



UniMe
1548

Università degli Studi di Messina

Dipartimento di Ingegneria

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE

Ciclo XXXVIII

SSD: IIND-04/A – Tecnologie e sistemi di lavorazione

Sviluppo e valutazione di nuove tecnologie di produzione tramite manifattura additiva nell'ottica dell'industria 4.0 e 5.0

Strutture TPMS, materiali compositi e applicazioni energetiche

Tesi di Dottorato di:

Gabriele Marabello

Tutor/Supervisore:

Prof. Guido Di Bella

Coordinatore del corso di Dottorato:

Prof. Edoardo Proverbio

Sommario

1	Premessa.....	12
2	Sezione introduttiva	14
2.1	Abstract.....	14
2.2	Introduzione	19
2.2.1	Additive Manufacturing: definizione e classificazione.....	21
2.2.1.1	Powder Bed Fusion (PBF)	23
2.2.1.2	Directed Energy Deposition (DED)	25
2.2.1.3	Vat Photopolymerization (VP)	27
2.2.1.4	Material Jetting (MJ).....	28
2.2.1.5	Binder Jetting (BJ)	28
2.2.1.6	Sheet Lamination (SL).....	29
2.2.1.7	Material Extrusion (ME).....	30
2.2.1.7.1	Tecniche emergenti basate su Material Extrusion: Direct Ink Writing (DIW) e Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF).....	31
2.2.1.8	Considerazioni di sintesi sulle tecnologie additive	32
2.2.1.9	Polimeri per la manifattura additiva.....	32
2.2.1.9.1	Compositi a fibre corte e fibre continue.....	33
2.2.1.9.2	Filler sostenibili e materiali a basso impatto ambientale	34
2.2.1.10	Metalli e leghe per la manifattura additiva.....	35
2.2.1.11	Ceramiche e materiali compositi avanzati	36
2.2.1.12	Potenzialità e limiti della manifattura additiva	37
2.2.2	Mechanical Metamaterials	38
2.2.2.1	Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS).....	40
2.2.2.1.1	Applicazioni nei pannelli sandwich	44

2.2.2.1.2	Applicazioni negli scambiatori di calore.....	44
2.2.3	Altri casi applicativi	45
2.2.3.1	Strutture per energy storage	45
2.2.3.2	Reverse engineering e digitalizzazione.....	45
2.2.4	LIVINGAM: infrastruttura sperimentale	45
2.2.5	Obiettivi e contributi originali della ricerca.....	46
3	Sezione sperimentale.....	47
3.1	Allestimento di un laboratorio integrato di stampa 3D e reverse engineering per la ricerca in ambito di manifattura digitale: LIVINGAM-Living Lab for Additive Manufacturing	47
3.1.1	Abstract.....	47
3.1.2	Introduzione	48
3.1.3	Materiali e Metodi.....	50
3.1.3.1	Descrizione del laboratorio: macchine.....	50
3.1.3.2	Descrizione del laboratorio: materiali.....	53
3.1.3.3	Descrizione del laboratorio: scanner 3D	55
3.1.4	Conclusioni	56
3.2	Strutture Sandwich con Geometrie Avanzate.....	59
3.2.1	Introduzione al capitolo.....	59
3.2.1.1	Introduzione alle strutture sandwich	59
3.2.2	Dalle strutture tradizionali alle geometrie TPMS: studio e sperimentazione di pannelli sandwich in AM	61
3.2.2.1	Abstract.....	61
3.2.2.2	Introduzione	61
3.2.2.3	Materiali e metodi	62
3.2.2.3.1	Preparazione provini a flessione	62
3.2.2.3.2	Preparazione provini a compressione.....	64

3.2.2.4	Risultati e discussioni.....	66
3.2.2.5	Conclusioni	67
3.2.2.6	Sviluppi futuri	68
3.2.3	Ottimizzazione della manifattura additiva di strutture sandwich: effetto delle geometrie TPMS sulle proprietà flessionali	69
3.2.3.1	Abstract	69
3.2.3.2	Introduzione	69
3.2.3.3	Materiali e metodi	72
3.2.3.3.1	Prove di flessione	76
3.2.3.4	Risultati e discussione.....	77
3.2.3.5	Conclusioni	85
3.2.4	Analisi dell'indentazione quasi-statica di strutture TPMS a gradiente funzionale realizzate mediante tecnologie di manifattura additiva.....	87
3.2.4.1	Abstract	87
3.2.4.2	Introduzione	87
3.2.4.3	Materiali e metodi	88
3.2.4.3.1	Modellazione provino	88
3.2.4.3.2	Produzione dei provini	92
3.2.4.3.3	Test di Indentazione	95
3.2.4.3.4	Valutazione dei meccanismi di frattura.....	98
3.2.4.4	Analisi dei risultati	99
3.2.4.4.1	Provini a densità costante.....	100
3.2.4.4.2	Provini a densità variabile.....	104
3.2.4.4.3	Analisi comparativa dei risultati	107
3.2.4.5	Considerazioni conclusive e prospettive di ricerca	109

3.2.5	Progettazione Field-Driven di Strutture Sandwich con Nucleo TPMS a Gradiente Funzionale Realizzate mediante Stampa 3D: Modellazione 3D, Fabbricazione e Caratterizzazione Meccanica.....	112
3.2.5.1	Abstract.....	112
3.2.5.2	Introduzione.....	113
3.2.5.3	Materiali e metodi.....	113
3.2.5.3.1	Modellazione 3D dei campioni.....	113
3.2.5.3.2	Produzione dei campioni.....	122
3.2.5.3.3	Test meccanici.....	124
3.2.5.4	Risultati e discussioni.....	125
3.2.5.4.1	Analisi dei risultati.....	125
3.2.5.4.2	Analisi al microscopio ottico.....	133
3.2.5.5	Conclusioni e sviluppi futuri.....	138
3.3	Strutture Sandwich Composite.....	139
3.3.1	Introduzione al capitolo.....	139
3.3.1.1	Introduzione alle strutture composite e ai filamenti per AM.....	139
3.3.2	Modellazione e caratterizzazione meccanica di strutture sandwich in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio realizzate mediante tecniche di additive manufacturing.....	141
3.3.2.1	Abstract.....	141
3.3.2.2	Introduzione.....	141
3.3.2.3	Materiali e metodi.....	143
3.3.2.4	Risultati.....	147
3.3.2.5	Analisi dei risultati.....	150
3.3.2.6	Conclusioni.....	159
3.3.2.7	Sviluppi futuri.....	159

3.3.3	Ottimizzazione della temperatura di deposizione e del riempimento a giroide per il miglioramento delle prestazioni flessionali di strutture sandwich in PLA e compositi PLA–fibra di lino	162
3.3.3.1	Abstract	162
3.3.3.2	Introduzione	162
3.3.3.3	Materiali e metodi	165
3.3.3.3.1	Progettazione della struttura sandwich.....	165
3.3.3.3.2	Produzione additiva dei provini	168
3.3.3.3.3	Prove di flessione a tre punti.....	172
3.3.3.4	Analisi dei risultati	173
3.3.3.4.1	Analisi comparativa tra configurazioni – andamento tensione-deformazione.....	176
3.3.3.5	Conclusioni	186
3.3.4	Analisi dell’influenza delle variabili di processo sulla risposta meccanica di pannelli sandwich a geometria TPMS realizzati in materiale composito PLA-lino mediante fabbricazione additiva.....	189
3.3.4.1	Abstract	189
3.3.4.2	Introduzione	189
3.3.4.3	Materiali e Metodi.....	190
3.3.4.3.1	Geometria del core	191
3.3.4.3.2	Progettazione dei provini	192
3.3.4.3.3	Produzione dei provini	193
3.3.4.3.4	Fase di test.....	195
3.3.4.3.5	Analisi al microscopio ottico	198
3.3.4.4	Analisi dei risultati	199
3.3.4.4.1	Lotto sperimentale – 200 °C, layer 0,16 mm.....	202
3.3.4.4.2	Lotto sperimentale – 200 °C, layer 0,24 mm.....	204

3.3.4.4.3	Lotto sperimentale – 200 °C, layer 0,28 mm.....	206
3.3.4.4.4	Lotto sperimentale – 220 °C, layer 0,16 mm.....	209
3.3.4.4.5	Lotto sperimentale – 220 °C, layer 0,24 mm.....	211
3.3.4.4.6	Lotto sperimentale – 220 °C, layer 0,28 mm.....	213
3.3.4.4.7	Analisi comparativa intralotto – configurazioni a temperatura di estrusione 200 °C.....	215
3.3.4.4.8	Analisi comparativa intralotto – configurazioni a temperatura di estrusione 220 °C.....	216
3.3.4.4.9	Analisi comparativa – effetto della temperatura di estrusione su provini con layer da 0,16 mm.....	218
3.3.4.4.10	Analisi comparativa – effetto della temperatura di estrusione su provini con layer da 0,24 mm.....	219
3.3.4.4.11	Analisi comparativa – effetto della temperatura di estrusione su provini con layer da 0,28 mm.....	220
3.3.4.4.12	Confronto dei valori medi di tensione massima e deformazione a rottura	221
3.3.4.5	Conclusioni	223
3.3.4.6	Sviluppi futuri	225
3.4	Manifattura additiva e strutture TPMS per scambiatori di calore innovativi.....	227
3.4.1	Introduzione al capitolo.....	227
3.4.1.1	Scambiatori di calore.....	227
3.4.1.1.1	Classificazione degli scambiatori di calore.....	228
3.4.1.1.2	Fondamenti di termodinamica del trasferimento di calore.....	231
3.4.1.1.3	Efficacia termica dello scambiatore: formulazione ϵ -NTU.....	234
3.4.1.2	Scambiatori di calore con TPMS	236
3.4.2	Modellazione e ottimizzazione di scambiatori di calore innovativi realizzati tramite tecniche di additive manufacturing	240

3.4.2.1	Abstract	240
3.4.2.2	Introduzione	240
3.4.2.3	Materiali e metodi	241
3.4.2.4	Conclusioni	267
3.4.3	Progetto “For tunable thermochemical energy storage (4TunaTES)”	269
3.4.3.1	Presentazione progetto	269
3.4.3.2	Attività svolte	270
3.4.3.2.1	Caso studio: scambiatore fluido–solido	271
3.4.4	Ottimizzazione dei processi di manifattura additiva per la progettazione e fabbricazione di scambiatori di calore con morfologia interna basata su superfici minime triplamente periodiche (TPMS).	274
3.4.4.1	Abstract	274
3.4.4.2	Introduzione	274
3.4.4.3	Materiali e metodi	275
3.4.4.3.1	Modellazione numerica mediante COMSOL Multiphysics	275
3.4.4.4	Analisi dei risultati	278
3.4.5	Analisi sperimentale del comportamento meccanico di strutture TPMS a parete sottile, destinate all’impiego in scambiatori di calore, realizzate mediante manifattura additiva	284
3.4.5.1	Abstract	284
3.4.5.2	Introduzione	284
3.4.5.3	Materiali e metodi	285
3.4.5.3.1	Processo di fabbricazione	285
3.4.5.3.2	Materiali di stampa	286
3.4.5.3.3	Prova di compressione	289
3.4.5.4	Analisi dei risultati	291
3.4.5.4.1	Geometria Giroide	293

3.4.5.4.2	Geometria I-WP.....	299
3.4.5.4.3	Geometria Fischer-Koch S.....	303
3.4.5.4.4	Confronto delle curve sperimentali tensione–deformazione per provini TPMS realizzati in Rigid 10K Resin e High Temp Resin, relativi alle diverse geometrie analizzate.	306
3.4.5.4.5	Influenza delle proprietà del materiale sul comportamento meccanico delle strutture TPMS.	309
3.4.5.5	Discussione dei risultati	310
3.4.6	Progettazione e realizzazione di uno scambiatore di calore aria–acqua basato su geometria TPMS di tipo Giroide.	312
3.4.6.1	Abstract.....	312
3.4.6.2	Materiali e metodi	312
3.4.6.3	Analisi fluidodinamica.....	314
3.4.6.4	Discussione dei risultati	317
3.5	Manifattura additiva e reverse engineering per l’ottimizzazione del Friction Stir Welding.....	318
3.5.1	Introduzione al capitolo.....	318
3.6	Integrazione di Reverse Engineering, Digitalizzazione e Tecnologie Avanzate nella Cantieristica Navale.....	319
3.6.1	Presentazione del progetto	319
3.6.1.1	Abstract.....	320
3.6.1.2	Materiali e metodi	320
3.6.1.2.1	Scansione 3D e Reverse Engineering.....	320
3.6.1.2.2	Sperimentazione.....	321
3.6.1.2.3	Definizione di protocolli operativi.....	323
3.6.1.2.4	Machine Learning e Friction Stir Welding.....	324
3.6.1.3	Risultati e discussione.....	325

3.6.1.3.1	Risultati della scansione 3D	325
3.6.1.3.2	Risultati su FSW e machine learning	326
3.6.1.4	Sviluppi futuri	326
3.6.1.5	Conclusioni	328
3.7	Manifattura additiva per lo sviluppo di strutture reticolari in sistemi di Thermochemical Energy Storage	330
3.7.1	Introduzione al capitolo.....	330
3.7.2	Strutture reticolari 3D in materiale composito SAPO-34/S-PEEK, prodotte tramite manifattura additiva, per sistemi di trasformazione termica basati su adsorbimento	331
3.7.2.1	Abstract	331
3.7.2.2	Introduzione	331
3.7.2.3	Materiali e metodi	336
3.7.2.3.1	Preparazione del composito S-PEEK/zeolite	336
3.7.2.3.2	Realizzazione dello stampo mediante tecniche di additive manufacturing	342
3.7.2.3.3	Valutazione sperimentale della capacità di adsorbimento e caratterizzazione morfologica delle strutture composite.....	343
3.7.2.4	Risultati e discussioni.....	343
3.7.2.4.1	Progettazione e stampa 3D di strutture reticolari adsorbenti ...	343
3.7.2.4.2	Ottimizzazione del processo di fabbricazione e risoluzione delle criticità operative nella produzione degli stampi in PVA.....	350
3.7.2.4.3	Caratterizzazione morfologica della struttura	353
3.7.2.4.4	Valutazione delle prestazioni di adsorbimento/desorbimento..	356
3.7.2.5	Conclusioni	364
3.7.2.6	Sviluppi futuri	365

3.8	Manifattura additiva a supporto della deposizione uniforme nei MEA	367
3.8.1	Introduzione al capitolo.....	367
3.8.2	Progettazione e realizzazione di componenti stampati in 3D per il miglioramento del processo di produzione di MEA in elettrolizzatori PEMWE.	368
3.8.2.1	Presentazione progetto	368
3.8.2.2	Abstract	369
3.8.2.3	Introduzione	370
3.8.2.3.1	Limiti dei metodi convenzionali di fabbricazione dei MEA....	371
3.8.2.3.2	Innovazioni introdotte e contributo originale di questo studio	372
3.8.2.3.3	Obiettivi dello studio.....	373
3.8.2.4	Materiali e metodi	374
3.8.2.4.1	Configurazione sperimentale.....	374
3.8.2.4.2	Progettazione e realizzazione della testa di deposizione stampata in 3D	375
3.8.2.4.3	Ottimizzazione del processo.....	382
3.8.2.5	Risultati e discussione.....	383
3.8.2.5.1	Ottimizzazione della composizione dell'inchiostro e processo di deposizione del catalizzatore.....	383
3.8.2.5.2	Distribuzione del catalizzatore e confronto tra configurazioni di deposizione	385
3.8.2.5.3	Ottimizzazione della tenuta dell'inchiostro e stabilizzazione della membrana	388
3.8.2.5.4	Influenza della larghezza della lama delle cartucce sulla distribuzione del catalizzatore.....	388
3.8.2.5.5	Criticità residue e prospettive di miglioramento	390
3.8.2.5.6	Impatto potenziale del nuovo metodo sulle prestazioni dei MEA	390

3.8.2.6	Conclusioni	391
3.8.3	Sviluppo di un sistema di fissaggio per la stabilizzazione del Nafion® durante il processo di deposizione	392
3.8.3.1	Abstract	392
3.8.3.2	Introduzione	392
3.8.3.3	Materiali e metodi	393
3.8.3.4	Conclusioni	394
3.8.3.5	Sviluppi futuri	398
4	Sezione conclusiva	399
4.1	Conclusioni e sviluppi futuri	399
5	Elenco delle pubblicazioni correlate al lavoro di dottorato	410
6	Bibliografia	412

1 Premessa

Questo lavoro rappresenta il risultato di tre anni di ricerca, durante i quali ho avuto l'opportunità di esplorare diverse declinazioni dell'Additive Manufacturing. La tesi riflette un percorso che si è sviluppato in più direzioni, seguendo domande e sfide nate di volta in volta, ma sempre ricondotte a un'idea centrale: considerare l'additive non solo come un sistema produttivo, bensì come una metodologia capace di orientare la progettazione e aprire nuove prospettive applicative. Un elemento chiave di questo percorso è stata la creazione del LIVINGAM, un laboratorio di manifattura additiva e reverse engineering concepito come infrastruttura sperimentale all'interno dell'Università di Messina. Nato dall'esigenza di disporre di strumenti e spazi che prima non esistevano, si è progressivamente configurato come un polo di riferimento per la manifattura digitale e per le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 e 5.0, diventando il contesto in cui molti dei lavori qui presentati hanno potuto prendere forma e svilupparsi. A partire da questa base metodologica e infrastrutturale, il lavoro si articola in capitoli che affrontano temi distinti: dalle strutture cellulari per pannelli sandwich agli scambiatori di calore basati su superfici minimali, dai sistemi per l'accumulo termochimico di energia fino ai componenti per l'elettrolisi a membrana polimerica. Ogni capitolo raccoglie più lavori di ricerca, ciascuno sviluppato come un contributo autosufficiente, con la propria introduzione, la descrizione delle attività svolte e le relative conclusioni. Questa impostazione permette a ogni lavoro di mantenere la sua autonomia, ma al tempo stesso la loro successione segue una logica di continuità, che riflette l'evoluzione naturale del percorso complessivo. Il filo conduttore rimane la valorizzazione dell'Additive Manufacturing come strumento trasversale, capace di adattarsi a contesti diversi e di tradursi in soluzioni progettuali e tecnologiche innovative. Quelli qui presentati sono soltanto alcuni esempi delle potenzialità offerte da questa metodologia, che lascia intravedere possibilità ancora più ampie per lo sviluppo industriale e la trasformazione dei sistemi produttivi. Questo percorso di ricerca non è stato soltanto un'occasione per approfondire temi specifici, ma anche un modo per contribuire a un processo di

cambiamento più ampio: quello che vede l'Additive Manufacturing affermarsi come uno dei motori dell'innovazione industriale e scientifica dei prossimi anni.

2 Sezione introduttiva

2.1 Abstract

Il lavoro di ricerca presentato in questa tesi di dottorato si colloca nel quadro della transizione verso l'industria 4.0, in cui le tecnologie digitali e di manifattura avanzata assumono un ruolo strategico nel ridefinire modelli produttivi, filiere industriali e metodologie progettuali. Tra le tecnologie emergenti, l'Additive Manufacturing (AM) rappresenta un campo in costante crescita, caratterizzato da una progressiva espansione delle sue applicazioni in settori chiave come l'aerospazio, l'automotive, l'energia e il biomedicale. La possibilità di realizzare componenti con geometrie complesse e personalizzate, ottimizzando al tempo stesso l'impiego di materiale e riducendo tempi e costi di produzione, fa dell'AM un paradigma produttivo altamente competitivo. Tuttavia, il pieno sfruttamento di queste potenzialità richiede una profonda integrazione tra conoscenze di progettazione avanzata, sperimentazione sui materiali e validazione dei processi, al fine di superare i vincoli tipici delle tecnologie tradizionali. In quest'ottica, il presente lavoro di ricerca si è concentrato sull'analisi, progettazione e sperimentazione di strutture cellulari complesse, in particolare quelle basate sulle Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), e sulla valutazione delle loro prestazioni sia in applicazioni strutturali sia in applicazioni termo-fluidodinamiche. Le TPMS, grazie alla loro natura geometrica continua, periodica e priva di discontinuità, consentono di coniugare leggerezza, resistenza meccanica e un elevato rapporto superficie/volume, aprendo nuove prospettive nella realizzazione di pannelli sandwich, scambiatori di calore e dispositivi energetici. Parallelamente, è stata affrontata la tematica dei materiali compositi per Additive Manufacturing, con particolare riferimento alla tecnologia di Fused Filament Fabrication (FFF), nella quale l'introduzione di fibre e filler nei filamenti polimerici consente di migliorare proprietà meccaniche e funzionali dei manufatti, rendendoli idonei ad applicazioni strutturali e multifunzionali. Uno dei primi ambiti affrontati ha riguardato la progettazione e realizzazione di pannelli sandwich con core a geometria complessa, fabbricati mediante tecniche additive. Lo studio ha messo in evidenza come le

geometrie TPMS, se impiegate come core all'interno di pannelli sandwich, offrano vantaggi significativi in termini di rigidità flessionale, resistenza a compressione e capacità di assorbimento dell'energia, rispetto alle soluzioni convenzionali basate su honeycomb o schiume polimeriche. Attraverso prove sperimentali condotte su campioni realizzati in PLA e in materiali compositi caricati con fibre, è stato possibile dimostrare la stretta correlazione tra configurazione geometrica del core, densità relativa e comportamento meccanico complessivo del pannello. I risultati ottenuti hanno confermato il potenziale delle geometrie Gyroid, Diamond e Schwarz come soluzioni particolarmente promettenti per applicazioni in cui il rapporto resistenza/peso rappresenta un requisito critico. Un ulteriore filone della ricerca ha riguardato la modellazione e realizzazione di scambiatori di calore innovativi, caratterizzati da morfologie interne basate su superfici minimali triplamente periodiche (TPMS). Grazie alle loro proprietà topologiche, tali geometrie consentono di ottimizzare lo scambio termico attraverso un incremento del rapporto superficie/volume e una distribuzione più uniforme del flusso fluidodinamico, riducendo le perdite di carico tipiche delle configurazioni convenzionali. Nel corso dello studio, sono state progettate e confrontate diverse tipologie di TPMS – tra cui Gyroid, Diamond, Schwarz Primitive, Lidinoid e Split-P – realizzate mediante tecniche di additive manufacturing e analizzate sia attraverso modellazione numerica che sperimentazione diretta. Le prove hanno evidenziato come la scelta della geometria influisca in maniera determinante sulle prestazioni termo-fluidodinamiche complessive: la configurazione Gyroid si è confermata particolarmente efficace per l'equilibrio tra efficienza di scambio, autoportanza durante la fabbricazione e robustezza meccanica, mentre la geometria Schwarz Primitive ha mostrato un'elevata capacità di trasferimento termico, a fronte però di dimensioni complessive maggiori e di una ridotta resistenza strutturale. Parallelamente, la ricerca si è estesa allo sviluppo di strutture reticolari composite per sistemi di accumulo termochimico dell'energia, con specifico riferimento a materiali a base di zeoliti e polimeri ad alte prestazioni. In questo contesto, l'additive manufacturing si è rivelato uno strumento particolarmente adatto per superare i limiti delle tecniche tradizionali, che spesso impediscono di ottenere geometrie complesse con un'adeguata quantità di materiale attivo e una

distribuzione interna ottimale. Sono state quindi progettate e realizzate strutture reticolari tridimensionali in composito SAPO-34/S-PEEK, valutate sia dal punto di vista morfologico che funzionale. Le prove di adsorbimento e desorbimento di vapore acqueo hanno confermato l'elevata efficienza del materiale e la sua stabilità nel corso di cicli operativi ripetuti, aprendo nuove prospettive per l'impiego di tali configurazioni in sistemi di accumulo energetico a lungo termine. La possibilità di realizzare reticoli cellulari ottimizzati, interamente costituiti da materiale attivo e privi di supporti metallici, ha dimostrato un significativo miglioramento sia nei processi di trasferimento di massa che nelle prestazioni di scambio termico, rispetto alle configurazioni convenzionali basate su letti impaccati o rivestimenti sottili. Questi risultati suggeriscono l'efficacia della manifattura additiva come piattaforma per l'integrazione di materiali avanzati e geometrie complesse, in grado di abilitare nuove soluzioni per lo storage e la conversione energetica in scenari applicativi che spaziano dal recupero di calore di scarto ai sistemi di climatizzazione sostenibile. Un altro aspetto centrale di questo lavoro ha riguardato lo studio e la sperimentazione di materiali compositi per la manifattura additiva tramite Fused Filament Fabrication (FFF). L'introduzione di fibre rinforzanti e filler funzionali all'interno dei filamenti polimerici ha permesso di migliorare sensibilmente le proprietà meccaniche, termiche e funzionali dei manufatti, rendendoli idonei ad applicazioni ingegneristiche avanzate. I risultati hanno mostrato come l'aggiunta di fibre di carbonio, vetro o Kevlar incrementi rigidità e resistenza, mentre l'impiego di filler naturali e sostenibili (come legno, lino, canapa o scarti agroalimentari) apra prospettive interessanti in termini di economia circolare e riduzione dell'impatto ambientale. Questi materiali sono stati applicati in particolare alla realizzazione di strutture sandwich con core a geometria complessa, dove la sinergia tra geometria TPMS e composito rinforzato ha permesso di ottenere pannelli leggeri, resistenti e adattabili a condizioni operative severe. La ricerca si è inoltre estesa all'ambito energetico, con la progettazione e la realizzazione di componenti innovativi per elettrolizzatori PEM (Proton Exchange Membrane Water Electrolysis), dispositivi fondamentali per la produzione di idrogeno verde. In questo contesto è stato sviluppato un sistema di deposizione catalitica basato sulla manifattura additiva, in grado di migliorare l'uniformità degli strati attivi nei Membrane Electrode

Assembly (MEA), riducendo gli sprechi di materiale e incrementando la riproducibilità del processo. I risultati preliminari hanno mostrato un miglioramento significativo rispetto ai metodi convenzionali, suggerendo la possibilità di trasferire queste tecniche in scenari produttivi semi-industriali, con un potenziale impatto positivo sulla scalabilità e sull'efficienza dei sistemi per la generazione sostenibile di idrogeno. Un elemento trasversale e strategico del percorso di dottorato è stato rappresentato dall'allestimento del Living Lab for Additive Manufacturing (LIVINGAM), un'infrastruttura sperimentale pensata per la prototipazione rapida, la validazione di processi e materiali e l'integrazione di tecniche di digitalizzazione e reverse engineering. Il laboratorio ha permesso di condurre campagne sperimentali su materiali eterogenei e geometrie complesse, favorendo iter rapidi di progettazione–produzione–validazione e aprendo la strada a collaborazioni interdisciplinari. Grazie alla sua natura flessibile e distribuita, LIVINGAM si configura come un modello operativo replicabile in altri contesti accademici e industriali, in linea con i principi della manifattura distribuita e della sostenibilità dei processi. Accanto a queste attività, un contributo rilevante è stato fornito anche dall'impiego di tecniche di reverse engineering e scansione 3D, utilizzate come strumenti complementari per la digitalizzazione di componenti complessi e per la creazione di gemelli digitali. Tali metodologie, integrate nei flussi di progettazione e prototipazione, hanno permesso di ottimizzare i processi di fabbricazione additiva e di estendere le possibilità applicative del Living Lab, con ricadute significative in contesti industriali quali la cantieristica e la prototipazione funzionale. Nel loro insieme, le attività condotte dimostrano come l'Additive Manufacturing non debba essere inteso unicamente come strumento di prototipazione, ma come piattaforma produttiva matura, capace di abilitare applicazioni innovative attraverso la combinazione di nuove geometrie (TPMS e strutture cellulari), materiali avanzati (compositi per FFF) e processi ottimizzati (scambiatori di calore, energy storage, MEA). La tesi contribuisce quindi a delineare un approccio metodologico integrato, in cui progettazione computazionale, sperimentazione sui materiali e validazione funzionale convergono in una visione unitaria. Le ricadute di questa ricerca interessano diversi ambiti applicativi: dall'aerospazio, dove la leggerezza e l'efficienza strutturale sono vincoli critici, all'automotive, in cui la riduzione del

peso e l'ottimizzazione termo-fluidodinamica si traducono in maggiore efficienza energetica; dai sistemi energetici, in cui l'additivo abilita componenti innovativi per scambio termico e accumulo, fino al settore delle tecnologie per l'idrogeno, in cui nuove metodologie di fabbricazione possono accelerare il passaggio a un'economia decarbonizzata. In conclusione, il lavoro di dottorato evidenzia come la manifattura additiva possa costituire un abilitatore chiave per lo sviluppo di soluzioni ingegneristiche avanzate, ponendo le basi per un'adozione sempre più estesa e sistemica di queste tecnologie nella produzione industriale. L'integrazione tra geometria, materiale e processo emerge come il filo conduttore di una ricerca che, pur muovendosi su diversi ambiti applicativi, mantiene come obiettivo comune quello di dimostrare il valore dell'additivo quale tecnologia abilitante per la progettazione e la produzione del futuro.

2.2 Introduzione

Negli ultimi decenni il mondo della produzione industriale ha vissuto una trasformazione radicale, guidata da processi di digitalizzazione, automazione e dalla crescente attenzione verso la sostenibilità. La cosiddetta quarta rivoluzione industriale, o Industria 4.0, ha aperto nuove possibilità in termini di progettazione, monitoraggio e gestione dei sistemi produttivi, modificando in profondità non soltanto le tecnologie impiegate, ma anche le logiche organizzative e i modelli di business delle imprese. Concetti come l'Internet of Things (IoT), la sensoristica diffusa e i sistemi cyber-fisici hanno reso possibile la creazione di fabbriche connesse, nelle quali macchine, prodotti e operatori dialogano in tempo reale lungo l'intera catena del valore. Più recentemente, l'attenzione si è spostata verso la prospettiva dell'Industria 5.0, che non si limita ad ampliare il paradigma digitale della quarta rivoluzione, ma introduce una dimensione centrata sull'uomo e sulla sostenibilità. In questa visione, la manifattura non è soltanto intelligente e connessa, ma anche resiliente, inclusiva e rispettosa dell'ambiente, con l'obiettivo di coniugare competitività industriale e benessere sociale. In questo scenario, il settore delle Tecnologie e dei Sistemi di Lavorazione riveste un ruolo cruciale: esso non si limita a studiare i singoli processi di fabbricazione, ma li colloca in un contesto sistemico, considerando materiali, macchine, flussi, costi, qualità e impatto ambientale come elementi strettamente interconnessi. L'evoluzione tecnologica ha reso sempre più sfumati i confini tra progettazione e produzione: oggi non si tratta più soltanto di "fabbricare un pezzo" ma di concepirlo sin dall'inizio come parte di un ecosistema di prodotto-processo-sistema. In questa visione, il progettista non deve soltanto pensare a geometrie e materiali, ma deve conoscere i vincoli e le opportunità offerti dai diversi processi di lavorazione, tradizionali e avanzati, per poter sfruttare al meglio le risorse disponibili e ridurre inefficienze e sprechi. I sistemi di lavorazione moderni, infatti, sono caratterizzati da un approccio integrato che mette insieme le diverse fasi della catena del valore: dalla concezione del prodotto alla selezione del materiale, dalla definizione delle strategie di produzione fino al controllo qualità e al ciclo di vita del manufatto. All'interno di questo scenario si inserisce la manifattura additiva, che rappresenta una delle più

importanti innovazioni nel panorama dei sistemi di produzione contemporanei. Se i processi sottrattivi tradizionali hanno dominato per secoli la scena manifatturiera, oggi la possibilità di costruire oggetti strato su strato, depositando solo il materiale necessario e dando forma a geometrie di complessità potenzialmente illimitata, ha cambiato le regole del gioco. L'AM si configura non soltanto come una nuova tecnologia, ma come un paradigma produttivo che investe in pieno l'area delle Tecnologie e dei Sistemi di Lavorazione: esso implica nuove metodologie progettuali (Design for Additive Manufacturing), nuovi strumenti di simulazione e modellazione, nuovi approcci metrologici per il controllo, flussi di lavorazione più agili, nei quali la versatilità del processo consente di limitare l'impiego di attrezzature dedicate. Dal punto di vista sistemico, questa transizione non va intesa come sostituzione completa delle tecniche tradizionali, ma come loro integrazione. L'AM consente infatti di affiancare alle tecnologie sottrattive, formative o di giunzione una capacità produttiva complementare, utile soprattutto laddove la complessità geometrica, la personalizzazione e la rapidità di iterazione rappresentano fattori competitivi decisivi. Per questo motivo, nelle logiche dei sistemi di lavorazione moderni, l'additivo viene sempre più spesso collocato al centro di catene ibride di fabbricazione, nelle quali la sua flessibilità si combina con la robustezza e l'affidabilità di processi consolidati come la fresatura, la tornitura o la saldatura. Dal punto di vista metodologico, la ricerca in questo campo si fonda su alcuni principi cardine. In primo luogo, l'integrazione tra geometria, materiale e processo: nessuno di questi tre elementi può essere considerato separatamente, perché le prestazioni del manufatto sono il risultato congiunto della sua forma, della sua composizione e delle condizioni operative di produzione. In secondo luogo, l'approccio digital-driven, basato su modellazione parametrica, simulazioni numeriche e gestione dei dati di processo, che consente di ridurre gli errori e di abbreviare i tempi di validazione. Infine, l'attenzione alla sostenibilità, che si esprime sia nella riduzione degli sprechi di materiale e di energia, sia nella possibilità di utilizzare biopolimeri o materiali riciclati, sia nella prospettiva più ampia di filiere produttive distribuite e prossime al punto di utilizzo. Un aspetto altrettanto importante è la dimensione della misurazione e del controllo, anch'essa centrale nell'area delle Tecnologie e dei Sistemi di Lavorazione. L'adozione di

nuove tecnologie come la manifattura additiva richiede metodi innovativi di validazione, in grado di tenere conto delle specificità del processo: rugosità e anisotropia dei materiali, tolleranze geometriche su strutture complesse, variazioni indotte dai parametri di stampa. Tecniche di metrologia avanzata, reverse engineering e digital twin consentono di colmare il divario tra modello virtuale e componente reale, assicurando la qualità e l'affidabilità necessarie per il trasferimento industriale. In questo contesto, il lavoro di ricerca presentato in questa tesi si sviluppa proprio nell'ottica dei sistemi di lavorazione moderni, considerando la manifattura additiva non come un'isola a sé stante, ma come parte di un ecosistema produttivo integrato. L'obiettivo è stato duplice: da un lato, esplorare e sfruttare le potenzialità dell'additivo nella realizzazione di geometrie complesse e di componenti multifunzionali; dall'altro, verificare concretamente le condizioni di trasferibilità dei risultati, attraverso validazioni sperimentali, prove di laboratorio e la costruzione di un'infrastruttura sperimentale dedicata. Questo approccio metodologico, che tiene insieme concetti di progettazione, materiali, processi e sistemi, rappresenta il filo conduttore dell'intero percorso di ricerca.

2.2.1 Additive Manufacturing: definizione e classificazione

La manifattura additiva (Additive Manufacturing, AM) è definita dallo standard internazionale ISO/ASTM 52900 come “l'insieme dei processi che uniscono materiali per realizzare oggetti a partire da dati di un modello tridimensionale, solitamente attraverso la deposizione strato su strato, a differenza dei metodi sottrattivi e formativi tradizionali”. Questa definizione mette in evidenza due aspetti chiave. Da un lato, la logica costruttiva layer-by-layer, che consente di impiegare esclusivamente il materiale necessario, riducendo gli sprechi e abilitando configurazioni geometriche altrimenti non realizzabili. Dall'altro, l'origine digitale del processo, in cui il modello CAD rappresenta sempre il punto di partenza: esso viene discretizzato, trasformato in un insieme di strati mediante software di slicing e infine inviato alla macchina di produzione. Per garantire chiarezza terminologica e uniformità a livello scientifico e industriale, lo stesso documento ISO/ASTM 52900 propone una classificazione dei processi AM in sette categorie principali, che costituiscono oggi il riferimento universalmente accettato. Esse sono:

1. Powder Bed Fusion (PBF) – processi basati sulla fusione selettiva di un letto di polvere tramite una sorgente energetica, tipicamente laser o fascio elettronico.
2. Directed Energy Deposition (DED) – processi in cui il materiale, in forma di filo o polvere, viene depositato e fuso simultaneamente da una sorgente energetica concentrata.
3. Material Extrusion (ME) – tecniche fondate sull’estrusione controllata di un materiale termoplastico o composito attraverso un ugello riscaldato.
4. Material Jetting (MJ) – processi che prevedono la deposizione selettiva di microgocce di materiale, successivamente solidificate.
5. Binder Jetting (BJ) – tecniche basate sulla deposizione di un legante liquido su un letto di particelle solide, seguite da post-processi di sinterizzazione o infiltrazione.
6. Sheet Lamination (SL) – processi che utilizzano la sovrapposizione e la giunzione di fogli di materiale, successivamente rifilati secondo la geometria desiderata.
7. Vat Photopolymerization (VP) – tecniche che sfruttano la solidificazione fotoindotta di resine liquide mediante radiazioni ultraviolette o luce proiettata.

Questa suddivisione non è soltanto tassonomica, ma riflette le profonde differenze in termini di principi fisici, materiali impiegabili, potenzialità e limiti applicativi. Ciascuna categoria, infatti, si colloca in un differente stadio di maturità tecnologica (Technology Readiness Level, TRL) e risponde a esigenze specifiche in ambito produttivo. Nei paragrafi successivi, tali famiglie verranno analizzate in maniera approfondita. Per ognuna saranno descritti i principi di funzionamento, le principali varianti tecnologiche (come ad esempio SLS, SLM, SLA, FDM, EBM, LENS), i materiali maggiormente utilizzati e i relativi campi applicativi, senza trascurare i limiti e le sfide ancora aperte. Questo percorso consentirà di collocare la manifattura additiva non soltanto come insieme di tecniche di fabbricazione, ma come vero e proprio paradigma produttivo emergente.

2.2.1.1 Powder Bed Fusion (PBF)

Tra le sette categorie individuate dallo standard ISO/ASTM 52900, la Powder Bed Fusion (PBF) rappresenta una delle famiglie più consolidate e ampiamente diffuse nell'industria. Essa si basa sull'impiego di un letto di polvere, polimerica o metallica, che viene selettivamente fuso o sinterizzato da una sorgente energetica ad alta densità, tipicamente un laser o un fascio di elettroni. Il processo avviene in maniera iterativa: uno strato di polvere viene steso su un piano di lavoro e la sorgente energetica ne consolida le aree corrispondenti alla sezione del modello digitale; successivamente il piano si abbassa e un nuovo strato di polvere viene distribuito, ripetendo la sequenza fino alla realizzazione completa del componente. All'interno di questa famiglia ricadono diverse varianti tecnologiche, oggi ampiamente utilizzate in contesti industriali e accademici. La Selective Laser Sintering (SLS), destinata prevalentemente a polimeri, utilizza un raggio laser per sinterizzare le particelle senza arrivare alla fusione completa. Essa consente di ottenere componenti con buone proprietà meccaniche e un'elevata libertà geometrica, spesso impiegati per prototipazione funzionale e per piccole serie produttive. Una sua evoluzione è rappresentata dalla Multi Jet Fusion (MJF), sviluppata più recentemente, che sfrutta agenti chimici e fonti di calore per migliorare la velocità e la qualità del processo, producendo parti isotrope con buone finiture superficiali. Nel caso dei metalli, la tecnologia di riferimento è la Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB), nota anche come Selective Laser Melting (SLM), in cui la polvere metallica viene fusa completamente dal laser, generando componenti ad alta densità con proprietà meccaniche comparabili a quelle ottenibili tramite processi tradizionali. Materiali come titanio, alluminio, superleghe a base di nichel e acciai inossidabili sono comunemente utilizzati, con applicazioni che spaziano dal settore aerospaziale al biomedicale. Una variante di particolare rilievo è l'Electron Beam Melting (EBM), che impiega un fascio elettronico in condizioni di vuoto. Questa configurazione riduce il rischio di ossidazione e permette di lavorare materiali reattivi come le leghe di titanio, rendendo la tecnologia particolarmente adatta alla produzione di impianti biomedicali personalizzati e componenti aeronautici. Pur offrendo vantaggi significativi in termini di complessità geometrica, prestazioni meccaniche e possibilità di personalizzazione,

i processi PBF presentano anche alcune criticità. Tra queste si annoverano l'accumulo di tensioni residue dovute ai forti gradienti termici, la necessità di trattamenti termici post-processo, nonché la gestione dei parametri di processo per garantire qualità costante. Inoltre, la finitura superficiale dei pezzi ottenuti può richiedere lavorazioni aggiuntive, soprattutto in applicazioni ad alte prestazioni. Nonostante tali sfide, la PBF si configura come una tecnologia ormai matura, con un livello di prontezza elevato e un ruolo di primo piano nella produzione di componenti avanzati, in particolare nei settori in cui l'alleggerimento, la complessità geometrica e l'affidabilità strutturale costituiscono fattori competitivi decisivi.

Tecnologia	Tipo materiali principali	Sorgente energetica	Vantaggi	Limiti
Selective Laser Sintering (SLS)	Polimeri termoplastici (es. PA12, TPU)	Laser	Alta libertà geometrica; polvere autoportante; buona robustezza per prototipazione funzionale	Finitura da migliorare; proprietà meccaniche inferiori ai metalli; accuratezza dipendente dai parametri
Multi Jet Fusion (MJF)	Polimeri termoplastici (es. PA12, TPU)	Agenti di fusione + IR	Buona isotropia; velocità elevata; qualità superficiale superiore a SLS	Limitata ai polimeri; dipendenza da agenti/termica; palette materiali più ristretta
Selective Laser Melting (SLM / PBF-LB)	Metalli e leghe (Ti-6Al-4V, Al, Ni-base, inox)	Laser	Alta densità; proprietà meccaniche elevate; componenti strutturali	Supporti necessari; tensioni residue; post-processi (HT/HIP/finitura) obbligati
Electron Beam	Metalli reattivi (leghe di)	Fascio elettronico	Ridotto rischio ossidazione; minori	Rugosità elevata; risoluzione limitata; costo

Melting (EBM)	titanio, Co-Cr, ecc.)	(vuoto, preriscaldato)	deformazioni; adatta a biomedicale/aerospazio	polveri/impianto; palette materiali più ristretta

Tabella 1: Comparazione delle tecnologie Powder Bed Fusion (PBF).

2.2.1.2 Directed Energy Deposition (DED)

La Directed Energy Deposition (DED) è una categoria di processi di manifattura additiva che prevede l'apporto diretto di materiale, in forma di polvere o filo, il quale viene fuso simultaneamente nel punto di deposizione grazie a una sorgente energetica concentrata, come un laser, un arco elettrico o un fascio di elettroni. A differenza della Powder Bed Fusion, in cui la geometria viene definita selezionando le aree da fondere in un letto di polvere preesistente, nella DED il materiale e l'energia vengono somministrati nello stesso istante, consentendo una costruzione più flessibile e continua. Questo approccio rende la tecnologia particolarmente adatta non solo alla realizzazione di componenti di grande formato, ma anche a operazioni di riparazione, che costituiscono una delle applicazioni più rilevanti in ambito industriale. Tra le implementazioni più note vi sono il Laser Engineered Net Shaping (LENS) e il Laser Metal Deposition (LMD), entrambe sviluppate negli anni '90 come evoluzione delle tecniche di cladding laser. Questi processi permettono di costruire direttamente nuove parti metalliche o di aggiungere materiale su componenti esistenti, con la possibilità di generare strutture a gradiente di composizione e di proprietà. L'utilizzo di sistemi a cinque assi e l'alimentazione controllata di polveri diverse consentono infatti la realizzazione di componenti multimateriale, caratteristica difficilmente raggiungibile con altre tecnologie additive. Inoltre, l'elevato tasso di deposizione tipico della DED consente di ridurre i tempi di fabbricazione, favorendo l'impiego in contesti produttivi che richiedono rapidità ed efficienza. Nonostante questi vantaggi, la DED presenta alcune criticità. La precisione geometrica risulta inferiore a quella dei processi a letto di polvere, e i componenti ottenuti mostrano generalmente una maggiore rugosità superficiale, rendendo necessario un intervento di rifinitura mediante lavorazioni sottrattive. Inoltre, la presenza di forti gradienti termici durante la fusione può indurre tensioni residue elevate e deformazioni, che compromettono la stabilità dimensionale. Per migliorare le prestazioni finali, i componenti realizzati tramite DED richiedono spesso trattamenti post-processo, tra cui trattamenti termici e Hot Isostatic Pressing

(HIP), finalizzati a uniformare la microstruttura, ridurre le tensioni residue e aumentare la duttilità. In termini applicativi, la DED trova impiego soprattutto nei settori aerospaziale, energetico e della manutenzione industriale, dove la possibilità di riparare componenti costosi o critici (come pale di turbine, stampi o elementi strutturali di grandi dimensioni) rappresenta un vantaggio competitivo determinante. Sebbene la tecnologia non raggiunga i livelli di accuratezza e finitura propri della PBF, la sua flessibilità e la capacità di depositare materiali differenti nello stesso processo la rendono una soluzione strategica per applicazioni avanzate e personalizzate.

Tecnologia	Tipo materiali principali	Sorgente energetica	Vantaggi	Limiti
Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Polveri metalliche (acciai, Ti-6Al-4V, superleghe)	Laser	Alta flessibilità; parti grandi; multimateriale e gradienti; possibilità di riparazioni	Rugosità elevata; tensioni residue; post-processi necessari
Laser Metal Deposition (LMD)	Polveri o filo metallici (acciai, leghe Ni, Co, Ti)	Laser	Buona precisione; elevato tasso di deposizione; riparazioni e riporti funzionali	Accuratezza inferiore a PBF; finitura scadente; deformazioni termiche
DED con arco elettrico (WAAM)	Filo metallico (acciai, Al, Ti)	Arco elettrico (MIG/TIG)	Alto tasso di deposizione; basso costo feedstock; componenti molto grandi	Scarsa accuratezza; forte rugosità; necessità di lavorazioni meccaniche
DED con fascio elettronico	Polveri o fili metallici conduttivi	Fascio elettronico in vuoto	Rapido raffreddamento; microstrutture fini; adatta a leghe reattive (Ti, Al)	Alti costi impianto; ambiente in vuoto; limiti dimensionali

Tabella 2: Comparazione delle tecnologie Directed Energy Deposition (DED).

2.2.1.3 Vat Photopolymerization (VP)

La Vat Photopolymerization (VP) è una delle tecnologie additive più consolidate e rappresenta la prima forma di stampa 3D ad aver trovato applicazioni industriali. Il principio di base consiste nella fotopolimerizzazione di una resina liquida contenuta in una vasca, che viene solidificata selettivamente tramite una sorgente luminosa, generalmente un laser ultravioletto o un proiettore digitale. La costruzione del pezzo avviene strato dopo strato: ogni sezione del modello digitale viene polimerizzata, il piano si abbassa e un nuovo strato di resina viene esposto alla radiazione fino a completare l'intero componente. All'interno di questa categoria rientrano principalmente due varianti: la Stereolitografia (SLA), che utilizza un fascio laser UV per polimerizzare localmente la resina con elevata precisione, e la Digital Light Processing (DLP), che sfrutta invece un proiettore digitale capace di polimerizzare interi strati contemporaneamente, incrementando la velocità del processo. Esistono anche soluzioni basate sulla Mask Projection Stereolithography, nelle quali un pannello LCD funge da maschera dinamica interposta tra la sorgente luminosa e la vasca, consentendo di ottenere una buona qualità dimensionale e una riduzione dei tempi di esposizione. I principali vantaggi della VP risiedono nell'alta precisione dimensionale, nella capacità di riprodurre dettagli fini e nella qualità delle superfici, generalmente molto lisce rispetto ad altre tecnologie additive. Tali caratteristiche rendono questa famiglia particolarmente adatta a settori come il biomedicale (scaffold, modelli anatomici, protesi personalizzate), la microfluidica, l'orologeria e il design di prodotto, dove la complessità geometrica e la qualità estetica sono requisiti essenziali. Tuttavia, la VP presenta anche limiti significativi: la gamma di materiali utilizzabili è limitata ai fotopolimeri, che risultano spesso fragili, sensibili all'umidità e alla radiazione UV e quindi poco adatti ad applicazioni strutturali o all'impiego in ambienti esterni. Inoltre, la resina liquida è generalmente costosa, richiede particolari condizioni di manipolazione e deve essere seguita da post-trattamenti, come la pulizia e la polimerizzazione secondaria in forno UV, per ottenere le prestazioni desiderate. Nonostante queste criticità, la Vat Photopolymerization continua a rappresentare una tecnologia di riferimento per applicazioni ad alta precisione, e la sua evoluzione recente, legata allo sviluppo di

resine ingegneristiche e biocompatibili, ne sta ampliando progressivamente le potenzialità in ambiti industriali e clinici.

2.2.1.4 Material Jetting (MJ)

La Material Jetting (MJ) è una tecnologia di manifattura additiva che si ispira al principio delle stampanti inkjet, ma con la differenza che, invece di inchiostro, vengono depositate microgocce di materiale funzionale. Queste gocce, polimeriche o composite, vengono rilasciate con estrema precisione sugli strati successivi e solidificate mediante radiazione ultravioletta o processi termici, consentendo la costruzione di componenti tridimensionali con elevata risoluzione e finitura superficiale. Uno dei principali punti di forza di questa tecnologia è la possibilità di realizzare parti multimateriale e multicolore, caratteristica che la distingue dalle altre famiglie additive e che apre scenari applicativi interessanti in ambito di prototipazione estetica, design industriale e biomedicale. La capacità di integrare materiali con proprietà diverse nello stesso componente consente inoltre di ottenere prototipi funzionali dotati di sezioni rigide e flessibili, oppure con gradienti di colore e texture avanzate. Tuttavia, i limiti principali della MJ risiedono nei costi elevati dei materiali e delle macchine, nella fragilità dei polimeri fotopolimerizzati e nella ridotta durabilità delle parti, che ne circoscrivono l'uso prevalentemente alla prototipazione e alla validazione estetica o ergonomica.

2.2.1.5 Binder Jetting (BJ)

La Binder Jetting (BJ) è una tecnologia di manifattura additiva che prevede la deposizione selettiva di un legante liquido su un letto di particelle solide, generalmente polveri metalliche, sabbia o ceramiche. Il legante, rilasciato da testine a getto simili a quelle delle stampanti inkjet, consolida localmente le particelle dando forma agli strati successivi del componente. Una volta completata la stampa, il pezzo grezzo (definito “green part”) richiede tipicamente un post-processo di sinterizzazione o di infiltrazione con metalli a basso punto di fusione (ad esempio rame) per ottenere le proprietà meccaniche desiderate. L'assenza di una sorgente termica durante la fase di costruzione offre alcuni vantaggi peculiari: innanzitutto la produttività elevata, che rende la tecnologia interessante per la produzione in serie, e la possibilità di fabbricare componenti di grandi dimensioni con costi

relativamente contenuti. Inoltre, il processo non necessita di strutture di supporto, poiché il letto di polvere funge da sostegno naturale, facilitando la rimozione del pezzo e ampliando la libertà geometrica. Tuttavia, la BJ presenta limiti significativi: le proprietà meccaniche finali dipendono fortemente dal tipo di polvere e dalla qualità del post-processo, risultando spesso inferiori a quelle ottenibili con tecniche come la PBF o la DED. La presenza di porosità residua e i ritiri volumetrici durante la sinterizzazione possono compromettere la precisione dimensionale, rendendo necessario un accurato controllo delle fasi successive. Nonostante queste criticità, la Binder Jetting si sta affermando come una tecnologia strategica per settori quali l'automotive e la fonderia, grazie alla possibilità di produrre rapidamente anime in sabbia per colata o componenti metallici a basso costo, nonché per applicazioni biomedicali e prototipali in cui la personalizzazione e la produttività sono requisiti fondamentali.

2.2.1.6 Sheet Lamination (SL)

La Sheet Lamination (SL) è una famiglia di processi di manifattura additiva che si basa sulla sovrapposizione e giunzione di fogli di materiale, successivamente sagomati secondo le sezioni del modello digitale. I fogli, che possono essere di carta, polimeri, metalli o compositi, vengono tagliati e uniti tramite adesivi, pressione o saldatura, fino alla costruzione completa del componente. Una delle varianti più note è la Laminated Object Manufacturing (LOM), sviluppata già negli anni Settanta, che utilizza principalmente carta o film plastici stratificati e incollati, rifilati strato per strato con lame o laser. Questa tecnologia ha avuto un certo successo nella prototipazione rapida grazie ai costi contenuti e alla possibilità di produrre modelli di grandi dimensioni in tempi ridotti. Più recentemente sono state introdotte soluzioni basate su fogli metallici o ceramici, giuntati tramite ultrasuoni o processi termici, che consentono di ottenere componenti multistrato con proprietà funzionali specifiche. I principali vantaggi della Sheet Lamination risiedono nella velocità di produzione, nella possibilità di lavorare materiali diversi, anche compositi, e nella ridotta necessità di supporti, poiché la struttura viene stabilizzata man mano che si costruisce. Inoltre, i costi di macchina e di materiale sono inferiori rispetto ad altre tecniche additive, rendendola una soluzione interessante per modelli architettonici, prototipi estetici o inserti funzionali. Tuttavia, i limiti

principali riguardano la scarsa resistenza meccanica dei componenti, che dipende fortemente dalla qualità del legame tra i fogli, e la difficoltà nella realizzazione di geometrie cave o molto complesse. Anche la finitura superficiale è generalmente modesta e richiede interventi post-processo. Nonostante non abbia raggiunto la diffusione industriale di altre tecnologie additive, la Sheet Lamination mantiene un ruolo di nicchia in contesti in cui velocità, economicità e flessibilità di materiali costituiscono fattori determinanti. Le prospettive di sviluppo sono legate in particolare all'utilizzo di fogli metallici o ceramici e alla possibilità di integrare funzionalità aggiuntive durante la laminazione, aprendo la strada a nuove applicazioni nell'elettronica, nei dispositivi microfluidici e nei sistemi multistrato avanzati.

2.2.1.7 Material Extrusion (ME)

La Material Extrusion (ME) è la categoria di manifattura additiva più diffusa a livello globale e comprende la tecnologia comunemente nota come Fused Filament Fabrication (FFF) o Fused Deposition Modeling (FDM). Il principio consiste nell'estrusione controllata di un filamento termoplastico fuso attraverso un ugello riscaldato, che deposita il materiale strato dopo strato seguendo le traiettorie definite dal modello digitale. Questa apparente semplicità nasconde però una notevole complessità ingegneristica, poiché la qualità e le proprietà del componente finale dipendono da numerosi parametri, tra cui temperatura di estrusione e del piano di stampa, velocità di deposizione, spessore degli strati, strategie di riempimento, condizioni ambientali e caratteristiche reologiche del materiale. La tecnologia FFF si è affermata rapidamente grazie ai costi contenuti, alla semplicità di utilizzo e all'ampia disponibilità di materiali, diventando uno strumento di riferimento per la prototipazione rapida e la validazione di concept. Negli ultimi anni la sua evoluzione ha ampliato i campi applicativi: da un lato l'introduzione di filamenti caricati con fibre corte di carbonio, vetro o aramide ha permesso di incrementare rigidità e resistenza, dall'altro lo sviluppo di sistemi per la co-deposizione di fibre continue ha aperto prospettive per componenti semi-strutturali con elevati rapporti resistenza/peso, pur con limiti legati alla geometria realizzabile. In parallelo, l'impiego di polimeri ad alte prestazioni come poliammidi, policarbonato e PEEK ha esteso l'utilizzo dell'estrusione a contesti più esigenti,

mentre i filamenti con filler naturali o derivati da scarti agroalimentari hanno contribuito a esplorare scenari di sostenibilità ed economia circolare. I vantaggi principali della ME risiedono nell'accessibilità, nella flessibilità e nella capacità di iterare rapidamente tra progettazione e produzione, ma la tecnologia presenta anche limiti strutturali rilevanti, come l'anisotropia meccanica dovuta alla scarsa adesione interlaminare, la porosità residua, la rugosità superficiale e la precisione dimensionale generalmente inferiore rispetto a tecniche come SLS o PBF-LB. Nonostante queste criticità, la Material Extrusion si è consolidata come una piattaforma strategica per la ricerca e lo sviluppo di nuove applicazioni, specialmente in ambito accademico e sperimentale, grazie alla possibilità di coniugare costi ridotti con la sperimentazione di geometrie complesse e materiali innovativi.

2.2.1.7.1 Tecniche emergenti basate su Material Extrusion: Direct Ink Writing (DIW) e Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)

Accanto alla Fused Filament Fabrication, la famiglia della Material Extrusion comprende anche implementazioni più recenti ed emergenti, sviluppate prevalentemente in ambito di ricerca, tra cui la Direct Ink Writing (DIW) e la Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF). La DIW si basa sull'estrusione di inchiostri viscoplastici o paste funzionali, progettati in modo da scorrere attraverso l'ugello durante la deposizione e solidificare rapidamente una volta rilasciati. Questa configurazione consente di lavorare un'ampia gamma di materiali non disponibili sotto forma di filamenti, come paste ceramiche, compositi avanzati o bioink, rendendo la tecnologia particolarmente interessante per applicazioni biomedicali e di biofabbricazione, nonché per la realizzazione di strutture porose e funzionalizzate. La FEF rappresenta invece un'evoluzione del concetto di estrusione di paste, in cui la deposizione avviene in ambiente a temperatura inferiore a 0 °C: in queste condizioni la sospensione colloidale solidifica immediatamente per congelamento, permettendo di costruire forme complesse e di grandi dimensioni con ridotta deformazione. Questa tecnica è stata sviluppata soprattutto per la lavorazione di materiali ceramici e compositi destinati ad applicazioni estreme, come componenti aerospaziali esposti ad alte temperature o parti funzionali per sistemi energetici avanzati. Sebbene entrambe le tecnologie

presentino ancora un livello di maturità tecnologica limitato rispetto alle implementazioni più consolidate, esse ampliano le potenzialità della Material Extrusion, aprendo la strada a scenari innovativi in cui geometrie complesse e materiali non convenzionali possono essere combinati in soluzioni ingegneristiche su misura.

2.2.1.8 Considerazioni di sintesi sulle tecnologie additive

La panoramica delle sette famiglie di processi individuate dallo standard ISO/ASTM 52900, insieme alle varianti più rilevanti e alle implementazioni emergenti, mette in evidenza come la manifattura additiva non possa essere considerata una tecnologia unitaria, bensì un insieme articolato di approcci che rispondono a principi fisici differenti e a esigenze applicative eterogenee. Se le tecniche a letto di polvere hanno raggiunto livelli di maturità industriale elevati, trovando applicazioni consolidate nei settori aerospaziale, biomedicale e dell'energia, altre come la Material Extrusion o la Vat Photopolymerization rimangono protagoniste soprattutto in ambito prototipale, di ricerca e di personalizzazione spinta, mentre soluzioni di nicchia quali la Sheet Lamination o le implementazioni di Direct Ink Writing e Freeze-form Extrusion Fabrication rappresentano ancora strumenti sperimentali con potenzialità selettive. Ciò che accomuna queste tecnologie è la possibilità di liberare la progettazione dai vincoli imposti dalle tecniche tradizionali, introducendo nuove libertà geometriche e funzionali. Tuttavia, le differenze in termini di materiali processabili, proprietà dei componenti, accuratezza dimensionale, finitura superficiale, costi e tempi di produzione rendono necessaria un'analisi critica che tenga conto delle reali potenzialità e dei limiti di ciascun approccio. In quest'ottica, un aspetto determinante è rappresentato dai materiali disponibili e dalle loro prestazioni: essi non solo definiscono i campi applicativi possibili, ma condizionano anche le prospettive di sviluppo futuro delle tecnologie additive.

2.2.1.9 Polimeri per la manifattura additiva

I polimeri rappresentano la categoria di materiali più diffusa nella manifattura additiva, grazie alla loro versatilità, disponibilità commerciale e relativa facilità di lavorazione. Possono essere distinti in due grandi gruppi: termoplastici e

fotopolimeri termoindurenti. I termoplastici costituiscono i materiali più comuni nei processi di Material Extrusion e Powder Bed Fusion. Tra i più utilizzati si annoverano PLA (acido polilattico), ABS (acrilonitrile butadiene styrene), PETG e ASA, impiegati soprattutto per prototipazione rapida e attrezzaggi, grazie ai costi contenuti e alla buona processabilità. Essi offrono però prestazioni meccaniche e termiche limitate, che ne circoscrivono l'uso a componenti non strutturali. Accanto a questi si collocano i polimeri tecnici ad alte prestazioni, come poliammidi (PA), policarbonato (PC), PEEK e PEKK, capaci di garantire elevata resistenza meccanica, stabilità termica e resistenza chimica, aprendo l'additive manufacturing a settori più esigenti come l'aerospazio, l'automotive e il biomedicale. Diversa è la natura dei fotopolimeri, utilizzati nei processi di Vat Photopolymerization (SLA, DLP) e in parte nel Material Jetting. Questi materiali si presentano in forma liquida e solidificano attraverso reazioni fotoindotte di reticolazione, che conferiscono al pezzo elevata precisione dimensionale, superfici molto lisce e possibilità di riprodurre dettagli fini. Tuttavia, la polimerizzazione è irreversibile: i fotopolimeri appartengono infatti alla classe dei termoindurenti e risultano più fragili e meno resistenti agli agenti ambientali rispetto ai termoplastici, oltre a richiedere post-trattamenti di polimerizzazione secondaria per garantire le prestazioni finali. Negli ultimi anni si è registrato un crescente interesse anche verso i polimeri biodegradabili e biocompatibili, come il PLA derivato da risorse rinnovabili, e verso i filamenti caricati con filler naturali o derivati da scarti agroalimentari, in un'ottica di manifattura sostenibile ed economia circolare. Questa evoluzione ha ampliato il campo applicativo dei polimeri, rendendoli una piattaforma fondamentale non solo per la prototipazione e la ricerca, ma anche per applicazioni funzionali avanzate in settori ingegneristici e biomedicali.

2.2.1.9.1 Compositi a fibre corte e fibre continue

Un'evoluzione significativa nell'ambito dei materiali polimerici per manifattura additiva è rappresentata dai compositi rinforzati, sviluppati con l'obiettivo di migliorare le proprietà meccaniche dei componenti stampati. Si distinguono principalmente due approcci: il caricamento della matrice con fibre corte e l'integrazione di fibre continue durante la deposizione. I compositi a fibre corte, generalmente in carbonio, vetro o aramide, vengono ottenuti mediante l'estrusione

di filamenti già caricati con particelle fibrose di lunghezza micrometrica o millimetrica. Questa configurazione consente di incrementare modulo elastico e resistenza rispetto ai polimeri puri, mantenendo al contempo una buona processabilità. Tuttavia, la distribuzione delle fibre lungo la direzione di estrusione introduce anisotropie locali e può generare notch effects che riducono la resistenza a frattura, rendendo necessaria un'attenta progettazione delle traiettorie di deposizione. I compositi a fibre continue rappresentano invece un'evoluzione più recente e si basano su sistemi di stampa in grado di co-depositare fibre di carbonio, vetro o Kevlar insieme alla matrice polimerica. In questo caso, la disposizione delle fibre può essere orientata lungo le direzioni principali di carico, ottenendo rapporti resistenza/peso paragonabili a quelli dei laminati tradizionali. I vantaggi sono significativi in termini di prestazioni strutturali, ma la complessità del processo limita le geometrie realizzabili e richiede strategie di design dedicate, compatibili con i vincoli di deposizione. Nonostante queste sfide, i compositi rinforzati hanno ampliato notevolmente le possibilità applicative della manifattura additiva, consentendo la produzione di componenti semi-strutturali in settori quali l'aerospazio, l'automotive e l'energia, dove la riduzione di peso e l'ottimizzazione del rapporto rigidità/resistenza rappresentano fattori chiave.

2.2.1.9.2 Filler sostenibili e materiali a basso impatto ambientale

Negli ultimi anni, in parallelo con l'attenzione crescente verso la sostenibilità dei processi produttivi, la ricerca in manifattura additiva ha dedicato particolare interesse allo sviluppo di materiali con filler naturali o derivati da scarti industriali e agroalimentari. Questi materiali si pongono come alternativa ai polimeri convenzionali e ai compositi sintetici, con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale e favorire modelli di economia circolare. Tra le soluzioni più studiate vi sono i filamenti caricati con polveri di legno, fibre vegetali o fibre naturali come lino e canapa, che consentono di ottenere componenti alleggeriti e caratterizzati da particolari effetti estetici. Altri approcci prevedono l'impiego di filler derivati da scarti organici o residui di lavorazioni agroalimentari, come bucce di caffè, gusci di noccioli o fibre di scarto, che oltre a valorizzare sottoprodotti a basso costo introducono nuove funzionalità meccaniche o termiche. L'integrazione di cariche minerali o naturali può inoltre migliorare proprietà specifiche, come la resistenza

all'abrasione o la stabilità dimensionale, pur con un impatto variabile sulle prestazioni meccaniche complessive. Sebbene tali materiali non abbiano ancora raggiunto lo stesso livello di prestazioni dei compositi rinforzati con fibre sintetiche, essi rappresentano una prospettiva promettente per la manifattura additiva sostenibile, soprattutto in applicazioni non strutturali o in prodotti destinati a cicli di vita brevi. L'interesse industriale verso questi filler è in costante crescita, alimentato sia da esigenze normative e di mercato, sia dalla possibilità di posizionarsi in settori emergenti come il design ecocompatibile, la produzione personalizzata a basso impatto ambientale e i dispositivi biomedicali riassorbibili o temporanei.

2.2.1.10 Metalli e leghe per la manifattura additiva

I metalli costituiscono una delle categorie di materiali più rilevanti per la manifattura additiva, in particolare nei processi a Powder Bed Fusion (PBF) e Directed Energy Deposition (DED), che ne consentono l'impiego in applicazioni ad alte prestazioni. Le leghe più utilizzate appartengono a quattro grandi famiglie: leghe di titanio, superleghe a base di nichel, leghe di alluminio e acciai. Le leghe di titanio, come la Ti-6Al-4V, rappresentano un materiale di riferimento per applicazioni aerospaziali e biomedicali grazie all'elevato rapporto resistenza/peso, alla biocompatibilità e alla resistenza alla corrosione; tuttavia, il loro costo elevato e la difficoltà di lavorazione ne limitano la diffusione a settori ad alto valore aggiunto. Le superleghe a base di nichel (Inconel 625, 718 e altre varianti) sono ampiamente impiegate in turbine aeronautiche, motori e impianti energetici, dove le proprietà meccaniche e la resistenza all'ossidazione ad alte temperature sono requisiti fondamentali. Le leghe di alluminio hanno trovato un crescente impiego nella manifattura additiva grazie alla loro leggerezza e conducibilità termica, risultando strategiche per il settore automobilistico e aerospaziale; la sfida principale resta la loro elevata riflettività e conducibilità termica, che rende complessa la fusione laser. Infine, gli acciai (inossidabili, maraging, H13) rappresentano una soluzione versatile per applicazioni che richiedono resistenza meccanica, durabilità e buone proprietà di lavorabilità, con un ampio spettro di utilizzi che va dagli stampi per iniezione fino a componenti strutturali. In generale, i metalli stampati in 3D possono raggiungere densità prossime al 100% e proprietà

meccaniche paragonabili o superiori a quelle dei materiali lavorati con metodi convenzionali, a condizione che vengano adottati adeguati trattamenti post-processo, come trattamenti termici, Hot Isostatic Pressing (HIP) e lavorazioni meccaniche di finitura. Tra i limiti più rilevanti si annoverano i costi elevati delle polveri, la necessità di ambienti controllati (gas inerte o vuoto), la gestione delle tensioni residue e la complessità nella produzione di componenti di grande formato. Nonostante queste criticità, la manifattura additiva di metalli sta rapidamente maturando, assumendo un ruolo sempre più strategico nei settori aerospaziale, biomedicale, automobilistico ed energetico, dove l'ottimizzazione delle prestazioni e la riduzione dei pesi costituiscono vantaggi competitivi cruciali.

2.2.1.11 Ceramiche e materiali compositi avanzati

Le ceramiche rappresentano una classe di materiali di grande interesse per la manifattura additiva grazie alle loro proprietà uniche, tra cui elevata durezza, resistenza all'usura, stabilità chimica e capacità di mantenere prestazioni anche a temperature estremamente elevate. Tali caratteristiche le rendono particolarmente adatte per applicazioni in settori strategici come l'aerospazio, l'energia e il biomedicale. Tuttavia, la natura fragile e la difficoltà di lavorazione tradizionale hanno storicamente limitato la diffusione delle ceramiche nei processi produttivi; la manifattura additiva ha aperto nuove prospettive, consentendo di realizzare geometrie complesse e strutture porose che sarebbero difficilmente ottenibili con tecniche convenzionali. Le tecnologie più utilizzate per la fabbricazione di componenti ceramici sono la Vat Photopolymerization, mediante resine caricate con particelle ceramiche, e la Material Extrusion in forma di paste o inchiostri ad alta concentrazione solida (come avviene nella Direct Ink Writing o nella Freeze-form Extrusion Fabrication). Una volta stampati, i componenti richiedono cicli di debinding e sinterizzazione per eliminare il legante organico e consolidare la matrice ceramica, con l'obiettivo di ottenere microstrutture dense e proprietà meccaniche adeguate. Accanto alle ceramiche tradizionali (allumina, zirconia, carburo di silicio), si stanno diffondendo compositi ceramico-polimerici e ceramico-metallici, progettati per combinare le proprietà di ciascuna fase: elevata resistenza termica e meccanica da un lato, tenacità e facilità di lavorazione dall'altro. Questi materiali compositi avanzati trovano applicazioni in dispositivi

biomedicali (scaffold ossei, protesi dentali), in sistemi energetici (componenti per celle a combustibile, turbine ad alta efficienza) e in applicazioni aerospaziali dove la combinazione di leggerezza, stabilità e resistenza è cruciale. Le sfide principali riguardano il controllo della porosità residua, i ritiri volumetrici in sinterizzazione e la ripetibilità del processo, aspetti che richiedono ancora un notevole sforzo di ricerca e ottimizzazione. Nonostante queste criticità, i progressi nel campo delle ceramiche additive stanno aprendo scenari innovativi, consolidando il ruolo di questi materiali come soluzioni ad alto valore aggiunto in applicazioni ingegneristiche avanzate.

2.2.1.12 Potenzialità e limiti della manifattura additiva

La manifattura additiva presenta una serie di potenzialità trasversali che ne spiegano la rapida diffusione negli ultimi due decenni. Tra i principali vantaggi vi è l'elevata libertà progettuale, che consente la realizzazione di geometrie complesse, reticolari o topologie ottimizzate, impossibili da ottenere con i metodi tradizionali. La costruzione layer-by-layer permette inoltre una significativa riduzione degli sprechi di materiale, con impatti positivi sulla sostenibilità dei processi, soprattutto se confrontata con i metodi sottrattivi. Un ulteriore aspetto riguarda la personalizzazione spinta dei prodotti, che trova applicazioni di rilievo in settori come il biomedicale (impianti su misura) e l'aerospazio (componenti ottimizzati per specifici requisiti). La manifattura additiva facilita inoltre la produzione on-demand e locale, riducendo la dipendenza da filiere lunghe e aprendo prospettive verso modelli produttivi distribuiti. Dal punto di vista della ricerca, essa costituisce un potente strumento per l'esplorazione di nuove geometrie funzionali e materiali innovativi, come i compositi avanzati o i filler sostenibili. Accanto a queste potenzialità, esistono tuttavia limiti ancora significativi. Le proprietà meccaniche dei componenti, in particolare l'anisotropia dovuta alla stratificazione, la presenza di porosità residue e le tensioni residue indotte dai gradienti termici, possono ridurre l'affidabilità strutturale. La precisione dimensionale e la finitura superficiale risultano spesso inferiori rispetto alle lavorazioni tradizionali, rendendo necessari post-processi come trattamenti termici, infiltrazioni o lavorazioni meccaniche. Sul piano economico, i costi elevati dei materiali e delle macchine, uniti alla produttività relativamente limitata, ne frenano la diffusione su larga scala. Anche la

standardizzazione e la qualificazione dei processi rimangono sfide cruciali, poiché le prestazioni dei pezzi dipendono fortemente dai parametri di processo, dalle condizioni ambientali e dai post-trattamenti adottati. In questo contesto, un aspetto che rappresenta forse la vera cifra distintiva della manifattura additiva è la possibilità di svincolare la progettazione dai vincoli geometrici dei processi convenzionali. Grazie alla costruzione layer-by-layer è possibile realizzare strutture reticolari, configurazioni a gradiente e superfici complesse, come le lattice structures e le Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), che consentono di modulare localmente proprietà meccaniche, termiche o fluidodinamiche. Queste geometrie non solo permettono di ridurre peso e materiale mantenendo elevate prestazioni, ma aprono anche la strada a componenti multifunzionali e ottimizzati per applicazioni specifiche. Proprio da questo legame tra libertà geometrica e funzionalità deriverà l'analisi che segue, dedicata alle strutture cellulari avanzate e al loro ruolo nella progettazione ingegneristica abilitata dall'additive manufacturing.

2.2.2 Mechanical Metamaterials

Il termine Mechanical Metamaterials indica una classe di materiali ingegnerizzati la cui risposta meccanica non è determinata principalmente dalla composizione chimica, ma dalla geometria della microstruttura artificiale. A differenza dei materiali convenzionali, le proprietà emergenti nei metamateriali derivano da un'architettura interna progettata con criteri specifici, spesso impossibili da ottenere in natura. Questo approccio consente di ottenere comportamenti non convenzionali, come moduli elastici negativi, proprietà auxetiche (coefficiente di Poisson negativo), elevata capacità di assorbimento di energia o modulazioni mirate di rigidità e densità. In letteratura i metamateriali vengono distinti in diverse categorie in base alla funzionalità prevalente: metamateriali meccanici, nei quali l'architettura definisce proprietà elastiche, plastiche o di assorbimento; metamateriali acustici, che manipolano la propagazione delle onde sonore; e metamateriali termici, che regolano la conduzione e la distribuzione del calore. All'interno di questa visione, i mechanical metamaterials costituiscono il nucleo di interesse per l'ingegneria strutturale e rappresentano l'ambito in cui la manifattura

additiva ha avuto il maggiore impatto, poiché la costruzione layer-by-layer consente di realizzare microstrutture complesse e altamente controllate.

All'interno dei mechanical metamaterials, una delle categorie più rilevanti è rappresentata dalle Cellular Structures, ovvero strutture caratterizzate dalla ripetizione spaziale di celle elementari che generano una configurazione a porosità controllata. La loro peculiarità risiede nella possibilità di ottenere componenti leggeri e al tempo stesso resistenti, modulando parametri geometrici come densità relativa, spessore delle pareti e connettività delle celle. Le cellular structures possono essere classificate secondo diversi criteri. Una prima distinzione riguarda la morfologia delle celle, che possono essere aperte (con canali interconnessi, adatte ad applicazioni di scambio termico o filtrazione) o chiuse (tipiche delle schiume, con buone proprietà di isolamento termico e acustico). Un ulteriore criterio riguarda la regolarità geometrica: le strutture possono essere periodiche, basate sulla ripetizione regolare di unità identiche nello spazio, oppure stocastiche, come nel caso delle schiume naturali o sintetiche, dove la distribuzione spaziale è irregolare. Le cellular structures ingegnerizzate realizzabili mediante manifattura additiva si collocano prevalentemente nella categoria periodica, grazie alla possibilità di progettare e controllare digitalmente la geometria della cella elementare. Questo le rende strumenti potenti per la progettazione di materiali a proprietà su misura, nei quali è possibile ottenere combinazioni ottimali di resistenza, leggerezza e funzionalità aggiuntive. In letteratura si distinguono in particolare due sottocategorie principali: le Lattice Structures, caratterizzate da reticoli tridimensionali costruiti mediante elementi beam-based o surface-based, e le Schiume stocastiche ingegnerizzate, che riproducono e ottimizzano geometrie naturali come quelle delle spugne o delle ossa. Tra queste, le lattice structures hanno assunto un ruolo centrale poiché rappresentano una piattaforma ideale per esplorare la sinergia tra libertà geometrica offerta dall'additive manufacturing e prestazioni ingegneristiche avanzate.

Le Lattice Structures costituiscono una sottoclasse delle cellular structures caratterizzata da una disposizione tridimensionale regolare di celle elementari, che si ripetono nello spazio generando una struttura reticolare. La loro peculiarità è quella di combinare leggerezza e resistenza, grazie alla distribuzione del materiale

lungo traiettorie ottimizzate che consentono di ridurre la densità mantenendo adeguate prestazioni meccaniche. Le lattice structures trovano ampia applicazione in settori come l'aerospazio, l'automotive e il biomedicale, dove la riduzione di peso e la possibilità di personalizzare le proprietà locali rappresentano fattori chiave. Dal punto di vista della classificazione, esse possono essere suddivise in due principali categorie: beam-based e surface-based. Le lattice structures beam-based sono costituite da aste e giunzioni che si interconnettono a formare reticoli tridimensionali; sono relativamente semplici da progettare e analizzare e permettono un buon controllo delle proprietà meccaniche attraverso la modulazione della topologia delle aste e della densità relativa. Tuttavia, esse presentano punti di concentrazione degli sforzi nelle giunzioni, che possono ridurre la resistenza a fatica e aumentare la probabilità di collasso fragile. Le lattice structures surface-based si basano invece su superfici continue e periodiche che si estendono nello spazio tridimensionale; in questo caso il materiale è distribuito lungo superfici lisce e connesse, garantendo una maggiore uniformità nella distribuzione delle sollecitazioni e riducendo i punti di concentrazione delle tensioni. All'interno di questa seconda categoria rientrano le Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), che negli ultimi anni hanno attirato un crescente interesse scientifico e industriale per le loro proprietà geometriche e funzionali uniche.

2.2.2.1 Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)

Le Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) rappresentano una classe di superfici minimali che si ripetono periodicamente nello spazio tridimensionale, caratterizzate da curvatura media nulla e dalla capacità di suddividere lo spazio in domini interconnessi. La loro struttura continua e priva di discontinuità conferisce proprietà uniche in termini di distribuzione delle sollecitazioni, isotropia e rapporto superficie/volume, rendendole una piattaforma ideale per lo sviluppo di materiali ingegnerizzati attraverso la manifattura additiva. Dal punto di vista matematico, le TPMS sono descritte da funzioni implicite trigonometriche o polinomiali che definiscono superfici periodiche nello spazio cartesiano. Questo approccio consente di generare famiglie di strutture con parametri geometrici controllabili, quali spessore, densità relativa e connettività, adattabili alle specifiche esigenze applicative. L'interesse verso le TPMS è aumentato esponenzialmente negli ultimi

anni, non solo per le potenzialità strutturali, ma anche per l'ampio ventaglio di applicazioni multifunzionali.

Le configurazioni più studiate sono:

- Gyroid (giroide): introdotto da Alan Schoen nel 1970, è una superficie minimale priva di piani di simmetria riflettente e caratterizzata da una topologia intrecciata che garantisce connettività tridimensionale continua. Dal punto di vista meccanico, il Gyroid offre un eccellente compromesso tra rigidità e capacità di assorbimento energetico, con un comportamento pseudo-isotropo che lo rende particolarmente adatto a componenti sottoposti a carichi multiassiali. Dal punto di vista termo-fluidodinamico, l'elevato rapporto superficie/volume e i canali interconnessi lo rendono una delle configurazioni più promettenti per scambiatori di calore e reattori chimici. Numerosi studi hanno inoltre evidenziato l'idoneità del Gyroid per applicazioni biomedicali, in particolare scaffold ossei, grazie all'unione tra solidità meccanica e una porosità che favorisce la crescita e l'integrazione delle cellule.
- Diamond: anch'esso appartenente alle superfici minimali di Schoen, è caratterizzato da simmetria tetraedrica e da un'elevata efficienza strutturale. Le strutture Diamond mostrano rapporti rigidità/peso particolarmente elevati, risultando ideali per applicazioni che richiedono leggerezza senza sacrificare la stabilità meccanica, come i core per pannelli sandwich o le strutture aerospaziali. Rispetto al Gyroid, il Diamond presenta un comportamento più fragile in termini di frattura, ma offre una maggiore resistenza elastica e una deformazione più controllata sotto carico statico.
- Schwarz-P (Primitive Surface): è una superficie caratterizzata da simmetria cubica e proprietà isotrope. Dal punto di vista meccanico garantisce un buon equilibrio tra rigidità e resistenza, ma con prestazioni leggermente inferiori rispetto a Gyroid e Diamond. È spesso considerato come geometria di riferimento per studi comparativi, grazie alla sua relativa semplicità di generazione e alla buona riproducibilità sperimentale. Le configurazioni

Schwarz-P trovano applicazione in sistemi di filtrazione e scambio termico, grazie alla disposizione uniforme dei canali.

- **Lidinoid:** è una superficie minimale complessa caratterizzata da una geometria intrecciata che garantisce elevata capacità di assorbimento energetico. Dal punto di vista meccanico, le strutture Lidinoid mostrano una risposta più fragile rispetto al Gyroid e al Diamond, con collassi più repentini sotto carico, ma con una fase iniziale di deformazione utile per dissipare energia. Queste caratteristiche le rendono interessanti per applicazioni in cui l'assorbimento d'urto è un requisito fondamentale.
- **Split-P:** è una variante geometrica della Schwarz-P, caratterizzata da una distribuzione più efficiente dei carichi lungo la superficie. Dal punto di vista meccanico, consente di ottenere strutture leggere con buona resistenza a flessione e stabilità sotto compressione. Le applicazioni potenziali includono strutture sandwich e componenti soggetti a flessione controllata.
- **Neovius:** superficie caratterizzata da elevata simmetria e da una configurazione più compatta rispetto ad altre TPMS. Presenta una buona efficienza strutturale ma un comportamento fragile, con collasso repentino sotto carico. Nonostante questo limite, la geometria Neovius è oggetto di crescente interesse per applicazioni in cui la riduzione di peso è prioritaria rispetto alla capacità di deformazione plastica, come in alcuni settori aerospaziali e micro-ingegneristici.

ID	Equazione
Gyroid	$\sin(x) \cdot \cos(y) + \sin(y) \cdot \cos(z) + \sin(z) \cdot \cos(x) = 0$
Schwarz-P	$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0$
Diamond	$\sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) + \sin(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) = 0$
Lidinoid	$\sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) + \sin(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) = 0$
Split-P	$\sin(2x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) + \sin(2y) \cdot \cos(z) \cdot \sin(x) + \sin(2z) \cdot \cos(x) \cdot \sin(y) - \cos(2x) \cdot \cos(2y) - \cos(2y) \cdot \cos(2z) - \cos(2z) \cdot \cos(2x) + 0.3 = 0$

Neovius	$3[\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)] + 4 \cdot \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) = 0$

Tabella 3: Equazioni TPMS.

Nome geometria	Gyroid	Schwarz-P	Diamond	Lidinoid	Split-P	Neovius
Rappresentazione grafica						

Tabella 4: Rappresentazione grafica TPMS.

Un aspetto trasversale a tutte le TPMS è la possibilità di introdurre gradienti funzionali, variando localmente parametri come lo spessore delle pareti o la densità relativa, per adattare la risposta meccanica o fluidodinamica alle condizioni di esercizio. Questo approccio, reso possibile solo dalla manifattura additiva, consente di ottenere componenti multifunzionali e ottimizzati, in grado di coniugare leggerezza, resistenza e prestazioni avanzate. Le TPMS si configurano come una delle soluzioni più avanzate nel panorama dei mechanical metamaterials, rappresentando un paradigma progettuale che integra in modo sinergico geometria, materiale e processo produttivo. La loro versatilità le rende oggetto di crescente attenzione scientifica e industriale, con prospettive di applicazione in settori strategici che spaziano dall'aerospazio al biomedicale, dall'energia alla microfluidica. La progressione concettuale dai mechanical metamaterials alle cellular structures, fino alle lattice structures e alle Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), evidenzia come la manifattura additiva non sia soltanto un nuovo strumento di fabbricazione, ma un paradigma progettuale che permette di concepire materiali e componenti in maniera radicalmente diversa. Se i metamateriali introducono l'idea di proprietà meccaniche emergenti definite dalla geometria piuttosto che dalla composizione, le cellular structures rappresentano la traduzione pratica di questo concetto in configurazioni a celle periodiche o stocastiche. All'interno di esse, le lattice structures offrono un controllo raffinato sulla distribuzione del materiale e sulle prestazioni meccaniche, distinguendosi tra soluzioni beam-based e surface-based. Le TPMS, infine, costituiscono la forma più avanzata di queste architetture, in grado di coniugare continuità geometrica, isotropia e multifunzionalità. La capacità di modellare la risposta meccanica,

termica e fluidodinamica attraverso la geometria rende queste strutture un vero e proprio ponte tra scienza dei materiali e ingegneria dei processi produttivi. Tale approccio apre la strada a una nuova generazione di applicazioni, nelle quali le potenzialità delle geometrie reticolari vengono messe al servizio di requisiti ingegneristici specifici: dai pannelli sandwich alleggeriti agli scambiatori di calore compatti, dai dispositivi per energy storage fino agli scaffold biomedicali. La sezione successiva approfondirà proprio queste applicazioni, mettendo in luce come la libertà geometrica abilitata dalla manifattura additiva si traduca in vantaggi concreti nei diversi settori industriali e di ricerca.

2.2.2.1.1 Applicazioni nei pannelli sandwich

Un'applicazione di grande rilevanza delle strutture TPMS è quella come core per pannelli sandwich. Tradizionalmente, i core dei sandwich sono costituiti da strutture honeycomb o da schiume polimeriche, che offrono leggerezza ma presentano limiti in termini di isotropia e resistenza a impatti localizzati. L'impiego delle TPMS come core consente invece di ottenere pannelli caratterizzati da una combinazione di leggerezza e rigidità superiore, grazie alla distribuzione continua delle sollecitazioni e alla possibilità di modulare la densità relativa. Le prove sperimentali hanno mostrato come configurazioni quali Gyroid e Diamond garantiscano prestazioni ottimali a flessione e a compressione, con una progressiva dissipazione di energia e un collasso meno fragile rispetto a honeycomb convenzionali. Queste caratteristiche rendono i pannelli sandwich basati su TPMS candidati ideali per applicazioni in ambito aerospaziale, automotive e trasporti, dove la riduzione di peso si traduce direttamente in maggiore efficienza energetica.

2.2.2.1.2 Applicazioni negli scambiatori di calore

Accanto alle applicazioni strutturali, le TPMS offrono vantaggi significativi in ambito termo-fluidodinamico. La loro topologia continua e intrecciata genera canali interni altamente connessi, che massimizzano la superficie di scambio e favoriscono una distribuzione uniforme del flusso, riducendo al tempo stesso le perdite di carico rispetto a configurazioni tradizionali. Queste proprietà le rendono ideali come matrici per scambiatori di calore compatti, particolarmente richiesti in settori come l'energia e l'elettronica di potenza. La manifattura additiva consente inoltre di introdurre gradienti funzionali all'interno delle geometrie, variando localmente

parametri come lo spessore delle pareti o la dimensione delle celle, al fine di ottimizzare lo scambio termico nelle aree di maggiore sollecitazione. La possibilità di integrare direttamente la funzione di scambio nella struttura portante del componente apre prospettive di progettazione integrata e multifunzionale, coerenti con la visione dei sistemi di lavorazione avanzati.

2.2.3 Altri casi applicativi

2.2.3.1 Strutture per energy storage

Un ambito di grande interesse riguarda l'integrazione delle geometrie reticolari in sistemi di accumulo energetico. L'elevata superficie specifica e la possibilità di modulare la densità relativa rendono le TPMS e le altre strutture cellulari idonee a ospitare materiali funzionali o a fungere da supporto per elettrodi e catalizzatori. In questo contesto, sono stati sviluppati dimostratori sperimentali di celle per energy storage e sistemi PEMWE, nei quali la manifattura additiva ha permesso di realizzare configurazioni interne ottimizzate per ridurre perdite di carico, migliorare lo scambio termico ed elettrico e garantire la compatibilità meccanica con i cicli di carica-scarica.

2.2.3.2 Reverse engineering e digitalizzazione

Un ulteriore filone della ricerca ha riguardato l'impiego di tecniche di reverse engineering e scansione 3D come strumenti complementari ai processi additivi. Queste metodologie hanno permesso di acquisire geometrie complesse, generare gemelli digitali e verificare in modo accurato le deviazioni tra modello progettuale e componente realizzato. In questo senso, il reverse engineering ha rappresentato una componente trasversale del lavoro, integrandosi nei flussi di progettazione e validazione sperimentale e permettendo di rafforzare il legame tra mondo fisico e digitale.

2.2.4 LIVINGAM: infrastruttura sperimentale

Un elemento distintivo della ricerca è stato lo sviluppo del laboratorio diffuso LIVINGAM, una piattaforma concepita come ambiente di sperimentazione integrato per l'Additive Manufacturing. Questo laboratorio non si è limitato a fornire le attrezzature necessarie alla prototipazione, ma ha rappresentato un vero e

proprio ecosistema di ricerca, basato sulla collaborazione interdisciplinare e sulla connessione con il tessuto industriale. Grazie alla sua natura flessibile e distribuita, LIVINGAM si configura come un modello replicabile, in grado di supportare non solo attività di ricerca di base, ma anche il trasferimento tecnologico verso applicazioni concrete.

2.2.5 Obiettivi e contributi originali della ricerca

L'obiettivo generale della ricerca è stato quello di dimostrare come la manifattura additiva, interpretata nell'ottica delle Tecnologie e Sistemi di Lavorazione, possa costituire una piattaforma abilitante per lo sviluppo di nuove generazioni di componenti ingegneristici, capaci di coniugare complessità geometrica, prestazioni avanzate e sostenibilità. I contributi originali possono essere sintetizzati come segue:

- Sviluppo e validazione sperimentale di core per pannelli sandwich basati su geometrie TPMS, con analisi comparativa delle prestazioni meccaniche rispetto a strutture convenzionali;
- Progettazione e caratterizzazione di scambiatori di calore innovativi, fondati sull'impiego di reticoli TPMS con gradiente di densità e ottimizzazione termo-fluidodinamica;
- Applicazione di materiali compositi per FFF, con particolare attenzione a filamenti rinforzati a fibre corte e continue, e studio delle loro prestazioni in combinazione con strutture cellulari;
- Esplorazione di applicazioni in ambito energy storage e PEMWE, con la realizzazione di dimostratori funzionali;
- Implementazione di tecniche di reverse engineering come strumento di supporto ai flussi di progettazione e validazione;
- Istituzione del laboratorio diffuso LIVINGAM come piattaforma sperimentale a supporto della ricerca e del trasferimento tecnologico.

3 Sezione sperimentale

3.1 Allestimento di un laboratorio integrato di stampa 3D e reverse engineering per la ricerca in ambito di manifattura digitale: LIVINGAM-Living Lab for Additive Manufacturing¹

3.1.1 Abstract

Questo capitolo documenta il percorso che, a partire da una riflessione teorica su Living Lab e manifattura distribuita sviluppata nelle fasi iniziali del dottorato, ha portato alla progettazione e alla messa in opera di un laboratorio di stampa 3D pensato come infrastruttura sperimentale versatile per ricerca applicata e prototipazione rapida. L'obiettivo principale è disporre di un ambiente controllato ma flessibile nel quale testare metodologie, processi e materiali eterogenei, integrando la produzione additiva di tipo FFF con attività di digitalizzazione e reverse engineering. Il laboratorio è equipaggiato con sistemi tra loro complementari—Creality K1 Max e Creality K2 Plus con modulo multicolore; Bambu Lab X1 Carbon con modulo multicolore; due Bambu Lab A1 Mini e una Bambu Lab A1 anch'esse con comparto multicolore; Qidi X Max 3 con camera riscaldata—così da coprire un ampio spettro di requisiti dimensionali e prestazionali, dalla stampa di grandi volumi alla gestione accurata di materiali tecnici sensibili alle condizioni termoigrometriche. La dotazione di materiali include polimeri correnti (PLA, ABS, PET, PETG, Nylon) e una famiglia estesa di filamenti ad alte prestazioni e a ridotto impatto ambientale: compositi rinforzati con fibre (carbonio, vetro, Kevlar), compound con filler naturali (legno, lino, canapa, noccioli di oliva, caffè, luppolo) e filamenti conduttivi a base di carbonio per applicazioni di sensoristica ed elettronica integrata. A completare la filiera digitale, il laboratorio impiega, quando necessario, sistemi di scansione 3D ad alta precisione

¹ Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [89]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

(Revopoint Miraco Pro e Metro X) disponibili in concessione nell'ambito di progetti collaborativi esterni; tali strumenti, pur non appartenendo direttamente all'infrastruttura dipartimentale, risultano integrabili nei flussi di lavoro per l'acquisizione metrologica e la ricostruzione di geometrie complesse. La combinazione di macchine, materiali e strumenti di misura consente di impostare campagne sperimentali riproducibili su geometrie complesse e materiali compositi, valutando l'effetto dei parametri di processo sulla qualità del manufatto e abilitando iter rapidi di progettazione–produzione–verifica. In questa prospettiva, il laboratorio opera come Living Lab in senso operativo: uno spazio dove coesistono sviluppo di conoscenza, validazione tecnica e trasferibilità, con particolare attenzione alla sostenibilità dei materiali e alla resilienza dei processi, in linea con i principi della manifattura distribuita. Per sottolinearne la natura aperta, collaborativa e sperimentale, il laboratorio è stato formalmente denominato LIVINGAM – Living Lab for Additive Manufacturing, evidenziando il legame con i principi metodologici del Living Lab e la vocazione alla ricerca su stampa 3D e manifattura digitale.



Figura 1: Rendering del progetto iniziale del laboratorio LIVINGAM.

3.1.2 Introduzione

Le attività di ricerca sviluppate nella fase iniziale del dottorato hanno messo in evidenza come i concetti di Living Lab e di manifattura distribuita non siano soltanto modelli teorici, ma possano costituire strumenti concreti per affrontare alcune delle sfide più rilevanti dell'ingegneria contemporanea. In particolare, la riflessione avviata attraverso l'elaborazione di contributi scientifici sul ruolo dei

laboratori diffusi e sull'impatto delle pratiche di manifattura additiva ha permesso di delineare un percorso di ricerca orientato alla creazione di un'infrastruttura fisica che incarnasse tali principi. L'idea di fondo era quella di disporre di uno spazio operativo che, pur inserendosi nel contesto accademico, fosse al tempo stesso aperto, flessibile e in grado di integrare tecnologie eterogenee in un'ottica di sperimentazione continua. Questa esigenza ha trovato risposta nella progettazione e realizzazione di un laboratorio di stampa 3D, concepito non soltanto come insieme di macchine e materiali, ma come piattaforma metodologica e culturale. Esso rappresenta infatti il punto di convergenza tra le riflessioni maturate sul ruolo dei Living Lab, intesi come ambienti di co-creazione e innovazione distribuita, e la necessità di disporre di strumenti pratici per la prototipazione rapida e la sperimentazione su nuovi materiali. L'approccio adottato non si limita alla mera installazione di stampanti 3D, ma guarda alla costruzione di un ecosistema in cui tecnologie di produzione, digitalizzazione e caratterizzazione possano dialogare, consentendo di affrontare problemi di ricerca complessi e di testare applicazioni avanzate. Un ulteriore elemento di contesto è stato rappresentato dalla possibilità di integrare strumenti esterni, resi disponibili attraverso progetti di ricerca collaborativi. È il caso degli scanner 3D Revopoint Miraco Pro e Metro X, acquisiti nell'ambito di iniziative europee e messi a disposizione per attività di sperimentazione, questi dispositivi ampliano le potenzialità del laboratorio, permettendo di includere flussi di reverse engineering e digitalizzazione che arricchiscono e completano le attività di manifattura additiva. La costruzione del laboratorio ha quindi rappresentato una tappa strategica all'interno del percorso di dottorato. Da un lato, esso ha consentito di tradurre in pratica i principi teorici su cui era stato impostato l'avvio della ricerca; dall'altro, ha reso possibile disporre di una piattaforma sperimentale capace di sostenere la validazione di processi, materiali e applicazioni in un contesto controllato ma al tempo stesso aperto a collaborazioni e contaminazioni disciplinari. Il laboratorio si configura così come un living environment in cui la ricerca si alimenta di sperimentazione diretta, di confronto con scenari applicativi concreti e della possibilità di esplorare nuove traiettorie tecnologiche in modo rapido e ripetibile.

