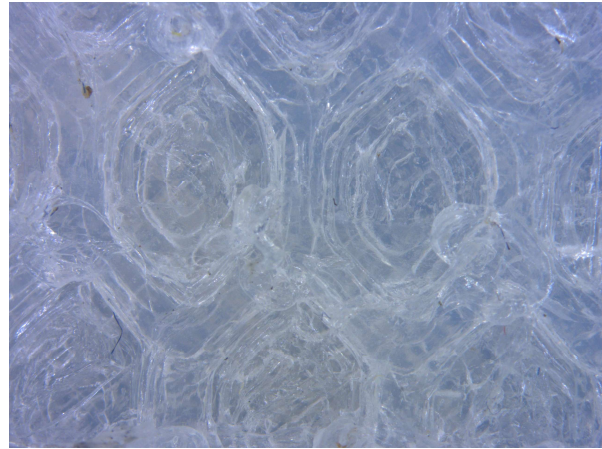


Figura 5.5: Dettaglio al microscopio

Dall'analisi dei primi campioni si è osservato che il TPU, impiegato come materiale esterno, veniva depositato in modo corretto e regolare, senza difetti apprezzabili nelle pareti perimetrali. Il PLA interno, al contrario, presentava un flusso (flow) troppo elevato, con un conseguente eccesso di materiale che comprometteva la definizione delle celle e la regolarità dei layer. Per correggere tale difetto il valore del flow del PLA è stato diminuito leggermente: già con questa modifica e poche altre riportate nella tabella successiva si sono riscontrati evidenti miglioramenti nella qualità di deposizione e nella fedeltà geometrica.

Parametro	Prima	Dopo
Retraction extra prime amount	2 mm	2,5 mm
Flow	58%	52%

Table 5.1: Modifica parametri honeycomb

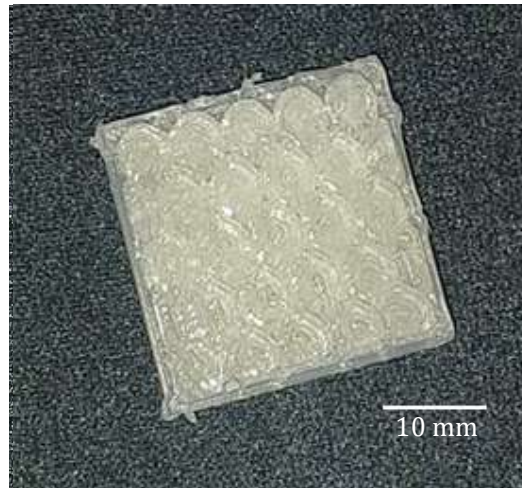


Figura 5.6: Prova ottimizzazione flow PLA

Verificato l'effetto positivo della taratura del flusso, si è quindi proceduto alla stampa di un provino completo, che è risultato ben formato e privo di difetti macroscopici, a conferma della bontà dei parametri adottati.

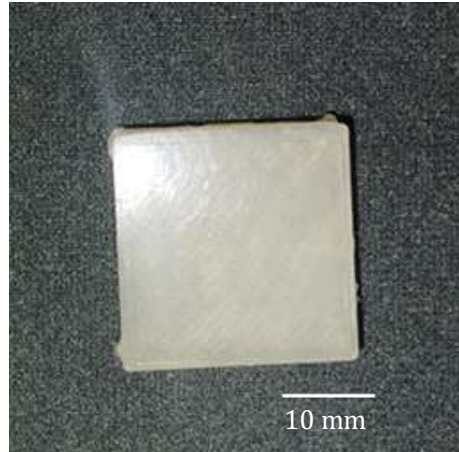


Figura 5.7: Provino completo

Si precisa che nell'immagine il dettaglio della struttura interna non risulta visibile: il PLA è infatti completamente racchiuso dal TPU, che riveste esternamente l'intero provino su tutti i lati. Per questo motivo la fotografia mostra unicamente la superficie esterna in TPU, mentre la geometria honeycomb interna rimane celata all'interno del componente.

5.4 Modellazione 3D del Provino honeycomb per le Prove Meccaniche

Per poter eseguire le prove meccaniche sulle geometrie honeycomb è stato realizzato un modello tridimensionale in ambiente CAD parametrico Creo Parametric. La scelta di progettare ex novo il provino è nata dall'esigenza di disporre di un campione con dimensioni di ingombro identiche a quelle dei provini impiegati nelle campagne sperimentali precedenti, pari a $10 \times 10 \times 20$ mm.

Mantenere lo stesso volume di ingombro ($10 \times 10 \times 20$ mm) consente infatti di confrontare direttamente i risultati ottenuti sulle nuove geometrie honeycomb con quelli dei provini testati nei capitoli precedenti, a parità di condizioni di prova e di superficie di contatto con i piatti della macchina. In questo modo le eventuali differenze nelle curve di risposta possono essere attribuite esclusivamente alla geometria interna della struttura, e non a variazioni dimensionali del campione.