3.1.3 Materiali e Metodi

3.1.3.1 Descrizione del laboratorio: macchine

Il laboratorio di manifattura additiva è stato allestito con una dotazione di sistemi di stampa 3D a deposizione di filamento fuso (FFF, Fused Filament Fabrication) accuratamente selezionati per garantire sia una complementarità di prestazioni sia la possibilità di affrontare scenari sperimentali molto differenti. La scelta di includere macchine con caratteristiche eterogenee è stata dettata dalla volontà di disporre di un'infrastruttura versatile, in grado di coprire esigenze che spaziano dalla prototipazione rapida di oggetti di piccole dimensioni fino alla produzione di componenti complessi e voluminosi, con materiali che richiedono condizioni operative specifiche per mantenere stabilità e qualità di stampa. La Creality K2 Plus Max rappresenta l'elemento di riferimento per quanto riguarda la capacità di realizzare stampe di grande formato: grazie a un volume di costruzione superiore alla media delle stampanti desktop e a una velocità di deposizione elevata, questa macchina consente di affrontare sia produzioni di tipo concettuale, orientate a validare forme e proporzioni, sia applicazioni in cui la dimensione del pezzo costituisce un vincolo progettuale significativo. La presenza di una camera parzialmente chiusa, unita a sistemi di controllo attivo della temperatura, contribuisce a garantire la stabilità dei processi anche quando si utilizzano polimeri più sensibili agli sbalzi termici, riducendo i rischi di deformazioni e migliorando la ripetibilità dei risultati. Accanto a questa macchina di grande capacità, la Bambu Lab X1 Carbon con modulo multicolore rappresenta uno strumento fortemente orientato alla sperimentazione avanzata: la possibilità di combinare più materiali e colori all'interno dello stesso processo di stampa non solo amplia le opportunità dal punto di vista estetico, ma introduce anche funzionalità aggiuntive, come l'impiego simultaneo di materiali con proprietà meccaniche o fisiche diverse all'interno del medesimo componente. Questa caratteristica risulta particolarmente rilevante nei casi in cui si vogliano simulare giunzioni, differenze di rigidità o integrazione di zone funzionali, aspetti di grande interesse sia in ottica di design sperimentale sia nello sviluppo di prototipi funzionali complessi. A completamento di questa fascia di macchine, il laboratorio dispone di due Bambu Lab A1 Mini, anch'esse equipaggiate con sistemi multimateriale, che costituiscono strumenti di supporto

fondamentali per le attività quotidiane. Le loro dimensioni ridotte, unite alla semplicità di utilizzo e alla velocità di configurazione, le rendono particolarmente adatte per prove preliminari, per la validazione rapida di parametri di processo o per attività formative, senza impegnare le risorse di macchine più complesse. La presenza di due unità identiche consente inoltre di condurre test comparativi o di replicare produzioni in parallelo, aumentando la produttività complessiva e riducendo i tempi di attesa. Una ulteriore Bambu Lab A1 con comparto multicolore rafforza questa configurazione, garantendo continuità operativa e flessibilità organizzativa, poiché permette di gestire carichi di lavoro distribuiti mantenendo uniformità nei risultati ottenuti. Infine, la Qidi X Max 3 si distingue per la presenza di una camera riscaldata attivamente controllata, caratteristica che la rende particolarmente adatta alla lavorazione di polimeri tecnici come ABS, Nylon e altri materiali sensibili. La possibilità di mantenere un ambiente termico stabile riduce fenomeni indesiderati come warping o delaminazione, tipici della lavorazione di tali materiali, e consente di realizzare manufatti con caratteristiche meccaniche più affidabili e con una qualità superficiale superiore. L'integrazione di questa macchina nella dotazione del laboratorio amplia notevolmente lo spettro applicativo, consentendo di affrontare sperimentazioni con materiali che, in condizioni non controllate, presenterebbero tassi di insuccesso elevati. L'insieme di queste macchine, considerate nel loro complesso, conferisce al laboratorio un carattere modulare e adattabile, poiché permette di selezionare di volta in volta la piattaforma più adatta in funzione del tipo di materiale, delle dimensioni del pezzo e degli obiettivi della sperimentazione, garantendo così un approccio metodologico solido e replicabile alle attività di ricerca.



Figura 2: Foto del LIVINGAM.



Figura 3: Foto del LIVINGAM.



Figura 4: Foto del LIVINGAM.

3.1.3.2 Descrizione del laboratorio: materiali

Dal punto di vista dei materiali, il laboratorio è stato concepito per ospitare una gamma estremamente ampia di filamenti, con l'obiettivo di consentire sperimentazioni che spaziano dall'impiego di polimeri comuni fino a soluzioni avanzate a elevata complessità funzionale. La disponibilità di materiali standard come PLA, ABS, PETG, PET e Nylon costituisce la base per le attività quotidiane e per la validazione preliminare dei processi, offrendo un riferimento consolidato in termini di lavorabilità, stabilità dimensionale e proprietà meccaniche. Tuttavia, la caratteristica distintiva della dotazione risiede nella presenza di numerose varianti modificate e rinforzate, che consentono di ampliare notevolmente il campo applicativo della manifattura additiva. In particolare, i filamenti caricati con fibre ad alte prestazioni come fibra di carbonio, fibra di vetro e fibra di Kevlar permettono di incrementare significativamente rigidità, resistenza meccanica e stabilità termica dei manufatti, rendendo possibile la realizzazione di componenti destinati a prototipi funzionali sottoposti a sollecitazioni più gravose o a parti semi-strutturali in grado di sopportare condizioni operative complesse. Parallelamente,

una linea di ricerca di grande interesse è rappresentata dall'utilizzo di materiali con filler naturali di origine vegetale o derivati da scarti agroalimentari, che consentono di coniugare l'innovazione tecnologica con i principi di sostenibilità ambientale. All'interno del laboratorio sono disponibili filamenti caricati con legno, lino e canapa, che introducono proprietà estetiche e tattili peculiari e permettono di riprodurre finiture simili a quelle di materiali naturali tradizionali. A questi si aggiungono soluzioni più sperimentali, sviluppate attraverso l'impiego di sottoprodotti quali noccioli di oliva, caffè macinato e luppolo residuo dalla produzione della birra: questi composti, oltre a ridurre l'impatto ambientale attraverso il riuso di scarti, aprono prospettive interessanti per lo sviluppo di materiali biocompositi a basso costo e dal carattere fortemente innovativo, sia per applicazioni di design sostenibile sia per la sperimentazione di filiere produttive circolari. Un ulteriore ambito esplorativo riguarda i materiali conduttivi a base di carbonio, che introducono la possibilità di integrare proprietà elettriche direttamente all'interno dei manufatti stampati. Questa tipologia di filamenti consente di realizzare prototipi in cui la funzione strutturale si combina con caratteristiche funzionali aggiuntive, ad esempio per lo sviluppo di sensori integrati, circuiti stampati flessibili o componenti per dispositivi elettronici embedded, rappresentando quindi un settore di ricerca trasversale che unisce manifattura additiva, elettronica e scienza dei materiali. L'eterogeneità dei materiali disponibili non solo conferisce al laboratorio un'elevata capacità di adattamento, ma permette di condurre indagini comparative sistematiche, valutando l'influenza di parametri di processo e di configurazioni di stampa sul comportamento meccanico, sulla qualità superficiale e sulla sostenibilità complessiva del manufatto. In questo modo, l'insieme delle sperimentazioni non si limita a fornire risultati specifici per singoli casi studio, ma genera un patrimonio di conoscenze trasferibile e replicabile, utile per orientare future applicazioni industriali o accademiche nel campo della manifattura additiva.



Figura 5: Foto del LIVINGAM.

3.1.3.3 Descrizione del laboratorio: scanner 3D

Tra le risorse a disposizione figurano anche strumenti di scansione 3D ad alta precisione, nello specifico un Revopoint Miraco Pro e un Metro X, introdotti attraverso iniziative progettuali e attualmente utilizzabili per integrare i flussi di manifattura digitale. L'impiego di scanner 3D permette infatti di acquisire geometrie complesse direttamente da componenti fisici, generando nuvole di punti ad alta risoluzione che possono essere elaborate e trasformate in modelli tridimensionali accurati. Questo processo di digitalizzazione non si limita a riprodurre fedelmente le forme originali, ma costituisce il punto di partenza per attività di reverse engineering, per la creazione di gemelli digitali e per la modifica o l'ottimizzazione di componenti esistenti. L'integrazione della scansione tridimensionale con le tecnologie di stampa consente di chiudere il ciclo della manifattura digitale, realizzando un flusso di lavoro continuo in cui progettazione, produzione e verifica sono interconnessi. In questo contesto, gli scanner 3D non sono soltanto strumenti di acquisizione geometrica, ma diventano nodi fondamentali del digital thread, ovvero quel filo digitale che unisce in maniera coerente le fasi di concezione, prototipazione e realizzazione del prodotto. Ciò significa poter passare in tempi ridotti dal componente reale alla sua rappresentazione virtuale e infine alla sua replica fisica, con la possibilità di introdurre modifiche progettuali intermedie e di testare varianti senza dover

disporre di documentazione tecnica preesistente. Dal punto di vista operativo, il Revopoint Miraco Pro risulta particolarmente adatto a rilievi ad alta risoluzione di oggetti di dimensioni medio-piccole, sfruttando sistemi ottici basati su luce strutturata e garantendo una precisione adeguata alla generazione di modelli dettagliati per componenti di interesse ingegneristico o di design. Il Metro X, invece, si presta a digitalizzare manufatti di dimensioni maggiori o con geometrie più complesse, ampliando il campo di applicazione della tecnologia di scansione all'interno del laboratorio. L'integrazione di tali strumenti nel workflow consente di affrontare sia scenari di riproduzione di componenti usurati o non più disponibili sul mercato, sia attività di progettazione di nuovi prodotti che traggono ispirazione da oggetti fisici esistenti, alimentando così processi di innovazione incrementale e di sperimentazione avanzata. La combinazione tra scansione tridimensionale e manifattura additiva permette inoltre di rafforzare la dimensione collaborativa e aperta del laboratorio, in quanto i modelli digitali ottenuti possono essere condivisi, modificati e integrati in piattaforme di progettazione distribuita, abilitando pratiche di open innovation e riducendo le barriere tra progettazione e produzione. In questo senso, la presenza di scanner 3D si collega direttamente alla visione del laboratorio come Living Lab, ovvero come ambiente in cui l'innovazione non è soltanto il risultato dell'uso di macchine e materiali, ma nasce dalla capacità di costruire un ecosistema digitale interconnesso in cui dati, processi e conoscenze possono circolare e generare valore.

3.1.4 Conclusioni

La realizzazione del laboratorio di manifattura additiva ha rappresentato un passaggio fondamentale nel percorso del dottorato, configurandosi non solo come un insieme di risorse tecniche ma come una vera e propria infrastruttura di ricerca, capace di tradurre in pratica i principi di manifattura distribuita e di Living Lab che avevano ispirato le fasi iniziali del lavoro. L'integrazione di un parco macchine diversificato, di un portafoglio ampio e innovativo di materiali e di strumenti di scansione tridimensionale ha consentito di costruire un ambiente sperimentale completo, in cui progettazione, produzione e digitalizzazione sono interconnessi in un unico flusso coerente. Questo laboratorio ha permesso di superare il concetto di

semplice officina tecnologica per diventare un ecosistema in cui le attività di ricerca trovano un supporto metodologico solido e replicabile, favorendo la sperimentazione su geometrie complesse, la validazione di materiali non convenzionali e lo sviluppo di applicazioni in cui l'elemento digitale e quello fisico si intrecciano senza soluzione di continuità. Dal punto di vista scientifico, la disponibilità di sistemi eterogenei ha reso possibile indagare l'influenza delle condizioni operative e dei parametri di processo sulla qualità dei manufatti, costruendo un quadro conoscitivo che non si limita alla validazione di singoli casi ma che produce dati e riflessioni trasferibili a scenari più ampi. In particolare, la possibilità di testare materiali rinforzati con fibre ad alte prestazioni, biocompositi derivati da scarti naturali e filamenti conduttivi a base di carbonio ha permesso di esplorare tre direzioni di ricerca parallele e complementari: la prima orientata alla realizzazione di prototipi funzionali con prestazioni meccaniche elevate, la seconda legata allo sviluppo di soluzioni sostenibili e circolari, e la terza focalizzata sull'integrazione di funzionalità elettroniche e sensoriali nei manufatti. Queste tre linee convergono nel delineare un approccio alla manifattura additiva che non è puramente produttivo, ma che guarda alla stampa 3D come a una piattaforma aperta per la sperimentazione multidisciplinare e per l'innovazione di prodotto e di processo. Parallelamente, l'introduzione degli scanner tridimensionali ha consentito di inserire il laboratorio in una prospettiva più ampia di manifattura digitale, rafforzando la capacità di chiudere il ciclo progettuale dalla concezione alla produzione passando per la digitalizzazione e l'analisi metrologica. La possibilità di acquisire e ricostruire forme complesse da componenti fisici ha ampliato i confini applicativi del laboratorio, consentendo attività di reverse engineering, di riproduzione di parti non più disponibili e di generazione di modelli digitali direttamente utilizzabili nei processi di stampa. L'integrazione tra scansione 3D e manifattura additiva ha quindi reso possibile la costruzione di un digital thread coerente, in cui dati e geometrie si muovono senza soluzione di continuità tra il dominio virtuale e quello fisico. Questo approccio ha rafforzato la natura di Living Lab del laboratorio, trasformandolo in uno spazio in cui sperimentazione tecnologica, sviluppo metodologico e produzione distribuita convivono e si alimentano reciprocamente. L'esperienza maturata dimostra come l'adozione di una

visione integrata e multidisciplinare non solo aumenti le potenzialità operative, ma generi anche valore in termini di trasferibilità, poiché i flussi e le metodologie sviluppate possono essere replicati in altri contesti accademici o industriali. Dal punto di vista strategico, la costruzione di questa infrastruttura rappresenta inoltre un investimento nel lungo periodo: il laboratorio si configura come un ambiente dinamico, in grado di adattarsi all'evoluzione delle tecnologie di stampa e dei materiali, mantenendo una flessibilità che ne garantisce la rilevanza anche di fronte a scenari futuri ancora incerti. Le prospettive aperte da questa infrastruttura non si limitano quindi al supporto delle attività di ricerca svolte nel dottorato, ma riguardano più in generale la possibilità di alimentare collaborazioni interdisciplinari, di supportare iniziative di open innovation e di favorire la diffusione di pratiche di manifattura sostenibile. In quest'ottica, il laboratorio diventa non soltanto uno strumento operativo ma un vero e proprio nodo di conoscenza e innovazione, capace di coniugare sperimentazione tecnica, sostenibilità dei materiali e resilienza dei processi produttivi, offrendo un modello replicabile di come l'infrastruttura di ricerca possa tradursi in valore per la comunità scientifica e per il territorio. Il percorso di allestimento e sperimentazione ha quindi portato alla piena configurazione del LIVINGAM – Living Lab for Additive Manufacturing, che non si limita a essere un laboratorio tecnico, ma rappresenta un ecosistema di ricerca e innovazione replicabile in altri contesti accademici e industriali.

3.2 Strutture Sandwich con Geometrie Avanzate

3.2.1 Introduzione al capitolo

Le strutture sandwich rappresentano una delle soluzioni costruttive più efficienti per coniugare leggerezza e resistenza meccanica. Tradizionalmente realizzate con core a nido d'ape o schiume polimeriche, esse hanno trovato ampia diffusione in ambito aerospaziale, automobilistico e civile. L'evoluzione delle tecnologie di manifattura additiva ha reso possibile superare le configurazioni convenzionali, introducendo geometrie complesse come le superfici minimali triplamente periodiche (TPMS). Tali architetture offrono vantaggi sostanziali in termini di distribuzione uniforme delle sollecitazioni, continuità strutturale e possibilità di modulare localmente le proprietà meccaniche[1–3]. In questa prima parte vengono analizzati diversi approcci progettuali basati su geometrie avanzate: dalle configurazioni TPMS classiche ai gradienti funzionali, fino alla progettazione field-driven, con l'obiettivo di valutarne l'impatto sulle prestazioni meccaniche e la fattibilità mediante tecniche additive.

3.2.1.1 Introduzione alle strutture sandwich

Le strutture sandwich costituiscono una tipologia costruttiva ampiamente adottata in ambito ingegneristico per la capacità di coniugare leggerezza e prestazioni meccaniche elevate[4,5]. Il loro schema tipico è costituito da due sottili pelli resistenti (facesheets), realizzate in materiali ad alta rigidezza e resistenza, separate da un nucleo centrale (core) a bassa densità. Tale configurazione consente di massimizzare il momento d'inerzia della sezione, incrementando in maniera significativa la rigidezza flessionale complessiva a fronte di un ridotto incremento di massa[6,7]. Il principio strutturale può essere assimilato a quello di una trave a sezione a I, in cui le pelli assolvono la funzione delle flange, resistendo agli sforzi di trazione e compressione, mentre il core svolge il ruolo dell'anima, opponendosi ai carichi di taglio e mantenendo le pelli opportunamente distanziate[8]. Tale configurazione permette di ottenere prestazioni meccaniche superiori a quelle conseguibili con materiali monolitici di pari peso, rendendo i sandwich una delle soluzioni più efficienti per massimizzare il rapporto resistenza/peso[9]. Dal punto

di vista strutturale, il core riveste un ruolo determinante, poiché la sua geometria e le sue proprietà meccaniche controllano la risposta globale del pannello[10]. Le pelli, realizzate in materiali ad alte prestazioni (fibre di carbonio, vetro o kevlar in matrice polimerica, o sottili lamine metalliche), devono infatti essere supportate da un nucleo in grado di prevenire instabilità locali e di distribuire in maniera uniforme i carichi. I core tradizionali più diffusi sono costituiti da schiume polimeriche e da strutture cellulari a nido d'ape. Le prime garantiscono facilità di fabbricazione, economicità e buone proprietà funzionali, ma offrono resistenze meccaniche limitate. Le seconde, invece, assicurano un rapporto rigidità/peso particolarmente favorevole, pur presentando criticità intrinseche come fenomeni di crimpling, wrinkling e dimpling che ne limitano l'affidabilità in determinate condizioni di carico[11]. Queste considerazioni hanno reso evidente come le prestazioni di un pannello sandwich non siano soltanto il risultato delle proprietà dei materiali impiegati, ma dipendano in misura sostanziale dalla morfologia del core. Negli ultimi anni, l'interesse della comunità scientifica si è quindi spostato verso lo studio di architetture cellulari avanzate, capaci di superare i limiti delle configurazioni convenzionali[12,13]. In particolare, l'attenzione si è concentrata sulle geometrie reticolari periodiche e, più recentemente, sulle superfici minimali triplamente periodiche (TPMS), che si distinguono per la continuità spaziale, l'elevato rapporto superficie/volume e la capacità di distribuire uniformemente le sollecitazioni. L'avvento della manifattura additiva (AM) ha avuto un ruolo decisivo in questo scenario, poiché ha reso possibile la fabbricazione di geometrie complesse precedentemente irrealizzabili con processi convenzionali[14]. Tecniche come la Fused Deposition Modeling (FDM) permettono oggi la realizzazione di core reticolari tridimensionali ottimizzati, senza la necessità di attrezzaggi complessi o assemblaggi, favorendo lo sviluppo di configurazioni personalizzate e la possibilità di modulare localmente le proprietà strutturali. In tale contesto, la progettazione del core assume un valore strategico: non è più soltanto un elemento di riempimento, ma diventa la chiave per definire le prestazioni globali del pannello sandwich, aprendo nuove prospettive per la progettazione di strutture leggere e multifunzionali[15,16].

3.2.2 Dalle strutture tradizionali alle geometrie TPMS: studio e sperimentazione di pannelli sandwich in AM²

3.2.2.1 Abstract

Il presente studio analizza l'evoluzione delle strutture sandwich dai core tradizionali a geometria tri-esagonale fino all'impiego di configurazioni avanzate basate su superfici minimali triplamente periodiche (TPMS), rese fabbricabili grazie alla manifattura additiva. La ricerca ha previsto la progettazione e la realizzazione sperimentale di pannelli sandwich, con particolare attenzione alla valutazione comparativa delle prestazioni meccaniche sotto carico flessionale. I risultati ottenuti evidenziano come le geometrie TPMS, rispetto alle configurazioni tri-esagonali, offrano una distribuzione più uniforme delle sollecitazioni e una maggiore capacità di assorbimento energetico, dimostrando il potenziale delle architetture complesse per lo sviluppo di strutture leggere e ad alte prestazioni.

3.2.2.2 Introduzione

I pannelli sandwich costituiscono una tipologia strutturale ampiamente adottata in virtù dell'elevato rapporto resistenza/peso, ma le prestazioni meccaniche dipendono in maniera significativa dalla morfologia del core[17,18]. Le configurazioni tradizionali si basano prevalentemente su geometrie bidimensionali, come le celle esagonali e le loro varianti tri-esagonali, ottenute mediante l'estrusione del pattern lungo un unico asse. Queste soluzioni, pur garantendo buone caratteristiche di rigidità e stabilità planare, presentano una limitata articolazione spaziale, che ne riduce la capacità di distribuire in modo uniforme le sollecitazioni in tre dimensioni. L'avvento delle tecniche di manifattura additiva ha reso possibile la fabbricazione di geometrie non convenzionali, caratterizzate da continuità topologica e sviluppo tridimensionale. In tale contesto, le superfici minimali triplamente periodiche (TPMS) si collocano come un'alternativa innovativa, in quanto capaci di realizzare reticoli complessi che si estendono simultaneamente lungo le tre direzioni ortogonali dello spazio[19]. Lo studio presentato in questa sezione si propone di confrontare una configurazione tradizionale di tipo 2D, rappresentata dal core tri-

² Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [90]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

esagonale, con una configurazione 3D innovativa, rappresentata dalla superficie di tipo giroide, al fine di valutarne le potenzialità in termini di applicabilità ai pannelli sandwich e di individuare i benefici connessi all'introduzione di geometrie spaziali avanzate.

$$\sin x \cdot \cos y + \sin y \cdot \cos z + \sin z \cdot \cos x = 0$$

Equazione 1: Formula matematica del giroide.

3.2.2.3 Materiali e metodi

3.2.2.3.1 Preparazione provini a flessione

La realizzazione dei provini destinati alle prove di flessione è stata condotta mediante tecnologia di additive manufacturing, con la produzione complessiva di trenta campioni. I provini sono stati progettati secondo due differenti configurazioni interne di riempimento, già descritte nelle sezioni precedenti, ovvero il pattern di tipo giroide e quello tri-esagonale. Per ciascuna configurazione geometrica sono state impiegate tre diverse densità di riempimento, definite come percentuale volumetrica di materiale solido rispetto al volume totale del provino, pari a 25%, 50% e 75%. Sulla base di evidenze presenti in letteratura e con l'obiettivo di garantire la significatività statistica dell'analisi dei risultati sperimentali, per ogni combinazione di geometria e densità di riempimento sono stati prodotti cinque campioni identici. L'intero processo di stampa 3D è stato condotto mantenendo costanti tutti gli altri parametri tecnologici, al fine di isolare l'effetto della sola variazione del pattern e della densità. Nella tabella seguente vengono riportati in modo sistematico i parametri di processo adottati per la fabbricazione additiva dei provini.

• Temperatura di stampa	• 190 °C
• Percentuale di riempimento	• 25%50%75%
• Altezza dei layer	• 0.2 mm
• Software di slicing	• Ultimaker CURA
• Macchina	• Sidewinder x2
• Materiale	• Acido polilattico (PLA)

Tabella 5: parametri di stampa provini a flessione

Le dimensioni dei provini per la prova di flessione sono state definite in conformità alle prescrizioni normative di riferimento. In particolare, ciascun provino presenta un'altezza pari a 10 mm, una larghezza di 39,9 mm e una profondità di 192 mm. Tali valori dimensionali sono stati adottati per garantire la ripetibilità sperimentale, la compatibilità con l'apparecchiatura di prova e la confrontabilità con risultati presenti in letteratura tecnica.

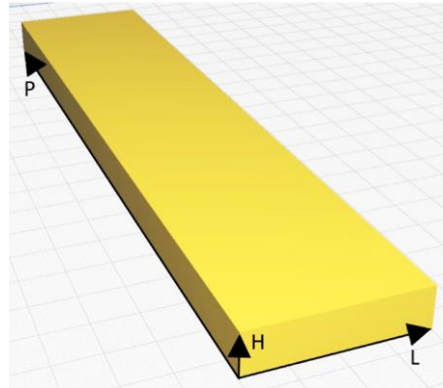


Figura 6: Provino a flessione

È possibile osservare, mediante rappresentazione visiva, l'effetto delle differenti percentuali di densità di riempimento sulla morfologia interna dei provini realizzati. La variazione della densità influisce significativamente sulla distribuzione del materiale all'interno del volume del campione, determinando configurazioni strutturali con caratteristiche meccaniche e prestazionali differenti.

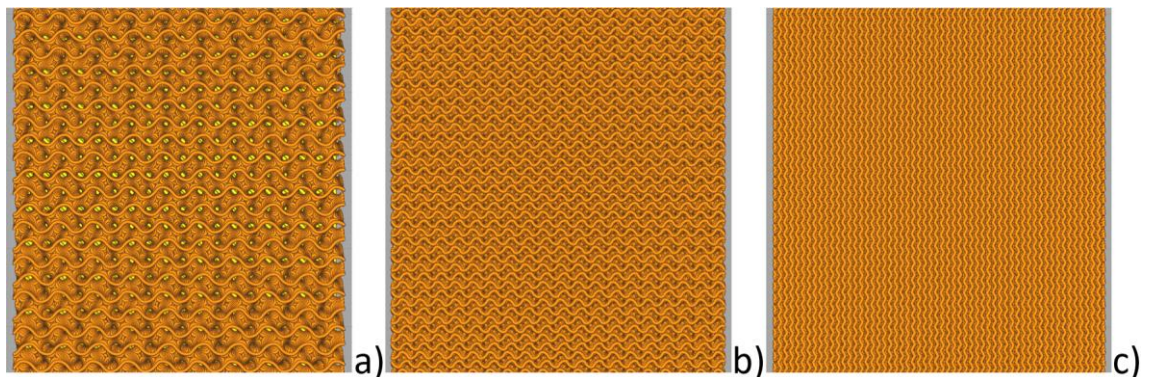


Figura 7: Riempimento giroide provino a flessione con densità 25%(a), 50%(b), 75%(c)

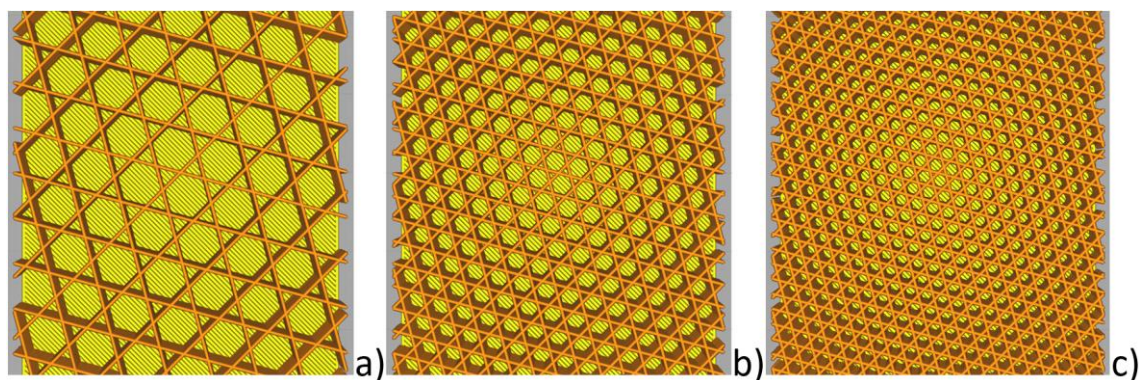


Figura 8: Riempimento tri-esagonale provino a flessione con densità 25%(a), 50%(b), 75%(c)

La tabella seguente riporta i dati tecnici relativi ai provini destinati alle prove di flessione, includendo dimensioni fisiche e parametri operativi utilizzati durante il processo di stampa additiva.

Tipologia di riempimento	Giroide	Giroide	Giroide	Tri-esagonale	Tri-esagonale	Tri-esagonale
Peso	36g	56g	75g	36g	56g	76g
Lunghezza filamento utilizzato	12,08m	18,81m	25,19m	11,96m	18,71m	25,45m
Densità di riempimento	25%	50%	75%	25%	50%	75%
Tempo	03h18m	06h17m	11h04m	02h37m	03h38m	04h39m

Figura 9: Dati provini a flessione

3.2.2.3.2 Preparazione provini a compressione

La realizzazione dei provini destinati alle prove di compressione è stata effettuata mediante tecnologia di additive manufacturing, con una produzione complessiva di trenta unità. I campioni sono stati configurati con due distinte tipologie di pattern di riempimento, ovvero strutture a geometria giroide e tri-esagonale, già descritte in precedenza. Per ciascuna geometria sono state selezionate tre differenti percentuali di riempimento, pari rispettivamente al 25%, 50% e 75%, rappresentative della frazione volumica del materiale solido rispetto al volume totale del provino. La scelta di tali valori è stata effettuata sulla base di evidenze riportate in letteratura. Per ciascuna combinazione tra geometria e densità, sono stati realizzati cinque provini identici, al fine di garantire una base statistica adeguata

per l'analisi comparativa dei risultati sperimentali. I parametri impiegati nel processo di stampa additiva sono sintetizzati nella tabella sottostante.

• Temperatura di stampa	• 190 °C
• Percentuale di riempimento	• 25%50%75%
• Altezza dei layer	• 0.2 mm
• Software di slicing	• Ultimaker CURA
• Macchina	• Sidewinder x2
• Materiale	• Acido polilattico (PLA)

Figura 10: Parametri di stampa provini a compressione

Le dimensioni dei provini impiegati per le prove di compressione sono state definite in conformità alle specifiche normative di riferimento. I campioni presentano una geometria cuboidale con le seguenti dimensioni: altezza (H) pari a 15 mm, larghezza (L) di 25 mm e profondità (P) anch'essa di 25 mm. La scelta di tali valori è stata effettuata al fine di garantire la standardizzazione dei test meccanici e la ripetibilità delle misurazioni, consentendo un confronto coerente con i dati riportati in letteratura e con le normative tecniche vigenti per i materiali polimerici additivamente realizzati.

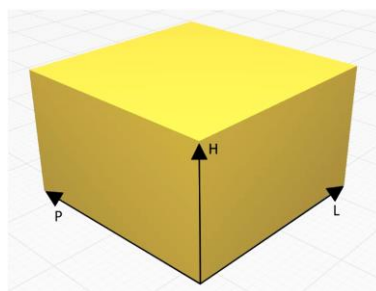


Figura 11: Provino a compressione

È possibile osservare, attraverso l'analisi visiva riportata di seguito, l'effetto generato dalla variazione della densità di riempimento sulla morfologia interna dei provini realizzati. Le immagini documentano in maniera esplicita le modificazioni strutturali indotte dalla differente percentuale volumetrica di materiale solido impiegato, evidenziando il rapporto diretto tra densità di riempimento e configurazione geometrica del pattern interno.

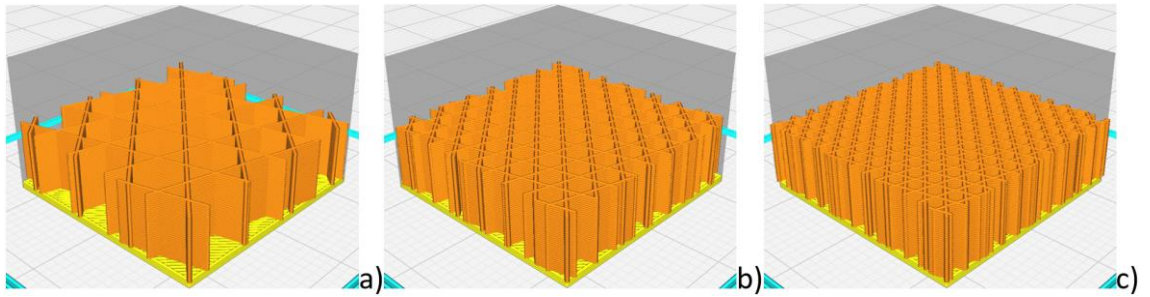


Figura 12: Riempimento giroide provino a compressione con densità 25%(a), 50%(b), 75%(c)

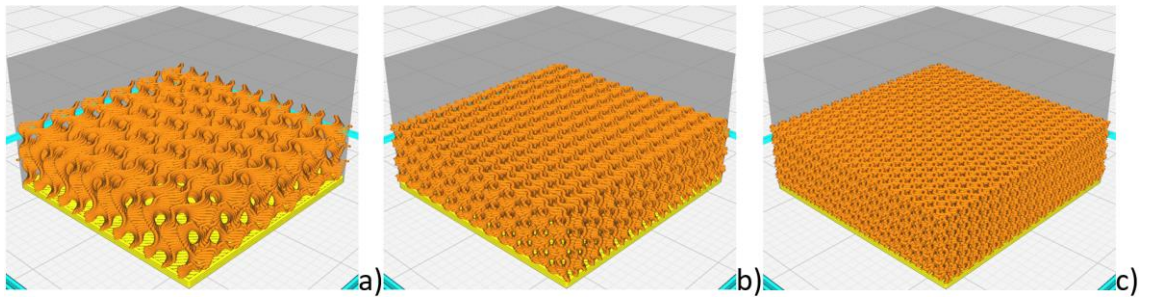


Figura 13: Riempimento tri-esagonale provino a compressione con densità 25%(a), 50%(b), 75%(c)

La tabella seguente illustra i dati sperimentali relativi ai provini sottoposti a prova di flessione, includendo informazioni sulle geometrie, le densità di riempimento e i parametri di processo adottati durante la produzione tramite additive manufacturing.

Tipologia di riempimento	Giroide	Giroide	Giroide	Tri-esagonale	Tri-esagonale	Tri-esagonale
Peso	4g	7g	9g	4g	7g	9g
Lunghezza filamento utilizzato	1,35m	2,26m	3,09m	1,35m	2,24m	3,12m
Densità di riempimento	25%	50%	75%	25%	50%	75%
Tempo	26m	50m	1h26m	23m	29m	38m

Figura 14: Dati provini a compressione

3.2.2.4 Risultati e discussioni

Sono state eseguite le prove meccaniche di flessione e compressione su tutti i provini realizzati, conformemente ai parametri prescritti dalle normative di riferimento per ciascuna tipologia di test. Al fine di garantire una maggiore affidabilità statistica dei dati acquisiti, si è adottato un criterio di selezione casuale

dei provini da testare, variando intenzionalmente le fasce orarie e le date di esecuzione delle prove. L'analisi qualitativa preliminare ha evidenziato un significativo incremento della rigidità flessionale nei campioni caratterizzati da riempimento di tipo giroide rispetto a quelli con pattern tri-esagonale. Per contro, nelle prove di compressione, le strutture a infill giroide hanno mostrato una maggiore cedevolezza, attribuibile alla natura tridimensionale della geometria, che comporta una distribuzione delle celle anche lungo l'asse Z. Questo comporta un collasso progressivo della struttura. Al contrario, la struttura bidimensionale tri-esagonale, priva di tale sviluppo volumetrico, manifesta un comportamento meccanico più fragile, con rottura improvvisa e localizzata a carichi più elevati. I dati quantitativi sono attualmente in fase di elaborazione statistica; le osservazioni sopra riportate rappresentano pertanto una valutazione qualitativa preliminare del comportamento meccanico delle differenti configurazioni strutturali.

3.2.2.5 Conclusioni

L'analisi qualitativa preliminare dei risultati ottenuti evidenzia come l'impiego di geometrie complesse per la realizzazione dei core nei pannelli sandwich rappresenti un ambito di ricerca ad elevato potenziale. È stato osservato che differenti configurazioni strutturali, a parità di massa e volume del provino, determinano risposte meccaniche significativamente divergenti. Tali differenze non si esauriscono nei soli valori di carico limite, ma si manifestano attraverso una varietà di comportamenti meccanici inattesi, aprendo a una gamma più ampia di possibilità applicative in funzione delle specifiche condizioni d'impiego. Di conseguenza, risulta tecnicamente possibile partire da geometrie note e modularne le proprietà attraverso una rielaborazione della loro conformazione geometrica, ottenendo così strutture con caratteristiche ottimizzate per determinati utilizzi. Questo risultato è stato reso perseguibile dallo sviluppo delle tecnologie di produzione additiva, che consentono di superare i vincoli progettuali tipici delle tecniche convenzionali. In tale contesto, risulta altresì realizzabile la fabbricazione di pannelli sandwich non planari, caratterizzati da geometrie complesse e continue, che permettono di eliminare la necessità di giunzioni e ampliare in modo significativo le possibilità progettuali in ambito ingegneristico e industriale.

3.2.2.6 Sviluppi futuri

Tra le prospettive evolutive individuate nell'ambito della presente attività di ricerca si annoverano sia sviluppi di tipo progettuale sia avanzamenti tecnologici relativi ai processi di produzione. Un'estensione naturale dello studio consiste nell'introduzione e nella successiva caratterizzazione meccanica di ulteriori configurazioni geometriche per il riempimento del core, comprendenti sia strutture bidimensionali che tridimensionali. Tali configurazioni, opportunamente progettate, potrebbero contribuire ad ampliare la letteratura tecnica sul tema, offrendo esempi significativi di applicazione delle tecnologie di additive manufacturing nella realizzazione di pannelli sandwich ad elevate prestazioni. In tale contesto, particolare attenzione sarà rivolta alle strutture reticolari, note come lattice structures, la cui realizzazione risulta agevolmente ottenibile mediante tecnologie additive e che presentano un elevato potenziale di ottimizzazione meccanica e funzionale. Ulteriori sviluppi sono ipotizzabili attraverso il passaggio dalla tecnologia FDM attualmente impiegata verso altre tecnologie di produzione additiva, quali SLA, SLS o DED, al fine di espandere le possibilità geometriche e i range prestazionali delle strutture prodotte. Inoltre, si prevede di sperimentare l'impiego della stampa 3D multimateriale, sempre tramite tecnologia FDM, con l'obiettivo di sviluppare pannelli sandwich compositi caratterizzati dalla presenza di materiali differenti per le pelli e per il core. Ciò consentirà l'integrazione di polimeri rinforzati mediante fibre corte o lunghe, sia di natura sintetica (es. fibra di carbonio, kevlar) sia vegetale, aprendo nuove possibilità per la realizzazione di strutture leggere, resistenti e ottimizzate in funzione dell'applicazione.

3.2.3 Ottimizzazione della manifattura additiva di strutture sandwich: effetto delle geometrie TPMS sulle proprietà flessionali³

3.2.3.1 Abstract

Lo studio presentato analizza il comportamento flessionale di strutture sandwich dotate di core basati su superfici minimali triplicemente periodiche (TPMS), realizzati mediante tecniche di manifattura additiva. Le geometrie TPMS oggetto dell'indagine includono Gyroid, Schwarz, Diamond, Lidinoid, Split-P e Neovius, selezionate in virtù del loro favorevole rapporto resistenza/peso, caratteristica fondamentale in applicazioni dove la leggerezza è un requisito critico, quali i settori aerospaziale, automobilistico e dell'ingegneria civile. Al fine di garantire una valutazione comparativa coerente, tutti i campioni sono stati fabbricati mediante stampa 3D mantenendo costante la percentuale di riempimento. Le prestazioni meccaniche sotto carico flessionale sono state valutate attraverso prove di flessione a tre punti. I risultati evidenziano come la configurazione geometrica del core TPMS influenzi in modo significativo l'integrità strutturale e le proprietà meccaniche complessive delle strutture sandwich. In particolare, sono state osservate variazioni sia nella resistenza alla flessione sia nella rigidità in funzione della tipologia di geometria TPMS impiegata.

3.2.3.2 Introduzione

Le superfici minimali triplicemente periodiche (TPMS) sono geometrie caratterizzate da superfici continue, periodiche e lisce, note per l'elevato rapporto resistenza/peso e per le eccellenti proprietà meccaniche. Configurazioni quali Gyroid, Schwarz, Diamond, Lidinoid, Split-P e Neovius hanno suscitato un notevole interesse grazie alla loro capacità di bilanciare efficacemente resistenza meccanica ed efficienza nell'uso del materiale. I recenti sviluppi nelle tecnologie di manifattura additiva (AM) hanno avuto un ruolo determinante nel rendere possibile la fabbricazione di queste geometrie complesse, offrendo una libertà progettuale senza precedenti e la possibilità di ottimizzare le prestazioni meccaniche in

³ Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [26]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

funzione delle esigenze specifiche. Un'applicazione particolarmente promettente delle geometrie TPMS riguarda il loro impiego come materiale di core all'interno di strutture sandwich. Queste strutture, composte da un'anima leggera racchiusa tra due pelli esterne rigide, trovano largo impiego nei settori aerospaziale, automobilistico e delle costruzioni, grazie alla loro capacità di offrire elevate prestazioni meccaniche con un peso contenuto. L'integrazione di core TPMS in tali strutture comporta vantaggi rilevanti: l'elevato rapporto superficie/volume e la distribuzione uniforme delle sollecitazioni, intrinseche alle geometrie TPMS, contribuiscono a migliorare l'integrità strutturale complessiva e la capacità di carico. Studi recenti hanno esplorato differenti configurazioni TPMS, tra cui Gyroid, Schwarz e Diamond, evidenziando come queste possano offrire proprietà meccaniche superiori rispetto ai materiali da core convenzionali, quali nidi d'ape polimerici o metallici, schiume espanse e strutture reticolari tradizionali. Pur essendo materiali ampiamente utilizzati per la loro leggerezza ed efficienza meccanica, questi ultimi presentano limitazioni in termini di adattabilità strutturale e possibilità di ottimizzazione, a differenza delle geometrie TPMS. In confronto alle strutture a nido d'ape classiche, i core TPMS garantiscono una maggiore continuità strutturale e una distribuzione più uniforme degli sforzi, contribuendo così al miglioramento della resistenza a flessione e della capacità di assorbimento dell'energia. Sebbene i materiali a nido d'ape offrano ottimi rapporti rigidità/peso in direzioni di carico specifiche, presentano un comportamento meccanico anisotropo, che ne limita la versatilità in condizioni di carico multiassiali. Inoltre, le strutture TPMS possono essere realizzate mediante tecnologie additive senza necessità di processi di incollaggio, riducendo così la complessità del processo produttivo e il rischio di interfacce deboli. L'introduzione della manifattura additiva ha quindi avuto un impatto cruciale nella concretizzazione del potenziale delle strutture sandwich con core TPMS, permettendo la fabbricazione precisa di geometrie complesse e la produzione integrata di strutture sandwich in un unico processo, eliminando le fasi di assemblaggio post-produzione e semplificando i flussi di lavorazione. Questo approccio non solo semplifica la produzione ma migliora anche l'integrità strutturale e le prestazioni del componente finale. La sinergia tra geometrie TPMS e manifattura additiva mostra un elevato potenziale

per applicazioni industriali in cui la riduzione del peso, le prestazioni meccaniche e l'efficienza dei costi rappresentano fattori determinanti. Nel settore aerospaziale, i pannelli sandwich basati su TPMS possono contribuire alla riduzione del peso e quindi al miglioramento dell'efficienza dei consumi. Essi trovano impiego in componenti interni della cabina (pannelli strutturali, supporti per sedili, elementi fonoassorbenti), in strutture secondarie (sportelli di accesso, carenature, superfici di controllo) e in elementi per l'assorbimento di energia (strutture per la crashworthiness e componenti resistenti agli impatti), dove la leggerezza e l'efficienza strutturale sono fondamentali. Nel settore automobilistico, tali strutture possono essere utilizzate per sviluppare componenti leggeri che migliorano le prestazioni e l'efficienza energetica dei veicoli, oltre a incrementare la sicurezza passiva e la capacità di assorbimento dell'energia in caso di urto. Anche in ambito civile, tali strutture offrono spunti interessanti per l'analisi del comportamento meccanico dei campioni stampati in 3D e per lo studio dell'influenza delle geometrie del core sui fenomeni di innesco e propagazione delle fratture. Nonostante le TPMS siano ampiamente studiate in ambito accademico e abbiano dimostrato proprietà meccaniche promettenti, la loro implementazione industriale risulta ancora limitata e si colloca attualmente a un livello di maturità tecnologica (TRL) compreso tra 3 e 5, con applicazioni prevalentemente in fase sperimentale o di prototipazione. Tuttavia, i recenti progressi nelle tecnologie additive stanno favorendo un'accelerazione nel loro passaggio verso applicazioni pratiche in settori quali l'aerospaziale, il biomedicale e l'automotive, con sforzi crescenti volti all'integrazione in processi produttivi su scala industriale. Il presente studio si propone di ottimizzare il processo di manifattura additiva di strutture sandwich con core TPMS, concentrandosi sulla valutazione delle proprietà flessionali. Attraverso l'analisi comparativa di diverse configurazioni TPMS, mediante prove di flessione a tre punti, si intende identificare le geometrie più efficaci per il miglioramento delle prestazioni meccaniche. I risultati ottenuti contribuiranno allo sviluppo di strutture composite leggere e ad alte prestazioni, con potenziali applicazioni in numerosi ambiti industriali.

3.2.3.3 Materiali e metodi

Il materiale impiegato per la realizzazione delle strutture sandwich oggetto di questo studio è l'acido polilattico (PLA), un poliestere termoplastico biodegradabile ottenuto da risorse rinnovabili. Questo polimero è ampiamente utilizzato nella manifattura additiva per via della sua facilità di lavorazione, del favorevole rapporto resistenza/peso e della buona stabilità dimensionale, caratteristiche essenziali per garantire l'integrità geometrica delle strutture TPMS complesse. Grazie al suo intervallo di temperature di lavorazione, compreso tra 190°C e 220°C, il PLA risulta compatibile con la maggior parte delle stampanti a deposizione di filamento fuso (Fused Filament Fabrication, FFF). Per garantire la compatibilità tra materiali, uniformità delle proprietà meccaniche e un processo produttivo semplificato, il PLA è stato utilizzato sia per il core che per le pelli esterne delle strutture sandwich. Le proprietà del materiale impiegato, riportate nella Tabella 1, sono state ricavate dalla scheda tecnica del produttore e rappresentano i valori tipici dei filamenti PLA comunemente disponibili in commercio per applicazioni di manifattura additiva.

Proprietà	Tipo di unità	Valore
Densità	g/cm ³	1,24
Resistenza a trazione	MPa	50–70
Modulo di Young	GPa	3,5–4,0
Allungamento a rottura	%	3–6
Resistenza a flessione	MPa	80–100
Modulo a flessione	GPa	3,5–4,0
Temperatura di transizione vetrosa	°C	55–60
Temperatura di fusione	°C	150–160
Intervallo di temperatura di lavorazione	°C	190–220

In questo studio sono state impiegate sei differenti geometrie di superfici minimali triplicemente periodiche (TPMS) come strutture di core all'interno dei compositi

sandwich. Le configurazioni selezionate comprendono Gyroid, Schwarz-P, Diamond, Lidinoid, Split-P e Neovius.

ID	Descrizione	Spessore medio [mm]
Gyroid	Nota per l'elevata superficie specifica e la distribuzione uniforme delle sollecitazioni, la geometria Gyroid fornisce un buon equilibrio tra resistenza e leggerezza, risultando adatta ad applicazioni nei settori aerospaziale e automobilistico.	1,54
Schwarz-P	Presenta simmetria cubica e disposizione periodica, offrendo buone prestazioni meccaniche in compressione e flessione. È utilizzata in applicazioni che richiedono comportamento meccanico isotropo.	0,87
Diamond	Si caratterizza per l'elevato rapporto rigidità/peso, garantendo stabilità e durabilità; è frequentemente impiegata in applicazioni che	1,29

	richiedono elevata rigidità strutturale.	
Lidinoid	Con una topologia superficiale complessa, offre ottime capacità di assorbimento dell'energia ed è indicata per applicazioni che richiedono resistenza all'urto.	0,81
Split-P	È nota per l'efficiente distribuzione dei carichi e si presta bene a strutture leggere soggette a sollecitazioni flessionali.	1,14
Neovius	Caratterizzata da elevata simmetria e superficie ben distribuita, offre ottime proprietà meccaniche ed efficienza strutturale in termini di peso, risultando adatta ad applicazioni portanti.	0,27

Nome geometria	Gyroid	Schwarz-P	Diamond	Lidinoid	Split-P	Neovius
Rappresentazione grafica						

Ciascuna delle geometrie TPMS considerate è caratterizzata da superfici continue e periodiche che conferiscono proprietà meccaniche peculiari, rendendole idonee per la realizzazione di strutture leggere. Tutte le geometrie sono state progettate con

una percentuale di riempimento costante pari al 30%, definita come il rapporto tra il volume di materiale effettivamente depositato e il volume totale della struttura TPMS, al fine di garantire una densità uniforme tra i diversi campioni. Lo spessore indicato corrisponde allo spessore medio delle pareti delle strutture TPMS ed è stato controllato in fase di progettazione per mantenere costante la densità, indipendentemente dalla geometria adottata, pur rispettando la percentuale di riempimento prefissata del 30%. Le strutture sandwich con core TPMS sono state fabbricate mediante una stampante 3D Bambu Lab X1-Carbon, utilizzando la tecnologia di deposizione di filamento fuso (Fused Filament Fabrication, FFF), scelta per l'elevata precisione e la versatilità nella produzione di geometrie complesse. I parametri di processo principali sono stati selezionati sulla base di prove preliminari condotte nell'ambito di questo studio, con l'obiettivo di garantire un'elevata qualità di fabbricazione delle strutture TPMS. I valori adottati sono stati ottimizzati considerando il compromesso tra finitura superficiale, integrità meccanica e accuratezza dimensionale, attraverso un processo iterativo. In particolare, l'altezza del layer pari a 0,2 mm e la temperatura di stampa di 190°C si sono dimostrati efficaci nel garantire un buon equilibrio tra risoluzione e adesione interstrato. Nelle fasi iniziali di stampa è stato utilizzato filamento PLA nero per finalità di visualizzazione, mentre tutti i provini destinati alle prove meccaniche sono stati realizzati con PLA rosso, in modo da assicurare omogeneità tra i campioni.

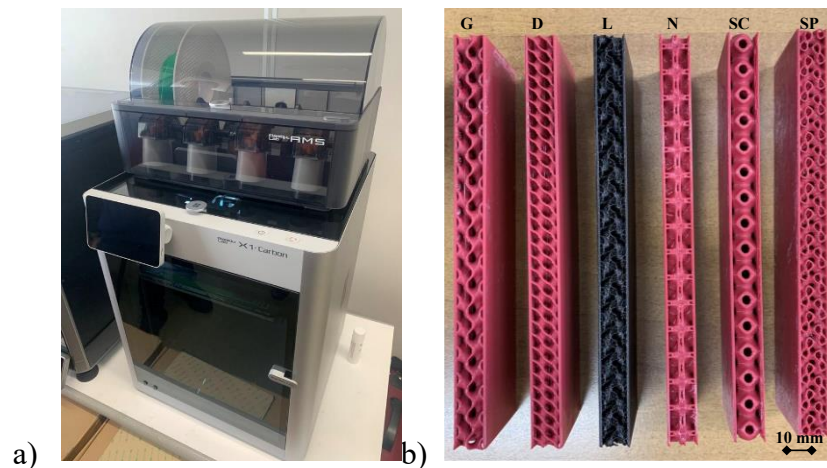


Figura 15: a) Stampante 3D Bambu Lab X1 Carbon; b) campioni prodotti mediante manifattura additiva con le diverse geometrie TPMS: G (Gyroid), SC (Schwarz-P), D (Diamond), L (Lidinoid), SP (Split-P), N (Neovius).

Parametro di processo	Descrizione
Temperatura di stampa	190 °C
Temperatura del piano	60 °C
Percentuale di riempimento	30%
Altezza del layer	0,2 mm
Materiale	Acido polilattico (PLA)

Tabella 6: Parametri di processo

3.2.3.3.1 Prove di flessione

Per la valutazione delle proprietà meccaniche e delle modalità di cedimento, sono state eseguite prove di flessione a tre punti su un totale di 30 provini utilizzando una macchina di prova Zwick/Roell 8253 equipaggiata con una cella di carico da 2,5 kN, in conformità alla norma ASTM D790. Tale standard rappresenta un riferimento affidabile per il confronto delle proprietà flessionali di diverse geometrie TPMS in condizioni di carico uniformi. La scelta del test a tre punti è motivata dalla sua capacità di fornire informazioni sia sulla rigidità sia sul comportamento a rottura, aspetti fondamentali in applicazioni in cui i core TPMS sono soggetti a sollecitazioni flessionali, come nei settori aerospaziale e automobilistico. Inoltre, il rapporto tra la luce di appoggio e lo spessore del campione è stato selezionato in modo da garantire un meccanismo di rottura dominato dalla flessione, riducendo al minimo l'influenza di altri possibili meccanismi di cedimento, quali taglio o schiacciamento locale. I provini, con dimensioni pari a $150 \times 40 \times 12$ mm, comprendevano sei diverse geometrie TPMS: Gyroid, Schwarz-P, Diamond, Lidinoid, Split-P e Neovius; per ciascuna geometria sono stati testati cinque campioni, al fine di garantire una sufficiente affidabilità statistica. Le prove sono state condotte con una velocità di deformazione pari a 1 mm/min e una distanza tra gli appoggi di 120 mm. Al termine delle prove, le modalità di cedimento e il comportamento microstrutturale dei campioni sono stati analizzati mediante un microscopio digitale Hirox KH 8700. È stato inoltre registrato il peso dei core TPMS, evidenziando differenze significative tra le diverse configurazioni geometriche.

Tipo di cella	Peso [g]
Gyroid	$36,18 \pm 0,0554$
Diamond	$35,43 \pm 0,0745$
Schwarz-P	$36,87 \pm 0,0605$
Split-P	$40,09 \pm 0,0856$
Neovius	$36,49 \pm 0,1075$
Lidinoid	$51,09 \pm 0,2934$

Tabella 7: Correlazione tra le geometrie TPMS e il peso.

Sebbene le geometrie Gyroid, Diamond, Schwarz e Neovius abbiano mostrato pesi simili, le configurazioni Split-P e Lidinoid sono risultate più pesanti a causa della loro topologia superficiale più complessa e della distribuzione del materiale, che ha determinato un maggiore deposito di materiale pur mantenendo invariata la percentuale di riempimento. Tale analisi evidenzia l'influenza della complessità geometrica sul consumo di materiale e sulle prestazioni meccaniche, sottolineando l'importanza di questo parametro nell'ottimizzazione delle strutture sandwich basate su TPMS per applicazioni in cui la leggerezza rappresenta un requisito fondamentale.

3.2.3.4 Risultati e discussione

La figura seguente mostra l'andamento del carico specifico (N/kg) in funzione dello spostamento (mm) per le sei differenti geometrie TPMS impiegate come core. I valori di carico specifico sono stati normalizzati rispetto al peso di ciascuna struttura al fine di compensare le differenze di massa e consentire un confronto diretto delle prestazioni meccaniche, indipendentemente dal peso. La geometria Gyroid evidenzia un ampio intervallo elastico seguito da una fase plastica marcata, superato il punto di snervamento, il carico specifico continua ad aumentare in modo progressivo, con una significativa capacità di assorbimento energetico prima di raggiungere il carico massimo. La propagazione della cricca avviene in maniera graduale e conduce a una riduzione controllata del carico, segnalando la capacità della struttura di ridistribuire efficacemente le sollecitazioni lungo un'estesa fase plastica. La geometria Diamond presenta un comportamento analogo a quello del Gyroid, con una regione elastica ben definita seguita da una fase plastica; tuttavia, quest'ultima risulta più breve e la propagazione della cricca è meno graduale,

determinando un calo più repentino del carico dopo il massimo, pur mantenendo una discreta capacità di assorbimento energetico prima della rottura. La struttura Split-P mostra un passaggio dalla fase elastica a una fase plastica relativamente breve; il carico specifico cresce rapidamente fino al valore di picco, seguito da un'improvvisa caduta del carico causata dalla rapida propagazione della cricca. Nonostante la ridotta estensione della fase plastica, la struttura manifesta comunque una deformazione plastica, confermando la natura duttile del comportamento, pur in presenza di una rottura brusca.

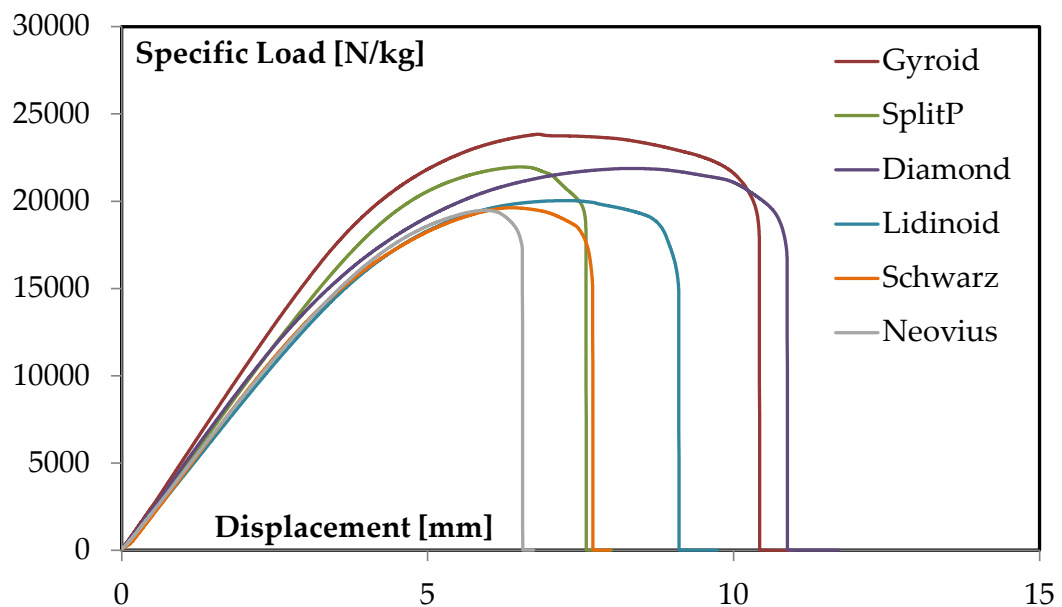


Figura 16: Andamento del carico specifico in funzione dello spostamento per ciascuna tipologia di cella.

La geometria Schwarz presenta una regione elastica di entità moderata e una fase plastica limitata. Dopo il punto di snervamento, il carico specifico aumenta leggermente prima di raggiungere il valore massimo. La propagazione della cricca risulta più prevedibile rispetto a quanto osservato nella geometria Split-P, portando a una riduzione graduale del carico dopo il massimo, segnale di un comportamento meccanico bilanciato ma con deformazione plastica contenuta. La geometria Lidinoid mostra una regione elastica più breve e una fase plastica ancora più limitata. Il carico specifico raggiunge rapidamente il valore di picco, seguito da un repentino calo dovuto alla veloce propagazione della cricca. Ciò indica che, sebbene la struttura manifesti deformazione plastica, la sua capacità di assorbire energia risulta inferiore rispetto alle configurazioni Gyroid e Diamond. La geometria

Neovius presenta la più breve regione elastica e una fase plastica pressoché minima. Il carico specifico aumenta rapidamente fino al massimo, seguito da un brusco cedimento, segnalando una scarsa capacità di redistribuzione delle sollecitazioni. Durante la transizione alla deformazione plastica, l'assorbimento energetico risulta estremamente ridotto, portando a una rapida propagazione della cricca e al collasso strutturale. Tutte le geometrie analizzate evidenziano un comportamento duttile, caratterizzato da una fase elastica seguita da una fase plastica. In particolare, le configurazioni Gyroid e Diamond presentano le regioni plastiche più estese, che favoriscono una propagazione progressiva della cricca e ritardano il cedimento. Al contrario, le geometrie Split-P, Schwarz, Lidinoid e Neovius mostrano fasi plastiche più contenute, con conseguente propagazione più rapida della cricca dopo il superamento della soglia elastica. Tale analisi mette in evidenza le differenze in termini di capacità di assorbimento dell'energia e modalità di propagazione della cricca tra le varie configurazioni, fattori che influenzano la loro idoneità per applicazioni in cui sono richieste rottura controllata e redistribuzione delle sollecitazioni. Il confronto con dati presenti in letteratura rafforza ulteriormente le osservazioni relative al comportamento delle geometrie Lidinoid e Neovius. Mentre configurazioni come Gyroid e Diamond sono state oggetto di numerosi studi per quanto riguarda le prestazioni meccaniche, le geometrie Lidinoid e Neovius risultano meno approfondite. Tuttavia, studi precedenti su strutture sandwich basate su TPMS confermano che topologie complesse, come quella Lidinoid, tendono ad aumentare il consumo di materiale e le concentrazioni di tensione, fattori che coincidono con il cedimento rapido osservato sotto carico flessionale nel presente lavoro. Allo stesso modo, anche per la geometria Neovius, evidenze sperimentali precedenti confermano i risultati rilevati. I valori massimi di carico specifico per ciascuna geometria testata evidenziano le differenze prestazionali tra le configurazioni. L'analisi dei risultati delle prove di flessione è stata condotta calcolando media e deviazione standard per ogni geometria TPMS, al fine di consentire un confronto chiaro della variabilità delle prestazioni meccaniche. Le geometrie Gyroid e Diamond raggiungono i valori più elevati di carico specifico, a testimonianza della loro efficiente distribuzione delle sollecitazioni e dell'idoneità a impieghi in cui la resistenza è un requisito fondamentale. La configurazione Split-

P si colloca immediatamente dopo, offrendo un'elevata resistenza al picco ma una ridotta capacità di assorbimento energetico. La geometria Schwarz mostra un comportamento intermedio, bilanciando la capacità portante con una rottura progressiva. Al contrario, le configurazioni Neovius e Lidinoid si distinguono per una minore efficienza meccanica, legata alla limitata capacità di distribuzione del carico, risultando pertanto meno adatte ad applicazioni che richiedono elevate prestazioni strutturali.

Tipo di cella	Carico specifico massimo [N/kg]
Gyroid	23602,0 ± 597,94
Diamond	22539,1 ± 644,29
Schwarz-P	19697,9 ± 506,65
Split-P	22232,5 ± 615,40
Neovius	19141,7 ± 738,13
Lidinoid	19451,2 ± 818,79

Tabella 8: Carico specifico massimo per ciascuna tipologia di cella.

La sequenza di immagini relativa alla struttura Gyroid evidenzia i meccanismi di cedimento sotto carico flessionale. L'intero processo di frattura si sviluppa in un intervallo di circa 2 minuti, corrispondente a uno spostamento di 2 mm, in linea con la progressiva riduzione del carico osservata durante il test. Tra tutte le geometrie TPMS analizzate, la configurazione Gyroid ha mostrato il meccanismo di cedimento più complesso, caratterizzato da una propagazione graduale della cricca e da una ridistribuzione dell'energia prima della rottura completa. Per tale motivo, è stato documentato in dettaglio il processo di frattura della struttura Gyroid, evidenziandone le fasi principali. Al contrario, le altre geometrie hanno presentato modalità di propagazione della cricca più semplici e dirette.

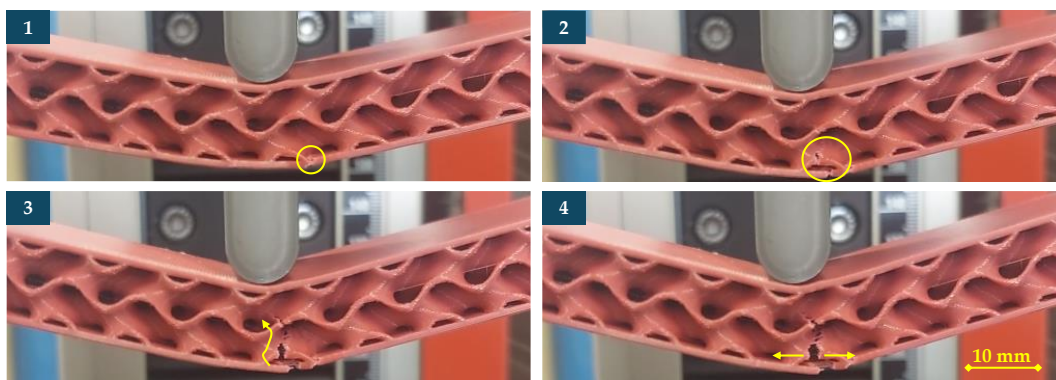


Figura 17: Modalità di cedimento della struttura Gyroid..

La prima fase del cedimento mostra la formazione iniziale di una cricca localizzata all'interfaccia tra il core e la pelle inferiore. Tale area è soggetta a elevate tensioni di trazione durante il carico flessionale, il che favorisce l'innescò della cricca nel punto di connessione tra la geometria del core e la pelle. La concentrazione localizzata degli sforzi in questa giunzione ne fa un punto critico per l'avvio del danneggiamento. In una fase successiva, la cricca si propaga ulteriormente, attraversando sia il core che la pelle inferiore. Questa cricca secondaria ha probabilmente origine dalla frattura iniziale e si sviluppa a causa del proseguimento del carico flessionale. Il tracciato della cricca evidenzia come l'interfaccia tra core e pelle rappresenti un punto debole della struttura in presenza di sollecitazioni di trazione. Nella terza fase, la propagazione della cricca avviene verticalmente attraverso il core, estendendosi verso le regioni superiori della struttura. La frattura segue i percorsi meccanicamente più deboli propri della topologia Gyroid, corrispondenti a zone con elevate concentrazioni di sforzo. In questa fase risulta evidente la limitata capacità della struttura di ridistribuire i carichi una volta che la cricca ha superato una lunghezza critica. Nell'ultima fase, l'apertura della cricca si amplia significativamente, determinando una separazione netta tra il core e la pelle. L'apertura progressiva della frattura indica che la struttura ha raggiunto il limite massimo di carico sopportabile e che il cedimento catastrofico è imminente. La cricca ha raggiunto uno spostamento di circa 2 mm, a conferma dell'avanzata fase del processo di frattura. Le modalità di cedimento osservate nelle geometrie TPMS Split-P, Diamond, Lidinoid e Schwarz sottoposte a carico flessionale evidenziano differenze nette per quanto riguarda l'innescò, la propagazione della cricca e il

comportamento finale della struttura, in accordo con le tendenze riscontrate nelle curve carico specifico in funzione dello spostamento.

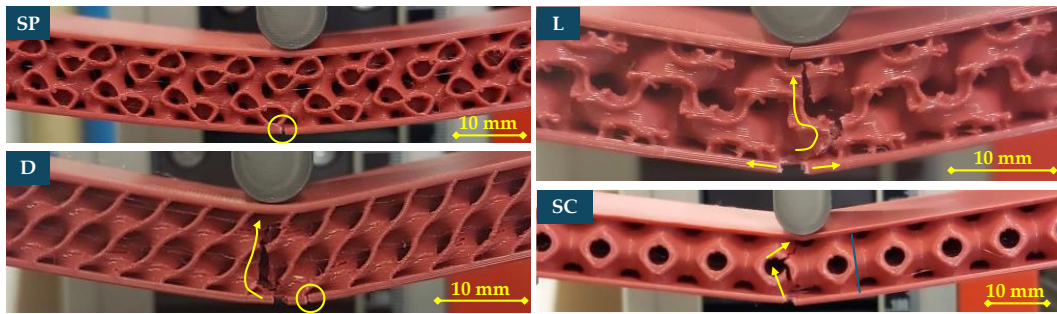


Figura 18: Modalità di cedimento delle strutture Split-P, Diamond, Lidinoid e Schwarz.

Nella struttura Split-P, l'innesco della cricca avviene all'interfaccia tra il core e la pelle inferiore, in corrispondenza di una zona soggetta a elevate concentrazioni di tensione di trazione durante il carico flessionale. La cricca si propaga rapidamente, portando a un cedimento improvviso caratterizzato da un brusco calo del carico subito dopo il picco. Questo comportamento è indicativo della presenza di una regione plastica limitata nella geometria Split-P, con conseguente ridotta capacità di assorbimento dell'energia prima della frattura. Sebbene il cedimento non sia di tipo fragile in senso stretto, la propagazione rapida della cricca e il collasso repentino evidenziano una capacità ridotta della struttura di ridistribuire le sollecitazioni, in accordo con quanto osservato dalle curve carico-spostamento. Per quanto riguarda la geometria Lidinoid, il processo di frattura si avvia con la formazione di cricche multiple in prossimità dell'interfaccia core-pelle. Tali cricche si propagano verticalmente all'interno del core e orizzontalmente lungo la pelle, dando origine a un pattern di frattura complesso. Questo comportamento riflette una capacità limitata della struttura di ridistribuire efficacemente le sollecitazioni, verosimilmente dovuta alla topologia intricata e non uniforme della geometria. Sebbene la frattura avvenga in modo rapido e con una marcata riduzione del carico, è comunque presente una fase plastica prima del collasso, come confermato dall'andamento della curva carico-spostamento. La propagazione accelerata della cricca conferma la ridotta capacità di assorbimento energetico. Nella geometria Schwarz, una singola cricca si forma all'interfaccia tra il core e la pelle, propagandosi in diagonale verso l'interno del core. La cricca si estende progressivamente verso l'alto e verso l'esterno, delineando un percorso

relativamente semplice e prevedibile. Questa configurazione mostra una modalità di cedimento progressiva, nella quale la cricca avanza in maniera graduale, permettendo un maggiore assorbimento energetico prima della rottura rispetto alla geometria Lidinoid. La deformazione plastica, seppur contenuta, è chiaramente osservabile e coerente con la curva carico-spostamento, che evidenzia una riduzione graduale del carico dopo il massimo, indicativa di un processo di cedimento controllato. La struttura Neovius, invece, presenta un comportamento di frattura particolarmente repentino, con un'improvvisa caduta del carico una volta raggiunto il picco. La fase di propagazione della cricca risulta difficilmente rilevabile a causa della natura improvvisa del cedimento. Nonostante sia presente una minima deformazione plastica prima del collasso, la struttura mostra una marcata incapacità di ridistribuire le sollecitazioni, con conseguente assorbimento energetico molto limitato e scarsa resistenza a carichi flessionali. L'analisi condotta mediante microscopia ottica ha permesso di osservare in modo dettagliato le modalità di frattura tipiche associate alle diverse geometrie cellulari analizzate.

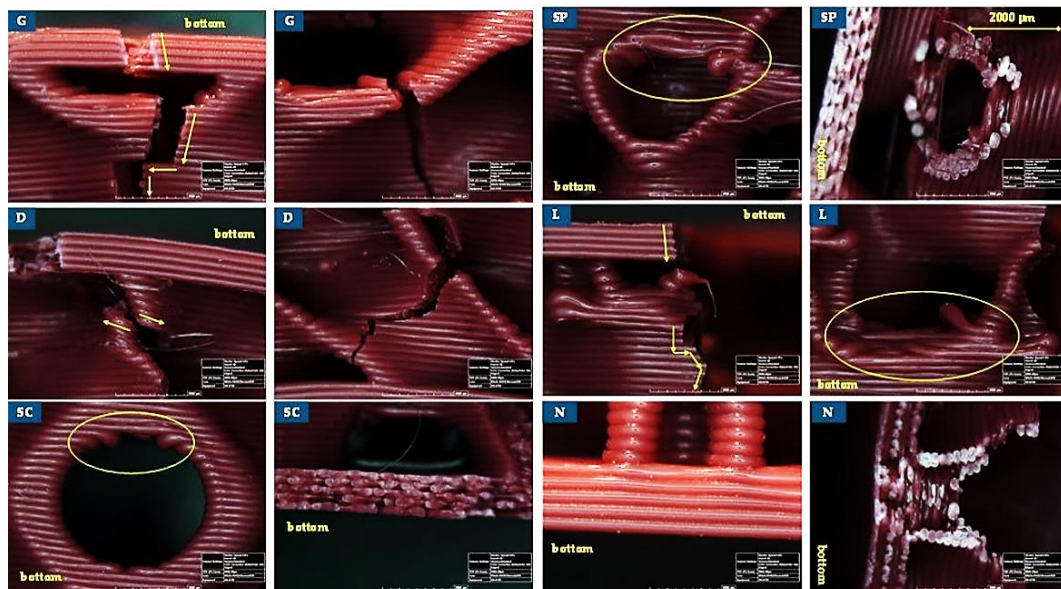


Figura 19: Analisi mediante microscopia ottica delle superfici di frattura per le diverse geometrie TPMS del core dopo le prove di flessione: G (Gyroid), SP (Split-P), D (Diamond), L (Lidinoid), SC (Schwarz), N (Neovius). Il termine "bottom" si riferisce alla pelle inferiore.

Nella struttura Gyroid, la cricca si origina all'interfaccia tra core e pelle e si propaga attraverso il core lungo i percorsi definiti dalla stratificazione del materiale. In alcune zone si osservano fenomeni di delaminazione, indicativi di debolezze

localizzate nell'adesione tra gli strati. Nonostante ciò, la geometria risulta efficace nella redistribuzione delle sollecitazioni e presenta una fase plastica estesa prima del cedimento, contribuendo a ritardare il collasso catastrofico. La geometria Split-P mostra una buona qualità di deposizione nelle cavità interne, anche se si riscontrano lievi irregolarità nelle aree prive di supporto. Il comportamento a frattura è caratterizzato da una fase plastica ridotta, che conduce a un rapido calo del carico dopo il picco. Il cedimento improvviso riflette la limitata capacità della geometria di redistribuire le sollecitazioni, in linea con il brusco decremento osservato nella curva carico specifico-spostamento. La struttura Diamond evidenzia un comportamento a frattura bilanciato, con cricche che seguono percorsi irregolari influenzati dalle concentrazioni di tensione e, talvolta, allineati alla curvatura delle celle. La presenza di segni di deformazione plastica suggerisce un assorbimento energetico localizzato e conferma la capacità della geometria di bilanciare rigidità e duttilità. La configurazione Lidinoid presenta un comportamento a frattura complesso, con cricche che si originano all'interfaccia tra core e pelle. Sebbene la deposizione appaia nel complesso uniforme, la topologia intricata comporta un maggiore consumo di materiale e la formazione di concentrazioni di sforzo localizzate, che favoriscono una rapida propagazione della cricca. Il comportamento osservato mette in evidenza le limitazioni meccaniche della struttura, nonostante la complessità geometrica. La geometria Schwarz mostra una deposizione costante e una modalità di cedimento prevedibile e progressiva. Le cricche si propagano in modo lineare, a conferma della capacità della geometria di redistribuire efficacemente le sollecitazioni. Le lievi irregolarità riscontrate nelle aree non supportate non compromettono significativamente l'integrità complessiva, come dimostrato dalla riduzione graduale del carico osservata nei test meccanici. La struttura Neovius presenta criticità sia nella deposizione sia nel comportamento a frattura. Sebbene le superfici piane evidenzino una deposizione regolare, le zone prive di supporto mostrano imperfezioni che generano concentrazioni di tensione localizzate. La struttura subisce un rapido calo del carico dopo lo snervamento, indicando una deformazione plastica molto limitata e una ridotta capacità di assorbimento dell'energia in condizioni di carico flessionale.

3.2.3.5 Conclusioni

Le analisi ottiche e meccaniche condotte sulle sei geometrie TPMS – Gyroid, Split-P, Diamond, Lidinoid, Schwarz e Neovius – evidenziano differenze significative nei meccanismi di cedimento e nelle prestazioni strutturali sotto carico flessionale. Le configurazioni Gyroid e Diamond mostrano le migliori prestazioni complessive, caratterizzate da modalità di rottura progressive e da un'efficace redistribuzione delle sollecitazioni. Tali geometrie sono in grado di sostenere una propagazione graduale della cricca e un elevato assorbimento di energia prima della frattura, risultando adatte ad applicazioni che richiedono congiuntamente resistenza e duttilità. Al contrario, le geometrie Split-P e Lidinoid evidenziano un comportamento meno favorevole: la prima presenta un innesco localizzato della cricca e una propagazione rapida che porta a un cedimento improvviso; la seconda, nonostante la maggiore complessità geometrica e il più elevato consumo di materiale, risente della presenza di concentrazioni di tensione e di una ridotta capacità di assorbimento dell'energia, fattori che ne limitano l'efficienza meccanica. La configurazione Schwarz si colloca in una posizione intermedia, mostrando un comportamento bilanciato, con una propagazione della cricca prevedibile e una modalità di cedimento progressiva. La capacità di redistribuire efficacemente gli sforzi e di evitare collassi improvvisi rende questa geometria una soluzione affidabile per applicazioni in cui è richiesta una rottura controllata. La struttura Neovius risulta la meno prestante, mostrando una capacità limitata di assorbimento dell'energia e un cedimento rapido. L'incapacità di redistribuire le sollecitazioni sotto carico flessionale ne compromette l'idoneità per scenari strutturali particolarmente gravosi. Tali risultati sottolineano il ruolo cruciale della geometria nel determinare il comportamento meccanico delle strutture basate su TPMS. Sebbene geometrie come Gyroid e Diamond offrano prestazioni superiori, il miglioramento dell'adesione interstrato e della connessione tra core e pelle rappresenta un aspetto fondamentale per incrementare ulteriormente la resistenza e l'affidabilità delle strutture sandwich realizzate mediante stampa 3D. Rispetto ai materiali da core convenzionali, come le schiume polimeriche e le strutture a nido d'ape, i core basati su TPMS offrono vantaggi distintivi, tra cui una distribuzione delle sollecitazioni più uniforme, una maggiore continuità strutturale e una migliore

capacità di assorbimento dell'energia. Tali proprietà rendono queste strutture particolarmente adatte ad applicazioni in cui il design leggero e le elevate prestazioni meccaniche sono requisiti essenziali, come nel settore aerospaziale (pannelli strutturali, componenti resistenti agli impatti), automobilistico (assorbitori di energia per impatti) e biomedicale (scaffold porosi per rigenerazione ossea). Tra le geometrie analizzate, le configurazioni Gyroid e Diamond hanno evidenziato le proprietà meccaniche più elevate, risultando pertanto le più promettenti per applicazioni portanti. In prospettiva, i futuri sviluppi potrebbero concentrarsi sull'ottimizzazione del processo produttivo per migliorare la qualità superficiale, sulla regolazione dei parametri della cella unitaria per incrementare l'efficienza meccanica, e sull'adozione della stampa multimateriale per modulare localmente le proprietà della struttura.

3.2.4 Analisi dell'indentazione quasi-statica di strutture TPMS a gradiente funzionale realizzate mediante tecnologie di manifattura additiva

3.2.4.1 Abstract

Il presente lavoro si propone di analizzare le proprietà meccaniche di provini in PLA con morfologia giroide, realizzati tramite stampa tridimensionale FDM, nei quali è stato introdotto un gradiente funzionale di densità. Attraverso l'applicazione di prove di indentazione a bassa velocità e successive osservazioni microscopiche, si intende valutare l'impatto della variazione dello spessore interno sul comportamento globale della struttura, al fine di esplorarne la compatibilità con scenari applicativi ad alta specializzazione nel campo dell'ingegneria meccanica avanzata.

3.2.4.2 Introduzione

L'avanzamento delle tecnologie di produzione ha generato un profondo mutamento nei criteri di progettazione e realizzazione di dispositivi meccanici, portando all'adozione di metodologie basate sulla complessità geometrica e sull'ottimizzazione funzionale[20]. In tale ambito, la manifattura additiva ha assunto un ruolo centrale, offrendo un accesso senza precedenti alla fabbricazione di strutture ingegneristicamente sofisticate, precedentemente non realizzabili con i processi tradizionali[21]. Tra le architetture emergenti, le superfici minimali a periodicità tripla (TPMS) si distinguono per l'elevata efficienza strutturale, la distribuzione omogenea delle sollecitazioni e la capacità di coniugare leggerezza e resistenza meccanica[22–24]. Numerosi studi hanno già evidenziato la superiorità delle strutture TPMS rispetto ai core tradizionali, sia in termini di resistenza che di capacità di assorbimento energetico[25]. Parallelamente, confronti sistematici tra diverse morfologie di TPMS hanno messo in luce le specificità di ciascuna configurazione, fornendo un quadro comparativo ampio sulle loro prestazioni[26]. Su queste basi, l'attenzione si è spostata verso l'introduzione di gradienti funzionali all'interno delle geometrie TPMS[27–30], con l'obiettivo di modulare localmente la densità e ottimizzare ulteriormente il comportamento meccanico[31]. In questo studio viene analizzato l'effetto della variazione a gradiente funzionale su strutture

TPMS sottoposte a prove di indentazione quasi-statica, al fine di valutare in che misura questa strategia progettuale possa migliorare la risposta meccanica e ampliare le potenzialità applicative di tali architetture[27].

3.2.4.3 Materiali e metodi

Durante le attività sperimentali, è stata impiegata una dotazione strumentale specificamente selezionata per la progettazione, fabbricazione e caratterizzazione meccanica di provini a morfologia giroide con variazione controllata dello spessore. L'apparato sperimentale è stato concepito per garantire un'analisi dettagliata della risposta strutturale delle geometrie testate, con particolare attenzione agli effetti indotti dalla distribuzione non uniforme della densità. In questa sezione sono descritte le attrezzature adottate e le procedure operative impiegate per l'intera fase di sviluppo, dalla modellazione geometrica alla validazione meccanica dei campioni. La produzione additiva dei provini è stata eseguita mediante un sistema di stampa tridimensionale a deposizione fusa (FDM), modello Bambu Lab X1 Carbon, attualmente in dotazione presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Messina presso il laboratorio LIVINGAM. Tale dispositivo è stato selezionato per le sue elevate prestazioni in termini di risoluzione di stampa, compatibilità con materiali polimerici tecnici e possibilità di gestire configurazioni geometriche complesse, come quelle tipiche delle strutture TPMS.

3.2.4.3.1 Modellazione provino

La definizione del modello geometrico dei provini destinati alla caratterizzazione mediante indentazione quasi-statica ha richiesto un processo di modellazione articolato, condotto secondo una sequenza operativa rigorosa. Nella fase preliminare, è stato necessario conformarsi alle specifiche dimensionali e geometriche imposte dalla normativa tecnica di riferimento, al fine di garantire la riproducibilità delle condizioni di prova e la confrontabilità dei risultati sperimentali. L'adozione di standard consolidati per la definizione del campione e delle modalità di test costituisce un presupposto essenziale per assicurare coerenza metodologica e validità statistica ai dati ottenuti, rendendoli idonei all'inquadramento in un contesto scientifico sistematizzato. La prova di indentazione quasi-statica è stata eseguita in conformità alla norma ASTM D6264–

98, emanata dall'American Society for Testing and Materials, la quale definisce i criteri dimensionali e le condizioni sperimentali per la caratterizzazione di materiali compositi sottoposti a carichi concentrati. Secondo tale specifica, i provini devono presentare una configurazione planare di 152×152 mm con uno spessore massimo di 5 mm. La norma stabilisce inoltre la necessità di utilizzare una base di supporto in acciaio rigido, dotata di apertura centrale, al fine di garantire la libera deformazione del campione durante il carico. In presenza di specifici requisiti sperimentali o vincoli progettuali, è comunque ammessa la possibilità di adottare geometrie differenti, purché tali variazioni siano giustificate da esigenze tecniche e accompagnate da un'adeguata valutazione degli effetti sulla validità del test. La modellazione del provino è stata successivamente condotta mediante l'impiego del software Ntopology, una piattaforma avanzata di progettazione computazionale orientata alla generazione di geometrie complesse mediante approcci algoritmici. Questo strumento consente non solo la definizione parametrica del componente da sottoporre a test, sebbene entro alcuni vincoli geometrici e funzionali, ma anche l'integrazione di modelli esterni su cui è possibile eseguire simulazioni numeriche di tipo meccanico, termico e fluidodinamico. Tale versatilità rende il software particolarmente adatto alla progettazione di strutture a topologia complessa, come le configurazioni TPMS, e alla valutazione virtuale del loro comportamento in condizioni operative specifiche. Ntopology si distingue per un'interfaccia grafica che, pur richiamando l'organizzazione visuale di numerosi ambienti CAD tradizionali, introduce un paradigma operativo fondato sulla logica a blocchi. In tale contesto, la modellazione e la validazione delle geometrie non avvengono tramite un editing diretto delle superfici, bensì attraverso la costruzione di flussi procedurali composti da moduli funzionali interconnessi, ciascuno dei quali consente la definizione parametrica di entità geometriche, vettori, curve o relazioni matematiche. Il pannello principale, denominato "Create", costituisce il nucleo operativo per la generazione delle primitive geometriche e per l'impostazione delle variabili progettuali. Accanto a esso, il software mette a disposizione sezioni dedicate alla modellazione di strutture reticolari e topologie TPMS, nonché strumenti integrati per l'esecuzione di simulazioni numeriche, tra cui analisi agli elementi finiti, termiche e fluidodinamiche. Tali funzionalità risultano

particolarmente utili in contesti di ottimizzazione funzionale, come la progettazione avanzata di scambiatori di calore. Inoltre, il modulo “Lightweighting” consente di implementare strategie di alleggerimento strutturale basate su distribuzioni spaziali delle sollecitazioni, delle temperature o di altri parametri fisici, derivati da precedenti analisi, consentendo una riduzione selettiva del materiale nelle aree a basso contributo meccanico. Il campione oggetto di indagine è stato progettato con una configurazione planare di 150×150 mm e uno spessore totale pari a 22 mm, suddiviso in due pelli esterne di 1 mm ciascuna e un nucleo centrale a geometria complessa di 20 mm. La modellazione iniziale è stata condotta utilizzando un modulo parametrico per la generazione di solidi prismatici rettangolari. A partire da tale struttura base, si è proceduto all’integrazione di una topologia interna di tipo TPMS, mediante l’utilizzo del modulo “Infill Gyroid” disponibile nel software Ntopology. Tale funzione consente l’applicazione di una trama reticolare basata su superficie minimali triplicemente periodiche, nella quale è possibile controllare lo spessore locale degli elementi strutturali. Per calibrare la densità relativa del reticolo al 30% rispetto al corrispondente volume pieno, è stata impiegata una procedura iterativa di tipo proporzionale. Partendo da un valore iniziale dello spessore pari a 1 mm, il modulo “mass properties” ha restituito una densità relativa del 19%. Applicando un’equivalenza proporzionale del tipo: $0,19 : 1 = 0,30 : x$. È stato determinato lo spessore ottimale pari a circa 1,579 mm, in grado di produrre una densificazione interna corrispondente al valore target. Una volta ottenuta la configurazione base a densità costante, si è proceduto alla definizione di un secondo campione, caratterizzato da un gradiente funzionale dello spessore, finalizzato a introdurre una variazione controllata della distribuzione di massa all’interno della struttura, con l’obiettivo di indagare gli effetti di tale variazione sulla risposta meccanica durante le prove di indentazione. Per analizzare l’influenza della variazione spaziale dello spessore sulla risposta meccanica delle strutture TPMS, è stata sviluppata una configurazione provino con distribuzione funzionale graduale della densità, ottenuta attraverso un incremento dello spessore localizzato nella zona centrale e una riduzione progressiva verso i bordi esterni. Tale configurazione è stata implementata sfruttando una funzione “Ramp” all’interno dell’ambiente Ntopology, basata su un campo scalare (Scalar Field), ossia una funzione che

associa a ciascun punto di un dominio geometrico un valore numerico, utilizzabile per modulare parametri strutturali come lo spessore in funzione della posizione. Questo approccio rappresenta un metodo particolarmente efficace nella definizione di gradienti funzionali e si presta anche all'implementazione di distribuzioni ingegneristiche di altre grandezze fisiche, quali tensione, temperatura o pressione. Nel contesto specifico, la progettazione del campo scalare è stata guidata da un'analisi preliminare dei campioni con densità omogenea, esaminando le modalità di collasso in seguito alla prova di indentazione. A partire da tali osservazioni sperimentali, è stato definito un volume geometrico rappresentativo della regione maggiormente coinvolta nella deformazione plastica. Tale volume è stato modellato come un solido di rivoluzione a forma conica, con asse verticale e vertice centrato sull'area di applicazione del carico. Le dimensioni del cono sono state determinate in base all'estensione del cratere di rottura osservato: altezza pari a 33,3 mm e raggio di base pari a 25 mm. Questo dominio è stato utilizzato come riferimento spaziale per l'applicazione del gradiente di spessore, con l'obiettivo di concentrare il materiale nella zona più sollecitata e ridurlo progressivamente nelle aree periferiche.

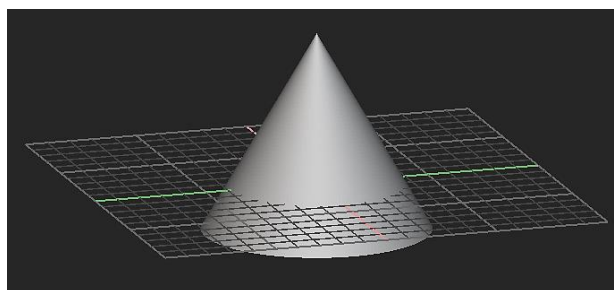


Figura 20: Cono utilizzato per la creazione del campo scalare.

In seguito alla definizione del dominio geometrico per l'introduzione del gradiente, è stato necessario determinare il valore massimo di spessore da assegnare alla regione centrale del provino, al fine di implementare correttamente la funzione "Ramp" all'interno del campo scalare. Assumendo come riferimento il valore minimo di spessore pari a 1,57 mm, corrispondente a una densità relativa del 30% rispetto al volume pieno, il valore massimo è stato incrementato di circa 1 mm, raggiungendo così uno spessore pari a 2,55 mm nella zona maggiormente sollecitata. Tale variazione, sebbene contenuta in termini assoluti, è stata progettata

per valutare con precisione gli effetti meccanici indotti da un incremento localizzato della massa strutturale. Le simulazioni condotte e le proprietà estratte dal modello indicano che l'aumento dello spessore si traduce in un incremento moderato della densità complessiva del provino, che rimane comunque entro un range compreso tra il 30% e il 33% rispetto al modello pieno. Questo risultato ha confermato la possibilità di modulare le caratteristiche meccaniche della struttura in modo localizzato, mantenendo al contempo un contenuto materiale globalmente limitato, obiettivo strategico nella progettazione di strutture leggere ad alte prestazioni.

3.2.4.3.2 Produzione dei provini

A conclusione della fase di modellazione geometrica dei provini, realizzata mediante strumenti CAD parametrici, si è proceduto all'esportazione dei modelli nel formato STL (Standard Tessellation Language), comunemente adottato nei processi di manifattura additiva per la conversione delle geometrie tridimensionali in strutture discretizzate. Il formato STL consente la rappresentazione del modello mediante una mesh triangolare, in cui ogni faccia piana è definita da tre vertici associati a un sistema di riferimento cartesiano. Questa discretizzazione, pur essendo largamente compatibile con i software di slicing e preparazione alla stampa, introduce inevitabilmente una perdita di dettaglio geometrico, dovuta alla necessaria approssimazione delle superfici complesse. L'utilizzo di una mesh a bassa risoluzione, se da un lato riduce la dimensione del file e facilita l'elaborazione computazionale, dall'altro può compromettere la precisione nella riproduzione delle caratteristiche morfologiche più fini. Viceversa, l'esportazione di modelli ad alta definizione incrementa sensibilmente il numero di triangoli necessari alla rappresentazione e, di conseguenza, la dimensione del file STL, con un impatto diretto sui tempi di processamento, sulla compatibilità software e sull'affidabilità nella fase di slicing. Tale criticità si accentua nel caso di strutture a topologia complessa come le TPMS, per le quali è richiesto un compromesso accurato tra fedeltà geometrica e sostenibilità computazionale nella fase di pre-stampa. La fase di preparazione del file per la stampa additiva è stata gestita mediante l'impiego del software Bambu Studio, un'interfaccia avanzata di slicing compatibile con sistemi FDM, progettata per offrire un controllo dettagliato sul processo di generazione dei percorsi utensile. L'ambiente operativo del software, caratterizzato da una struttura

grafica intuitiva ma tecnicamente sofisticata, consente la visualizzazione tridimensionale del modello importato, con possibilità di intervenire direttamente su parametri geometrici e impostazioni di stampa, qualora si rendano necessarie modifiche prima dell'inizio della produzione. In presenza di modelli con elevata estensione verticale o complessità morfologica, Bambu Studio implementa in modo automatico strategie di stabilizzazione e supporto, con l'obiettivo di prevenire cedimenti durante la deposizione del materiale, migliorando così l'affidabilità dell'intero processo. Una volta caricato il modello in formato STL, il software esegue l'operazione di "slicing", che rappresenta una fase cruciale nella transizione dal modello virtuale all'oggetto fisico. Il processo consiste nella segmentazione del solido tridimensionale in una serie di strati orizzontali di spessore definito, corrispondenti ai layer successivi che la stampante andrà a realizzare. Il risultato di tale segmentazione è un file di istruzioni (tipicamente in formato G-code) che guida il sistema di stampa nel posizionamento del materiale lungo il piano di lavoro. Un ulteriore vantaggio offerto dal software risiede nella sua capacità di riconoscere automaticamente modelli ad alta complessità computazionale, proponendo, ove necessario, una riduzione controllata della densità di triangolazione della mesh. Questa funzione di semplificazione geometrica consente di ottimizzare i tempi di slicing e di ridurre il carico computazionale, mantenendo al contempo un'elevata coerenza tra geometria progettata e geometria stampata. Nel contesto della stampa FDM, è possibile impiegare una vasta gamma di materiali termoplastici, tra cui il PLA (acido polilattico), le fibre naturali di origine vegetale come la canapa, nonché altri biocompositi a matrice polimerica. In fase preliminare, è stata presa in considerazione l'opzione di utilizzare materiali rinforzati con fibre naturali per la fabbricazione dei provini, al fine di esplorare potenziali vantaggi in termini di sostenibilità ambientale e comportamento meccanico. Tuttavia, i test condotti con tali materiali hanno evidenziato incompatibilità operative con il sistema di stampa disponibile. In particolare, è stata riscontrata una scarsa efficienza nella fusione e nell'estrusione del filamento, causata da una temperatura insufficiente all'interno dell'hot-end, che ha determinato il precoce raffreddamento del materiale e conseguente occlusione dell'ugello. Tale problematica ha compromesso la continuità del processo e la qualità della deposizione, rendendo impraticabile

l'utilizzo delle fibre naturali con la specifica configurazione della stampante in dotazione. Alla luce di queste considerazioni, è stato selezionato il PLA come materiale di riferimento per la produzione dei campioni, in quanto caratterizzato da un'elevata compatibilità con la tecnologia FDM, buona processabilità e stabilità dimensionale durante la deposizione. Il polilattide (PLA) è un polimero termoplastico appartenente alla classe dei poliesteri alifatici, noto per la sua biodegradabilità e per l'origine da fonti rinnovabili. La sua sintesi avviene prevalentemente mediante polimerizzazione dell'acido lattico, ottenuto da biomasse agricole contenenti zuccheri o amidi, come mais, patate o barbabietole, oppure attraverso la polimerizzazione ad anello del lattide, una molecola ciclica derivata dallo stesso acido. Il PLA si è affermato negli ultimi anni come uno dei materiali più diffusi nella manifattura additiva, grazie alla sua processabilità a basse temperature, alla stabilità dimensionale durante la stampa e alle proprietà ambientali favorevoli, tra cui la compostabilità in condizioni controllate. Dal punto di vista meccanico, il PLA presenta una resistenza a trazione e un modulo elastico che si collocano su livelli comparabili, e in alcuni casi superiori, a quelli di polimeri convenzionali come polistirene, polipropilene e polietilene. Tuttavia, il materiale mostra una fragilità intrinseca, associata a un basso allungamento a rottura e a una limitata tenacità, che ne riducono l'idoneità in applicazioni soggette a carichi d'urto o elevate deformazioni plastiche. Un'ulteriore limitazione è rappresentata dalla bassa temperatura di transizione vetrosa, che ne compromette la stabilità dimensionale a temperature relativamente moderate, rendendolo poco adatto per impieghi termici spinti. Inoltre, la sua permeabilità ai gas, come ossigeno, anidride carbonica e vapore acqueo, risulta superiore rispetto a materiali polimerici tecnici come il PET, influenzando negativamente le performance in ambito packaging. In risposta a tali criticità, la ricerca scientifica e industriale si è orientata verso il miglioramento delle proprietà del PLA mediante modificazione strutturale, introduzione di rinforzi fibrosi, cariche funzionali e additivi mirati, al fine di potenziarne la resistenza meccanica, la stabilità termica e le proprietà barriera. Parallelamente, l'interesse crescente per materiali a basso impatto ambientale e le normative sempre più stringenti in materia di sostenibilità stanno alimentando una rapida espansione del mercato dei biopolimeri. Il PLA, in tale scenario, rappresenta

una delle soluzioni più promettenti per coniugare requisiti prestazionali e compatibilità ambientale in una molteplicità di settori, tra cui biomedicale, imballaggio, tessile tecnico e componentistica industriale.

3.2.4.3.3 Test di Indentazione

La prova di indentazione in condizioni quasi-statiche costituisce una metodologia consolidata per la caratterizzazione meccanica di materiali e strutture sottoposti a sollecitazioni localizzate. Tale procedura consente di determinare non solo la risposta del materiale a un carico concentrato, ma anche di inferire proprietà correlate alla durezza superficiale e alla capacità di dissipazione dell'energia in condizioni di deformazione progressiva. L'efficacia del test, intesa come validità scientifica e riproducibilità dei risultati, dipende strettamente dall'aderenza a normative tecniche specifiche che regolano le modalità di esecuzione della prova e le caratteristiche geometriche del sistema di prova nel suo complesso. Nel presente studio, le attività sperimentali sono state condotte in conformità alla norma ASTM D6264–98, la quale disciplina l'esecuzione dell'indentazione quasi-statica su materiali compositi strutturali. Tale norma specifica i requisiti dimensionali del provino, le caratteristiche geometriche dell'indentatore e le condizioni vincolari del supporto. In particolare, quest'ultimo deve essere configurato con un'apertura centrale di diametro pari a $127 \pm 2,5$ mm, al fine di evitare interferenze meccaniche tra il provino e il piano di appoggio durante la fase di carico. Questo accorgimento consente alla struttura testata di deformarsi liberamente nel verso opposto all'applicazione della forza, garantendo così una corretta distribuzione delle sollecitazioni e l'assenza di vincoli artificiali che possano alterare l'interpretazione del comportamento meccanico osservato. Prima dell'esecuzione della prova di indentazione, è necessario procedere con una fase preliminare di calibrazione del sistema sperimentale, al fine di garantire l'accuratezza delle misure e la correttezza dell'allineamento tra il dispositivo di carico e il provino. In particolare, l'indentatore—generalmente costituito da una punta sferica o semisferica—deve essere posizionato in modo tale da realizzare un contatto iniziale puntuale e controllato con la superficie superiore del campione. Solo a seguito della verifica di tali condizioni iniziali è possibile avviare la procedura di prova. Durante l'esecuzione del test, la macchina di indentazione applica un carico crescente

secondo una legge di avanzamento a velocità controllata, provocando la progressiva deformazione del provino nella zona di contatto. L'acquisizione simultanea dei dati di carico e spostamento consente la costruzione della curva forza-spostamento, che rappresenta la risposta meccanica del materiale o della struttura sottoposta a sollecitazione concentrata. Tale curva costituisce la base per l'estrazione di parametri meccanici significativi, quali la rigidità iniziale, il carico massimo sopportato e l'eventuale comportamento plastico o fragile del campione. Al termine della prova, il componente viene rimosso dal sistema di carico e sottoposto a successive analisi, che possono includere l'osservazione visiva o microscopica delle modalità di collasso, la misurazione delle deformazioni residue o la valutazione della distribuzione delle cricche, qualora presenti. I dati acquisiti vengono quindi elaborati per la caratterizzazione quantitativa della risposta strutturale, con l'obiettivo di correlare le proprietà geometriche e materiali alla prestazione meccanica osservata. Le prove di indentazione statica sono state condotte mediante l'utilizzo di una macchina di prova Zwick-Roell, installata presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria. L'unità è caratterizzata da una capacità massima di carico pari a 600 kN e risulta equipaggiata con una cella di carico di precisione da 10 kN, specificamente selezionata per garantire un'elevata sensibilità nella misurazione delle forze applicate durante test su materiali a bassa e media resistenza. Il sistema di applicazione del carico è costituito da un meccanismo a doppia vite senza fine, azionato da un motore elettrico controllato in retroazione, il quale consente uno spostamento verticale continuo e regolare dell'indentatore. Quest'ultimo è connesso all'attuatore principale tramite un'interfaccia meccanica dotata di guide inclinate, progettate per garantire l'allineamento ottimale della punta e facilitare le operazioni di montaggio e sostituzione degli utensili di prova. Durante l'esecuzione del test, la macchina acquisisce in tempo reale sia i dati relativi alla forza applicata al provino sia quelli riguardanti lo spostamento verticale dell'indentatore. Quest'ultimo viene determinato in modo indiretto attraverso il monitoraggio della rotazione delle viti senza fine, convertita in traslazione tramite un sistema cinematico calibrato. I dati raccolti vengono successivamente elaborati e rappresentati sotto forma di curva forza-spostamento, che costituisce il principale strumento interpretativo per

l'analisi del comportamento meccanico del provino in esame, consentendo di individuare fenomeni quali il regime elastico, l'inizio della deformazione plastica e l'eventuale cedimento strutturale.

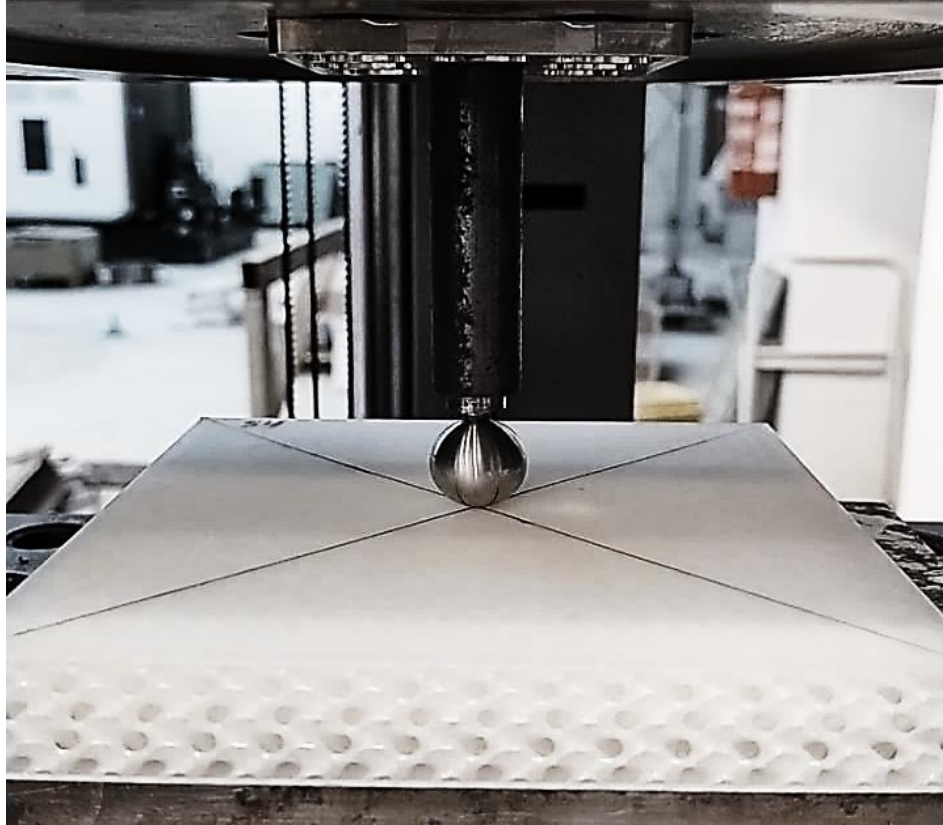


Figura 21: Dettaglio sistema di aggancio della punta con annessa punta di indentazione da 20mm di diametro.

L'elemento indentatore riveste un ruolo cruciale nell'esecuzione della prova, in quanto determina la distribuzione del carico e l'estensione della zona sollecitata. Secondo quanto prescritto dalla normativa di riferimento, la configurazione standard prevede l'impiego di una punta sferica o semisferica con diametro nominale pari a 12,5 mm. Tuttavia, in considerazione delle dimensioni del provino impiegato e della geometria specifica del sistema di aggancio della macchina di prova, è stata adottata una punta di diametro maggiore, pari a 20 mm. Tale scelta progettuale ha permesso di evitare interferenze meccaniche tra il supporto dell'indentatore e il campione durante la fase di carico, garantendo così la correttezza e la validità dei risultati sperimentali ottenuti.

3.2.4.3.4 Valutazione dei meccanismi di frattura

Al termine delle prove di indentazione, i campioni sono stati rimossi dalla macchina di prova e sottoposti a un'ispezione visiva preliminare al fine di rilevare eventuali evidenze macroscopiche di danneggiamento. Per consentire un'analisi più dettagliata dei meccanismi di frattura e della morfologia della zona plastificata, ciascun provino è stato sezionato trasversalmente lungo un piano passante per l'asse di applicazione del carico. Questo procedimento ha permesso di esporre la regione maggiormente deformata, rendendola accessibile per l'osservazione e la caratterizzazione dei fenomeni di collasso localizzato.

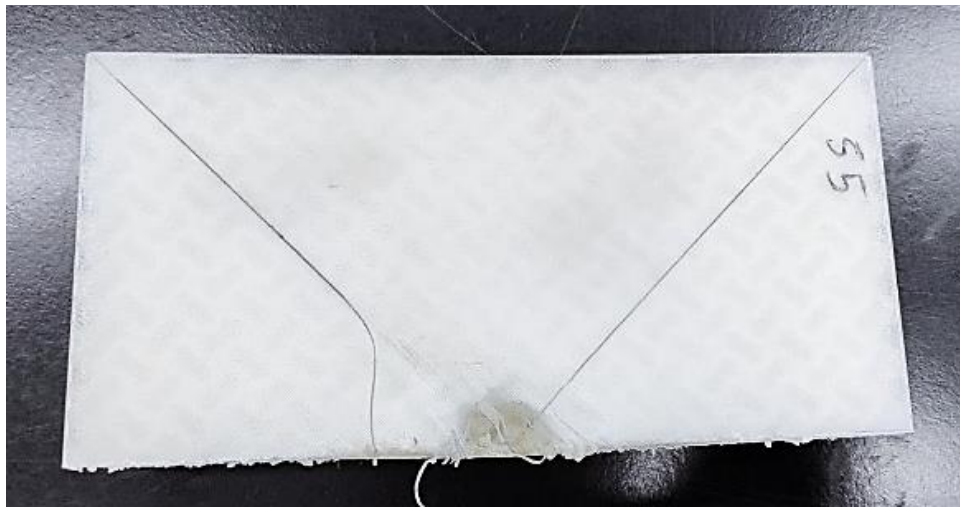


Figura 22: Foto del provino densificato (faccia superiore).

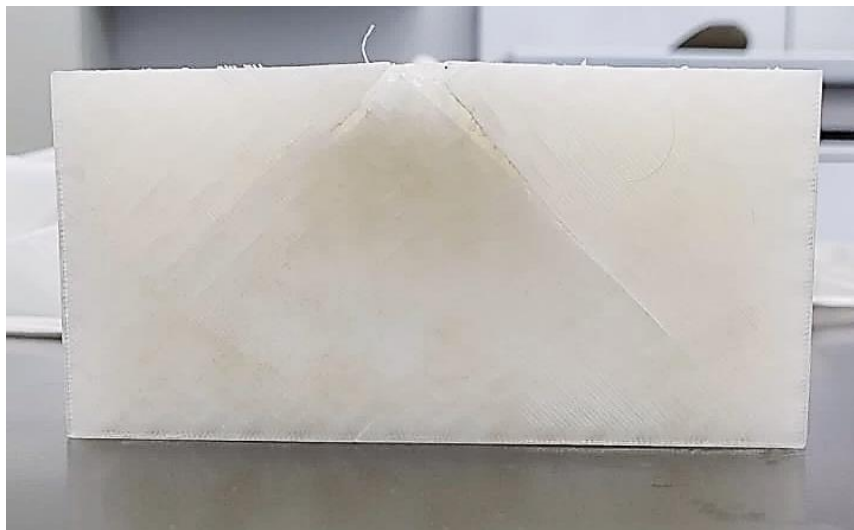


Figura 23: Foto del provino densificato (faccia inferiore).

I campioni, una volta sezionati lungo il piano mediano e stabilizzati mediante fissaggio con nastro adesivo per impedire spostamenti durante le fasi di osservazione, sono stati sottoposti ad analisi morfologica finalizzata all'identificazione dei meccanismi di frattura. L'esame visivo ha consentito di individuare in modo chiaro le modalità di collasso e di discriminare le differenze strutturali tra i provini con e senza densificazione a gradiente. Sono state rilevate e tracciate le cricche sviluppatesi a seguito delle prove di indentazione, distinguendo le traiettorie di propagazione all'interno della struttura reticolare. Le osservazioni effettuate hanno evidenziato un comportamento meccanico composito, caratterizzato dalla coesistenza di due regimi di sollecitazione distinti: compressione localizzata nella regione centrale, in corrispondenza del punto di applicazione del carico, e trazione nelle aree periferiche adiacenti, responsabili dell'innesco e dell'estensione delle fratture. Tali risultati confermano la complessità del campo tensionale generato nel materiale e forniscono indicazioni utili alla comprensione delle modalità di danneggiamento associate alla geometria TPMS con variazione funzionale dello spessore.



Figura 24: Foto del provino non densificato (piano di sezione).

3.2.4.4 Analisi dei risultati

Le prove sperimentali condotte sui campioni hanno evidenziato risultati significativi, confermando l'elevato potenziale delle strutture a geometria giroide per applicazioni ingegneristiche avanzate. L'attività ha coinvolto due configurazioni distinte di provini: la prima caratterizzata da una morfologia TPMS a densità omogenea, la seconda realizzata con un gradiente funzionale di densificazione ottenuto mediante variazione controllata dello spessore. L'analisi dei dati raccolti ha permesso di rilevare differenze sostanziali tra le due tipologie in termini di capacità portante, risposta meccanica sotto carico localizzato e

comportamento energetico. In particolare, i provini con distribuzione di densità modulata hanno mostrato prestazioni meccaniche superiori rispetto a quelli uniformi, evidenziando una maggiore resistenza all'indentazione e una più efficiente dissipazione dell'energia meccanica. Tali risultati suggeriscono la rilevanza dell'approccio progettuale basato sulla variazione funzionale delle proprietà geometriche come strategia per l'ottimizzazione delle prestazioni strutturali di componenti reticolari.

3.2.4.4.1 Provini a densità costante

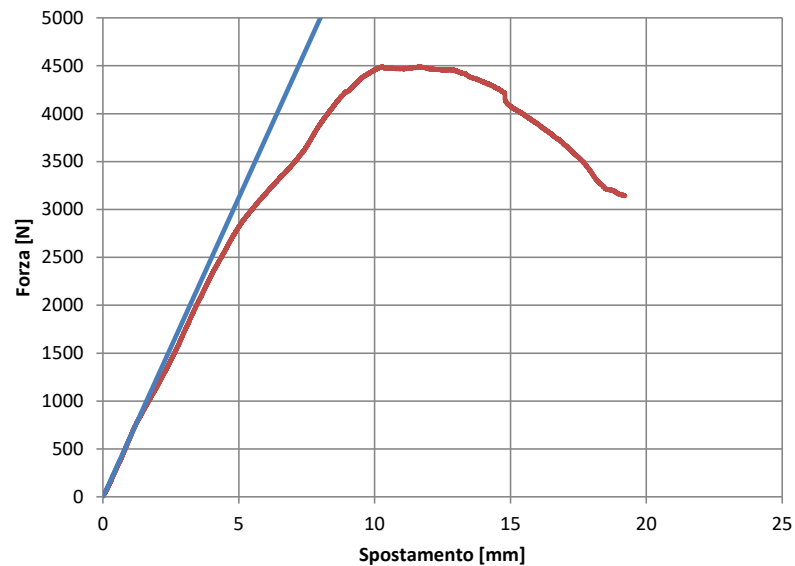


Figura 25: Andamento forza-spostamento del campione 2-20 mm

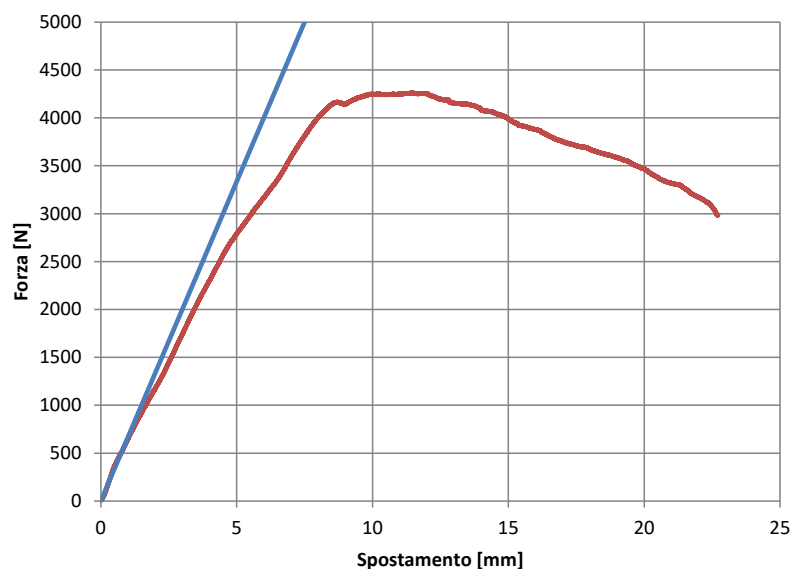


Figura 26: Andamento forza-spostamento del campione 3-20 mm

I grafici riportati illustrano la relazione forza-spostamento verticale ottenuta per i primi due provini esaminati, identificati rispettivamente con le sigle Sample2-20 mm e Sample3-20 mm. Tali curve rappresentano la risposta meccanica dei campioni sottoposti a prova di indentazione quasi-statica, consentendo l'analisi comparativa del comportamento strutturale in termini di capacità di carico, rigidità iniziale e modalità di collasso. Il grafico, corrispondente al provino campione 2-20 mm (Figura 25), evidenzia una risposta meccanica suddivisibile in tre fasi distinte. Nella fase iniziale, compresa tra 0 e circa 8–9 mm di spostamento, si osserva un comportamento marcatamente lineare: la forza applicata cresce in modo pressoché proporzionale all'incremento dello spostamento verticale, suggerendo una fase elastica caratterizzata da rigidità costante e deformazioni reversibili. Questa porzione della curva è indicativa della capacità iniziale della struttura di resistere al carico attraverso meccanismi elastici di tipo reticolare. Tra 9 e 13 mm si sviluppa un plateau compreso tra 4300 e 4500 N, che segnala l'ingresso del provino in una fase di deformazione plastica localizzata. In tale intervallo, l'energia fornita dal sistema non si traduce in un ulteriore incremento della forza, ma viene dissipata attraverso fenomeni di collasso progressivo della struttura interna, quali instabilità locali, delaminazione o microcedimenti distribuiti. Questa fase è rappresentativa della capacità della geometria giroide di assorbire energia meccanica senza variare significativamente il carico agente. Superata la soglia dei 13 mm, la curva mostra

una decrescita graduale della forza, che passa da circa 4400 N a 3200 N al raggiungimento dei 20 mm di deformazione. Tale andamento decrescente indica un cedimento progressivo della struttura, legato al degrado delle connessioni interne e alla perdita di integrità della configurazione reticolare. L'assenza di una rottura improvvisa e la transizione graduale suggeriscono una modalità di cedimento distribuita e non fragile, tipica delle architetture cellulari ottimizzate.

Il tratto iniziale della curva può essere descritto mediante una relazione lineare del tipo:

$$- Y_1 = 625 \times X_1$$

dove:

- Y_1 è la forza applicata, espressa in newton (N);
- X_1 è lo spostamento verticale, in millimetri (mm);
- 625 N/mm rappresenta il coefficiente di rigidità lineare nella fase elastica iniziale.

Il secondo grafico, associato al provino campione 3-20 mm (Figura 26), presenta un'evoluzione della curva forza-spostamento in parte analoga a quella osservata per il campione Sample2, ma con alcune variazioni rilevanti in termini di risposta meccanica. Anche in questo caso, la fase iniziale — fino a circa 8 mm di spostamento verticale — è caratterizzata da un comportamento pressoché lineare, indicativo di una risposta elastica della struttura sotto carico concentrato. La forza massima raggiunta risulta lievemente inferiore rispetto al campione precedentemente analizzato, con un picco compreso tra 4200 e 4300 N, localizzato tra i 9 e gli 11 mm di deformazione. Tuttavia, a differenza del Sample2, il plateau associato alla fase di deformazione plastica si sviluppa su un intervallo più ristretto e la riduzione della forza si manifesta in maniera anticipata, a partire da circa 12 mm di spostamento. Tale comportamento suggerisce un processo di collasso meccanico più precoce e regolare, caratterizzato da una traiettoria discendente più continua e meno irregolare rispetto a quella osservata nel provino precedente. Al raggiungimento dei 20 mm di deformazione, la forza residua si attesta attorno ai 3100 N, valore comparabile con quello misurato per Sample2 nella fase finale del

test. L'analisi del tratto iniziale della curva consente anche in questo caso di identificare un comportamento lineare ben definito, che può essere descritto da una relazione del tipo:

$$- Y_2 = 666,6 \times X_2$$

dove:

- Y_2 indica la forza applicata (N),
- X_2 rappresenta lo spostamento verticale (mm),
- 666,6 N/mm è il coefficiente angolare che esprime la rigidità iniziale del provino nella fase elastica.

Entrambi i provini analizzati presentano una risposta meccanica qualitativamente analoga, articolata in una fase iniziale lineare, seguita da un plateau caratteristico della deformazione plastica localizzata e da una successiva riduzione graduale della forza applicata. Tuttavia, il campione 2 evidenzia una capacità di carico leggermente superiore, accompagnata da una maggiore stabilità nella fase post-picco. Questo comportamento suggerisce una più efficace dissipazione dell'energia meccanica, verosimilmente riconducibile a meccanismi interni quali schiacciamento progressivo della struttura reticolare o fenomeni di microdelaminazione distribuita, che ritardano l'innescio del collasso macroscopico. Al contrario, il campione 3, pur manifestando un carico massimo comparabile, presenta un cedimento anticipato e una fase discendente della curva forza-spostamento più lineare e regolare. Tale differenza comportamentale potrebbe essere attribuita a variazioni nella configurazione microstrutturale, a una distribuzione meno eterogenea delle tensioni interne oppure a un'elevata omogeneità del danno, che conduce a un'evoluzione del cedimento più uniforme ma meno energeticamente assorbente rispetto al campione 2.

3.2.4.4.2 Provini a densità variabile

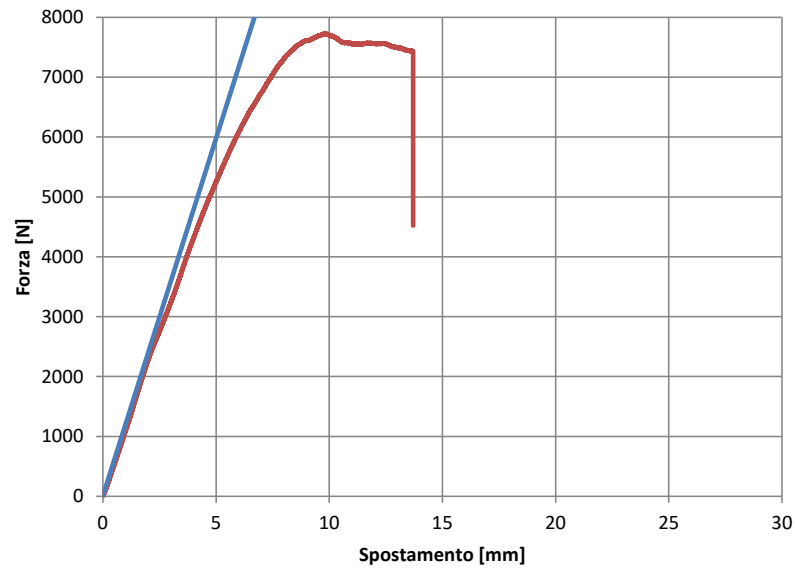


Figura 27: Andamento forza-spostamento del campione 4-Den1-20 mm

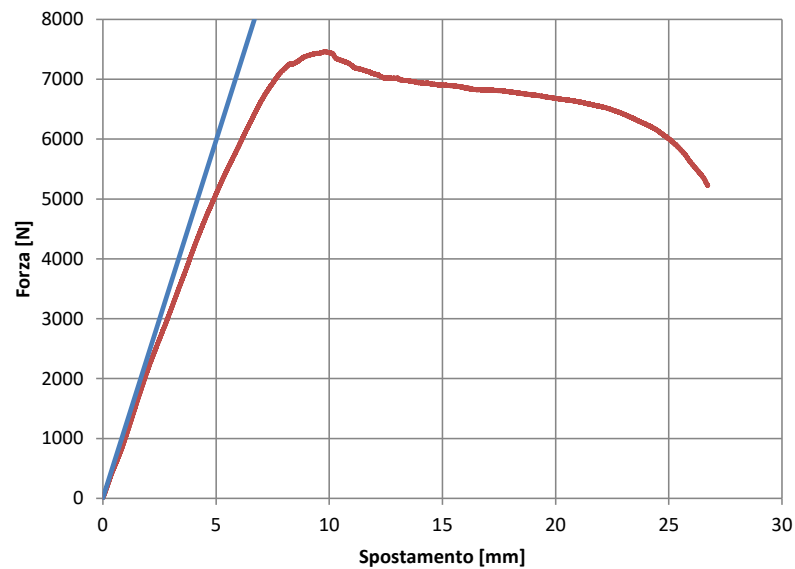


Figura 28: Andamento forza-spostamento del campione 5-Den1-20 mm

Il grafico Figura 27 descrive l'andamento della forza applicata in funzione dello spostamento verticale per il campione 4, appartenente alla serie di provini densificati. Nella fase iniziale della prova, si osserva un comportamento lineare marcato: la struttura reticolare oppone una resistenza proporzionale alla deformazione imposta, indicando una risposta elastica coerente con l'integrità della geometria interna. Questo regime lineare si estende fino a circa 8 mm di

spostamento, raggiungendo un intervallo di forza compreso tra 7600 e 7800 N. Oltre tale soglia, la curva evidenzia un appiattimento, segnale dell'ingresso in una fase di scorrimento plastico: la forza continua ad aumentare ma con pendenza ridotta, a indicare una deformazione crescente non accompagnata da un corrispondente incremento di carico. Tra 8 e circa 13,5 mm, la curva si stabilizza attorno a valori compresi tra 7400 e 7900 N, evidenziando un regime pseudo-plastico in cui la struttura assorbe deformazione mantenendo il carico quasi costante. A partire da circa 14 mm, si osserva un cedimento improvviso: la forza subisce un decremento netto, passando da circa 7400 N a meno di 5000 N in un intervallo di spostamento ridotto. Tale crollo repentino indica il superamento della soglia critica di stabilità strutturale e l'insorgere di un collasso localizzato del reticolo, che compromette irreversibilmente la capacità portante del campione. Anche in questo caso, il tratto iniziale della curva può essere approssimato mediante una relazione lineare:

$$- Y_3 = 1194,03 \times X_3$$

dove:

- Y_3 rappresenta la forza applicata (N);
- X_3 è lo spostamento verticale (mm);
- 1194,03 N/mm è il coefficiente angolare che esprime la rigidezza nella fase elastica iniziale del campione 4.

Il grafico in Figura 28 descrive la risposta meccanica del campione 5, anch'esso realizzato in PLA con struttura giroide e densificazione a gradiente, ma caratterizzato da un comportamento leggermente differente rispetto al campione 4. Anche in questo caso, la curva forza-spostamento inizia con una fase lineare ben definita, che si estende fino a circa 7,5 mm, durante la quale la forza cresce proporzionalmente allo spostamento, indicando una rigidezza iniziale elevata. Il valore massimo registrato in questa fase è prossimo ai 7400 N, in linea con quanto osservato per il campione precedente. Tuttavia, a differenza del campione 4, la curva non mostra un collasso improvviso al superamento del picco, ma evidenzia una progressiva riduzione della forza applicata, che accompagna l'aumento continuo dello spostamento fino a circa 26 mm. Questo comportamento indica una

modalità di cedimento più duttile, in cui la struttura mantiene una capacità di deformazione significativa anche dopo il superamento del carico massimo, senza una rottura netta o localizzata. La fase discendente della curva è caratteristica di materiali o configurazioni strutturali in grado di redistribuire le sollecitazioni interne e prolungare il processo di deformazione plastica, consentendo un progressivo assorbimento di energia. Il campione 5 mostra, dunque, una maggiore estensibilità rispetto al campione 4, a parità di carico massimo, suggerendo una differente evoluzione dei meccanismi di collasso interni, probabilmente legata a variazioni locali nella densificazione o nella morfologia reticolare. Anche in questo caso, il tratto elastico iniziale della curva può essere descritto mediante un'equazione di tipo lineare:

$$- Y_4 = 1194,03 \times X_4$$

dove:

- Y_4 è la forza applicata (N);
- X_4 rappresenta lo spostamento verticale (mm);
- 1194,03 N/mm è il coefficiente di rigidità della fase elastica iniziale per il campione 5.

Sebbene entrambi i campioni densificati abbiano raggiunto valori di carico massimo comparabili, compresi tra 7400 e 7900 N, le modalità di cedimento osservate risultano profondamente differenti. Il campione 4 manifesta un comportamento fragile, caratterizzato da un'improvvisa perdita di capacità portante subito dopo aver raggiunto il picco di forza, in corrispondenza di una deformazione relativamente contenuta (~14 mm). Questo collasso rapido suggerisce una concentrazione localizzata delle sollecitazioni e una ridotta capacità della struttura di redistribuire i carichi in condizioni critiche. Al contrario, il campione 5 evidenzia una risposta più duttile: il carico diminuisce gradualmente mentre il provino continua a deformarsi fino a circa 26 mm, senza mostrare fenomeni di frattura netta. Questo comportamento indica una maggiore resilienza strutturale, presumibilmente dovuta a una differente distribuzione interna della densità, a una morfologia reticolare più regolare o a condizioni locali più favorevoli dal punto di vista microstrutturale o geometrico. Tali divergenze prestazionali, pur in presenza di

configurazioni geometriche apparentemente analoghe, mettono in evidenza l'influenza significativa che anche lievi variazioni nei parametri di stampa, nei gradienti di densificazione o nella qualità del materiale possono esercitare sulla risposta meccanica globale. Le curve forza-spostamento associate ai due campioni confermano quindi l'importanza di un controllo accurato dei parametri di processo per ottenere prestazioni ripetibili e ottimizzate.

3.2.4.4.3 Analisi comparativa dei risultati

Nel complesso, sono stati testati quattro provini, suddivisi equamente tra configurazioni a densità costante e densificata a gradiente funzionale. Il numero limitato di campioni è stato ritenuto adeguato sulla base dell'elevata ripetibilità delle risposte meccaniche osservate in strutture prodotte mediante manifattura additiva, come documentato in letteratura. L'analisi delle curve forza-spostamento ha evidenziato differenze marcate tra le due tipologie di provini, rendendo opportuna una valutazione comparativa globale. La prima distinzione significativa riguarda le modalità di cedimento: i campioni con densificazione localizzata mostrano un comportamento tipicamente fragile, caratterizzato da un collasso improvviso e localizzato, coerente con una risposta strutturale di tipo brittle. Al contrario, i provini non densificati manifestano una maggiore capacità di deformazione progressiva, con un cedimento distribuito e privo di fratture nette, indicativo di una risposta più duttile. Oltre alle differenze qualitative, il confronto ha evidenziato anche un significativo divario in termini di capacità portante. I provini con gradiente funzionale di spessore hanno raggiunto forze massime sensibilmente superiori rispetto a quelli a densità omogenea, con un incremento pari a circa il 74,5%. Tale miglioramento è tanto più rilevante se si considera che è stato ottenuto mediante una variazione contenuta dello spessore della struttura interna, a conferma dell'efficacia progettuale della densificazione mirata nella zona critica. Questi risultati sottolineano l'importanza dell'ingegnerizzazione del gradiente come strategia per l'ottimizzazione meccanica di strutture reticolari realizzate tramite additive manufacturing.

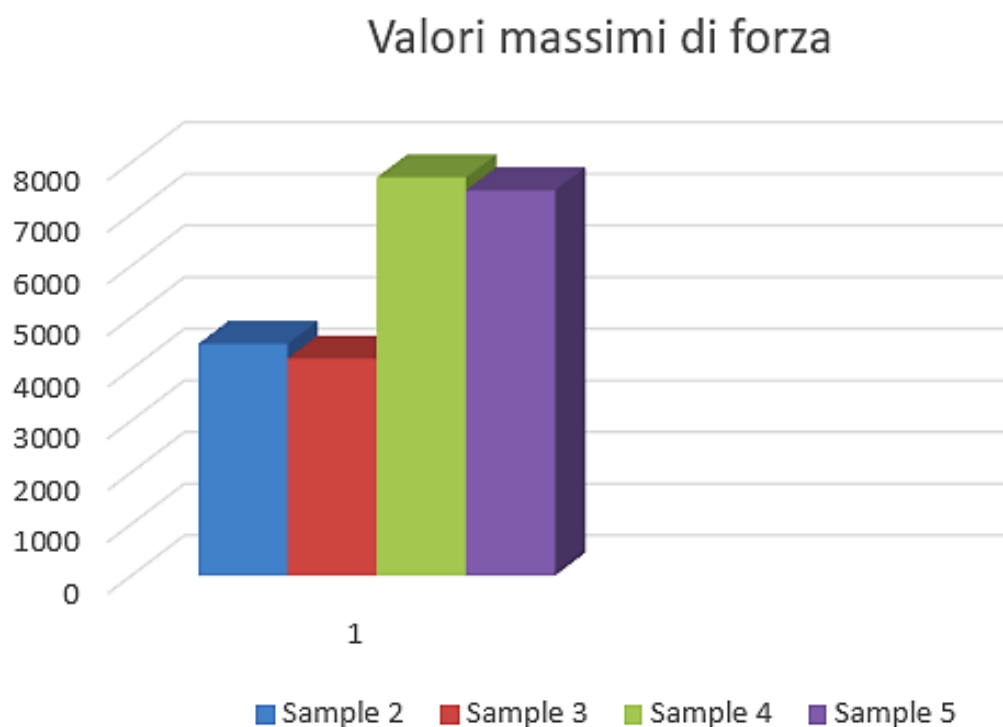


Figura 29: Confronto valori massimi di forza ottenuti nelle prove.

A supporto delle evidenze precedentemente discusse, risulta utile analizzare comparativamente i coefficienti angolari derivanti dall'approssimazione lineare del tratto elastico iniziale delle curve forza-spostamento. Nei provini non densificati, tale coefficiente — indicativo della rigidità iniziale — si attesta intorno a 645,8 N/mm, mentre nei campioni caratterizzati da densificazione a gradiente il valore raggiunge circa 1194 N/mm. Questo incremento, pari all'84,9%, conferma quantitativamente l'effetto positivo della variazione funzionale di spessore sulla risposta meccanica del sistema strutturale, evidenziando un netto miglioramento della capacità del provino di opporsi al carico applicato nella fase elastica. L'aumento della rigidità associato alla strategia di densificazione rappresenta un indicatore diretto dell'efficacia del gradiente progettuale nel rafforzare la resistenza iniziale senza compromettere l'efficienza del materiale impiegato.

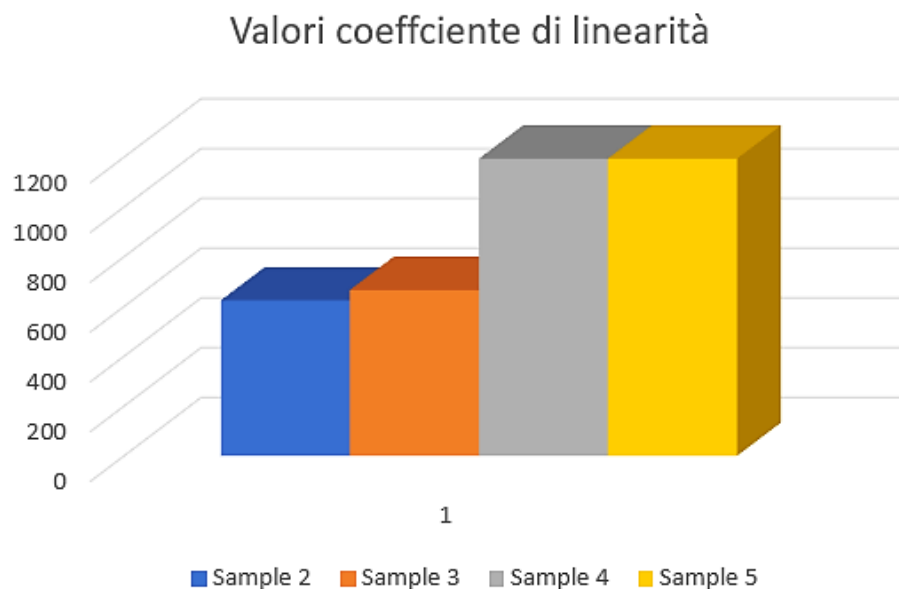


Figura 30: Confronto valori del coefficiente di linearità.

Il confronto tra le configurazioni testate evidenzia con chiarezza le elevate potenzialità della struttura giroide adottata, la cui efficacia meccanica risulta significativamente amplificata dall'introduzione di un gradiente funzionale di densificazione. L'incremento della capacità portante, prossimo al 100% rispetto ai provini a densità uniforme, conferma il ruolo strategico della progettazione a gradiente nello sviluppo di componenti reticolari ottimizzati per specifiche condizioni di carico, in particolare nelle aree soggette a elevate sollecitazioni. Sebbene il materiale utilizzato nei test, ovvero il PLA, non sia usualmente impiegato per applicazioni strutturali in ambito industriale avanzato, esso si è rivelato idoneo come mezzo dimostrativo per evidenziare l'efficacia dell'approccio adottato. I risultati ottenuti suggeriscono dunque che la combinazione tra geometrie TPMS e strategie di densificazione localizzata costituisca una soluzione progettuale promettente, con implicazioni rilevanti per lo sviluppo di componenti leggeri e ad alte prestazioni in contesti tecnologici eterogenei.

3.2.4.5 Considerazioni conclusive e prospettive di ricerca

I risultati sperimentali ottenuti mediante prove di indentazione quasi-statica hanno messo in luce le rilevanti potenzialità ingegneristiche delle strutture a morfologia giroidale con densità variabile, realizzate in PLA attraverso processi di manifattura additiva. Nonostante il materiale impiegato – un termoplastico di origine bio-based

con caratteristiche meccaniche moderate – la risposta strutturale dei campioni si è dimostrata robusta, con capacità di assorbimento del carico concentrate superiori alle aspettative, anche in condizioni di bassa densità relativa. Questo comportamento è riconducibile, in larga misura, all'efficienza meccanica intrinseca della geometria TPMS e all'introduzione di un gradiente funzionale di spessore, che ha permesso di adattare localmente la distribuzione di materiale in funzione delle sollecitazioni attese, migliorando il compromesso tra massa e prestazione meccanica. Le lievi differenze osservate tra campioni appartenenti alla stessa categoria sono attribuibili alle normali tolleranze associate alla stampa FDM, tra cui fluttuazioni di temperatura, irregolarità nel flusso di estrusione, discrepanze dimensionali tra layer successivi e presenza di microvuoti. Tali imperfezioni, pur inevitabili in un processo di prototipazione termoplastica non industriale, non hanno compromesso la coerenza globale dei risultati, confermando la validità metodologica della strategia progettuale adottata. Il presente studio ha esplorato un sottoinsieme specifico delle funzionalità offerte dalle strutture TPMS, limitandosi alla caratterizzazione meccanica in condizioni di carico localizzato statico. Tuttavia, le potenzialità applicative di tali configurazioni sono molto più ampie e meritevoli di approfondimenti futuri. In particolare, saranno di grande interesse ulteriori studi orientati alla valutazione del comportamento a fatica, alla risposta dinamica e vibrazionale, all'isolamento acustico e alla conduzione termica, con l'obiettivo di delineare un quadro prestazionale multifisico completo. La possibilità di integrare materiali polimerici avanzati, come termoplastici caricati con fibre corte o nanoparticelle funzionali, oppure materiali compositi a matrice rinforzata, potrà ulteriormente amplificare il potenziale strutturale e funzionale di queste architetture, favorendo la loro transizione dall'ambito prototipale a quello industriale. Dal punto di vista applicativo, le strutture TPMS con densità modulata si prestano all'impiego in settori in cui la riduzione della massa, la distribuzione ottimale dei materiali e l'adattabilità topologica rappresentano fattori chiave di progetto. L'ambito dei sistemi meccanici ad alta dinamica, come quello motoristico e, più in generale, il settore dei trasporti, costituisce un terreno fertile per l'integrazione di tali geometrie avanzate. Ad esempio, l'implementazione di un componente strutturale come una biella alleggerita con nucleo giroide a densità

variabile potrebbe comportare una drastica riduzione delle masse alternative e delle inerzie associate, traducendosi in una maggiore efficienza globale del sistema e in minori sollecitazioni trasmesse agli organi adiacenti. Alla luce di quanto emerso, appare strategico proseguire la ricerca lungo due direttrici parallele: da un lato, l'approfondimento sistematico delle strutture TPMS, anche mediante modelli numerici e approcci di ottimizzazione topologica; dall'altro, lo sviluppo e l'integrazione di tecnologie di stampa 3D sempre più performanti, sia in termini di risoluzione geometrica che di compatibilità con materiali ingegneristici avanzati. L'intersezione tra queste due linee di indagine costituisce un'opportunità concreta per generare soluzioni strutturali ad alte prestazioni, capaci di soddisfare le esigenze della progettazione meccanica contemporanea in termini di efficienza, leggerezza, sostenibilità e versatilità funzionale.

3.2.5 Progettazione Field-Driven di Strutture Sandwich con Nucleo TPMS a Gradiente Funzionale Realizzate mediante Stampa 3D: Modellazione 3D, Fabbricazione e Caratterizzazione Meccanica.

3.2.5.1 Abstract

Il presente studio adotta una metodologia di progettazione che impiega geometrie TPMS a gradiente funzionale (Functionally Graded TPMS), nelle quali lo spessore delle celle varia spazialmente secondo una logica controllata da campi scalari (Field-Driven Design). Questo approccio consente di regolare con precisione la distribuzione locale delle proprietà meccaniche all'interno del nucleo della struttura sandwich, seguendo specifici criteri progettuali imposti a priori[32,33]. La fabbricazione dei campioni è stata realizzata mediante tecniche di manifattura additiva, che assicurano sia un'elevata fedeltà geometrica rispetto al modello digitale sia una notevole versatilità nel generare strutture complesse[34,35]. La valutazione delle proprietà meccaniche è stata eseguita attraverso prove di flessione a tre punti, con l'obiettivo di analizzare il comportamento strutturale sotto carico flessionale. L'intera strategia progettuale è finalizzata all'esplorazione di nuove opportunità per l'ottimizzazione di materiali avanzati e strutture leggere ad alte prestazioni.

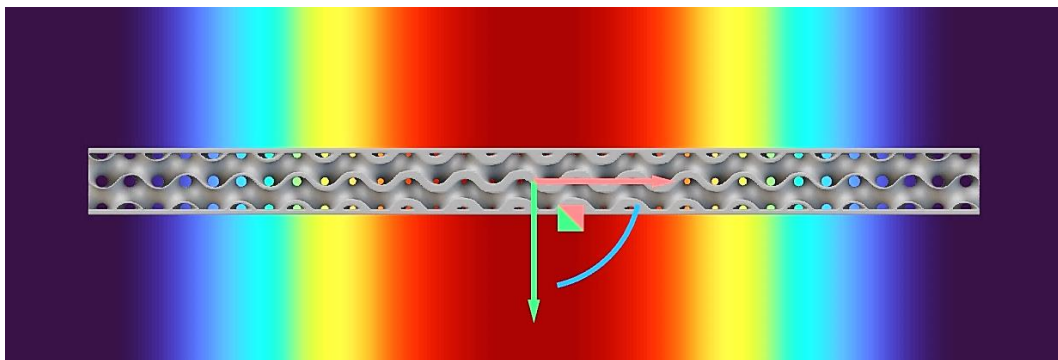


Figura 31: functionally graded triply periodic minimal surface sample.

3.2.5.2 Introduzione

Nel campo della progettazione di componenti strutturali alleggeriti, le configurazioni sandwich rappresentano una scelta strategica grazie alla loro capacità di offrire elevate prestazioni meccaniche a fronte di un peso contenuto[36,37]. In particolare, l'impiego di geometrie derivate da superfici minimali triplicemente periodiche (TPMS) all'interno del nucleo strutturale si è rivelato estremamente efficace[38–40], in virtù delle peculiarità morfologiche che le caratterizzano. Lo studio condotto si concentra sull'utilizzo della configurazione Gyroid, selezionata sulla base delle sue comprovate qualità meccaniche e della sua stampabilità ottimale[41,42]. L'elemento innovativo introdotto consiste nell'integrazione di una variazione funzionale dello spessore all'interno del nucleo TPMS. Tale modulazione è stata realizzata mediante una funzione rampa che consente di ottenere una transizione graduale dello spessore, incrementandolo nella zona centrale, soggetta ai maggiori carichi flessionali, e riducendolo verso le estremità. Questa distribuzione mirata del materiale permette di aumentare la densità strutturale nelle aree più critiche, con potenziali benefici in termini di resistenza[43–45]. La definizione del gradiente di spessore è stata implementata attraverso il software nTopology, sfruttando un campo scalare generato da un elemento planare virtuale. Applicando tale campo a una funzione rampa, si è ottenuta una variazione controllata dello spessore della geometria. I campioni così progettati sono stati prodotti mediante stampa 3D, utilizzando tecnologia FDM su una stampante Bambu Lab X1 Carbon e impiegando PLA come materiale. Le strutture finali presentano dimensioni complessive pari a 160 mm in lunghezza, 40 mm in larghezza e 12 mm in altezza, con pelli esterne di 1 mm e un nucleo TPMS di 10 mm composto da celle cubiche di 10 mm per lato. L'indagine si propone di valutare l'influenza della distribuzione funzionale dello spessore sulle proprietà meccaniche globali, con l'obiettivo di fornire indicazioni utili per lo sviluppo di future strategie di ottimizzazione strutturale in ambito ingegneristico avanzato.

3.2.5.3 Materiali e metodi

3.2.5.3.1 Modellazione 3D dei campioni

La modellazione tridimensionale dei provini è stata eseguita mediante il software nTopology, uno strumento avanzato che consente di implementare strategie

progettuali basate su campi scalari per la definizione di geometrie complesse. Il processo di modellazione ha avuto inizio dalla definizione del nucleo centrale della struttura sandwich, caratterizzato da dimensioni pari a 160 mm in lunghezza, 40 mm in larghezza e 10 mm in altezza. Questo nucleo è stato concepito come un reticolo regolare, costruito attraverso la ripetizione spaziale lungo coordinate cartesiane di celle unitarie appartenenti alla famiglia delle superfici minimali triplicemente periodiche (TPMS). In particolare, è stata adottata la configurazione Gyroid come unità elementare, selezionata per le sue eccellenti proprietà meccaniche in presenza di sollecitazioni flessionali e per la sua compatibilità con i processi di fabbricazione additiva tramite tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling). Ogni cella elementare presenta dimensioni cubiche di 10 mm per lato. La struttura del Gyroid, oltre a garantire una distribuzione omogenea delle sollecitazioni grazie alla sua continuità geometrica, è descritta da un'equazione matematica specifica, riportata nel documento come Equazione 2.

$$\sin x \cdot \cos y + \sin y \cdot \cos z + \sin z \cdot \cos x = 0$$

Equazione 2: Equazione della giroide.



Figura 32: Struttura di cella unitaria di geometria Gyroid.

Completata la modellazione del nucleo centrale, sono state progettate le due pelli esterne, superiore e inferiore, ciascuna con uno spessore uniforme pari a 1 mm.

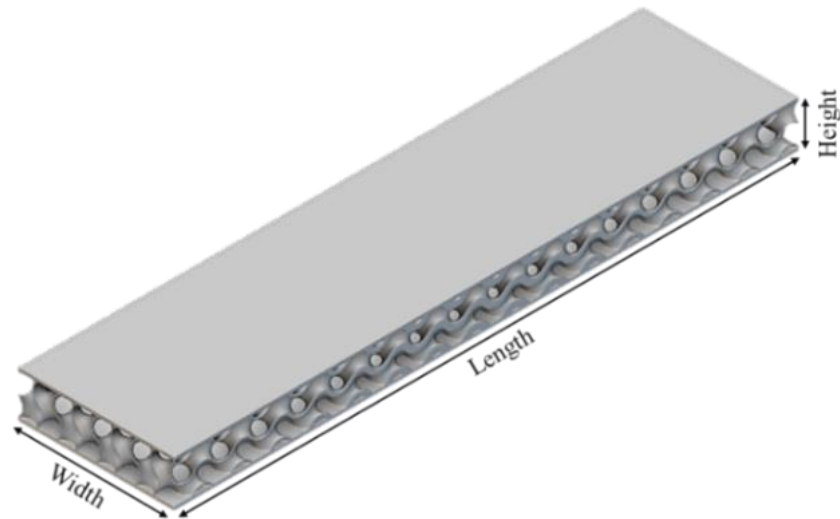


Figura 33: Indicazioni dimensionali del campione sandwich.



Figura 34: Suddivisione del campione tra pelli esterne e nucleo centrale.

Il campione analizzato presenta una configurazione geometrica finale che misura 160 mm in lunghezza, 40 mm in larghezza e 12 mm in spessore complessivo. Per introdurre una distribuzione variabile dello spessore all'interno del nucleo TPMS, si è fatto ricorso a una strategia di modellazione basata sulla generazione di un campo scalare. A tal fine, è stato inserito un elemento ausiliario con funzione di sorgente di campo: questo è stato definito come un solido di forma parallelepipedica, le cui dimensioni risultano fortemente sbilanciate, con due lati estesi (1000 mm $\times$ 1000 mm) e uno spessore estremamente ridotto (0,01 mm), tale da renderlo assimilabile a una superficie teorica. Posizionato in corrispondenza del piano mediano del campione, e orientato ortogonalmente rispetto all'asse longitudinale, questo elemento ha permesso di generare un campo il cui valore varia linearmente in funzione della distanza dalle sue facce principali. Applicando una funzione rampa ai valori assunti dal campo così definito, è stato possibile ottenere una variazione continua e controllata dello spessore nella struttura interna, modulando

localmente la geometria della superficie TPMS in funzione della posizione lungo la direzione principale.

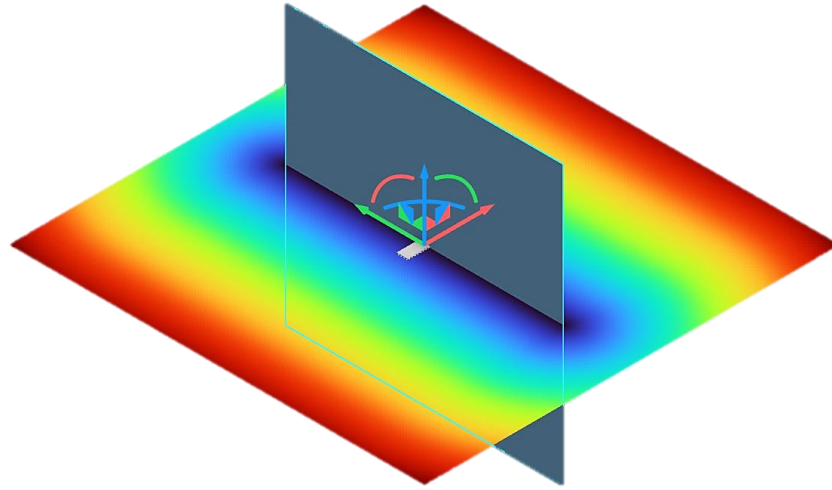


Figura 35: Visualizzazione policromatica del campo scalare generato dall'elemento planare.

Poiché la funzione rampa viene applicata ai valori del campo scalare generato dal piano virtuale, e dato che tale superficie è orientata trasversalmente rispetto all'asse longitudinale del campione, la variazione di spessore risultante si manifesta esclusivamente lungo la direzione parallela alla lunghezza del provino. Definendo un sistema di riferimento cartesiano con asse X corrispondente alla lunghezza, asse Y alla larghezza e asse Z allo spessore, il piano utilizzato per la generazione del campo risulta giacere nel piano YZ. Di conseguenza, il campo prodotto si estende ortogonalmente a tale piano, influenzando i valori del campo lungo la direzione X. In termini geometrici, ciò implica che la modulazione dello spessore nella struttura TPMS avviene esclusivamente nel piano XZ, mentre lungo la direzione YZ lo spessore rimane costante. Il comportamento del campo può essere efficacemente rappresentato all'interno dell'ambiente di modellazione nTopology mediante una scala cromatica continua, che consente di evidenziare visivamente la variazione graduale dei valori nel piano longitudinale (XZ), a fronte di una distribuzione uniforme nel piano trasversale (YZ).

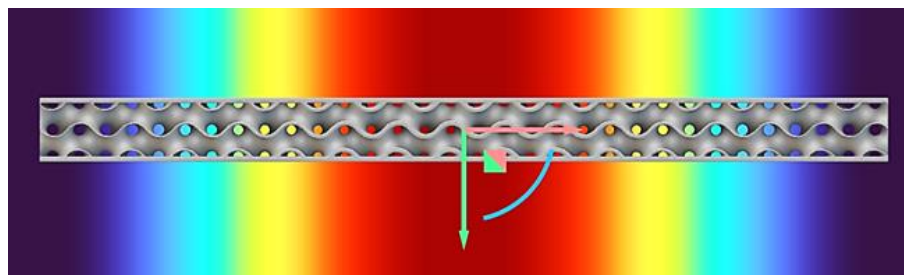


Figura 36: Vista laterale del campione nel piano XZ all'interno del campo scalare.

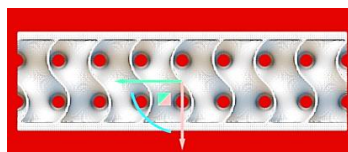


Figura 37: Vista frontale del campione nel piano YZ immerso nel campo scalare.

L'applicazione di questa metodologia progettuale ha consentito di ottenere uno spessore massimo localizzato nella zona centrale del campione, ovvero nell'area in cui si prevede la presenza del momento flettente più elevato, con una graduale riduzione dello spessore man mano che ci si avvicina alle estremità. Tale configurazione non solo migliora le prestazioni meccaniche in condizioni di flessione a tre punti, ma costituisce anche una base concettuale solida per futuri sviluppi. In prospettiva, infatti, la modulazione dello spessore—andando a incidere direttamente su densità e resistenza meccanica—potrà essere ottimizzata sfruttando mappe di sollecitazione ottenute tramite simulazioni numeriche agli elementi finiti (FEM). Nell'ambito dello studio sono state realizzate sei varianti geometriche, ciascuna caratterizzata da una specifica combinazione di valori minimi e massimi dello spessore nel nucleo TPMS. Ogni configurazione rappresenta una transizione distinta di spessore, controllata attraverso il campo scalare, e può quindi essere interpretata come un gradiente funzionale. Queste sei configurazioni sono state progettate con l'obiettivo di analizzare sistematicamente l'influenza della variazione di spessore sulla risposta meccanica dei provini sandwich. Al fine di isolare l'effetto attribuibile al valore minimo dello spessore, le configurazioni sono state organizzate in due gruppi distinti, ciascuno caratterizzato da un valore minimo costante.

- Classe A (Spessore minimo 0,5 mm): Le configurazioni incluse in questo gruppo sono caratterizzate da un gradiente di spessore particolarmente

accentuato. In esse, le regioni periferiche del nucleo TPMS presentano uno spessore minimo di 0,5 mm, che aumenta progressivamente fino a raggiungere, in prossimità della zona centrale, valori massimi pari a 1,5 mm, 2,0 mm o 2,5 mm, a seconda del tipo di provino. Questa distribuzione, ottenuta tramite variazione continua lungo la direzione longitudinale, consente di indagare in che modo una significativa riduzione di materiale nelle estremità influisca sulla ripartizione degli sforzi durante la prova di flessione. In particolare, l'accumulo di materiale nella regione centrale—dove si concentrano le sollecitazioni maggiori—è finalizzato al miglioramento della resistenza flessionale complessiva.

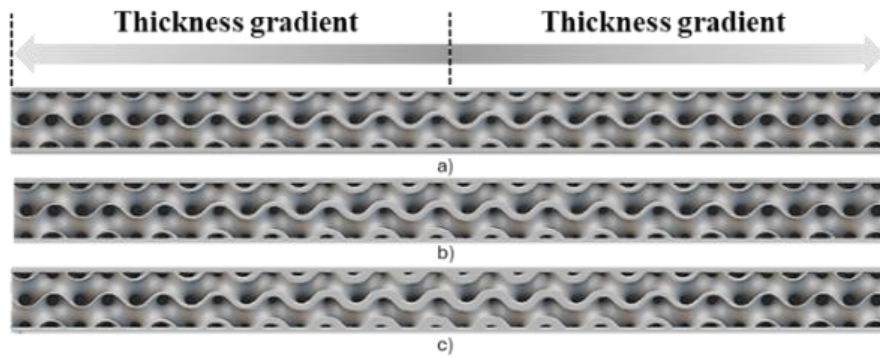


Figura 38: Vista laterale dei provini: a) 0,5–1,5 mm, b) 0,5–2,0 mm, c) 0,5–2,5 mm.

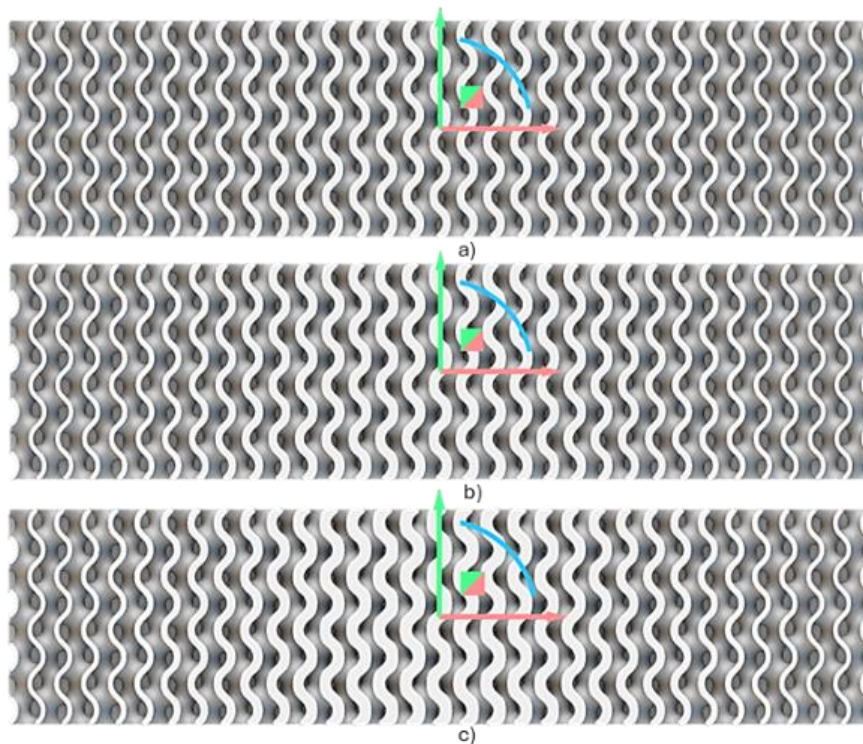


Figura 39: sectioned top view of specimens: a) 0.5-1.5 mm, b) 0.5-2.0 mm, c) 0.5-2.5 mm.

- Classe B (Spessore minimo 1,0 mm): In questa categoria, la variazione di spessore risulta meno accentuata rispetto alla Classe A, poiché il valore minimo nei tratti periferici del nucleo è più elevato, pari a 1,0 mm. I valori massimi considerati rimangono invariati—1,5 mm, 2,0 mm e 2,5 mm—ma la minore differenza tra spessore minimo e massimo determina un gradiente più graduale. Questa configurazione è stata introdotta con l'obiettivo di valutare in che modo una transizione più dolce influenzi la distribuzione degli sforzi interni e la rigidità globale del campione, consentendo un confronto diretto con le configurazioni caratterizzate da un gradiente più marcato.

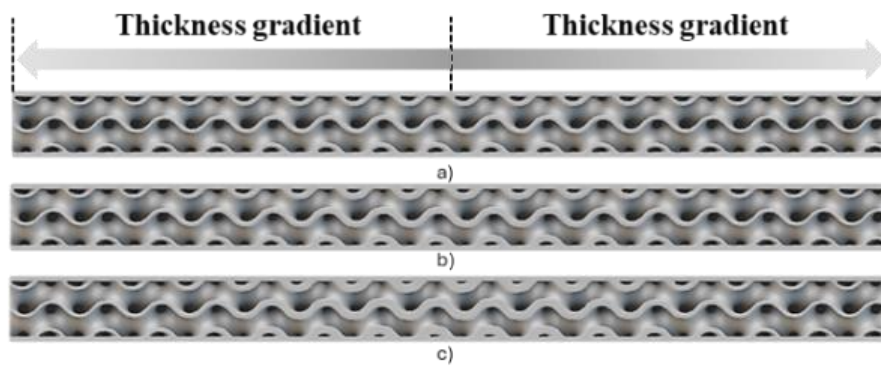


Figura 40: lateral view of specimens: a) 1.0-1.5 mm, b) 1.0-2.0 mm, c) 1.0-2.5 mm.

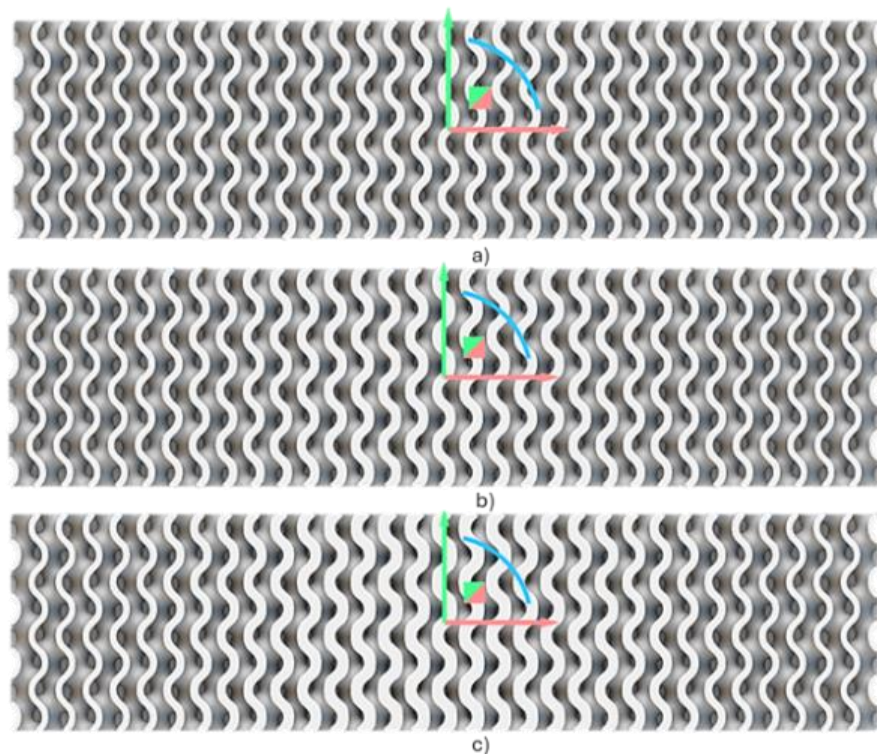


Figura 41: Vista superiore in sezione dei provini: a) 1,0–1,5 mm, b) 1,0–2,0 mm, c) 1,0–2,5 mm.

L'analisi comparativa condotta tra le due tipologie di configurazione ha permesso di ottenere indicazioni significative per l'individuazione della soluzione più efficace in termini strutturali. In particolare, il confronto tra campioni caratterizzati da un gradiente marcato di spessore (Classe A) e quelli con transizione più attenuata (Classe B) consente di valutare l'impatto della distribuzione localizzata del materiale nella zona centrale del provino, ossia in corrispondenza dell'area soggetta alle massime sollecitazioni flessionali. Tale confronto offre un utile strumento per

comprendere come la concentrazione del materiale nei punti più critici possa contribuire all'aumento della resistenza a flessione dell'intera struttura.

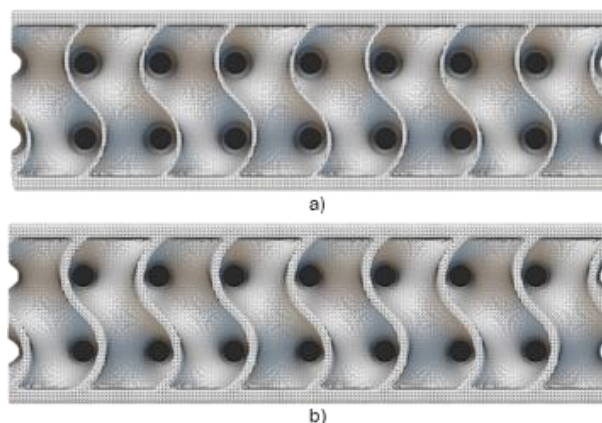


Figura 42: Vista frontale dei provini: a) 0,5 mm, b) 1,0 mm.

Di seguito è riportata la Tabella 9, che raccoglie i valori relativi al volume complessivo e alla percentuale di riempimento per ciascuna delle configurazioni considerate, definite in base a diverse combinazioni di spessore minimo e massimo. La prima colonna specifica i valori degli spessori estremi (in millimetri), la seconda riporta il volume totale della struttura calcolato in millimetri cubi (mm^3), mentre la terza indica la percentuale di materiale effettivamente presente rispetto al volume complessivo del campione.

Spessore minimo– massimo (mm)	Volume della struttura (mm^3)	Percentuale di riempimento (%)
0,5–1,5	12 398,5	19,3726563 %
0,5–2,0	15 525,9	24,2592188 %
0,5–2,5	18 660,0	29,15625 %
1,0–1,5	15 508,4	24,231875 %
1,0–2,0	18 632,9	29,1139063 %
1,0–2,5	21 804,7	34,0698438 %

Tabella 9: Caratteristiche geometriche dei nuclei dei diversi provini

I risultati evidenziano una correlazione diretta tra l'incremento dello spessore massimo e l'aumento sia del volume complessivo della struttura sia della percentuale di riempimento. Le configurazioni in cui il valore minimo di spessore

è pari a 0,5 mm si distinguono per una minore quantità di materiale impiegato, determinando volumi inferiori rispetto alle configurazioni con spessore minimo pari a 1,0 mm, che presentano una densità strutturale più elevata. Tali differenze consentono di confrontare in modo oggettivo il materiale effettivamente utilizzato in ciascuna soluzione progettuale, in funzione della strategia adottata: si può puntare, ad esempio, a massimizzare la resistenza meccanica mantenendo invariata la massa, oppure a contenere il peso totale riducendo il materiale senza comprometterne eccessivamente le prestazioni. L'intervallo di variazione della percentuale di riempimento risulta piuttosto ampio, spaziando da valori inferiori al 20% fino a superare il 34%, offrendo così una base quantitativa solida per analizzare l'influenza della modulazione di spessore sulla geometria del nucleo TPMS.

3.2.5.3.2 Produzione dei campioni

Nella fase di slicing, il file di stampa è stato generato in formato 3MF utilizzando il software Bambustudio.

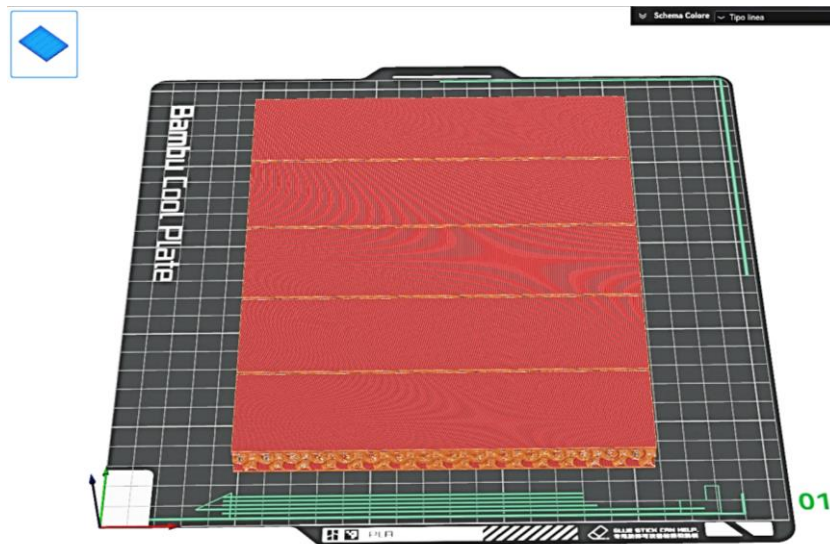


Figura 43: Software di slicing "Bambu Studio".

I campioni sono stati realizzati utilizzando PLA, un materiale apprezzato per la sua stabilità dimensionale e per la facilità di lavorazione all'interno dei processi di stampa FDM (Fused Deposition Modeling). I parametri impostati durante la fase di slicing sono riportati nella Tabella 10.

Parametro	Valore
Altezza del layer	0,2 mm
Larghezza del tracciato	0,3 mm
Temperatura dell'ugello	220 °C
Temperatura del piano	35 °C
Percentuale di riempimento	100%
Schema di riempimento	Lineare
Velocità primo strato	50 mm/s
Velocità parete esterna	200 mm/s
Velocità parete interna	300 mm/s
Accelerazione	10 000 mm/s ²
Supporti	Disattivati

Tabella 10: Parametri di stampa utilizzati.

Rispetto ai parametri predefiniti del software Bambustudio, sono state apportate solo tre modifiche specifiche. In primo luogo, lo spessore di tutte le linee è stato uniformemente ridotto a 0,3 mm, scelta necessaria per garantire un'elevata precisione nella stampa delle zone più sottili dei campioni, minimizzando il rischio di imperfezioni nei dettagli geometrici legati alla variazione di spessore. In secondo luogo, la percentuale di riempimento è stata impostata al 100%, al fine di ottenere una struttura completamente solida all'interno del nucleo TPMS. Infine, lo schema di riempimento è stato modificato in modalità "lineare", scelta coerente con l'obiettivo di ottenere un riempimento uniforme data la completa saturazione del volume. Tali interventi hanno permesso una riproduzione fedele del modello progettato, mantenendo la qualità e la continuità del gradiente strutturale lungo l'intero processo di stampa. La produzione dei campioni è stata eseguita mediante tecnologia di stampa 3D a estrusione di materiale fuso (FDM), utilizzando una stampante Bambu Lab X1 Carbon.



Figura 44: Sistema di stampa 3D utilizzato: Bambu Lab X1C.

L'acido polilattico (PLA) è un polimero biodegradabile ottenuto da fonti rinnovabili, tra cui l'amido di mais e la canna da zucchero. È ampiamente impiegato nei processi di stampa 3D grazie alla sua lavorabilità semplice e alle sue buone proprietà meccaniche, che comprendono una resistenza a trazione pari a 53 MPa e un modulo elastico di 3,6 GPa. Con una densità di 1,24 g/cm³ e una temperatura di transizione vetrosa compresa tra circa 55 °C e 60 °C, il PLA risulta particolarmente indicato per impieghi in cui queste caratteristiche rappresentano un vantaggio funzionale. Inoltre, è conforme alle normative FDA e ROHS, il che ne consente l'utilizzo in contesti non critici come prototipi, modelli didattici o componenti decorativi. In questo studio, il materiale è stato selezionato per la sua stabilità dimensionale e per la semplicità di lavorazione, aspetti fondamentali per garantire la precisione geometrica nella realizzazione delle variazioni di spessore e nella riproduzione continua della struttura interna del nucleo TPMS.

3.2.5.3.3 Test meccanici

Per valutare l'impatto della modulazione di spessore sulla resistenza meccanica, sono stati sottoposti a prove di flessione a tre punti tre esemplari per ciascuna configurazione geometrica. I test sono stati eseguiti utilizzando una macchina di prova universale, seguendo i criteri stabiliti dalla norma ASTM D790, la quale è stata adottata come riferimento per garantire confrontabilità diretta con studi già presenti in letteratura. La caratterizzazione meccanica è stata condotta mediante un sistema di prova Zwick Roell, dotato di cella di carico da 2,5 kN, tenendo in considerazione sia la distribuzione variabile dello spessore sia la specifica morfologia cellulare del nucleo. Durante le prove, sono stati monitorati parametri fondamentali come lo sforzo applicato e la deformazione risultante. Particolare attenzione è stata posta all'analisi comparativa tra le regioni centrali dei campioni,

caratterizzate da uno spessore maggiore, e le zone periferiche, dove la geometria risulta più sottile. I dati sperimentali, espressi tramite curve sforzo-deformazione e valori del modulo di Young, hanno permesso di individuare l'influenza del gradiente di spessore sulla distribuzione interna delle tensioni e di evidenziare i vantaggi strutturali associati alla localizzazione del materiale nelle aree soggette a maggiori sollecitazioni.



Figura 45: Configurazione della prova di flessione a tre punti.

3.2.5.4 Risultati e discussioni

3.2.5.4.1 Analisi dei risultati

Nel Grafico 1 sono riportati i valori di massa, espressi in grammi, relativi alle sei configurazioni studiate, ciascuna caratterizzata da una diversa combinazione di spessore minimo e massimo. Come prevedibile, si osserva un incremento progressivo della massa al crescere dei valori di spessore. L'obiettivo principale di questo studio è ottimizzare le proprietà meccaniche dei provini sandwich attraverso l'introduzione di un gradiente di spessore nel nucleo TPMS, che consente di concentrare il materiale nella zona centrale del campione, dove si manifestano le sollecitazioni flessionali più intense. Tutti i campioni sono stati realizzati con riempimento al 100%, garantendo così una struttura interna completamente solida. I dati sperimentali mostrano un aumento costante della massa in funzione della configurazione: il campione 0,5–1,5 mm pesa 30,2 g; quello 0,5–2,0 mm raggiunge i 33,8 g; mentre la variante 0,5–2,5 mm arriva a 37,4 g. Per quanto riguarda i campioni con spessore minimo pari a 1,0 mm, le masse rilevate sono pari a 33,1 g per la configurazione 1,0–1,5 mm, 37,9 g per la 1,0–2,0 mm e 41,8 g per la 1,0–2,5 mm. L'aumento complessivo della massa è coerente con l'aggiunta di materiale

nelle aree centrali, ma non rappresenta l'obiettivo in sé dell'approccio adottato. La strategia progettuale mira, infatti, a ottenere una distribuzione funzionale del materiale, attraverso la quale lo spessore variabile—da 0,5 mm o 1,0 mm fino a valori massimi di 1,5 mm, 2,0 mm o 2,5 mm—consente di rinforzare selettivamente le zone maggiormente sollecitate, incrementando la resistenza flessionale globale senza aumentare inutilmente la massa complessiva della struttura.

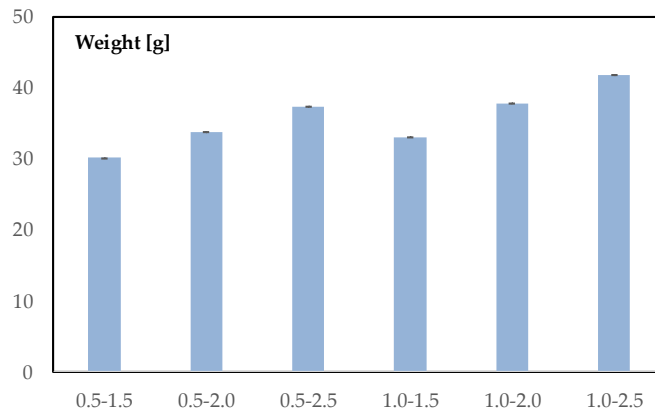


Grafico 1: Valori di massa dei campioni [g].

I risultati sperimentali ottenuti dalle prove di flessione a tre punti, riportati nel Grafico 2, evidenziano in modo chiaro l'influenza della modulazione dello spessore sulla resistenza meccanica delle strutture sandwich. L'aumento del valore massimo di spessore, a parità di spessore minimo, determina un progressivo incremento del carico massimo sostenuto, confermando l'efficacia della concentrazione di materiale nella regione centrale del campione, dove si manifestano i picchi di sollecitazione flessionale.

I valori registrati per ciascuna configurazione sono i seguenti:

- Configurazioni con spessore minimo pari a 0,5 mm:
 - 0,5–1,5 mm: 688,2 N
 - 0,5–2,0 mm: 800,2 N
 - 0,5–2,5 mm: 1155,4 N
- Configurazioni con spessore minimo pari a 1,0 mm:
 - 1,0–1,5 mm: 819,2 N
 - 1,0–2,0 mm: 903,0 N
 - 1,0–2,5 mm: 1125,9 N

Nel caso delle configurazioni con spessore minimo di 0,5 mm, si osserva una crescita quasi lineare del carico massimo in funzione dello spessore massimo, passando da 688,2 N nella variante 0,5–1,5 mm a 1155,4 N nella 0,5–2,5 mm. Le configurazioni con spessore minimo pari a 1,0 mm evidenziano valori iniziali superiori (819,2 N nella configurazione 1,0–1,5 mm), ma il valore massimo raggiunto nella configurazione 1,0–2,5 mm (1125,9 N) risulta leggermente inferiore rispetto a quello della configurazione 0,5–2,5 mm (1155,4 N). Questo comportamento suggerisce che, a parità di spessore massimo, un gradiente più esteso partendo da valori minimi più contenuti possa garantire una distribuzione del materiale più efficiente nel rafforzamento della struttura sotto carico flessionale.

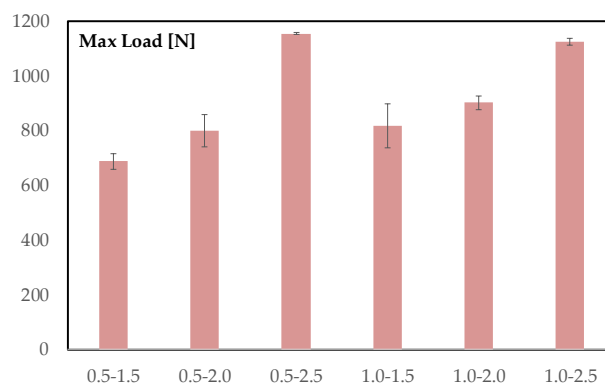


Grafico 2: Carico massimo [N].

I dati relativi al carico massimo specifico, riportati nel Grafico 3 ed espressi in N/kg (ovvero il carico massimo normalizzato rispetto alla massa del campione), offrono ulteriori elementi per valutare l'efficienza nella distribuzione del materiale all'interno della struttura. I valori sperimentali ottenuti per ciascuna configurazione sono i seguenti:

- Configurazioni con spessore minimo pari a 0,5 mm:
 - 0,5–1,5: 22 751,4 N/kg
 - 0,5–2,0: 23 649,1 N/kg
 - 0,5–2,5: 30 882,3 N/kg
- Configurazioni con spessore minimo pari a 1,0 mm:
 - 1,0–1,5: 24 722,1 N/kg
 - 1,0–2,0: 23 840,5 N/kg
 - 1,0–2,5: 26 964,4 N/kg

L'andamento dei risultati mostra una tendenza generale all'aumento del carico specifico con l'incremento dello spessore massimo. In particolare, la configurazione 0,5–2,5 mm raggiunge il valore più elevato, pari a 30 882,3 N/kg, evidenziando che l'utilizzo di uno spessore minimo ridotto non compromette le prestazioni, ma al contrario può migliorarle grazie a una distribuzione più efficiente del materiale. All'interno del gruppo con spessore minimo di 1,0 mm, il valore più alto si registra per la configurazione 1,0–1,5 mm (24 722,1 N/kg). Tuttavia, nella configurazione 1,0–2,0 mm si osserva una leggera diminuzione del valore (23 840,5 N/kg), probabilmente attribuibile a una maggiore variabilità dei risultati. Infine, nella configurazione 1,0–2,5 mm il valore torna a salire fino a 26 964,4 N/kg, confermando che una maggiore concentrazione di materiale nella regione centrale della struttura continua a produrre effetti positivi sul comportamento meccanico.

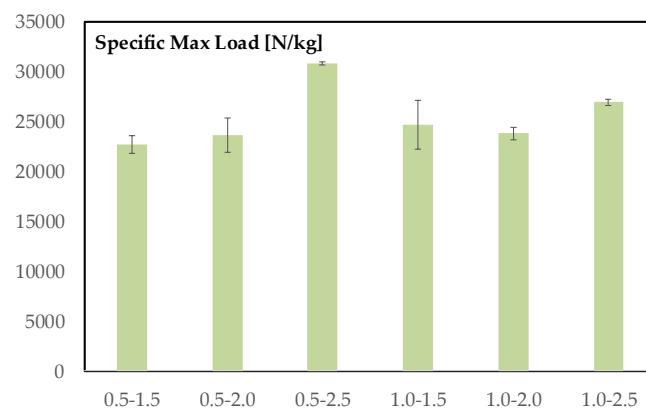


Grafico 3: Carico massimo specifico [N/kg].

I risultati relativi allo sforzo massimo (Grafico 4) e allo sforzo massimo specifico (Grafico 5), rispettivamente espressi in MPa e in MPa/kg, offrono ulteriori elementi utili per comprendere il comportamento meccanico dei campioni e l'efficacia della strategia basata sulla variazione di spessore. I valori sperimentali ottenuti per ciascuna configurazione sono i seguenti:

- Configurazioni con spessore minimo di 0,5 mm:
 - 0,5–1,5: Sforzo massimo = 21,5 MPa; Sforzo specifico = 711 MPa/kg
 - 0,5–2,0: Sforzo massimo = 25,0 MPa; Sforzo specifico = 739 MPa/kg
 - 0,5–2,5: Sforzo massimo = 36,1 MPa; Sforzo specifico = 965,1 MPa/kg
- Configurazioni con spessore minimo di 1,0 mm:

- 1,0–1,5: Sforzo massimo = 25,6 MPa; Sforzo specifico = 772,6 MPa/kg
- 1,0–2,0: Sforzo massimo = 28,2 MPa; Sforzo specifico = 745,0 MPa/kg
- 1,0–2,5: Sforzo massimo = 35,2 MPa; Sforzo specifico = 842,6 MPa/kg

L'analisi dei risultati mostra che l'aumento dello spessore massimo, e quindi della massa concentrata nella zona centrale del campione, determina un incremento significativo dello sforzo massimo. Questo effetto è particolarmente evidente nella configurazione 0,5–2,5 mm, che raggiunge il valore più elevato pari a 36,1 MPa. Lo stesso campione registra anche il massimo sforzo specifico, con un valore di 965,1 MPa/kg, indicando un'efficienza strutturale ottimale in termini di resistenza rapportata alla massa. Nelle configurazioni con spessore minimo di 0,5 mm, si osserva un miglioramento costante all'aumentare dello spessore massimo: da 21,5 MPa a 36,1 MPa per lo sforzo assoluto e da 711 a 965,1 MPa/kg per lo sforzo specifico. Le configurazioni con spessore minimo di 1,0 mm mostrano valori di sforzo leggermente superiori rispetto alle corrispondenti con 0,5 mm per spessori massimi inferiori (ad esempio: 25,6 MPa contro 21,5 MPa per la configurazione a 1,5 mm), ma nel confronto specifico risultano meno performanti rispetto alla 0,5–2,5 mm. In particolare, la configurazione 1,0–2,0 raggiunge 745,0 MPa/kg, mentre la 1,0–2,5 si attesta a 842,6 MPa/kg, entrambe inferiori rispetto al valore di picco di 965,1 MPa/kg ottenuto nella 0,5–2,5.

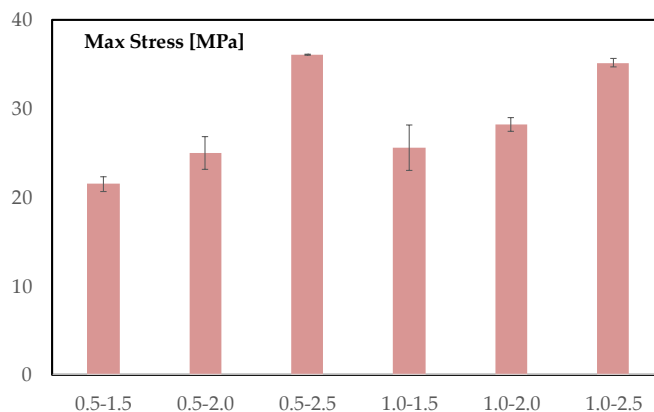


Grafico 4: Sforzo massimo [MPa].

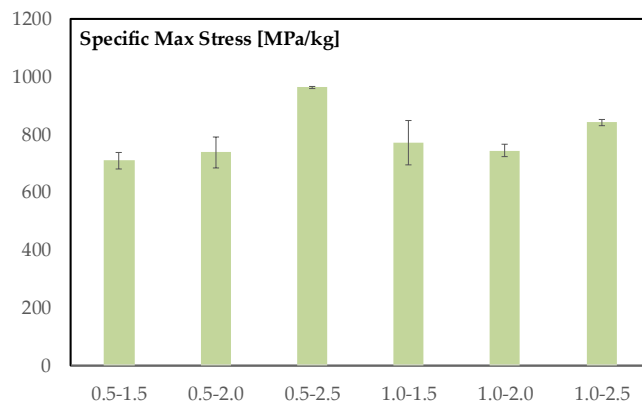


Grafico 5: Sforzo massimo specifico [MPa/kg].

Di seguito sono presentati i grafici relativi all'andamento del carico in funzione dello spostamento (Grafico 6), alla curva sforzo-deformazione (Grafico 7), espressa con lo sforzo in MPa e la deformazione in percentuale, e all'evoluzione del modulo di Young rispetto alla deformazione (Grafico 8). Queste rappresentazioni forniscono indicazioni fondamentali per l'interpretazione del comportamento meccanico dei campioni sottoposti a prova di flessione. In particolare, l'analisi del Grafico 6 consente di individuare le fasi iniziali del regime elastico, seguite da una progressiva transizione verso una risposta non lineare, fino al possibile collasso strutturale. La curva sforzo-deformazione del Grafico 7 permette invece di evidenziare il punto di snervamento e il valore massimo di carico sopportato, mostrando come la variazione del gradiente di spessore incida sulla capacità del materiale di resistere a sollecitazioni elevate. Il Grafico 8, infine, mostra l'andamento del modulo elastico in funzione della deformazione, mettendo in luce le variazioni di rigidità durante l'applicazione del carico. In particolare, si osserva come la concentrazione di materiale nella zona centrale del campione—ottenuta grazie al gradiente introdotto—contribuisca a rafforzare le aree maggiormente sollecitate. L'analisi congiunta di questi tre grafici consente di valutare in modo completo l'efficacia della strategia progettuale adottata nell'ottimizzazione delle prestazioni meccaniche delle strutture sandwich.

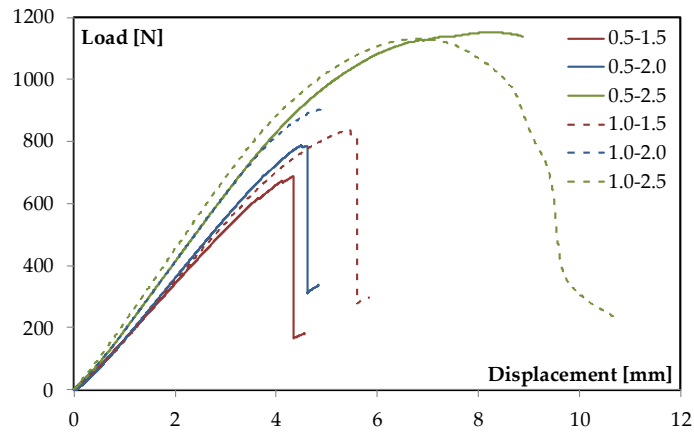


Grafico 6: Carico [N].

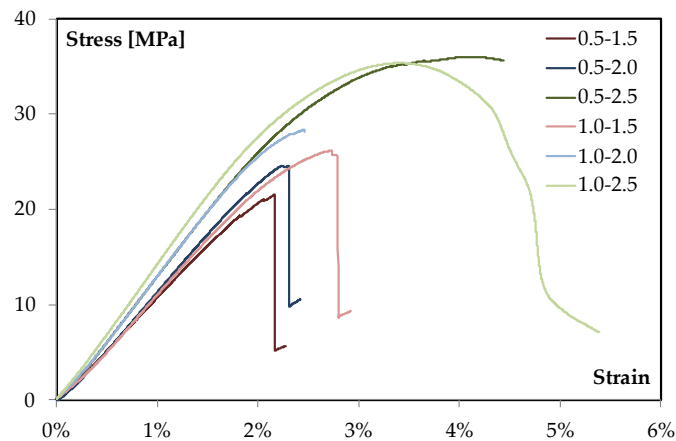


Grafico 7: Sforzo [MPa].

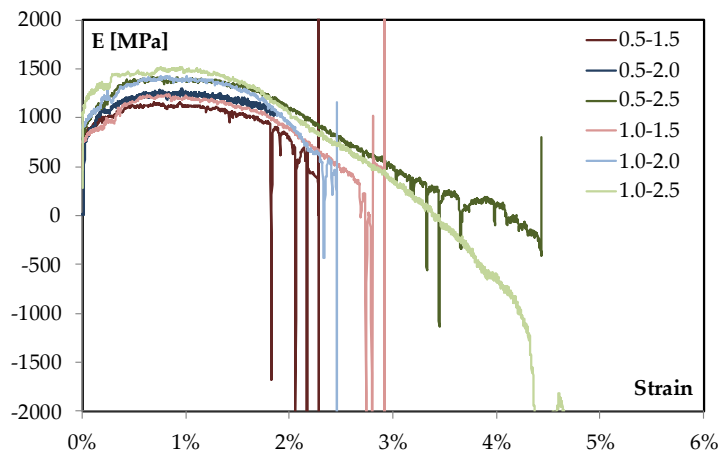


Grafico 8: Modulo di Young.

Analisi comparativa tra configurazioni a gradiente e a riempimento costante.

Di seguito, la Tabella 11 presenta un confronto tra i valori di tensione massima (in MPa) ottenuti per le configurazioni a spessore variabile e quelli corrispondenti a

campioni con spessore costante, selezionati in modo da avere percentuali di riempimento simili. I campioni a riempimento costante sono stati anch'essi generati nell'ambito degli studi condotti per questa ricerca e sono descritti in dettaglio in un paragrafo dedicato all'interno della presente tesi.

Configurazione a gradiente (mm)	Tensione massima (MPa) – Gradiente	Riempimento (%) – Gradiente	Riempimento (%) – Costante	Spessore del nucleo – Costante (mm)	Tensione massima (MPa) – Costante	Δ Tensione (MPa)	Δ Tensione (%)
0,5–1,5	21,5	19,37%	20%	1,036	22,64	–1,14	–5,05%
0,5–2,5	36,1	29,16%	30%	1,554	23,18	12,92	55,73%
1,0–2,0	28,2	29,11%	30%	1,554	23,18	5,02	21,65%

Tabella 11: Confronto tra tensione massima, percentuale di riempimento e spessore del nucleo per campioni a gradiente e a riempimento costante.

1. 0,5–1,5 mm vs. riempimento costante al 20%

- Il campione con gradiente di spessore compreso tra 0,5 e 1,5 mm ha raggiunto una tensione massima pari a 21,5 MPa, leggermente inferiore (–5,05%) rispetto ai 22,64 MPa registrati nel campione a spessore costante con riempimento del 20%.
- Il ridotto intervallo di variazione dello spessore potrebbe non essere sufficiente a garantire una localizzazione efficace del materiale nelle zone più sollecitate, determinando una prestazione complessiva lievemente inferiore rispetto alla configurazione costante.

2. 0,5–2,5 mm vs. riempimento costante al 30%

- La configurazione con gradiente da 0,5 a 2,5 mm si distingue nettamente, raggiungendo una tensione massima di 36,1 MPa, con un incremento significativo del 55,73% rispetto ai 23,18 MPa ottenuti nella corrispondente configurazione a riempimento costante.
- L'ampiezza del gradiente consente una concentrazione mirata del materiale nelle aree a maggiore sollecitazione, contribuendo in modo sostanziale al miglioramento della resistenza flessionale.

3. 1,0–2,0 mm vs. riempimento costante al 30%

- Il campione con spessore variabile da 1,0 a 2,0 mm ha registrato una tensione massima di 28,2 MPa, corrispondente a un aumento del 21,65% rispetto ai 23,18 MPa della configurazione con spessore uniforme.
- Sebbene il miglioramento non sia marcato quanto quello osservato nel caso 0,5–2,5 mm, anche questa configurazione dimostra i vantaggi legati all'uso di un gradiente progettato con criterio, che consente di concentrare il materiale nelle zone maggiormente sollecitate.

Nel complesso, i risultati confermano che le configurazioni a gradiente possono superare le prestazioni dei campioni a spessore costante, a condizione che l'intervallo di variazione sia sufficientemente ampio. Al contrario, gradienti più ristretti, come quello da 0,5 a 1,5 mm, potrebbero non garantire un'efficace redistribuzione del materiale, con prestazioni inferiori rispetto a un riempimento costante equivalente. Gradienti più estesi, come 0,5–2,5 mm e 1,0–2,0 mm, permettono invece una localizzazione più efficiente del materiale nelle zone critiche, portando a un incremento misurabile della tensione massima raggiunta.

3.2.5.4.2 Analisi al microscopio ottico

3.2.5.4.2.1 0,5–1,5 mm

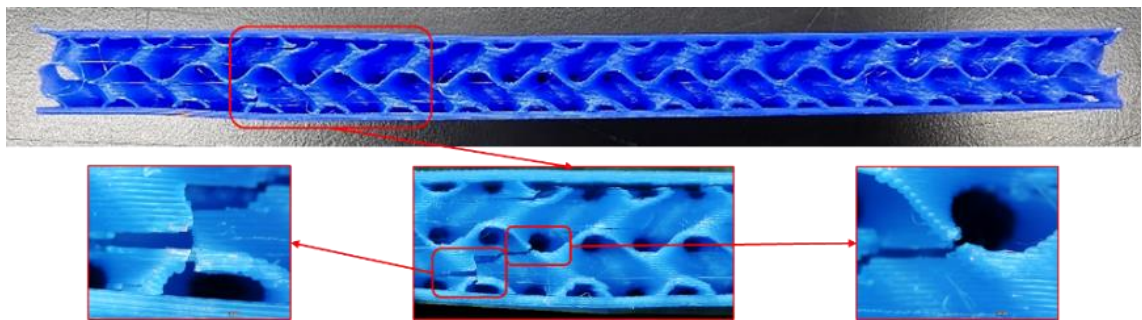


Figura 46: Immagini microscopiche del campione 0,5–1,5 mm che evidenziano l'innesco della frattura lungo le pareti più sottili e la presenza di cricche localizzate all'interno del nucleo TPMS.

Dall'osservazione della Figura 46 emerge chiaramente che i danni sono localizzati prevalentemente nelle aree in cui lo spessore delle pareti interne risulta ridotto, pari a 0,5 mm. In tali zone si riscontrano fratture che attraversano i ponti sottili della struttura TPMS, indicando una maggiore vulnerabilità locale. Alcune delle cricche seguono il profilo delle celle, suggerendo che la propagazione della frattura avviene

preferenzialmente nei tratti in cui il materiale presenta uno spessore inferiore. In determinati punti si evidenziano inoltre deformazioni plastiche di lieve entità, che testimoniano un comportamento parzialmente duttile del PLA prima della rottura finale. La riduzione dello spessore minimo influisce quindi in modo diretto sul meccanismo di cedimento, favorendo l'innescò e la propagazione delle cricche nelle zone strutturalmente più deboli. Questa evidenza risulta coerente con l'approccio progettuale adottato, che prevede la concentrazione del materiale nella porzione centrale maggiormente sollecitata, ma al contempo mette in luce la limitata resistenza alla frattura delle aree periferiche a ridotto spessore.

3.2.5.4.2.2 0,5–2,0 mm

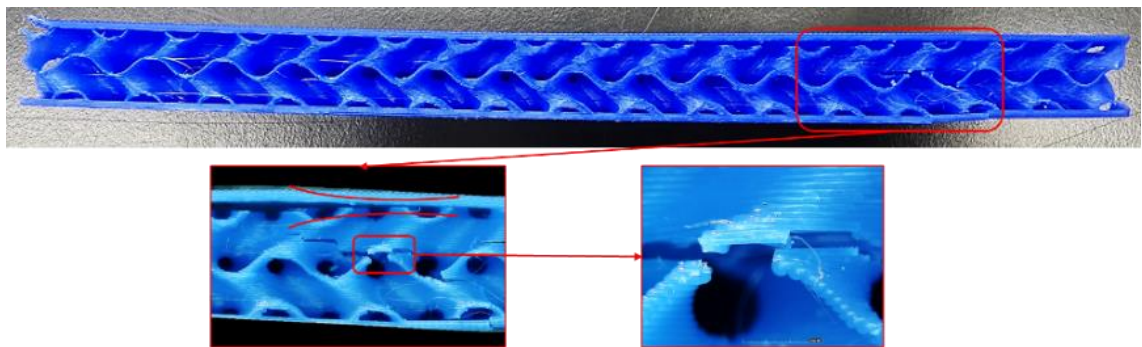


Figura 47: Immagini microscopiche del campione 0,5–2,0 mm che evidenziano una delaminazione parziale della pelle superiore e la propagazione di cricche attraverso il gradiente.

Dall'analisi della Figura 47, relativa al campione con gradiente di spessore 0,5–2,0 mm, risulta evidente che la modalità di frattura si sviluppa secondo una direzione trasversale, con propagazione delle cricche che attraversa sia le aree caratterizzate da pareti sottili (0,5 mm) sia quelle in cui lo spessore risulta maggiore, fino a 2,0 mm. In questa configurazione, la presenza di un nucleo centrale più spesso consente una distribuzione delle sollecitazioni più efficace, contribuendo a rallentare l'avanzamento della frattura rispetto a configurazioni con spessori massimi inferiori. Tuttavia, nonostante la maggiore robustezza del nucleo centrale, si osserva un ulteriore fenomeno significativo: la delaminazione della pelle superiore, la cui sezione è costante e pari a 1 mm, rispetto alla struttura interna. Questo distacco indica che, in alcuni punti, l'adesione tra lo strato superficiale e il nucleo non è stata sufficiente a garantire un efficace trasferimento degli sforzi. La causa può essere

attribuita alla presenza di micro-difetti formatisi durante la fase di deposizione oppure all'intensità delle sollecitazioni flettenti applicate durante il test.

3.2.5.4.2.3 0,5–2,5 mm

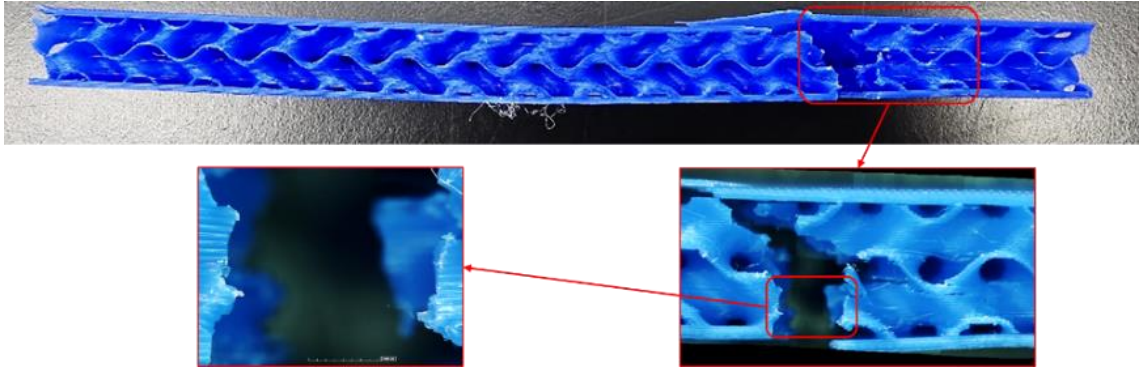


Figura 48: Immagini microscopiche del campione 0,5–2,5 mm che evidenziano una frattura improvvisa di tipo fragile nella zona centrale, con minima deformazione plastica.