L'impiego di un ambiente parametrico ha inoltre permesso di gestire con facilità i parametri della cella all'interno del volume prefissato, adattando il numero e la dimensione delle celle senza modificare l'ingombro complessivo del provino.

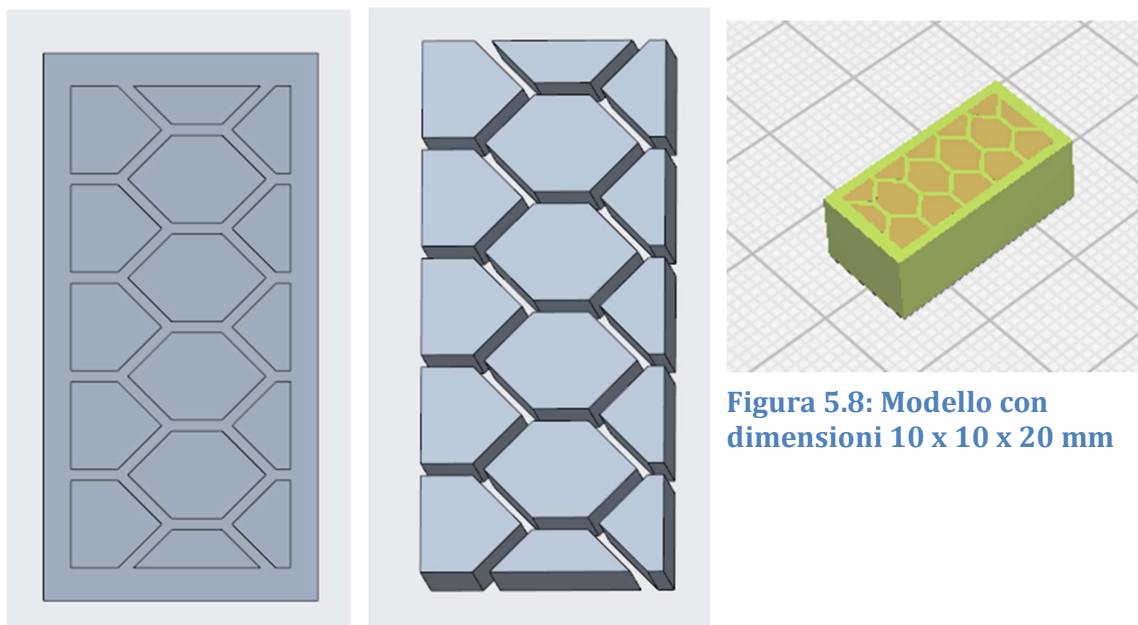


Figura 5.8: Modello con dimensioni 10 x 10 x 20 mm

5.5 Estensione ai Materiali Ceramici e Metallici

Il percorso delineato nei capitoli precedenti è stato condotto interamente su materiali polimerici, scelta motivata dalla facilità di lavorazione, dai costi contenuti e dalla rapidità di iterazione sperimentale. Tuttavia, l'obiettivo finale del progetto prevede l'utilizzo di materiali ad alte prestazioni meccaniche, in particolare allumina (Al_2O_3) e acciaio, che offrono valori di rigidità, resistenza e tenacità nettamente superiori ai polimeri e sono quindi più adatti all'applicazione automotive in condizioni di impatto severo.

La transizione verso questi materiali richiederà l'adozione di tecnologie di manifattura additiva differenti da quella MEX utilizzata finora. In entrambi i casi sarà necessaria una nuova campagna di ottimizzazione dei parametri di processo, che potrà tuttavia beneficiare dell'esperienza metodologica acquisita durante la fase polimerica.

Le prove meccaniche da condurre su questi materiali ricalcheranno la struttura già consolidata: caratterizzazione a trazione dei provini dog-bone, prove di compressione statica e dinamica sui provini cubici e, successivamente, test sulle geometrie ausettiche definitive. Il confronto tra i risultati ottenuti con i polimeri e quelli con i materiali ad alte prestazioni permetterà di valutare la scalabilità del concept bimateriale ausettico a diverse classi di materiali.

5.6 Obiettivo Finale: il Paraurti per Formula SAE

L'obiettivo conclusivo dell'intero programma di ricerca è la progettazione e la realizzazione di un paraurti per vettura Formula SAE basato sulle strutture ausettiche bimateriali caratterizzate nelle fasi precedenti. Il paraurti dovrà soddisfare i requisiti regolamentari della competizione in termini di geometria, massa e capacità di assorbimento energetico in caso di impatto frontale, rappresentando al contempo una soluzione innovativa rispetto alle strutture tradizionali in composito o in schiuma polimerica comunemente utilizzate.