Dall'osservazione della Figura 48, riferita al campione con gradiente di spessore 0,5–2,5 mm, si evidenzia un cedimento improvviso, caratterizzato da superfici di frattura nette e prive di deformazioni plastiche evidenti. Questo comportamento è indicativo di una frattura di tipo fragile, assimilabile a una rottura catastrofica. Sebbene l'aumento dello spessore massimo fino a 2,5 mm contribuisca a rinforzare il nucleo nella zona centrale, la brusca transizione rispetto allo spessore minimo di 0,5 mm genera un gradiente particolarmente marcato, che può favorire la concentrazione delle tensioni in aree localizzate a ridotto spessore. In tale contesto, il carico flettente applicato può aver rapidamente raggiunto il punto critico di innesco della cricca in una zona debole, provocando la frattura istantanea della struttura, senza che questa abbia avuto il tempo di deformarsi plasticamente. Questo comportamento suggerisce che, pur essendo efficace nella distribuzione del materiale verso le regioni centrali, una differenza eccessiva tra spessore minimo e massimo può indurre sollecitazioni localizzate tali da compromettere la capacità della struttura di assorbire energia prima del cedimento.

3.2.5.4.2.4 1,0–1,5 mm

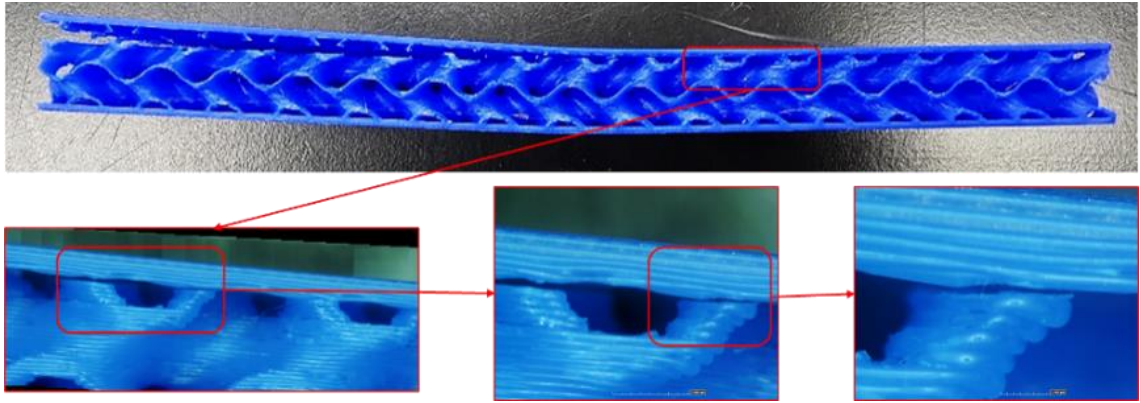


Figura 49: Immagini microscopiche del campione 1,0–1,5 mm che mostrano una chiara delaminazione della pelle superiore rispetto al nucleo sotto carico flessionale.

Dall'analisi della Figura 49, riferita al campione con gradiente di spessore compreso tra 1,0 e 1,5 mm, emerge una delaminazione evidente tra la pelle superiore e il nucleo sottostante. Nonostante in questa configurazione la differenza tra lo spessore minimo e quello massimo sia contenuta, pari a soli 0,5 mm, tale variazione si è comunque rivelata insufficiente a garantire un'adeguata continuità strutturale durante la prova di flessione. Il distacco osservato indica che, sotto carico, l'adesione tra lo strato esterno e la geometria interna non è risultata sufficientemente efficace da impedire la separazione tra le due parti.

3.2.5.4.2.5 1,0–2,0 mm

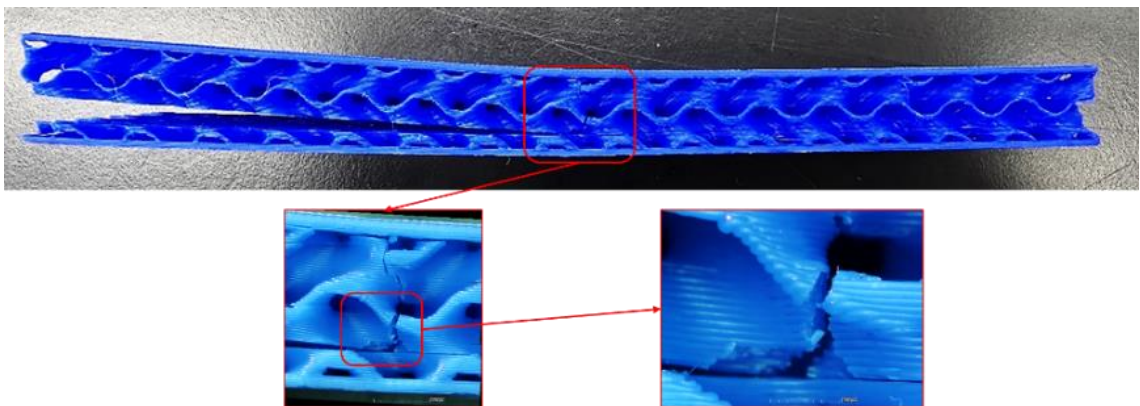


Figura 50: Immagini microscopiche del campione 1,0–2,0 mm che illustrano l'innesco di cricche al centro del nucleo e la successiva separazione degli strati lungo la lunghezza.

Nel campione 1,0–2,0 mm, la frattura ha avuto origine nella zona centrale del nucleo, corrispondente al punto di massimo momento flettente. Come evidenziato nella Figura 50, il danneggiamento si è propagato lungo l'asse longitudinale del

campione, causando una delaminazione estesa degli strati interni. Questo comportamento indica che, sebbene la configurazione presenti uno spessore minimo di 1,0 mm e un massimo di 2,0 mm — valori superiori rispetto alle configurazioni con spessori più contenuti — l'adesione tra i vari strati costituenti il nucleo non è risultata sufficiente a contrastare le elevate sollecitazioni indotte dalla flessione. L'innesco del cedimento nella zona centrale suggerisce il superamento della soglia critica di tensione in quel punto, con conseguente attivazione di un meccanismo di frattura che ha portato a una separazione netta e prolungata lungo tutta la struttura.

3.2.5.4.2.6 1,0–2,5 mm

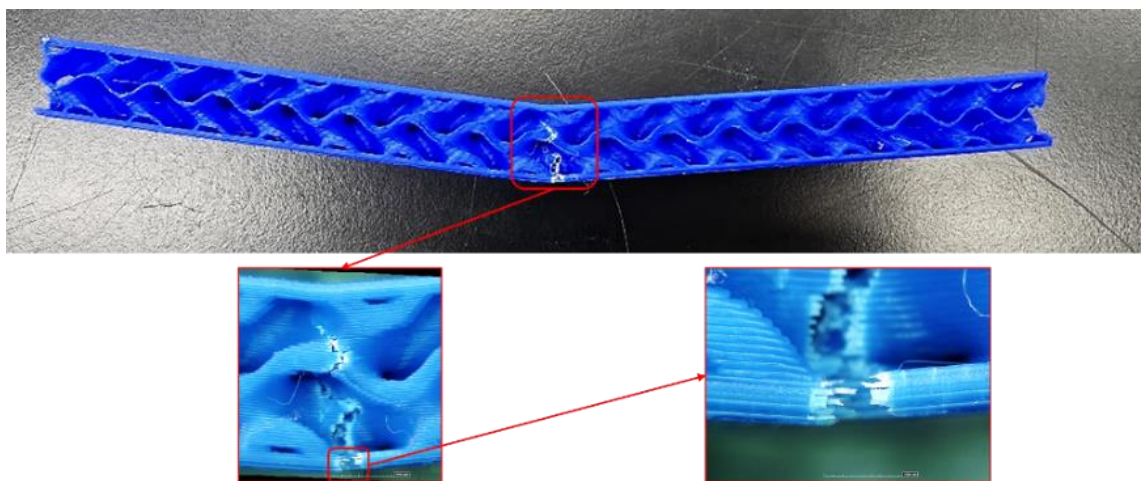


Figura 51: Immagini microscopiche del campione 1,0–2,5 mm che mostrano una modalità di frattura più duttile, con crescita evidente della cricca nella zona centrale prima del cedimento finale.

Nella configurazione 1,0–2,5 mm, la Figura 51 evidenzia una frattura localizzata nella zona centrale del campione, ma caratterizzata da un comportamento nettamente più duttile rispetto ai casi precedenti. La presenza di un nucleo con spessore massimo pari a 2,5 mm ha conferito alla struttura una maggiore capacità di assorbimento dell'energia, permettendo al materiale di deformarsi plasticamente prima che la cricca si propagasse in modo definitivo. Tale comportamento è confermato dall'osservazione di filamenti allungati e di superfici di frattura poco nette, indicativi di un cedimento non improvviso. In questo contesto, la transizione dello spessore da 1,0 mm a 2,5 mm si è rivelata efficace nel rinforzare la regione centrale — coincidente con il punto di massimo momento flettente — contribuendo

a rallentare la propagazione della frattura e migliorando la resistenza complessiva del provino.

3.2.5.5 Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro ha dimostrato come l'integrazione di un gradiente di spessore variabile all'interno di strutture sandwich basate su geometrie TPMS consenta un netto miglioramento delle prestazioni meccaniche in condizioni di sollecitazione flessionale. I risultati sperimentali ottenuti hanno evidenziato che configurazioni caratterizzate da un'ampia escursione di spessore—come nel caso del range 0,5–2,5 mm—sono in grado di raggiungere valori di tensione massima e di tensione specifica sensibilmente superiori rispetto a quelli rilevati nei campioni con riempimento costante. Questi risultati confermano che una distribuzione mirata della massa, concentrata strategicamente nelle regioni centrali soggette alle sollecitazioni maggiori, può contribuire in modo significativo a incrementare la capacità resistente dell'intera struttura. In prospettiva, gli sviluppi futuri dovranno concentrarsi sull'ottimizzazione del gradiente geometrico attraverso metodologie di progettazione avanzate, basate su strumenti computazionali più sofisticati. In particolare, l'integrazione di mappe di sollecitazione derivate da simulazioni agli elementi finiti (FEM) potrà consentire un controllo ancora più preciso, e guidato da criteri fisicamente significativi, della variazione di spessore all'interno della geometria. In questo modo, sarà possibile ottenere una distribuzione del materiale ancora più efficiente, localizzandolo esclusivamente nelle zone che ne richiedono la presenza in funzione delle effettive condizioni di carico. Parallelamente, sarà utile sviluppare studi parametrici estesi, in grado di esplorare un intervallo più ampio di percentuali di riempimento e di ampiezze del gradiente, al fine di individuare configurazioni ottimali che bilancino al meglio le esigenze di alleggerimento strutturale con quelle di robustezza meccanica. L'insieme di questi perfezionamenti progettuali potrà rappresentare la base per lo sviluppo di una nuova generazione di strutture ingegneristiche avanzate, capaci di coniugare elevata efficienza funzionale e resistenza strutturale, anche in contesti applicativi complessi e ad alte prestazioni.

3.3 Strutture Sandwich Composite

3.3.1 Introduzione al capitolo

Parallelamente all'innovazione geometrica, la ricerca sui pannelli sandwich ha visto un crescente interesse verso l'impiego di materiali compositi[46,47], in grado di combinare le proprietà di matrici polimeriche, rinforzi fibrosi e additivi funzionali[48,49]. L'uso di fibre di carbonio, vetro, kevlar e biocompositi naturali permette di ottenere pannelli leggeri e ad alte prestazioni, mentre la manifattura additiva multimateriale apre la strada a configurazioni in cui pelli e core possono essere realizzati con materiali differenti e ottimizzati localmente. Questo capitolo è dedicato allo studio delle strutture sandwich composite, mettendo in evidenza le potenzialità dei materiali avanzati, le tecniche di fabbricazione multimateriale e le prospettive applicative in settori ad elevata specializzazione, dall'aerospazio all'ingegneria civile, fino al biomedicale.

3.3.1.1 Introduzione alle strutture composite e ai filamenti per AM

I materiali compositi rappresentano una categoria di materiali ingegnerizzati che sfruttano la combinazione di due o più fasi per ottenere proprietà superiori rispetto ai singoli costituenti[50,51]. Essi sono tipicamente costituiti da una matrice continua – polimerica, metallica o ceramica – che ha il compito di trasferire i carichi e di proteggere la fase di rinforzo, e da un rinforzo disperso (fibre, particelle o lamelle), responsabile del miglioramento delle prestazioni meccaniche[52–54]. L'efficacia di un composito dipende in larga misura dalla qualità dell'interfaccia matrice–rinforzo, poiché è in questa zona che avviene il trasferimento del carico e si determina l'adesione tra le due fasi[55]. All'interno dei compositi fibrosi, si distinguono comunemente due categorie principali:

- Compositi a fibre corte, in cui il rinforzo è costituito da fibre con lunghezze tipicamente comprese tra poche decine di micrometri e alcuni millimetri. Queste fibre sono distribuite casualmente o con orientamento parziale all'interno della matrice, rendendo il materiale più isotropo e facilmente processabile. Tuttavia, la capacità di trasferimento del carico è limitata, poiché la lunghezza ridotta non consente di sfruttare appieno il potenziale

della fibra, traducendosi in resistenze e rigidzze inferiori rispetto ad altre configurazioni.

- Compositi a fibre lunghe o continue, nei quali le fibre possono estendersi per l'intera dimensione del componente o essere organizzate in tessuti e preforme. In questo caso, il rinforzo conferisce proprietà altamente anisotrope, con prestazioni meccaniche particolarmente elevate lungo la direzione delle fibre. Tali materiali raggiungono valori di resistenza e modulo comparabili o superiori a quelli delle leghe metalliche leggere, a fronte di una significativa riduzione di peso.

Questa distinzione risulta fondamentale in fase progettuale: le fibre corte offrono versatilità e facilità di fabbricazione, mentre le fibre lunghe garantiscono le massime prestazioni meccaniche ma richiedono processi più complessi e controllati[55–57]. Con l'avvento della manifattura additiva, questi concetti sono stati trasferiti nei filamenti compositi per stampa 3D, in cui una matrice polimerica (ad esempio PLA, ABS o nylon) è caricata con fibre corte, polveri funzionali o addirittura fibre continue[58]. I filamenti caricati con fibre corte consentono di migliorare rigidità e resistenza dei polimeri mantenendo la semplicità di stampa, mentre i filamenti rinforzati con fibre lunghe o continue aprono prospettive di prestazioni molto più elevate, vicine a quelle dei laminati stratificati. Un ulteriore avanzamento è rappresentato dalla stampa multimateriale, che consente di combinare filamenti compositi e polimeri tradizionali all'interno dello stesso componente. Ciò permette di modulare localmente le proprietà del pezzo, realizzando strutture ibride, pannelli sandwich con pelli rinforzate e core leggeri, oppure elementi funzionalizzati senza ricorrere ad assemblaggi. In questa prospettiva, i filamenti compositi, integrati con la flessibilità della stampa multimateriale, delineano una delle frontiere più promettenti della progettazione di strutture avanzate, capaci di unire leggerezza, resistenza e multifunzionalità.

3.3.2 Modellazione e caratterizzazione meccanica di strutture sandwich in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio realizzate mediante tecniche di additive manufacturing

3.3.2.1 Abstract

La presente ricerca affronta il tema della realizzazione di pannelli sandwich avanzati mediante manifattura additiva, con particolare attenzione alle potenzialità offerte dalla fabbricazione a filamento fuso. Sono state impiegate pelli in acido polilattico (PLA) e PLA arricchito con fibre corte di carbonio, in combinazione con nuclei cellulari caratterizzati da geometrie derivate da superfici minimali triplamente periodiche (TPMS). L'inserimento di rinforzi fibrorinforzati nella matrice polimerica consente di incrementare le proprietà meccaniche del materiale, sebbene la tecnologia additiva possa introdurre discontinuità morfologiche che influiscono sulle prestazioni finali. L'attività sperimentale ha previsto prove di flessione a tre punti, con l'obiettivo di confrontare il comportamento di differenti configurazioni in termini di resistenza, rigidità e modalità di cedimento. L'analisi condotta ha permesso di evidenziare i vantaggi e le criticità legati sia alla scelta del materiale che alla geometria del core, offrendo indicazioni utili per l'ottimizzazione del design e dei parametri di processo nella realizzazione di strutture leggere ad alte prestazioni tramite additive manufacturing.

3.3.2.2 Introduzione

Nel presente studio è stata adottata la tecnologia di manifattura additiva, comunemente nota come stampa 3D, la quale sta progressivamente trasformando il settore manifatturiero grazie alla possibilità di realizzare geometrie complesse e componenti altamente personalizzati mediante un'ampia varietà di materiali[59,60]. L'attività di ricerca è focalizzata sull'analisi delle proprietà meccaniche di strutture a sandwich avanzate, ottenute tramite la tecnica di fabbricazione a filamento fuso (Fused Filament Fabrication, FFF), utilizzando per le facce materiali polimerici in acido polilattico (PLA) e PLA rinforzato con fibre corte di carbonio, e impiegando per i nuclei strutture cellulari innovative. I materiali compositi a matrice polimerica, in particolare il PLA rinforzato con fibre di carbonio, presentano vantaggi significativi rispetto ai materiali polimerici

tradizionali[61,62]. Il PLA, un biopolimero ottenuto da fonti rinnovabili, risulta particolarmente adatto alla stampa 3D per via della sua facilità di lavorazione e della sua biodegradabilità[63]. L'introduzione di fibre corte di carbonio nella matrice polimerica consente di incrementare le proprietà meccaniche del materiale, come confermato da numerosi contributi presenti in letteratura tecnica[64,65]. Tuttavia, la distribuzione non ottimale delle fibre durante il processo di estrusione, tipica dei sistemi FFF, può introdurre discontinuità, vuoti e difetti morfologici che compromettono le prestazioni finali del componente, rappresentando così un limite critico del processo[66,67]. Tale aspetto costituisce al contempo una sfida progettuale e una potenziale opportunità di ottimizzazione nei processi di stampa additiva. L'obiettivo specifico di questa ricerca è lo studio sperimentale e numerico delle proprietà meccaniche di strutture sandwich avanzate realizzate mediante additive manufacturing, impiegando come materiale di rivestimento il PLA rinforzato con fibre corte di carbonio e utilizzando per i core strutture cellulari derivate da superfici minimali triplamente periodiche (Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS). Queste ultime, grazie alla loro morfologia tridimensionale complessa, consentono di ottenere un'elevata efficienza strutturale in termini di rapporto tra resistenza meccanica e massa, aprendo nuove prospettive applicative nel campo dell'ingegneria dei materiali e delle strutture leggere ad alte prestazioni[68–70].

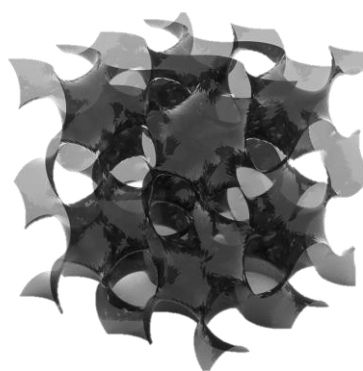


Figura 52: Geometria giroide.

Attraverso l'esecuzione di prove di flessione a tre punti, la presente attività di ricerca si propone di analizzare in modo approfondito il comportamento meccanico di strutture sandwich realizzate mediante manifattura additiva, confrontando le

prestazioni di configurazioni costituite esclusivamente da acido polilattico (PLA) con quelle ottenute mediante PLA rinforzato con fibre corte di carbonio. L'indagine sperimentale è focalizzata in particolare sui meccanismi di deformazione e rottura che si manifestano durante il caricamento flessionale, al fine di individuare eventuali criticità strutturali e potenzialità applicative delle diverse configurazioni. L'obiettivo è quello di valutare l'efficacia del rinforzo fibrorinforzato nel migliorare le prestazioni meccaniche del materiale base, nonché di fornire indicazioni utili per l'ottimizzazione del design e dei parametri di processo nelle tecnologie di additive manufacturing impiegate per la realizzazione di elementi strutturali a elevate prestazioni.

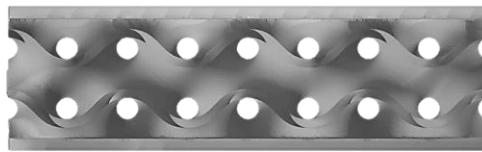


Figura 53: Vista frontale provino sandwich (rendering).

3.3.2.3 Materiali e metodi

Si procede all'analisi del processo di realizzazione dei campioni, a partire dalla fase di modellazione tridimensionale mediante software CAD. È stato utilizzato il software nTopology, selezionato per le sue funzionalità avanzate nella generazione e manipolazione di strutture basate su superfici minimali triplicemente periodiche (TPMS). I campioni sono stati modellati conformemente alle normative di riferimento, definendo per il nucleo dimensioni pari a 10 mm in altezza, 40 mm in larghezza e 160 mm in profondità, come illustrato nella figura di riferimento. Le pelli esterne sono state progettate con uno spessore costante pari a 1 mm. Concentrandosi sul nucleo strutturale, esso è costituito da un insieme di celle unitarie con geometria giroide, ciascuna delle quali presenta dimensioni di 10 mm lungo le tre direzioni spaziali. Lo spessore della superficie della cella è stato impostato pari a 1,554 mm. Tale configurazione genera una struttura con una densità relativa del 30% rispetto al pieno, ovvero un rapporto pieno/vuoto pari al 30%. La scelta di questa densità è il risultato di un'analisi comparativa tra diverse percentuali, finalizzata all'individuazione del miglior compromesso tra resistenza meccanica e leggerezza strutturale.



Figura 54: Provino di struttura sandwich con geometria giroide (vista laterale).

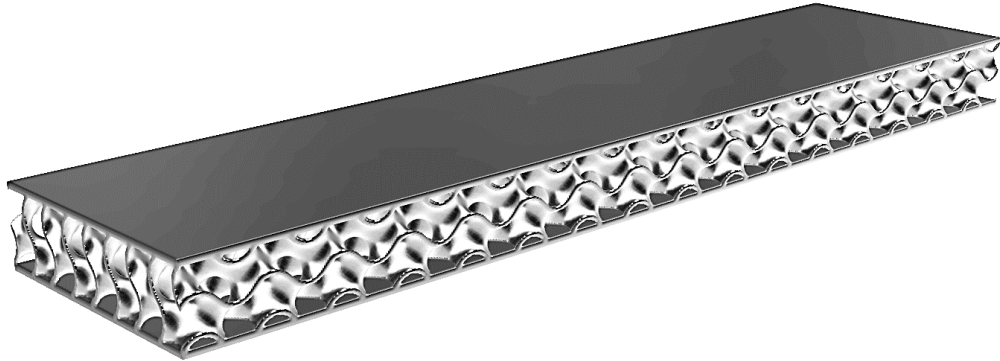


Figura 55: Provino di struttura sandwich con geometria giroide

H	10 mm
L	40 mm
P	160 mm
Thickness of the skins	1 mm
Filling percentage	30%
Medium thickness	1.554 mm
Unit cell dimensions (x, y, z)	10 mm

Tabella 12: Caratteristiche geometriche del provino

Si procede con l'analisi del processo di fabbricazione dei campioni mediante tecnologie di additive manufacturing. Per l'operazione è stata impiegata una stampante 3D prodotta dall'azienda Bambu Lab, modello X1 Carbon (X1C), dotata di sistema AMS (Automatic Material System) per la gestione del multimateriale, che ha consentito la stampa combinata di materiali diversi all'interno dello stesso ciclo produttivo. La macchina è equipaggiata con un ugello in acciaio temprato, soluzione tecnica necessaria per la lavorazione di filamenti caricati con rinforzi

abrasivi; in particolare, è stato utilizzato un filamento in PLA rinforzato con fibre di carbonio, la cui elevata abrasività risulterebbe incompatibile con ugelli standard in lega di bronzo a causa dell'usura accelerata. I campioni sono stati realizzati con una densità di riempimento pari al 100%, adottando uno spessore di layer di 0,2 mm e impostando una temperatura di estrusione di 220 °C per il PLA standard e di 230 °C per il PLA caricati con fibre. La temperatura del piano di stampa è stata mantenuta costantemente a 60 °C al fine di garantire l'adesione ottimale del primo strato e la stabilità dimensionale durante l'intero processo additivo.

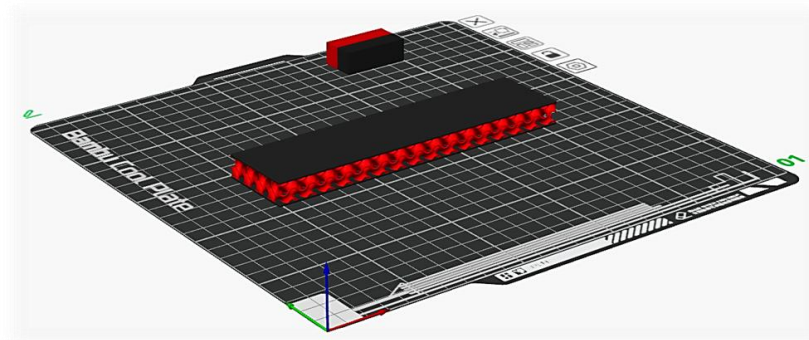


Figura 56 : Anteprima del modello di provino a struttura sandwich nell'ambiente di slicing del software Bambu Lab.

La figura mostra la vista frontale di un campione realizzato interamente in PLA, il quale viene adottato come riferimento per la valutazione comparativa delle proprietà meccaniche dei campioni rinforzati con fibre, consentendo l'analisi dell'influenza del rinforzo sulla risposta strutturale del materiale.



Figura 57: Vista frontale del provino in PLA con configurazione a struttura sandwich.

La figura seguente mostra il campione dotato di pelli esterne realizzate in materiale composito, la cui produzione è stata resa possibile grazie all'impiego del sistema AMS (Automatic Material System) integrato nella stampante Bambu Lab, che consente la gestione e la stampa simultanea di più materiali in un'unica operazione additiva.



Figura 58: Vista frontale del provino in PLA con configurazione a struttura sandwich.

Si procede con la descrizione della fase di testing, durante la quale sono state eseguite prove di flessione a tre punti, come già anticipato in precedenza. Le prove sperimentali sono state condotte mediante una macchina universale Zwick/Roell modello 8253, equipaggiata con una cella di carico avente capacità massima pari a 2,5 kN. I test sono stati eseguiti in conformità alla normativa ASTM D790, che disciplina la procedura per la determinazione delle proprietà meccaniche a flessione dei materiali plastici. La velocità di avanzamento della traversa è stata impostata a 1 mm/min, mentre la distanza tra i supporti, ovvero la support span, è stata fissata pari a 120 mm, in linea con le prescrizioni dello standard di riferimento.



Figura 59: Configurazione dell'apparato sperimentale per la prova di flessione.

Test parameters	
Test	Flexural
Standard	ASTM D 790

Machine	Zwick/Roell type 8253, Fmax 2.5 kN
Speed Test	1 [mm/min]
Specimen Length	160 mm
Specimen Thickness	12 mm
Core thickness	10 mm
Support span	120 mm

Figura 60: Parametri sperimentali per la prova di flessione.

3.3.2.4 Risultati

Si riportano di seguito i grafici relativi ai risultati ottenuti dai campioni realizzati in PLA e in PLA rinforzato con fibre di carbonio (PLA-CF), in cui sono rappresentati congiuntamente i valori di resistenza a flessione, modulo di flessione e carico massimo, al fine di consentire un'analisi comparativa delle prestazioni meccaniche dei due materiali sottoposti a prova.

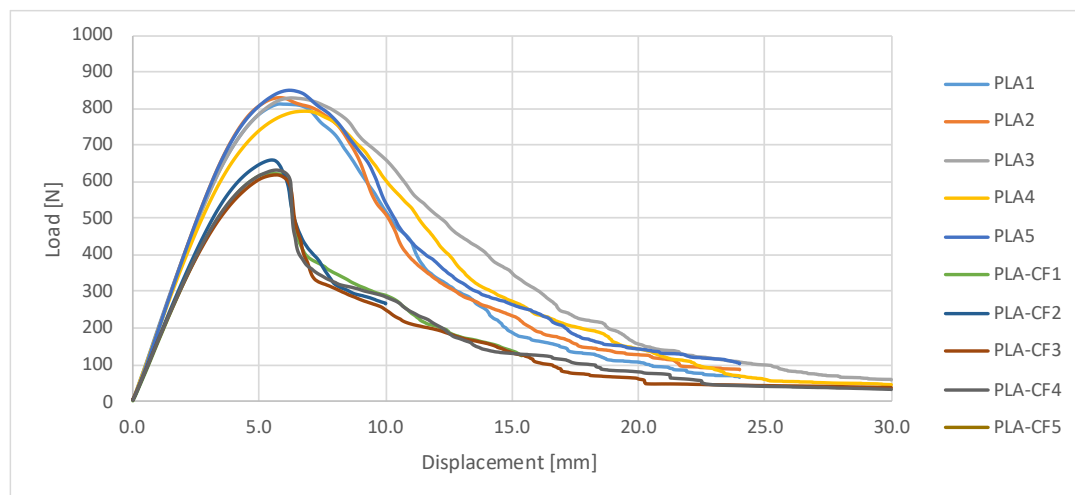


Grafico 9: Grafico carico–spostamento relativo ai provini a struttura sandwich in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio.

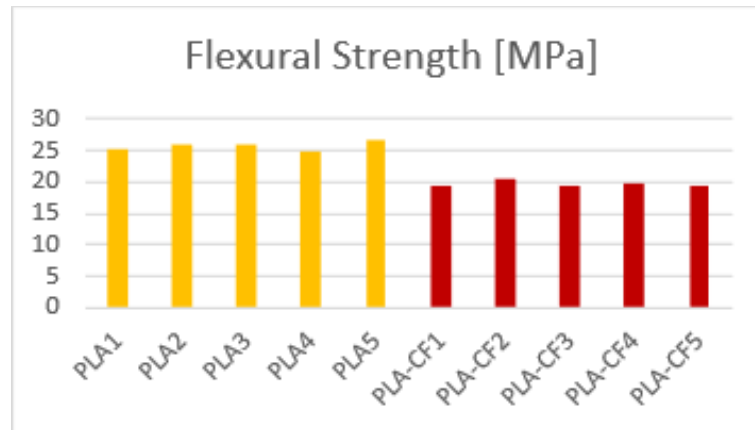


Grafico 10: Grafico della resistenza a flessione dei provini a struttura sandwich in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio.

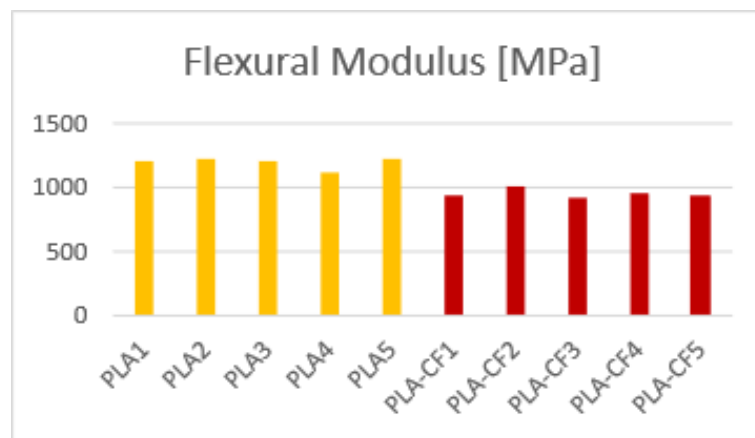


Grafico 11 : Grafico del modulo a flessione dei provini a struttura sandwich in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio.

PLA (Polylactic Acid) Samples

Sample	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)	Maximum Load (N)
PLA1	25.39	1214.25	812.50
PLA2	25.93	1230.23	829.63
PLA3	25.91	1202.45	828.99
PLA4	24.77	1122.39	792.67
PLA5	26.56	1230.66	849.89

PLA-CF (PLA with Carbon Fibers) Samples

Sample	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)	Maximum Load (N)
PLA-CF1	19.43	939.59	621.75
PLA-CF2	20.60	1018.51	659.24
PLA-CF3	19.33	920.27	618.51
PLA-CF4	19.74	964.89	631.66
PLA-CF5	19.42	936.51	621.32

Tabella 13: Valori di resistenza a flessione, modulo a flessione e carico massimo dei provini a struttura sandwich in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio.

PLA (Acido Polilattico)

1. Resistenza a Flessione: I valori di resistenza a flessione dei campioni PLA variano da 24.77 Mpa a 26.56 MPa, con il campione PLA5 che mostra il valore più alto di 26.56 MPa. Questo suggerisce una buona prestazione meccanica generale del PLA.
2. Modulo di Flessione: Il modulo di flessione è compreso tra 1122.39 MPa e 1230.66 MPa, con il campione PLA5 che presenta anche il massimo valore. Un modulo elevato indica una buona rigidità e stabilità dimensionale.
3. Carico Massimo: I campioni PLA possono sostenere carichi massimi tra 792.67 N e 849.89 N, con PLA5 che ha il carico massimo più alto a 849.89 N. Questo dimostra una notevole capacità di carico.

PLA-CF (PLA con Fibre di Carbonio)

1. Resistenza a Flessione: I campioni PLA-CF presentano una resistenza a flessione che varia da 19.33 Mpa a 20.60 MPa, con il campione PLA-CF2 che mostra il valore massimo. Questi valori sono significativamente inferiori rispetto ai campioni PLA, suggerendo una minore capacità di resistenza.

2. Modulo di Flessione: I valori di modulo di flessione per i campioni PLA-CF oscillano tra 920.27 MPa e 1018.51 MPa. Anche se ci sono miglioramenti rispetto ai valori più bassi, rimangono inferiori rispetto ai campioni PLA.

3. Carico Massimo: I carichi massimi sostenuti dai campioni PLA-CF variano da 618.51 N a 659.24 N. Questi valori sono notevolmente più bassi rispetto ai campioni di PLA, evidenziando una perdita di capacità di carico con l'aggiunta delle fibre di carbonio.

3.3.2.5 Analisi dei risultati

L'analisi dei risultati sperimentali evidenzia in modo inequivocabile che i campioni realizzati in PLA presentano prestazioni meccaniche superiori rispetto a quelli rinforzati con fibre di carbonio (PLA-CF). In particolare, i provini in PLA mostrano valori più elevati di resistenza a flessione, modulo elastico e carico massimo, confermando una maggiore rigidità e capacità portante. Tali evidenze sperimentali suggeriscono che, per applicazioni in cui le proprietà meccaniche, quali la resistenza e la rigidità, rivestono un ruolo prioritario, il materiale in PLA non rinforzato rappresenta la scelta preferibile. Considerato che i risultati ottenuti si discostano da quanto atteso—ossia da un miglioramento prestazionale associato all'inserimento delle fibre di carbonio—è stata condotta un'analisi supplementare al microscopio ottico, e sono stati inoltre sottoposti a test ulteriori dei provini a geometria “dog-bone” in PLA puro e PLA-CF. Prima di analizzare i risultati relativi a tali ulteriori indagini, si procede con la valutazione delle modalità di frattura osservate nei provini sandwich. L'osservazione post-prova dei campioni compositi stampati in 3D ha evidenziato che la frattura è avvenuta secondo traiettorie discontinue, corte e irregolari, con un andamento a zig-zag, aderente alla geometria tridimensionale della superficie giroide impiegata per il nucleo. Tale configurazione del fronte di frattura è riconducibile alla tipica orientazione di stampa $\pm 45^\circ$ adottata nei processi di fabbricazione additiva, che induce una risposta anisotropa del materiale. La rottura si è innescata a seguito di uno stato di sollecitazione prevalentemente a trazione nella parte inferiore del provino, localizzata nella pelle in CF-PLA. Al crescere dello stato tensionale, si è raggiunta una soglia oltre la quale il materiale non è stato in grado di sostenere ulteriormente il carico applicato,

provocando la nucleazione e successiva propagazione della cricca attraverso lo spessore della struttura sandwich, interessando sia le facce esterne che il materiale di nucleo. Durante tale processo di propagazione, si è verificata la perdita di aderenza tra pelle e nucleo, conducendo a un evidente fenomeno di delaminazione. Questa separazione interstrato ha determinato una progressiva compromissione dell'integrità meccanica dell'intero composito. Il meccanismo di danneggiamento è stato ulteriormente confermato dalla rottura localizzata delle fibre polimeriche nel PLA, rivelando zone critiche in corrispondenza delle quali le sollecitazioni di trazione hanno superato il limite di resistenza del materiale. L'andamento non lineare e disordinato delle cricche, secondo percorsi a zig-zag, suggerisce che la struttura stratificata del materiale abbia influito in modo significativo sul comportamento a frattura, poiché la presenza di vuoti interlaminari derivanti dalla deposizione sequenziale degli strati ha generato punti deboli localizzati. Complessivamente, tale modalità di frattura evidenzia l'importanza di tenere in considerazione sia l'orientamento degli strati durante la fase di stampa sia la qualità dell'adesione interlaminare nella progettazione e nella valutazione strutturale dei materiali compositi realizzati mediante tecnologie di manifattura additiva.

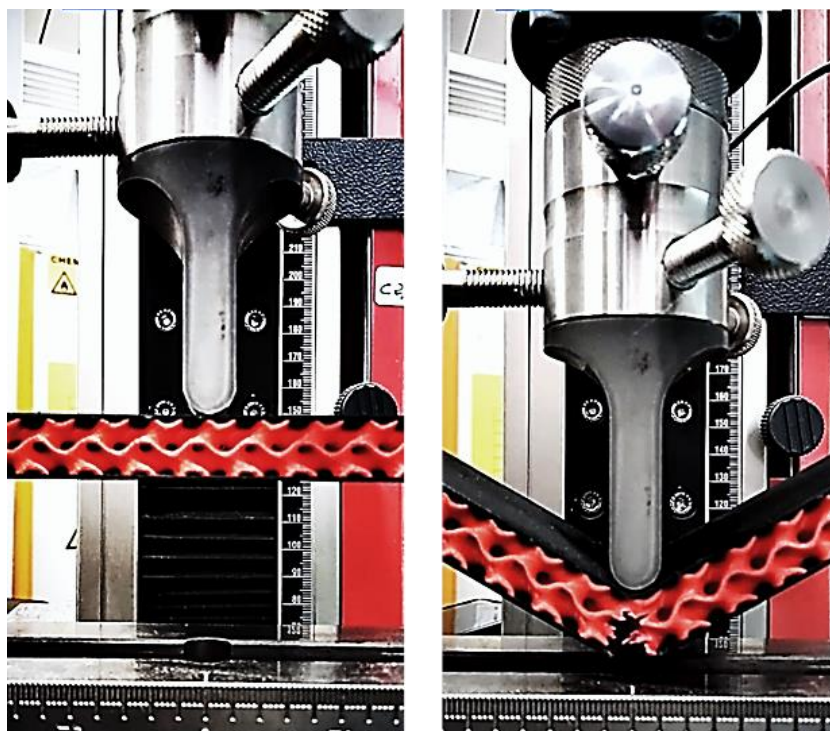


Figura 61 : Prova di flessione su provini a struttura sandwich in PLA rinforzato con fibra di carbonio.

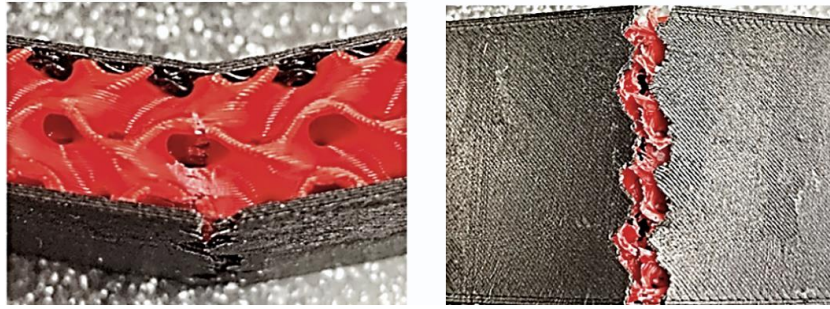


Figura 62: Modalità di frattura dei provini a struttura sandwich in PLA rinforzato con fibra di carbonio.

Di seguito è possibile apprezzare l'analisi al microscopio ottico della frattura dei provini compositi. Com'è possibile vedere la frattura è partita dalla faccia inferiore per propagarsi all'interno del core.



Figura 63 : Immagini al microscopio ottico delle modalità di frattura dei provini a struttura sandwich in PLA rinforzato con fibra di carbonio.

Le immagini riportate mostrano in dettaglio lo strato in PLA rinforzato con fibre di carbonio impiegato per la realizzazione delle pelli esterne. L'osservazione condotta mediante microscopio ottico evidenzia una minore adesione tra i layer depositati nei campioni in materiale composito rispetto a quelli in PLA puro. Tale comportamento, unitamente alla presenza di difetti morfologici di dimensioni ridotte visibili nelle immagini, potrebbe costituire una delle concause delle prestazioni meccaniche inferiori osservate nei provini realizzati in PLA-CF.

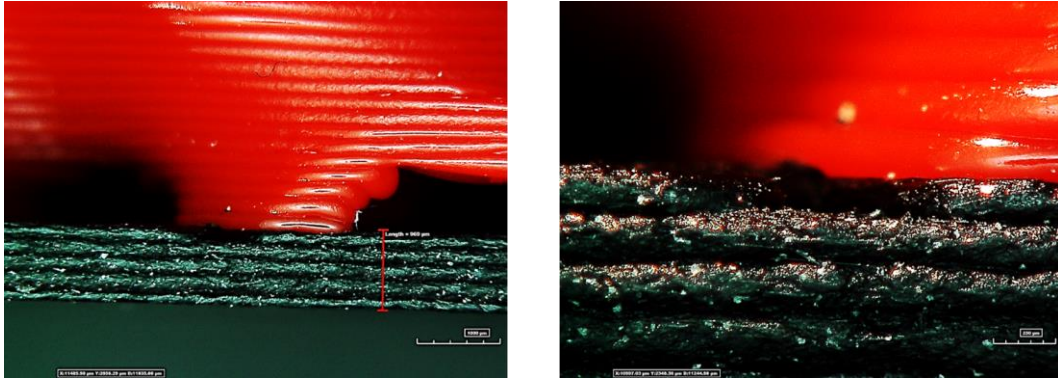


Figura 64 : Immagini al microscopio ottico dei provini a struttura sandwich in PLA rinforzato con fibra di carbonio.

Di seguito è possibile apprezzare la frattura dei provini in PLA puro. Il meccanismo di frattura è il medesimo di quello precedentemente analizzato nei compositi.

In queste immagini tratte dall'analisi al microscopio ottico è possibile notare l'avanzamento della cricca nei layer in PLA.

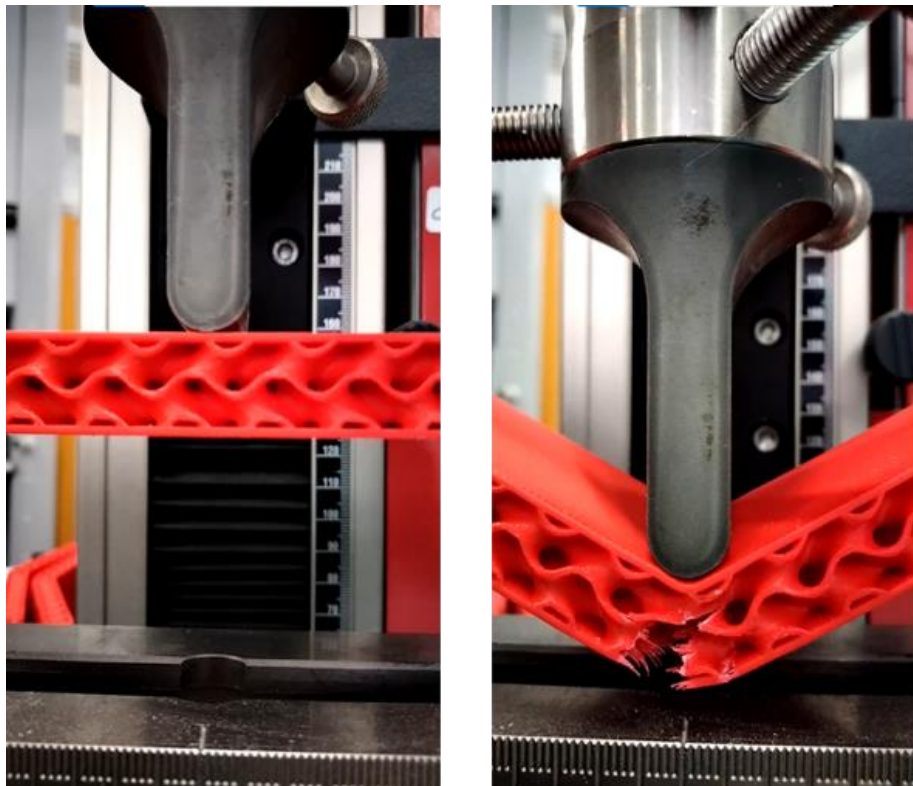


Figura 65 : Prova di flessione su provini a struttura sandwich in PLA.

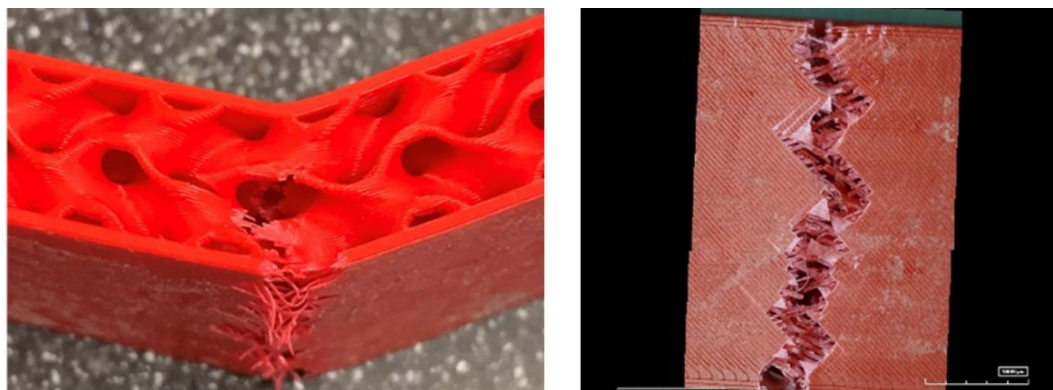


Figura 66: Modalità di frattura dei provini a struttura sandwich in PLA.

Nelle immagini ottenute dall'analisi al microscopio ottico è possibile osservare la propagazione della frattura all'interno degli strati di PLA.

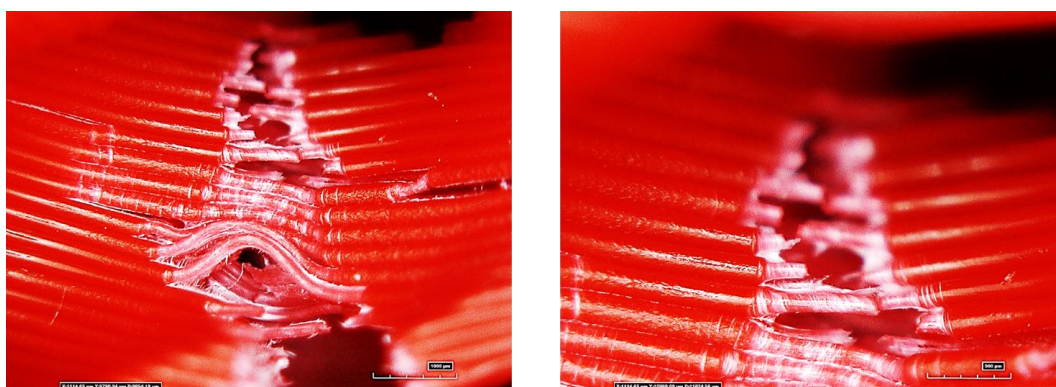


Figura 67: Immagini al microscopio ottico delle modalità di frattura dei provini a struttura sandwich in PLA.

Le immagini seguenti evidenziano una maggiore coesione tra i layer nei campioni realizzati in PLA puro rispetto a quanto osservato nei campioni compositi precedentemente analizzati. Tale comportamento indica che la fusione tra gli strati avviene in modo più efficiente nel materiale non rinforzato, contribuendo a una migliore integrità strutturale e a prestazioni meccaniche superiori nelle pelli realizzate interamente in PLA.

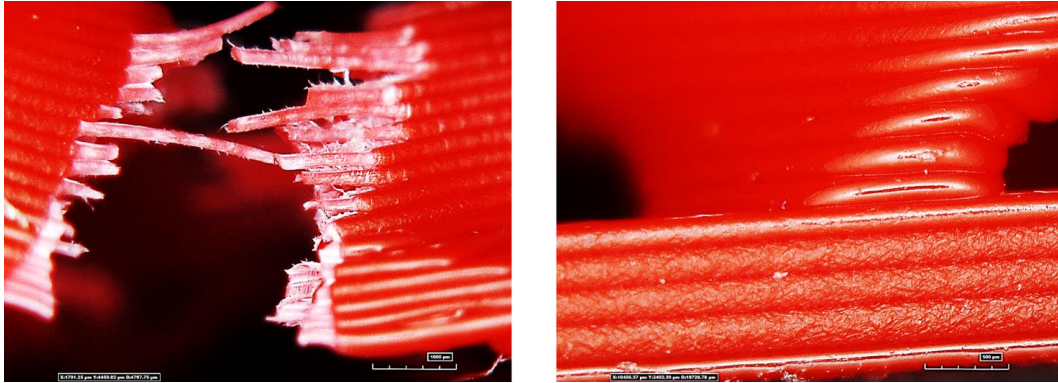


Figura 68 : Immagini al microscopio ottico dei provini a struttura sandwich in PLA.

L'immagine ottenuta tramite microscopio ottico mostra un confronto diretto tra le superfici di frattura delle facce inferiori dei provini realizzati in PLA e in PLA rinforzato con fibre di carbonio (PLA-CF), evidenziando nuovamente un comportamento fratturativo sostanzialmente analogo tra i due materiali, con modalità di rottura simili indipendentemente dalla presenza del rinforzo.

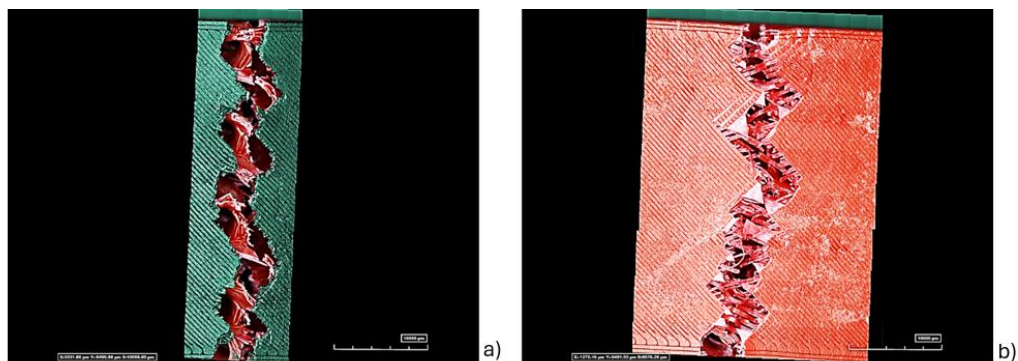


Figura 69: Immagine comparativa delle modalità di frattura, rilevate nella parte inferiore dei provini a struttura sandwich in PLA-CF (a) e PLA (b), acquisita mediante microscopia ottica.

Come anticipato, i risultati ottenuti non hanno soddisfatto le aspettative iniziali. Per tale motivo, si è deciso di caratterizzare meccanicamente il materiale costituente le pelli, considerando anche che la frattura osservata nei provini sandwich tendeva a propagarsi proprio da tale regione. Sono quindi state eseguite prove di trazione su provini con geometria a “dog-bone”, realizzati rispettivamente in PLA e in PLA rinforzato con fibre di carbonio (PLA-CF). I grafici relativi alle prove di trazione per entrambi i materiali sono riportati di seguito. Le prove sono state condotte conformemente alla norma ASTM D638, utilizzando la stessa macchina universale impiegata precedentemente per le prove a flessione. L'analisi dei risultati ha

riguardato i parametri di resistenza a trazione, modulo elastico e deformazione a rottura. L'elaborazione dei dati evidenzia che i campioni realizzati in PLA mostrano prestazioni meccaniche superiori rispetto a quelli in PLA-CF. In particolare, i provini in PLA hanno fatto registrare valori più elevati sia in termini di resistenza che di modulo di elasticità, indicando una maggiore robustezza strutturale e rigidità. L'inserimento di fibre di carbonio all'interno della matrice polimerica non ha comportato un miglioramento delle proprietà meccaniche, anzi ha determinato una riduzione della resistenza a trazione. Tale comportamento suggerisce la possibile necessità di ottimizzare la formulazione del materiale composito o di affinare i parametri di processo della stampa per ottenere risultati prestazionali più soddisfacenti. I risultati delle prove a trazione confermano quanto osservato nei test a flessione delle strutture sandwich, rafforzando l'evidenza sperimentale secondo cui il PLA puro risulta più adatto, nelle condizioni testate, per applicazioni strutturali che richiedano elevate prestazioni meccaniche. Al contrario, il materiale PLA-CF, nella configurazione e con il processo di fabbricazione adottati, manifesta limitazioni che ne compromettono l'efficacia e che richiedono interventi migliorativi per renderlo competitivo dal punto di vista strutturale.

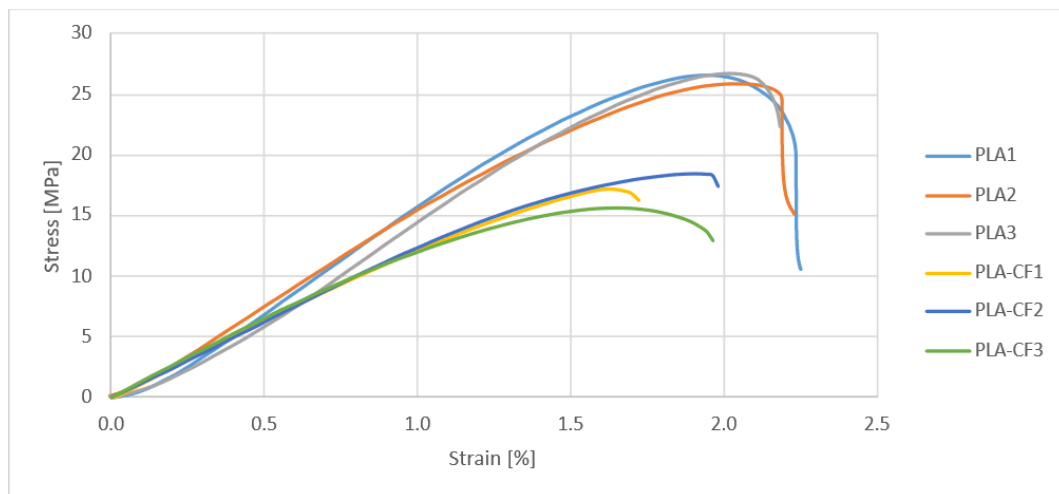


Figura 70: Grafico sforzo-deformazione dei provini in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio.

Test parameters	
Test	Tensile
Standard	ASTM D 638
Machine	Zwick/Roell type 8253, Fmax 2.5 kN
Speed Test	1 [mm/min]
Specimen Thickness	1 mm
Specime Length	25,4 mm
Gauge width	2,66 mm
Gauge Area	2,66 mm ²

Figura 71: Parametri sperimentali per la prova di trazione dei provini in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio.

	Strength [MPa]	Modulus [MPa]	Elongation [%]
PLA1	26.58	1678.44	2.25
PLA2	26.72	1561.17	2.23
PLA3	26.72	1296.20	2.18
PLA-CF1	17.13	1265.78	1.72
PLA-CF2	18.45	1256.14	1.98
PLA-CF3	15.62	1274.05	1.96

Tabella 14 : Valori di resistenza, modulo elastico e allungamento dei provini in PLA e PLA rinforzato con fibra di carbonio.

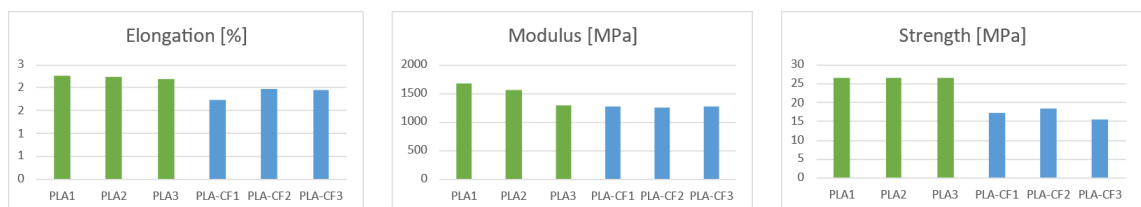


Grafico 12: : Elongation, Modulus and Strength values graphs of PLA and PLA-CF specimens.

Di seguito sono riportati i risultati relativi al comportamento a frattura dei campioni in PLA puro. L'analisi della superficie di frattura ha evidenziato una modalità di rottura di tipo inter-strato, caratterizzata da una superficie fratturata orientata parallelamente agli strati di deposizione, condizione tipica in presenza di angoli di stampa pari a $\pm 45^\circ$. La frattura inter-strato si manifesta quando la rottura avviene lungo l'interfaccia tra due layer adiacenti, senza che gli strati stessi vengano

compromessi internamente, e risulta identificabile dall'angolo nullo tra il piano di frattura e la direzione degli strati. Al contrario, la modalità di frattura intra-strato si verifica quando la rottura avviene all'interno del materiale costituente uno specifico strato, generando una superficie fratturata inclinata rispetto alla direzione degli strati, ovvero con un angolo diverso da zero, indicando una rottura che coinvolge direttamente la massa del layer depositato. La distinzione tra queste due modalità risulta particolarmente rilevante per l'interpretazione del comportamento meccanico dei materiali ottenuti mediante stampa 3D, in quanto fornisce indicazioni fondamentali sull'interazione tra layer e sull'efficacia dell'adesione interlaminare. In questo contesto, la scelta dell'angolo di deposizione e la qualità del legame tra strati rivestono un ruolo determinante nella definizione della resistenza meccanica e della durabilità delle strutture prodotte mediante tecnologie additive.



Figura 72 : Modalità di frattura dei provini in PLA sottoposti a prova di trazione.

Di seguito sono presentati i risultati relativi al comportamento a frattura dei provini realizzati in materiale composito PLA-CF. In tutti i campioni testati è stata osservata esclusivamente una modalità di frattura di tipo inter-strato, confermando quanto precedentemente ipotizzato in seguito all'analisi al microscopio ottico, ovvero che l'adesione tra gli strati nel materiale composito risulta significativamente più debole rispetto a quella riscontrata nei campioni in PLA puro. La presenza sistematica di fratture lungo le interfacce tra layer adiacenti suggerisce una coesione insufficiente all'interno della struttura stratificata, indicativa di un'interazione meccanica ridotta tra le deposizioni successive del filamento composito, con conseguenti limitazioni nella resistenza globale del materiale.

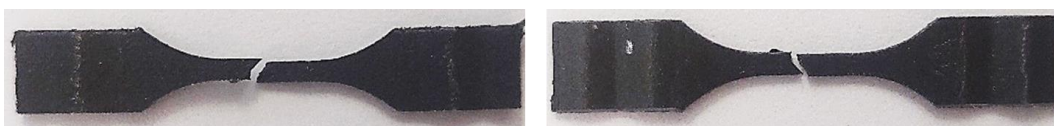


Figura 73: Modalità di frattura dei provini in PLA rinforzato con fibra di carbonio sottoposti a prova di trazione.

3.3.2.6 Conclusioni

L'indagine condotta sulle strutture a sandwich realizzate con polimero PLA e PLA rinforzato con fibre di carbonio corte, abbinate a nuclei ispirati alle superfici minimali triplicemente periodiche (TPMS), ha permesso di trarre considerazioni rilevanti in merito alle loro prestazioni meccaniche. Sebbene l'impiego del PLA combinato con fibre di carbonio corte sia teoricamente in grado di generare un materiale composito con proprietà meccaniche potenziate, i risultati sperimentali non hanno confermato l'atteso incremento in termini di resistenza e rigidità rispetto alle strutture costituite esclusivamente da PLA. Questo comportamento anomalo suggerisce che l'efficacia del rinforzo a base di fibre di carbonio sia fortemente condizionata da molteplici fattori di natura progettuale e tecnologica. Una delle possibili cause è riconducibile a una scarsa interazione tra la matrice polimerica e il rinforzo fibroso: qualora l'interfaccia fibra-matrice non garantisca un'adeguata adesione, si verifica un trasferimento di carico inefficace, che vanifica i benefici meccanici teoricamente associati alla presenza delle fibre. Un ulteriore fattore critico è rappresentato dall'orientamento delle fibre durante il processo di stampa: qualora non siano allineate lungo la direzione principale di sollecitazione, la loro capacità di contribuire alla resistenza strutturale risulta significativamente ridotta. Infine, la presenza di difetti di fabbricazione, quali vuoti, discontinuità o distribuzioni non uniformi delle fibre, può compromettere ulteriormente l'integrità meccanica del composito, annullando gli effetti positivi del rinforzo. Le implicazioni di questi risultati evidenziano che, sebbene i materiali compositi a base di PLA e fibre di carbonio presentino un potenziale di utilizzo nelle strutture sandwich, la loro efficacia dipende in modo sostanziale dall'accuratezza della progettazione, dalla qualità dell'interfaccia tra i costituenti e dalla precisione dei processi di manifattura additiva, i quali devono essere opportunamente ottimizzati per ottenere prestazioni meccaniche competitive.

3.3.2.7 Sviluppi futuri

Le prospettive future di questo filone di ricerca possono essere articolate secondo diverse direttrici di sviluppo mirate al miglioramento delle prestazioni meccaniche e funzionali delle strutture a sandwich realizzate mediante manifattura additiva.

- Esplorazione di differenti geometrie TPMS: L'analisi comparativa di diverse superfici minimali triplicemente periodiche, quali Gyroid, Schwarz P e D-surface, consentirebbe di valutare come ciascuna configurazione influisca su rigidità, distribuzione del carico e comportamento meccanico complessivo. Ogni geometria presenta proprietà strutturali distintive, e la loro caratterizzazione potrebbe condurre all'individuazione della soluzione più efficiente per specifiche applicazioni ingegneristiche.
- Investigazione sull'impiego di strutture reticolari nei nuclei: L'integrazione di reticoli a geometria esagonale, tetraedrica o di altra natura all'interno del nucleo potrebbe fornire un compromesso ottimale tra leggerezza e resistenza, migliorando le capacità di dissipazione energetica, la resistenza al buckling e la stabilità meccanica.
- Sperimentazione con percentuali di infill diverse dal 30%: L'analisi sistematica di valori di riempimento superiori o inferiori al 30% consentirebbe di ottimizzare il rapporto tra massa e prestazioni, individuando configurazioni capaci di massimizzare rigidità strutturale o flessibilità in funzione dei requisiti applicativi.
- Valutazione di materiali alternativi e impiego di rinforzi con fibre continue: L'utilizzo di polimeri bio-based, elastomeri termoplastici o materiali ibridi, eventualmente rinforzati con fibre continue invece che corte, potrebbe portare a miglioramenti significativi in termini di modulo elastico, resistenza e durata. Questo approccio è particolarmente rilevante per applicazioni ad alte prestazioni, dove le proprietà meccaniche del materiale sono determinanti.
- Adozione di tecnologie avanzate di manifattura additiva: L'impiego di tecniche come la stampa multimateriale, la sinterizzazione laser selettiva o l'ottimizzazione della FDM può consentire la realizzazione di geometrie complesse con proprietà meccaniche distribuite e adesione interlaminare migliorata. Il controllo fine del processo produttivo ridurrebbe la presenza di difetti, aumentando la qualità e l'affidabilità delle strutture prodotte.

Le potenziali applicazioni delle strutture a sandwich sviluppate includono diversi settori ingegneristici, nei quali la combinazione tra leggerezza e resistenza costituisce un requisito progettuale primario:

- Industria aerospaziale: per la produzione di pannelli strutturali alleggeriti destinati ad aeromobili e veicoli spaziali;
- Settore automobilistico: per componenti ad alta resistenza agli urti e parti di carrozzeria alleggerite;
- Ambito biomedicale: per impianti personalizzati e protesi a geometria ottimizzata;
- Attrezzatura sportiva: per la realizzazione di dispositivi ad alte prestazioni come telai per biciclette e caschi protettivi;
- Ingegneria civile e delle costruzioni: per elementi strutturali innovativi destinati a edifici e infrastrutture;
- Beni di consumo: per componenti leggeri e durevoli, quali custodie per dispositivi elettronici o arredi tecnici.

3.3.3 Ottimizzazione della temperatura di deposizione e del riempimento a giroide per il miglioramento delle prestazioni flessionali di strutture sandwich in PLA e compositi PLA–fibra di lino⁴

3.3.3.1 Abstract

La presente ricerca analizza l'ottimizzazione di strutture sandwich realizzate mediante stampa 3D con tecnologia a filamento fuso (FFF), utilizzando polilattide (PLA) e PLA rinforzato con fibre di lino. Il nucleo delle strutture è caratterizzato da un pattern di riempimento di tipo gyroidale, noto per l'elevata efficienza meccanica. Lo studio si concentra sugli effetti della temperatura di deposizione sull'adesione tra core e pelli esterne, nonché sull'influenza della densità di riempimento sulle proprietà meccaniche complessive. Le prestazioni flessionali delle strutture sono valutate mediante prove di flessione a tre punti. L'obiettivo è individuare i parametri di processo ottimali per migliorare le performance di strutture sandwich a base PLA rinforzate, destinate a un utilizzo avanzato. Le potenziali applicazioni di queste strutture includono componenti leggeri per interni automobilistici, soluzioni di imballaggio sostenibili ed elementi architettonici in cui è richiesto un bilanciamento tra resistenza meccanica e sostenibilità ambientale.

3.3.3.2 Introduzione

La manifattura additiva si è affermata come tecnologia chiave per la realizzazione di strutture sandwich leggere e personalizzabili, superando i limiti dei metodi tradizionali grazie alla possibilità di fabbricare geometrie complesse in modo più rapido, economico e sostenibile. Negli ultimi anni si è registrato un crescente interesse verso l'impiego di materiali sostenibili ed ecocompatibili nel campo della stampa 3D. Tra questi, l'acido polilattico (PLA) ha assunto un ruolo di primo piano come termoplastico biodegradabile, ottenuto da risorse rinnovabili quali l'amido di mais e la canna da zucchero. Il PLA presenta numerosi vantaggi, tra cui bassa tossicità, buone proprietà meccaniche e facilità di lavorazione. Tuttavia, le sue

⁴ Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [91]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

prestazioni meccaniche risultano talvolta limitate, soprattutto in condizioni di sollecitazione elevata. Per ovviare a tali limitazioni mantenendo al contempo un approccio progettuale sostenibile, è stata ampiamente studiata la possibilità di rinforzare il PLA mediante fibre naturali. Tra queste, le fibre di lino rappresentano una soluzione particolarmente promettente, grazie all'elevato rapporto resistenza/peso, alla bassa densità e alle eccellenti proprietà di isolamento termico e acustico. L'integrazione di fibre di lino nella matrice polimerica consente infatti la realizzazione di materiali compositi caratterizzati da prestazioni meccaniche superiori e maggiore sostenibilità ambientale. Una rassegna approfondita ha evidenziato come l'inserimento di fibre naturali nel PLA possa migliorare significativamente le proprietà meccaniche, rendendo questi biocompositi adatti a una vasta gamma di applicazioni. In uno studio specifico, sono stati esaminati compositi PLA rinforzati con fibre corte di lino in percentuali comprese tra il 10% e il 40% in peso, prodotti mediante estrusione. I risultati hanno evidenziato un incremento della resistenza a trazione e della rigidità all'aumentare del contenuto di fibra, con prestazioni ottimali osservate al 20% in peso. Tale miglioramento è stato attribuito all'efficace trasferimento di carico tra la matrice e le fibre, nonostante l'assenza di trattamenti superficiali volti a migliorare l'adesione interfacciale. L'integrazione di fibre di lino all'interno di matrici in PLA mediante processi di stampa 3D è stata oggetto di numerose indagini sperimentali, volte a valutarne l'efficacia nel migliorare le proprietà meccaniche, in particolare la resistenza a trazione e a flessione. Alcuni studi hanno esaminato l'influenza di parametri di processo quali la temperatura di estrusione, la quantità e la configurazione delle fibre introdotte, la percentuale di riempimento e l'eventuale applicazione di trattamenti chimici superficiali alle fibre stesse. È emerso che, se da un lato l'applicazione di trattamenti alcalini (come l'uso di NaOH) non produce effetti significativi sulle prestazioni meccaniche, dall'altro la densità di infill riveste un ruolo determinante nell'influenzare la resistenza strutturale del composito. In alcuni casi, sono stati raggiunti valori massimi di resistenza a trazione e a flessione pari rispettivamente a 50 MPa e 73 MPa. Un ulteriore approccio ha riguardato la produzione di filamenti compositi ad alte prestazioni ottenuti attraverso la pre-impregnazione di filati di lino sbiancati all'interno della matrice polimerica PLA,

utilizzando tecniche sia a base solvente (solution-based) sia in emulsione acquosa. I risultati hanno evidenziato che la pre-impregnazione tramite soluzione organica consente una migliore bagnabilità e distribuzione delle fibre nella matrice, portando a un incremento significativo della resistenza a trazione, fino a valori dell'ordine di 356 MPa. Complessivamente, questi risultati confermano che l'uso di fibre naturali come rinforzo nel PLA rappresenta una strategia efficace per il miglioramento delle proprietà meccaniche, purché siano attentamente controllati fattori critici quali il contenuto di fibra, l'allineamento delle fibre stesse e le condizioni ambientali di esercizio, che influiscono in modo sostanziale sulle prestazioni e sulla durabilità dei biocompositi ottenuti. Le proprietà meccaniche complessive di una struttura sandwich composita dipendono fortemente dalla configurazione del nucleo, in particolare dal pattern di riempimento, che definisce la distribuzione del materiale all'interno del core. Tale parametro influenza in modo significativo rigidità, resistenza e peso della struttura finale. Tra i diversi schemi di infill analizzati nel contesto della stampa 3D, si annoverano configurazioni a nido d'ape, a griglia e di tipo gyroidale. In particolare, il pattern gyroidale si distingue per l'elevata integrità strutturale, la buona risposta meccanica e la ridotta densità, caratteristiche che lo rendono particolarmente adatto a soluzioni leggere e resistenti. L'ottimizzazione della geometria gyroidale consente di modulare con precisione le prestazioni delle strutture sandwich in funzione delle specifiche esigenze applicative. Confronti sperimentali tra strutture gyroidali stampate in 3D e modelli solidi tradizionali hanno evidenziato che, pur presentando questi ultimi valori superiori di resistenza ultima e di snervamento, le strutture con infill gyroidale offrono vantaggi in termini di maggiore capacità di deformazione e migliore resistenza agli urti. Tali risultati ne confermano l'elevato potenziale per applicazioni in cui il contenimento del peso risulti un requisito prioritario, senza compromettere l'assorbimento di energia o la deformabilità globale. Le strutture sandwich con geometria gyroidale possono essere ulteriormente ottimizzate attraverso l'introduzione di gradienti di densità, studiati per modulare localmente la distribuzione del materiale in funzione delle sollecitazioni. In particolare, l'adozione di variazioni basate su funzioni trigonometriche si è dimostrata efficace nell'aumentare sia il modulo elastico sia la capacità di assorbimento di energia, rendendo queste configurazioni

particolarmente adatte ad applicazioni in cui è richiesta un'elevata dissipazione dell'energia d'urto. In questo contesto, il presente studio si propone di ottimizzare i parametri di processo per la fabbricazione di strutture sandwich mediante tecnologia FFF (Fused Filament Fabrication), utilizzando sia PLA che PLA rinforzato con fibre di lino. L'indagine sperimentale si concentra su due variabili principali: la temperatura di deposizione (200 °C e 220 °C), analizzata in relazione all'adesione interfaccia tra core e pelli esterne, e la densità di riempimento del nucleo (20% e 30%), valutata per il suo impatto sulle prestazioni meccaniche complessive. La caratterizzazione meccanica delle strutture prodotte sarà condotta attraverso prove di flessione a tre punti, al fine di determinare le condizioni di processo più favorevoli in termini di resistenza flessionale. La scelta di adottare un infill gyroidale, noto per l'elevato rapporto resistenza/peso, si inserisce in una logica progettuale orientata alla leggerezza e all'efficienza strutturale. Inoltre, l'analisi dell'adesione tra core e pelli, spesso trascurata in letteratura, rappresenta un elemento chiave per garantire l'integrità del sistema sandwich. L'utilizzo combinato di PLA e compositi PLA-lino consente infine di perseguire obiettivi di sostenibilità ambientale, con ricadute applicative potenziali in ambiti come la componentistica leggera per l'automotive, l'imballaggio eco-compatibile e la realizzazione di elementi architettonici a basso impatto ambientale. I risultati attesi offriranno un contributo utile all'ottimizzazione progettuale e produttiva di strutture sandwich ad alte prestazioni, stampate in 3D con materiali rinnovabili.

3.3.3.3 Materiali e metodi

3.3.3.3.1 Progettazione della struttura sandwich

Nel presente lavoro sono stati realizzati pannelli sandwich innovativi mediante stampa 3D, caratterizzati da un nucleo interno con geometria gyroidale, al fine di valutarne le prestazioni meccaniche tramite prove di flessione a tre punti. Le strutture sono state fabbricate variando la temperatura di estrusione, impostata su due livelli (200 °C e 220 °C), utilizzando polilattide (PLA), fornito da Filoalfa (Ciceri de Model Srl, Ozzero, Italia), e PLA rinforzato con fibre di lino (PLA-flax, tipo Starflax 3D), fornito da Nanovia (Louargat, Francia). I pattern del nucleo sono stati stampati con due differenti densità di riempimento: 20% e 30%. La densità di riempimento rappresenta la percentuale volumetrica di materiale depositato

all'interno del core, dove un valore pari a 0% corrisponde a una struttura completamente cava, mentre il 100% rappresenta una configurazione piena. I valori scelti, pari a 20% e 30%, sono stati selezionati sulla base di precedenti evidenze sperimentali, che ne hanno dimostrato l'efficacia nel garantire un equilibrio ottimale tra leggerezza strutturale e prestazioni meccaniche. Questa scelta risulta coerente con l'obiettivo dello studio, volto allo sviluppo di soluzioni leggere e sostenibili per potenziali applicazioni industriali. La produzione dei provini è stata condotta attraverso un approccio di tipo “design-driven manufacturing”, basato su modellazione parametrica. In particolare, il disegno iniziale è stato elaborato utilizzando Autodesk Inventor 2022, mentre la generazione e l'ottimizzazione della geometria gyroïdale sono state effettuate mediante il software nTop (in precedenza noto come nTopology), che consente un controllo preciso delle strutture reticolari. Questo ha permesso di definire spessori di parete coerenti con le densità di riempimento selezionate (20% o 30%). I campioni sono stati progettati secondo le dimensioni previste dalla norma ASTM D790 e successivamente pesati, con i risultati riportati nella Tabella seguente.

Materiale	T [°C]	Infill [%]	Dimensioni [mm × mm × mm]	Peso [g]
PLA	200	20	150 × 40 × 12	31,5 ± 0,06
PLA	200	30	150 × 40 × 12	37,5 ± 0,14
PLA	220	20	150 × 40 × 12	30,1 ± 0,04
PLA	220	30	150 × 40 × 12	35,9 ± 0,10
PLA-flax	200	20	150 × 40 × 12	28,1 ± 0,04
PLA-flax	200	30	150 × 40 × 12	35,5 ± 0,02
PLA-flax	220	20	150 × 40 × 12	28,4 ± 0,04
PLA-flax	220	30	150 × 40 × 12	35,9 ± 0,01

Tabella 15: Proprietà dei campioni

Successivamente, il file CAD è stato esportato in formato STL, una rappresentazione del solido basata su superfici triangolari. Ogni triangolo all'interno del file STL è descritto tramite le coordinate X, Y e Z dei propri vertici, accompagnate da un vettore normale alla superficie. Il file STL è stato poi importato

all'interno di un software di slicing, il quale ha il compito di convertire il modello digitale tridimensionale in istruzioni operative per la stampante 3D, rendendo possibile la costruzione fisica dell'oggetto mediante deposizione strato per strato. Il processo di slicing consiste nella suddivisione del modello in sezioni planari e nella definizione dei percorsi di stampa, con possibilità di personalizzazione dei parametri principali quali la densità di riempimento e la velocità di stampa. In questo studio è stato impiegato il software Bambu Studio, che consente la modifica della configurazione cellulare e dei parametri di infill. La struttura TPMS di tipo gyroidale rappresenta un modello geometrico di particolare interesse nel contesto della stampa 3D e dell'ingegneria, grazie alle sue proprietà meccaniche e strutturali distintive. Si tratta di una superficie minimamente triperiodica (TPMS, Triply Periodic Minimal Surface) definita matematicamente, caratterizzata da una configurazione continua, priva di intersezioni e ripetitiva nello spazio tridimensionale. Tale superficie presenta curvatura media nulla, condizione che determina una distribuzione uniforme degli sforzi di trazione in ogni punto. Questa configurazione consente un'ottimizzazione del rapporto resistenza/peso, attraverso un uso efficiente del materiale. Le strutture che impiegano geometrie gyroidali beneficiano quindi di una riduzione della massa senza comprometterne la robustezza, grazie all'efficienza della distribuzione interna del materiale. Come altre superfici minimali triperiodiche, anche il gyroid può essere descritto approssimativamente tramite un'espressione trigonometrica semplice.

$$\sin(x) \cdot \cos(y) + \sin(y) \cdot \cos(z) + \sin(z) \cdot \cos(x) = 0^5$$

La densità di riempimento (20% o 30%) determina lo spessore delle pareti all'interno della struttura gyroidale quando questa viene generata come modello CAD solido. In fase di slicing, il software è stato configurato per applicare un riempimento al 100% alle pareti, ovvero le regioni interne delle superfici gyroidali sono state completamente riempite di materiale. Questa scelta ha garantito che la geometria stampata replicasse fedelmente il modello progettato, poiché lo spessore delle pareti risultava direttamente controllato dalla densità di infill impostata in fase di modellazione (20% o 30%). L'impiego del riempimento completo per le pareti

⁵ Equazione giroide

ha inoltre consentito di preservare l'integrità strutturale e le proprietà meccaniche dei componenti finali, riflettendo in modo accurato i parametri progettuali definiti. Una volta completato il processo di slicing, il file è stato inviato alla stampante 3D per la produzione mediante tecnologia additiva. I provini sono stati posizionati in modo che la dimensione più piccola fosse allineata lungo l'asse Z, con strati orizzontali orientati a 90°. Non sono stati eseguiti trattamenti post-processo di alcun tipo, né chimici, né termici, né di finitura.

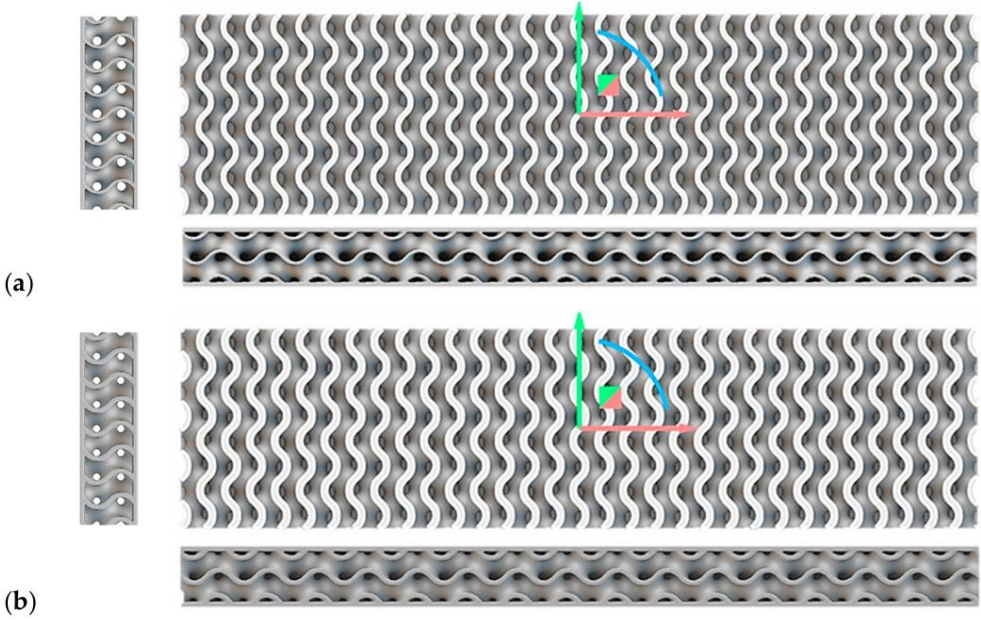


Figura 74: Struttura gyroidale TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) con (a) densità di riempimento del 20% e (b) densità di riempimento del 30%

3.3.3.3.2 Produzione additiva dei provini

Per la realizzazione dei provini, è stata adottata la tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM), utilizzando due stampanti 3D commerciali: la Bambu Lab X1-Carbon (Bambu Lab, Shenzhen, Cina) per i campioni in PLA e la Creality K1 Max (Creality, Shenzhen, Cina) per quelli in PLA rinforzato con fibre di lino (PLA–flax). Entrambi i sistemi di stampa sono stati impiegati nelle configurazioni di fabbrica, senza modifiche agli estrusori o agli ugelli. I parametri di stampa sono stati definiti in modo da garantire la piena ripetibilità del processo, come riportato nella Tabella seguente.

Parametro	PLA	PLA–flax	Unità

Stampante 3D	Bambu Lab X1-Carbon	Crealty K1 Max	–
Temperatura di estrusione	200 / 220	200 / 220	°C
Temperatura del piano	60	60	°C
Altezza del layer	0,2	0,2	mm
Larghezza linea predefinita	0,42	0,42	mm
Larghezza linea primo layer	0,5	0,5	mm
Larghezza linea parete interna	0,45	0,45	mm
Velocità primo layer	50	50	mm/s
Velocità riempimento primo layer	105	105	mm/s
Velocità parete esterna/interna	200 / 300	200 / 300	mm/s
Velocità di riempimento	270	270	mm/s
Risoluzione	0,012	0,012	mm
Pattern di riempimento	Gyroid (pareti 100%)	Gyroid (pareti 100%)	–

Tabella 16: Parametri di stampa FDM

Le stampanti impiegate erano dotate di un estrusore di tipo Titan e di un ugello Volcano, con una temperatura massima di estrusione pari a 240 °C. Nell’ambito di questo studio, sono state prese in esame due temperature operative: 200 °C e 220 °C. La temperatura del piano di stampa è stata mantenuta costante a 60 °C, al fine di assicurare condizioni ottimali durante il processo. La scelta delle temperature di deposizione si è basata sulle indicazioni fornite dai produttori dei materiali: il PLA

presenta un range operativo compreso tra 170 °C e 210 °C, mentre per il PLA–flax tale intervallo è compreso tra 200 °C e 230 °C. Per garantire la compatibilità tra i due materiali e favorire un’adeguata adesione interlaminare durante la stampa, è stata selezionata come temperatura minima 200 °C (valore limite inferiore per il PLA–flax), mentre la temperatura massima, 220 °C, è stata scelta come valore intermedio tra i limiti superiori dei due materiali. La selezione di queste temperature è stata inoltre supportata da un’analisi termogravimetrica (TGA), che ha confermato la stabilità termica dei materiali fino a 300 °C, convalidando così l’idoneità dei valori adottati per l’estrusione.

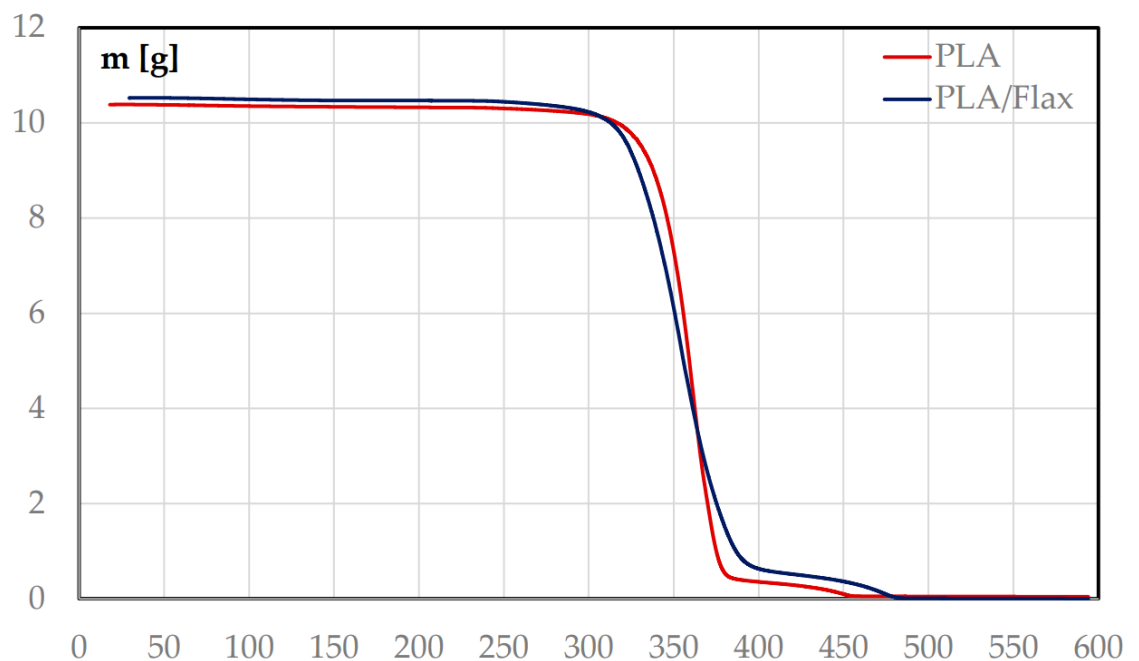


Grafico 13: Analisi termogravimetrica (TGA) del PLA e del PLA–flax

Il polilattide (PLA) è un polimero biodegradabile ampiamente utilizzato, derivato da fonti rinnovabili come l’amido di mais e la canna da zucchero. La sua popolarità nella stampa 3D è legata alla facilità di lavorazione e a un buon bilanciamento delle proprietà meccaniche, con valori tipici di resistenza a trazione pari a 53 MPa e modulo elastico di circa 3,6 GPa. Il materiale presenta una densità di 1,24 g/cm³ e una temperatura di transizione vetrosa compresa tra 55 °C e 60 °C. Inoltre, è conforme alle normative FDA e RoHS, rendendolo adatto ad applicazioni non critiche, quali prototipi, modelli educativi o elementi decorativi. Il PLA rinforzato con fibre di lino combina le caratteristiche del polimero base con proprietà

meccaniche e ambientali migliorate. Questo biocomposito presenta un modulo elastico a trazione pari a 3,4 GPa e una finitura superficiale simile al legno una volta stampato. L'integrazione delle fibre naturali contribuisce ad aumentare la rigidità e la resistenza agli urti del materiale, mantenendo la compatibilità con le comuni stampanti 3D. Tali caratteristiche lo rendono particolarmente adatto alla produzione di componenti rigidi, leggeri e orientati al design. Inoltre, l'utilizzo delle fibre di lino contribuisce al miglioramento del profilo ambientale del materiale composito. Le strutture sandwich con nucleo gyroidale TPMS realizzate mediante stampa 3D, caratterizzate da una densità di riempimento pari al 20% e da una temperatura di deposizione di 200 °C, rappresentano un esempio dell'approccio progettuale adottato in questo studio. Tali strutture sono state prodotte utilizzando due materiali differenti: PLA puro e PLA rinforzato con fibre di lino, al fine di evidenziare la versatilità della tecnologia impiegata e il potenziale migliorativo derivante dall'introduzione di un rinforzo fibroso naturale. L'osservazione dei campioni stampati ha messo in evidenza un'elevata qualità superficiale e una buona precisione dimensionale, risultati in linea con quanto documentato in letteratura in merito all'ottimizzazione dei parametri di processo per materiali polimerici e compositi.

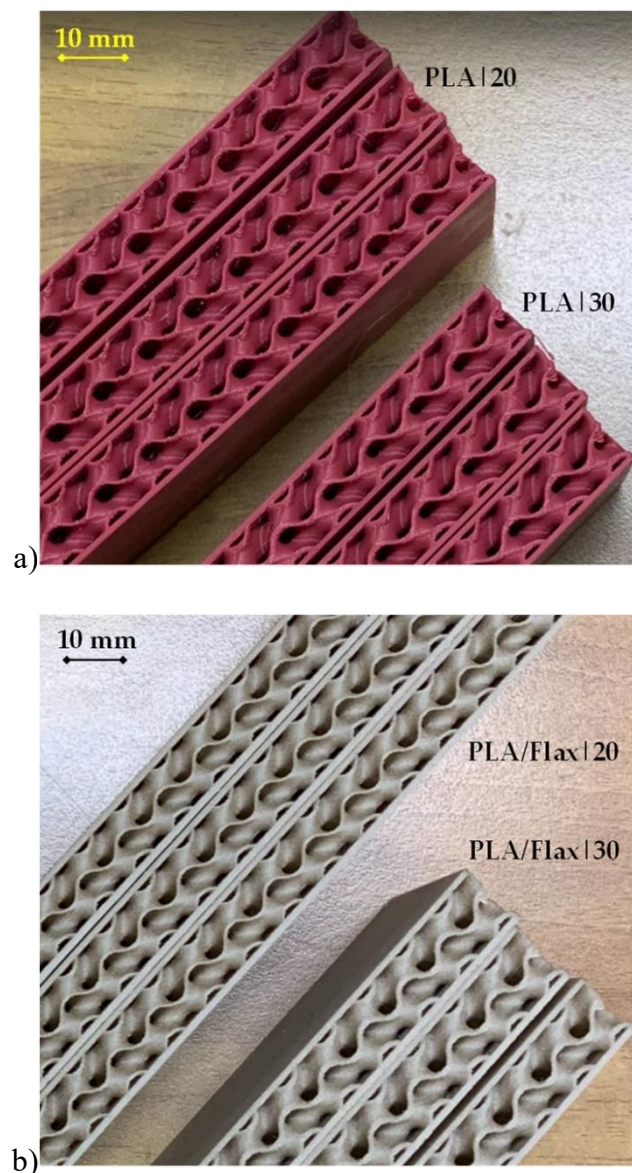


Figura 75: Strutture sandwich gyroidali TPMS stampate in 3D mediante deposizione a 220 °C e con densità di riempimento pari al 20%: (a) realizzate in PLA; (b) realizzate in PLA rinforzato con fibre di lino.

3.3.3.3 Prove di flessione a tre punti

Le prove di flessione sono state condotte secondo lo standard ASTM D790, con l'obiettivo di ottimizzare la resistenza flessionale tenendo conto di configurazioni realistiche in termini di densità di riempimento e geometrie del core. Questo approccio standardizzato consente un confronto diretto con studi presenti in letteratura e scenari applicativi reali. La caratterizzazione meccanica dei provini è stata eseguita mediante una macchina di prova ZwickRoell (Zwick Roell, Ulm, Germania), equipaggiata con una cella di carico da 2,5 kN, operando in conformità con la norma ASTM D790. Per ciascuna delle quattro combinazioni di parametri

considerati (due densità di riempimento: 20% e 30%; due temperature di estrusione: 200 °C e 220 °C), sono stati prodotti tre provini, per un totale di dodici pannelli sandwich con struttura gyroidale realizzati tramite FFF. Le prove di flessione sono state condotte a una velocità di deformazione pari a 0,1 mm/min. Inoltre, per l'analisi post-prova e la caratterizzazione dei meccanismi di danneggiamento, è stato utilizzato un microscopio digitale Hirox KH 8700 (Hirox, Tokyo, Giappone).

3.3.3.4 Analisi dei risultati

Per avviare l'analisi delle prestazioni meccaniche delle strutture sandwich sottoposte a sollecitazione flessionale, è stato preso come riferimento un campione identificato dalla sigla P-220-20. La risposta di questo campione a flessione viene assunta come configurazione di base per il confronto con le altre varianti sperimentali analizzate nello studio. L'andamento sperimentale della resistenza a flessione (rappresentata sull'asse primario) e del modulo flessionale (rappresentato sull'asse secondario) in funzione della deformazione è illustrato nella figura seguente. L'analisi del comportamento meccanico consente di individuare tre regioni distinte nella risposta del materiale.

Fase I – Ai bassi livelli di deformazione si osserva una chiara relazione lineare tra la deformazione applicata e la tensione risultante. Tale comportamento è indicativo di una risposta elastica del sistema sandwich, in cui il materiale è in grado di recuperare integralmente la sua forma originaria una volta rimosso il carico. In questa fase il modulo elastico, che rappresenta la rigidezza della struttura, si mantiene pressoché costante e raggiunge un valore massimo pari a 1023 MPa. Sulla base di tali osservazioni, questa fase iniziale può essere identificata come un regime elastico lineare.

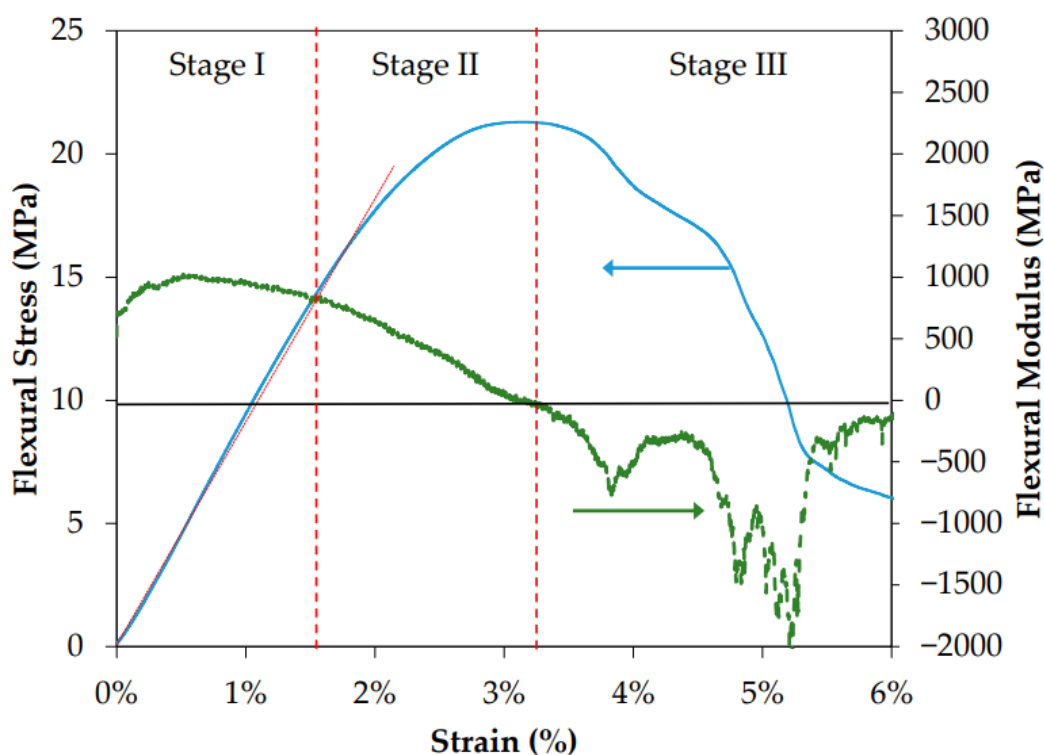


Figura 76: Andamento della resistenza a flessione (asse primario, curva blu) e del modulo flessionale (asse secondario, curva verde) in funzione della deformazione, per un sandwich di riferimento P-220-20.

Fase II – Inizio della non linearità e frattura della pelle inferiore: Man mano che la deformazione aumenta, si osserva una deviazione evidente rispetto al comportamento lineare precedentemente descritto. In corrispondenza di una deformazione pari a circa 1,5%, ha inizio la Fase II, caratterizzata da un progressivo scostamento dalla linearità iniziale. In questa fase, il tasso di incremento dello sforzo diminuisce sensibilmente, mentre il modulo flessionale — che rappresenta la pendenza tangente alla curva sforzo-deformazione — mostra una riduzione continua. Dal punto di vista strutturale, la risposta della struttura sandwich evidenzia un aumento marcato della flessione complessiva, che comporta un'intensificazione delle sollecitazioni interne e una localizzazione delle deformazioni, in particolare nelle interfacce tra il core e le pelli. L'evoluzione di questi fenomeni conduce infine alla frattura per trazione della pelle inferiore, che rappresenta il punto di massimo carico sopportabile dalla struttura (punto 1 nella Figura 77). In corrispondenza di questo evento critico, il modulo flessionale si azzerava, indicando una perdita significativa dell'integrità strutturale.

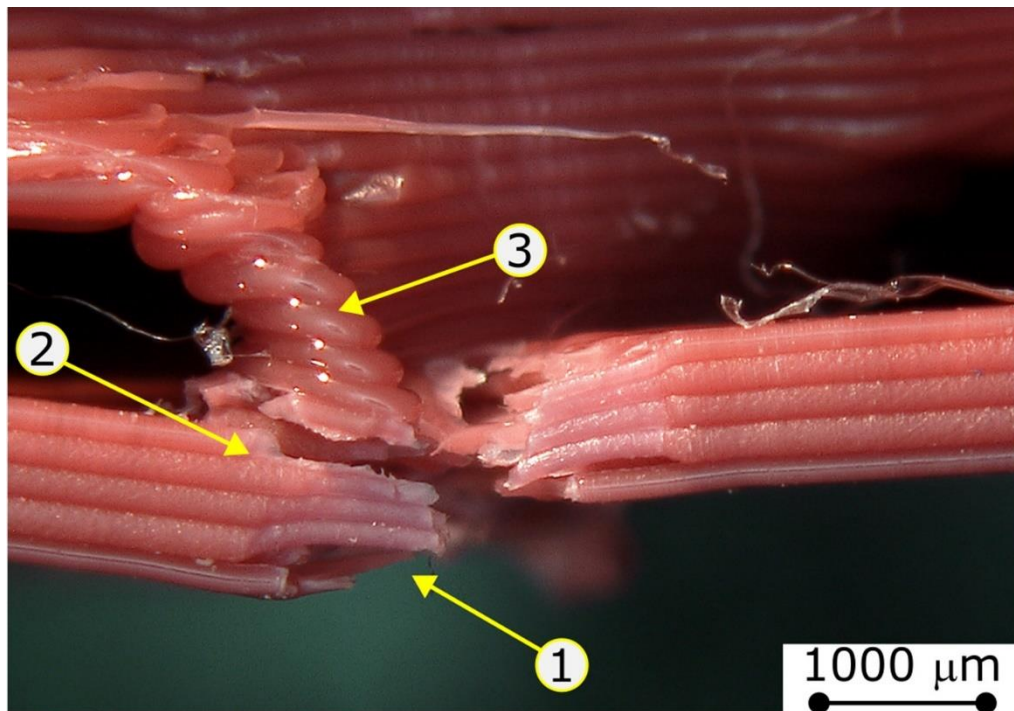


Figura 77: Immagine ottica di un campione P-220-20 al termine della prova di flessione a tre punti.

Fase III – Evoluzione finale del danneggiamento e ruolo del core: durante la Fase III, successiva all’innescò della frattura nella pelle inferiore, il carico applicato mostra un progressivo e continuo decadimento. Questa tendenza discendente si correla direttamente all’andamento del modulo flessionale, che si mantiene costantemente al di sotto dello zero per tutta la durata della fase. Il comportamento osservato riflette una progressione del danno di tipo graduale e non improvviso, indicando un cedimento strutturale progressivo, piuttosto che di natura catastrofica. Le fluttuazioni registrate nel carico applicato, che riproducono fedelmente le variazioni locali del modulo (con picchi e depressioni), costituiscono un indicatore chiaro della presenza di stadi successivi di evoluzione del danno, che contribuiscono in modo sinergico alla progressiva perdita di prestazione della struttura sandwich. Con il protrarsi della deformazione, la frattura nella pelle inferiore (punto 1 in figura) tende ad estendersi e ad allargarsi lungo i piani della pelle, propagandosi dall’esterno verso l’asse neutro nella direzione del carico. Contemporaneamente, si osservano fenomeni di delaminazione in prossimità della frattura, localizzati all’interfaccia tra la pelle e il core gyroidale (punto 2), fenomeno

attribuibile alla progressiva perdita di adesione tra la geometria complessa del core e la pelle esterna. Tuttavia, un aspetto significativo riscontrato durante le osservazioni è l'assenza di fenomeni di instabilità locale (buckling) nelle pareti del core. Questo risultato (punto 3) conferma la capacità intrinseca della struttura gyroidale di mantenere la propria integrità e di funzionare efficacemente come elemento di trasferimento del carico, favorendo una distribuzione omogenea degli sforzi tra le pelli superiore e inferiore.

3.3.3.4.1 Analisi comparativa tra configurazioni – andamento tensione-deformazione

Per valutare in maniera approfondita l'influenza di diversi parametri — in particolare il tipo di materiale (PLA o composito PLA-lino) e le variazioni di densità di riempimento del core — sul comportamento meccanico delle strutture sandwich, è stata condotta un'analisi comparativa mediante le curve tensione-deformazione ottenute per ciascuna configurazione. I risultati sono riassunti nelle figure seguenti, che fornisce una panoramica dettagliata del comportamento meccanico osservato nei test di riferimento su tutti i lotti realizzati. Per una lettura più mirata, sono stati separati i dati relativi i provini in PLA (denominati lotti “P”), mettendo in evidenza le caratteristiche distintive e le risposte meccaniche ottenute al variare dei parametri, e quelli relativi i dati delle strutture composite PLA-flax (lotti “PF”), consentendo un confronto diretto con i campioni in materiale monolitico e offrendo una valutazione complessiva delle proprietà meccaniche espresse da ciascun sistema strutturale.

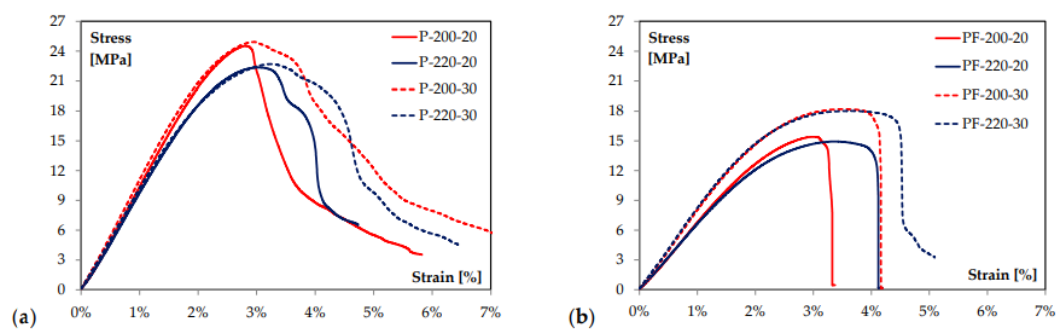


Figura 78: Andamento tipico carico-spostamento al variare della densità di riempimento e della temperatura di estrusione per: (a) sandwich in PLA (lotti P); (b) sandwich in PLA-flax (lotti PF).

Nel caso dei sandwich in PLA (Figura 78a), si osserva che la densità di riempimento non influisce in modo significativo sulla resistenza a flessione, che rimane pressoché invariata al variare del parametro. Tuttavia, la densità ha un impatto rilevante sulle modalità di danneggiamento, come evidenziato dalla maggiore deformazione a rottura registrata nei lotti con riempimento più elevato (P-xx-30). Inoltre, l'impiego di una temperatura di estrusione più alta (lotti P-220-xx) comporta un leggero calo nella resistenza a flessione, indipendentemente dalla densità adottata. Si rileva anche uno spostamento delle curve verso livelli di deformazione più elevati, suggerendo che una temperatura più alta posticipi l'insorgere della frattura e la propagazione del danno. Queste osservazioni indicano che l'interazione tra densità di riempimento e temperatura di estrusione riveste un ruolo chiave sia nel determinare la resistenza meccanica che nel controllare il livello di deformazione a cui si manifesta il cedimento. Nel caso dei sandwich compositi PLA-flax (Figura 78b), si riscontrano effetti analoghi a quelli osservati nei campioni in PLA, ma con un'intensità maggiore, evidenziando una sensibilità più marcata ai parametri di processo. In particolare, i valori massimi di resistenza a flessione risultano inferiori rispetto al PLA puro, con valori compresi tra 15 e 19 MPa per il composito e 23–25 MPa per il PLA. Inoltre, il comportamento post-picco (fase III) è sostanzialmente diverso: mentre nel PLA si osserva un'evoluzione graduale del danno, nel composito PLA-flax il decadimento delle prestazioni avviene in modo repentino e brusco, segnalando una rottura catastrofica dell'intera struttura sandwich. Questa differenza è legata alle differenti modalità di cedimento osservate. Come precedentemente discusso, nei sandwich in PLA il danneggiamento avviene attraverso la propagazione progressiva di una frattura per trazione nella pelle inferiore, spesso accompagnata da delaminazione tra core e pelle nella zona soggetta a trazione. Al contrario, nei sandwich in PLA-flax si verifica un cedimento improvviso e localizzato, caratterizzato da una frattura singola e critica che attraversa la struttura. Il meccanismo di rottura osservato nei sandwich compositi evidenzia un difetto strutturale critico: la rottura simultanea della pelle inferiore (punto 1 in Figura 79) avviene senza che si verifichi alcun distacco evidente tra pelle e core (punto 2), a differenza di quanto riscontrato nei campioni in PLA.

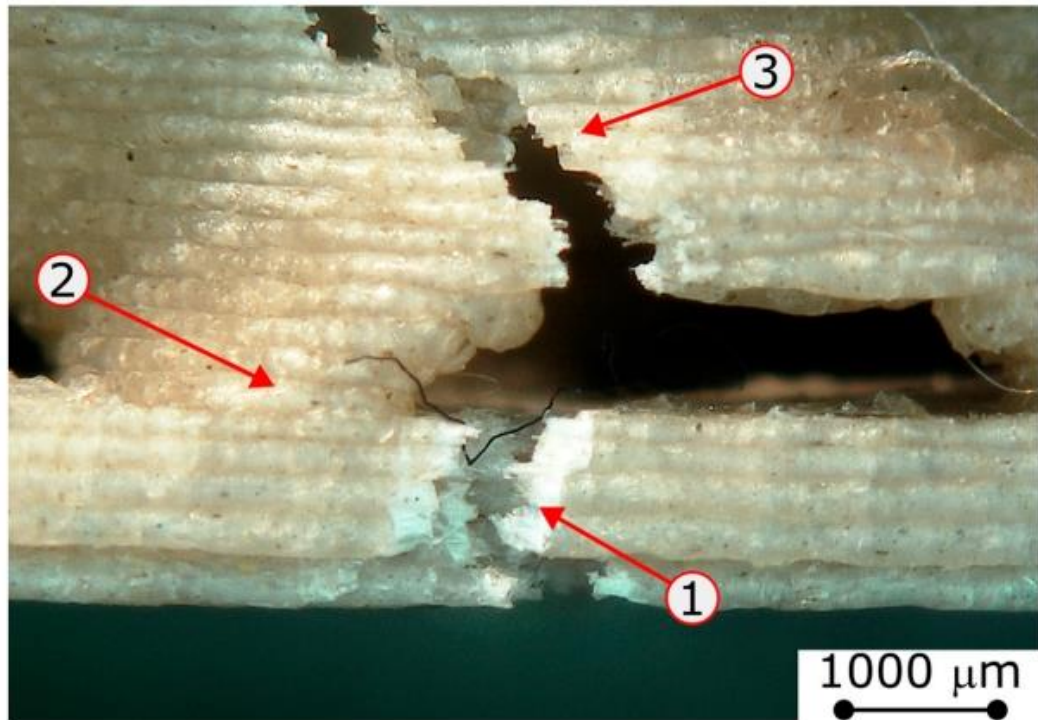


Figura 79: Micrografia ottica di un sandwich composito PF-200-30 al termine della prova di flessione a tre punti.

Questa frattura si manifesta in corrispondenza della zona a maggiore concentrazione di sforzo, dove si innesca il cedimento strutturale più critico. A differenza di quanto comunemente atteso nei sandwich compositi, il meccanismo di cedimento principale non consiste nel distacco tra le pelli e il core, bensì in un collasso localizzato della struttura interna del core gyroidale (punto 3 in Figura 79). Questo collasso è innescato dalla formazione di una frattura rilevante in prossimità della cricca già presente nella pelle inferiore, la cui propagazione viene amplificata dalla forte concentrazione di sforzo presente in quel punto. Tale condizione agisce come catalizzatore, promuovendo una rapida avanzata del fronte di frattura attraverso le pareti del core lungo la direzione del carico applicato. Il pattern di frattura osservato in Figura 79 mette in evidenza una buona adesione interlaminare, riconducibile presumibilmente all'ottimizzazione dei parametri di stampa, come la temperatura di estrusione, la velocità di stampa e l'altezza del layer. Questo comportamento è coerente con quanto riportato in letteratura, dove viene sottolineato il ruolo cruciale della selezione dei parametri di processo nel garantire una adesione interstrato efficace e il conseguente miglioramento delle prestazioni meccaniche complessive del componente stampato.

Questa osservazione evidenzia in modo inequivocabile una limitazione intrinseca del materiale composito PLA–flax nell’ambito della stampa 3D, che richiede una gestione adeguata in fase progettuale e di processo. In particolare, il comportamento di cedimento osservato suggerisce che il materiale non è in grado di garantire un’elevata adesione interstrato tra i filamenti depositati successivamente durante la stampa. Tale debolezza strutturale, legata alla scarsa coesione tra layer adiacenti, compromette l’integrità complessiva della struttura sandwich, rendendola suscettibile a rotture premature e catastrofiche sotto carico. È opportuno sottolineare che l’impiego di una temperatura di estrusione più elevata non comporta fenomeni di degradazione del materiale, né produce benefici evidenti in termini di adesione o miglioramento del giunto. Infatti, i risultati sperimentali mostrano che la resistenza a flessione rimane sostanzialmente invariata tra i lotti PF-200 e PF-220, suggerendo che l’incremento della temperatura non apporta miglioramenti significativi alle prestazioni meccaniche del composito. Per analizzare con maggiore precisione e dettaglio le variazioni, anche sottili, delle prestazioni meccaniche espresse dalle strutture sandwich stampate in 3D in funzione delle condizioni di fabbricazione, è stata realizzata un’analisi comparativa mediante la Figura 80. Tale figura mostra, in forma aggregata, i valori di resistenza a flessione (a) e la deformazione alla massima tensione (b), al variare della densità di riempimento e della temperatura di estrusione, sia per i campioni monolitici in PLA (lotti P) sia per quelli compositi PLA–flax (lotti PF).

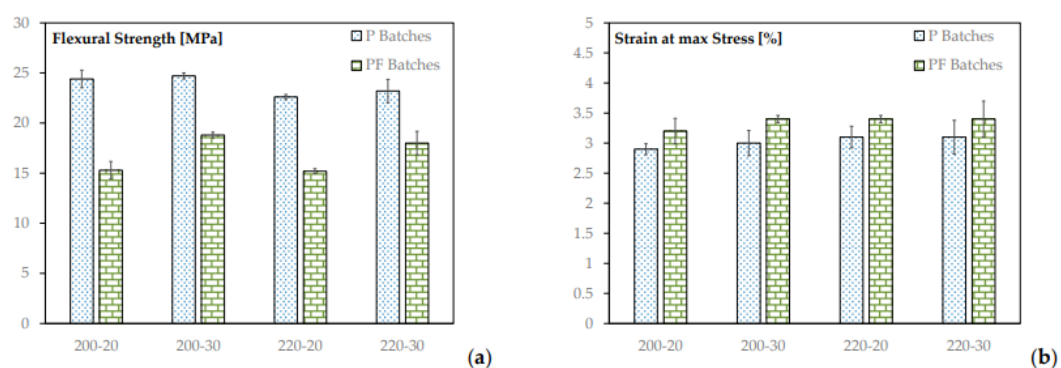


Figura 80: Confronto tra: (a) la resistenza a flessione e (b) la deformazione alla massima tensione al variare della densità di riempimento e della temperatura di estrusione per i sandwich monolitici (lotti P) e compositi (lotti PF).

La resistenza a flessione dei sandwich compositi contenenti fibre di lino risulta costantemente inferiore rispetto a quella dei corrispondenti campioni monolitici in polilattide (PLA) puro. Tale differenza diventa particolarmente marcata alle basse densità di riempimento, con una riduzione della resistenza pari al 35% per un'infill del 20% e al 22% per un'infill del 30%. Parallelamente, nei sandwich compositi si osserva un aumento della deformazione alla massima tensione di circa 0,3% rispetto alle strutture realizzate in PLA non rinforzato. Questo comportamento è principalmente attribuibile alla migliore adesione interlaminare ottenuta con il filamento in PLA puro durante il processo di stampa additiva. L'introduzione delle fibre di lino all'interno del composito comporta inevitabilmente una riduzione della frazione volumetrica della matrice polimerica, che rappresenta il materiale legante responsabile dell'adesione tra i layer. La conseguente diminuzione di materiale polimerico disponibile per l'adesione tra strati adiacenti compromette l'efficacia dell'interfaccia tra i filamenti depositati. Inoltre, la presenza del rinforzo fibroso influisce anche sulla trasmissione degli sforzi nelle zone critiche di giunzione tra le pelli esterne e il nucleo, introducendo discontinuità meccaniche. Questa interferenza nei meccanismi di trasferimento del carico tra le diverse porzioni della struttura sandwich è alla base dei valori inferiori di resistenza meccanica osservati e della maggiore deformabilità registrata nei campioni realizzati con il composito ecocompatibile PLA-flax. In confronto a studi analoghi presenti in letteratura, le prestazioni meccaniche inferiori osservate in questa analisi possono essere ricondotte a diversi fattori. Innanzitutto, le fibre di lino impiegate non sono state sottoposte a trattamenti chimici né a tecniche di pre-impregnazione, che risultano particolarmente efficaci nel migliorare l'adesione fibra-matrice. In secondo luogo, il processo di stampa adottato — ovvero la manifattura additiva tramite FFF (Fused Filament Fabrication) — presenta limitazioni intrinseche nella capacità di garantire una buona adesione interlaminare, risultando meno efficace rispetto a metodi come lo stampaggio a iniezione o l'estrusione di filamento. Infine, le densità di riempimento adottate (20% e 30%) sono state scelte in modo intenzionale per ridurre il peso complessivo, a scapito delle massime prestazioni meccaniche ottenibili.

Tali considerazioni mettono in luce le sfide associate all'impiego di fibre naturali nei processi di stampa 3D, e suggeriscono linee di miglioramento potenzialmente efficaci: ad esempio, l'utilizzo di trattamenti chimici superficiali o di tecniche di pre-impregnazione potrebbe contribuire ad aumentare la resistenza del composito PLA-flax. Allo stesso modo, una maggiore ottimizzazione dei parametri di processo o l'impiego di tecniche alternative di fabbricazione potrebbe favorire una migliore adesione interstrato e una maggiore integrità strutturale. Per analizzare l'influenza della configurazione cellulare e dei parametri di stampa sulla resistenza a flessione, è stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) utilizzando il software MINITAB 22.1.0. Lo studio ha considerato tre fattori, ciascuno con due livelli:

- Materiale: PLA vs PLA-flax
- Temperatura di estrusione: 200 °C e 220 °C
- Densità di riempimento: 20% e 30%

Prima di eseguire l'ANOVA, sono state verificate le ipotesi statistiche fondamentali:

- (i) normalità dei residui;
- (ii) omoscedasticità (varianza costante);
- (iii) indipendenza delle osservazioni.

Come mostrato in Figura 81, i residui risultano distribuiti in modo simmetrico attorno allo zero, a conferma della normalità. Inoltre, la dispersione uniforme rispetto ai valori previsti indica una varianza costante, mentre l'assenza di pattern evidenzia l'indipendenza tra i dati. I risultati ottenuti dall'analisi ANOVA sono riassunti in Tabella 17: Analisi della varianza sulla resistenza a flessione. Essa include i gradi di libertà (DF), le somme dei quadrati (SS), i valori quadratici medi (MS), le statistiche F e i corrispondenti p-value. Questi indicatori permettono di stimare l'effetto statistico di ciascun fattore e delle loro interazioni sulla variabilità del carico massimo registrato. Un p-value $\leq 0,05$ è considerato indicativo di un effetto significativo, confermando la rilevanza statistica dei fattori esaminati.

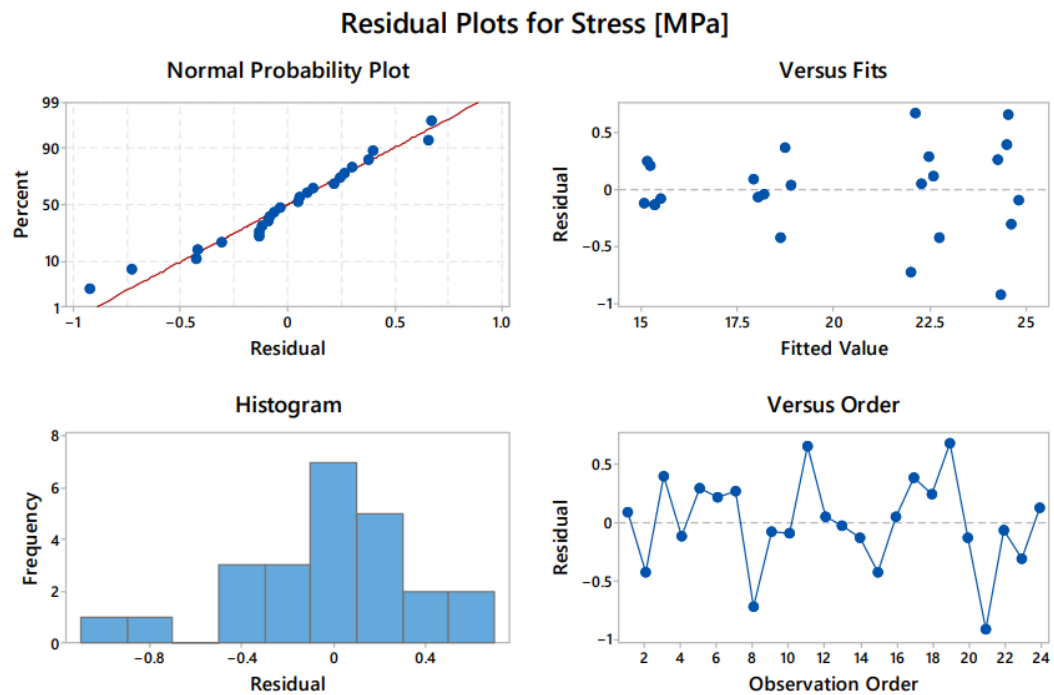


Figura 81: Grafici dei residui relativi alla resistenza a flessione.

Fonte	Gradi di libertà (DF)	Somma dei quadrati corretta (Adj SS)	Quadrato medio corretto (Adj MS)	Valore F (F-Value)	Valore p (p-Value)
Modello	9	307,420	34,158	141,19	0,000
Blocchi	2	0,318	0,159	0,66	0,534
Termini lineari	3	290,816	96,939	400,70	0,000
Materiale	1	262,497	262,497	1085,04	0,000
Temperatura	1	9,950	9,950	41,13	0,000
Infill	1	18,369	18,369	75,93	0,000
Interazioni a due vie	3	16,086	5,362	22,16	0,000
Materiale*Temperatura	1	4,386	4,386	18,13	0,001
Materiale*Infill	1	11,651	11,651	48,16	0,000
Temperatura*Infill	1	0,050	0,050	0,21	0,656
Interazione a tre vie	1	0,199	0,199	0,82	0,380

Materiale*Temperatura*Infill	1	0,199	0,199	0,82	0,380
Errore	14	3,387	0,242		
Totale	23	310,806			
Parametro		Valore			
Errore standard (S)		0,491857			
Coefficiente di determinazione (R^2)		98,91%			
R^2 corretto (adjusted R^2)		98,21%			
R^2 predetto (predicted R^2)		96,80%			

Tabella 17: Analisi della varianza sulla resistenza a flessione.

I risultati dell'analisi ANOVA evidenziano l'impatto significativo dei fattori principali — materiale, temperatura di estrusione e densità di riempimento — sulla variabile di risposta, ovvero la resistenza a flessione. Tra questi, il materiale risulta il fattore più influente ($F = 1085,04$, $p < 0,001$), seguito dalla densità di infill ($F = 75,97$, $p < 0,001$) e infine dalla temperatura ($F = 41,13$, $p < 0,001$). Tra le interazioni a due vie, sia materiale*temperatura ($F = 16,13$, $p < 0,001$) sia materiale*infill ($F = 48,16$, $p < 0,001$) risultano statisticamente significative, indicando che le combinazioni di questi fattori influenzano in modo rilevante il comportamento meccanico del sistema. Al contrario, l'interazione temperatura*infill ($F = 0,21$, $p = 0,656$) non è significativa, suggerendo che questi due parametri, se considerati congiuntamente, non determinano effetti rilevanti sulla variabile analizzata. Analogamente, l'interazione a tre vie Materiale*Temperatura*Infill ($F = 0,82$, $p = 0,380$) non presenta un contributo significativo alla variabilità complessiva. Nel complesso, il modello statistico risulta estremamente robusto: esso spiega il 98,91% della variabilità osservata nella risposta ($R^2 = 98,91\%$), con un R^2 corretto pari a 98,21% e un R^2 predetto pari a 96,80%. Questi valori confermano sia l'elevata capacità esplicativa del modello sia la sua affidabilità predittiva. Alla luce di tali risultati, si raccomanda di porre priorità all'ottimizzazione dei fattori principali (soprattutto il materiale) e alle interazioni a due vie significative, in quanto sono le componenti che determinano le variazioni più rilevanti nella risposta. L'effetto delle interazioni è ulteriormente visualizzato nella Figura 82.

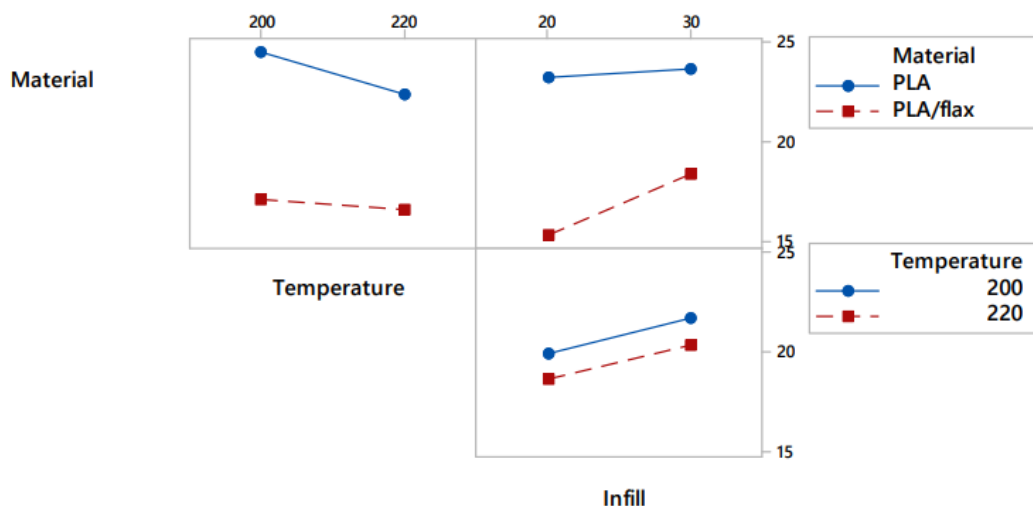


Figura 82: Effetti di interazione tra i fattori (materiale, temperatura, infill) rappresentati graficamente.

I grafici di interazione forniscono indicazioni fondamentali su come i fattori materiale, temperatura ed infill influenzino, in combinazione, la variabile di risposta. L'interazione materiale*temperatura evidenzia una netta differenza tra PLA e PLA-flax: mentre il PLA mostra una diminuzione della resistenza all'aumentare della temperatura di estrusione, il composito PLA-flax mantiene una prestazione relativamente stabile all'interno dell'intervallo di temperature analizzato. Ciò suggerisce una maggiore sensibilità del PLA alle variazioni termiche, mentre il PLA-flax presenta una maggiore robustezza, risultando meno influenzato da questo parametro. Anche l'interazione materiale*infill conferma comportamenti distinti tra i due materiali. Il PLA evidenzia una riduzione significativa della resistenza con l'aumento della densità di riempimento, indicando una maggiore dipendenza delle sue prestazioni dalla configurazione geometrica interna. Al contrario, il PLA-flax risulta meno sensibile alle variazioni di infill, mostrando un comportamento più coerente e stabile. Questa caratteristica rende il composito potenzialmente più adatto ad applicazioni in cui la densità di riempimento non può essere mantenuta costante, oppure è soggetta a variazioni progettuali. Diversamente, l'interazione temperatura*infill risulta trascurabile, come indicato dal quasi perfetto parallelismo delle curve nel grafico di interazione corrispondente. Ciò implica che, per entrambe le tipologie di materiale — e in particolare per PLA-flax — l'effetto combinato di temperatura e densità di riempimento sulla risposta meccanica è minimo, semplificando così il processo di

ottimizzazione. Le interazioni significative materiale*temperatura e materiale*infill mettono in evidenza il ruolo cruciale della scelta del materiale nell'ottimizzazione del comportamento meccanico in funzione dei parametri di processo. Il PLA si dimostra più sensibile a questi fattori, mentre il PLA-flax garantisce prestazioni più stabili e prevedibili, rendendolo un candidato promettente per applicazioni che richiedono affidabilità sotto condizioni operative variabili. Al contrario, l'interazione temperatura*infill, essendo marginale, semplifica l'approccio progettuale, concentrando l'attenzione sulle interazioni guidate dal materiale. Il presente studio ha quindi analizzato il comportamento meccanico di strutture sandwich stampate in 3D con core gyrooidale, realizzate in PLA e in composito PLA-flax, dimostrando che i fattori materiale, temperatura di estrusione e densità di riempimento esercitano un'influenza significativa sulla resistenza a flessione e sulle modalità di cedimento. Pur mostrando valori inferiori di resistenza, il composito PLA-flax ha evidenziato una notevole stabilità prestazionale al variare dei parametri di processo, confermandone il potenziale per applicazioni in cui la costanza di comportamento è prioritaria rispetto alla massima prestazione meccanica assoluta. Gli effetti amplificati osservati nei sandwich compositi sottolineano l'importanza di un controllo accurato e di una comprensione approfondita delle variabili di processo, al fine di ottenere prestazioni ottimali in termini di resistenza, rigidità e integrità strutturale. L'analisi del legame tra densità di riempimento, temperatura di estrusione e comportamento meccanico del composito rappresenta un passaggio fondamentale per ottimizzare il processo produttivo e adattare le prestazioni del materiale sostenibile alle esigenze di specifiche applicazioni. Alla luce di ciò, sarà necessario approfondire sistematicamente l'influenza di questi parametri per massimizzare i benefici ottenibili dai sandwich compositi, contribuendo così all'evoluzione delle pratiche ingegneristiche e allo sviluppo di materiali avanzati nel campo della scienza dei materiali. In tale contesto, un futuro sviluppo della ricerca sarà orientato verso l'esplorazione di strategie e parametri di stampa 3D finalizzati al miglioramento dell'adesione interlaminare e all'ottimizzazione della distribuzione delle fibre all'interno della matrice PLA-flax. Questo approccio consentirà di migliorare ulteriormente le proprietà meccaniche del composito, ampliando il ventaglio di

applicazioni in ambiti legati alla progettazione strutturale sostenibile e alla riduzione del peso. Ciò apre prospettive applicative concrete per l'impiego di strutture sandwich stampate in 3D a base di materiali compositi bio-based come il PLA-flax, in considerazione del crescente interesse verso soluzioni leggere e sostenibili per applicazioni industriali. In particolare, attraverso l'ottimizzazione dei parametri di processo, la risoluzione delle criticità legate all'adesione interstrato e l'approfondimento degli effetti dell'orientamento e della distribuzione delle fibre, sarà possibile valorizzare appieno il potenziale ingegneristico di questi materiali innovativi. Questo processo evolutivo porterà allo sviluppo di componenti ad alte prestazioni ed eco-compatibili, destinati a settori strategici come l'automotive, l'aerospaziale e l'edilizia, dove la leggerezza strutturale e la sostenibilità ambientale rappresentano requisiti fondamentali.

3.3.3.5 Conclusioni

Il presente lavoro ha indagato il comportamento meccanico di strutture sandwich ottenute mediante stampa 3D, caratterizzate da core a geometria gyroidale e realizzate con due diverse tipologie di materiale: PLA e composito PLA-flax. L'attività sperimentale si è focalizzata sulla valutazione dell'effetto di due parametri fondamentali di processo — la temperatura di estrusione (200 °C e 220 °C) e la densità di riempimento del core (20% e 30%) — sulle proprietà meccaniche in flessione, in particolare sulla resistenza massima e sulla rigidità flessionale delle strutture. Le prove di flessione a tre punti condotte sui campioni hanno evidenziato come la tipologia di materiale sia il fattore dominante nel determinare la risposta meccanica. I campioni in PLA puro hanno mostrato valori di resistenza a flessione compresi tra 23 e 25 MPa, superiori rispetto ai 15–19 MPa registrati per i campioni in PLA-flax. Questo divario prestazionale è stato attribuito alla migliore adesione interlaminare garantita dalla matrice polimerica pura nel PLA, rispetto al composito in cui la presenza delle fibre — non trattate — ostacola parzialmente la coesione tra i layer depositati. L'analisi statistica mediante ANOVA ha confermato la significatività dei fattori principali (materiale, temperatura, infill), nonché delle interazioni a due vie materiale*temperatura e materiale*infill, le quali risultano avere un'influenza rilevante sulla variabilità della resistenza a flessione. Queste interazioni indicano che l'effetto dei parametri di processo dipende fortemente dal

materiale utilizzato, evidenziando l'importanza di una progettazione integrata tra scelta del materiale e definizione delle condizioni di stampa. Tuttavia, i risultati ottenuti mostrano che l'apporto rinforzante delle fibre di lino nel composito PLA–flax, in questa specifica configurazione, non è stato sufficiente a migliorare le prestazioni meccaniche complessive. Ciò è dovuto principalmente all'assenza di trattamenti superficiali sulle fibre, che avrebbe potuto migliorare l'adesione fibra–matrice, e alla natura stratificata del processo FFF, che rende difficile garantire un buon legame interlaminare in presenza di fasi eterogenee. Questi limiti sottolineano la necessità di approfondire le interazioni tra le fibre naturali e la matrice polimerica, esplorando al contempo nuove strategie di fabbricazione e modifiche superficiali in grado di migliorare l'integrazione tra le componenti del materiale composito. Nonostante le prestazioni inferiori rispetto al PLA puro, il composito PLA–flax ha mostrato una maggiore coerenza e stabilità del comportamento meccanico al variare delle condizioni di stampa. Questo aspetto evidenzia un potenziale significativo per applicazioni in cui la prevedibilità del comportamento strutturale, più che la massima prestazione meccanica, risulta il requisito principale, come nel caso di componenti soggetti a produzione decentralizzata o condizioni operative non perfettamente controllabili. Un ulteriore elemento di interesse emerso dallo studio riguarda le differenze nei meccanismi di rottura tra i due materiali. I sandwich in PLA tendono a fallire in modo progressivo, con l'innescarsi di una cricca per trazione nella pelle inferiore, seguita da fenomeni di delaminazione all'interfaccia con il core. Questo comportamento permette una certa gradualità nella perdita di integrità strutturale. Al contrario, i campioni in PLA–flax hanno mostrato un cedimento catastrofico, causato dalla rottura simultanea della pelle inferiore e dal collasso improvviso delle pareti interne del core gyroidale. Tale modalità di rottura, più repentina, riflette le criticità dell'adesione interstrato nel materiale composito e suggerisce la necessità di ulteriori interventi progettuali per migliorarne la robustezza. Inoltre, l'analisi dei dati ha mostrato che l'aumento della temperatura di estrusione, pur non determinando miglioramenti significativi delle proprietà meccaniche, ha influenzato il livello di deformazione alla massima tensione, suggerendo un cambiamento nel meccanismo di cedimento più che un rafforzamento delle prestazioni strutturali. Nel complesso, questo lavoro ha fornito

un quadro dettagliato degli effetti combinati di materiale, temperatura e geometria interna sul comportamento meccanico di strutture sandwich realizzate con tecnologie di manifattura additiva, offrendo indicazioni preziose per la loro ottimizzazione progettuale e funzionale. I risultati ottenuti costituiscono una base solida per il miglioramento delle prestazioni meccaniche e della sostenibilità ambientale dei materiali e dei processi impiegati, in vista di applicazioni in ambiti ad alta specializzazione come l'automotive, l'aerospaziale e l'edilizia, dove leggerezza e affidabilità strutturale sono requisiti chiave.

3.3.4 Analisi dell'influenza delle variabili di processo sulla risposta meccanica di pannelli sandwich a geometria TPMS realizzati in materiale composito PLA-lino mediante fabbricazione additiva

3.3.4.1 Abstract

Lo studio presenta un'indagine sperimentale sul comportamento meccanico di pannelli sandwich con core a geometria giroide, appartenente alla famiglia delle superfici minimali triplamente periodiche (TPMS), realizzati mediante manifattura additiva. Le strutture sono state prodotte utilizzando un composito a matrice polimerica in PLA rinforzato con fibre di lino, con l'obiettivo di valutare l'influenza dei parametri di processo sulla risposta strutturale. Sei configurazioni sperimentali, ottenute dalla combinazione di due temperature di estrusione (200 °C e 220 °C) e tre spessori di layer (0,16 mm, 0,24 mm e 0,28 mm), sono state sottoposte a prove di flessione a tre punti. L'analisi ha evidenziato una correlazione diretta tra condizioni operative, adesione interlayer e proprietà meccaniche, in particolare rigidità e tenacità. Le osservazioni microscopiche delle superfici di frattura hanno permesso di approfondire i meccanismi di propagazione delle cricche. I risultati dimostrano l'efficacia dell'impiego di biocompositi e geometrie topologicamente ottimizzate per la realizzazione di strutture leggere ad alte prestazioni, suggerendo margini di ottimizzazione ulteriori attraverso l'ampliamento delle variabili tecnologiche e dei regimi di carico analizzati.

3.3.4.2 Introduzione

Il presente lavoro si concentra sull'analisi di pannelli sandwich con core a giroide, fabbricati tramite stampa 3D a filamento fuso (FFF) e realizzati con un composito polimerico a base di acido polilattico (PLA) rinforzato con fibre di lino. Tale materiale, oltre a garantire compatibilità con i processi additivi, unisce i vantaggi di un biopolimero rinnovabile alle migliori

proprietà meccaniche conferite dal rinforzo naturale[71], in un'ottica di sostenibilità e riduzione dell'impatto ambientale. La ricerca è stata incentrata sulla valutazione dell'influenza di parametri di processo fondamentali – temperatura di estrusione e spessore del layer – sul comportamento meccanico dei provini sottoposti a flessione a tre punti. Per ogni configurazione sono stati prodotti campioni replicati e sottoposti a test sperimentali, seguiti da osservazioni microscopiche delle superfici di frattura per l'analisi dei meccanismi di cedimento. I risultati hanno mostrato una stretta correlazione tra condizioni operative e qualità delle interfacce interlayer, con impatti significativi sulla rigidità e sulla resistenza a rottura. L'indagine ha inoltre evidenziato come la variazione dei parametri di stampa consenta di individuare configurazioni ottimali in funzione del compromesso desiderato tra resistenza e duttilità. Questo studio, pur limitandosi a un set circoscritto di variabili, apre la strada a futuri sviluppi che includano la sperimentazione di ulteriori parametri di processo e l'estensione delle prove a diversi regimi di carico, quali compressione e impatto. L'integrazione di approcci di progettazione generativa e simulazione numerica potrebbe inoltre contribuire all'ottimizzazione delle prestazioni di pannelli sandwich innovativi, rendendoli candidati ideali per applicazioni in settori ad alta intensità tecnologica come l'aerospaziale e l'automobilistico.

3.3.4.3 Materiali e Metodi

Nel contesto dell'indagine sperimentale condotta, sono stati progettati e realizzati campioni strutturati secondo una configurazione sandwich con nucleo centrale a morfologia giroide, impiegando tecniche di fabbricazione additiva. I campioni ottenuti sono stati sottoposti a prove meccaniche di flessione a tre punti con l'obiettivo di caratterizzare la risposta strutturale sotto carico. La fase di produzione è stata articolata sulla variazione controllata di due parametri di processo fondamentali: la temperatura di estrusione, impostata su due livelli distinti (200 °C e 220 °C), e lo spessore del singolo strato depositato (layer height), selezionato secondo tre valori nominali (0,16 mm, 0,24 mm e 0,28 mm). L'analisi è finalizzata

alla valutazione degli effetti combinati di tali variabili operative sulle proprietà meccaniche globali delle strutture ottenute. L'intero protocollo sperimentale è stato sviluppato in conformità con le normative tecniche di riferimento per le prove di flessione su materiali polimerici, al fine di garantire la tracciabilità, la ripetibilità e la confrontabilità dei risultati, nonché l'aderenza ai criteri metodologici e qualitativi imposti dagli standard internazionali per la caratterizzazione meccanica dei materiali stampati.

3.3.4.3.1 Geometria del core

Le strutture sandwich si configurano come sistemi compositi a tre strati, costituiti da due pelli esterne ad alta rigidità e da un'anima centrale a densità ridotta, progettata per garantire la distanza tra le superfici resistenti e incrementare la rigidità flessionale del pannello. Tale configurazione consente una distribuzione ottimizzata degli sforzi: le pelli assorbono le sollecitazioni di trazione e compressione generate dalla flessione, mentre il core è dimensionato per contrastare le sollecitazioni di taglio e contribuire alla stabilità globale del componente. Le prestazioni meccaniche risultano strettamente correlate alla scelta della geometria interna dell'anima, che può essere opportunamente personalizzata in funzione dei requisiti progettuali. L'efficacia di tale architettura è riconducibile al rapporto elevato tra resistenza meccanica e massa, rendendo questi sistemi idonei all'impiego in ambiti applicativi nei quali è richiesta una combinazione di leggerezza strutturale, elevata rigidità specifica e capacità di assorbimento energetico. Nel presente studio è stata adottata una configurazione sandwich con anima interna a morfologia giroide, appartenente alla classe delle superfici minimali triplicemente periodiche (TPMS), al fine di ottimizzare la risposta meccanica delle strutture stampate. La scelta è motivata dalle proprietà strutturali della geometria giroide, tra cui l'elevata rigidità specifica, la continuità geometrica e la distribuzione uniforme degli sforzi interni, che la rendono particolarmente adatta a condizioni di carico non isotropo. Rispetto ad altre topologie TPMS, la configurazione giroide ha mostrato un comportamento meccanico bilanciato sotto sollecitazioni flessionali e compressive, mantenendo al contempo una bassa densità relativa. La selezione della morfologia dell'anima si basa su un'analisi comparativa tra diverse strutture TPMS, evidenziando la superiorità della geometria giroide in

termini di distribuzione dei carichi e minimizzazione dei punti di concentrazione delle tensioni. L'impiego di tale geometria, reso possibile dall'utilizzo di tecnologie di fabbricazione additiva, ha permesso la realizzazione di forme complesse non ottenibili tramite lavorazioni convenzionali, con un elevato grado di precisione. La capacità di personalizzazione della topologia interna ha rappresentato un elemento chiave per la definizione del layout strutturale, in funzione degli obiettivi prestazionali del lavoro.

3.3.4.3.2 Progettazione dei provini

La modellazione geometrica dei provini sandwich con nucleo interno a morfologia giroide è stata effettuata mediante il software nTop, ambiente di progettazione computazionale avanzato basato su logiche parametriche e generative, specificamente indicato per la definizione di strutture reticolari e superfici TPMS. L'adozione di tale strumento ha consentito la generazione di geometrie tridimensionali altamente complesse, con un riempimento strutturale impostato al 30%, in conformità alle prescrizioni dimensionali previste dalla normativa ASTM D790 per i provini da sottoporre a prova di flessione. I modelli generati sono stati successivamente esportati in formato STL, formato standard per la rappresentazione della mesh superficiale, impiegato per l'interfacciamento con i software di slicing. I file STL sono stati importati all'interno dell'ambiente Bambu Studio, utilizzato per la fase di preparazione alla stampa. Il software ha consentito l'impostazione dei parametri di processo richiesti, inclusi spessore del layer, temperatura di estrusione e densità di riempimento, generando il relativo codice G-code per la successiva esecuzione del processo additivo. Nonostante l'ottimizzazione del software per dispositivi proprietari, la stampa è stata eseguita con una Creality K1 Max, senza rilevazione di incompatibilità operative. L'integrazione tra gli strumenti software impiegati ha permesso la gestione completa del flusso digitale, dalla modellazione parametrica alla produzione fisica dei provini. Definiti i parametri sperimentali, è stata predisposta la produzione di diciotto provini suddivisi in sei configurazioni risultanti dalla combinazione di tre spessori di layer (0,16 mm, 0,24 mm, 0,28 mm) e due temperature di estrusione (200 °C e 220 °C). Per tutte le condizioni sperimentali è stato impostato un riempimento interno pari al 100%, utilizzando un ugello con diametro di 0,4 mm e

un filamento composito PLA-lino da 1,75 mm. I modelli digitali sono stati organizzati in sei insiemi di stampa, ciascuno contenente tre provini con identica configurazione di processo, al fine di assicurare l'omogeneità all'interno dei lotti e la ripetibilità dei risultati. L'operazione di slicing è stata eseguita mediante il software Bambu Studio, che ha elaborato la stratificazione dei modelli tridimensionali e definito i percorsi dell'estrusore per la deposizione sequenziale del materiale. I file generati, convertiti in linguaggio macchina G-code, sono stati trasferiti alla stampante 3D tramite supporto di memoria esterno, avviando così la fase di produzione additiva.

3.3.4.3.3 Produzione dei provini

La tecnologia impiegata per la realizzazione dei campioni oggetto della presente indagine è la modellazione a deposizione fusa (FDM), selezionata per la sua compatibilità con materiali compositi a base polimerica e per la capacità di riprodurre geometrie complesse con elevata precisione. In particolare, è stata utilizzata una stampante Creality K1 Max, dotata di estrusore a singolo ugello, alimentata da filamento termoplastico PLA rinforzato con fibre di lino. Il processo prevede la deposizione sequenziale di materiale fuso secondo le traiettorie definite dal file G-code, generato tramite slicing del modello tridimensionale. L'elevato grado di controllo offerto dalla tecnologia FDM consente la regolazione puntuale di parametri critici quali temperatura di estrusione, spessore del layer, velocità di stampa e densità di riempimento, risultando quindi particolarmente idonea per studi sperimentali basati sulla variazione controllata di variabili di processo. Nel presente lavoro, sono stati considerati sei scenari sperimentali ottenuti dalla combinazione di due valori di temperatura di estrusione (200 °C e 220 °C) e tre spessori di layer (0,16 mm, 0,24 mm, 0,28 mm), mantenendo costanti gli altri parametri operativi. La possibilità di realizzare strutture tridimensionali a geometria TPMS è strettamente connessa alla flessibilità della tecnologia FDM, che consente l'integrazione tra progettazione generativa e produzione additiva, con riduzione degli scarti di materiale e miglioramento del rapporto tra efficienza strutturale e massa. A fronte di tali vantaggi, la tecnologia presenta ancora alcune criticità, tra cui la disomogeneità della qualità interlayer e la potenziale anisotropia delle proprietà meccaniche, aspetti che sono stati oggetto di valutazione specifica nel

corso dell'analisi sperimentale. Il materiale impiegato per la produzione dei campioni è un filamento termoplastico di tipo PLA rinforzato con fibre di lino, fornito in forma cilindrica con diametro nominale di 1,75 mm. Il processo prevede la sua estrusione in stato semisolidificato mediante riscaldamento localizzato, con deposizione sequenziale di strati in conformità alle traiettorie definite dal file G-code generato in fase di slicing. Il movimento dell'ugello, nonché i parametri di processo quali temperatura, portata di materiale, velocità di avanzamento e precisione del sistema di movimentazione, influenzano direttamente le caratteristiche morfologiche e meccaniche del manufatto finale. Per garantire un'adeguata adesione tra i layer, è stata impiegata una piattaforma riscaldata, mentre la realizzazione delle geometrie interne non ha richiesto l'uso di supporti strutturali. L'obiettivo sperimentale si è focalizzato sull'analisi della variazione delle prestazioni meccaniche in funzione di specifici parametri di processo, con particolare attenzione alla temperatura di estrusione e allo spessore del layer, identificati come fattori critici nella formazione dei giunti interlayer e nell'integrità strutturale del materiale stampato. Nel presente studio è stato impiegato un materiale composito costituito da una matrice termoplastica di tipo polilattico (PLA) rinforzata con fibre naturali di lino, selezionate per le loro proprietà meccaniche e per la compatibilità ambientale. I materiali compositi polimerici risultano particolarmente idonei per applicazioni in stampa 3D grazie alla loro bassa densità, alla buona processabilità e alla resistenza agli agenti meccanici e chimici. La configurazione strutturale del composito prevede la dispersione di fibre discontinue all'interno della matrice polimerica, con la funzione di incrementare la rigidità e la resistenza meccanica, in particolare sotto carichi flessionali. Il ruolo della matrice è quello di trasferire e distribuire gli sforzi applicati, garantendo al contempo coesione tra le fibre e integrità strutturale del materiale. La scelta della fibra di lino come fase di rinforzo è motivata dall'equilibrio tra proprietà meccaniche (resistenza a trazione specifica, modulo elastico) e sostenibilità ambientale, derivante dalla biodegradabilità intrinseca e dal ridotto impatto del processo di coltivazione. L'integrazione della fibra naturale in una matrice compatibile consente di ottenere un composito a basso impatto ambientale, con prestazioni meccaniche adeguate ad applicazioni ingegneristiche leggere. In

particolare, l'impiego di tale materiale in combinazione con geometrie a struttura reticolare è volto a ottimizzare il comportamento in flessione, oggetto principale della presente indagine sperimentale. Nel contesto della produzione additiva mediante tecnologia FDM, il materiale composito PLA-lino è impiegato in forma di filamento continuo, costituito da una matrice termoplastica caricata con fibre naturali micronizzate, avvolto su bobine con diametro standardizzato. Il processo di stampa prevede l'alimentazione del filamento nell'estrusore, la sua fusione termica e la deposizione controllata strato per strato secondo le traiettorie definite dal modello digitale. La qualità del filamento risulta un parametro critico per la riproducibilità meccanica dei manufatti: una distribuzione omogenea delle fibre all'interno della matrice e un controllo accurato delle caratteristiche reologiche del materiale sono condizioni indispensabili per garantire la coerenza strutturale dei provini e la validità dei dati sperimentali. L'integrazione della fibra di lino nel processo FDM consente di combinare l'efficienza geometrica della fabbricazione strato per strato con le proprietà meccaniche e ambientali del rinforzo naturale, permettendo la produzione di componenti ottimizzati per l'analisi del comportamento strutturale. Tale approccio risulta coerente con le attuali direttrici della ricerca ingegneristica, orientate alla riduzione dell'impatto ambientale dei materiali e all'impiego di soluzioni compositive sostenibili senza comprometterne la funzionalità meccanica.

3.3.4.3.4 Fase di test

Nel contesto della caratterizzazione meccanica dei materiali polimerici ottenuti mediante produzione additiva, l'adozione di normative tecniche standardizzate rappresenta un requisito imprescindibile per garantire la ripetibilità, l'affidabilità statistica e la confrontabilità dei risultati sperimentali. In questo studio, la valutazione del comportamento a flessione dei provini realizzati tramite stampa FDM è stata condotta secondo la norma ASTM D790, standard di riferimento per la determinazione delle proprietà meccaniche di materiali plastici rigidi, rinforzati o non rinforzati. Tale normativa definisce in modo rigoroso le condizioni operative della prova, incluse la geometria del campione, la configurazione dell'apparato di prova, la velocità di carico, le condizioni ambientali e i criteri di elaborazione dei dati, consentendo di minimizzare gli effetti di variabilità sperimentale dovuti a

fattori esterni o soggettivi. L'applicazione della ASTM D790 è particolarmente indicata per l'analisi di materiali stampati in 3D, nei quali le proprietà meccaniche possono essere significativamente influenzate dai parametri di processo quali temperatura di estrusione, spessore del layer, velocità di deposizione e orientamento del percorso dell'estrusore. L'utilizzo di tale protocollo consente quindi di valutare in modo sistematico l'effetto di ciascun parametro sulla risposta flessionale del materiale, supportando lo sviluppo di modelli predittivi e la costruzione di database prestazionali affidabili per materiali additivi. La determinazione sperimentale di grandezze meccaniche quali il modulo a flessione, la resistenza a flessione e la deformazione a rottura fornisce un quadro quantitativo utile alla progettazione di componenti soggetti a sollecitazioni flessionali, soprattutto nel caso di materiali soggetti ad anisotropie strutturali indotte dal processo di deposizione. Inoltre, l'adozione di standard riconosciuti a livello internazionale, quali quelli emanati da ASTM International o ISO, permette di inquadrare i risultati all'interno di un sistema metodologico condiviso, indispensabile tanto in ambito accademico quanto in ambito industriale, dove la certificazione delle prestazioni costituisce prerequisito per l'integrazione dei materiali nei processi produttivi. L'utilizzo di un linguaggio normativo codificato consente il confronto diretto con dati presenti in letteratura tecnica o schede materiali, favorendo la validazione sperimentale di nuove combinazioni materiche o processuali. In tale prospettiva, la norma ASTM D790 si configura non solo come uno strumento operativo, ma come un dispositivo abilitante per il trasferimento tecnologico dei risultati sperimentali verso applicazioni concrete, strutturalmente rilevanti e industrialmente sostenibili. L'impiego di protocolli di prova codificati rappresenta quindi una condizione necessaria per l'adozione dei materiali polimerici stampati in 3D in settori soggetti a regolamentazioni tecniche stringenti.

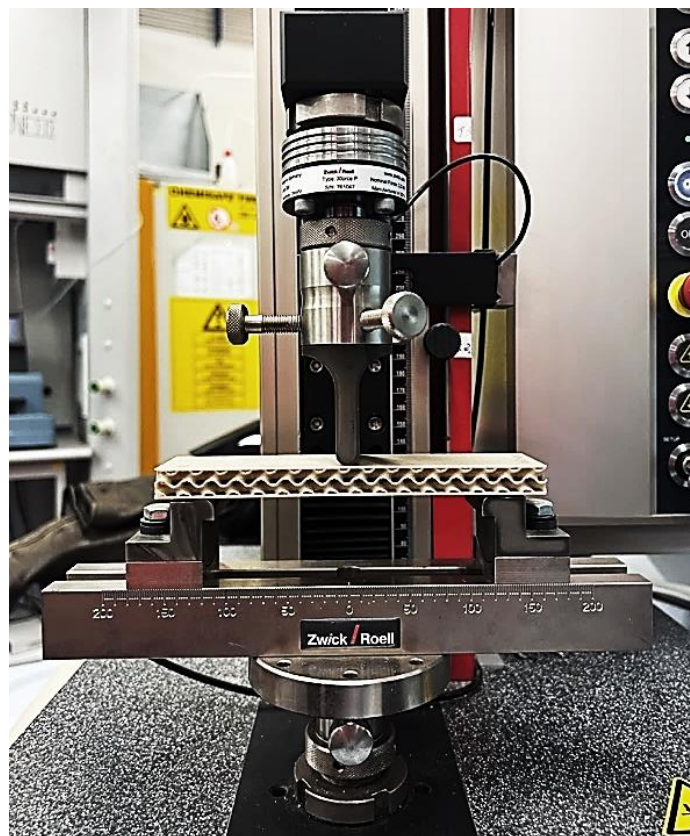


Figura 83: Set up test a flessione.

Nel presente studio sperimentale sono stati sottoposti a prova meccanica 18 provini a struttura sandwich, con differenti combinazioni di parametri di stampa, al fine di analizzare l'influenza delle condizioni di processo sulla risposta meccanica in flessione. Le prove sono state eseguite utilizzando una macchina universale per prove meccaniche in configurazione a tre punti, equipaggiata con due supporti cilindrici fissi e un carico centrale applicato da un traversino mobile. L'interasse tra i supporti è stato impostato in conformità ai requisiti geometrici della normativa, così come la geometria dei campioni, mantenuta costante in tutte le configurazioni: 160 mm di lunghezza, 40 mm di larghezza e 12 mm di spessore. La velocità di applicazione del carico è stata definita in funzione della lunghezza del campione, secondo quanto prescritto dalla normativa di riferimento. Il sistema di acquisizione ha registrato in tempo reale i dati di forza e spostamento, consentendo la costruzione delle curve carico-spostamento e l'estrazione dei parametri meccanici di interesse, quali modulo elastico a flessione, resistenza massima e deformazione al cedimento. Le variabili di processo investigate comprendono due livelli di temperatura di estrusione (200 °C e 220 °C) e tre spessori di layer (0,16 mm, 0,24 mm, 0,28 mm),

per un totale di sei configurazioni sperimentali. Il corretto posizionamento dei campioni sul banco di prova è stato verificato preliminarmente al fine di evitare disallineamenti e condizioni di carico non uniformi, garantendo così la validità dei dati sperimentali ottenuti.

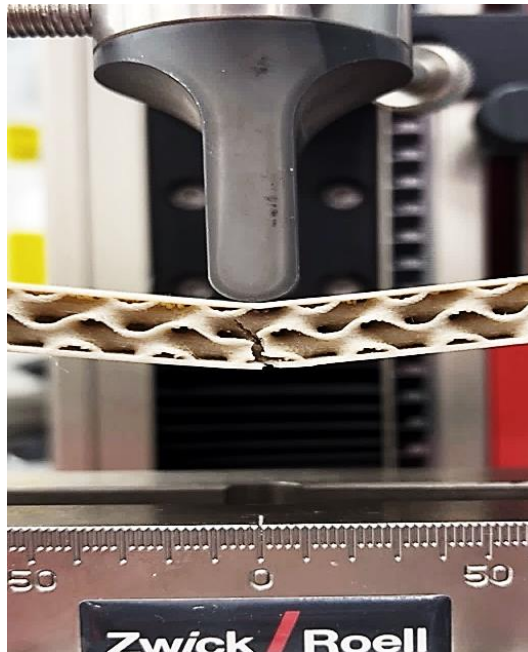


Figura 84: Particolare della cricca durante la prova a flessione.

L'esecuzione delle prove ha evidenziato che le prestazioni meccaniche dei campioni non sono unicamente riconducibili alla natura del materiale impiegato, ma risultano fortemente dipendenti dalla configurazione dei parametri di stampa. I risultati ottenuti sottolineano l'importanza di un'accurata calibrazione del processo, in particolare per quanto riguarda temperatura e spessore del layer, al fine di ottenere componenti con proprietà strutturali stabili e riproducibili. L'analisi sperimentale ha inoltre consentito di individuare combinazioni di parametri operativi in grado di massimizzare le prestazioni flessionali, offrendo potenziali riferimenti per futuri processi produttivi o per ulteriori approfondimenti nell'ambito della fabbricazione additiva di materiali compositi.

3.3.4.3.5 Analisi al microscopio ottico

A seguito della caratterizzazione meccanica, tutti i campioni fratturati sono stati sottoposti ad analisi morfologica mediante microscopia ottica, con l'obiettivo di esaminare in dettaglio le modalità di rottura e rilevare la presenza di cricche,

delaminazioni o discontinuità interlaminari. L'osservazione microscopica ha consentito di acquisire informazioni complementari ai dati numerici, fornendo indicazioni sulla propagazione del danno in relazione alla configurazione interna dei provini. La particolare morfologia del nucleo, realizzata secondo una struttura TPMS di tipo giroide, ha introdotto una distribuzione spaziale complessa delle sollecitazioni interne, influenzando i percorsi di frattura e i meccanismi di cedimento locale. La continuità geometrica e l'assenza di superfici piane hanno determinato una risposta anisotropa non lineare, con traiettorie di cricca che si sviluppano lungo i contorni curvilinei delle celle, confermando l'influenza diretta della topologia reticolare sulla cinematica del danneggiamento.

3.3.4.4 Analisi dei risultati

Al termine della fase di fabbricazione, per ciascuna configurazione sperimentale sono stati acquisiti tre parametri operativi di riferimento: massa media dei provini, tempo totale di stampa e lunghezza del filamento impiegato. Tali dati sono stati sistematizzati in forma tabellare al fine di valutare l'influenza combinata dei parametri di processo – spessore del layer e temperatura di estrusione – sull'efficienza produttiva. La raccolta preliminare di queste informazioni ha permesso di quantificare il consumo di materiale e la durata del ciclo di produzione per ciascun lotto, fornendo un'indicazione oggettiva delle implicazioni operative associate alle diverse combinazioni parametriche, indipendentemente dalla successiva caratterizzazione meccanica. L'analisi di tali metriche consente inoltre di evidenziare eventuali variazioni nella stabilità del processo, in termini di ripetibilità produttiva e coerenza geometrica tra i campioni realizzati.

Provinci	Tempo di stampa	Peso [g]	Lunghezza filamento [m]
220-0.16	8h 44m	114.61	38.42
220-0.24	6h 26m	113.25	37.97
220-0.28	5h 56m	118.64	39.78
200-0.16	8h 45m	114.61	38.42

200-0.24	6h 26m	113.25	37.97
200-0.28	5h 56m	118.64	39.78

Figura 85: Misure dei provini, in particolare su tempo totale di stampa, peso del materiale utilizzato e lunghezza del filamento.

L'analisi dei dati evidenzia l'influenza diretta dei parametri di processo sui principali indicatori di efficienza produttiva: durata del ciclo di stampa, massa del materiale utilizzato e lunghezza del filamento estruso. Lo spessore del layer risulta il fattore maggiormente incidente sulla variabile temporale: al crescere dell'altezza dello strato da 0,16 mm a 0,28 mm, il tempo di stampa si riduce sensibilmente, con un delta medio di circa tre ore, attribuibile alla minore numerosità degli strati richiesti per il completamento del volume nominale del provino. Le variazioni registrate in termini di massa e lunghezza del filamento risultano meno marcate, ma comunque significative. I campioni stampati con layer da 0,28 mm presentano masse lievemente superiori rispetto alle configurazioni con spessori inferiori, suggerendo una possibile variazione locale nella densità del materiale depositato o nella precisione della deposizione perimetro-riempimento. L'effetto della temperatura di estrusione (200 °C vs. 220 °C) su questi parametri appare trascurabile, poiché, a parità di spessore, i valori di massa e lunghezza del filamento risultano pressoché invariati. Ciò indica che, nella fase di fabbricazione, la variabile termica non incide in modo significativo sul consumo di materiale, sebbene la sua influenza sulle proprietà meccaniche verrà analizzata nei paragrafi successivi. In una fase successiva, è stata effettuata una pesatura individuale di ciascun campione al fine di rilevare eventuali deviazioni all'interno dei singoli lotti e valutare la stabilità del processo. Questo ha consentito di verificare l'eventuale presenza di fluttuazioni dimensionali o microdifetti, attribuibili alla variabilità termica o geometrica durante la deposizione, i cui risultati sono sintetizzati nella tabella seguente.

PROVINI	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 3	TOTALE
220 °C- 0.16mm	36.6g	36.6g	36.6g	109.8g

220 °C- 0.24mm	36.1g	36.1g	36.1g	108.2g
220 °C- 0.28mm	37.9g	37.9g	37.9g	113.6g
200 °C- 0.16mm	36.6g	36.6g	36.6g	109.8g
200 °C- 0.24mm	35.6g	35.6g	35.6g	106.8g
200 °C- 0.28mm	37.8g	37.8g	37.8g	113.4g

Tabella 18: Massa individuale dei provini per ciascuna configurazione sperimentale

Dall'analisi dei valori riportati in Tabella 18 emergono considerazioni rilevanti in merito alla coerenza dimensionale e alla distribuzione della massa nei campioni prodotti. All'interno di ciascun lotto sperimentale, i tre provini presentano masse identiche, a conferma dell'elevata ripetibilità del processo e della stabilità operativa nella fase di stampa. Confrontando i diversi lotti, si osserva che, a parità di temperatura di estrusione, l'aumento dello spessore del layer è correlato a un incremento della massa, attribuibile presumibilmente a una deposizione volumetrica più densa o a una maggiore efficienza di riempimento. In particolare, le configurazioni con layer da 0,28 mm risultano sistematicamente più pesanti rispetto a quelle con spessori inferiori. L'effetto della temperatura, sebbene meno marcato, risulta comunque rilevabile: a parità di spessore, i provini stampati a 220 °C mostrano valori di massa lievemente superiori rispetto a quelli stampati a 200 °C, in modo più evidente nei campioni con layer sottili. Questo comportamento potrebbe essere attribuito a un miglior grado di fusione e coalescenza tra i filamenti, con conseguente incremento della densità locale del materiale depositato. I risultati confermano che la configurazione dei parametri di stampa non incide esclusivamente sui tempi di processo o sulla qualità geometrica superficiale, ma

risulta influente anche sulla massa e, indirettamente, sulla densità strutturale del componente finito.

3.3.4.4.1 Lotto sperimentale – 200 °C, layer 0,16 mm

I provini appartenenti al lotto con temperatura di estrusione pari a 200 °C e spessore del layer di 0,16 mm sono stati sottoposti a prova di flessione, al fine di valutarne la risposta meccanica. Le curve sforzo-deformazione acquisite mostrano una buona sovrapposizione tra le tre repliche, evidenziando una fase elastica iniziale ben definita, seguita da un regime plastico moderatamente sviluppato prima del collasso strutturale. La tensione massima raggiunta si attesta in prossimità dei 20 MPa, mentre i valori di deformazione a rottura risultano compresi nell'intervallo 0,05–0,07 mm/mm. Nella fase post-picco si osservano leggere variazioni nella pendenza discendente: in alcuni casi il decadimento dello sforzo risulta più marcato, suggerendo un comportamento fragile associabile alla possibile presenza di discontinuità interne o imperfezioni localizzate generate in fase di stampa. Tali fenomeni possono compromettere la capacità del materiale di sostenere deformazioni plastiche, influenzando negativamente la stabilità della risposta post-elastica.

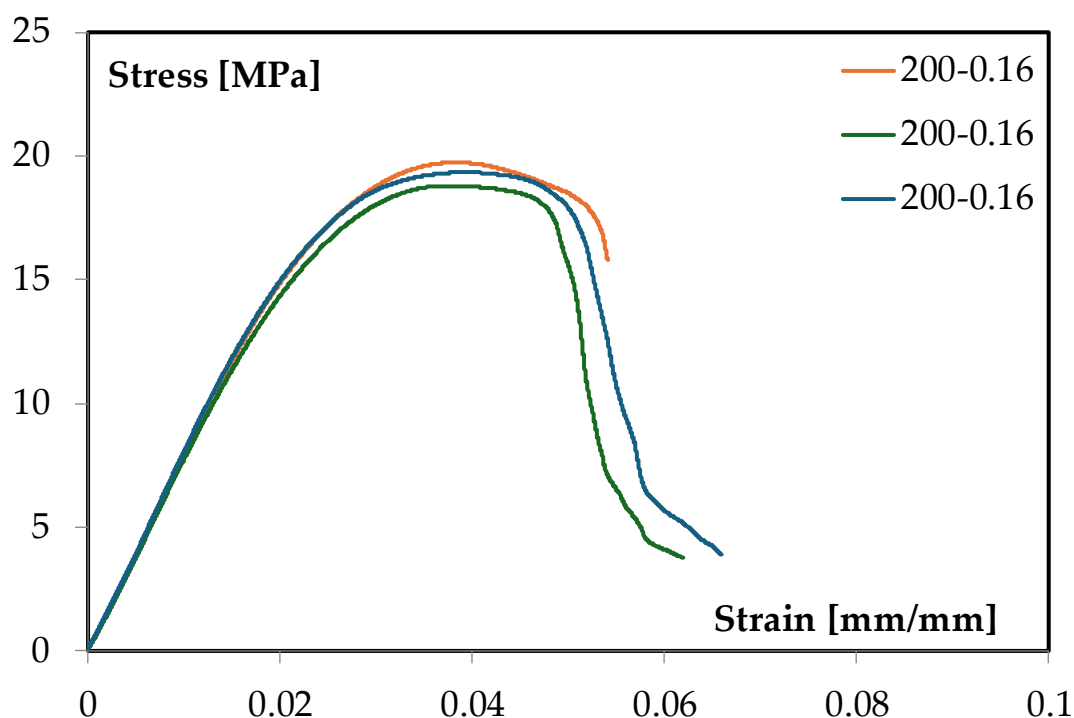


Grafico 14: Grafico Sforzo-Deformazione dei provini stampati a 200 °C con layer da 0.16 mm

A integrazione della caratterizzazione meccanica, è stata condotta un'analisi microscopica delle superfici di frattura dei provini appartenenti alla configurazione 200 °C – 0,16 mm, con l'obiettivo di identificare le modalità di innesco e propagazione del danneggiamento. Le immagini ottenute evidenziano che l'avvio della cricca avviene preferenzialmente in regioni a ridotta densità locale di materiale, potenzialmente associate a discontinuità strutturali o a parziale coalescenza tra i layer. La propagazione successiva si sviluppa lungo traiettorie non lineari, fortemente condizionate dalla morfologia interna giroide, che impone un percorso tortuoso alla frattura. Questo comportamento è indicativo di un meccanismo di dissipazione dell'energia meccanica lungo la struttura reticolare, che rallenta la cinetica di propagazione e posticipa il collasso macroscopico del campione. La combinazione tra distribuzione spaziale del materiale e architettura TPMS sembra quindi contribuire a un'evoluzione del danno meno localizzata e più progressiva.

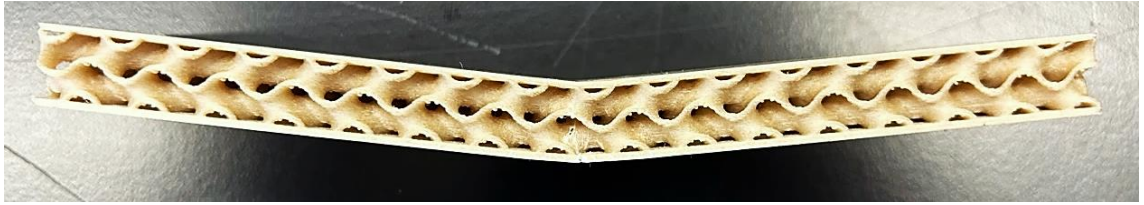


Figura 86: Provino stampato a 200 °C con layer 0.16 mm

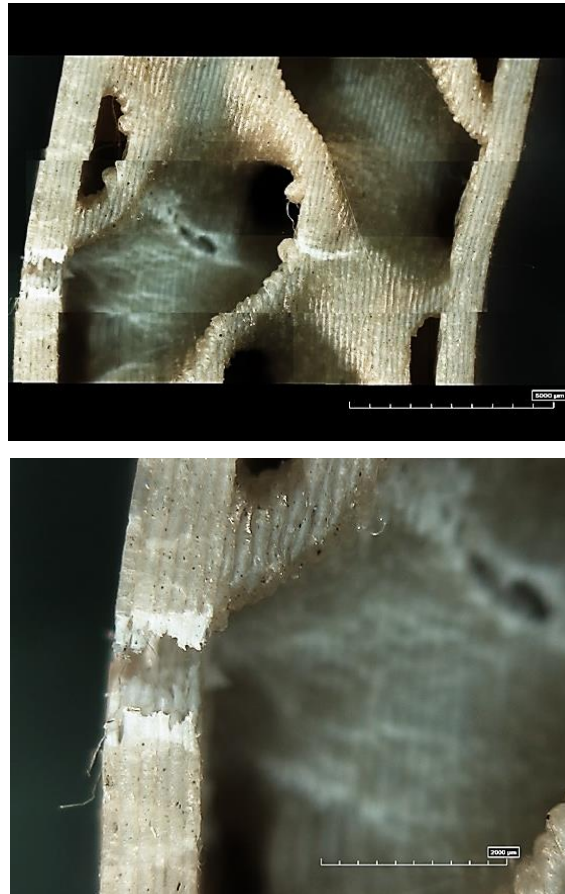


Figura 87: Dettaglio al microscopio del punto di frattura del provino stampato a 200 °C con layer 0.16 mm.

3.3.4.4.2 Lotto sperimentale – 200 °C, layer 0,24 mm

I provini appartenenti alla configurazione sperimentale con temperatura di estrusione di 200 °C e spessore del layer pari a 0,24 mm sono stati sottoposti a prova di flessione, da cui sono state ricavate le relative curve sforzo-deformazione. I tre campioni hanno mostrato un comportamento meccanico coerente, con una fase elastica ben definita, un picco di carico stabile e una rottura successiva caratterizzata da un cedimento netto. I valori di tensione massima rilevati si collocano nell'intervallo 19–20 MPa, mentre la deformazione a rottura risulta compresa tra 0,045 e 0,055 mm/mm, leggermente inferiore rispetto a quanto

osservato per la configurazione con layer da 0,16 mm. L'analisi comparativa delle curve evidenzia un'elevata sovrapposizione nella fase elastica, con una lieve divergenza nella zona post-picco. In uno dei tre provini è stato registrato un cedimento più marcato, compatibile con una frattura fragile, verosimilmente riconducibile alla presenza di difetti localizzati o discontinuità nella deposizione. Complessivamente, la configurazione con spessore intermedio mostra una resistenza analoga al lotto a spessore minimo, ma una duttilità leggermente ridotta, presumibilmente imputabile a una minore efficacia dell'adesione interlayer dovuta all'aumento dello spessore del singolo strato.

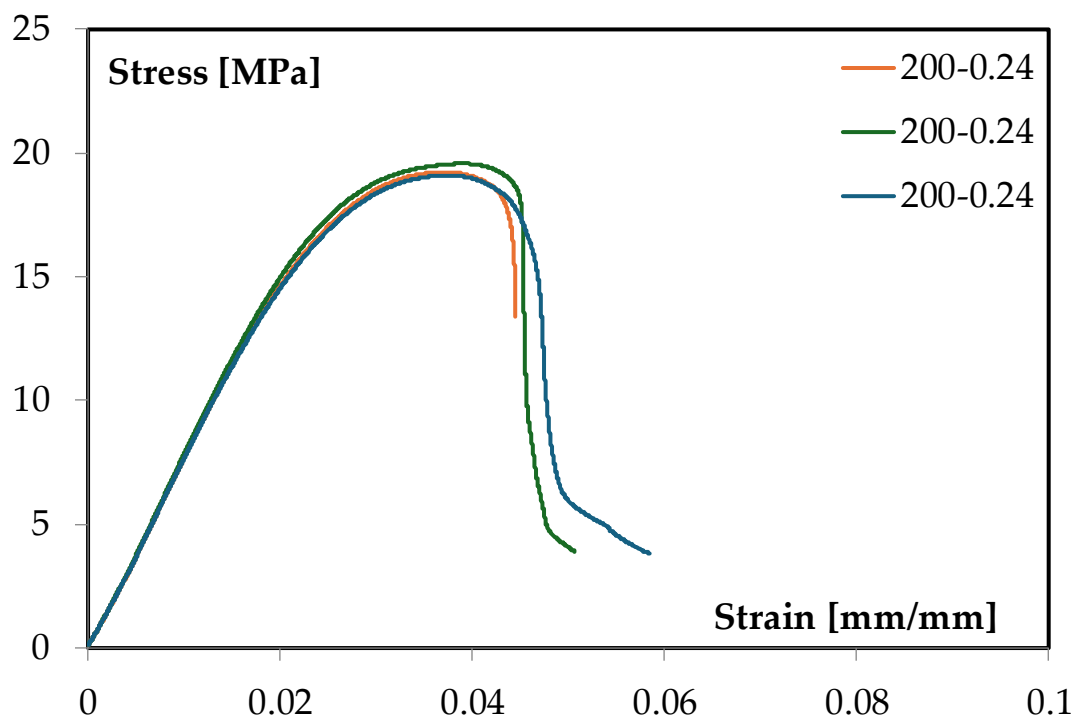


Grafico 15: Grafico Sforzo-Deformazione dei provini stampati a 200 °C con layer da 0.24 mm.

L'osservazione microscopica delle superfici fratturate dei provini stampati con spessore del layer pari a 0,24 mm e temperatura di estrusione di 200 °C ha consentito di analizzare i meccanismi di innesco e propagazione del danno. Le immagini acquisite evidenziano chiaramente l'avvio della cricca in prossimità della regione centrale del campione, compatibile con il punto di massimo momento flettente durante la prova. La frattura si sviluppa successivamente verso le estremità, seguendo una traiettoria relativamente lineare lungo i bordi laterali della struttura. Rispetto alla configurazione con spessore inferiore, il danneggiamento

risulta più localizzato e diretto, suggerendo un comportamento di tipo fragile, con una propagazione del cedimento meno dissipativa e più rapida una volta superata la soglia critica. Tale fenomeno può essere associato a una ridotta efficacia dell'ancoraggio interlayer, potenzialmente compromesso dall'aumento dello spessore di deposizione.



Figura 88: Provino stampato a 200 °C con layer 0.24 mm.

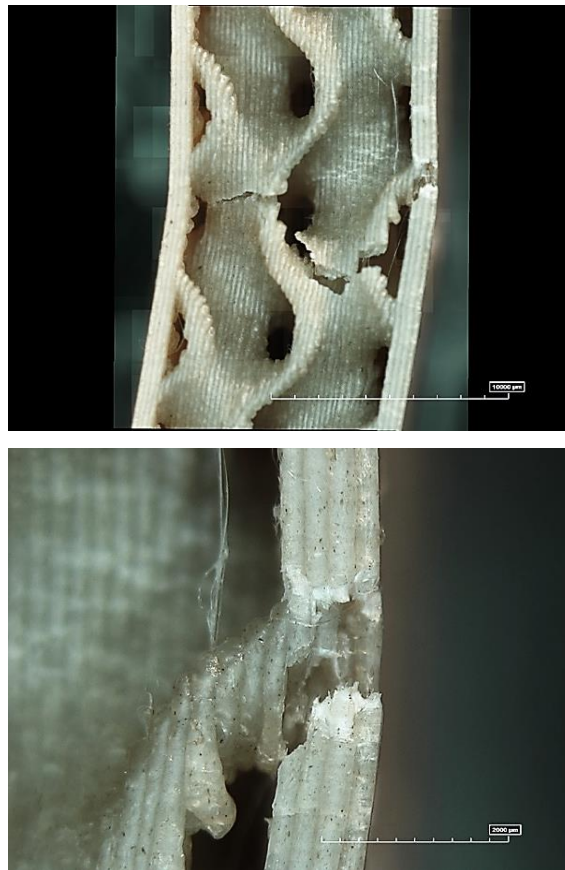


Figura 89: Dettaglio al microscopio del punto di frattura del provino stampato a 200 °C con layer 0.24 mm.

3.3.4.4.3 Lotto sperimentale – 200 °C, layer 0,28 mm

Per la configurazione con temperatura di estrusione pari a 200 °C e spessore del layer di 0,28 mm, le curve sforzo-deformazione ottenute dalle tre repliche mostrano un'elevata regolarità nella risposta elastica, con andamento sostanzialmente

sovrapponibile tra i campioni. I valori massimi di tensione registrati si collocano nell'intervallo 23–24 MPa, rappresentando i livelli di resistenza più elevati tra tutte le configurazioni sperimentali a 200 °C. La deformazione al cedimento, tuttavia, risulta più contenuta rispetto ai lotti con layer inferiori, con valori compresi tra 0,045 e 0,055 mm/mm. L'andamento post-picco evidenzia un decadimento rapido dello sforzo, indicativo di un comportamento meccanico fragile. L'incremento dello spessore del layer, pur contribuendo all'aumento della rigidità e della resistenza flessionale, sembra penalizzare la duttilità del materiale, verosimilmente per effetto di una riduzione dell'efficacia dell'adesione interlayer. Tale configurazione, caratterizzata da elevata rigidità e risposta meccanica stabile fino alla rottura, risulta pertanto idonea per applicazioni in cui la capacità deformativa non costituisce un requisito prioritario, ma è richiesto un elevato carico di rottura.

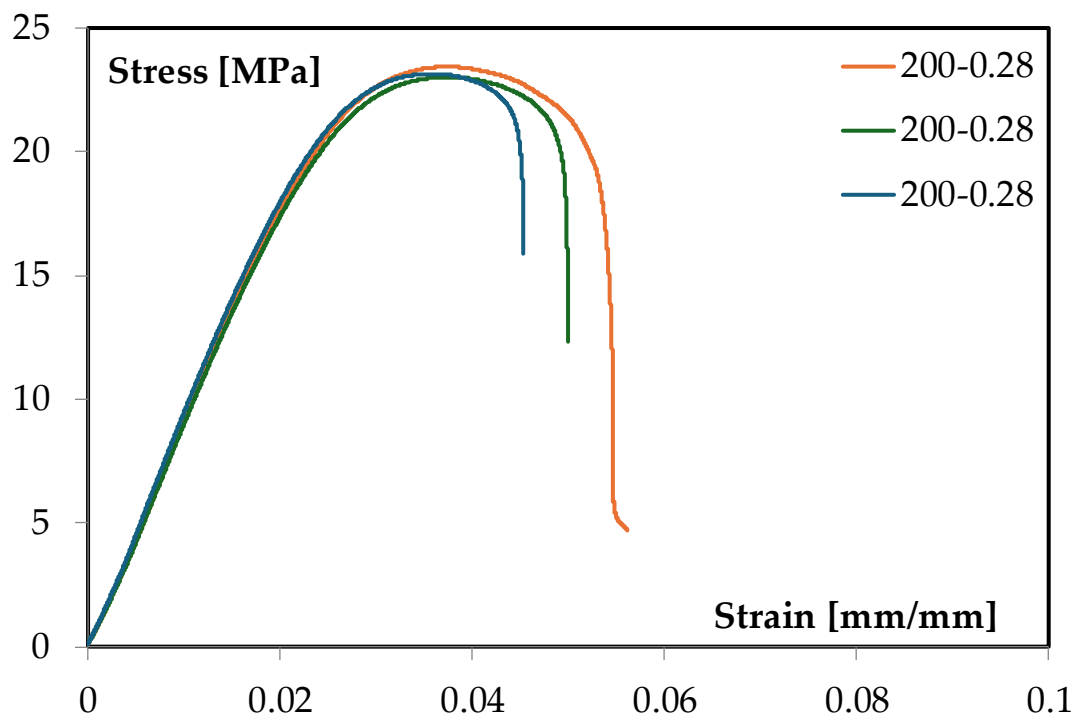


Grafico 16: Grafico Sforzo-Deformazione dei provini stampati a 200 °C con layer da 0.28 mm.

L'osservazione microscopica delle superfici fratturate nei provini stampati con layer di 0,28 mm ha consentito di correlare i meccanismi di rottura con i comportamenti rilevati dalle curve sforzo-deformazione. In coerenza con quanto emerso nell'analisi del lotto a spessore intermedio, l'aumento dell'altezza del layer ha determinato un'evoluzione del danno più localizzata, con una frattura netta e ben

delimitata. Le immagini mostrano che la cricca si propaga lungo la struttura giroide seguendo in parte il profilo geometrico delle celle, ma con un percorso più diretto e continuo rispetto a quanto osservato nei campioni con spessori inferiori. Tale configurazione risulta meno efficace nel rallentare la propagazione del danneggiamento, suggerendo una capacità di dissipazione dell'energia limitata. Il comportamento fratturativo osservato risulta quindi coerente con la risposta meccanica sperimentale, caratterizzata da un cedimento repentino in prossimità del picco di carico, indice di una transizione verso modalità di rottura fragile indotte dalla minore coesione interlayer associata allo spessore elevato.

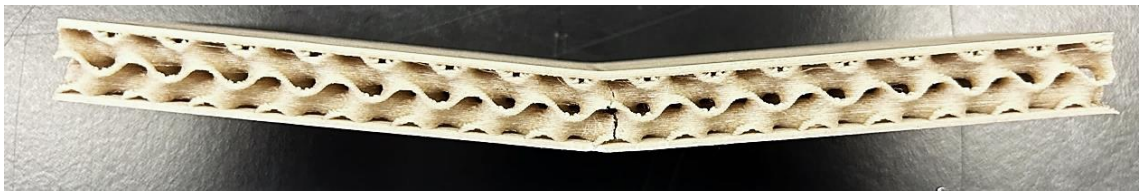


Figura 90: Provino stampato a 200 °C con layer 0.28 mm.

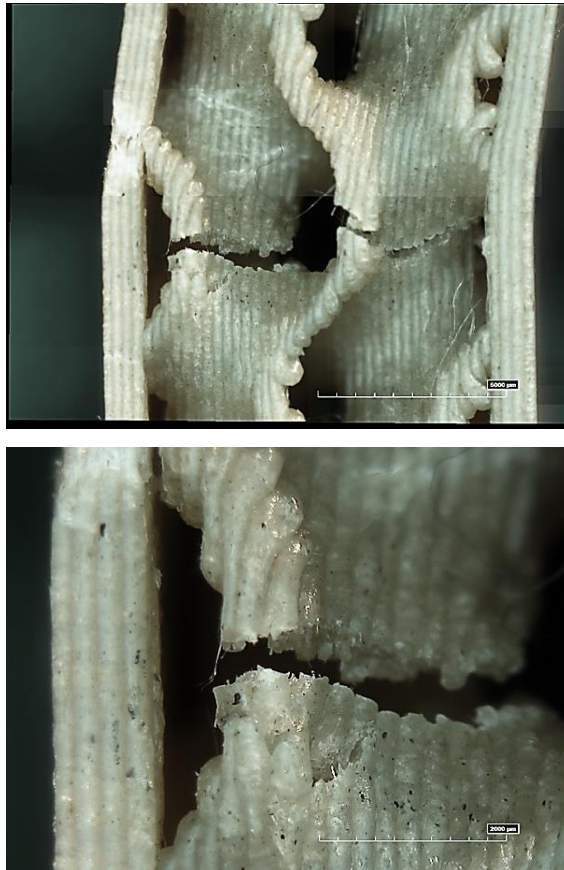


Figura 91: Dettaglio al microscopio del punto di frattura del provino stampato a 200 °C con layer 0.28 mm.

3.3.4.4.4 Lotto sperimentale – 220 °C, layer 0,16 mm

Le curve sforzo-deformazione ottenute per i provini stampati a 220 °C con spessore del layer pari a 0,16 mm mostrano un'elevata omogeneità nella risposta elastica, con sovrapposizione pressoché completa fino al raggiungimento del carico massimo. I valori di tensione massima registrati si collocano nel range 22–23 MPa, mentre la deformazione a rottura risulta compresa tra 0,040 e 0,043 mm/mm, leggermente inferiore rispetto a quella misurata nei campioni a pari spessore stampati a 200 °C. Il tratto post-picco evidenzia un cedimento netto e repentino per tutti i provini, tipico di un comportamento fragile. La ripetibilità osservata tra le tre repliche è indicativa di un buon controllo del processo di stampa e di una distribuzione regolare delle sollecitazioni durante la prova. L'incremento della temperatura sembra aver favorito una maggiore coesione interlayer, incrementando la resistenza meccanica, ma a discapito della capacità deformativa complessiva del materiale.

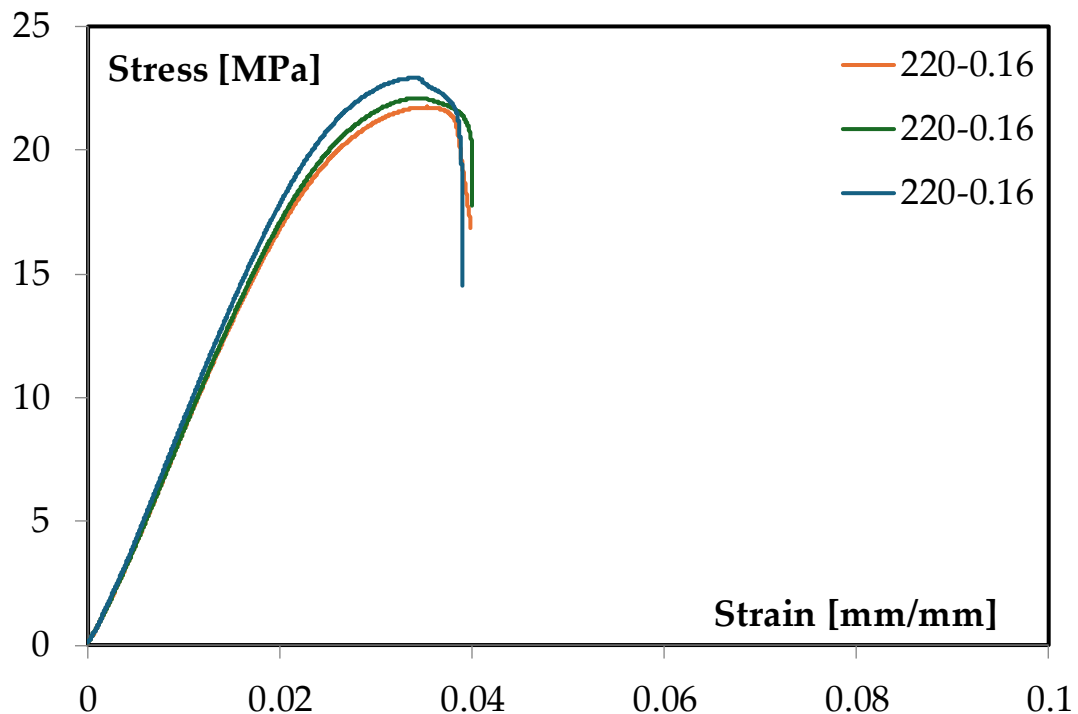


Grafico 17: Grafico Sforzo-Deformazione dei provini stampati a 220 °C con layer da 0.16 mm.

L'incremento della temperatura di estrusione, in combinazione con un basso spessore del layer, ha determinato un miglioramento della resistenza a flessione, accompagnato tuttavia da una riduzione della duttilità. Tale comportamento risulta

coerente con un effetto di fusione interlayer più efficace, che incrementa la coesione tra gli strati ma riduce la capacità deformativa complessiva del materiale. A seguito delle prove meccaniche, i campioni relativi a questa configurazione sono stati sottoposti a osservazione microscopica, con l'obiettivo di analizzare le modalità di innesco e propagazione della frattura. Le immagini ottenute mostrano una linea di frattura netta e continua, che si origina in prossimità della regione centrale del provino, compatibilmente con il punto di massimo sforzo durante il test. La propagazione della cricca avviene con andamento diretto, senza deviazioni significative, attraversando la struttura giroide con scarsa interazione con la geometria interna. Questo comportamento conferma la natura fragile del cedimento osservata nelle curve sforzo-deformazione, suggerendo una limitata capacità della struttura reticolare di dissipare l'energia meccanica prima della rottura.



Figura 92: Provino stampato a 220 °C con layer 0.16 mm.



Figura 93: Dettaglio al microscopio del punto di frattura del provino stampato a 220 °C con layer 0,16 mm.

3.3.4.4.5 Lotto sperimentale – 220 °C, layer 0,24 mm

Le curve sforzo-deformazione ottenute per i provini stampati alla temperatura di 220 °C con spessore del layer pari a 0,24 mm mostrano un'elevata uniformità nella fase elastica, con sovrapposizione quasi completa delle traiettorie fino al raggiungimento del massimo carico. I valori di tensione massima registrati si collocano nel range 19–20 MPa, mentre la deformazione a rottura varia tra 0,042 e 0,050 mm/mm. La risposta meccanica complessiva è caratterizzata da un comportamento fragile, evidenziato dal repentino decadimento dello sforzo nella fase post-picco. Nonostante ciò, la presenza di una fase elastica ben sviluppata e stabile suggerisce un buon livello di coesione interlayer, attribuibile alla temperatura elevata di estrusione, che favorisce una migliore fusione tra gli strati. Questa configurazione si distingue per un bilanciamento tra rigidità e capacità di deformazione, con prestazioni intermedie rispetto ai lotti a spessori inferiori o superiori.

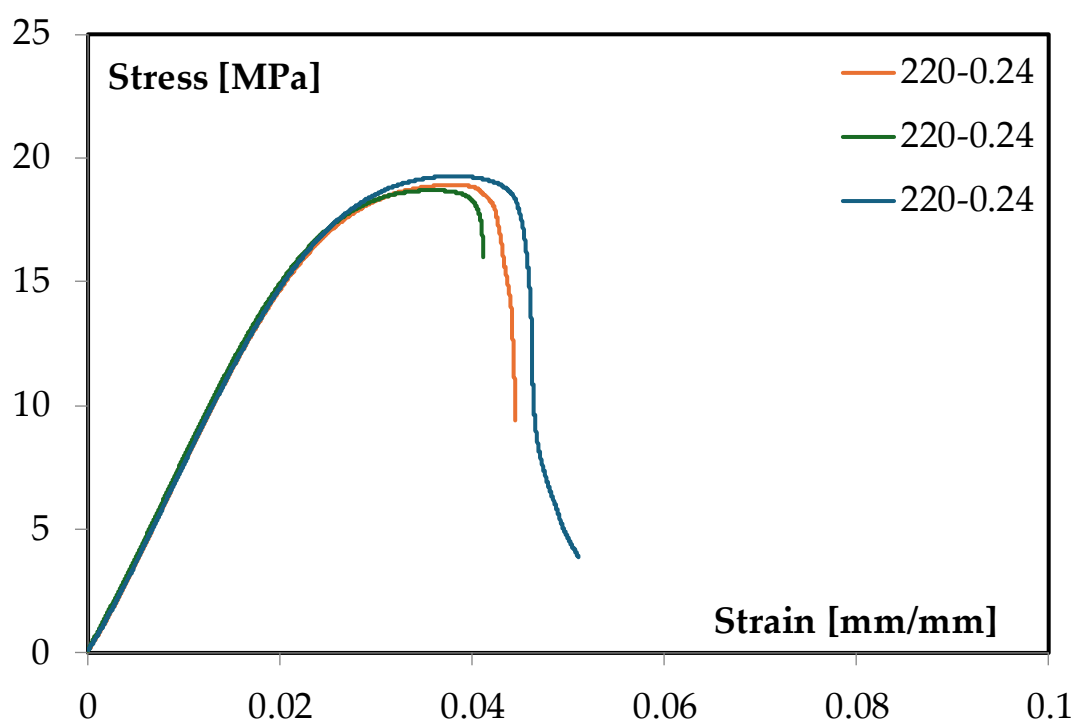


Figura 94: Grafico Sforzo-Deformazione dei provini stampati a 220 °C con layer da 0.24 mm.

Dal confronto con i risultati ottenuti per la configurazione a spessore 0,16 mm, emerge che i provini realizzati con layer da 0,24 mm presentano una deformazione a rottura leggermente superiore, indicando un comportamento meccanico più duttile. Sebbene i valori di tensione massima risultino marginalmente inferiori, l'equilibrio tra capacità resistente e deformabilità risulta più favorevole, suggerendo una migliore combinazione prestazionale. I campioni a layer sottile, al contrario, mostrano una maggiore fragilità, con rotture localizzate e capacità ridotta di assorbire deformazioni plastiche prima del cedimento. L'indagine microscopica condotta sui provini con spessore intermedio ha evidenziato un innesco della cricca in prossimità della zona centrale, seguito da una propagazione tortuosa che interagisce con la geometria interna della struttura giroide. Rispetto ai campioni con spessori inferiori, la frattura si presenta più estesa e meno lineare, confermando un comportamento meccanico più progressivo e una maggiore capacità dissipativa della struttura. Le evidenze microscopiche risultano coerenti con i dati sperimentali, supportando l'ipotesi di una transizione da rottura fragile a rottura più distribuita al crescere dello spessore del layer.

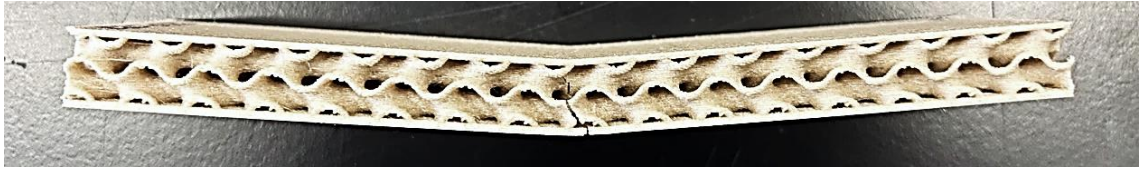


Figura 95: Provino stampato a 220 °C con layer 0.24 mm.

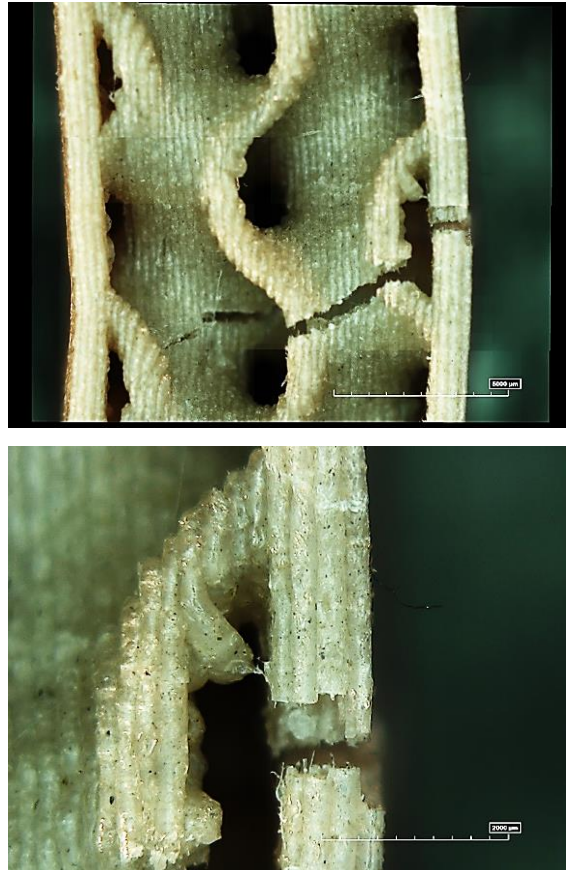


Figura 96: Dettaglio al microscopio del punto di frattura del provino stampato a 220 °C con layer 0.24 mm.

3.3.4.4.6 Lotto sperimentale – 220 °C, layer 0,28 mm

Le curve sforzo-deformazione relative ai provini stampati alla temperatura di 220 °C con spessore del layer pari a 0,28 mm mostrano una risposta meccanica altamente coerente tra le tre repliche, con fase elastica iniziale praticamente sovrapponibile e picchi di tensione ben allineati. I valori di stress massimo si attestano tra 22 e 23 MPa, mentre la deformazione a rottura si colloca nell'intervallo 0,040–0,045 mm/mm. La fase post-picco è caratterizzata da un cedimento brusco, indicativo di una rottura fragile, con propagazione repentina del danneggiamento. L'elevata sovrapposizione delle curve conferma un'eccellente ripetibilità del comportamento meccanico, a indicazione di una buona stabilità del processo di

stampa. Rispetto alle configurazioni con spessori inferiori, l'incremento del layer determina una riduzione della capacità deformativa, pur mantenendo elevata la resistenza flessionale. Il compromesso prestazionale ottenuto evidenzia la tendenza dei layer più spessi a favorire rigidità e resistenza, a scapito della duttilità, confermando quanto già osservato anche nei lotti stampati a temperatura inferiore.