Un precedente diretto è costituito da uno studio sviluppato presso lo stesso Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova [17], in cui un impact attenuator frontale per Formula SAE — realizzato con struttura sandwich a pelli in CFRP e core a nido d'ape in alluminio — è stato progettato e validato mediante simulazioni agli elementi finiti (LS-DYNA®) e prove d'impatto a caduta di peso. Tale lavoro definisce i requisiti prestazionali di riferimento (decelerazione di una massa di 300 kg a 7 m/s contro barriera rigida, assorbimento di almeno 7350 J, ingombro minimo di 200×200×100 mm) e fornisce la cornice metodologica su cui innestare lo sviluppo del paraurti ausettico bimateriale proposto in questa tesi.

La progettazione del componente finale dovrà integrare i risultati sperimentali di tutte le fasi precedenti con simulazioni numeriche agli elementi finiti, al fine di ottimizzare la distribuzione delle celle ausettiche, lo spessore delle pareti e la combinazione bimateriale in funzione degli scenari di impatto previsti dal regolamento Formula SAE. La validazione sperimentale del prototipo, mediante prove di impatto su slitta o su banco a caduta di peso, costituirà il punto d'arrivo del progetto e la dimostrazione concreta della fattibilità del concept sviluppato in questa tesi.

Riferimenti Bibliografici

- [1] K. Rambhad, V. Sutar, P. Sonwane, S. Suryawanshi, M. Thigale, "A Review on Automotive Bumper Beam Design and Analysis," *Journal of Automotive Engineering & Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 18–35, 2020.
- [2] A. Corsini, *Tesi di Laurea Magistrale – Analisi di strutture paraurti in materiali compositi*, Università degli Studi di Padova, 2022.
- [3] Euro NCAP, *Technical Bulletin – Frontal Impact Test Protocol v9.3*, European New Car Assessment Programme, 2023.
- [4] S. Heimbs, F. Strobl, P. Middendorf, S. Gardner, B. Eddington, J. Key, "Crash Simulation of an F1 Racing Car Front Impact Structure," *7th European LS-DYNA Conference*, EADS Innovation Works / Force India F1, 2009.
- [5] FIA, *2024 Formula One Technical Regulations*, Fédération Internationale de l'Automobile, Paris, 2024.
- [6] L. Biasetto et al., *AMAX-C – Extrusion Additive Manufacturing of Auxetic Composite structures*, *Proposta di Ricerca*, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Padova, 2025.
- [7] A. Airoidi, N. Novak, F. Sgobba, A. Gilardelli, M. Borovinsek, "Foam-filled energy absorbers with auxetic behaviour for localized impacts," *Materials Science and Engineering A*, vol. 788, 139500, 2020.
- [8] N. Novak, O. Al-Ketan, A. Mauko, L. Krstulović-Opara, M. Borovinšek, M. Vesenjak, Z. Ren, "Quasi-static and impact behaviour of polymer-metal interpenetrating phase TPMS composites," *Composite Structures*, vol. 366, 119225, 2025.
- [9] H.H. Xu, H.C. Luo, X.G. Zhang, W. Jiang, X.C. Teng, W.Q. Chen, J. Yang, Y.M. Xie, X. Ren, "Mechanical properties of aluminum foam filled re-entrant honeycomb with uniform and gradient designs," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 244, 108075, 2023.
- [10] T. Li, F. Liu, L. Wang, "Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials," *Composites Part B*, vol. 198, 108229, 2020.

- [11] R. Miotto, Tesi di Laurea Magistrale – Produzione di componenti bi-materiale con tecnologia di stampa additiva FDM: ottimizzazione dei parametri di stampa e del processo di debinding e sinterizzazione, Università degli Studi di Padova, 2024.
- [12] B. Liu, H. Dong, M. Ding, Q. Zhao, "Study of Compatibility and Flame Retardancy of TPU/PLA Composites," *Materials*, vol. 15, no. 6, p. 2339, 2022. DOI: 10.3390/ma15062339
- [13] I. Ferrer, M.L. Gromeu, "On the interlaminar bonding adhesion of the PLA-TPU printed multimaterial," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025. DOI: 10.1007/s00170-025-17099-x
- [14] M. Rismalia, S. C. Hidajat, I. G. R. Permana, B. Hadisujoto, M. Muslimin, and F. Triawan, "Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3D printed PLA material," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1402, no. 4, p. 044041, Dec. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1402/4/044041.
- [15] T. Letcher and M. Waytashek, "Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer," in *Proc. ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. (IMECE2014)*, Montreal, Canada, Nov. 2014, p. V02AT02A014, doi: 10.1115/IMECE2014-39379.
- [16] S. Anand Kumar and Y. Shivraj Narayan, "Tensile testing and evaluation of 3D-printed PLA specimens as per ASTM D638 Type IV standard," in *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Singapore: Springer, 2019, pp. 79–95, doi: 10.1007/978-981-13-2718-6_9.
- [17] S. Candela, G. Meneghetti, M. Ricotta, S. Giacometti, L. Bernardotto, "Numerical Analysis and Experimental Tests of a Sandwich-Structured Impact Attenuator for Formula SAE Application," *SAE Technical Paper 2020-01-5170*, 2020. DOI: 10.4271/2020-01-5170.