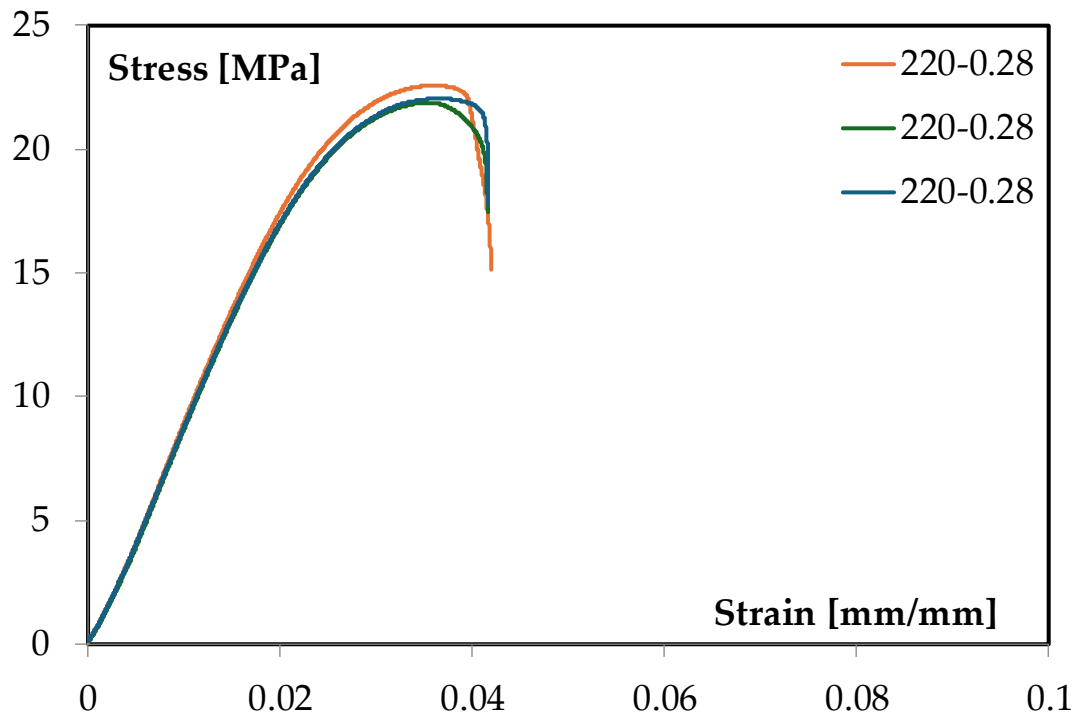


Figura 97: Grafico Sforzo-Deformazione dei provini stampati a 220 °C con layer da 0.28 mm.

L'osservazione microscopica dei provini stampati a 220 °C con spessore del layer di 0,28 mm ha evidenziato modalità di frattura coerenti con la risposta meccanica ottenuta in fase di prova. Le immagini mostrano una propagazione netta e localizzata della cricca, con traiettorie rettilinee che attraversano le pareti della struttura reticolare. Rispetto ai lotti realizzati con spessori inferiori, la frattura appare meno tortuosa e più diretta, suggerendo una ridotta interazione tra il fronte di rottura e la geometria interna. Tale comportamento risulta compatibile con il cedimento repentino osservato nelle curve sforzo-deformazione, e indica una diminuzione della capacità del materiale di assorbire energia mediante deformazione plastica. L'aumento dello spessore del layer, pur migliorando la resistenza massima, determina quindi una transizione verso un meccanismo di

rottura fragile, con ridotta dissipazione meccanica e maggiore concentrazione degli sforzi nel punto di innesco.

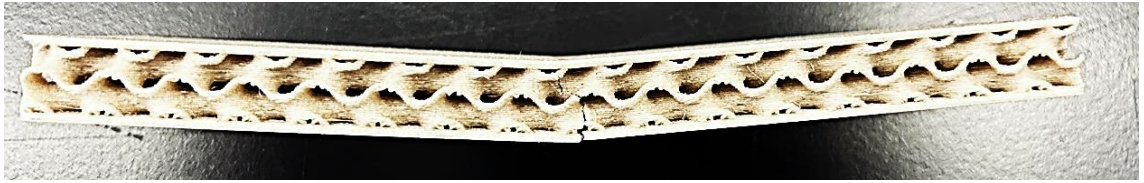


Figura 98: Provino stampato a 220 °C con layer 0.28 mm.



Figura 99: Dettaglio al microscopio del punto di frattura del provino stampato a 220 °C con layer 0.28 mm.

3.3.4.4.7 Analisi comparativa intralotto – configurazioni a temperatura di estrusione 200 °C

In questa sezione viene condotto un confronto tra i provini stampati con temperatura di estrusione costante pari a 200 °C, variando unicamente lo spessore del layer. L'obiettivo dell'analisi è valutare l'influenza di questa variabile sulle proprietà meccaniche in flessione, mantenendo inalterate tutte le altre condizioni di processo. L'interpretazione delle curve sforzo-deformazione evidenzia differenze significative in termini sia di resistenza massima sia di capacità deformativa. L'aumento dello spessore dello strato di deposizione determina un incremento della tensione massima raggiunta: i campioni con layer da 0,28 mm mostrano valori compresi tra 23 e 24 MPa e una maggiore pendenza del tratto elastico, indicativa di una rigidità più elevata. Tuttavia, questi provini presentano una deformazione a rottura inferiore, con un comportamento meccanico meno duttile e un cedimento più localizzato. Al contrario, i campioni con spessore di 0,16 mm evidenziano una maggiore deformabilità, caratterizzata da una zona post-picco più estesa e da una frattura meno repentina, suggerendo una migliore continuità strutturale interlayer, favorita dalla maggiore frequenza di deposizione. I provini con layer intermedio di

0,24 mm si collocano in una posizione transitoria tra le due configurazioni estreme: la resistenza meccanica risulta simile a quella dei campioni da 0,16 mm, mentre la capacità deformativa è leggermente ridotta. Nel complesso, l'effetto dello spessore del layer si manifesta in modo graduale e proporzionale, influenzando simultaneamente la rigidità, la resistenza e la duttilità del materiale stampato. In sintesi, l'incremento dello spessore del layer comporta un miglioramento della resistenza a flessione, accompagnato da una riduzione della duttilità complessiva del materiale stampato.

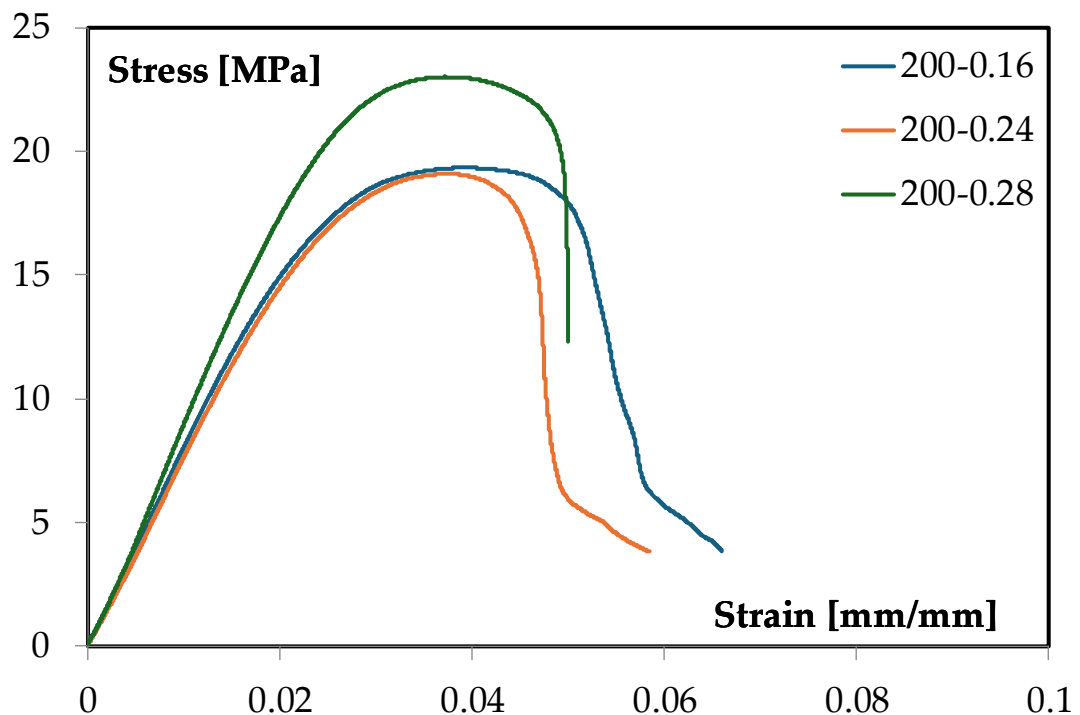


Grafico 18: Curva stress-strain comparativa – provini stampati a 200 °C con layer 0,16 mm, 0,24 mm e 0,28 mm.

3.3.4.4.8 Analisi comparativa intralotto – configurazioni a temperatura di estrusione 220 °C

Il confronto condotto in questa sezione analizza l'effetto dello spessore del layer sui provini realizzati a temperatura di estrusione costante di 220 °C, mantenendo inalterate tutte le altre condizioni operative. L'obiettivo è valutare l'influenza specifica di questa variabile sul comportamento meccanico del materiale in flessione. L'analisi delle curve sforzo-deformazione evidenzia differenze

significative sia in termini di resistenza massima che di capacità deformativa. I campioni con spessore del layer pari a 0,28 mm raggiungono i valori di stress più elevati, nell'intervallo 22–23 MPa, seguiti dai provini da 0,16 mm, con valori leggermente inferiori. Entrambe le configurazioni, tuttavia, mostrano una deformazione a rottura contenuta, compresa tra 0,040 e 0,045 mm/mm, indicativa di un comportamento meccanico rigido e scarsamente duttile. Diversamente, i campioni stampati con layer intermedio di 0,24 mm evidenziano una tensione massima inferiore, pari a circa 18 MPa, ma presentano una deformazione a rottura più estesa, suggerendo una maggiore capacità di dissipare energia attraverso deformazione plastica. Tale comportamento potrebbe essere riconducibile a un migliore compromesso tra continuità strutturale interlayer e morfologia interna del reticolo. In sintesi, anche per la temperatura di 220 °C, l'incremento dello spessore del layer si associa a un aumento della resistenza flessionale, a fronte di una riduzione della deformabilità, in linea con quanto osservato per i lotti stampati a 200 °C.

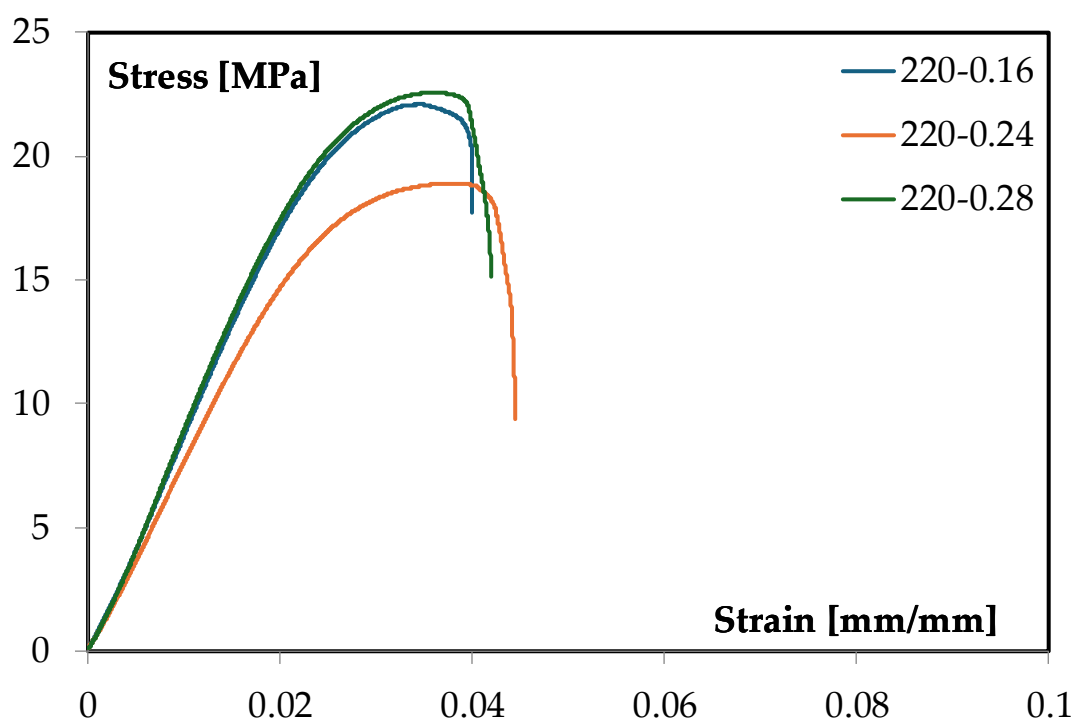


Grafico 19: Curva stress-strain comparativa – provini stampati a 220 °C con layer 0,16 mm, 0,24 mm e 0,28 mm.

3.3.4.4.9 Analisi comparativa – effetto della temperatura di estrusione su provini con layer da 0,16 mm

Il confronto presentato in questa sezione riguarda i provini realizzati con spessore del layer costante pari a 0,16 mm, variando esclusivamente la temperatura di estrusione, impostata rispettivamente a 200 °C e 220 °C. L'obiettivo è valutare l'influenza della variabile termica sulle proprietà meccaniche del materiale, mantenendo costante la geometria della struttura e le restanti condizioni di processo. L'analisi delle curve sforzo-deformazione mostra che i campioni stampati a 220 °C raggiungono valori di tensione massima superiori ai 22 MPa, mentre i provini stampati a 200 °C si attestano intorno ai 19 MPa. Questo incremento di resistenza è attribuibile a una migliore coesione interlayer favorita dalla temperatura più elevata, che determina una fusione più efficace del materiale durante la deposizione. Nonostante il vantaggio in termini di resistenza, il comportamento post-picco evidenzia una significativa differenza tra le due configurazioni. I provini stampati a 200 °C presentano una zona plastica più estesa, indicativa di una maggiore capacità di deformazione prima del collasso. Al contrario, i campioni realizzati a 220 °C mostrano una frattura più repentina e localizzata, riconducibile a un comportamento fragile. Questi risultati evidenziano il compromesso tra incremento della resistenza e perdita di duttilità associato all'aumento della temperatura di estrusione. In sintesi, l'incremento della temperatura di estrusione determina un miglioramento delle prestazioni meccaniche in termini di resistenza massima, ma può concorrere a una riduzione della duttilità globale del materiale, in particolare per configurazioni caratterizzate da spessori di layer ridotti, come quello pari a 0,16 mm.

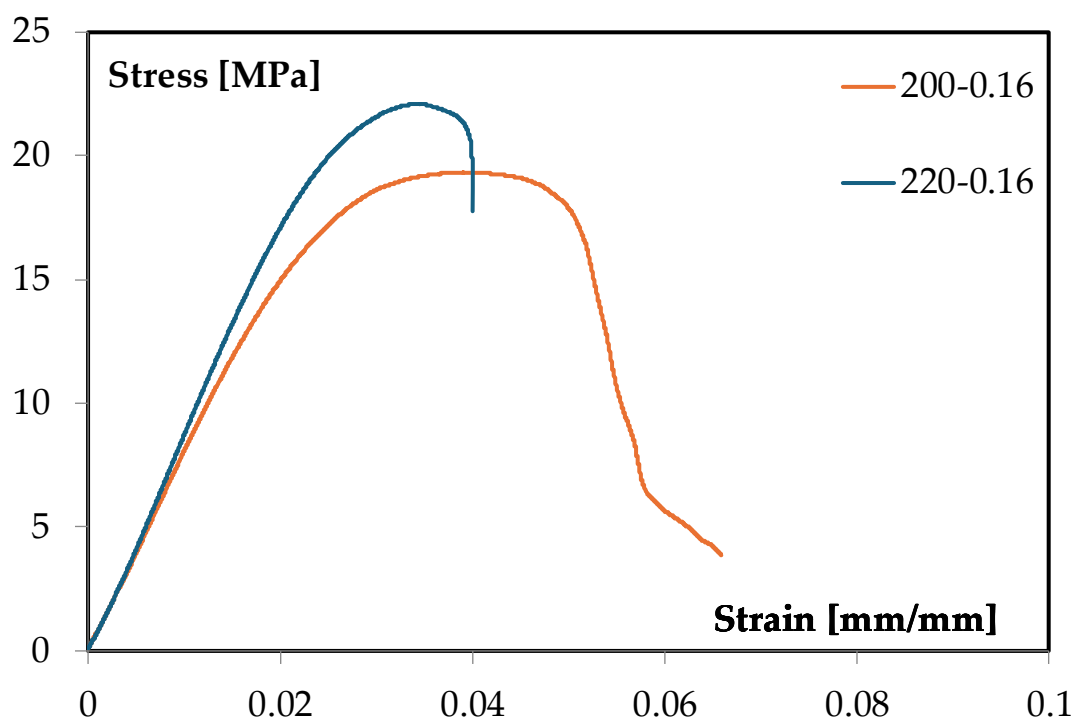


Grafico 20: Confronto delle curve Sforzo-Deformazione per i provini con layer da 0.16 mm stampati a 200 °C e 220 °C.

3.3.4.4.10 Analisi comparativa – effetto della temperatura di estrusione su provini con layer da 0,24 mm

Il presente confronto analizza il comportamento meccanico dei provini realizzati con spessore del layer pari a 0,24 mm, variando esclusivamente la temperatura di estrusione tra 200 °C e 220 °C. Mantenendo costanti le condizioni geometriche e operative, è possibile isolare l'effetto della variabile termica. Le curve sforzo-deformazione mostrano un andamento iniziale quasi identico per entrambe le configurazioni, con valori di tensione massima comparabili, attestati intorno ai 19 MPa. Le differenze significative emergono nella fase post-picco: i campioni stampati a 200 °C evidenziano una maggiore estensione della zona plastica, associata a una superiore capacità deformativa prima del collasso strutturale. Al contrario, i provini realizzati a 220 °C mostrano un comportamento più fragile, con una frattura repentina e una ridotta porzione plastica, suggerendo un abbassamento della duttilità. Questo effetto potrebbe essere riconducibile a un eccessivo apporto termico, tale da compromettere la qualità della fusione interlayer o generare disomogeneità microstrutturali. In conclusione, pur registrando valori di resistenza

flessionale simili, la configurazione a 200 °C risulta più favorevole in termini di duttilità e capacità di assorbimento della deformazione prima del cedimento.

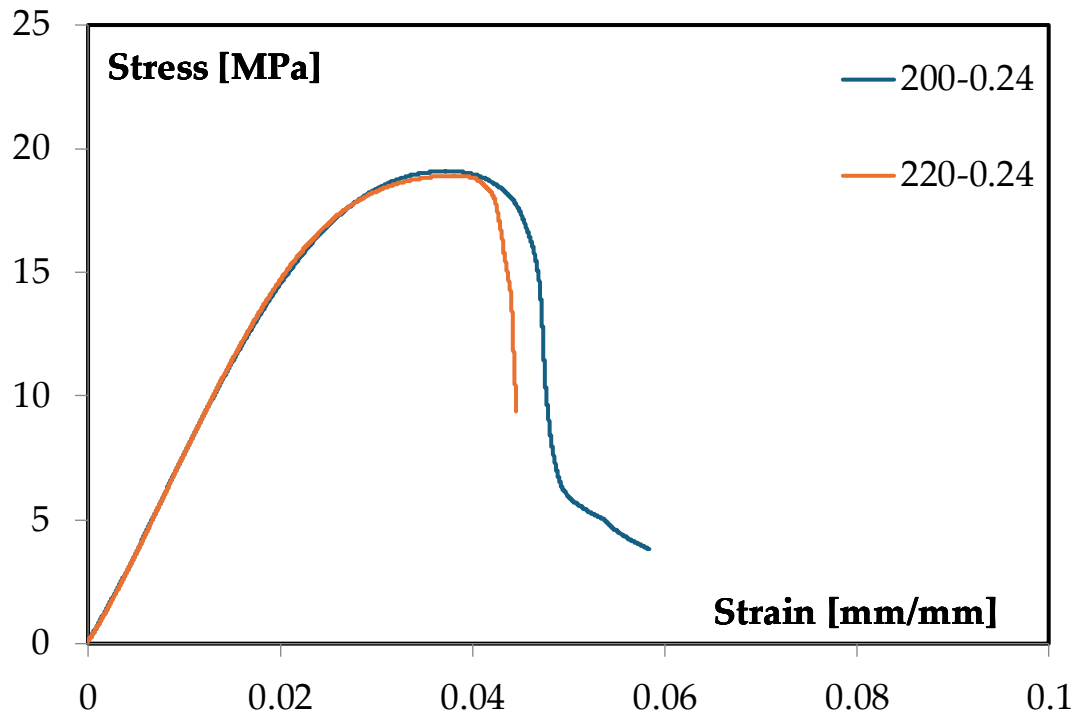


Grafico 21: Confronto delle curve Sforzo-Deformazione per i provini con layer da 0.24 mm stampati a 200 °C e 220 °C.

3.3.4.4.11 Analisi comparativa – effetto della temperatura di estrusione su provini con layer da 0,28 mm

Nel presente confronto vengono analizzati i provini caratterizzati da spessore del layer pari a 0,28 mm, realizzati mediante stampa a temperature di estrusione di 200 °C e 220 °C, con l'obiettivo di isolare l'effetto della variabile termica sulla risposta meccanica del materiale. Le curve sforzo-deformazione relative alle due configurazioni evidenziano valori di tensione massima comparabili, compresi tra 23 e 24 MPa, rappresentando i livelli di resistenza più elevati tra tutte le condizioni sperimentali investigate. Le differenze significative emergono nella fase successiva al picco: i provini stampati a 200 °C mostrano una maggiore estensione della curva post-picco, indicativa di una migliore capacità di deformazione plastica prima del collasso. Al contrario, i campioni stampati a 220 °C manifestano una rottura più repentina, con una caduta brusca dello sforzo immediatamente successiva al raggiungimento della sollecitazione massima. Tale comportamento è riconducibile

a una maggiore fragilità del materiale, potenzialmente derivante da effetti termici eccessivi che compromettono l'omogeneità microstrutturale o la qualità dell'adesione interlayer, particolarmente critica nei layer ad alto spessore. In sintesi, a parità di geometria, la configurazione stampata a 200 °C appare più bilanciata in termini di compromesso tra resistenza meccanica e duttilità, mentre l'incremento della temperatura a 220 °C, pur mantenendo elevate prestazioni in termini di carico massimo, riduce sensibilmente la capacità del materiale di assorbire deformazioni prima della frattura.

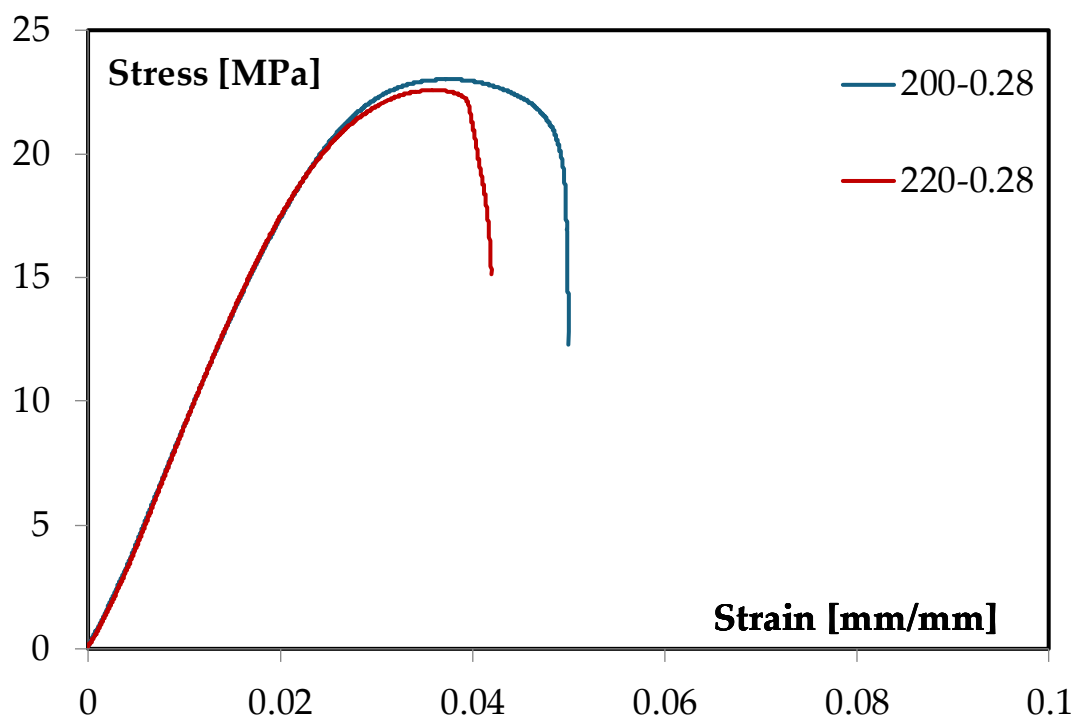


Grafico 22: Confronto delle curve Sforzo-Deformazione per i provini con layer da 0.28 mm stampati a 200 °C e 220 °C.

3.3.4.4.12 Confronto dei valori medi di tensione massima e deformazione a rottura
 Nel presente paragrafo viene effettuato un confronto tra i valori medi di tensione massima e deformazione a rottura ottenuti dai provini stampati con le sei combinazioni sperimentali previste, variando la temperatura di estrusione (200 °C e 220 °C) e lo spessore del layer (0,16 mm, 0,24 mm, 0,28 mm). L'analisi dei grafici riassuntivi, Grafico 23, evidenzia le seguenti tendenze:

- Per i campioni con layer di 0,16 mm, la tensione massima risulta significativamente più elevata nella configurazione a 220 °C, indicando un miglioramento dell'adesione interlayer determinato dalla temperatura più elevata.
- Nella configurazione intermedia, con layer di 0,24 mm, i valori medi di stress massimo risultano pressoché equivalenti tra le due condizioni termiche, suggerendo che in tale intervallo l'influenza della temperatura risulta marginale ai fini della resistenza meccanica.
- Per i campioni con layer di 0,28 mm, si registra un'inversione di tendenza: i provini stampati a 200 °C mostrano valori medi di tensione massima leggermente superiori rispetto a quelli ottenuti a 220 °C. Tale comportamento può essere attribuito a un'eccessiva esposizione termica, che in presenza di spessori elevati potrebbe compromettere la qualità della deposizione, generando discontinuità o difetti microstrutturali.

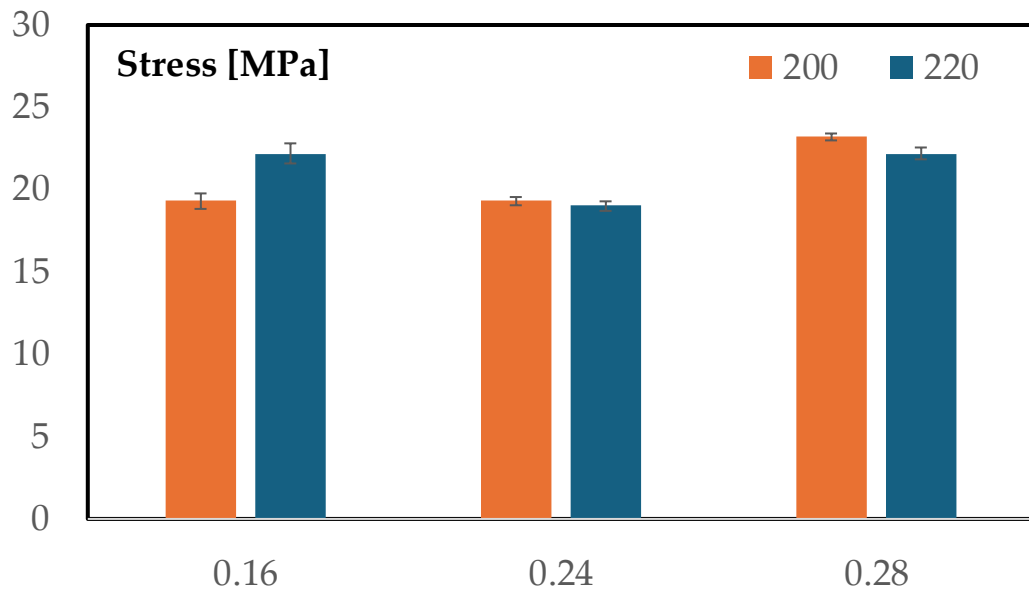


Grafico 23: Confronto dei valori medi di stress massimo al variare della temperatura e dello spessore del layer.

Dal Grafico 24, relativo ai valori medi di deformazione a rottura, si osservano le seguenti tendenze:

- I campioni stampati alla temperatura di 200 °C mostrano, in media, una deformazione maggiore rispetto a quelli realizzati a 220 °C, in particolare nelle configurazioni con spessore del layer pari a 0,16 mm e 0,28 mm. Questo

comportamento è indicativo di una maggiore duttilità del materiale a temperature di estrusione più contenute.

- Nel caso dello spessore intermedio (0,24 mm), le differenze tra le due condizioni termiche risultano trascurabili, con valori di deformazione sostanzialmente equivalenti, in accordo con quanto precedentemente rilevato anche per la tensione massima.

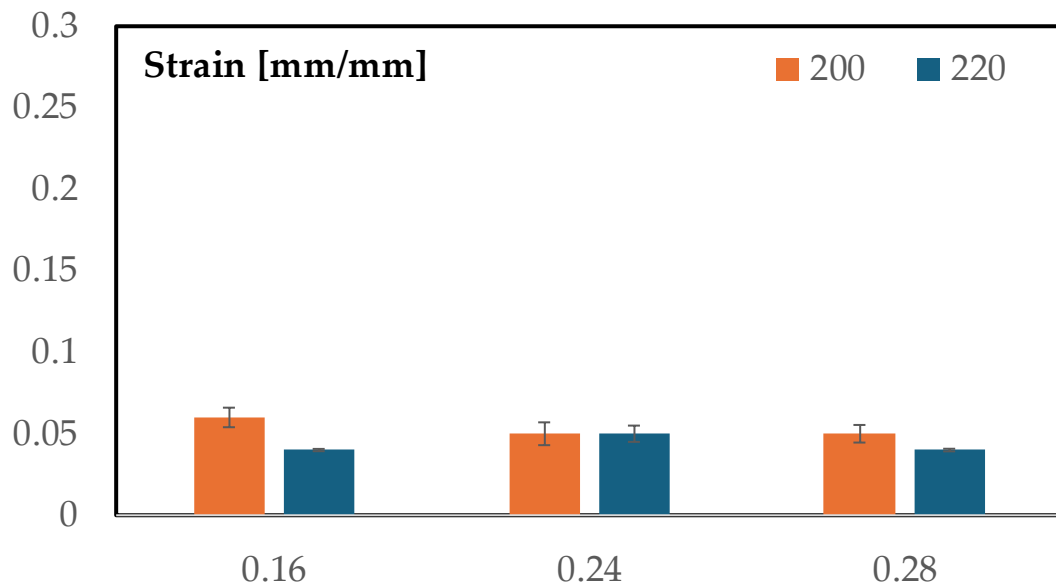


Grafico 24: Confronto dei valori medi di deformazione massima al variare della temperatura e dello spessore del layer.

3.3.4.5 Conclusioni

Lo studio condotto ha previsto la fabbricazione, mediante produzione additiva, di strutture sandwich con nucleo a geometria giroide, realizzate in materiale composito PLA rinforzato con fibre di lino. L'indagine sperimentale si è focalizzata sull'analisi dell'influenza della temperatura di estrusione (200 °C e 220 °C) e dello spessore del layer (0,16 mm, 0,24 mm, 0,28 mm) sul comportamento meccanico in flessione a tre punti. Di seguito vengono sintetizzate, per ciascuna configurazione sperimentale, le proprietà meccaniche riscontrate:

- 200 °C – 0,16 mm: comportamento meccanico caratterizzato da buona duttilità, tensione massima inferiore ai 20 MPa, frattura progressiva;
- 200 °C – 0,24 mm: risposta intermedia, resistenza compresa tra 19–20 MPa, cedimento moderatamente fragile;

- 200 °C – 0,28 mm: resistenza più elevata (23–24 MPa), ma con comportamento fragile e bassa deformabilità;
- 220 °C – 0,16 mm: incremento della resistenza (22–23 MPa), ma associato a una frattura più repentina e localizzata;
- 220 °C – 0,24 mm: valori di resistenza comparabili alla configurazione a 200 °C, ma con ridotta capacità deformativa, indicativa di comportamento fragile localizzato;
- 220 °C – 0,28 mm: buona ripetibilità e resistenza (22–23 MPa), ma accompagnata da una riduzione della deformabilità. L'analisi comparativa tra configurazioni con temperatura costante evidenzia le seguenti tendenze:
 - Per i provini stampati a 200 °C, all'aumentare dello spessore del layer si osserva un incremento della resistenza massima, con il valore più elevato per lo spessore di 0,28 mm. Tuttavia, tale incremento è accompagnato da una riduzione della capacità deformativa e da un comportamento progressivamente più fragile. I campioni da 0,16 mm mostrano la deformazione a rottura più elevata, evidenziando una risposta più duttile. I provini da 0,24 mm si collocano in posizione intermedia, con resistenza analoga a quella dei campioni a 0,16 mm ma con minore duttilità.
 - Per i provini stampati a 220 °C, la configurazione con layer da 0,28 mm conferma la resistenza massima più alta (22–23 MPa). Le differenze tra i vari spessori risultano meno marcate rispetto al lotto a 200 °C, soprattutto in termini di deformabilità: i valori di deformazione a rottura sono simili per tutte le configurazioni. Questo indica che, a temperature più elevate, l'effetto dello spessore del layer sulla duttilità tende a ridursi, pur continuando a influenzare significativamente la resistenza. Dall'analisi dei valori medi di tensione e deformazione si ricavano le seguenti considerazioni:
 - La temperatura di estrusione non determina variazioni sistematiche nei valori medi di resistenza flessionale per i diversi spessori considerati; le differenze osservate sono di entità limitata e prive di una tendenza univoca. Per quanto concerne la deformabilità, invece, si evidenzia una tendenza chiara: i provini stampati a 200 °C

mostrano, in media, una maggiore deformazione a rottura rispetto a quelli realizzati a 220 °C, indicando un comportamento meccanico complessivamente più duttile.

- Lo spessore del layer, al contrario, risulta essere una variabile significativamente influente sulla resistenza massima. In entrambe le condizioni termiche, l'aumento dello spessore da 0,16 a 0,28 mm è associato a un incremento della tensione massima sopportata. Una leggera deviazione da questa tendenza è rappresentata dal campione 220 °C – 0,16 mm, che ha mostrato una resistenza superiore rispetto alla configurazione da 0,24 mm. Tale anomalia potrebbe essere imputabile a una maggiore qualità di adesione tra i layer o a fluttuazioni locali del processo di deposizione. È possibile dunque affermare che lo spessore del layer rappresenta il parametro più incisivo sulla resistenza meccanica, con un incremento sistematico della tensione massima al crescere dello spessore da 0,16 mm a 0,28 mm. La temperatura di estrusione influisce in modo più rilevante sulla duttilità del materiale: i provini stampati a 200 °C mostrano, in media, una maggiore deformabilità e una frattura meno localizzata, mentre le configurazioni a 220 °C tendono a un cedimento più fragile. Per quanto concerne la resistenza massima, le differenze tra i due set termici non sono sistematiche: in alcune configurazioni, come per lo spessore di 0,28 mm, i campioni stampati a 200 °C hanno mostrato performance addirittura superiori. I risultati sperimentali ottenuti nel presente studio costituiscono una base solida per l'analisi del comportamento meccanico di strutture sandwich TPMS in materiale composito PLA/fibre di lino, ma al contempo aprono la strada a numerose prospettive di approfondimento.

3.3.4.6 Sviluppi futuri

Un primo sviluppo potenziale riguarda l'estensione dell'indagine sperimentale ad ulteriori parametri di processo, quali la velocità di deposizione, la densità di riempimento interna, nonché l'impiego di materiali differenziati tra le pelli esterne e l'anima centrale. Tali variabili, se opportunamente controllate, permetterebbero un'analisi più articolata dell'influenza dei parametri di stampa sulla risposta meccanica del sistema sandwich. Un secondo ambito di interesse consiste nella valutazione comparativa tra differenti tipologie di fibre naturali o altri materiali compositi biodegradabili stampabili, con l'obiettivo di costruire una mappa

prestazionale dei materiali bio-based adatti alla produzione additiva. Questo approccio consentirebbe di correlare prestazioni meccaniche e impatto ambientale, rafforzando la sostenibilità del processo produttivo. Un'estensione naturale dello studio prevede l'integrazione di prove meccaniche supplementari, quali test di trazione, compressione o impatto, al fine di ottenere una caratterizzazione meccanica multidirezionale delle strutture TPMS, più rappresentativa delle condizioni di esercizio reali. Parallelamente, l'introduzione della simulazione numerica mediante analisi agli elementi finiti (FEM) rappresenta un ulteriore ambito di sviluppo, finalizzato alla previsione del comportamento strutturale e all'ottimizzazione preventiva dei parametri operativi e geometrici. Infine, considerando i risultati ottenuti con la struttura giroide, risulterebbe opportuno estendere l'analisi ad altre configurazioni TPMS, al fine di identificare geometrie con comportamento meccanico ottimizzato in funzione dell'applicazione specifica. Tali sviluppi, se opportunamente perseguiti, avrebbero un impatto diretto sull'ampliamento delle potenzialità applicative della manifattura additiva, con ricadute nei settori industriali ad alta tecnologia, quali aerospazio, mobilità avanzata, biomedicale e design funzionale.

3.4 Manifattura additiva e strutture TPMS per scambiatori di calore innovativi

3.4.1 Introduzione al capitolo

Il capitolo è dedicato all'applicazione della manifattura additiva nella progettazione e realizzazione di scambiatori di calore innovativi, con particolare attenzione all'impiego di strutture cellulari basate su superfici minimali triplamente periodiche (TPMS). Queste geometrie, caratterizzate da un elevato rapporto superficie/volume e da una distribuzione regolare dei flussi, consentono di superare i limiti degli approcci tradizionali, migliorando l'efficienza dello scambio termico e riducendo le perdite di carico. Attraverso attività di modellazione parametrica, simulazione numerica e sperimentazione, il capitolo mostra come la stampa 3D renda possibile la fabbricazione di componenti complessi non ottenibili con tecniche convenzionali, aprendo nuove prospettive per dispositivi compatti, efficienti e scalabili. L'analisi comparativa delle diverse morfologie TPMS e la validazione sperimentale evidenziano i vantaggi dell'integrazione dell'Additive Manufacturing nello sviluppo di scambiatori di calore ad alte prestazioni, rafforzando il ruolo delle strutture cellulari come piattaforme progettuali per applicazioni energetiche avanzate. A seguire sarà proposta una trattazione teorica degli scambiatori di calore, con particolare attenzione alle configurazioni innovative rese possibili dalle strutture TPMS.”

3.4.1.1 Scambiatori di calore

Gli scambiatori di calore sono dispositivi termotecnici progettati per consentire il trasferimento controllato di energia, sotto forma di calore, tra due o più fluidi che si trovano a differenti condizioni termiche. Il principio di funzionamento si basa sull'esistenza di un gradiente di temperatura tra i fluidi, che attiva lo scambio energetico secondo i meccanismi della conduzione, convezione e, in taluni casi, dell'irraggiamento. Questi dispositivi sono ampiamente utilizzati in molteplici contesti applicativi, tra cui impianti di produzione energetica, sistemi di climatizzazione e refrigerazione, unità per il trattamento dell'aria, nonché in processi chimici e industriali che richiedono un'efficiente gestione dei flussi

termici. I fluidi coinvolti nello scambio possono presentarsi in fase liquida o gassosa, a seconda delle specifiche esigenze operative. In alcune configurazioni, gli scambiatori sono progettati per favorire una transizione di fase del fluido – ad esempio, da liquido a vapore – sfruttando i vantaggi termodinamici legati al calore latente. Inoltre, un'applicazione particolarmente comune consiste nel preriscaldamento di uno dei fluidi, con l'obiettivo di incrementare il rendimento globale del ciclo termico, ottimizzando l'uso dell'energia disponibile e riducendo le perdite termiche[72].

3.4.1.1.1 Classificazione degli scambiatori di calore

Gli scambiatori di calore possono essere classificati secondo molteplici criteri ingegneristici, che riflettono sia le modalità operative del trasferimento termico sia le caratteristiche geometriche e funzionali della struttura. Di seguito si riportano le principali categorie classificative, ciascuna delle quali risulta determinante nella selezione e progettazione del dispositivo in base al contesto applicativo.

1. In base al meccanismo di interazione tra i fluidi

Questa classificazione distingue i dispositivi in funzione della modalità con cui i fluidi coinvolti realizzano lo scambio di calore:

- A contatto indiretto: i fluidi scorrono in canali separati, isolati da una superficie solida che consente esclusivamente il trasferimento di calore, impedendo qualsiasi scambio di massa.
- A contatto diretto: i fluidi interagiscono fisicamente all'interno dello stesso volume, mescolandosi e realizzando uno scambio simultaneo di calore e massa.

2. In base alla configurazione costruttiva

La struttura geometrica e il principio di funzionamento meccanico costituiscono un altro criterio fondamentale per la classificazione degli scambiatori:

- Scambiatori tubolari: includono dispositivi a doppio tubo, fascio tubiero e tubo a spirale; questi sono tra i più comuni e versatili, adatti a pressioni elevate.
- Scambiatori compatti: comprendono tipologie a piastre, a spirale o a pannello, caratterizzate da un'elevata superficie di scambio in rapporto al volume.
- Scambiatori con superficie estesa: utilizzano elementi alettati o lamierini per aumentare l'area utile allo scambio.
- Rigeneratori: prevedono l'alternanza ciclica del fluido caldo e freddo su una stessa massa solida (matrice fissa o rotante) che assorbe e rilascia calore.

3. In base al grado di compattezza geometrica

Un parametro ingegneristico molto utilizzato è il rapporto β , definito come la superficie di scambio termico per unità di volume del dispositivo. Esso consente di distinguere:

- Scambiatori tradizionali, per cui $\beta < 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$;
- Scambiatori compatti, per cui $\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Valori elevati di β implicano una maggiore efficienza termica ma spesso richiedono geometrie complesse, costi di produzione superiori e una gestione più delicata delle perdite di carico.

4. In base alla disposizione dei flussi

La direzione relativa con cui i fluidi attraversano lo scambiatore influisce significativamente sull'efficienza del trasferimento termico:

- Equicorrente: entrambi i fluidi scorrono nella medesima direzione lungo percorsi paralleli.
- Controcorrente: i fluidi scorrono parallelamente ma in direzioni opposte, massimizzando il gradiente termico lungo l'intero percorso.
- Flusso incrociato: i fluidi si muovono perpendicolarmente tra loro, soluzione tipica nei sistemi compatti aria-acqua.

5. In base allo stato fisico dei fluidi coinvolti

Gli scambiatori possono operare con differenti combinazioni di fase nei fluidi, tra cui:

- Gas–liquido;
- Liquido–liquido;
- Gas–gas;
- Configurazioni miste, in cui almeno uno dei fluidi subisce una transizione di fase durante lo scambio.

Tale classificazione è fondamentale per selezionare i materiali costruttivi e per valutare le condizioni operative, in particolare pressione e temperatura.

6. In base al meccanismo fisico di trasferimento del calore

I fenomeni termici che avvengono all'interno dello scambiatore possono includere:

- Conduzione: trasferimento di calore attraverso il materiale solido di separazione;
- Convezione monofase: in regime naturale o forzato, avviene tra superficie e fluido senza cambiamento di fase;
- Convezione bifase: associata a fenomeni di condensazione o evaporazione, in condizioni di moto naturale o forzato;
- Combinazione di convezione e irraggiamento: presente in casi complessi ad alta temperatura o in ambienti radiativi.

Dal punto di vista progettuale, uno dei principali parametri di efficienza risiede nell'estensione della superficie di scambio termico. Un'area maggiore consente, a parità di altre condizioni, un trasferimento energetico più efficace. Tuttavia, l'aumento di superficie spesso comporta una crescita del volume e del peso dell'apparato, con implicazioni su costi, ingombri e perdite di carico. Il parametro β rappresenta una misura sintetica utile per confrontare soluzioni diverse, tenendo conto dell'equilibrio tra ingombro volumetrico e superficie disponibile. Oltre alla superficie, un altro parametro cruciale è rappresentato dalla portata massica dei fluidi, che, insieme alla differenza di temperatura e al calore specifico, determina la potenza termica scambiata. La progettazione deve pertanto considerare in modo integrato le proprietà termofisiche dei fluidi e le condizioni operative specifiche.

Nel presente studio, l'attenzione è rivolta esclusivamente a scambiatori a flussi separati, ovvero dispositivi in cui i due fluidi circolano in circuiti isolati da pareti solide che fungono da interfaccia termica. In questa configurazione, non avviene alcuno scambio di massa tra i fluidi, ma soltanto un trasferimento di energia, realizzato per conduzione attraverso la parete e per convezione tra parete e fluido. Tali dispositivi risultano ideali nei casi in cui sia necessario garantire l'integrità e la separazione fisica dei due flussi, come ad esempio nei processi in cui uno dei fluidi è contaminante, corrosivo o presenta requisiti di purezza elevati[73].

3.4.1.1.2 Fondamenti di termodinamica del trasferimento di calore

Affinché possa avvenire un trasferimento di energia termica tra due corpi o sistemi, è imprescindibile la presenza di un gradiente di temperatura, ovvero una differenza termica spaziale che costituisce la forza motrice del processo. In termini termodinamici, il calore fluisce spontaneamente dal corpo a temperatura più elevata verso quello a temperatura inferiore, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. I meccanismi fisici che governano il trasferimento di calore si distinguono in tre fenomeni fondamentali: conduzione, convezione e irraggiamento, ciascuno dei quali opera secondo principi differenti e richiede specifiche condizioni di interfaccia e di stato dei materiali coinvolti. La conduzione termica si manifesta all'interno di un corpo solido o tra corpi a contatto diretto, ed è dovuta alla trasmissione dell'energia interna mediante interazioni microscopiche. Nei materiali solidi, tale meccanismo è descritto attraverso le vibrazioni reticolari degli atomi o, nel caso di metalli, anche mediante il movimento degli elettroni liberi. Nei fluidi – liquidi e gas – il processo avviene principalmente a seguito delle collisioni molecolari durante il moto termico casuale. La legge di Fourier descrive quantitativamente il flusso termico per conduzione in funzione del gradiente di temperatura e della conducibilità termica del materiale. La convezione implica il trasferimento di calore tra una superficie solida e un fluido adiacente in movimento, combinando la conduzione locale tra superficie e fluido e il trasporto macroscopico di massa all'interno del fluido stesso. Questo meccanismo può avvenire in forma naturale, quando il moto del fluido è indotto da differenze di densità legate alla temperatura (flusso convettivo libero), oppure in forma forzata, quando il movimento del fluido è imposto da pompe, ventilatori o altri dispositivi meccanici.

La descrizione del trasferimento convettivo richiede il ricorso a parametri adimensionali, quali il numero di Nusselt, di Reynolds e di Prandtl. L'irraggiamento termico, infine, è il meccanismo mediante il quale l'energia viene emessa sotto forma di onde elettromagnetiche da parte di qualsiasi corpo dotato di temperatura superiore allo zero assoluto. Tale emissione avviene in conseguenza della variazione negli stati energetici degli atomi o delle molecole, i quali rilasciano energia sotto forma di fotoni. A differenza degli altri due meccanismi, l'irraggiamento non richiede la presenza di un mezzo materiale per propagarsi, rendendolo il principale mezzo di trasporto termico nel vuoto. L'intensità del flusso radiativo dipende fortemente dalla temperatura assoluta del corpo emittente, secondo la legge di Stefan-Boltzmann. Per analizzare in modo semplificato il bilancio energetico di uno scambiatore di calore, è comune fare riferimento al modello canonico dello scambiatore a doppio tubo. Questa configurazione consiste in due condotti cilindrici coassiali: il fluido caldo scorre all'interno del tubo centrale, mentre il fluido freddo fluisce nell'intercapedine anulare compresa tra il tubo interno e quello esterno. Lo scambio termico avviene attraverso la parete cilindrica del tubo interno, che funge da interfaccia conduttiva tra i due circuiti. Nel definire le sezioni di riferimento, si assume convenzionalmente che la sezione 1 corrisponda all'ingresso del fluido caldo e la sezione 2 alla sua uscita. Le grandezze termodinamiche relative al fluido freddo vengono denotate con il pedice "F", mentre quelle riferite al fluido caldo riportano il pedice "C". Ad esempio, la temperatura T_{F1} indica la temperatura del fluido freddo all'ingresso o all'uscita, in funzione della configurazione adottata (equicorrente o controcorrente). Inoltre, per indicare le differenze di temperatura tra due sezioni, si utilizza la notazione $T_1 - T_2$, adottando tale convenzione per uniformare il trattamento delle variazioni termiche lungo il dispositivo. Questa configurazione semplice ma rappresentativa consente di analizzare le principali variabili di scambio e di costruire modelli predittivi utili nella fase preliminare di progetto, ponendo le basi per la successiva modellazione termofluidodinamica dei dispositivi più complessi. Durante il funzionamento di uno scambiatore di calore, il fluido a temperatura più elevata cede energia termica al fluido più freddo, con conseguente raffreddamento del primo e riscaldamento del secondo. Tale processo può essere descritto attraverso

l'applicazione del principio di conservazione dell'energia a ciascun fluido, consentendo di determinare il flusso termico scambiato in funzione delle proprietà termofisiche e delle condizioni operative. Nel caso di scambiatori in configurazione equicorrente, in cui entrambi i fluidi scorrono parallelamente nella medesima direzione, il bilancio energetico fornisce le seguenti relazioni:

$$|\dot{Q}_C| = c_C \dot{M}_C (T_{C1} - T_{C2})$$

$$|\dot{Q}_F| = -c_F \dot{M}_F (T_{F1} - T_{F2})$$

Nel caso di scambiatori in configurazione controcorrente, in cui i fluidi scorrono parallelamente ma in direzione opposta, le relazioni risultano formalmente analoghe, ma si osserva una diversa distribuzione dei gradienti termici lungo il percorso:

$$|\dot{Q}_C| = c_C \dot{M}_C (T_{C1} - T_{C2})$$

$$|\dot{Q}_F| = c_F \dot{M}_F (T_{F1} - T_{F2})$$

In queste equazioni:

- $|\dot{Q}_C|$ e $|\dot{Q}_F|$ rappresentano i flussi termici relativi rispettivamente al fluido caldo e al fluido freddo (in valore assoluto),
- c_C e c_F sono i calori specifici dei due fluidi,
- $\dot{M}_C$ e $\dot{M}_F$ indicano le rispettive portate massiche,
- T_{C1}, T_{C2} sono le temperature di ingresso e uscita del fluido caldo,
- T_{F1}, T_{F2} sono le temperature di ingresso e uscita del fluido freddo.

L'uguaglianza dei moduli dei flussi termici in condizioni ideali deriva dall'assunzione di isolamento termico del sistema e assenza di dispersioni verso l'esterno. Un ulteriore parametro fondamentale per la progettazione e l'analisi delle prestazioni degli scambiatori è la differenza di temperatura media logaritmica (ΔT_{ml}), che costituisce un indice rappresentativo del gradiente termico medio effettivo tra i due fluidi lungo l'intero scambiatore. Essa viene introdotta poiché, durante il processo, la temperatura dei fluidi non varia linearmente ma secondo un andamento esponenziale, dovuto alla natura del trasferimento termico. Il calcolo

della ΔT_{ml} avviene secondo espressioni differenti a seconda della configurazione del flusso:

- Per scambiatori in equicorrente:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{C1} - T_{F1}) - (T_{C2} - T_{F2})}{\ln\left(\frac{(T_{C1} - T_{F1})}{(T_{C2} - T_{F2})}\right)}$$

- Per scambiatori in controcorrente:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{C1} - T_{F1}) - (T_{C2} - T_{F2})}{\ln\left(\frac{(T_{C1} - T_{F1})}{(T_{C2} - T_{F2})}\right)}$$

Nel primo caso, la differenza di temperatura viene calcolata tra i fluidi in ingresso e in uscita nella stessa direzione, mentre nel secondo caso si considera il fluido freddo in uscita opposto al fluido caldo in ingresso, in accordo alla geometria del flusso. Questa formulazione logaritmica fornisce una media pesata del gradiente termico, più accurata rispetto a una media aritmetica, e rappresenta una delle grandezze fondamentali per la valutazione dell'efficacia termica del sistema e per il dimensionamento della superficie di scambio necessaria a soddisfare una data richiesta energetica[74,75].

3.4.1.1.3 Efficacia termica dello scambiatore: formulazione ε -NTU

La valutazione quantitativa delle prestazioni di uno scambiatore di calore può essere effettuata attraverso differenti approcci analitici, scelti in funzione delle grandezze termodinamiche disponibili. In presenza di dati noti riguardanti le temperature di ingresso e uscita dei fluidi, le portate massiche e i rispettivi calori specifici, risulta particolarmente efficace l'impiego del metodo ε -NTU (Effectiveness-Number of Transfer Units), formalizzato da London e Seban nel 1942, ampiamente utilizzato nella progettazione e nell'analisi comparativa dei sistemi di scambio termico. In tale formulazione, il flusso termico effettivamente trasferito all'interno dello scambiatore viene espresso come prodotto tra l'efficacia del dispositivo, la capacità termica minima tra i due fluidi e il salto termico disponibile in ingresso. L'equazione fondamentale del metodo è la seguente:

$$Q = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{C1} - T_{F1})$$

dove:

- Q rappresenta la potenza termica effettivamente scambiata,
- ε è il parametro adimensionale che esprime l'efficacia dello scambiatore,
- C_{min} è la capacità termica inferiore tra i due fluidi, calcolata come prodotto tra portata massica e calore specifico ($C=M \cdot c_p$),
- $T_{C1} - T_{F1}$ sono, rispettivamente, le temperature di ingresso del fluido caldo e del fluido freddo.

L'efficacia ε fornisce quindi una misura diretta del grado di utilizzo termico dello scambiatore, in quanto definita come rapporto tra il calore effettivamente trasferito e il massimo calore teoricamente trasferibile in condizioni ideali. Essa può essere espressa anche nella forma:

$$\varepsilon = \frac{Q_{scambiata}}{Q_{max,scambiabile}}$$

Il valore di ε è sempre compreso tra 0 e 1, dove:

$\varepsilon=0$ indica assenza di scambio termico,

$\varepsilon=1$ corrisponde al trasferimento massimo teoricamente possibile, compatibile con il salto termico iniziale e la capacità termica minima.

$$\varepsilon = \phi (NTU, C^*, \text{disposizione del flusso})$$

L'efficacia dipende dalla geometria dello scambiatore, dal regime di flusso e da due parametri fondamentali:

1. Il numero di unità di trasferimento (Number of Transfer Units, NTU), definito come:

$$NTU = \frac{U A}{C_{min}}$$

oppure, in forma integrale:

$$NTU = \frac{1}{C_{min}} \int U dA$$

dove:

- U è il coefficiente globale di scambio termico (comprensivo di conduzione, convezione interna ed esterna, e resistenze di parete),
- A rappresenta la superficie totale disponibile per lo scambio.

2. Il rapporto di capacità termica normalizzato, indicato come C^* , che rappresenta la frazione tra la capacità termica minima e quella massima dei due fluidi:

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Il valore dell'efficacia ε è pertanto una funzione delle variabili adimensionali NTU e C^* , nonché della configurazione del flusso (equicorrente, controcorrente, incrociato, ecc.), e può essere ottenuto mediante formule analitiche o, più frequentemente, tramite l'utilizzo di grafici e diagrammi empirici costruiti a partire da modelli semplificati. Questi strumenti permettono di dimensionare lo scambiatore in fase di progetto oppure di verificarne le prestazioni in fase operativa. In conclusione, il metodo ε -NTU rappresenta un riferimento essenziale nella termofluidodinamica applicata, in quanto consente di correlare le grandezze misurabili con i parametri geometrici e prestazionali del sistema, costituendo una base solida per l'ottimizzazione del progetto termico[76,77].

3.4.1.2 Scambiatori di calore con TPMS

Negli ultimi anni, la ricerca ingegneristica ha evidenziato un crescente interesse verso l'impiego di geometrie complesse basate su superfici minime triplamente periodiche (Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS) come interfacce per lo scambio termico all'interno di scambiatori di calore compatti[78–81]. L'obiettivo principale di tale approccio progettuale è duplice: da un lato incrementare significativamente la superficie specifica disponibile per il trasferimento termico; dall'altro, promuovere configurazioni di flusso che inducano turbolenze controllate e migliorino l'efficienza dello scambio convettivo[82]. Le strutture TPMS, grazie alla loro topologia continua, priva di discontinuità geometriche e caratterizzata da

connettività tridimensionale, sono in grado di generare moti elicoidali lungo la direzione del flusso. Tali fenomeni fluidodinamici si manifestano con un'intensificazione del gradiente di velocità, che contribuisce alla riduzione dello spessore dello strato limite termico e favorisce una miscelazione più efficace dei fluidi, incrementando così il coefficiente locale di scambio termico. Inoltre, questi flussi eccentrici favoriscono l'autopulizia delle superfici, facilitando la rimozione di particolato e residui solidi eventualmente presenti nel canale[83,84]. Analisi numeriche disponibili in letteratura hanno evidenziato che determinate configurazioni TPMS, quali Neovius e I-WP, inducono accelerazioni e decelerazioni periodiche del flusso, generando vortici localizzati che incrementano l'intensità del trasporto convettivo. Al contrario, le geometrie di tipo "Primitive" presentano elevate prestazioni nei tratti soggetti a contrazione superficiale, ma risultano penalizzate nei rami a bassa velocità dove si instaurano regioni di riflusso, riducendo l'efficienza termica globale. Una classificazione dei modelli di flusso all'interno delle strutture TPMS può essere basata sulla presenza o assenza di fori passanti nella proiezione in pianta della struttura solida. In particolare, i modelli privi di fori passanti risultano più favorevoli al potenziamento dello scambio termico convettivo, poiché ostacolano l'instaurarsi di percorsi preferenziali e promuovono una distribuzione più uniforme della velocità. Diversi confronti tra configurazioni TPMS e soluzioni convenzionali hanno analizzato le prestazioni termiche e fluidodinamiche di strutture come Diamond, Gyroid, I-WP e di sistemi con alette (Fins). In tali confronti, la temperatura media di uscita del fluido diminuisce al crescere della complessità geometrica, con la struttura Giroide che tende a garantire le migliori prestazioni in termini di dissipazione termica. Risultati sperimentali e simulativi indicano che, rispetto a scambiatori a flusso incrociato tradizionali, l'impiego di strutture TPMS come la Giroide può determinare incrementi dell'efficacia termica fino al 35%, in funzione del numero di unità di trasferimento (NTU) e del rapporto tra le capacità termiche[84,85]. Inoltre, per numeri di Reynolds compresi tra 200 e 500, è stato osservato un miglioramento prestazionale compreso tra il 90% e il 110% rispetto a scambiatori a piastre, con prestazioni superiori anche rispetto a configurazioni reticolari a traliccio. Un ulteriore vantaggio delle strutture TPMS risiede nelle loro eccellenti proprietà

meccaniche. La loro configurazione geometrica continua, priva di nodi critici, conferisce una resistenza elevata alla fatica e un comportamento meccanico superiore sotto carichi uniassiali rispetto a strutture reticolari convenzionali, quali quelle a corpo centrato cubico (BCC) o a capriate. In particolare, la configurazione Giroide in versione sheet ha mostrato i migliori risultati in termini di stabilità meccanica, rigidità, sforzo di snervamento e tenacità, rendendola particolarmente idonea per applicazioni in ambienti critici, come quello aerospaziale o automobilistico. Le strutture TPMS possono essere suddivise in due categorie principali: TPMS-sheet e TPMS-solid. Nelle prime, la superficie minima divide lo spazio tridimensionale in due domini continui e non interconnessi; nelle seconde, uno dei due domini viene completamente solidificato, ottenendo una struttura massiva. Questa classificazione geometrica ha impatti significativi sia sulle proprietà fluidodinamiche che sul comportamento meccanico del sistema. Dal punto di vista della modellazione e fabbricazione, uno degli aspetti più critici nell'applicazione delle strutture TPMS riguarda la generazione corretta dei modelli geometrici tridimensionali, sia per l'analisi numerica che per la produzione mediante manifattura additiva. Le superfici TPMS sono infatti definite matematicamente attraverso equazioni implicite contenenti funzioni trigonometriche. A partire da tale definizione, è possibile generare due varianti geometriche distinte: la prima consiste nell'ispessimento della superficie minima, ottenendo una configurazione sheet; la seconda nella solidificazione di uno dei domini spaziali individuati dalla superficie, generando così una struttura solid. È rilevante sottolineare che, sebbene le superfici TPMS siano state introdotte concettualmente già nel XIX secolo da Hermann Schwarz, la loro applicazione pratica è stata resa possibile solo a partire dai primi anni 2000, grazie allo sviluppo delle tecnologie di manifattura additiva. Queste tecnologie, basate sulla deposizione strato per strato di materiale, hanno consentito la realizzazione fisica di geometrie altrimenti non fabbricabili con metodi convenzionali sottrattivi o formativi. L'integrazione di superfici TPMS negli scambiatori di calore rappresenta una direzione di ricerca estremamente promettente, in grado di coniugare elevate prestazioni termiche con requisiti meccanici stringenti. La versatilità di queste strutture, unita alla possibilità di adattarne parametricamente le proprietà attraverso

modifiche della funzione generatrice, le rende candidati ideali per una nuova generazione di dispositivi termofluidici ottimizzati.

3.4.2 Modellazione e ottimizzazione di scambiatori di calore innovativi realizzati tramite tecniche di additive manufacturing

3.4.2.1 Abstract

Nel presente studio è stata condotta l'attività di modellazione e realizzazione di uno scambiatore di calore innovativo mediante tecnologie di additive manufacturing. I recenti avanzamenti tecnologici rendono oggi possibile la progettazione di geometrie complesse, non ottenibili attraverso i convenzionali software CAD. A tal fine, è stata adottata la piattaforma nTopology, la quale si basa sull'utilizzo di geometrie implicite per integrare in modo efficiente le fasi di progettazione e produzione. Il lavoro include una trattazione preliminare dei principi dello scambio termico e delle tecnologie additive impiegate, seguita dalla modellazione e dalla realizzazione sperimentale di uno scambiatore di calore in configurazione semplificata, prodotto in cinque diverse varianti geometriche al fine di valutarne le prestazioni termiche e individuare la configurazione ottimale.

3.4.2.2 Introduzione

Gli scambiatori di calore rappresentano componenti fondamentali in numerosi settori industriali, dall'energia alla refrigerazione, e il loro miglioramento costituisce un tema di ricerca di grande rilevanza[86,87]. Le soluzioni tradizionali, pur consolidate, mostrano limiti nel raggiungere configurazioni geometriche in grado di massimizzare l'efficienza termica senza penalizzare compattezza e leggerezza. L'evoluzione delle tecniche di progettazione computazionale e l'avvento della manifattura additiva aprono oggi la possibilità di concepire architetture interne complesse, difficilmente realizzabili con i metodi convenzionali, che offrono nuovi margini di ottimizzazione. In questo contesto si colloca il lavoro presentato, finalizzato a indagare l'integrazione tra modellazione avanzata e stampa 3D nella realizzazione di scambiatori di calore innovativi. L'attenzione è rivolta in particolare alle geometrie cellulari periodiche, che permettono di coniugare un'elevata superficie di scambio con una distribuzione omogenea dei flussi. L'attività svolta costituisce un passo significativo verso la definizione di criteri progettuali e produttivi specifici per componenti termici di

nuova generazione, aprendo la strada a sviluppi futuri in cui efficienza e libertà geometrica possano essere pienamente valorizzate[88].

3.4.2.3 Materiali e metodi

L'attività sperimentale è stata finalizzata alla progettazione e realizzazione di uno scambiatore di calore semplificato impiegando cinque differenti morfologie di strutture Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS): Giroide, Schwartz Primitive, Schwartz Diamond, Lidnoid e Split Primitive. Ciascuna struttura è stata modellata imponendo parametri geometrici identici in termini di dimensione unitaria della cella e spessore delle pareti, al fine di assicurare un confronto quantitativo uniforme e scientificamente attendibile tra le varie configurazioni topologiche. La modellazione parametrica e la generazione delle rispettive geometrie sono state eseguite mediante il software nTopology, che consente di operare su modelli a geometria implicita e risulta particolarmente idoneo per la creazione di strutture porose complesse da destinare a processi di additive manufacturing.

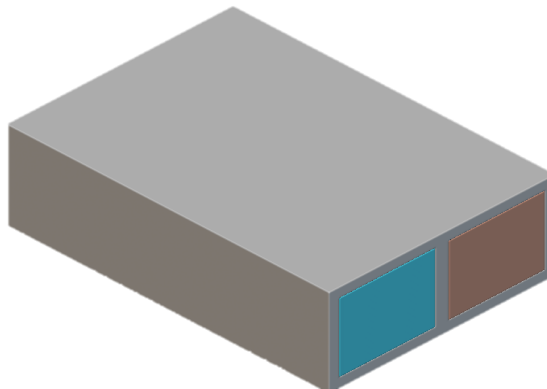


Figura 100: Geometria esterna dello scambiatore di calore

I parametri progettuali dello scambiatore di calore sono stati mantenuti costanti per tutte le configurazioni TPMS considerate, al fine di garantire coerenza nella valutazione comparativa delle prestazioni. Le specifiche geometriche adottate sono le seguenti:

- Altezza delle tubazioni: 250 mm
- Spessore delle pareti esterne: 70 mm
- Interasse tra le tubazioni laterali (sinistra e destra): 30 mm

- Spessore dei deflettori (baffles): 6,35 mm
- Spessore delle pareti delle strutture TPMS: 6 mm
- Dimensione unitaria delle celle: 60 mm

Successivamente, viene condotta un'analisi dettagliata sull'impatto morfologico e funzionale di ciascuna struttura TPMS sulla configurazione dello scambiatore, esaminando le caratteristiche specifiche di ogni geometria e la relativa influenza sui parametri termo-fluidodinamici del sistema.

3.4.2.3.1.1 Giroide

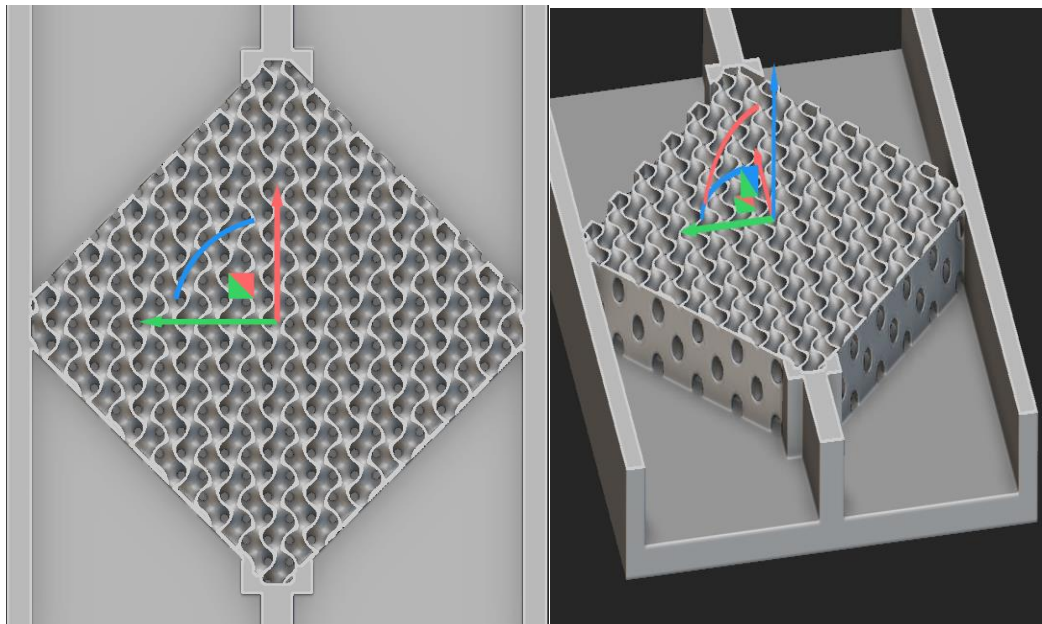


Figura 101: Sezione geometria Giroide

- Numero di unità di cella: 329

Dimensioni delle tubazioni:

- Larghezza: 533,4972 mm
- Lunghezza: 1055,9943 mm

Volumi dei fluidi:

- Volume di riempimento dello scambiatore: 71.154.804,8972 mm³
- Volume del fluido caldo: 81.432.820,9239 mm³
- Volume del fluido freddo: 81.206.309,0874 mm³

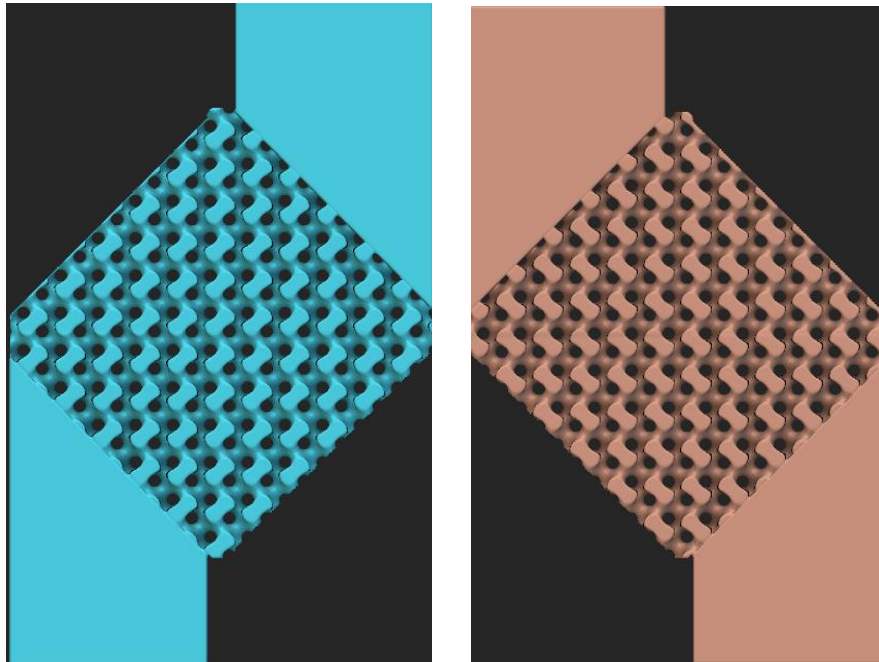


Figura 102: Fluido freddo e fluido caldo giroide

3.4.2.3.1.2 Schwartz Primitive

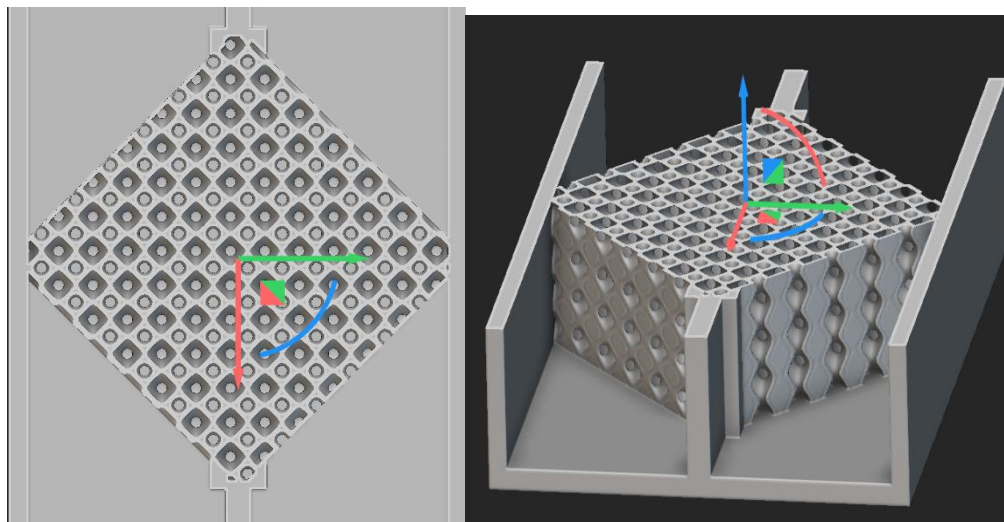


Figura 103: Sezione geometria Schwartz Primitive

- Numero di unità di cella: circa 377

Dimensioni delle tubazioni:

- Larghezza: 570,7277 mm
- Lunghezza: 1141,4554 mm

Volumi dei fluidi:

- Volume di riempimento dello scambiatore: 81.432.523,9855 mm³

- Volume del fluido caldo: 88.950.603,0983 mm³
- Volume del fluido freddo: 87.232.728,6173 mm³
- Volume delle tubazioni con deflettori: 117.628.851,8384 mm³

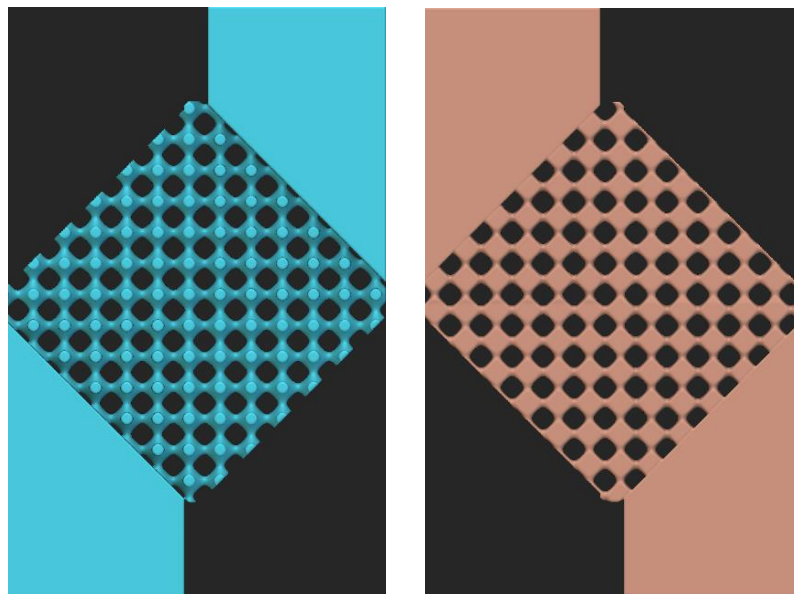


Figura 104: Fluido freddo e fluido caldo Schwartz Primitive

3.4.2.3.1.3 Diamante

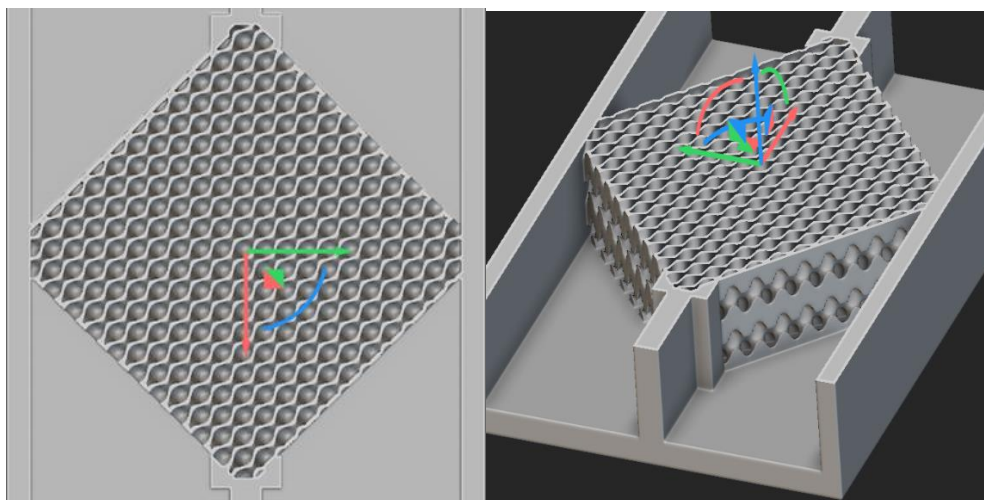


Figura 105: Sezione geometria Diamante

- Numero di unità di cella: circa 269

Dimensioni delle tubazioni:

- Larghezza: 482,6324 mm
- Lunghezza: 965,2649 mm

Volumi dei fluidi:

- Volume di riempimento dello scambiatore: 58.233.517,6443 mm³
- Volume del fluido caldo: 64.383.437,1189 mm³
- Volume del fluido freddo: 64.402.401,2622 mm³
- Volume delle tubazioni con deflettori: 81.476.639,8417 mm³

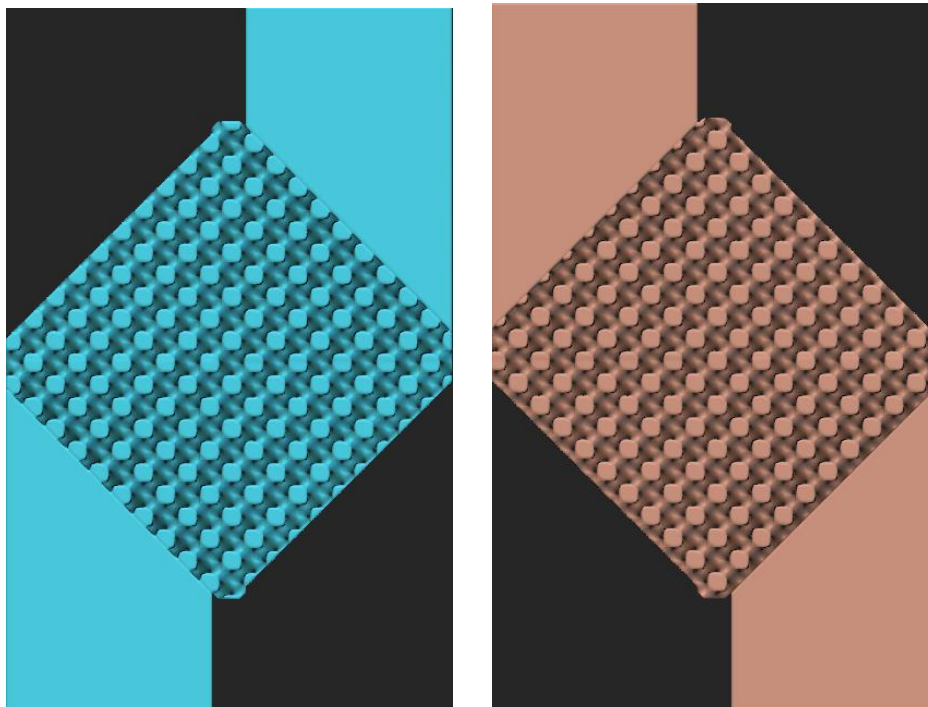


Figura 106: Fluido freddo e fluido caldo Diamante

3.4.2.3.1.4 Lidnoid

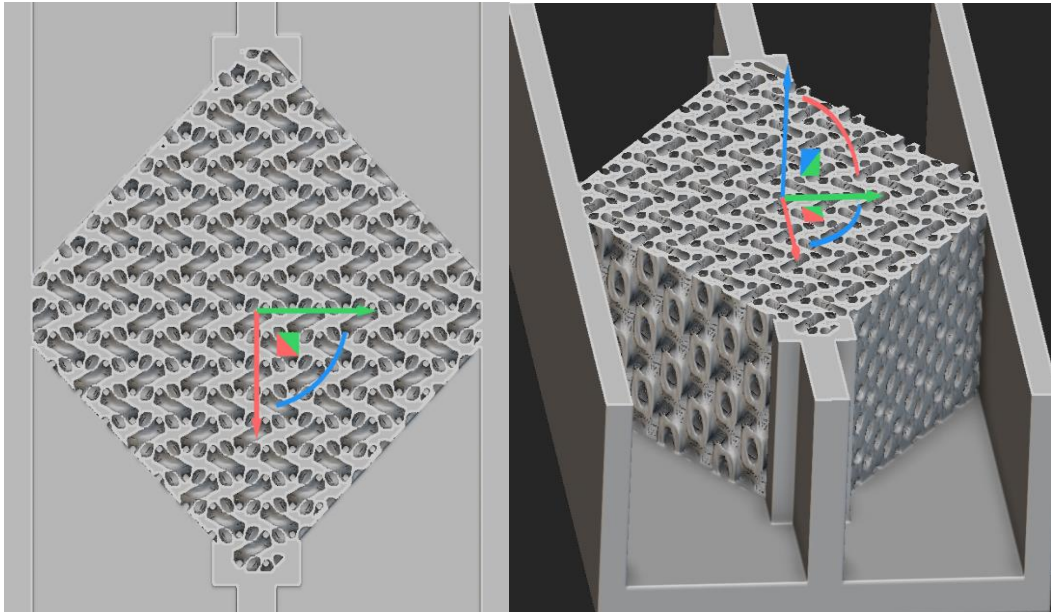


Figura 107: Sezione geometria Lidnoid

- Numero di unità di cella: circa 194

Dimensioni delle tubazioni:

- Larghezza: 409,3455 mm
- Lunghezza: 818,6911 mm

Volumi dei fluidi:

- Volume di riempimento dello scambiatore: 41.890.941,4215 mm³
- Volume del fluido caldo: 38.026.242,3628 mm³
- Volume del fluido freddo: 46.899.749,455 mm³
- Volume delle tubazioni con deflettori: 66.495.580,698 mm³

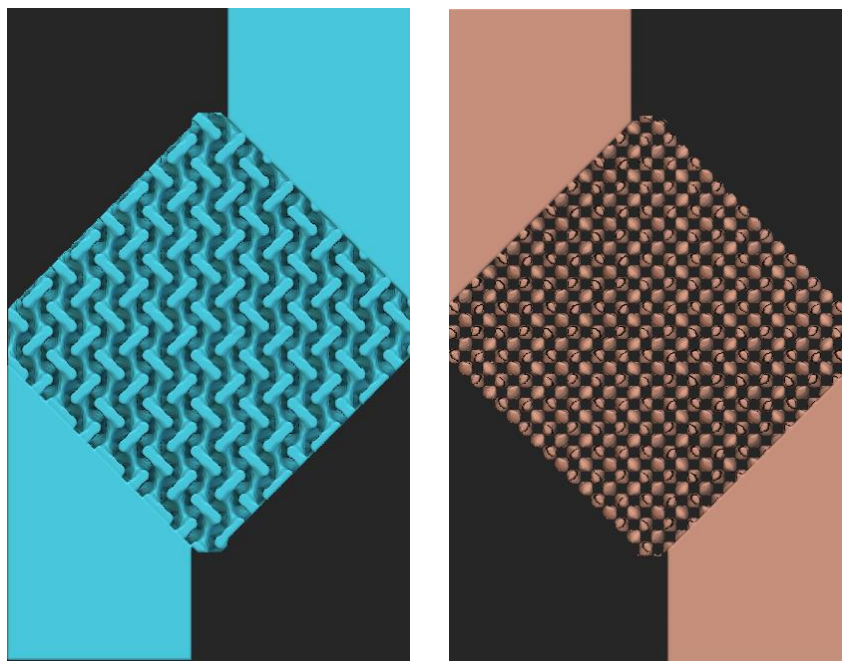


Figura 108: Fluido freddo e fluido caldo Lidinoid

3.4.2.3.1.5 Split Primitive

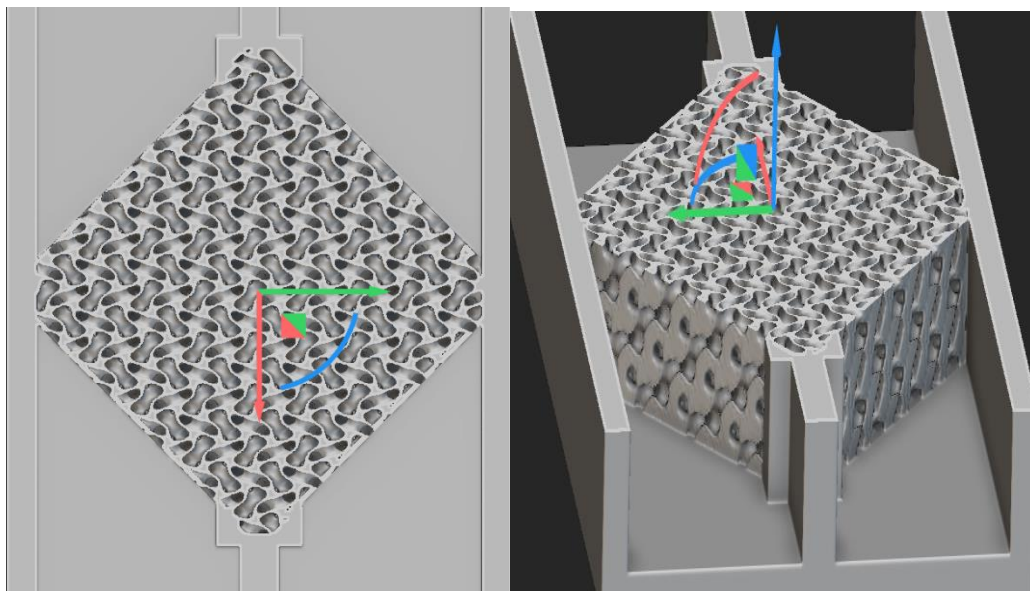


Figura 109: Sezione geometria Split P

- Numero di unità di cella: circa 201

Dimensioni delle tubazioni:

- Larghezza: 417,4055 mm
- Lunghezza: 834,8109 mm

Volumi dei fluidi:

- Volume di riempimento dello scambiatore: 43.556.832,477 mm³
- Volume del fluido caldo: 46.758.456,6175 mm³
- Volume del fluido freddo: 45.783.905,6361 mm³
- Volume delle tubazioni con deflettori: 64.925.277,899 mm³

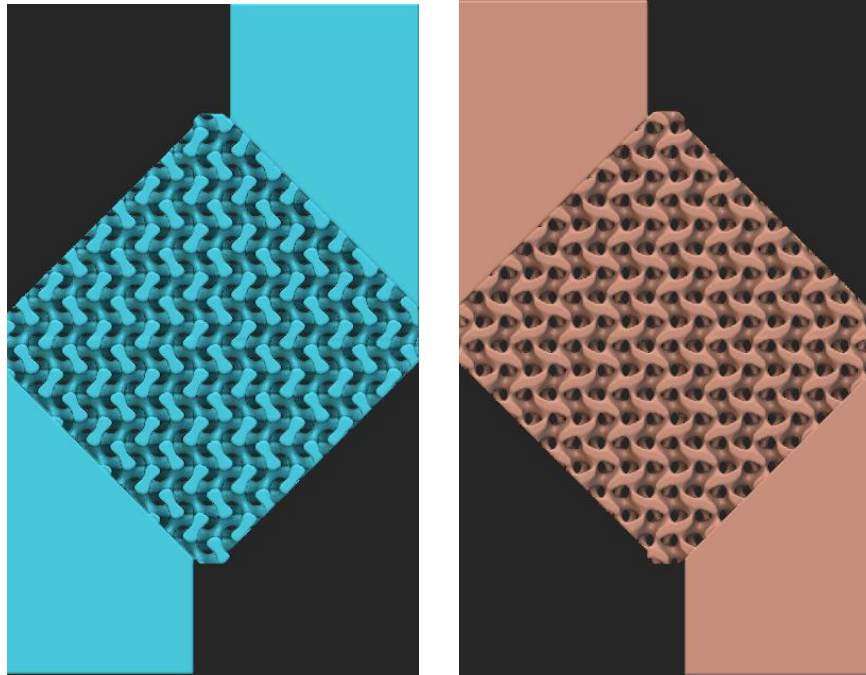
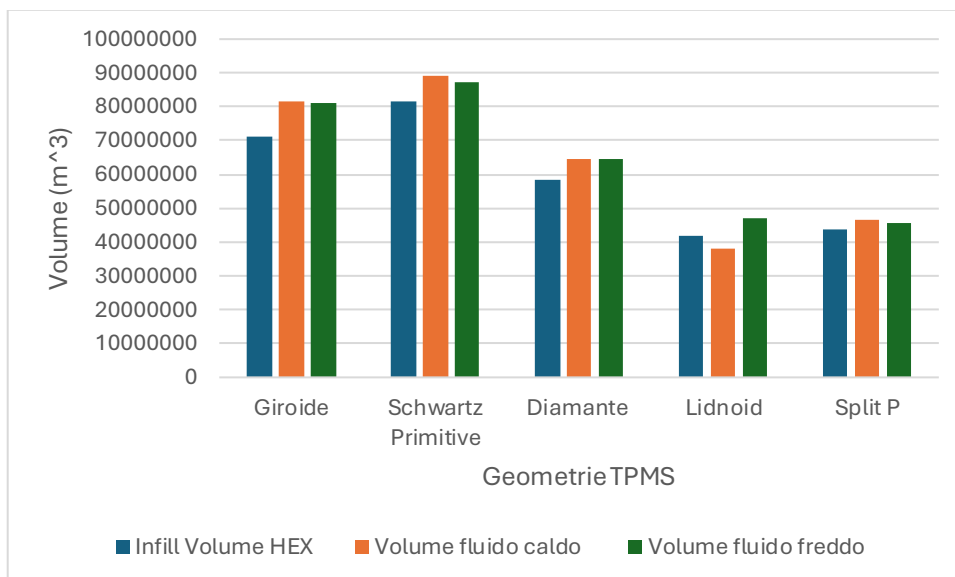


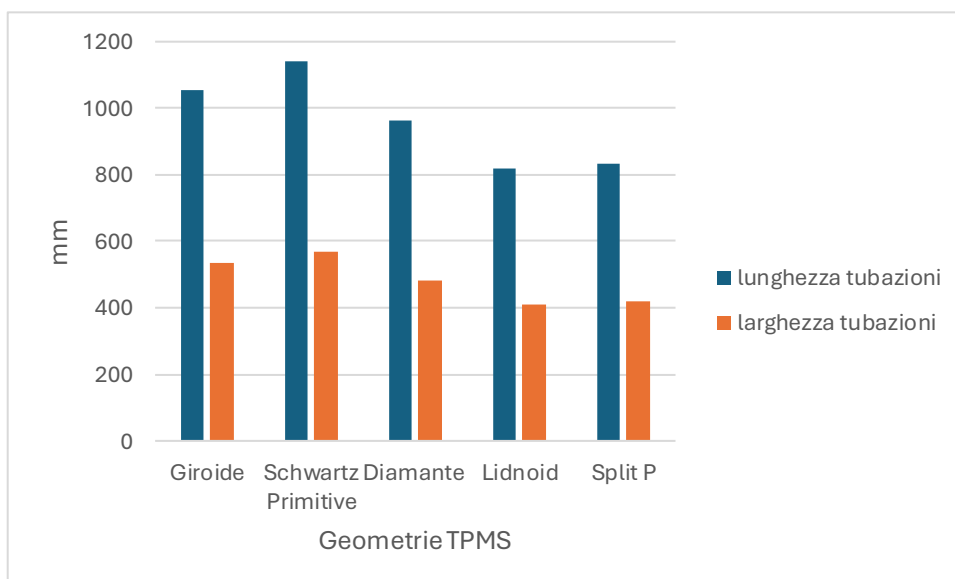
Figura 110: Fluido freddo e fluido caldo Split P

Confronto tra le geometrie

Grafici di confronto: sono stati impiegati istogrammi per rappresentare in modo visivo e sistematico le variazioni tra le diverse strutture TPMS in termini di volume occupato dal fluido, parametri geometrici caratteristici e numero di unità di cella. Tali rappresentazioni grafiche permettono di evidenziare l'impatto di ciascuna configurazione geometrica sulla progettazione dello scambiatore di calore e sulle relative prestazioni termo-fluidodinamiche, fornendo uno strumento utile per l'analisi comparativa e l'ottimizzazione.

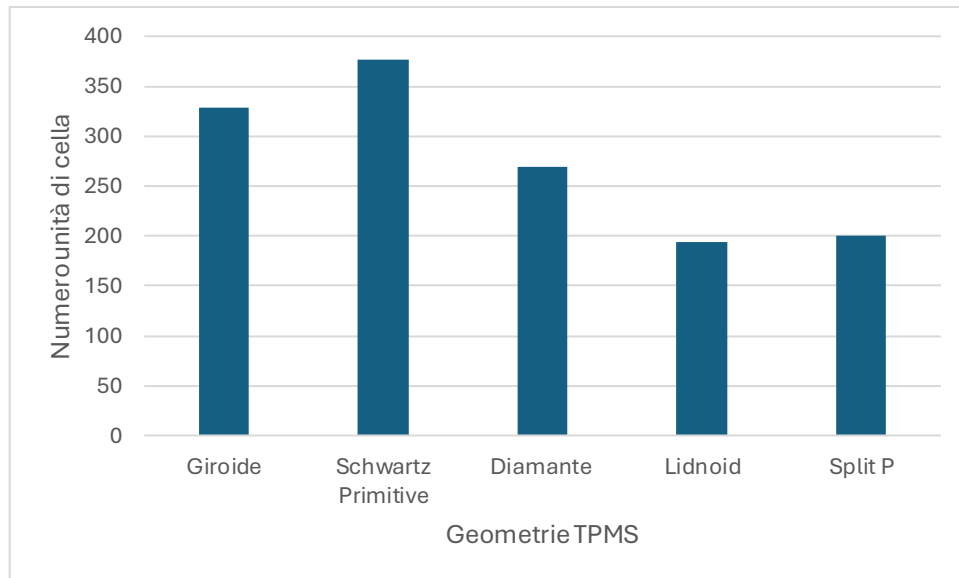


Dimensionamento delle tubazioni: ciascuna configurazione geometrica TPMS influisce in modo significativo sulle dimensioni complessive delle tubazioni all'interno dello scambiatore di calore. In particolare, la geometria denominata Schwartz Primitive determina la necessità di impiegare condotti di diametro e lunghezza maggiori rispetto a quelli richiesti dalle altre strutture analizzate, comportando un impatto rilevante sul volume totale del dispositivo e sull'efficienza della disposizione interna dei flussi.



Numero di unità di cella: A parità di dimensione unitaria delle celle, il numero totale di unità risultante all'interno del volume utile dello scambiatore differisce sensibilmente tra le varie geometrie TPMS, in funzione delle differenti

configurazioni morfologiche che ciascuna struttura presenta. Tali differenze strutturali determinano una distribuzione spaziale non uniforme delle celle, influenzando direttamente i parametri funzionali legati al trasferimento termico e alla resistenza meccanica.



Influenza sulle prestazioni termofluidodinamiche: L'incremento della portata volumetrica del fluido, come osservato nel caso della geometria Schwartz Primitive, comporta una riduzione del tempo di permanenza del fluido all'interno dello scambiatore, riducendo potenzialmente l'intervallo temporale utile per il trasferimento di calore tra i flussi caldi e freddi. Tuttavia, tale effetto può essere parzialmente compensato dall'aumento del volume totale disponibile per lo scambio termico, che può contribuire a mantenere o addirittura migliorare l'efficienza globale del sistema. La scelta della morfologia TPMS incide in maniera significativa sulle proprietà geometriche e sulle prestazioni complessive dello scambiatore di calore. Nello specifico, la configurazione Schwartz Primitive presenta vantaggi in termini di volume fluido interno e potenziale capacità di scambio termico, sebbene implichi un incremento delle dimensioni complessive delle tubazioni. Al contrario, configurazioni come Lidnoid e Split Primitive risultano in architetture più compatte, ma presentano una minore capacità volumetrica. Pertanto, la selezione della tipologia geometrica deve essere attentamente ponderata in funzione delle specifiche condizioni operative e degli

obiettivi prestazionali, al fine di ottenere un equilibrio ottimale tra ingombro, efficienza termica e perdite di carico.

Caso studio: geometria giroide

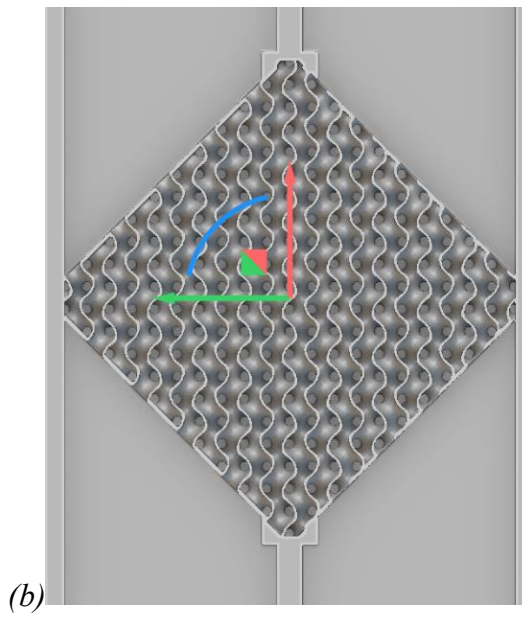
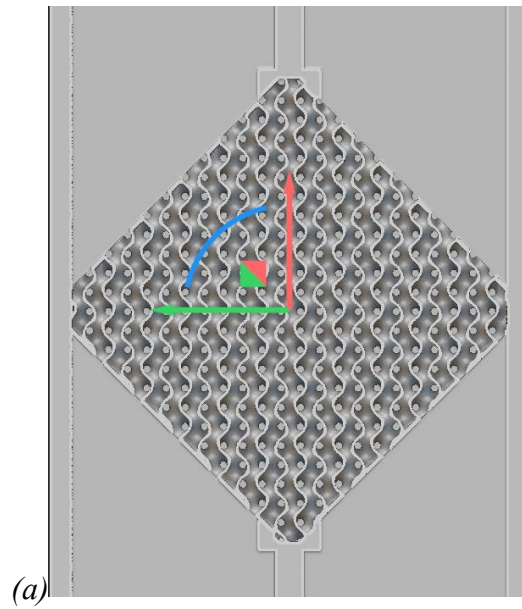
Tra le differenti configurazioni analizzate, particolare attenzione è stata rivolta alla struttura giroide, ampiamente adottata nella progettazione di scambiatori di calore in virtù delle seguenti proprietà:

- Rapporto superficie/volume ottimale tra la parete solida e i due fluidi coinvolti nello scambio termico;
- Distribuzione efficace e omogenea dei percorsi fluidodinamici, che favorisce l'interazione termica tra i due flussi;
- Elevata resistenza meccanica alla compressione, utile per applicazioni in condizioni di sollecitazioni strutturali;
- Autoportanza durante la produzione mediante additive manufacturing, riducendo o eliminando la necessità di supporti aggiuntivi.

Sulla base di tali caratteristiche, l'analisi è stata focalizzata sull'approfondimento di questa specifica configurazione geometrica. Sono stati pertanto generati tre modelli di struttura giroide, ciascuno differente per dimensione della cella elementare e spessore della parete, con l'obiettivo di valutarne l'impatto prestazionale. La scelta dei parametri dimensionali è stata condotta tenendo conto sia della densità del fluido adottato sia della necessità di contenere la caduta di pressione all'interno del componente.

Dimensioni di Cella

Sono state sperimentalmente considerate tre differenti configurazioni geometriche, caratterizzate da dimensioni della cella pari a 60 mm, 80 mm e 100 mm. Nella figura seguente sono riportate le rappresentazioni grafiche delle rispettive strutture, con l'obiettivo di evidenziare le variazioni morfologiche derivanti dall'incremento della dimensione unitaria della cella TPMS adottata.



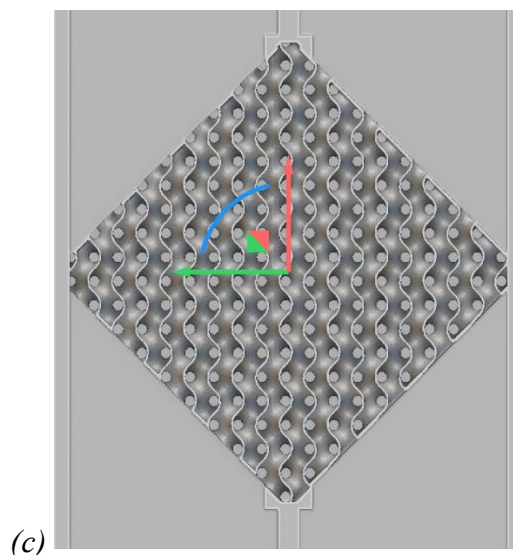


Figura 111: (a) Geometria con dimensione di cella 60 mm; (b) Geometria con dimensione di cella 80 mm; (c) Geometria con dimensione di cella 100 mm

Per ciascuna delle configurazioni geometriche considerate, è stato determinato il volume complessivo di fluido contenibile, includendo sia il volume relativo al fluido caldo sia quello associato al fluido freddo che scorrono rispettivamente all'interno delle tubazioni dedicate. Oltre a tali volumi, è stato calcolato anche il volume effettivo occupato dal materiale strutturale dello scambiatore, corrispondente al riempimento solido. I valori ottenuti da tali elaborazioni sono sintetizzati nella tabella riportata di seguito.

Dimensione di cella (mm)	Infill Volume HEX (mm ³)	Volume fluido caldo (mm ³)	Volume fluido freddo (mm ³)
60	71.154.804,8972	81.432.820,9239	81.206.309,0874
80	96.434.026,7172	114.882.241,7090	114.787.361,7108
100	122.133.190,0008	149.092.643,1888	149.709.162,1999

Dall'analisi dei dati tabulati emerge che l'incremento della dimensione della cella comporta un aumento proporzionale del volume di fluido contenibile all'interno dello scambiatore. Tale parametro geometrico influisce direttamente sulle dimensioni planari dello scambiatore, in particolare sulla larghezza e sulla lunghezza delle tubazioni, mantenendo costante l'altezza pari a 250 mm. Inoltre, la dimensione della cella incide sul numero totale di unità elementari che costituiscono la struttura interna del dispositivo, come di seguito riportato:

- Cella da 60 mm:
 - Larghezza tubazione: 533,4972 mm
 - Lunghezza tubazione: 1.066,9943 mm
 - Numero unità di cella: 330
- Cella da 80 mm:
 - Larghezza tubazione: 621,0766 mm
 - Lunghezza tubazione: 1.242,1531 mm
 - Numero unità di cella: 188
- Cella da 100 mm:
 - Larghezza tubazione: 698,9512 mm
 - Lunghezza tubazione: 1.397,9024 mm
 - Numero unità di cella: 122

Un aumento della dimensione dell'unità elementare implica quindi un'espansione delle dimensioni planari dello scambiatore, pur lasciando invariata la quota verticale. La tabella successiva riporta i valori del volume utile delle tubazioni, tenendo conto della presenza dei deflettori (baffles).

Dimensione di cella (mm)	Volume tubazioni con baffles (mm³)
60	94.156.056,5523
80	118.432.945,0910
100	142.212.817,6914

Risultati a Confronto

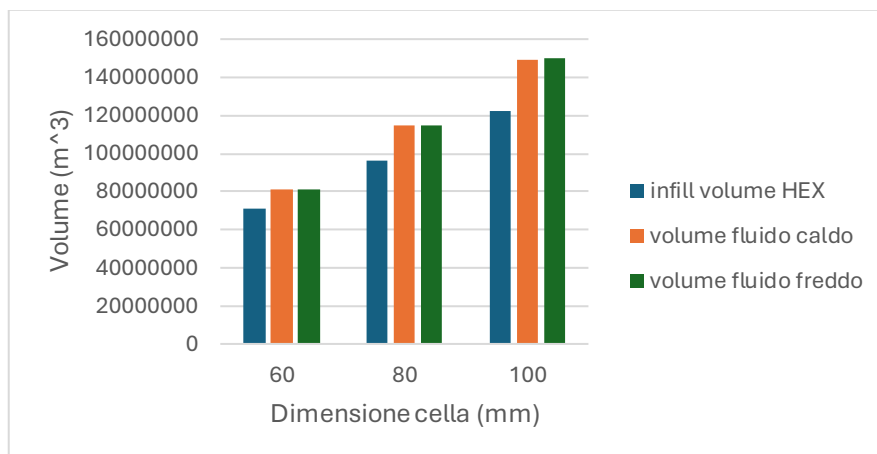


Grafico 25: Confronto dei volumi contenuti nello scambiatore per ogni dimensione di cella

Dall'osservazione dei dati sperimentali si conferma che l'aumento della dimensione dell'unità cellulare comporta un incremento del volume dei fluidi contenuti all'interno dello scambiatore, validando le precedenti considerazioni relative al potenziale miglioramento dell'efficienza termica. Tuttavia, l'ampliamento della cella comporta anche una riduzione delle perdite di carico associate alla resistenza al flusso, aspetto positivo dal punto di vista fluidodinamico. Tale condizione, tuttavia, risulta controbilanciata da un effetto secondario non trascurabile: l'aumento del rischio di formazione di depositi lungo le pareti interne. Questo fenomeno può compromettere l'efficacia del trasferimento termico, riducendo le prestazioni complessive dello scambiatore. A seguire sono riportati i parametri geometrici caratteristici dello scambiatore per ciascuna dimensione di cella considerata.

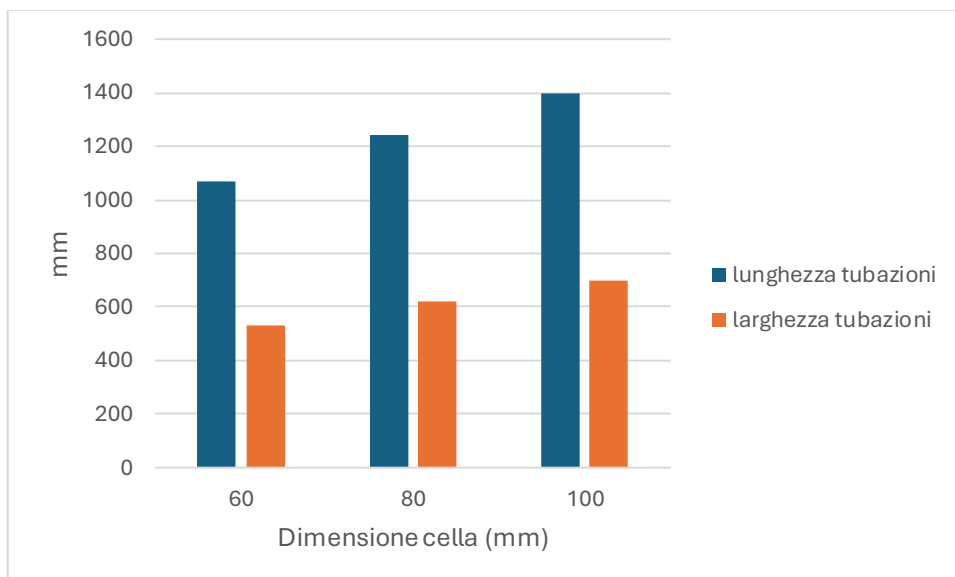


Grafico 26: Confronto dei parametri geometrici dello scambiatore per ogni dimensione di cella

L'aumento della dimensione dell'unità cellulare determina un incremento proporzionale delle dimensioni complessive delle tubazioni dello scambiatore. Tale ampliamento è direttamente correlato alla maggiore estensione geometrica richiesta per accogliere ciascuna cella. Parallelamente, si osserva una riduzione nel numero totale di unità di cella contenute all'interno del volume disponibile: all'aumentare delle dimensioni di ciascuna cella, diminuisce infatti il numero di elementi ripetuti che è possibile inserire nello stesso spazio, evidenziando un'inversamente proporzionale relazione tra dimensione della cella e densità numerica delle unità strutturali.

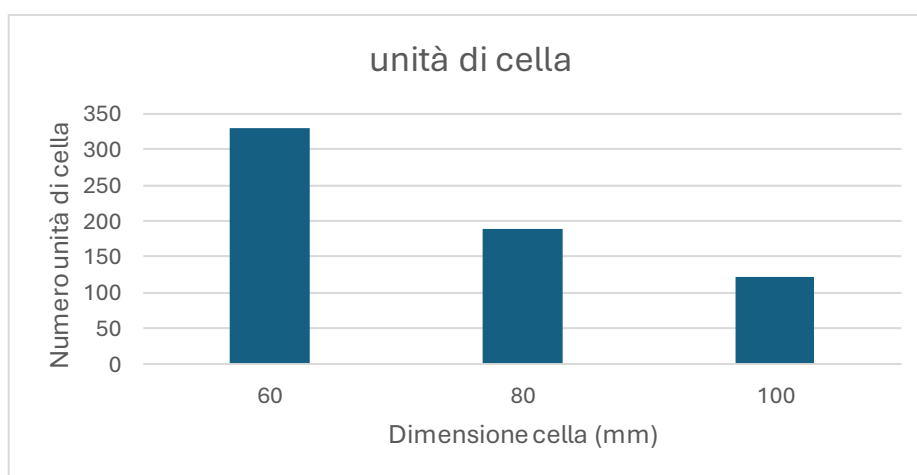


Grafico 27: Confronto del numero di unità di cella per ogni dimensione di cella

Spessore delle Pareti

Nel secondo caso studio, è stata condotta un'analisi parametrica finalizzata a valutare l'influenza dello spessore delle pareti delle strutture TPMS, mantenendo costante la dimensione dell'unità cellulare pari a 60 mm. I valori di spessore analizzati sono stati: 6 mm, 12 mm e 18 mm. Tale variazione è stata introdotta per esaminare le implicazioni geometriche e funzionali derivanti dall'aumento dello spessore delle pareti, in particolare rispetto alla resistenza termica, che risulta proporzionalmente incrementata al crescere dello spessore. La metodologia adottata è stata coerente con quella applicata nei casi precedenti, in modo da garantire l'affidabilità e la confrontabilità dei risultati. Per quanto riguarda lo spessore minimo considerato, pari a 6 mm, i risultati ottenuti coincidono con quelli precedentemente rilevati, poiché i parametri geometrici in esame (dimensione cella = 60 mm, spessore parete = 6 mm) sono identici a quelli già impiegati nello studio iniziale.

Lunghezza tubazione	Larghezza tubazione	Numero unità di cella
1.066,9943 mm	533,4972 mm	330

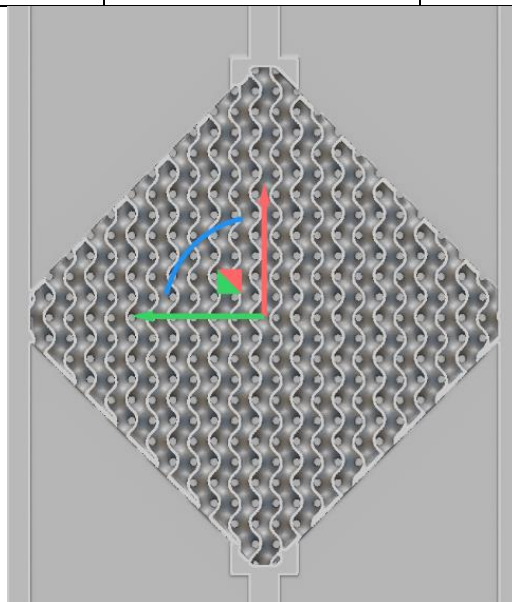


Figura 112: Geometria giroide con spessore delle pareti TPMS di 6 mm

Con uno spessore delle pareti TPMS pari a 12 mm, si rileva un incremento della resistenza termica, che determina una conseguente riduzione dell'efficienza del trasferimento di calore all'interno dello scambiatore. Tale modifica geometrica

influisce anche sui parametri strutturali delle tubazioni, determinando variazioni dimensionali rispetto alla configurazione con pareti da 6 mm, a causa della maggiore quantità di materiale solido che occupa volume utile precedentemente destinato al passaggio del fluido.

Lunghezza tubazione	Larghezza tubazione	Numero unità di cella
1.014,811 mm	507,4055 mm	298

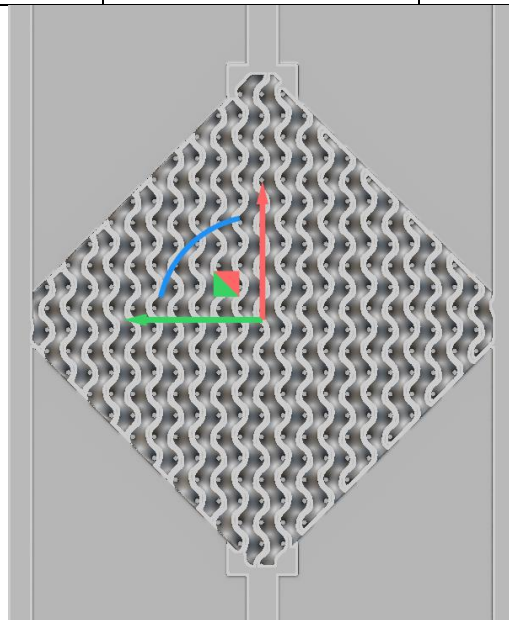


Figura 113: Geometria giroide con spessore delle pareti TPMS di 12 mm

Il progressivo aumento dello spessore delle pareti nelle strutture TPMS incide significativamente sui parametri geometrici dello scambiatore. In particolare, nel caso di uno spessore pari a 18 mm, si osserva un ulteriore restringimento della sezione delle tubazioni e una conseguente riduzione del numero complessivo di unità di cella. Queste variazioni sono coerenti con quanto rilevato per lo spessore intermedio di 12 mm, evidenziando una tendenza in cui l'incremento dello spessore delle pareti determina una maggiore occupazione volumetrica da parte della struttura solida, a discapito del volume utile per il passaggio dei fluidi. I parametri geometrici corrispondenti sono riportati nella tabella seguente, al fine di quantificare l'impatto specifico della configurazione con pareti da 18 mm.

Lunghezza tubazione	Larghezza tubazione	Numero unità di cella
973,22 mm	486,61 mm	274

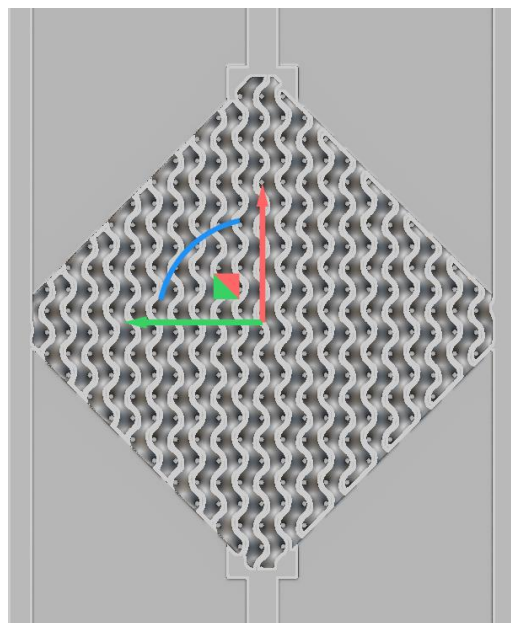


Figura 114: Geometria giroide con spessore delle pareti TPMS di 18 mm

Per quanto riguarda il calcolo dei volumi, per ogni geometria sono stati ottenuti i risultati riportati nella seguente tabella:

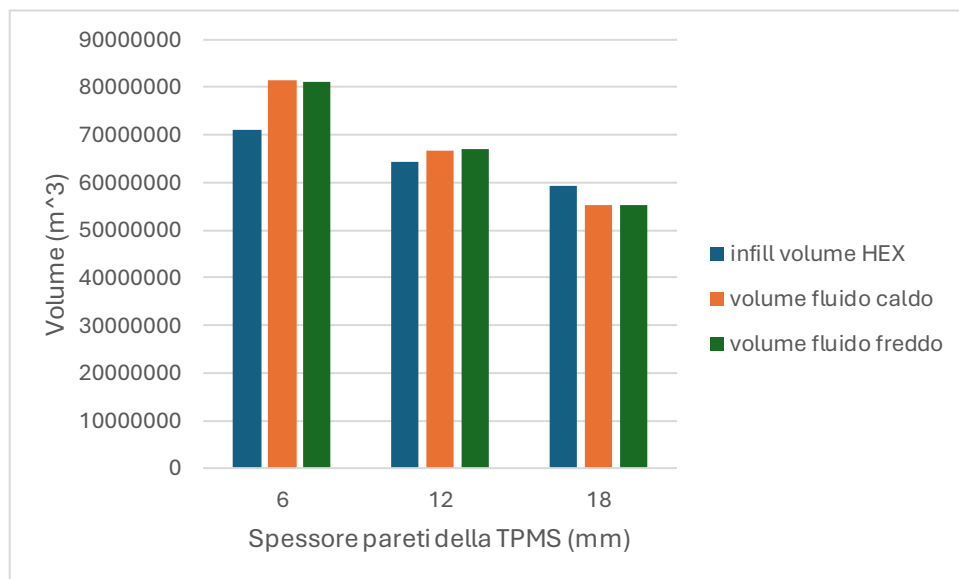
Spessore TPMS (mm)	Infill Volume HEX (mm³)	Volume fluido caldo (mm³)	Volume fluido freddo (mm³)
6	71.154.804,8972	81.432.820,9239	81.206.390,0874
12	64.365.079,7388	66.871.993,5050	67.011.680,7046
18	59.197.318,2326	55.349.721,5559	55.292.983,8957

Nella seguente tabella sono invece riportati i volumi che le tubazioni possono contenere considerando i baffles per ogni spessore delle pareti:

Spessore TPMS (mm)	Volume tubazioni con baffles (mm³)
6	94.156.056,5523
12	98.543.995,4750
18	103.203.659,9498

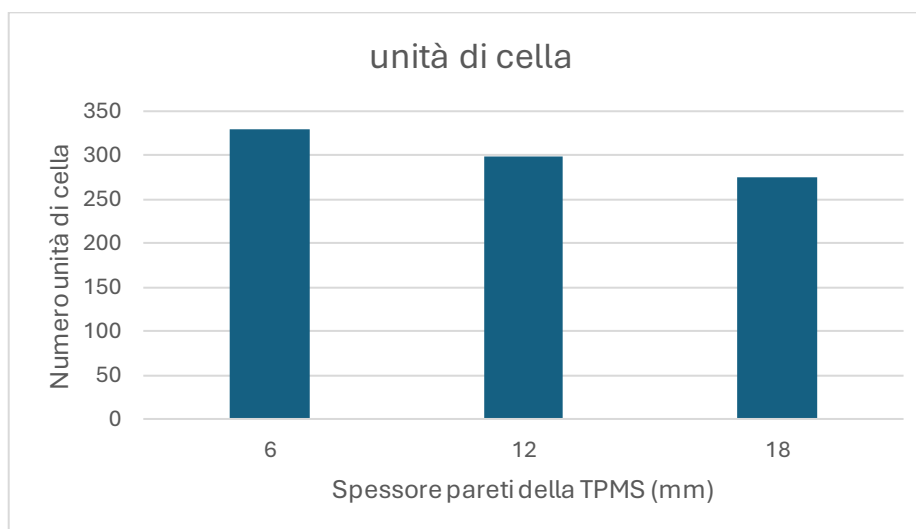
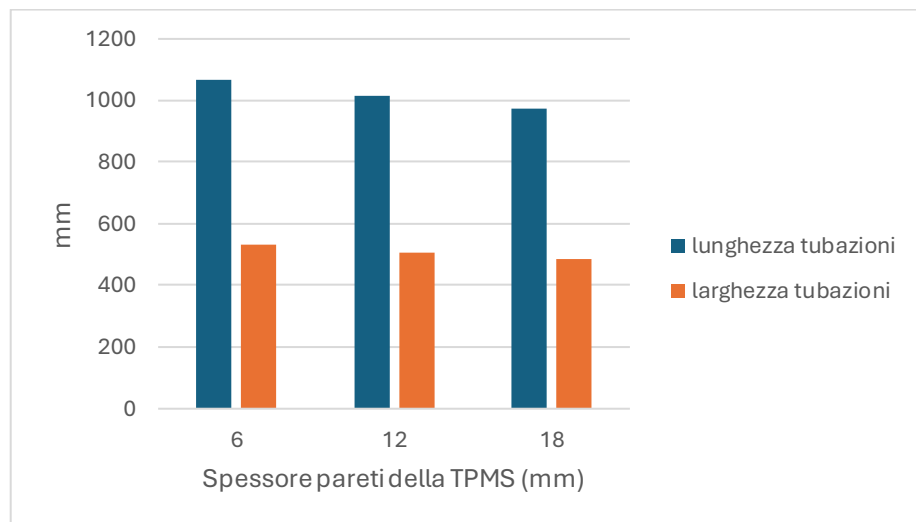
Risultati a Confronto

Nel presente paragrafo vengono confrontati i risultati derivanti dalla realizzazione di uno scambiatore di calore basato su geometria TPMS di tipo giroide, mantenendo costante la dimensione unitaria della cella a 60 mm e variando esclusivamente lo spessore delle pareti strutturali, rispettivamente pari a 6 mm, 12 mm e 18 mm. L'analisi è focalizzata sulla variazione del volume complessivo di fluido contenuto all'interno dello scambiatore, parametro critico ai fini delle prestazioni termiche. Di seguito si riportano i valori ottenuti per ciascuna configurazione di spessore, i quali evidenziano l'influenza diretta della variazione dello spessore sulla capacità volumetrica del dispositivo, a parità di geometria e dimensione di cella.



L'analisi evidenzia che, a parità di geometria e dimensione di cella, una riduzione dello spessore delle pareti della struttura TPMS consente un incremento del volume utile interno dello scambiatore di calore. Viceversa, l'aumento dello spessore delle pareti comporta una diminuzione del volume disponibile per il fluido, influenzando in modo significativo i parametri dimensionali delle tubazioni. In particolare, l'incremento dello spessore delle pareti si traduce in una riduzione della larghezza e della lunghezza delle tubazioni, nonché in una diminuzione del numero di unità di cella contenute all'interno dello scambiatore. Tali variazioni geometriche sono direttamente connesse all'ottimizzazione del rapporto tra superficie di scambio e

volume disponibile, e devono pertanto essere attentamente considerate nella fase di progettazione termofluidodinamica del componente.



Effetti dello Spessore delle Pareti

Uno spessore maggiore delle pareti nella struttura TPMS comporta una serie di implicazioni tecniche rilevanti, con effetti che influenzano sia le prestazioni termiche che la durabilità meccanica dello scambiatore di calore. Le principali conseguenze sono le seguenti:

- Incremento della resistenza alla corrosione: l'azione corrosiva agisce principalmente sulla superficie esposta del materiale; pertanto, un maggiore spessore delle pareti fornisce una barriera più robusta contro la penetrazione degli agenti chimici, aumentando la vita utile della struttura.

- Miglioramento della stabilità termica: l'elevato spessore contribuisce a una maggiore inerzia termica del sistema, favorendo una distribuzione più uniforme della temperatura e una minore suscettibilità a variazioni termiche localizzate.
- Incremento delle perdite di carico: l'incremento dello spessore riduce la sezione utile per il passaggio dei fluidi, generando un aumento della resistenza idraulica e, di conseguenza, una maggiore perdita di pressione all'interno dello scambiatore.
- Diminuzione della superficie utile per lo scambio termico: l'ispessimento delle pareti comporta una riduzione della superficie disponibile per il trasferimento di calore tra i due fluidi, compromettendo l'efficienza termica complessiva del dispositivo.
- Aumento della massa complessiva: l'utilizzo di pareti più spesse comporta un incremento del volume di materiale utilizzato, con un conseguente aumento del peso del componente, influenzando negativamente i costi di produzione, la maneggevolezza e le prestazioni in applicazioni in cui il peso è un parametro critico.

È possibile evincere che la selezione dello spessore delle pareti nella progettazione di uno scambiatore di calore basato su geometrie TPMS di tipo giroide rappresenta un compromesso tecnico tra la necessità di garantire integrità strutturale e durabilità nel tempo, e l'esigenza di massimizzare l'efficienza dello scambio termico, contenendo al contempo le perdite di carico e l'incremento di massa.

Processo di Produzione

Successivamente alla fase di modellazione 3D digitale, è stata avviata la produzione fisica dello scambiatore di calore mediante tecnologia di additive manufacturing. La struttura realizzata presenta una morfologia interna basata sulla geometria giroide, con parametri dimensionali fissati a una dimensione di cella pari a 60 mm e uno spessore delle pareti pari a 6 mm. La produzione è stata eseguita utilizzando una stampante 3D di tipo Fused Deposition Modeling (FDM), modello Creality-K1-MAX, disponibile presso il laboratorio LIVINGAM del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Messina. Tale dispositivo è stato selezionato in considerazione della sua capacità di garantire elevata precisione geometrica, compatibilità con strutture complesse e riproduzione fedele delle

superfici implicite caratteristiche delle strutture TPMS. Si precisa, inoltre, che l'intera geometria dello scambiatore è stata scalata del 20% rispetto al modello originario al fine di rientrare nei limiti dimensionali del volume di stampa della macchina utilizzata. Questo adattamento ha reso possibile la produzione effettiva del componente, senza comprometterne le caratteristiche funzionali e geometriche, come verrà ulteriormente dettagliato successivamente.

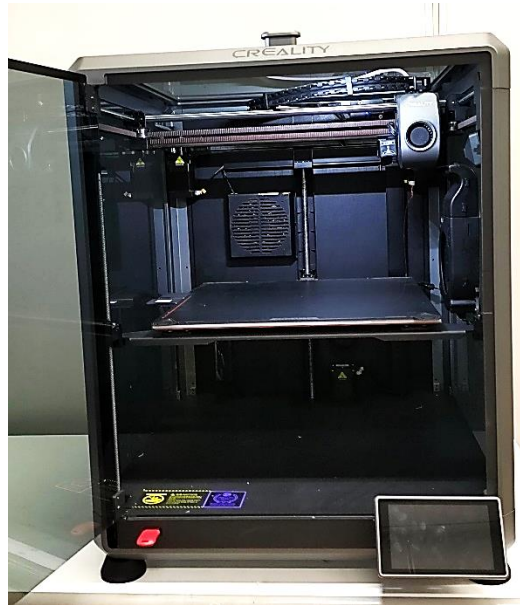


Figura 115: Creality K1-Max

Di seguito si riportano le specifiche:

Specifications

Printing Technology: FDM	File Transfer: USB drive, Ethernet, WiFi
Build Volume: 300*300*300mm	Display Screen: 4.3" color touch screen
Product Dimensions: 435*462*526mm	AI Camera: Yes
Package Dimensions: 508*508*608mm	AI LiDAR: Yes
Net Weight: 18kg	Power Loss Recovery: Yes
Gross Weight: 23kg	Filament Runout Sensor: Yes
Printing Speed: ≤600mm/s	Air Purifier: Yes
Acceleration: ≤20000mm/s ²	Input Shaping: Yes
Printing Accuracy: 100±0.1mm	Lighting kit: Yes
Layer Height: 0.1-0.35mm	Sleep Mode: Yes
Extruder: Dual-gear direct drive extruder	Rated Voltage: 100-240V ~, 50/60Hz
Filament Diameter: 1.75mm	Rated Power: 1000W
Nozzle Diameter: 0.4mm (swappable with 0.6/0.8mm nozzle)	Supported Filaments: ABS, PLA, PETG, PET, TPU, PA, ABS, ASA, PC, PLA-CF, PA-CF, PET-CF
Nozzle Temperature: ≤300°C	Printable File Format: G-Code
Heatbed Temperature: ≤100°C	Slicing Software: Creality Print; compatible with Cura, Simplify3D, PrusaSlicer
Build Surface: Flexible build plate	File Formats for Slicing: STL, OBJ, AMF
Leveling Mode: Dual hands-free auto leveling	UI Languages: Chinese, English, Spanish, German, French, Russian, Portuguese, Italian, Turkish, Japanese

Figura 116: Specifiche Creality K1-Max

Per la fabbricazione dello scambiatore di calore è stato selezionato l'acido polilattico (PLA) quale materiale costruttivo. Il PLA è un poliestere alifatico termoplastico appartenente alla categoria dei biopolimeri di origine naturale, largamente impiegato nei processi di additive manufacturing, in particolare nella stampa 3D mediante tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling). Tra le principali caratteristiche che ne giustificano l'utilizzo vi è l'elevata facilità di lavorazione, che lo rende uno dei materiali polimerici più agevoli da stampare. Tale proprietà è accompagnata da una buona stabilità dimensionale, nonostante una moderata tendenza al ritiro termico una volta completato il processo di deposizione. Un ulteriore vantaggio tecnico risiede nella possibilità di stampare il PLA senza la necessità di una piattaforma riscaldata, rendendolo compatibile con una più ampia gamma di stampanti desktop. Le temperature operative tipiche per la stampa variano generalmente tra 190 °C e 230 °C, configurando il materiale come idoneo per applicazioni in cui non sono richieste elevate prestazioni termomeccaniche, ma dove è prioritario ottenere un'elevata definizione geometrica e una buona qualità superficiale del manufatto.

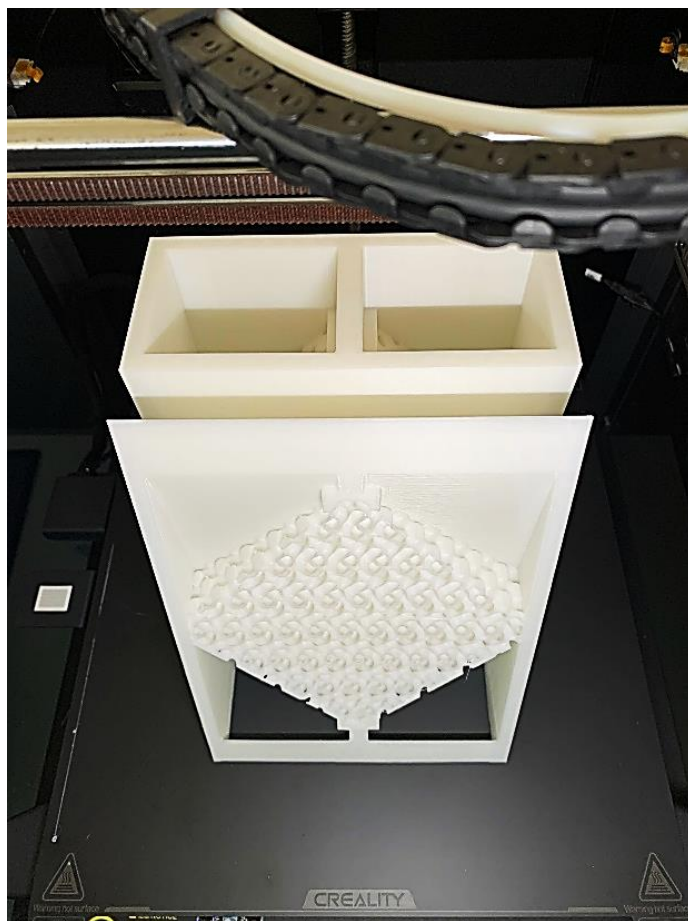


Figura 117: Processo di stampa dello scambiatore

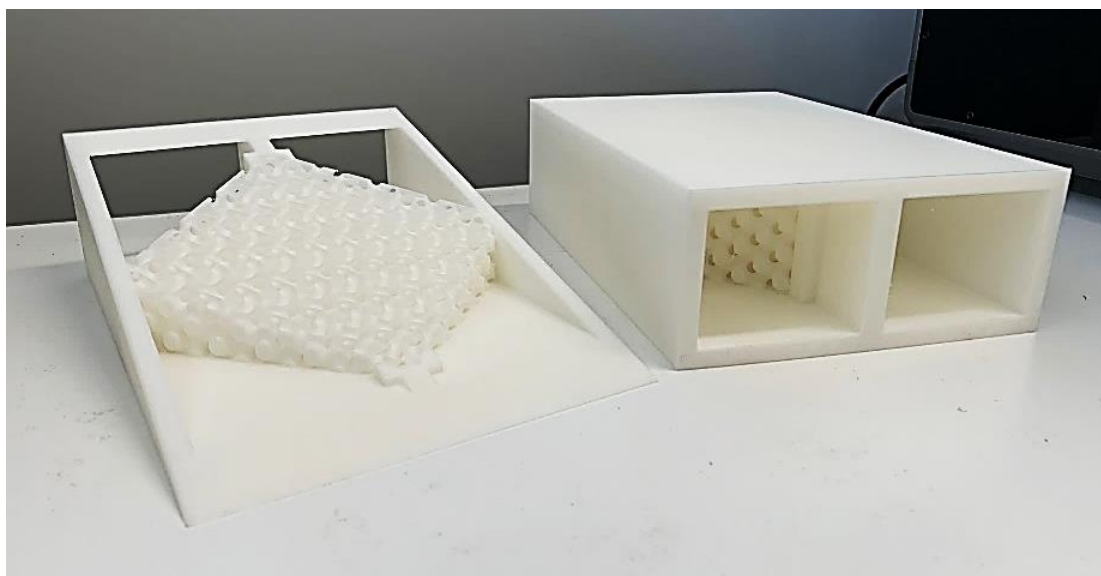


Figura 118: Modello stampato in 3D dello scambiatore e dello scambiatore sezionato

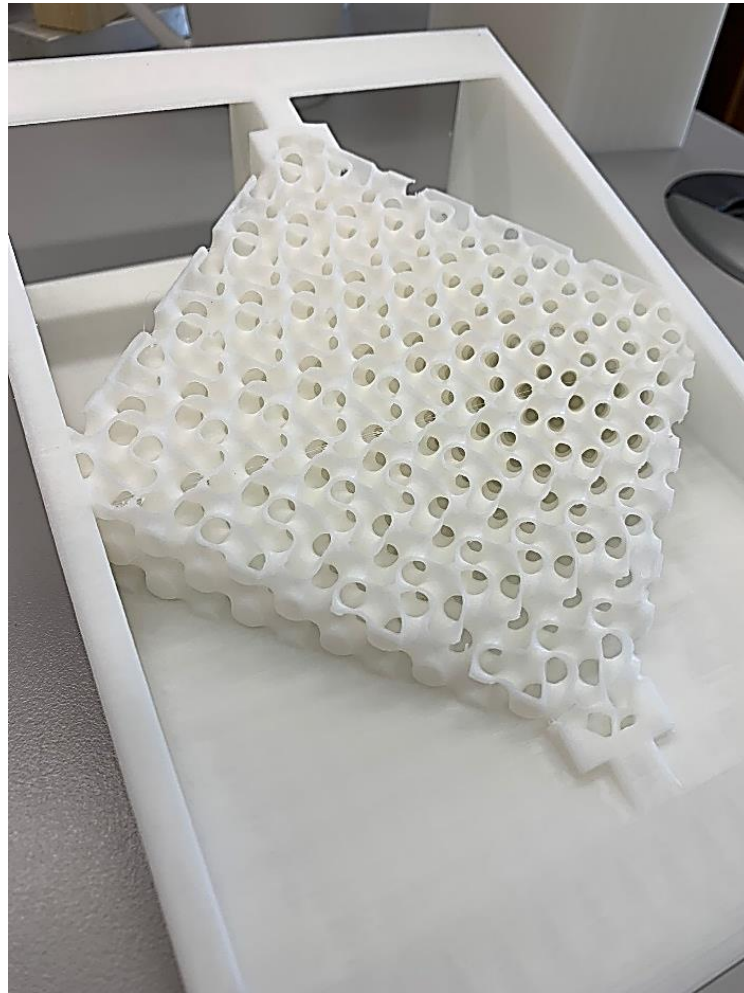


Figura 119: Modello dello scambiatore sezionato

Il modello tridimensionale dello scambiatore di calore è stato sottoposto a una riduzione scalare uniforme pari al 20% rispetto alle dimensioni originarie previste in fase di progettazione. Tale riduzione è stata adottata al fine di garantire la compatibilità geometrica con il volume massimo di stampa disponibile nella macchina utilizzata, agevolando contestualmente le operazioni di fabbricazione. L'intento di questa riduzione non è da intendersi come alterazione funzionale del progetto, ma come adattamento pratico alla fase di prototipazione fisica, conservando integralmente le proporzioni geometriche e le caratteristiche strutturali del modello originale. Le dimensioni finali risultanti, successivamente all'applicazione del fattore di scala, sono riportate di seguito:

Parametro	Valore
Altezza tubazione	63,97 mm
Lunghezza scambiatore	228,29 mm
Larghezza scambiatore	160,40 mm

I parametri di stampa utilizzati sono stati i seguenti:

Parametro	Valore
Altezza layer	0,1 mm
Temperatura piatto	45 °C
Temperatura ugello	220 °C
Densità di infill	15%
Pattern di infill	Grid

3.4.2.4 Conclusioni

Le tecnologie additive rappresentano un'innovazione strategica nel panorama manifatturiero moderno, evidenziandosi per la capacità di abilitare configurazioni geometriche complesse, precedentemente irrealizzabili mediante i metodi convenzionali. Il settore della manifattura additiva è caratterizzato da una crescita costante, con un'espansione progressiva delle applicazioni in ambito industriale. Tra i principali vantaggi di queste tecnologie vi sono la significativa riduzione degli scarti di materiale, l'ottimizzazione dei costi produttivi e il miglioramento dell'efficienza temporale dei cicli di fabbricazione, grazie all'impiego di tecniche di stampa tridimensionale. Nel presente contesto applicativo, l'utilizzo dell'Additive Manufacturing ha consentito la modellazione di scambiatori di calore caratterizzati da differenti configurazioni geometriche e parametri dimensionali. In particolare, analizzando i risultati ottenuti per uno scambiatore dotato di una struttura TPMS con dimensione di cella pari a 60 mm e spessore delle pareti di 6 mm, la geometria Schwartz Primitive si è rivelata la più efficiente dal punto di vista dello scambio termico tra i due fluidi. Tale configurazione risulta particolarmente adatta per applicazioni che coinvolgono fluidi a viscosità media o elevata, grazie alla sua elevata capacità di trasferimento termico. Tuttavia, l'efficacia della Schwartz Primitive è controbilanciata da criticità quali gli elevati costi di produzione e una limitata resistenza strutturale, che ne riducono la versatilità applicativa in scenari con carichi meccanici rilevanti. Di contro, la geometria Giroide, pur offrendo prestazioni termiche leggermente inferiori rispetto alla

Schwartz Primitive, rappresenta la soluzione maggiormente impiegata nella realizzazione di scambiatori di calore, in virtù del favorevole bilancio tra efficienza, producibilità e robustezza. Dallo studio condotto emerge chiaramente che la trasmissione del calore è significativamente influenzata da variabili progettuali quali la dimensione della cella e lo spessore delle pareti della struttura TPMS, oltre che da fattori operativi come la natura del fluido, la portata volumetrica e il gradiente termico tra i flussi. Le geometrie Lidnoid e Split Primitive, analizzate in parallelo, hanno evidenziato prestazioni inferiori in termini di capacità di trasferimento termico. Tali configurazioni si sono rivelate meno idonee per applicazioni che richiedono alta efficienza nello scambio di calore, presentando limitazioni strutturali e funzionali rispetto alle soluzioni più performanti. L'adozione delle tecnologie additive consente dunque di esplorare soluzioni avanzate nella progettazione di scambiatori di calore, favorendo la realizzazione di dispositivi ottimizzati in funzione delle esigenze applicative specifiche. La selezione della geometria più idonea rappresenta un compromesso tra efficienza termica, sostenibilità produttiva e requisiti strutturali. Tra le configurazioni esaminate, la struttura a geometria Giroide si conferma come una delle alternative più affidabili e versatili, combinando prestazioni soddisfacenti con vantaggi operativi e produttivi consolidati.

3.4.3 Progetto “For tunable thermochemical energy storage (4TunaTES)”

3.4.3.1 Presentazione progetto

Per accelerare in modo efficace la transizione energetica, risulta imprescindibile disporre con urgenza di sistemi di accumulo per energia elettrica e termica, resi indispensabili dall'intrinseca discontinuità delle fonti rinnovabili. Considerando che una quota rilevante del consumo energetico complessivo si manifesta sotto forma di calore, pari al 78% nell'ambiente costruito, e tenendo conto dell'enorme disponibilità di calore residuo a bassa temperatura non valorizzato (pari a circa 8900 PJ solo in ambito europeo), lo stoccaggio termico si configura come una strategia tecnologicamente efficace per riequilibrare dinamicamente domanda e offerta energetica. La possibilità di disporre di sistemi di accumulo di calore che siano compatti, durevoli, privi di perdite e adatti a lungo termine rappresenta l'elemento mancante per una gestione efficiente dell'energia termica, e i Sistemi di Stoccaggio di Energia Termo-Chimico (TCES) appaiono come la soluzione tecnologica più promettente per colmare tale gap. Tuttavia, le tecnologie TCES attualmente disponibili risultano caratterizzate da un'elevata rigidità operativa, richiedendo una stretta coerenza tra il comportamento termodinamico dei materiali attivi (in particolare il loro diagramma di fase), la configurazione del sistema e le esigenze termiche specifiche della singola applicazione. Tale vincolo limita la trasferibilità dei risultati ottenuti da una configurazione all'altra e comporta che ogni nuova applicazione necessiti di un processo di ricerca e sviluppo dedicato, con un impatto negativo su costi e tempi. Il progetto 4TunaTES si propone di superare tali criticità mediante lo sviluppo di una tecnologia TCES modulare e adattiva, capace di ridurre i costi di sviluppo fino al 90% rispetto agli approcci convenzionali. Il prototipo in corso di realizzazione è mirato ad affrontare le esigenze del riscaldamento residenziale, attraverso l'impiego di materiali reattivi innovativi, scambiatori di calore ad architettura flessibile e cicli termodinamici ottimizzati. Enti di rilievo internazionale quali CNR, DLR e Celcius sono coinvolti nell'integrazione di avanzamenti tecnologici strategici, orientati alla valorizzazione su larga scala dello stoccaggio termico. Grazie alla sinergia tra competenze altamente specializzate, che

spaziano dalla modellazione computazionale di materiali termo-attivi allo sviluppo di batterie termiche ad alta densità energetica, il progetto 4TunaTES si configura come una piattaforma tecnologica di frontiera, con il potenziale per introdurre innovazioni radicali nel settore dell'accumulo energetico e contribuire significativamente alla decarbonizzazione dei sistemi energetici.

3.4.3.2 Attività svolte

Nel corso del progetto sono state condotte numerose attività complesse, tutte finalizzate alla progettazione e realizzazione di scambiatori di calore ad alta efficienza, mediante l'impiego integrato di modellazione tridimensionale avanzata e tecnologie di manifattura additiva. L'utilizzo del software nTopology ha consentito di generare geometrie ottimizzate e strutture altamente complesse, abilitando la progettazione di dispositivi per lo scambio termico sia fluido-solido che fluido-fluido. L'integrazione di strutture reticolari nei modelli tridimensionali ha permesso di ampliare significativamente la superficie di scambio termico e di migliorare la distribuzione interna del flusso termico, con conseguente ottimizzazione delle prestazioni complessive del sistema. Parallelamente, sono state eseguite simulazioni termiche dettagliate per l'analisi del comportamento del calore all'interno delle strutture progettate, al fine di calibrare con precisione i parametri geometrici e valutare in maniera predittiva l'efficienza dei materiali selezionati. I modelli numerici sono stati successivamente convertiti in prototipi fisici mediante tecnologie di stampa 3D, che hanno garantito la riproduzione fedele delle architetture complesse elaborate nella fase progettuale. A valle della fabbricazione, è stata avviata una campagna sperimentale per la caratterizzazione della conducibilità termica dei materiali impiegati. In tale ambito, sono stati testati differenti materiali polimerici con l'obiettivo di individuare quelli dotati delle migliori proprietà di trasferimento termico. I dati sperimentali ottenuti sono stati confrontati con i risultati numerici delle simulazioni, consentendo di validare il modello e di individuare margini di miglioramento per una successiva ottimizzazione progettuale. Il progetto si è articolato come un processo iterativo di interazione tra modellazione teorica, simulazione numerica, fabbricazione additiva e verifica sperimentale, in cui ciascuna fase ha contribuito al progressivo affinamento delle prestazioni e della robustezza degli scambiatori di calore,

garantendo al contempo la compatibilità con i vincoli di producibilità e l'efficienza termofluidodinamica richiesta. Le attività descritte costituiscono solo una parte del percorso di ricerca sviluppato nell'ambito del progetto. Nei paragrafi successivi saranno presentati ulteriori esempi e casi applicativi, a partire da un primo prototipo di scambiatore fluido–solido realizzato e testato come studio preliminare.

3.4.3.2.1 Caso studio: scambiatore fluido–solido

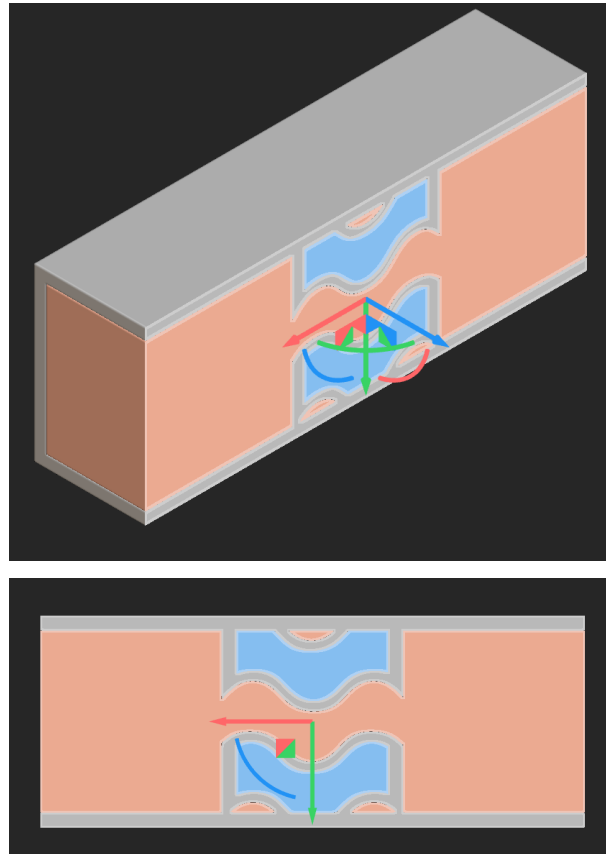


Figura 120: Scambiatore fluido solido

Lo scambiatore di calore di tipo fluido-solido è stato progettato secondo una configurazione in cui il fluido termovettore è rappresentato in rosso, il materiale a cambiamento di fase (PCM) in blu e la struttura dello scambiatore stesso in bianco. Il nucleo dello scambiatore integra una struttura reticolare basata su celle TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces) con dimensioni unitarie pari a $8 \times 8 \times 8$ mm e spessore delle pareti pari a 1 mm. Il volume attivo dell'elemento di scambio presenta dimensioni pari a $12 \times 12 \times 12$ mm, con una lunghezza complessiva dello scambiatore pari a 36 mm e uno spessore strutturale esterno di 2 mm. Tale configurazione geometrica è stata definita per garantire un'elevata superficie

specifica di scambio termico, favorire l'interazione tra fluido e PCM e ottimizzare il trasferimento energetico in applicazioni a medio-bassa temperatura.

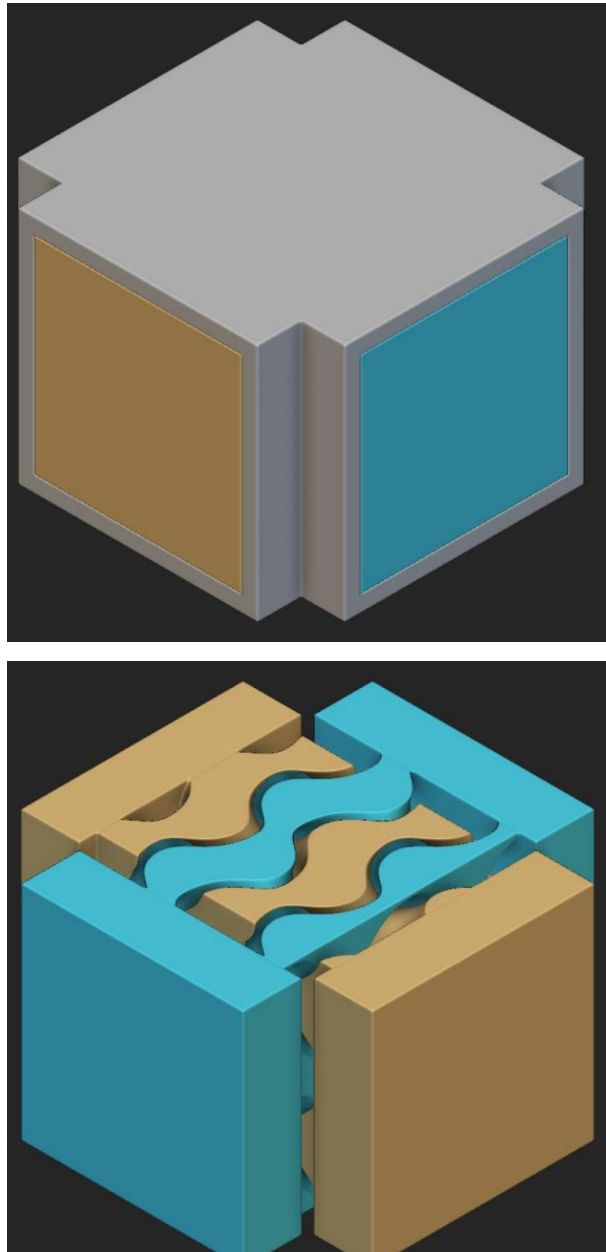


Figura 121: Scambiatore fluido-fluido

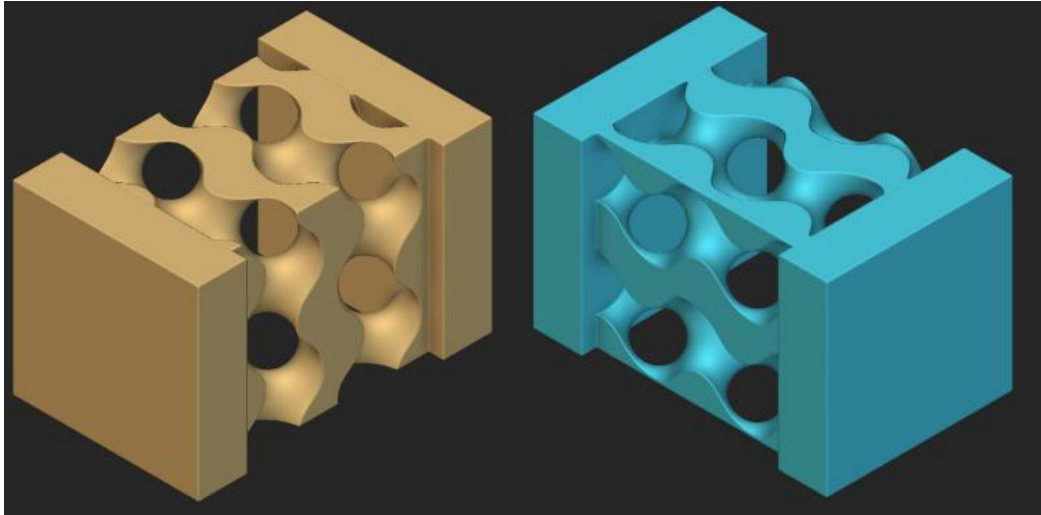


Figura 122: Fluido caldo(rosso)-freddo(blu).

3.4.4 Ottimizzazione dei processi di manifattura additiva per la progettazione e fabbricazione di scambiatori di calore con morfologia interna basata su superfici minime triplamente periodiche (TPMS).⁶

3.4.4.1 Abstract

Gli scambiatori di calore sono fondamentali in molti settori industriali, ma le soluzioni tradizionali hanno raggiunto un limite evolutivo; la manifattura additiva permette ora di sviluppare geometrie interne complesse, come le TPMS, capaci di migliorare l'efficienza dello scambio termico. Il presente lavoro affronta l'analisi termo-fluidodinamica di uno scambiatore aria-acqua basato su geometria Giroide, valutando numericamente l'influenza dei parametri operativi su distribuzione termica e dinamiche di flusso. Parallelamente, è stata condotta un'indagine sperimentale sulle proprietà meccaniche delle strutture, mediante prove di compressione uniassiale su campioni realizzati in polimeri ad alte prestazioni, per verificarne la resistenza in condizioni assimilabili a sollecitazioni idrostatiche. Infine, un prototipo fisico in scala è stato impiegato per la validazione sperimentale delle prestazioni di scambio termico in condizioni operative reali. Le attività sono state sviluppate in collaborazione tra l'Università di Messina e il CNR-ITAE.

3.4.4.2 Introduzione

Gli scambiatori di calore costituiscono dispositivi essenziali in settori quali HVAC, refrigerazione, processi energetici e chimici, garantendo il trasferimento di energia termica tra fluidi a diverse temperature. Nonostante la loro ampia diffusione, le configurazioni costruttive tradizionali hanno raggiunto un livello di maturità che limita ulteriori miglioramenti significativi. L'avvento delle tecnologie di manifattura additiva ha aperto nuove prospettive progettuali, rendendo realizzabili geometrie interne complesse che incrementano la superficie utile di scambio e favoriscono una distribuzione più omogenea dei flussi. Tra queste, le strutture TPMS si distinguono per la loro continuità topologica e l'elevato rapporto

⁶ Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [92]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

superficie/volume, che le rendono promettenti per applicazioni avanzate. Nonostante i progressi ottenuti, la letteratura scientifica si concentra prevalentemente su scambiatori TPMS destinati a cicli acqua–acqua o a fluidi speciali in condizioni estreme, lasciando in gran parte inesplorata l'applicabilità di tali soluzioni in configurazioni aria–acqua, di particolare interesse per i sistemi HVAC. Il presente lavoro si propone di colmare parte di questo vuoto, indagando le prestazioni termo-fluidodinamiche di uno scambiatore aria–acqua con struttura interna a geometria Giroide e approfondendo la risposta meccanica dei componenti mediante prove sperimentali su materiali polimerici ad alte prestazioni. A completamento dello studio, la realizzazione e la validazione sperimentale di un prototipo fisico offrono una base concreta per la valutazione del potenziale delle TPMS in applicazioni reali.

3.4.4.3 Materiali e metodi

3.4.4.3.1 Modellazione numerica mediante COMSOL Multiphysics

Nel presente studio, la generazione iniziale della mesh superficiale è stata eseguita utilizzando il software open-source MSLattice, appositamente sviluppato per la progettazione di reticoli tridimensionali basati su superfici minime triplamente periodiche (TPMS). Tale strumento consente la definizione parametrica delle strutture reticolari e la loro esportazione in formato STL, compatibile con tecnologie di produzione additiva. Tra le funzionalità avanzate offerte dal software si annoverano la possibilità di costruire sia reticoli a densità uniforme sia strutture funzionalmente graduate, mediante il controllo spaziale della dimensione delle celle e della densità relativa. Inoltre, MSLattice supporta domini geometrici complessi, quali volumi cuboidali, cilindrici e sferici, risultando quindi idoneo alla generazione di mesh per una vasta gamma di applicazioni ingegneristiche. A partire dalla superficie generata, è stata successivamente realizzata la mesh volumetrica impiegando l'ambiente integrato di COMSOL Multiphysics, che ha fornito gli strumenti necessari per la costruzione del dominio computazionale e per l'impostazione dei criteri di raffinamento locale della mesh. In particolare, sono stati definiti con precisione i sotto-domini, applicati raffinamenti selettivi nelle regioni critiche per la risoluzione del gradiente termico e generati strati limite adiacenti alle superfici solide, essenziali per una corretta discretizzazione delle

Nel presente studio, gli scambiatori di calore analizzati sono configurati per operare in condizioni acqua-aria, con due domini fluidi distinti: il primo occupato da acqua, modellata come fluido incomprimibile, e il secondo da aria, trattata come fluido comprimibile. L'interfaccia fisica tra i due domini è costituita da pareti in alluminio, selezionato per le sue proprietà termiche favorevoli e la compatibilità con processi di produzione additiva. Tutti i materiali coinvolti nel modello, inclusi i fluidi e il solido, presentano proprietà termofisiche dipendenti dalla temperatura, determinate tramite le correlazioni disponibili nel database interno del software COMSOL Multiphysics. La configurazione geometrica dello scambiatore simulato consiste in un volume cubico di dimensioni $20 \times 20 \times 20$ mm, al cui interno è generata una

struttura TPMS di tipo Giroide con passo di cella pari a 10 mm. Per garantire l'instaurarsi di un regime completamente sviluppato all'interno dei condotti, sono stati estesi due tratti rettilinei d'ingresso e uscita di 10 mm di lunghezza su entrambi i lati dei domini, mantenendo la coerenza geometrica tra i condotti di ingresso/uscita e la struttura interna. La modellazione numerica tridimensionale, in regime stazionario, del flusso turbolento accoppiato al trasferimento termico è stata condotta risolvendo le equazioni di Navier–Stokes mediate secondo Reynolds (RANS). L'accoppiamento tra campo di velocità e campo di pressione è stato risolto attraverso un algoritmo segregato basato sul metodo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), mentre la discretizzazione spaziale delle equazioni di quantità di moto, energia e dell'energia cinetica turbolenta è stata implementata mediante schema numerico di tipo upwind al secondo ordine, al fine di migliorare la stabilità numerica e la precisione delle soluzioni nei regimi convettivi dominanti. Per la chiusura del sistema di equazioni RANS, è stato adottato il modello di turbolenza k - ϵ , ritenuto adeguato alla stima del comportamento medio del flusso in domini geometricamente complessi. Il trasporto di calore nei solidi e nei fluidi è stato modellato mediante la legge di Fourier, assumendo un regime di conduzione lineare accoppiato al contributo convettivo nei fluidi. Le condizioni al contorno implementate prevedono, per ciascun dominio fluido, l'assegnazione di un profilo uniforme di velocità e di temperatura all'ingresso, nonché condizioni di deflusso libero all'uscita. Le superfici solide sono considerate perfettamente aderenti al flusso (condizioni di non-slip), con continuità termica all'interfaccia fluido-solido. La generazione della mesh è stata realizzata impiegando elementi tetraedrici non strutturati, con una dimensione minima locale degli elementi pari a 0,0098 mm e una dimensione massima di 0,637 mm. Per garantire un'adeguata risoluzione dello strato limite prossimo alle pareti solide, sono stati introdotti sei strati di elementi prismatici prossimali. La mesh risultante comprende un totale di 583 625 elementi finiti. Prima di eseguire le simulazioni definitive, è stata condotta un'analisi di sensibilità della discretizzazione, al fine di verificare la convergenza numerica e la stabilità delle soluzioni. I parametri mesh selezionati derivano da tale processo di ottimizzazione.

3.4.4.4 Analisi dei risultati

I risultati numerici ottenuti si riferiscono a condizioni al contorno ben definite, impostate al fine di valutare la sensibilità del sistema alle variazioni della velocità di ingresso dell'aria. In particolare, i parametri termici e fluidodinamici iniziali sono stati impostati come segue: la temperatura di ingresso dell'acqua è stata fissata a 15 °C, quella dell'aria a 35 °C, mentre la velocità di ingresso del flusso d'acqua è stata mantenuta costante a 1 m/s. La velocità di ingresso dell'aria, al contrario, è stata considerata come variabile indipendente dell'analisi parametrica.

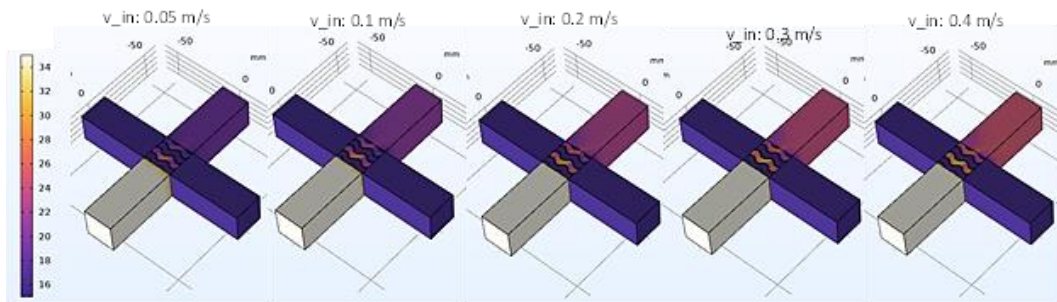


Figura 124: Distribuzione della temperatura in condizioni stazionarie per velocità variabile dell'aria in ingresso.

La Figura 124 riporta la distribuzione della temperatura all'interno del dominio computazionale, valutata in regime stazionario, in corrispondenza di differenti valori di velocità dell'aria. L'analisi dei risultati mette in evidenza che, per la configurazione geometrica e le condizioni operative adottate, la temperatura del fluido liquido (acqua) subisce variazioni minime lungo il percorso; ciò implica che, nel presente assetto, il trasferimento di calore verso l'acqua risulta limitato, come confermato dalla quasi assenza di gradiente termico tra le sezioni di ingresso e uscita. Diversamente, la variazione della velocità dell'aria ha un impatto significativo sul comportamento termico del sistema. All'aumentare della velocità di ingresso dell'aria, si osserva una progressiva attenuazione dei gradienti termici all'interno del volume dello scambiatore. Questa condizione è riconducibile a un ridotto tempo di residenza del fluido, che limita l'efficienza dello scambio convettivo. In particolare, le simulazioni mostrano che a velocità elevate (immagine di destra nella figura), la distribuzione di temperatura risulta pressoché uniforme, con minimi scambi termici localizzati, suggerendo una miscelazione termica poco efficace. Al contrario, per valori inferiori della velocità dell'aria (immagine di

sinistra), la distribuzione di temperatura è caratterizzata da gradienti più marcati e transizioni termiche più definite, a indicare un miglior accoppiamento convettivo tra i due flussi. Questi risultati confermano che il tempo di permanenza del fluido nel dominio geometrico gioca un ruolo fondamentale nell'ottimizzazione dello scambio termico, e che, a parità di configurazione, la riduzione della velocità d'ingresso dell'aria può migliorare l'efficacia del trasferimento di calore attraverso la struttura TPMS. Al fine di evidenziare con maggiore chiarezza le differenze di comportamento termico, la Figura 3 riporta un dettaglio dei due casi limite, corrispondenti a velocità di ingresso dell'aria pari a 0,05 m/s e 0,4 m/s, mostrando la distribuzione della temperatura lungo la sezione mediana del dominio.

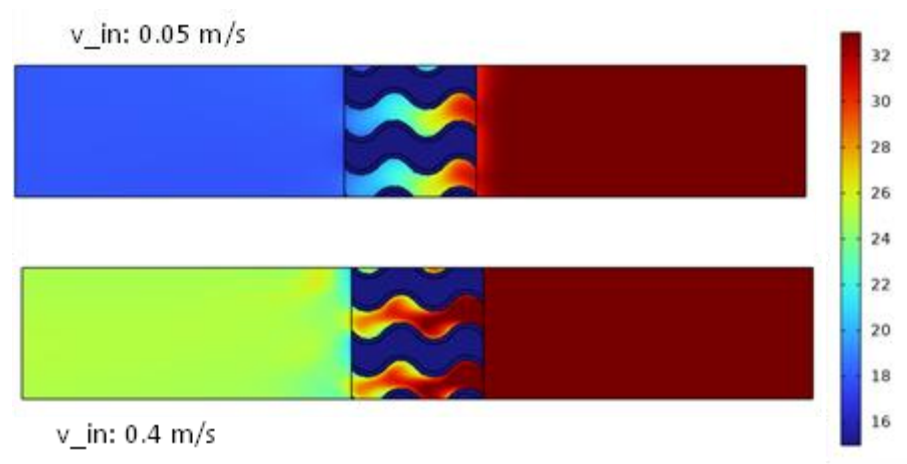


Figura 125: Distribuzione della temperatura nella sezione centrale per due velocità dell'aria.

Al fine di evidenziare con maggiore chiarezza le differenze di comportamento termico, la Figura 125 riporta un dettaglio dei due casi limite, corrispondenti a velocità di ingresso dell'aria pari a 0,05 m/s e 0,4 m/s, mostrando la distribuzione della temperatura lungo la sezione mediana del dominio. L'analisi della distribuzione termica evidenzia differenze significative tra le condizioni di flusso estreme, pur mantenendo costante la temperatura di ingresso dell'aria. In particolare, nella sezione di uscita dello scambiatore, si osserva una marcata variazione delle temperature finali del fluido: per una velocità di ingresso pari a 0,05 m/s, la temperatura dell'aria in uscita si attesta attorno ai 19 °C, mentre a 0,4 m/s si raggiungono valori prossimi ai 23 °C. Osservando la sezione centrale del dominio, corrispondente alla zona in cui è collocata la struttura TPMS, emergono differenze sostanziali nella distribuzione del gradiente termico. A bassa velocità

(0,05 m/s), la regione caratterizzata dalla geometria ondulata mostra una distribuzione della temperatura con gradienti moderati, a indicare un'interazione termica significativa tra il fluido e le superfici solide circostanti, con un efficiente trasferimento energetico. A velocità più elevate (0,4 m/s), la presenza di regioni a temperatura elevata localizzate in prossimità dell'uscita – visibili come zone cromaticamente sature verso il rosso – suggerisce che il raffreddamento del fluido è stato limitato, a causa di un tempo di permanenza insufficiente per un efficace scambio termico. Nel caso a bassa velocità, la mappa termica evidenzia un gradiente termico più pronunciato in prossimità della sezione d'ingresso, dove le temperature relativamente alte si propagano in modo più marcato verso la zona centrale della struttura. Questa configurazione è indicativa di un trasferimento di calore più efficiente all'interno del volume utile dello scambiatore, con un bilancio energetico più favorevole. Il confronto tra le due condizioni estreme di velocità mette chiaramente in luce l'influenza del tempo di residenza sulla capacità di trasferimento termico del sistema. In particolare, flussi a velocità ridotta permettono una più prolungata interazione termica tra fluido e superficie, incrementando l'efficacia del processo convettivo e favorendo la propagazione del calore lungo il dominio. Questi risultati evidenziano la necessità di una progettazione ottimizzata che consideri congiuntamente la geometria interna dello scambiatore e i parametri operativi del flusso, con l'obiettivo di massimizzare le prestazioni termiche complessive.

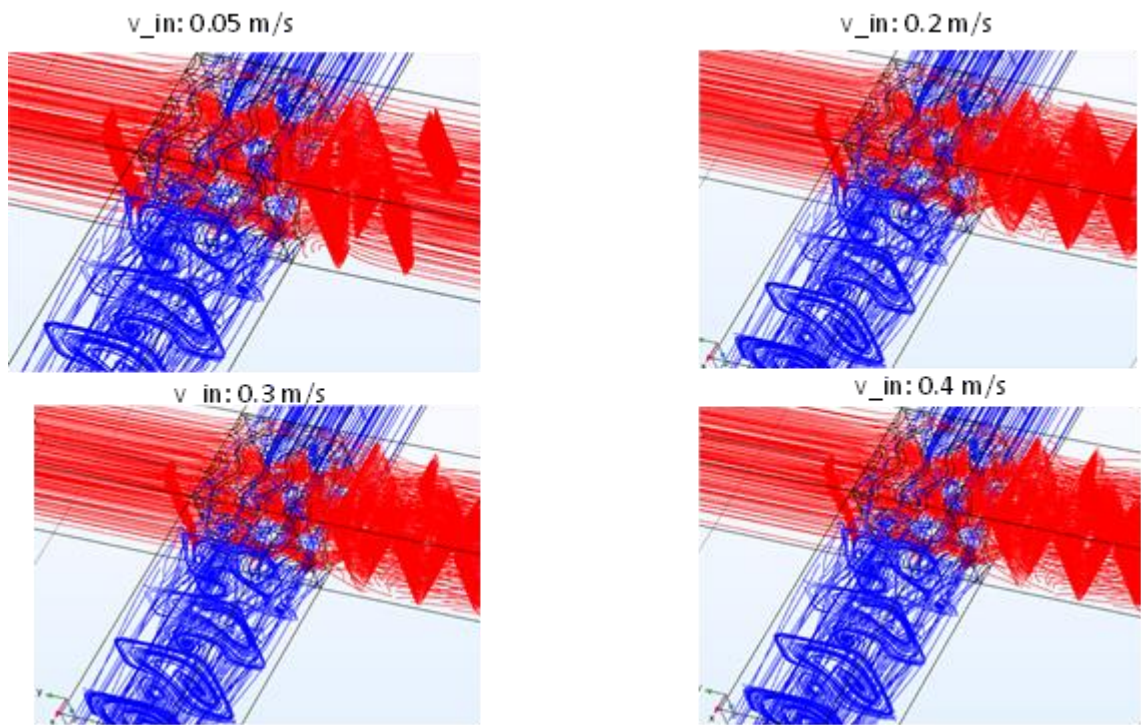


Figura 126: Linee di flusso relative ai due fluidi, visualizzate per differenti valori della velocità di ingresso dell'aria, con analisi delle modifiche nei campi di moto indotte dalla variazione del regime convettivo.

Le linee di flusso associate al dominio acqua, rappresentate in blu, mantengono una configurazione pressoché invariata al variare delle condizioni di ingresso dell'aria. Questo comportamento è riconducibile alla presenza di vortici stazionari ben definiti, generati dalla complessa morfologia interna della struttura TPMS, la quale impone una traiettoria forzata al flusso, indipendentemente dalle condizioni esterne. Al contrario, nel dominio aria, in cui la velocità di ingresso costituisce un parametro variabile, si osservano modifiche significative nella distribuzione delle linee di flusso. In particolare, per valori inferiori della velocità dell'aria, la configurazione del flusso in uscita risulta più regolare, con traiettorie maggiormente lineari e tendenzialmente parallele tra loro. Questo indica una minore interazione tra il fluido e le pareti interne della struttura, con ridotta instabilità del moto convettivo. La Figura 126 mostra la distribuzione della velocità nella sezione mediana dello scambiatore, per due condizioni estreme di velocità dell'aria in ingresso, selezionate al fine di mettere in evidenza gli effetti indotti dalla variazione del regime convettivo. L'analisi dei risultati evidenzia la presenza di strutture vorticali complesse, tipiche delle configurazioni TPMS, che si manifestano in entrambi i casi. Tuttavia, per una velocità di ingresso dell'aria pari a 0,4 m/s, si osservano

gradienti di velocità più accentuati e una formazione di vortici più intensa e distribuita, indicativa di un'accelerazione locale del fluido e di un'interazione più dinamica con la superficie solida. Al contrario, nel caso a bassa velocità, le zone ad alta velocità sono meno sviluppate e i campi di moto risultano più smorzati. Questi risultati confermano il ruolo chiave giocato dalla velocità del fluido nel determinare la natura e l'intensità dei fenomeni vorticosi all'interno dello scambiatore e suggeriscono che l'ottimizzazione delle condizioni operative può migliorare significativamente l'efficienza termofluidodinamica del dispositivo.

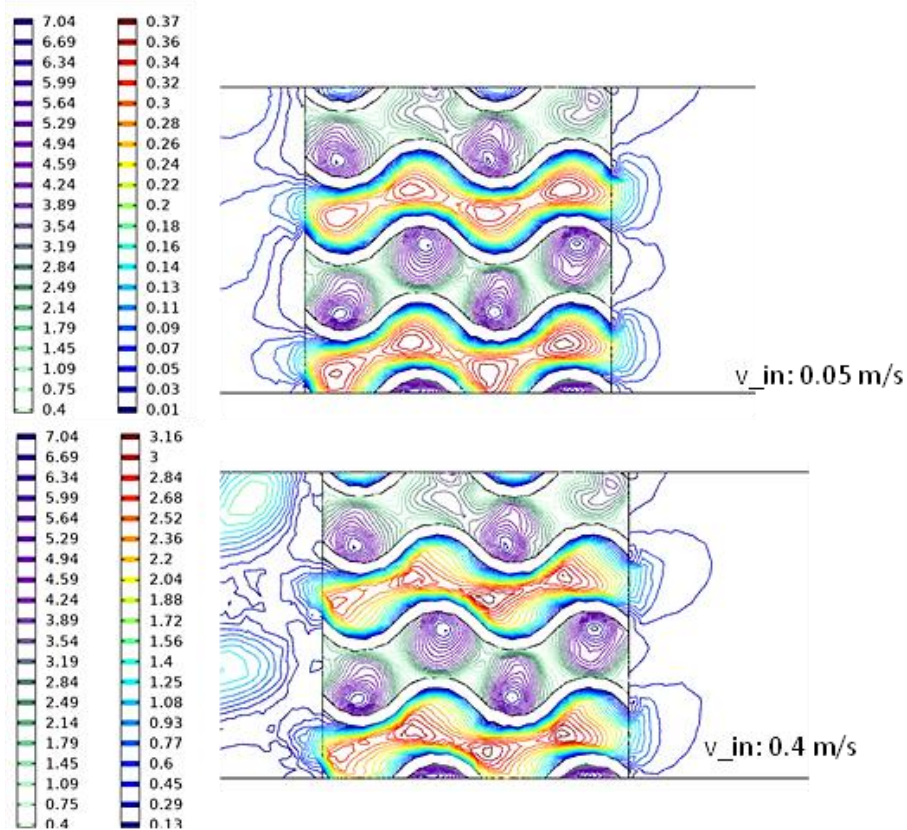


Figura 127: Distribuzione dei gradienti di velocità nella sezione centrale dello scambiatore per due differenti condizioni di velocità dell'aria in ingresso, evidenziando l'intensità e la configurazione dei campi vorticosi indotti dalla geometria TPMS.

L'analisi dei campi di velocità mostra che le scale di grandezza variano sensibilmente tra i due casi simulati. In particolare, per la condizione a bassa velocità, la velocità massima raggiunta nel dominio è pari a 0,37 m/s, mentre per la condizione ad alta velocità il valore massimo si attesta a 3,16 m/s. Questi risultati indicano che, rispetto alla velocità nominale di ingresso, il flusso può subire un'accelerazione fino a circa 6 volte nel primo caso e fino a 9 volte nel secondo,

evidenziando l'effetto localizzato di amplificazione della velocità indotto dalla geometria interna della struttura. L'incremento di velocità si manifesta principalmente nelle regioni a sezione ristretta generate dalla ripetizione periodica della superficie TPMS, dove l'area utile per il passaggio del fluido si riduce e il flusso viene canalizzato. In particolare, nel caso ad alta velocità di ingresso, la regione caratterizzata da elevati valori di velocità è più estesa, suggerendo un flusso più energetico e una maggiore intensità di moto convettivo all'interno del dominio. Nonostante le differenze nei valori assoluti di velocità, entrambi i casi presentano un'organizzazione del flusso qualitativamente analoga. La configurazione delle linee di corrente e la distribuzione dei gradienti indicano che la geometria interna dello scambiatore guida efficacemente il moto del fluido, mantenendo coerenza nei percorsi preferenziali anche al variare delle condizioni al contorno. Questo comportamento conferma la robustezza idrodinamica della struttura TPMS impiegata, che si dimostra in grado di regolare il flusso in maniera stabile e simmetrica, indipendentemente dalla velocità di ingresso.

3.4.5 Analisi sperimentale del comportamento meccanico di strutture TPMS a parete sottile, destinate all'impiego in scambiatori di calore, realizzate mediante manifattura additiva⁷

3.4.5.1 Abstract

In questa sezione si analizza l'influenza combinata della geometria interna di tipo TPMS e del materiale impiegato nella produzione additiva sul comportamento meccanico di strutture caratterizzate da pareti sottili, progettate per l'impiego in scambiatori di calore compatti. La valutazione è stata condotta mediante prove di compressione uniassiale, scelte come metodo sperimentale per approssimare i percorsi di carico e i meccanismi di cedimento che si verificano in condizioni di sollecitazione idrostatica. Pur non replicando in modo isotropo l'effetto di una vera pressione uniforme, questa modalità di prova è in grado di riprodurre, con buona approssimazione, le distribuzioni di stress interne e le modalità di frattura che si manifestano nelle applicazioni reali. Le attività sono state svolte nell'ambito della collaborazione tra l'Università di Messina e il CNR-ITAE.

3.4.5.2 Introduzione

Nel contesto della progettazione di scambiatori di calore basati su geometrie TPMS, un aspetto cruciale riguarda la resistenza delle pareti sottili che compongono la struttura interna. La capacità di queste superfici di sopportare sollecitazioni meccaniche è infatti determinante per la durabilità e l'affidabilità del componente in esercizio. Per affrontare questa problematica, lo studio ha previsto la fabbricazione dei provini tramite stampanti a resina, tecnologia particolarmente adatta alla realizzazione di pareti molto sottili e precise. Sono state quindi selezionate due resine fotopolimeriche ad alte prestazioni, caratterizzate da elevata rigidità e stabilità termica, al fine di garantire un confronto significativo tra differenti configurazioni geometriche e di valutare la reale idoneità dei materiali all'impiego in applicazioni termiche avanzate.

⁷ Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [93]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

3.4.5.3 Materiali e metodi

3.4.5.3.1 Processo di fabbricazione

Le geometrie TPMS considerate nello studio sono state generate utilizzando il software MSLattice, sviluppato per la progettazione di materiali architettonici e cellulari a periodicità controllata. Questo strumento è particolarmente indicato per la definizione parametrica di reticoli basati su superfici minime triplamente periodiche, consentendo la creazione di file in formato STL compatibili con la produzione additiva, sia per strutture a densità uniforme sia per configurazioni funzionalmente graduate. Le funzioni integrate permettono inoltre la classificazione delle dimensioni delle celle e della densità relativa, con possibilità di generare geometrie in volumi cuboidali, cilindrici o sferici.

Le tre tipologie di geometria selezionate sono:

- Giroide con spessore di parete pari a 0,30 mm;
- Fischer-Koch S con spessore di 0,24 mm;
- I-WP con spessore di 0,40 mm.

Tali valori corrispondono a una densità relativa uniforme del 15%, scelta sulla base di osservazioni sperimentali che hanno evidenziato come valori inferiori comportino difetti di produzione, in particolare nella formazione degli angoli esterni, con conseguente inadeguatezza dei campioni per prove meccaniche. La produzione dei campioni è stata effettuata mediante tecnologia Masked Stereolithography Apparatus (mSLA), che consente la realizzazione di pareti estremamente sottili, difficilmente ottenibili con processi Fused Deposition Modeling (FDM). È stata impiegata una stampante Formlabs Form 4 disponibile presso il CNR ITAE di Messina, dotata di tecnologia Low Force Display™ (LFD), che assicura la costruzione precisa di strati successivi, caratteristica essenziale per geometrie complesse come quelle TPMS. Le specifiche principali della stampante, riportate nella Tabella 19, evidenziano l'elevata risoluzione di stampa e la compatibilità con resine fotopolimeriche avanzate.

Caratteristica	Valore
Volume di stampa (L × W × H)	20 × 12,5 × 21 cm
Risoluzione asse Z	25–300 µm
Risoluzione assi XY	50 µm
Velocità media di stampa (spessore strato 100 µm)	40 mm/h
Velocità massima di stampa	100 mm/h
Durata serbatoio	Oltre 75 000 strati per ogni materiale Formlabs
Formati file compatibili	STL, OBJ, 3MF

Tabella 19: Caratteristiche principali della stampante 3D Formlabs Form 4.

A seguito della stampa, i campioni sono stati sottoposti a post-elaborazione comprendente:

- Lavaggio in alcol isopropilico per 10 min, al fine di rimuovere la resina residua;
- Polimerizzazione UV termica, con parametri adattati a ciascun tipo di resina, per ottimizzare le prestazioni meccaniche e termiche.

Le dimensioni finali dei provini sono state fissate a 75 × 75 × 10 mm, in conformità alla norma ASTM C365 che definisce le procedure per la caratterizzazione delle proprietà di compressione in piano di nuclei sandwich. Questa scelta dimensionale garantisce riproducibilità, confrontabilità e aderenza agli standard internazionali.

3.4.5.3.2 Materiali di stampa

Per la valutazione sperimentale sono state impiegate due resine fotopolimeriche prodotte da Formlabs Inc. (Somerville, Massachusetts, USA). Entrambi i materiali sono stati scelti per la loro resistenza meccanica e stabilità termica in condizioni operative gravose. La Rigid 10K Resin, caricata con vetro, offre un modulo elastico elevatissimo (paragonabile a quello del vetro o di termoplastici rinforzati con fibra), finitura superficiale liscia e opaca, eccellente resistenza chimica e buona stabilità dimensionale anche ad alte pressioni e temperature. Questa resina è indicata per stampi, maschere, utensili di precisione e componenti destinati a processi come stampaggio a iniezione, termoformatura e soffiaggio. La High Temp Resin è

formulata per applicazioni che richiedono resistenza termica eccezionale, con una temperatura di deflessione termica (HDT) pari a 238 °C a 0,45 MPa, la più alta tra i materiali Formlabs. È adatta a prototipi e componenti esposti a gas caldi, fluidi o ambienti ad alta temperatura, ma presenta limitata flessibilità.

Proprietà	Rigid 10K Resin	High Temp Resin
Temperatura di deflessione 0,45 MPa	218 °C	238 °C
Resistenza a trazione	53 MPa	49 MPa
Modulo elastico a trazione	10 GPa	2,8 GPa
Allungamento a rottura	1 %	2,3 %
Resistenza a flessione	103 MPa	97 MPa
Modulo elastico a flessione	10 GPa	2,8 GPa
Resistenza all'impatto (intaglio)	18 J/m	17 J/m
Dilatazione termica (0–150 °C)	46 µm/m °C	75 µm/m °C
Resistenza chimica	Elevata	Elevata

Tabella 20: Proprietà principali delle resine Rigid 10K e High Temp.

Ciascuna delle tre geometrie TPMS (Giroide, Fischer-Koch S, I-WP) è stata realizzata in entrambe le resine, al fine di consentire un confronto diretto delle proprietà meccaniche e termiche in funzione della combinazione materiale-geometria.

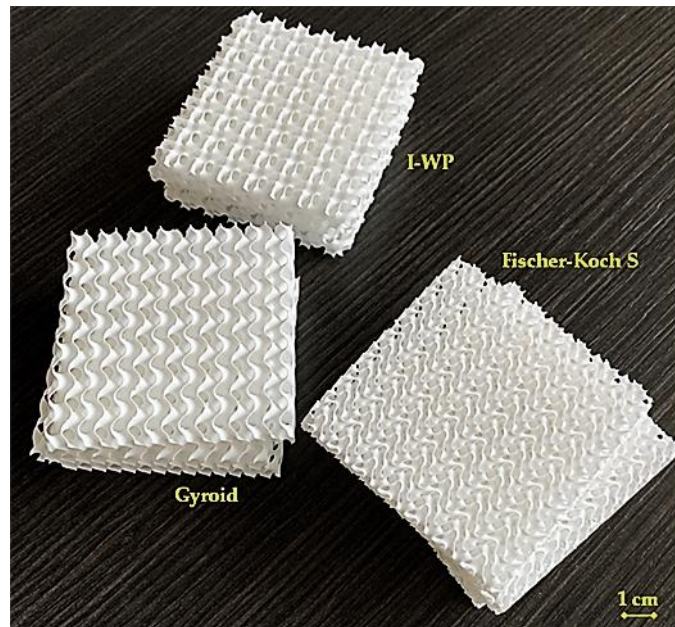


Figura 128: strutture TPMS stampate in resina Rigid 10K.

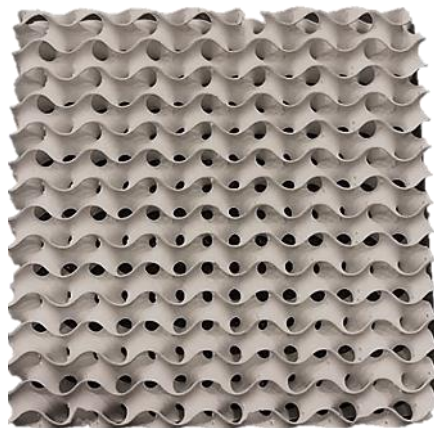


Figura 129: Campione geometria Giroide in resina Rigid 10K.

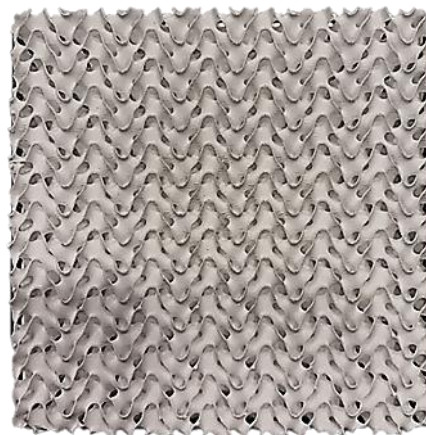


Figura 130: Campione geometria FKS in resina Rigid 10K.

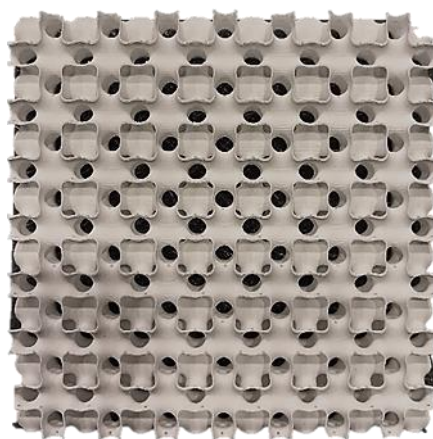


Figura 131: Campione geometria IWP in resina Rigid 10K.

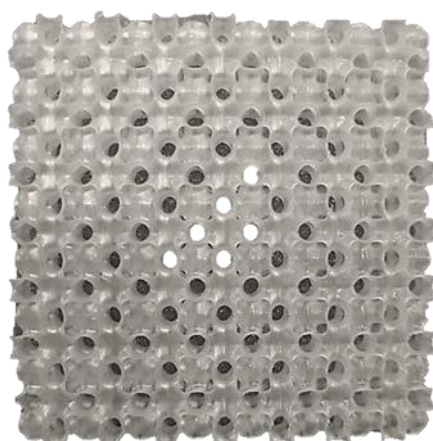


Figura 132: Campione geometria IWP in resina High Temp.

3.4.5.3.3 Prova di compressione

Le prove di caratterizzazione meccanica in compressione sono state condotte utilizzando una macchina di prova Zwick/Roell con capacità massima di carico pari a 600 kN, equipaggiata con una cella di carico da 10 kN, scelta per garantire un'elevata precisione nella misura delle forze applicate, in particolare su campioni con carichi di rottura relativamente contenuti. I provini, preparati secondo la geometria e le dimensioni previste dallo standard di riferimento, sono stati posizionati tra le piastre di compressione dell'apparecchiatura. Il carico è stato applicato in modo controllato, a velocità costante, fino al raggiungimento del valore massimo prestabilito o fino al cedimento strutturale del campione. Durante l'intero processo di prova, il sistema di acquisizione dati ha registrato in continuo sia la forza applicata sia la deformazione corrispondente, permettendo di ottenere con

precisione il valore di resistenza a compressione, definito come il rapporto tra forza e area della sezione caricata ed espresso in MPa (o N/mm²). Oltre alla resistenza meccanica, è stata analizzata la modalità di rottura del campione, distinguendo comportamenti di tipo fragile, duttile o caratterizzati da fessurazioni localizzate. L'elaborazione dei dati ha prodotto curve tensione–deformazione che consentono di correlare il carico applicato alla risposta meccanica del materiale, fornendo indicazioni fondamentali sulla rigidità, sulla capacità di assorbimento dell'energia e sui meccanismi di cedimento. Durante le prove è stata impostata una velocità di avanzamento della traversa, ossia la trave rigida solidale con il telaio di carico, pari a 0,5 mm/min. Tale valore è stato scelto al fine di acquisire in maniera accurata la curva sforzo–deformazione in condizioni di carico quasi statiche. L'adozione di una velocità di prova ridotta consente di minimizzare gli effetti dinamici indesiderati e di riprodurre in maniera più fedele le sollecitazioni stazionarie tipiche delle condizioni di pressione idrostatica. La Figura 133 presenta uno schema rappresentativo della configurazione di prova adottata.

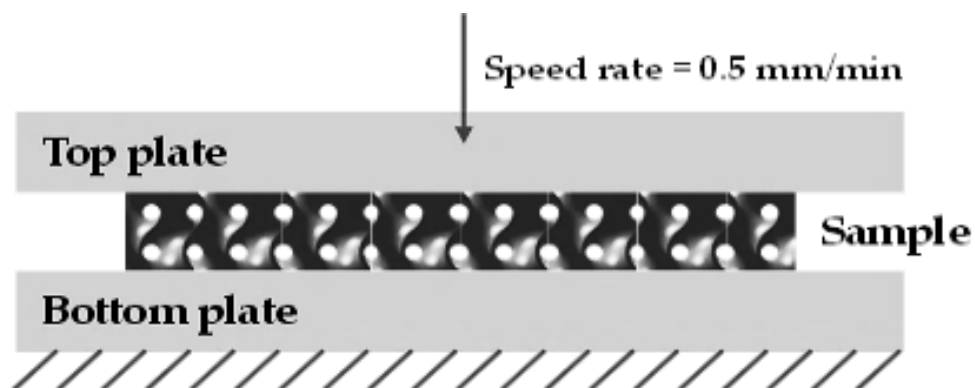


Figura 133: Rappresentazione della prova di compressione su provino TPMS.



Figura 134: Fotografia della prova di compressione su provino TPMS di tipo Giroide, realizzato in resina Rigid 10K.



Figura 135: Fotografia della prova di compressione eseguita su provino TPMS di tipo Fischer–Koch S, realizzato in resina Rigid 10K.



Figura 136: Fotografia della prova di compressione eseguita su provino TPMS di tipo Fischer–Koch S, realizzato in resina High Temp.



Figura 137: Fotografia della prova di compressione eseguita su provino TPMS di tipo I-WP, realizzato in resina High Temp.



Figura 138: Fotografia della prova di compressione eseguita su provino TPMS di tipo Giroide, realizzato in resina High Temp.

3.4.5.4 Analisi dei risultati

Tipologia cella	Rigid 10K Resin [g]	High Temp Resin [g]
Giroide	10.5	7.5
I-WP	10.2	7.4
Fischer–Koch S	14.0	9.0

Tabella 21: Massa dei campioni TPMS per tipologia di cella e materiale di stampa.

Per la valutazione delle prestazioni meccaniche dei provini TPMS realizzati, la prima fase di analisi ha riguardato la determinazione della massa dei campioni fabbricati con le due differenti resine: Rigid 10K Resin e High Temp Resin. I risultati, sintetizzati nella Tabella 21, evidenziano che, per tutte le tipologie di celle considerate, i campioni realizzati in Rigid 10K Resin presentano una massa superiore rispetto a quelli prodotti con High Temp Resin. Tale differenza è attribuibile alla maggiore densità e alla composizione rinforzata con particelle di vetro della Rigid 10K Resin. Queste variazioni di peso, di entità significativa, sottolineano l'esigenza di normalizzare le prestazioni meccaniche rispetto alla massa del provino, al fine di consentire un confronto oggettivo tra i materiali indipendentemente dalla loro densità intrinseca. A tale scopo è stato introdotto il concetto di stress specifico (σ_s), definito come il rapporto tra la tensione massima registrata durante la prova e la massa del campione:

$$\sigma_s = \sigma / m$$

dove σ rappresenta il valore di tensione (MPa) rilevato durante la prova e m la massa del campione (kg). Questo parametro consente di esprimere l'efficienza strutturale intrinseca del materiale, isolando l'influenza della densità e permettendo una comparazione più accurata delle prestazioni meccaniche tra configurazioni e materiali differenti.

3.4.5.4.1 Geometria Giroide

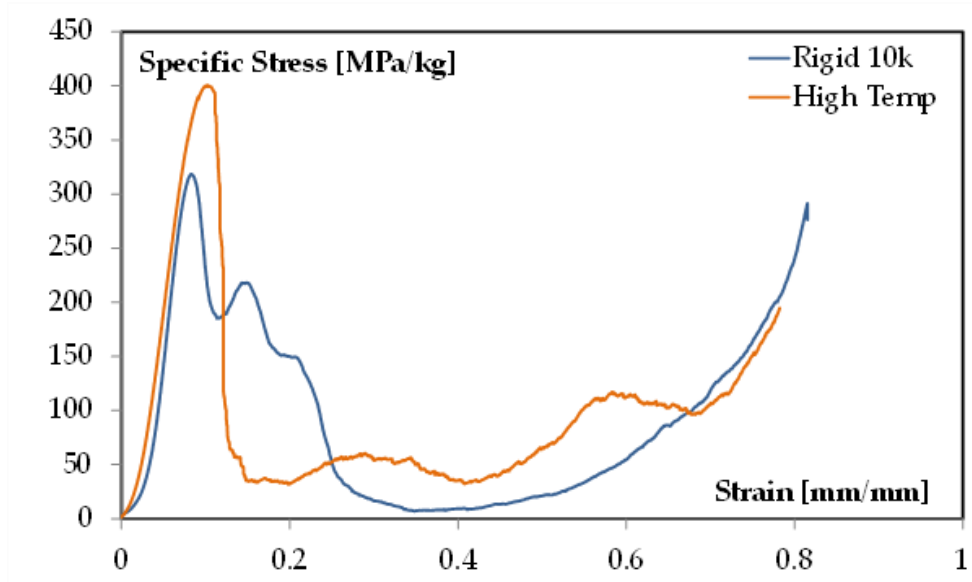


Figura 139: Curve sperimentali di stress specifico in funzione della deformazione per provini TPMS con geometria Giroide, realizzati in Rigid 10K Resin e High Temp Resin, con evidenza delle tre fasi caratteristiche di comportamento meccanico sotto compressione.

Il calcolo dello stress specifico ha permesso di effettuare un confronto diretto e privo di distorsioni dovute alla densità tra le prestazioni meccaniche delle due resine utilizzate. I risultati indicano che la Rigid 10K Resin presenta prestazioni meccaniche assolute superiori, principalmente grazie alla maggiore densità e rigidità intrinseca. Tuttavia, la High Temp Resin mostra valori competitivi in termini di tensione specifica, beneficiando della massa significativamente inferiore dei campioni. Le curve stress specifico–deformazione relative ai provini con geometria Giroide, riportate in Figura 139, evidenziano un comportamento meccanico tipico delle strutture cellulari sottoposte a compressione, articolato in tre fasi principali:

1. Fase elastica iniziale, caratterizzata da un incremento proporzionale della tensione in funzione della deformazione;
2. Fase di plateau o di deformazione stabile, in cui il materiale mostra una resistenza quasi costante, associata all'attivazione di meccanismi di cedimento progressivo;
3. Fase di densificazione finale, nella quale la tensione cresce rapidamente a seguito della compattazione della struttura.

Nella seconda fase si manifestano le differenze sostanziali tra i due materiali, sia in termini di comportamento meccanico sia nei meccanismi di frattura. In particolare, la struttura Giroide in Rigid 10K Resin evidenzia una rottura progressiva, con formazione di microcricche in corrispondenza delle zone di massima concentrazione di stress. Queste cricche si propagano gradualmente lungo la struttura, determinando un calo successivo dello stress e generando un tipico andamento a gradini nella curva sperimentale. Tale risposta dimostra la capacità della geometria Giroide, unita alla rigidità del materiale, di mantenere una resistenza residua significativa anche in presenza di danni distribuiti. Con l'aumentare della deformazione, la struttura entra nella fase di densificazione, durante la quale i frammenti delle pareti cellulari fratturate collassano all'interno dei vuoti, riducendo progressivamente la porosità e incrementando la tensione sopportabile fino alla compattazione quasi completa del materiale.

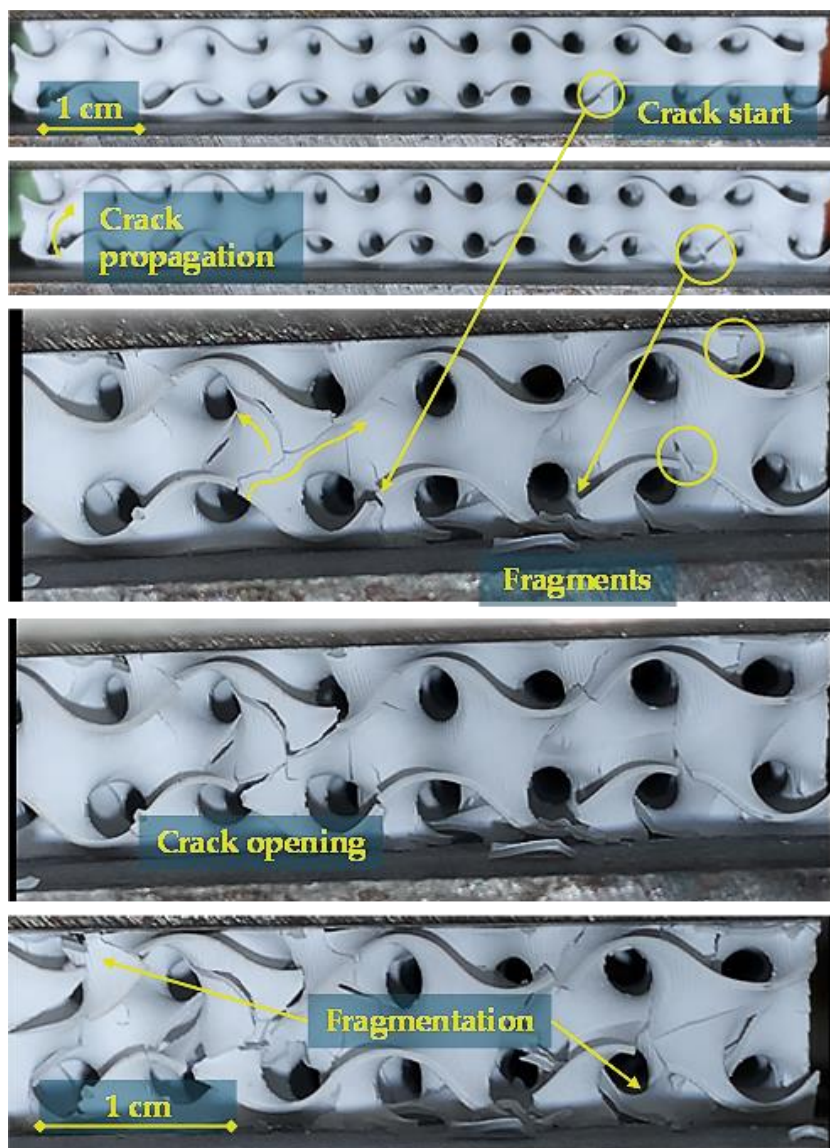


Figura 140: Dettaglio della morfologia di frattura di un provino TPMS con geometria Giroide dopo prova di compressione, con individuazione delle zone di innesco e propagazione delle cricche.

L'analisi post-prova della struttura fratturata Figura 140 ha evidenziato una modalità di cedimento distribuita, in cui le fratture si innescano prevalentemente nelle zone più sottili delle pareti cellulari e si propagano lungo percorsi di massimo stress, coinvolgendo progressivamente le aree adiacenti. Sulla base delle osservazioni sperimentali, il processo di rottura può essere suddiviso nelle seguenti fasi:

1. Innesco della cricca: formazione di microcricche nei punti di elevata concentrazione delle tensioni, tipicamente in prossimità di intersezioni o

sezioni sottili, quando il carico locale eccede la resistenza a trazione del materiale.

2. Propagazione della cricca: avanzamento graduale delle cricche, che collegano le zone a maggiore sollecitazione, preservando inizialmente l'integrità delle porzioni circostanti.
3. Apertura della cricca: progressivo ampliamento delle fratture, con formazione di separazioni visibili all'interno della struttura; in questa fase la continuità meccanica subisce una riduzione significativa.
4. Frammentazione: rottura di porzioni della struttura cellulare in segmenti più piccoli, accompagnata dal distacco localizzato e dallo spostamento di materiale nei vuoti interni.
5. Densificazione progressiva: nella fase finale, i frammenti prodotti si accumulano nei pori residui, aumentando la densità apparente del provino e determinando l'incremento della tensione registrato nella parte conclusiva della curva.

Questa sequenza di eventi mette in evidenza la natura progressiva del meccanismo di cedimento, nel quale la fase di apertura delle cricche precede quella di frammentazione, rappresentando un deterioramento strutturale graduale. Tale comportamento consente alla geometria Giroide, quando realizzata in Rigid 10K Resin, di ritardare il collasso completo, mantenendo una capacità di carico residua anche in presenza di danni estesi. Come tipico nei materiali a comportamento fragile, la rottura avviene a valori di tensione relativamente elevati e in maniera repentina. Con il progredire della compressione, i frammenti delle pareti cellulari fratturate si accumulano progressivamente all'interno dei vuoti interni della struttura, determinando un collasso delle celle e una conseguente riduzione della frazione di vuoto. Ciò comporta una disposizione interna sempre più compatta. Questa fase di densificazione è particolarmente rilevante ai fini della valutazione delle capacità di assorbimento energetico del materiale, in quanto la curva sforzo-deformazione mostra tipicamente un marcato incremento dello sforzo sostenibile in questa regione. Per contro, la struttura realizzata in High Temp Resin, una volta raggiunto il cedimento, si frattura e si frammenta in piccoli elementi irregolari, perdendo completamente la configurazione geometrica originaria e risultando

irricognoscibile dal punto di vista morfologico. I provini realizzati in High Temp Resin manifestano un meccanismo di cedimento di tipo fragile, nettamente distinto dalla rottura progressiva rilevata nei campioni in Rigid 10K Resin. Raggiunto il valore massimo di stress specifico, le cricche si propagano in maniera rapida e incontrollata attraverso l'intera struttura, determinando un collasso strutturale generalizzato. Questa dinamica si traduce in una brusca riduzione del carico sostenibile, con assenza quasi totale di resistenza residua. Tale comportamento riflette la natura fragile del materiale, la cui ridotta capacità di deformazione plastica impedisce un'attenuazione graduale delle sollecitazioni e favorisce un cedimento improvviso ed esteso della maglia cellulare. Durante la fase di densificazione, i frammenti derivanti dalla frattura delle pareti si accumulano nei vuoti interni, generando un nuovo incremento dello stress, fenomeno osservabile nella parte finale della curva sperimentale stress-deformazione specifica. Tuttavia, la rottura iniziale di tipo catastrofico compromette in maniera significativa la possibilità della struttura di sopportare ulteriori carichi oltre tale fase. L'osservazione delle superfici fratturate evidenzia una modalità di cedimento caratterizzata dal collasso simultaneo di ampie porzioni della struttura, come illustrato in Figura 141.

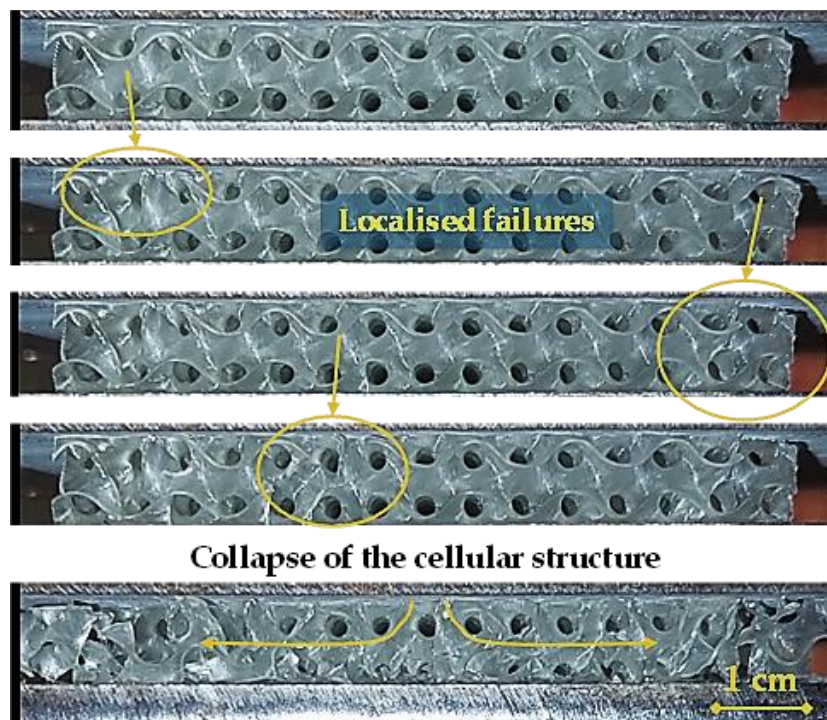


Figura 141: Vista delle superfici fratturate di un provino TPMS in High Temp Resin dopo prova di compressione, con evidenza del collasso simultaneo di ampie porzioni della struttura cellulare.

Questo comportamento si pone in netto contrasto con quello rilevato nei campioni in Rigid 10K Resin, nei quali la frattura avviene in maniera distribuita lungo la struttura. In tali provini, le zone di innesco si localizzano prevalentemente nei punti di elevata concentrazione di tensione, spesso in corrispondenza delle intersezioni tra più pareti cellulari. La presenza di un meccanismo di rottura progressivo consente a questa resina di mantenere una porzione significativa della capacità portante anche dopo l'avvio del cedimento, caratteristica che la rende più idonea ad applicazioni in cui è richiesto il sostegno del carico oltre il punto di frattura iniziale.

In sintesi:

- Rigid 10K Resin: garantisce una maggiore resistenza residua grazie al meccanismo di cedimento graduale, risultando particolarmente adatta per applicazioni in cui il controllo della frattura e la capacità di mantenere il carico siano requisiti fondamentali.
- High Temp Resin: raggiunge un valore di picco di stress specifico più elevato, ma presenta una resistenza residua ridotta, limitandone l'impiego

in applicazioni soggette a sollecitazioni dinamiche o in contesti in cui la sicurezza strutturale sia critica.

3.4.5.4.2 Geometria I-WP

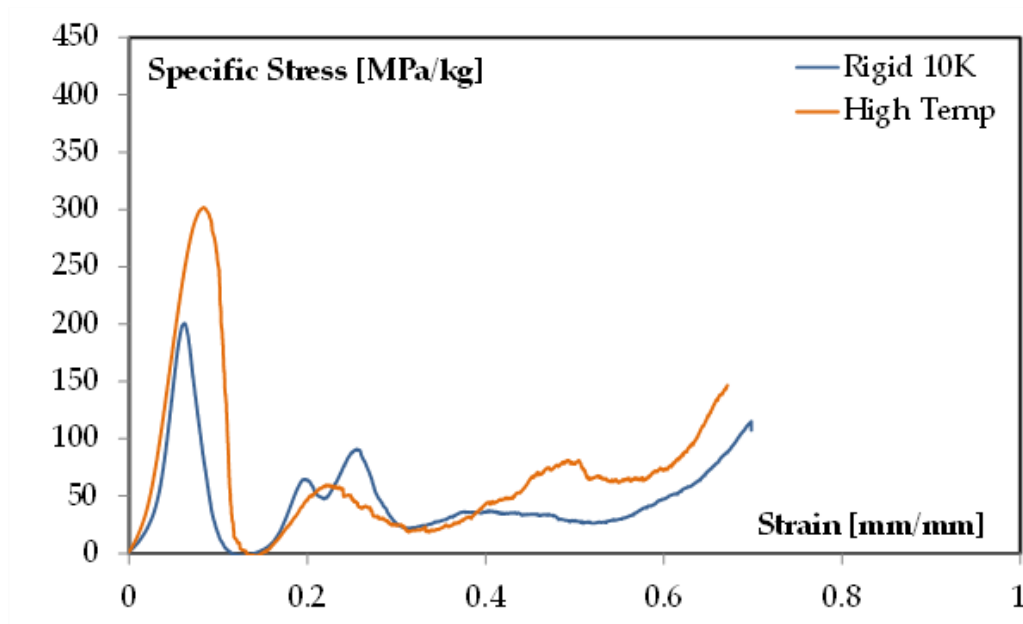


Figura 142: Curve sperimentali tensione–deformazione per provini TPMS con geometria I-WP, realizzati in Rigid 10K Resin e High Temp Resin, con confronto diretto del comportamento meccanico sotto carico di compressione.

Le curve sperimentali di stress specifico–deformazione relative ai provini I-WP in Rigid 10K Resin, riportate in Figura 142, evidenziano un comportamento articolato in tre fasi principali:

1. Fase elastica iniziale, in cui la tensione aumenta proporzionalmente alla deformazione;
2. Fase intermedia di densificazione, caratterizzata da modifiche strutturali e meccanismi di cedimento progressivo;
3. Fase finale di compattazione, in cui la resistenza cresce rapidamente a seguito della riduzione della porosità.

Le differenze più rilevanti tra i due materiali emergono nella seconda fase, a causa dell'interazione tra il diverso comportamento meccanico delle resine e la particolare configurazione geometrica della struttura I-WP. I campioni in Rigid 10K Resin manifestano un meccanismo di rottura progressivo, come evidenziato dall'andamento della curva: al raggiungimento del valore massimo di stress

specifico, si registra un calo repentino e marcato della tensione, indicativo di un cedimento distribuito. In questo caso, le fratture non risultano concentrate in un'unica zona, ma si generano simultaneamente su più piani strutturali. L'innesco iniziale si verifica nello strato superiore, in prossimità dell'area di applicazione del carico, per poi propagarsi verso la sezione centrale del provino, come illustrato in Figura 142. Questa fessurazione simultanea compromette rapidamente l'integrità complessiva della struttura, determinando un collasso repentino della capacità portante.

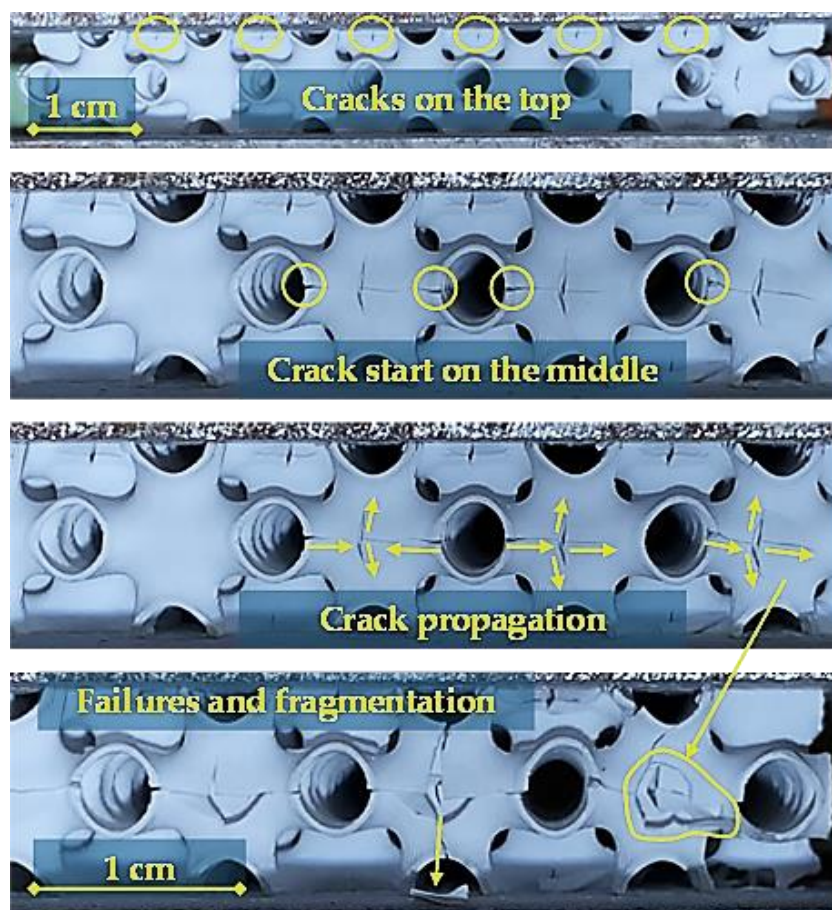


Figura 143: Modalità di cedimento di un provino TPMS con geometria I-WP, realizzato in Rigid 10K Resin, osservata a seguito di prova di compressione.

A seguito del collasso iniziale, il materiale conserva una capacità portante residua, evidenziata da un incremento graduale della tensione dopo la caduta repentina. Tale incremento non segue un andamento lineare, ma procede per fasi, come visibile nella curva sperimentale: ogni gradino corrisponde alla propagazione progressiva delle cricche all'interno della struttura. Con l'avanzare della frattura, porzioni del

materiale continuano a cedere, generando plateau intermedi in cui lo stress si stabilizza temporaneamente. Questa dinamica è ulteriormente illustrata in Figura 143, che mostra la frammentazione della struttura e la diffusione progressiva delle cricche. La fase di aumento graduale della tensione si conclude quando il materiale fratturato inizia a riempire i vuoti interni della geometria I-WP. Con la progressiva compattazione di tali vuoti, lo stress cresce nuovamente in modo marcato, segnalando l'inizio della fase di densificazione. Questo incremento finale riflette la risposta della struttura alla compressione del materiale frammentato e coincide con la transizione alla fase di compattazione finale, in cui i vuoti sono completamente saturati e la resistenza alla deformazione aumenta in maniera significativa. I provini I-WP realizzati in High Temp Resin evidenziano invece un meccanismo di cedimento tipicamente fragile, in netto contrasto con la rottura progressiva osservata nei campioni in Rigid 10K Resin. La curva sperimentale mostra un picco di stress specifico significativamente più elevato, indicativo di una maggiore rigidità e resistenza iniziale alla deformazione. Tuttavia, questo è seguito da un calo improvviso e catastrofico dello stress, determinato dalla propagazione quasi istantanea delle cricche attraverso l'intera struttura, con conseguente perdita della capacità portante.

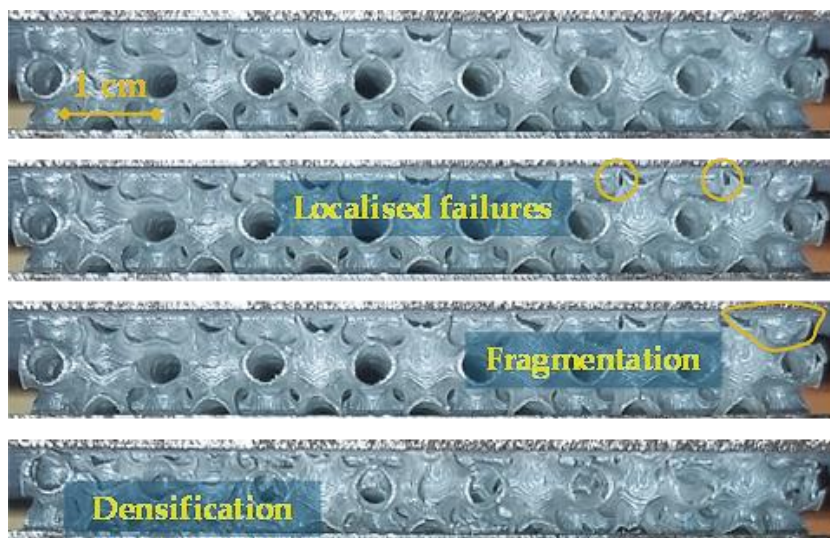


Figura 144: Modalità di cedimento di un provino TPMS con geometria I-WP, realizzato in High Temp Resin, osservata a seguito di prova di compressione.

La High Temp Resin non mostra un incremento graduale dello stress dopo il collasso iniziale. Al contrario, la struttura transita immediatamente nella fase di

densificazione, durante la quale il materiale frammentato occupa progressivamente i vuoti interni. In questa fase lo stress aumenta rapidamente fino al raggiungimento della compattazione completa, ma la redistribuzione del carico residuo evidenzia in maniera marcata la natura fragile del materiale, che non è in grado di fornire una resistenza significativa tra la rottura iniziale e la densificazione. La Rigid 10K Resin, invece, mantiene una resistenza superiore durante la fase di densificazione. Dopo il calo iniziale associato alla formazione e propagazione delle cricche, il materiale conserva una capacità portante residua, permettendo un incremento graduale della tensione. Questo andamento riflette la capacità del materiale di gestire un cedimento progressivo, con distribuzione e stabilizzazione parziale dei carichi durante la propagazione delle fratture. Tale comportamento graduale cessa quando i vuoti interni si saturano, determinando il passaggio alla compattazione completa, in cui la tensione cresce nuovamente in maniera significativa. La natura fragile della High Temp Resin si traduce in una perdita repentina di integrità strutturale, con redistribuzione minima dei carichi e assenza di una fase intermedia di resistenza tra il cedimento iniziale e la densificazione. Al contrario, la Rigid 10K Resin risulta più indicata per applicazioni che richiedono meccanismi di frattura controllati e una capacità di carico sostenuta, mentre la High Temp Resin trova maggiore applicazione in scenari in cui si privilegia il raggiungimento di elevati valori di picco di resistenza a discapito della gestione progressiva della rottura.

3.4.5.4.3 Geometria Fischer-Koch S

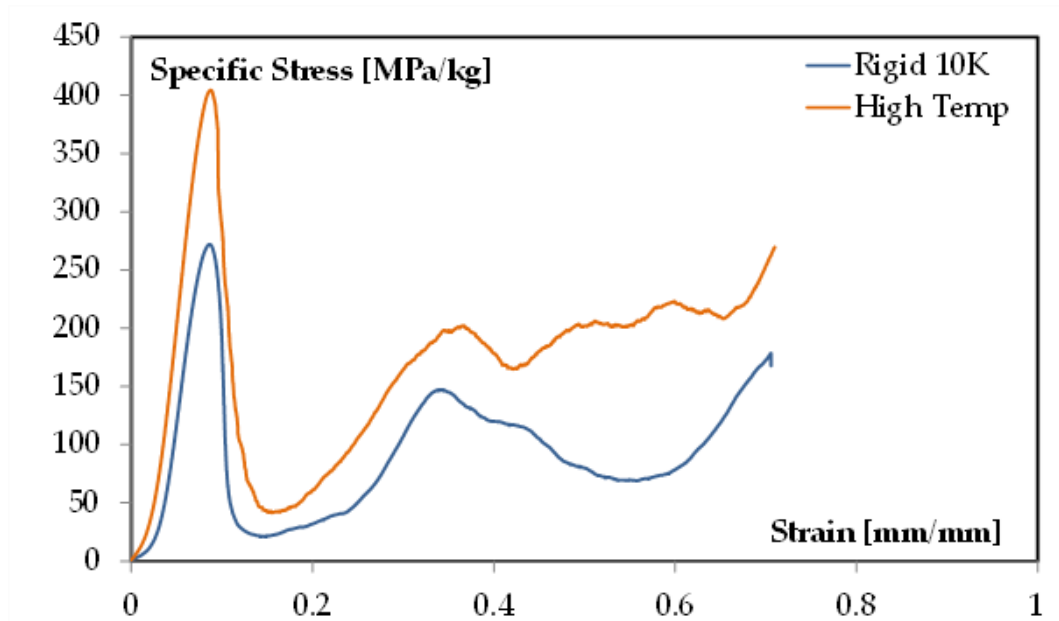


Figura 145: Curve sperimentali tensione–deformazione per provini TPMS con geometria Fischer–Koch S, realizzati in Rigid 10K Resin e High Temp Resin, con confronto diretto del comportamento meccanico sotto compressione.

Le curve sperimentali di stress specifico–deformazione per i provini con geometria Fischer–Koch S (Figura 145) evidenziano, in entrambe le resine, un picco iniziale caratteristico, seguito da un brusco calo della tensione e da una fase successiva di recupero attribuibile alla resistenza residua della struttura. Le differenze principali tra i due materiali emergono nelle fasi di densificazione e di compattazione finale. Nei campioni in Rigid 10K Resin, il meccanismo di cedimento è di tipo progressivo, ma la riduzione dello stress subito dopo il picco è più marcata rispetto a quanto osservato per la geometria Giroide. Questo comportamento è riconducibile alla propagazione simultanea delle cricche su più piani strutturali, con particolare incidenza sulle pareti delle celle, come mostrato in Figura 146. Le fratture localizzate, visibili nella parte superiore dell'immagine, indeboliscono inizialmente la struttura e determinano il rapido calo dello stress. Successivamente, il materiale conserva una capacità portante residua, che si traduce in un incremento graduale delle tensioni. Tale andamento è dovuto alla propagazione progressiva delle cricche dai punti di innesco iniziali e alla conseguente redistribuzione delle sollecitazioni. Durante questa fase intermedia, i frammenti delle pareti cellulari fratturate riempiono gradualmente i vuoti interni, generando plateau temporanei nella curva

sperimentale. Con il progredire della densificazione, si osserva una lieve riduzione della tensione dovuta alla frammentazione progressiva del materiale. Infine, nella fase di compattazione, la saturazione completa dei vuoti determina un brusco incremento dello stress, segnando il termine della prova di compressione.

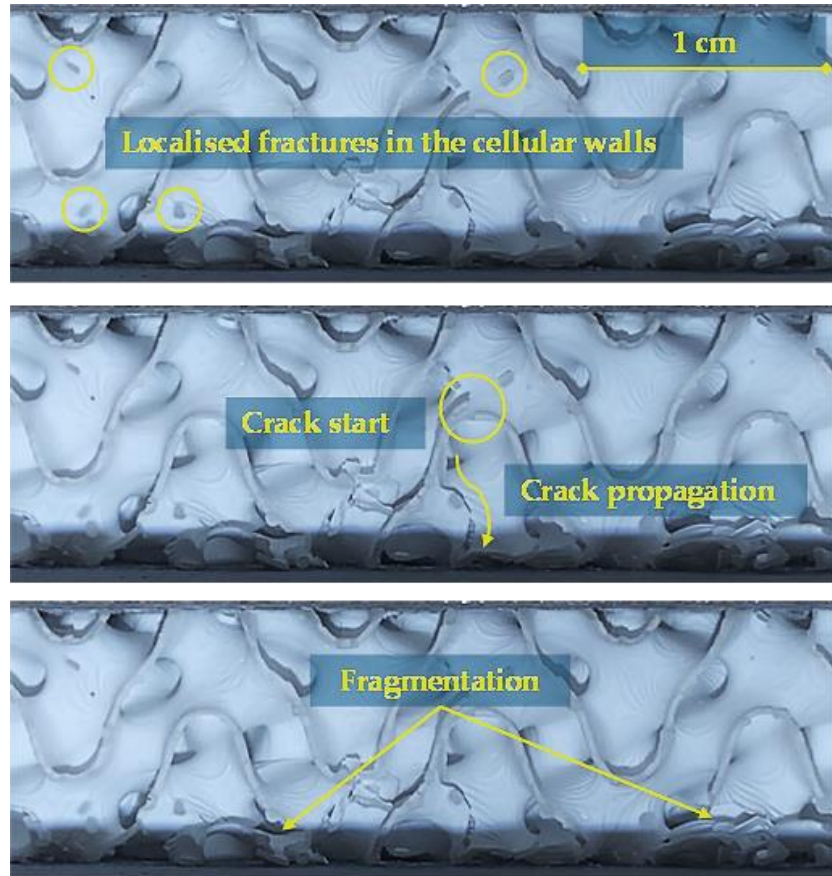


Figura 146: Modalità di cedimento di un provino TPMS con geometria Fischer-Koch S, realizzato in High Temp Resin, osservata a seguito di prova di compressione.

La sequenza di cedimento osservata per i provini in Rigid 10K Resin può essere sintetizzata come segue:

1. Innesco della cricca in aree localizzate delle pareti cellulari, tipicamente in corrispondenza di zone a elevata concentrazione di tensione;
2. Propagazione della cricca con conseguente collasso progressivo della maglia strutturale;
3. Frammentazione e densificazione graduale, durante la quale i frammenti derivanti dalla frattura riempiono i vuoti interni, contribuendo al mantenimento della capacità portante residua.

Al contrario, i provini Fischer–Koch S realizzati in High Temp Resin presentano un meccanismo di cedimento di tipo fragile, caratterizzato da valori di stress specifico più elevati rispetto a quelli registrati per la Rigid 10K Resin, ma seguiti da un collasso repentino e catastrofico. Come mostrato in Figura 25, la propagazione delle cricche avviene in maniera rapida e diffusa, attraversando l'intera struttura e determinando un cedimento improvviso e generalizzato, senza una fase intermedia significativa di resistenza residua.

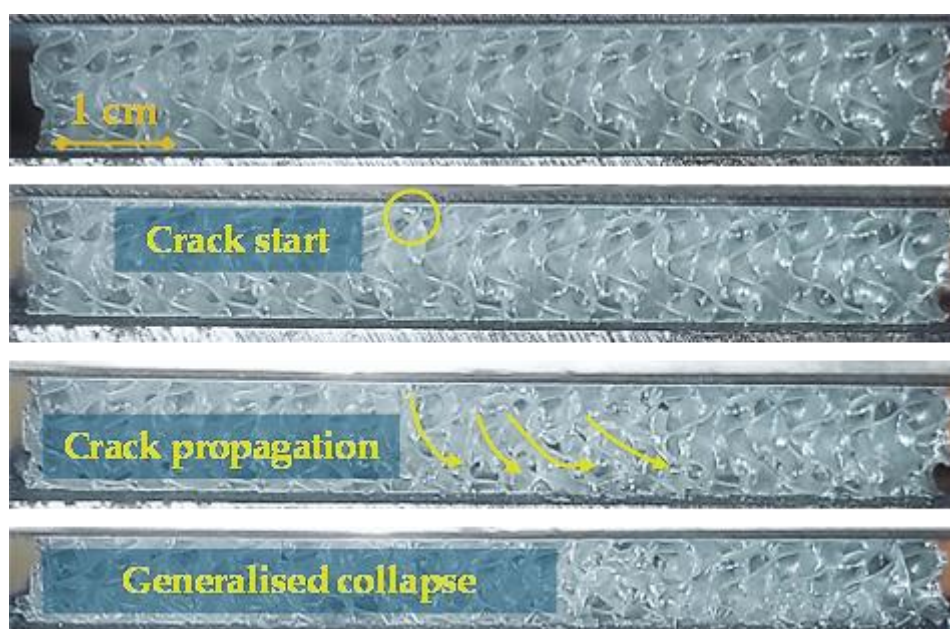


Figura 147: Modalità di cedimento di un provino TPMS con geometria Fischer–Koch S, realizzato in High Temp Resin, osservata a seguito di prova di compressione.

La sequenza di cedimento osservata per i provini in High Temp Resin, illustrata in Figura 147, può essere sintetizzata come segue:

1. Innesco e propagazione rapida delle cricche, che conducono quasi immediatamente al collasso strutturale;
2. Frammentazione e densificazione, durante le quali il materiale fratturato si compatta progressivamente nei vuoti interni della struttura;
3. Compattazione finale, caratterizzata da un incremento marcato dello stress, corrispondente al riempimento completo dei vuoti e alla saturazione del volume disponibile.

Sebbene le curve di stress specifico–deformazione per i provini Fischer–Koch S presentino un andamento complessivamente simile per entrambe le resine, la Rigid 10K Resin evidenzia un meccanismo di cedimento più controllato, con una fase di recupero graduale della resistenza successiva al calo iniziale dello stress. Tale comportamento risulta particolarmente vantaggioso in applicazioni in cui siano richiesti un collasso progressivo e una redistribuzione sostenuta del carico. Al contrario, la High Temp Resin raggiunge valori di picco di stress specifico più elevati, ma manifesta un cedimento fragile e catastrofico, senza un recupero significativo della capacità portante. Questa caratteristica ne limita l’impiego a contesti in cui la priorità sia massimizzare la resistenza iniziale, anche a scapito della gestione progressiva della frattura.

3.4.5.4.4 Confronto delle curve sperimentali tensione–deformazione per provini TPMS realizzati in Rigid 10K Resin e High Temp Resin, relativi alle diverse geometrie analizzate.

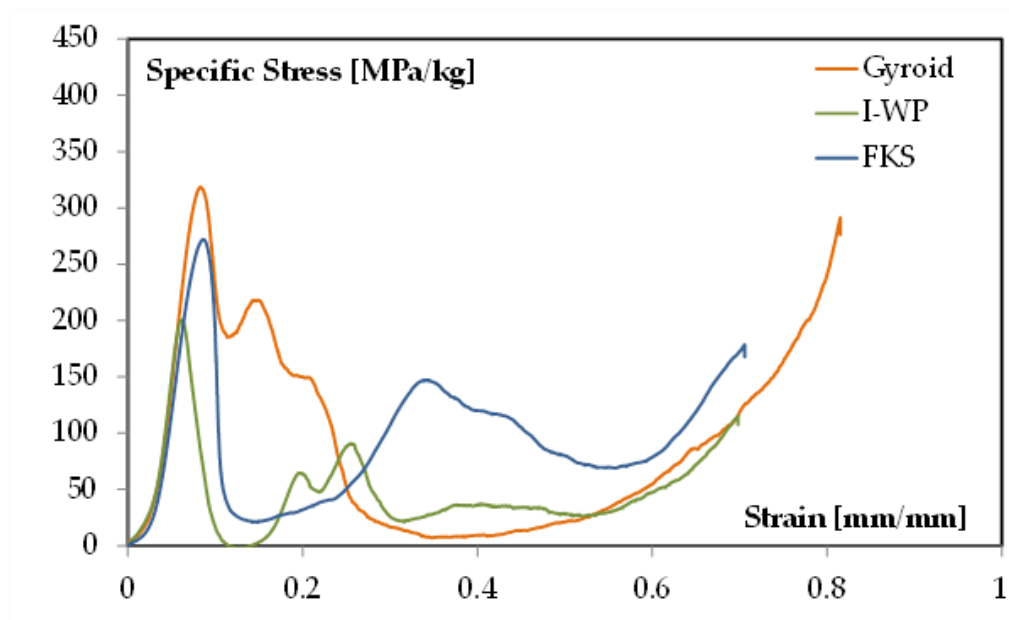


Figura 148: Confronto delle curve sperimentali tensione–deformazione per provini TPMS realizzati in Rigid 10K Resin, riferite alle diverse geometrie strutturali analizzate.

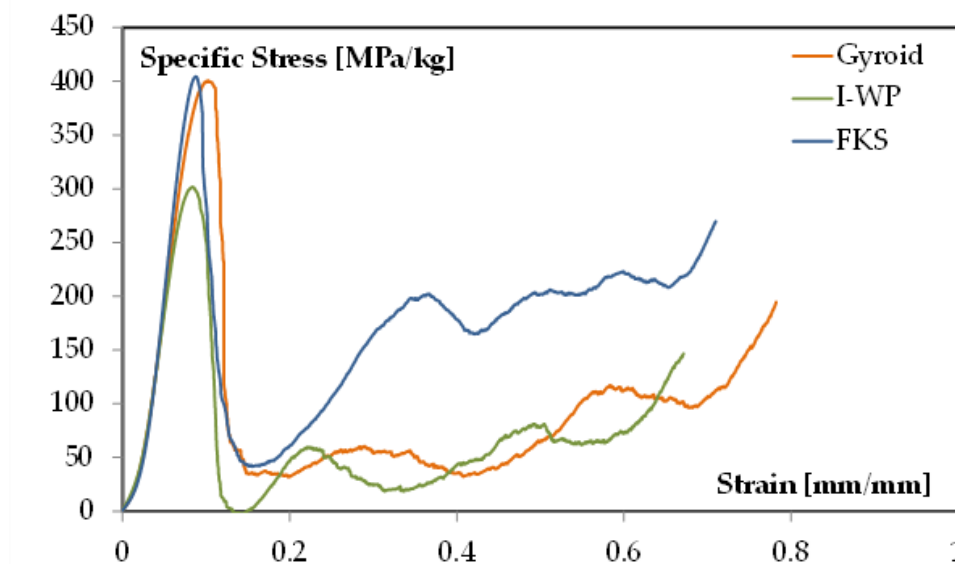


Figura 149: Confronto delle curve sperimentali tensione–deformazione per provini TPMS realizzati in High Temp Resin, riferite alle diverse geometrie strutturali analizzate.

Le Figura 148 e Figura 149 riportano un’analisi comparativa dettagliata delle curve sperimentali di stress specifico–deformazione relative a tre differenti configurazioni TPMS: Gyroid, I-WP e Fischer–Koch S (FKS), realizzate utilizzando due materiali di stampa distinti, Rigid 10K Resin (Figura 148) e High Temp Resin (Figura 149). L’analisi è condotta valutando parametri meccanici chiave quali: valore massimo di stress specifico (tensione di picco), modalità di rottura, comportamento in fase di resistenza residua e andamento della densificazione fino alla compattazione finale. Per la Rigid 10K Resin (Figura 148), le tre geometrie esibiscono risposte meccaniche nettamente distinguibili. La struttura Giroide evidenzia il valore massimo di tensione specifica più elevato, segno di una capacità superiore di resistere alla deformazione iniziale rispetto alle altre configurazioni. Successivamente al picco, si osserva un brusco calo dello stress dovuto all’innesco e alla propagazione delle cricche. Tuttavia, grazie al meccanismo di frattura progressivo, la resistenza residua si mantiene superiore, consentendo alla struttura di sopportare ulteriori carichi per un intervallo di deformazione esteso durante la fase di densificazione. In questa fase, lo stress cresce progressivamente fino alla saturazione completa dei vuoti interni, momento in cui si raggiunge la fase di compattazione finale con un incremento netto delle tensioni.

La cella I-WP presenta un picco di tensione leggermente inferiore rispetto alla Giroide. Tuttavia, la caduta di stress immediatamente successiva è più marcata, fenomeno attribuibile alla fessurazione simultanea su più piani all'interno della maglia strutturale. La resistenza residua mostra un recupero graduale dello stress, indicativo di propagazione progressiva delle cricche e frammentazione controllata del materiale. La compattazione finale evidenzia un incremento moderato dello stress, coerente con un processo di densificazione meno uniforme. La configurazione FKS registra il valore di picco più basso tra le tre geometrie, indicando una minore capacità di resistere alla deformazione iniziale. Tuttavia, la fase di resistenza residua è più stabile rispetto a quella dell'I-WP, caratterizzata da una diminuzione graduale dello stress durante la densificazione. Questo comportamento suggerisce una propagazione delle cricche più uniformemente distribuita in tutta la struttura e un collasso più controllato durante il caricamento. Per la High Temp Resin (Figura 149), le tendenze generali delle curve sono analoghe, ma influenzate da due fattori predominanti: la maggiore rigidità intrinseca e la natura fragile del materiale. Anche in questo caso, la cella Giroide ottiene il picco più elevato di stress specifico, seguito però da una caduta di tensione più brusca rispetto alla Rigid 10K Resin, evidenziando l'assenza di un meccanismo di redistribuzione graduale dei carichi. La fase di resistenza residua è meno marcata e si verifica una transizione rapida verso la densificazione, durante la quale lo stress cresce rapidamente per via della compattazione del materiale fratturato nei vuoti. La cella I-WP mostra un picco inferiore rispetto alla Giroide e un calo dello stress altrettanto repentino, seguito da una fase residua ridotta. Il recupero graduale della tensione, tipico della Rigid 10K Resin, è qui molto meno pronunciato, evidenziando la minore capacità della resina High Temp di sostenere un cedimento progressivo. La FKS, realizzata in High Temp Resin, ottiene un picco di stress specifico superiore rispetto a quello registrato con la Rigid 10K Resin, ma manifesta un cedimento fragile che porta a un rapido collasso della capacità portante. Durante la densificazione, l'aumento dello stress risulta più uniforme e meno variabile rispetto alle altre geometrie, indicando un collasso più omogeneo della struttura. Indipendentemente dal materiale utilizzato, la Giroide si distingue come la geometria più performante in termini di stress specifico di picco, rendendola

particolarmente adatta per applicazioni che richiedono elevata resistenza alla deformazione iniziale.

3.4.5.4.5 Influenza delle proprietà del materiale sul comportamento meccanico delle strutture TPMS.

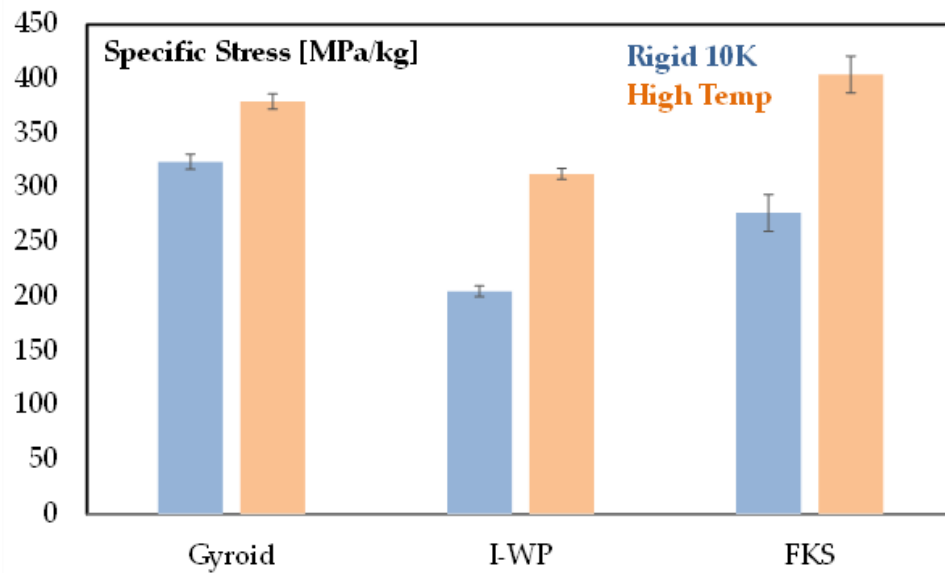


Grafico 28: Confronto dei valori massimi di sollecitazione specifica.

Il Grafico 28 mette a confronto i valori massimi di stress specifico per le geometrie Giroide, I-WP e Fischer–Koch S (FKS), realizzate rispettivamente in Rigid 10K Resin e High Temp Resin, evidenziando in maniera chiara l’influenza combinata del materiale e della configurazione geometrica sulle prestazioni meccaniche delle strutture TPMS. Per la Rigid 10K Resin, la configurazione Giroide registra il valore massimo di stress specifico, pari a circa 320 MPa/kg, confermando la sua capacità superiore di distribuire in modo omogeneo i carichi compressivi, caratteristica derivante dalla sua morfologia isotropica. Segue la geometria FKS, con un valore leggermente inferiore, mentre la I-WP si posiziona all’ultimo posto con circa 200 MPa/kg, prestazione limitata dalla fessurazione simultanea su più piani che riduce la capacità di sopportare carichi elevati. È inoltre rilevante osservare che la FKS presenta una deviazione standard più ampia rispetto alle altre configurazioni, indicativa di una maggiore variabilità prestazionale dovuta probabilmente a cedimenti localizzati o a disomogeneità nella risposta meccanica. Per la High Temp Resin, la distribuzione delle prestazioni varia sensibilmente: la FKS raggiunge il

valore di stress specifico più alto, pari a circa 400 MPa/kg, seguita dalla Giroide con 380 MPa/kg. La I-WP mostra un miglioramento significativo rispetto alla Rigid 10K Resin, attestandosi a circa 310 MPa/kg, evidenziando come la maggiore rigidità del materiale contribuisca a incrementare la capacità di carico. Per tutte le configurazioni, la resina High Temp supera la Rigid 10K Resin in termini di picco di stress specifico, risultato attribuibile alla maggiore rigidezza e resistenza alla deformazione del materiale. Tuttavia, anche in questo caso, la FKS mostra la deviazione standard più elevata, segno di una sensibilità accentuata della geometria alle imperfezioni locali o a microdifetti strutturali. L'analisi comparativa evidenzia che, sebbene la High Temp Resin consenta di raggiungere valori di picco più elevati, il suo comportamento fragile comporta un cedimento improvviso, limitandone l'impiego in applicazioni che richiedono capacità di carico sostenuta e frattura controllata. Al contrario, la Rigid 10K Resin fornisce un compromesso più bilanciato, con valori di picco moderati ma una resistenza residua più elevata, risultando preferibile per applicazioni in cui siano fondamentali meccanismi di cedimento progressivo e duttilità strutturale. Dal punto di vista geometrico, la Giroide si conferma altamente performante in entrambe le resine, mantenendo una variabilità ridotta nei valori di stress massimo grazie alla sua uniformità isotropica, che ne garantisce prestazioni più costanti rispetto alle altre configurazioni. Differenza di tensioni di picco a parità di geometria tra le due resine:

- Giroide: ~60 MPa/kg;
- IWP: ~110 Mpa/kg;
- FKS: ~125 Mpa/kg.

3.4.5.5 Discussione dei risultati

In sintesi, le strutture TPMS hanno evidenziato prestazioni fluidodinamiche e di trasferimento termico elevate, a condizione di non superare valori eccessivi di velocità del fluido caldo di scambio. In ogni caso, i modelli di flusso si sono mantenuti pressoché invariati nelle due condizioni di velocità testate, confermando la capacità intrinseca della geometria di garantire una gestione stabile ed efficiente del flusso. Inoltre, la temperatura di esercizio non ha mostrato effetti significativi sulle caratteristiche sopra menzionate.

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche, la configurazione Giroide ha costantemente superato le celle I-WP e FKS in termini di stress specifico di picco. Tuttavia, indipendentemente dalla geometria TPMS adottata, il comportamento fragile della High Temp Resin ne limita l'idoneità per applicazioni analoghe a quelle oggetto di studio. Al contrario, la Rigid 10K Resin, pur registrando valori di picco inferiori rispetto alla High Temp Resin, ha dimostrato un comportamento meccanico superiore grazie alla modalità di cedimento progressivo, che consente una gestione controllata della rottura. Sulla base di tali evidenze, la Rigid 10K Resin risulta la scelta preferenziale per lo sviluppo di future sperimentazioni.

3.4.6 Progettazione e realizzazione di uno scambiatore di calore aria–acqua basato su geometria TPMS di tipo Giroide.

3.4.6.1 Abstract

La fase successiva dello studio ha riguardato la verifica sperimentale delle prestazioni di scambio termico di uno scambiatore di calore aria–acqua basato su geometria Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) di tipo Giroide. Il core con struttura interna TPMS è stato generato mediante il software di modellazione avanzata nTopology. I condotti per l'ingresso e l'uscita del fluido caldo di processo sono stati invece progettati utilizzando Autodesk Inventor, dimensionati per assicurare una distribuzione uniforme del flusso e ridotte perdite di carico. Successivamente, i due modelli sono stati integrati e unificati all'interno di nTopology, ottenendo la configurazione finale del corpo di scambio pronta per la fase di fabbricazione. Le attività sono state svolte nell'ambito della collaborazione tra l'Università di Messina e il CNR-ITAE.

3.4.6.2 Materiali e metodi



Figura 150: Prototipo di scambiatore di calore aria–acqua con geometria TPMS di tipo Giroide, realizzato mediante stampa 3D in materiale ABS.

Lo scambiatore di calore è stato realizzato mediante stampa 3D utilizzando una QIDI X-Max 3, macchina dotata di camera di stampa riscaldata che garantisce condizioni ottimali per la lavorazione di ABS, minimizzando fenomeni di deformazione e migliorando la stabilità dimensionale del pezzo. Il prototipo stampato è stato impiegato per eseguire una valutazione sperimentale delle

prestazioni di scambio termico all'interno della camera di prova del CNR ITAE di Messina. Come mostrato nelle Figura 151 e Figura 152, l'apparato sperimentale è equipaggiato con sensori di temperatura di tipo termocoppia, posizionati per misurare con precisione le temperature di ingresso e di uscita dei fluidi, e con termocamere dedicate al monitoraggio in tempo reale della distribuzione termica del sistema. Lo scambiatore è stato alloggiato nella camera di prova tramite un supporto dedicato, progettato in modo da garantire il corretto attraversamento del fluido freddo (aria) attraverso le superfici laterali del corpo di scambio. Alle estremità dei condotti sono state quindi collegate le tubazioni per il convogliamento del fluido caldo (acqua), assicurando la corretta alimentazione del circuito e la separazione dei flussi.

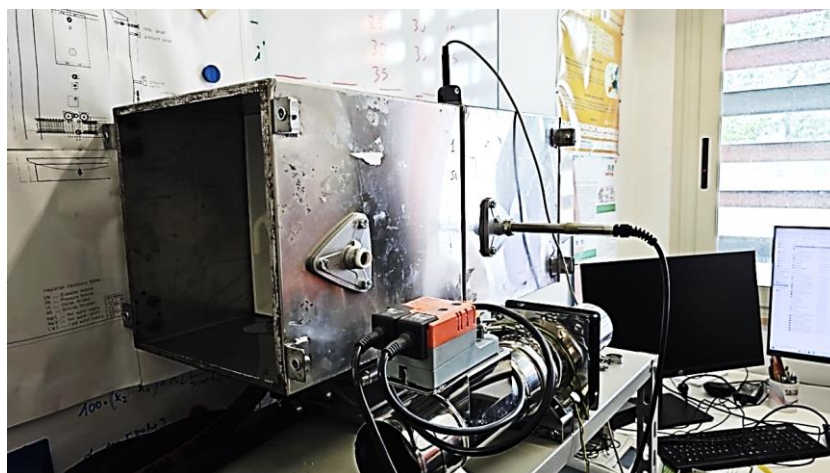


Figura 151: Impianto sperimentale per la caratterizzazione termica – camera di prova.



Figura 152: Impianto sperimentale per la caratterizzazione termica – camera di prova (vista laterale).

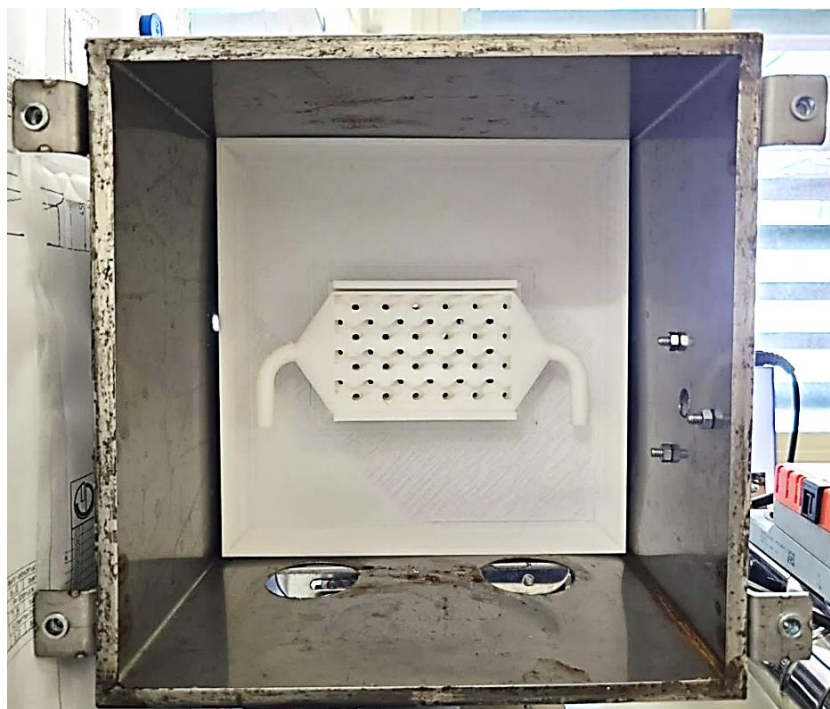


Figura 153: Vista della camera di prova con lo scambiatore di calore installato al suo interno.

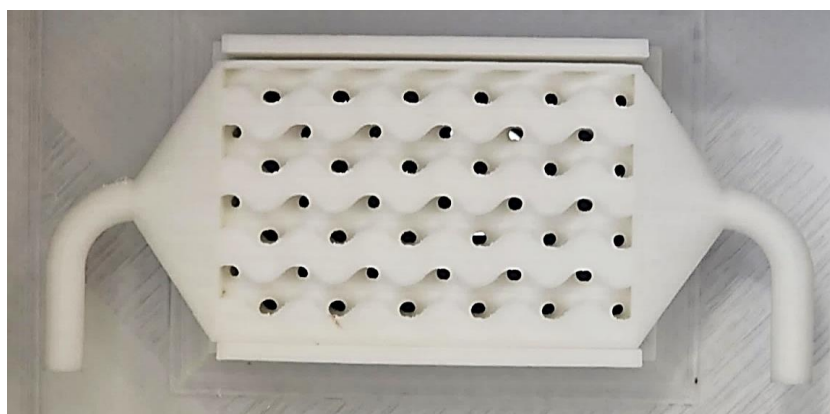


Figura 154: Dettaglio dello scambiatore di calore posizionato all'interno della camera di prova.

3.4.6.3 Analisi fluidodinamica

Parallelamente alla realizzazione fisica del prototipo, è stata avviata un'attività di analisi fluidodinamica numerica, con l'obiettivo di indagare il comportamento del flusso attraverso la struttura interna. Le condizioni al contorno e i parametri di simulazione sono stati definiti in modo coerente con quelli adottati durante le prove sperimentali al CNR, così da riprodurre scenari quanto più realistici. Le elaborazioni preliminari hanno permesso di ottenere mappe di pressione e di velocità, sia nelle condizioni iniziali sia come valori medi nel tempo, una volta raggiunto un regime stazionario del flusso. In particolare, sono state ricavate

informazioni sulla pressione iniziale, sulla velocità iniziale, nonché sulla loro evoluzione temporale. Sebbene lo studio sia ancora in corso e i risultati non siano stati del tutto analizzati, i dati disponibili confermano l'esistenza di tendenze significative e aprono la strada a successive indagini più approfondite. Dal punto di vista metodologico, l'approccio adottato rappresenta un passo importante poiché consente di collegare in modo diretto le proprietà geometriche delle strutture TPMS con la distribuzione dei campi fluidodinamici. Questa possibilità apre nuove prospettive di ricerca: a partire dalle mappe di pressione e velocità sarà infatti possibile iterare il processo progettuale, modificando parametri quali la dimensione unitaria delle celle o lo spessore delle superfici, al fine di migliorare la gestione dei flussi e ridurre le perdite di carico. L'analisi è stata condotta utilizzando gli strumenti di simulazione recentemente introdotti in nTopology, che permettono di lavorare direttamente su geometrie implicite. Questo approccio non solo ha reso più agevole la fase preliminare, ma soprattutto apre prospettive interessanti per il futuro. Un ulteriore sviluppo atteso riguarda infatti l'integrazione della simulazione dello scambio termico tra i fluidi: ciò permetterà di estendere l'ottimizzazione oltre l'aspetto puramente fluidodinamico, introducendo criteri legati all'efficienza del trasferimento di calore. In prospettiva, sarà quindi possibile progettare scambiatori sempre più complessi ed efficienti, in cui geometria e funzionalità saranno strettamente correlate, aprendo orizzonti di ricerca inediti nel campo della termofluidodinamica e della manifattura additiva.

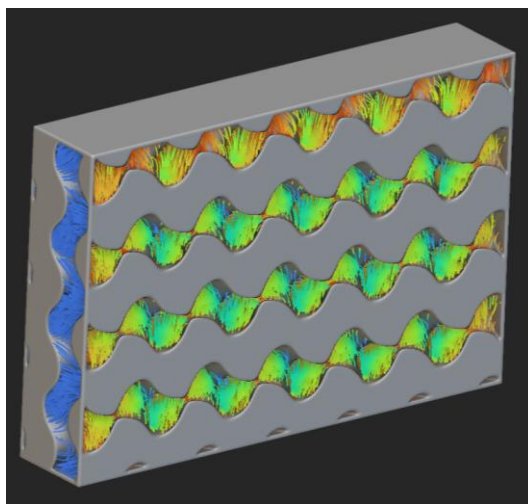


Figura 155: Simulazione CFD dello scambiatore- Time-averaged pressure streamlines (aria, acqua, corpo dello scambiatore)

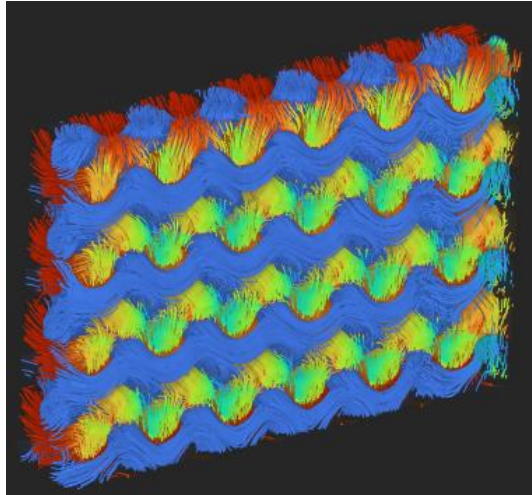


Figura 156: Simulazione CFD dello scambiatore- Time-averaged pressure streamlines (aria, acqua)

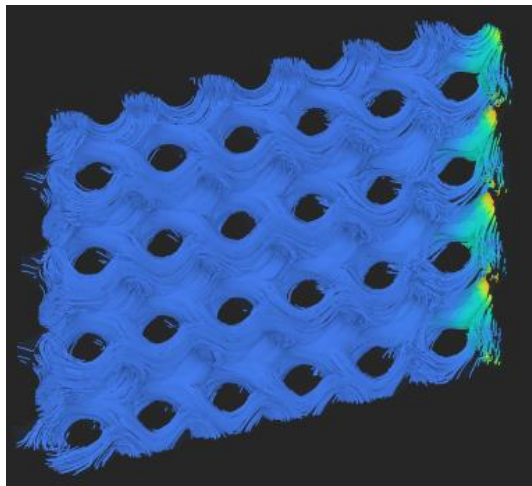


Figura 157: Simulazione CFD dello scambiatore- Time-averaged pressure streamlines (acqua)

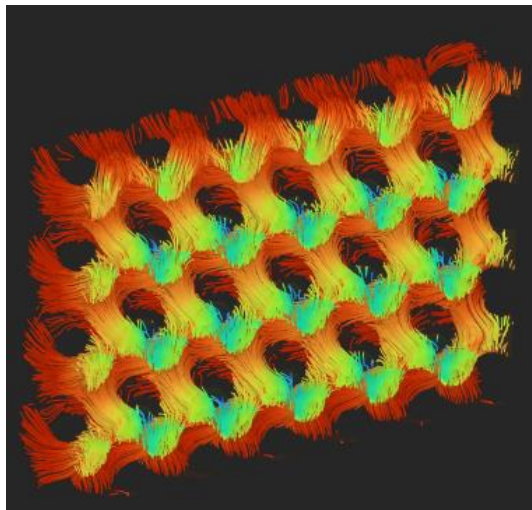


Figura 158: Simulazione CFD dello scambiatore- Time-averaged pressure streamlines (aria)

3.4.6.4 Discussione dei risultati

L'esito della prova sperimentale è risultato non conclusivo a causa di limiti dimensionali legati alla risoluzione della stampante utilizzata: gli spessori ridotti e la presenza di microscopici punti di connessione tra la superficie TPMS e le pareti esterne dello scambiatore hanno provocato perdite di fluido caldo, compromettendo la possibilità di proseguire il test. Per superare tali criticità, si è optato per la realizzazione di un nuovo prototipo mediante stampa in resina e l'impiego di una stampante 3D in grado di garantire migliori finiture superficiali e maggiore precisione geometrica. Contestualmente, è stata effettuata una ridisegnazione dei condotti di ingresso e di uscita del fluido caldo, con l'obiettivo di ridurre le perdite di carico e le cadute di pressione che potrebbero verificarsi prima del passaggio attraverso la sezione centrale in TPMS. Il nuovo layout prevede condotti con profilo più uniforme, caratterizzati da una espansione graduale dalla zona di collegamento con la tubazione fino alla regione in cui è collocato il core TPMS dello scambiatore.



Figura 159: Modello tridimensionale dei condotti ridisegnati dello scambiatore di calore, rappresentato in vista frontale.

3.5 Manifattura additiva e reverse engineering per l'ottimizzazione del Friction Stir Welding

3.5.1 Introduzione al capitolo

Il capitolo illustra il contributo della manifattura additiva all'interno del progetto SHIPLearning, focalizzato sull'ottimizzazione del processo di saldatura a stato solido (Friction Stir Welding – FSW) per applicazioni in ambito navale. L'integrazione tra stampa 3D e reverse engineering consente di produrre componenti complessi e strumenti di supporto con rapidità e precisione, facilitando la sperimentazione e la validazione di parametri di processo. L'approccio adottato dimostra come l'Additive Manufacturing, combinata con la digitalizzazione tridimensionale, possa rappresentare un fattore abilitante per lo sviluppo di metodologie innovative nel settore delle tecnologie di giunzione, contribuendo a migliorare l'efficienza, la riproducibilità e la trasferibilità industriale del FSW.

3.6 Integrazione di Reverse Engineering, Digitalizzazione e Tecnologie Avanzate nella Cantieristica Navale⁸

3.6.1 Presentazione del progetto

Il progetto SHIPLEARNING nasce dalla collaborazione tra il Distretto Tecnologico NAVTEC, il Cantiere Tringali e il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Messina, con il sostegno del programma europeo NextGenerationEU nell'ambito del PNRR. L'iniziativa si inserisce all'interno del più ampio ecosistema dell'innovazione iNEST (Spoke 5 – “Smart and Sustainable Environments”), con l'obiettivo di introdurre nei cantieri navali soluzioni digitali e metodologiche capaci di aumentare la competitività tecnologica, ridurre i tempi di lavorazione e favorire la transizione verso modelli produttivi più sostenibili. L'aspetto centrale del progetto è rappresentato dal reverse engineering applicato alla cantieristica, ossia la capacità di acquisire, digitalizzare e riprodurre geometrie complesse di componenti e strutture attraverso strumenti di scansione tridimensionale avanzata. Questa tecnologia consente di colmare un vuoto spesso presente nei cantieri: la mancanza di documentazione tecnica aggiornata su elementi installati da decenni, modificati nel tempo o difficili da sostituire. SHIPLEARNING mira quindi a creare un flusso di lavoro digitale continuo, che parte dal rilievo 3D e arriva fino alla prototipazione e alla produzione, favorendo la tracciabilità e la riduzione degli errori. Accanto a questa linea principale, il progetto esplora anche metodologie innovative di giunzione dei materiali, in particolare la friction stir welding (FSW), integrata con strumenti di machine learning per l'ottimizzazione dei parametri di processo. Queste attività hanno la funzione di mostrare come l'automazione digitale e l'intelligenza artificiale possano essere applicate anche ad altre fasi produttive, ampliando l'impatto complessivo dell'innovazione. L'originalità di SHIPLEARNING sta nella combinazione di sperimentazioni di laboratorio e validazioni dirette in cantiere. Grazie alla collaborazione con il Cantiere Tringali,

⁸ Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [94]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

le tecnologie vengono testate su casi concreti, così da garantire la fattibilità operativa e la trasferibilità delle soluzioni verso altre realtà produttive. In questo modo, il progetto si propone come modello pilota per la diffusione di pratiche digitali nella cantieristica navale, con l'obiettivo di rendere il settore più competitivo, efficiente e sostenibile.

3.6.1.1 Abstract

La cantieristica navale italiana si distingue a livello internazionale per la produzione di imbarcazioni ad alto valore aggiunto, ma deve affrontare sfide legate alla gestione di componenti unici, alla complessità delle attività di refitting e alla difficoltà di digitalizzare unità prive di documentazione aggiornata. In questo contesto, il reverse engineering e le tecniche di scansione tridimensionale rappresentano strumenti strategici per acquisire con precisione geometrie complesse, creare gemelli digitali e integrare i dati in flussi CAD/CAM e gestionali. Ciò consente di ridurre tempi e costi di manutenzione, aumentare la tracciabilità e costruire archivi digitali delle flotte. Il progetto SHIPLEARNING si concentra sullo sviluppo di protocolli operativi e strumenti pratici che rendano l'applicazione del reverse engineering più semplice, affidabile e replicabile nei cantieri. Parallelamente, il progetto esplora anche la friction stir welding (FSW), tecnologia di giunzione solida già affermata in altri settori, valutandone i benefici per la cantieristica in termini di efficienza, stabilità dimensionale e sostenibilità. L'integrazione di tecniche digitali con strumenti di intelligenza artificiale apre infine a scenari di ottimizzazione avanzata, sia per la ricostruzione dei modelli 3D sia per la calibrazione dei parametri di saldatura, delineando un futuro in cui la produzione navale potrà beneficiare di processi più intelligenti, rapidi e sostenibili.

3.6.1.2 Materiali e metodi

3.6.1.2.1 Scansione 3D e Reverse Engineering

Il cuore del progetto SHIPLEARNING è rappresentato dalla sperimentazione sul campo e in laboratorio delle tecniche di acquisizione tridimensionale applicate al contesto cantieristico. L'obiettivo non è soltanto dimostrare che gli strumenti di scansione 3D sono in grado di acquisire geometrie complesse con precisione, ma soprattutto definire protocolli operativi che permettano di standardizzare il processo

e di renderlo ripetibile, affidabile e integrabile nei flussi produttivi dei cantieri. Per l'avvio delle sperimentazioni è stato acquisito e messo in esercizio uno scanner Revopoint Miraco, scelto in base al costo contenuto e, soprattutto, alla sua maneggevolezza. Si tratta infatti di un dispositivo stand-alone che non necessita di collegamento a un PC, caratteristica che lo rende facilmente trasportabile e utilizzabile direttamente a bordo.

3.6.1.2.2 Sperimentazione

Le attività iniziali sono state condotte presso il Cantiere Tringali, con l'impiego di uno scanner REVOPOINT Miraco a luce strutturata/NIR. È stato scelto un componente rappresentativo delle principali criticità: un'elica caratterizzata da geometrie complesse e riflettenti. Le pale di un'elica rappresentano infatti superfici tridimensionali articolate, caratterizzate da curvature variabili e da una forte riflettività che rende difficoltosa l'acquisizione con strumenti ottici. Le prove hanno consentito di verificare l'accuratezza del Revopoint Miraco nel ricostruire dettagli morfologici complessi e di valutare la robustezza del sistema sia in condizioni controllate di laboratorio che in ambiente reale di cantiere.



Figura 160: Elica smontata con marker applicati.



Figura 161: Dettaglio del processo di acquisizione dell'elica.

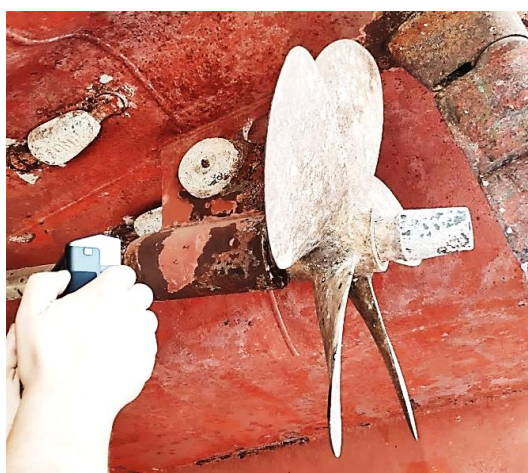


Figura 162: Prova di acquisizione di elica montata.

Questi test hanno permesso di evidenziare immediatamente alcuni limiti operativi. La qualità della scansione è risultata fortemente influenzata dalle condizioni di illuminazione e dalla riflettività dei materiali: per ottenere nuvole di punti affidabili è stato necessario operare in ambienti controllati o utilizzare un numero consistente di marker. Inoltre, superfici molto scure o lucide hanno mostrato difficoltà notevoli di acquisizione, richiedendo più passaggi per arrivare a un modello coerente. Per superare i vincoli emersi in cantiere, sono state avviate prove in ambiente controllato, dove è stato possibile studiare in dettaglio il comportamento dello scanner. Utilizzando un parallelo di precisione da 50 mm, scelto come riferimento per la somiglianza con le superfici metalliche tipiche dei componenti navali, si è verificato che i dati risultano particolarmente sensibili alla luce ambiente: al di sopra dei 100 lux diventa difficile acquisire informazioni affidabili. Si è osservata inoltre una sensibilità significativa alla temperatura dei materiali, il che ha portato a

ipotizzare l'utilità di procedure di "pre-condizionamento" dei pezzi (ad esempio portandoli a una temperatura controllata prima della scansione). Parallelamente è stato progettato, insieme agli operatori del cantiere, un set di componenti test specifico. Tre di essi sono stati realizzati in acciaio navale, con finiture superficiali diverse, e uno in PLA mediante stampa 3D. Questo insieme ha permesso di simulare le diverse geometrie e finiture con cui lo scanner si sarebbe trovato a operare. I risultati ottenuti hanno confermato che, con un corretto posizionamento dei marker e una gestione mirata della luce incidente, è possibile ottenere modelli 3D di buona qualità e precisione, anche se restano necessarie fasi di post-processing per la pulizia e l'allineamento delle nuvole di punti.

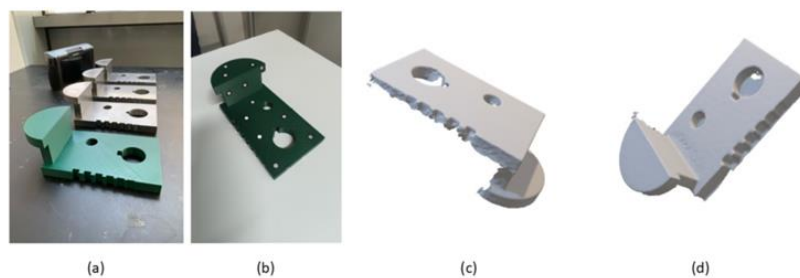


Figura 163: Scansione 3D di un set di prova – parte meccanica: (a) elementi testati, (b) configurazione dei marker, (c) scansione - lato inferiore provino in metallo, (d) scansione - lato superiore provino in metallo.

3.6.1.2.3 Definizione di protocolli operativi

L'esperienza raccolta nelle prove in campo e in laboratorio sta consentendo di mettere a punto procedure di utilizzo specifiche per il contesto navale. Questi protocolli comprendono:

- Gestione della luce: utilizzo di illuminazione artificiale controllata per garantire la costanza delle condizioni, con valori calibrati al di sotto dei 100 lux.
- Preparazione dei componenti: in alcuni casi, pre-condizionamento termico dei pezzi per stabilizzare la risposta dello scanner.
- Uso dei marker: posizionamento strategico dei riferimenti ottici per migliorare la lettura su superfici riflettenti o complesse.
- Post-processing standardizzato: definizione di procedure di filtraggio del rumore, fusione delle scansioni e generazione delle mesh, al fine di minimizzare errori e ridurre i tempi di rielaborazione.

Un aspetto innovativo del progetto è l'integrazione diretta dei dati acquisiti con le piattaforme di modellazione e produzione digitale. Le nuvole di punti e i modelli mesh vengono elaborati in software parametrici e successivamente collegati a macchinari 4.0, in grado di utilizzare direttamente i dati per operazioni di produzione o adattamento. Questo approccio consente non solo di accorciare i cicli di progettazione, ma anche di garantire tracciabilità e ripetibilità delle operazioni, riducendo il rischio di errori e semplificando la manutenzione.

3.6.1.2.4 Machine Learning e Friction Stir Welding

Accanto alla digitalizzazione tramite reverse engineering, il progetto SHIPLEARNING ha previsto attività sperimentali volte a esplorare le potenzialità della friction stir welding (FSW), con il supporto di strumenti di machine learning per l'ottimizzazione dei parametri di processo. La FSW è un processo di giunzione solida che non utilizza materiale d'apporto, noto per garantire giunzioni resistenti, dimensionalmente stabili e con un ridotto impatto ambientale. In settori come l'aerospaziale e l'automotive questa tecnologia è ormai consolidata, mentre in ambito navale si sta affermando soprattutto per applicazioni su sovrastrutture, ponti leggeri e giunzioni acciaio-alluminio. Le potenzialità della tecnica si legano a fattori quali: riduzione dei consumi energetici, assenza di gas di protezione e miglioramento delle prestazioni meccaniche delle giunzioni. Tuttavia, la complessità delle strutture navali, la varietà dei materiali impiegati e le geometrie difficilmente accessibili rendono necessaria un'attenta calibrazione dei parametri di processo. Proprio qui entra in gioco il machine learning, che consente di sfruttare banche dati sperimentali per identificare in modo predittivo i valori ottimali di variabili quali geometria dell'utensile, velocità di rotazione e avanzamento o forza applicata. Sono stati quindi sviluppati modelli basati su tecniche diverse, tra cui support vector regression, reti neurali artificiali e gradient boosting. Quest'ultimo approccio si è dimostrato particolarmente promettente, fornendo previsioni affidabili in test indipendenti. Il lavoro svolto non ha come finalità primaria la sostituzione delle pratiche consolidate di saldatura nei cantieri, ma piuttosto dimostrare come logiche di automazione e intelligenza artificiale possano essere applicate anche a processi produttivi tradizionali, rendendoli più efficienti, ripetibili e sostenibili. In questo senso, la FSW rappresenta un caso studio che completa

l'attività centrale del progetto, rafforzando la visione di una cantieristica in cui il dato digitale non si ferma alla fase di rilievo geometrico, ma diventa strumento trasversale a più momenti della produzione.

3.6.1.3 Risultati e discussione

Le attività condotte all'interno del progetto SHIPLEARNING hanno fornito risultati significativi sia per quanto riguarda l'impiego della scansione 3D nel reverse engineering, sia per la sperimentazione di approcci predittivi applicati alla saldatura FSW.

3.6.1.3.1 Risultati della scansione 3D

Le prove condotte in cantiere hanno messo in evidenza fin da subito le potenzialità di questa tecnologia, ma anche le condizioni operative che ne influenzano fortemente la qualità. La sensibilità alla luce ambientale è risultata un fattore critico: mentre in ambienti scarsamente illuminati, con valori inferiori ai 100 lux, lo scanner è stato in grado di restituire nuvole di punti dense e precise, in presenza di luce naturale o di superfici riflettenti i dati risultavano incompleti o distorti. Per ovviare a queste problematiche si è fatto ricorso a un numero maggiore di marker e a regolazioni mirate della sensibilità dello scanner. Questo ha permesso di ottenere modelli tridimensionali più accurati, ma al prezzo di tempi di acquisizione più lunghi e di una maggiore complessità operativa. Le sperimentazioni in laboratorio hanno confermato questi risultati, evidenziando inoltre come la temperatura del pezzo da acquisire possa condizionare la qualità della scansione. È stato così ipotizzato un protocollo di pre-condizionamento termico dei componenti, in grado di stabilizzare il comportamento dei materiali e ridurre gli errori di lettura. Attraverso il set di componenti appositamente realizzato (in acciaio navale e in PLA stampato in 3D), si è potuto validare l'efficacia di queste procedure e costruire una base dati utile a definire le migliori pratiche. Un ulteriore aspetto emerso riguarda il post-processing dei dati: la trasformazione della nuvola di punti in un modello digitale utilizzabile richiede ancora un impegno notevole, dovuto a operazioni di filtraggio, allineamento e generazione della mesh. Gli errori introdotti in questa fase possono rendere necessario ripetere la scansione, aumentando tempi e costi. Questo evidenzia la necessità di migliorare e standardizzare anche le procedure di

elaborazione, in modo da garantire flussi più fluidi e ridurre il rischio di rilavorazioni.

3.6.1.3.2 Risultati su FSW e machine learning

Sul fronte della friction stir welding, lo sviluppo e il confronto tra diversi modelli di machine learning hanno mostrato che approcci come il gradient boosting regression offrono previsioni affidabili sui parametri di processo. In particolare, è stato possibile correlare variabili come spessore del materiale, resistenza meccanica e obiettivo di efficienza della giunzione con i set di parametri ottimali da utilizzare in prova. I primi test indicano una buona capacità del modello di replicare i risultati sperimentali, aprendo la strada a un uso esteso dell'IA come supporto decisionale nei processi di giunzione. Sebbene il numero di sperimentazioni pratiche sia ancora limitato, l'integrazione di banche dati storiche del cantiere con modelli predittivi basati sulla letteratura scientifica ha consentito di costruire una piattaforma utile per la calibrazione delle tecnologie. Ciò conferma che l'adozione dell'intelligenza artificiale, pur partendo da casi specifici come la FSW, può diventare uno strumento più generale per introdurre metodologie di automazione e ottimizzazione nei cantieri.

3.6.1.4 Sviluppi futuri

L'esperienza maturata con lo scanner Revopoint Miraco ha permesso di testare sul campo i vantaggi della tecnologia stand-alone, soprattutto in termini di maneggevolezza e facilità di impiego a bordo. Tuttavia, i limiti legati alla sensibilità alla luce solare diretta e alle superfici metalliche riflettenti hanno reso necessario valutare soluzioni tecnologiche più avanzate. Per questo motivo è stato acquisito un nuovo scanner Revopoint METROX a luce blu, caratterizzato da una maggiore precisione e da una migliore capacità di acquisizione in condizioni ambientali complesse. La tecnologia a luce blu, meno sensibile alle interferenze della luce naturale, garantisce prestazioni superiori nella scansione di superfici metalliche lucide o scure, come quelle tipiche di scafi, eliche e componenti meccanici navali. A differenza del Miraco, il METROX non è un dispositivo stand-alone e richiede l'utilizzo di un computer per l'elaborazione dei dati. Per integrarlo nelle attività sperimentali è stata predisposta una postazione mobile dedicata, dotata di PC e

monitor, in grado di supportare lo scanner nelle operazioni sia in laboratorio sia in cantiere. Nonostante questo comporti una minore immediatezza d'uso rispetto al Miraco, i primi test hanno evidenziato un netto miglioramento nella qualità delle acquisizioni, con una definizione più elevata dei dettagli e una riduzione significativa degli errori legati alla riflettività delle superfici. L'introduzione del METROX rappresenta un passo importante nello sviluppo del progetto SHIPLEARNING, poiché consente di ampliare le possibilità applicative del reverse engineering in ambito navale. La combinazione tra portabilità e semplicità del Miraco e precisione e stabilità del METROX permette di coprire una gamma più ampia di scenari: dal rilievo veloce direttamente a bordo fino alla scansione di alta precisione in contesti di laboratorio o su componenti critici. Nei prossimi mesi, l'attività sarà focalizzata sulla validazione operativa del METROX, con prove sistematiche sia in ambienti controllati che direttamente in cantiere, per definire protocolli d'uso standardizzati e consolidare le best practice. L'obiettivo è integrare in maniera complementare le due tecnologie, sfruttando i punti di forza di ciascuna e rendendo così più flessibile ed efficace il flusso digitale del reverse engineering navale.



Figura 164: Testing scanner METROX.

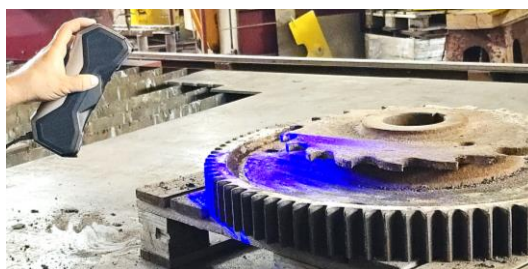


Figura 165: Testing scanner METROX.

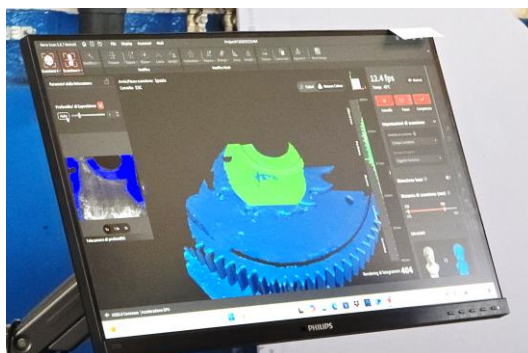


Figura 166: Testing scanner METROX.

3.6.1.5 Conclusioni

Il progetto SHIPLEARNING ha mostrato come l'introduzione di strumenti di reverse engineering e tecniche di scansione 3D possa costituire un passo decisivo verso la modernizzazione della cantieristica navale. Le sperimentazioni svolte hanno evidenziato l'enorme potenziale di questa tecnologia nel ridurre i tempi di progettazione e manutenzione, nel garantire una maggiore tracciabilità delle operazioni e nel creare una base digitale permanente per la gestione delle flotte. Il reverse engineering consente infatti di trasformare componenti fisici in modelli tridimensionali accurati, che possono essere impiegati per riprodurre parti danneggiate, pianificare attività di refitting e integrare nuovi impianti in spazi complessi. In prospettiva, la creazione di veri e propri gemelli digitali delle navi rappresenta un obiettivo concreto, capace di rivoluzionare la gestione dell'intero ciclo di vita delle unità navali. Le attività di scansione hanno inoltre permesso di individuare le principali criticità operative, come la sensibilità alla luce ambientale, la riflettività dei materiali e la complessità delle fasi di post-processing. L'aver definito protocolli operativi mirati – che includono la gestione dell'illuminazione, il pre-condizionamento dei componenti, l'uso strategico dei marker e procedure di elaborazione standardizzate – costituisce un risultato fondamentale per rendere la tecnologia più affidabile e replicabile. In questo senso, il progetto non si limita a dimostrare la fattibilità tecnica, ma getta le basi per un metodo trasferibile, applicabile anche in cantieri di piccole e medie dimensioni. Accanto a questo filone centrale, le attività su friction stir welding e machine learning hanno mostrato come l'innovazione digitale possa estendersi anche a processi produttivi più tradizionali,

introducendo strumenti predittivi in grado di ottimizzare i parametri di lavorazione. Pur trattandosi di un ambito ancora in fase sperimentale, i risultati ottenuti dimostrano la validità dell'approccio e aprono la strada a future integrazioni con altri processi. Guardando avanti, SHIPLEARNING si propone due direzioni principali. La prima è il consolidamento della transizione digitale all'interno del Cantiere Tringali, attraverso la stabilizzazione dei flussi di lavoro, la definizione di protocolli robusti e l'estensione dell'uso di strumenti AI-driven. La seconda è la creazione di un modello replicabile e diffondibile, che possa essere adottato da altri cantieri del territorio, favorendo una crescita diffusa della competitività tecnologica del comparto navale. In definitiva, i risultati del progetto confermano che l'unione di ricerca applicata, collaborazione tra enti territoriali e pragmatismo industriale rappresenta la strada maestra per costruire una cantieristica più sostenibile, resiliente e competitiva, in linea con i principi dell'Industria 5.0.

3.7 Manifattura additiva per lo sviluppo di strutture reticolari in sistemi di Thermochemical Energy Storage

3.7.1 Introduzione al capitolo

Il capitolo affronta la progettazione e realizzazione di strutture reticolari tridimensionali a base di compositi zeolite-S-PEEK, sviluppate mediante tecniche di manifattura additiva per applicazioni nei sistemi di accumulo e conversione energetica a sorzione. L'obiettivo principale è dimostrare come la stampa 3D possa superare i limiti dei rivestimenti convenzionali, permettendo di ottenere geometrie complesse con maggiore contenuto di materiale attivo, migliore trasferimento termico e una più efficiente diffusione di massa. Attraverso la caratterizzazione morfologica e le prove di adsorbimento/desorbimento, il capitolo evidenzia i benefici dell'approccio additivo in termini di stabilità, prestazioni e potenziale scalabilità, ponendo le basi per un utilizzo più efficiente delle tecnologie di accumulo termochimico a supporto della transizione energetica.

3.7.2 Strutture reticolari 3D in materiale composito SAPO-34/S-PEEK, prodotte tramite manifattura additiva, per sistemi di trasformazione termica basati su adsorbimento⁹

3.7.2.1 Abstract

Lo sviluppo di materiali adsorbenti ad alte prestazioni rappresenta un aspetto cruciale per qualunque processo di conversione energetica basato su meccanismi di sorzione. In questo ambito, i materiali compositi a base adsorbente, pur offrendo interessanti potenzialità in termini di efficienza e stabilità, risultano spesso difficili da conformare in geometrie complesse. La manifattura additiva, o stampa 3D, si configura come una tecnologia promettente per la realizzazione di strutture intricate con proprietà mirate. In questo studio è stata sviluppata, mediante tale approccio, un'innovativa struttura tridimensionale costituita da zeolite come fase attiva e da poli(eter etere chetone) solfonato come matrice polimerica, ottimizzata per applicazioni nei processi di conversione energetica basati sulla sorzione. La geometria reticolare è stata progettata in modo da favorire sia l'efficacia della procedura di sintesi sia la stabilità del materiale, consentendo la fabbricazione di una struttura tridimensionale complessa senza l'impiego di rinforzi metallici o plastici. L'integrità strutturale del composito è stata verificata mediante analisi morfologica, mentre le prestazioni di adsorbimento e desorbimento sono state determinate attraverso misure isobare di adsorbimento di vapore acqueo, condotte a 11 mbar e in condizioni di equilibrio termico nell'intervallo 30–120 °C, confermando un'elevata capacità di scambio adsorbimento/desorbimento.

3.7.2.2 Introduzione

La crescente necessità di valorizzare fonti di calore residuo a bassa temperatura e sorgenti termiche rinnovabili sta stimolando lo sviluppo di tecnologie innovative per l'accumulo e la conversione di energia termica, in grado anche di favorire l'integrazione di più fonti energetiche in applicazioni complesse. In tale contesto,

⁹ Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [95]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

le tecnologie di accumulo termochimico basate su meccanismi di adsorbimento fisico si configurano come una soluzione promettente e praticabile, in particolare per sistemi destinati allo stoccaggio a lungo termine. L'adsorbimento consiste nel trattenere e immagazzinare molecole sulla superficie di un materiale poroso; questo approccio risulta idoneo per accumuli energetici ad alta densità e di lunga durata, poiché l'energia viene conservata sotto forma di potenziale di legame tra il materiale adsorbente e il fluido di lavoro (o sorbato). Tra i diversi materiali disponibili, le zeoliti e, più in generale, gli alluminosilicati cristallini con rete microporosa ben definita hanno suscitato notevole interesse per le eccellenti proprietà di adsorbimento, in particolare nei confronti del vapore acqueo come fluido di lavoro.

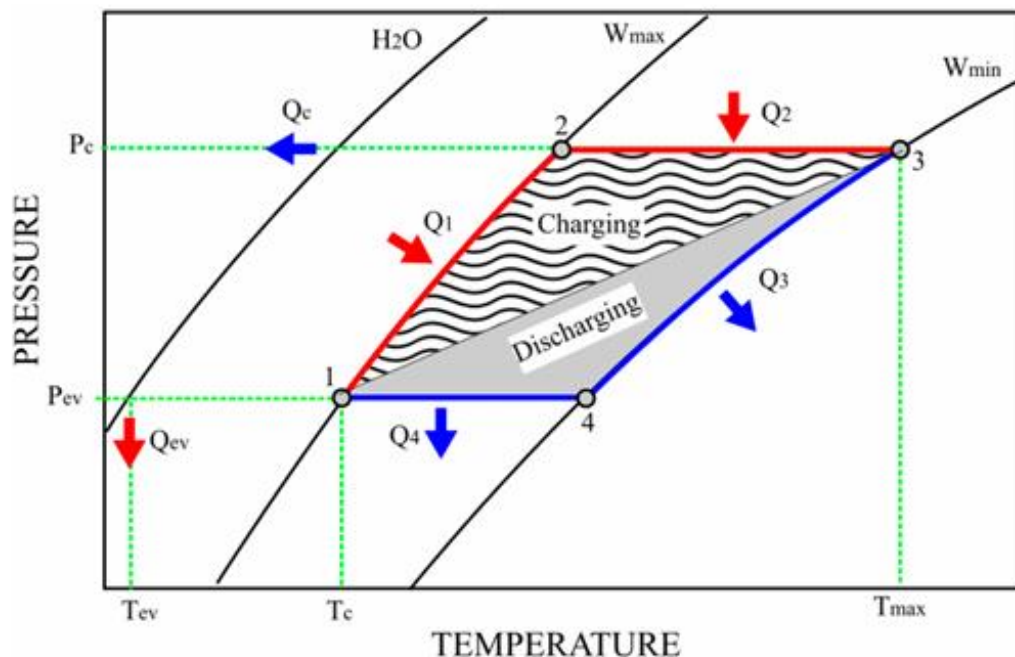


Figura 167: Rappresentazione schematica del ciclo termodinamico di un'unità di accumulo per adsorbimento.

Il ciclo di accumulo termico per adsorbimento si articola in due fasi principali, ciascuna suddivisa in due passaggi distinti. La prima, denominata fase di carica, ha inizio con un riscaldamento isosterico (Q_1), durante il quale il sistema viene portato a temperatura superiore mantenendo il volume costante. A seguire si svolge la desorbimento isobarico (Q_2), in cui il materiale adsorbente rilascia il fluido di lavoro accumulato sotto forma di vapore, a pressione costante. La seconda fase,

ovvero la fase di scarica, comincia con un raffreddamento isosterico (Q3), caratterizzato da una riduzione della temperatura a volume costante, e si conclude con l'adsorbimento isobarico (Q4), in cui il fluido di lavoro viene nuovamente fissato dal materiale adsorbente a pressione costante, completando il ciclo e preparando il sistema per una nuova fase di carica. Nonostante le caratteristiche promettenti, lo sviluppo su scala rilevante di questa tecnologia è stato in parte ostacolato dalla necessità di materiali con prestazioni superiori e da tecniche idonee per l'integrazione e la modellazione dell'adsorbente in componenti finali compatti ed efficienti. L'impiego delle zeoliti nei sistemi di accumulo e conversione termica a sorzione è spesso limitato dalla contemporanea esigenza di massimizzare i trasferimenti di calore e massa all'interno del sistema stesso. Per superare tali criticità, sono stati studiati materiali compositi in cui le zeoliti sono incorporate in matrici capaci di migliorarne le proprietà meccaniche. I primi tentativi hanno riguardato la realizzazione di rivestimenti sottili applicati direttamente alle superfici metalliche degli scambiatori di calore, così da incrementare l'efficienza termica minimizzando le limitazioni al trasferimento di massa. Questa strategia ha permesso di raggiungere valori di potenza frigorifera specifica superiori di oltre il 30% rispetto agli adsorbitori a grani sciolti tradizionali. Numerose ricerche hanno successivamente approfondito l'ottimizzazione del legante e della composizione complessiva del rivestimento, prendendo in esame leganti a base di silani, siliconi e poli(eter etere chetone) solfonato (S-PEEK) per applicazioni in pompe di calore, dissalazione e sistemi deumidificanti. I risultati ottenuti hanno evidenziato buone prestazioni e stabilità delle diverse configurazioni. Tuttavia, lo spessore ridotto dei rivestimenti, generalmente inferiore a 500 μm , limita la quantità di materiale adsorbente per unità di volume, rendendoli poco adatti allo stoccaggio termico, dove la capacità di accumulo dipende direttamente dalla massa di materiale attivo contenuta nel reattore. Per aumentare il contenuto di adsorbente, è stato successivamente proposto un composito costituito da zeolite dispersa in una schiuma polimerica porosa, capace di riempire completamente il volume dello scambiatore di calore e massimizzare così la capacità di adsorbimento volumetrica. Questo approccio è stato applicato con successo anche per l'inclusione di altre fasi attive, come gli idrati salini, ottenendo prestazioni elevate nei sistemi di accumulo

termico a sorzione. Sulla base di queste esperienze, in questo lavoro si propone un concetto innovativo che sfrutta la manifattura additiva per realizzare strutture tridimensionali complesse. Il materiale scelto per la matrice è il poli(eter etere chetone) solfonato (S-PEEK), un termoplastico ad alte prestazioni caratterizzato da elevata resistenza meccanica, stabilità termica e buona permeabilità al vapore acqueo. L'associazione di S-PEEK con zeolite offre la possibilità di sviluppare materiali adsorbenti avanzati per applicazioni di accumulo e conversione energetica. In precedenti studi è stato proposto un composito contenente fino al 90% in peso di zeolite SAPO-34 e legante S-PEEK, la cui elevata permeabilità al vapore riduce le limitazioni alla diffusione di massa all'interno della struttura. Questo materiale ha mostrato buone prestazioni meccaniche e termiche, oltre a stabilità nei cicli di adsorbimento/desorbimento. Inoltre, il polimero presenta una notevole resistenza alla degradazione termica, che inizia solo intorno ai 340 °C a seguito della reazione di desolfonazione dei gruppi SO_3H , confermandone l'idoneità alle condizioni operative tipiche delle tecnologie a sorzione. Nonostante i risultati incoraggianti, la tecnica del rivestimento presenta ancora limiti in termini di quantità di materiale caricabile nel reattore e di difficoltà nel rivestire geometrie complesse. La manifattura additiva, o stampa 3D, offre un approccio versatile e preciso per creare strutture articolate con geometrie complesse, aprendo nuove opportunità per l'ottimizzazione simultanea del trasferimento di calore e massa. I progressi in questo settore hanno già permesso la realizzazione di reticoli adsorbenti tridimensionali capaci di incrementare le prestazioni di refrigeratori a sorzione solida senza penalizzare efficienza o densità di potenza. In letteratura, sono riportati pochi esempi di applicazione della stampa 3D alle tecnologie a sorzione per riscaldamento, raffreddamento e accumulo. Tra questi, si evidenziano studi che impiegano configurazioni basate su superfici minimali triperiodiche per migliorare il trasferimento termico e di massa, e ricerche dedicate alla raccolta di acqua atmosferica, in cui l'uso di strutture 3D innovative ha consentito di raddoppiare sia l'efficienza energetica sia la produttività idrica rispetto a configurazioni convenzionali, dimostrando così le potenzialità di questa tecnologia nell'integrazione di geometrie complesse nei reattori adsorbenti.

Studi analoghi sono stati condotti anche su altre configurazioni di reattore, utilizzando sia materiali adsorbenti innovativi, come i MOF, sia materiali tradizionali, quali la zeolite 13X, per applicazioni di cattura diretta della CO₂ e di adsorbimento di anidride carbonica. La possibilità di modulare con precisione la struttura dei pori e la composizione del reticolo offre un'elevata flessibilità nella progettazione delle proprietà adsorbenti in funzione della specifica applicazione. L'integrazione di reticoli adsorbenti tridimensionali all'interno di sistemi a sorzione, quali unità di accumulo, refrigeratori ad adsorbimento e pompe di calore, può rappresentare un passaggio chiave verso una gestione e un utilizzo dell'energia più efficienti. Tali sistemi, infatti, possono fornire soluzioni di riscaldamento e raffrescamento sostenibili per edifici e processi industriali, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili e limitando l'impatto ambientale. La capacità della manifattura additiva di realizzare geometrie complesse costituisce un vantaggio sostanziale rispetto a configurazioni tradizionali, come le strutture a nido d'ape, i rivestimenti convenzionali o i letti impaccati. Ad esempio, un reticolo basato su celle cubottaedriche consente di definire percorsi interni ottimizzati, in grado di ridurre significativamente la resistenza alla diffusione del vapore acqueo e di accelerare la cinetica di adsorbimento. A differenza dei letti impaccati con disposizione casuale, la porosità distribuita e interconnessa di una struttura 3D minimizza le zone a bassa efficienza e assicura una distribuzione uniforme del vapore in tutto il materiale adsorbente. Un ulteriore aspetto cruciale è l'ottimizzazione del trasferimento termico: il maggiore rapporto superficie/volume e la rete di canali interconnessi favoriscono uno scambio di calore più efficiente nelle fasi di adsorbimento e desorbimento del materiale composito, contribuendo a incrementare l'efficienza complessiva del sistema. Sebbene le strutture a nido d'ape presentino alcuni vantaggi, la loro connettività interna e i percorsi di trasferimento termico risultano meno personalizzabili rispetto alle reti tridimensionali completamente interpenetranti ottenibili con la manifattura additiva, che offrono un equilibrio superiore tra trasferimento di massa e di calore. In tale contesto, il presente lavoro si propone di valutare l'impiego di questo materiale per la realizzazione di strutture reticolari tridimensionali, interamente costituite da

composito adsorbente e prive di supporto metallico, mediante tecniche di manifattura additiva, per applicazioni in tecnologie di conversione energetica a sorzione. Il materiale composito impiegato è costituito da zeolite SAPO-34 come fase attiva e da poli(eter etere chetone) solfonato come matrice polimerica. La geometria del reticolo è stata progettata per ottimizzare la sintesi, la stabilità del materiale e la capacità di adsorbimento/desorbimento. È stata così realizzata una struttura tridimensionale complessa, priva di supporti metallici convenzionali, la cui integrità è stata verificata mediante caratterizzazione morfologica. Le prestazioni di adsorbimento e desorbimento sono state determinate attraverso misure isobare di adsorbimento di vapore acqueo a 11 mbar nell'intervallo di temperatura 30–120 °C, confermando un'elevata efficienza nei processi di scambio.

3.7.2.3 Materiali e metodi

3.7.2.3.1 Preparazione del composito S-PEEK/zeolite

Il polimero poli(eter etere chetone) (PEEK), in granuli di diametro compreso tra 0,5 e 1 mm e caratterizzato da una temperatura di transizione vetrosa compresa tra 143 e 160 °C e un intervallo di fusione di 338–348 °C, è stato fornito da HEROFLOX Italy (Collebeato, BS). L'acido solforico (H_2SO_4) al 98% di purezza è stato acquistato da Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA), mentre l'N,N-dimetilformammide (DMF, $\text{HCON}(\text{CH}_3)_2$) con purezza pari al 99,8% è stato fornito da Honeywell. Come fase adsorbente è stata impiegata una zeolite microporosa di tipo SAPO-34 (AQSOA Z02) prodotta da Mitsubishi Plastics Inc. (Tokyo, Giappone), con particelle di diametro compreso tra 5 e 10 μm . La fase di preparazione prevede la dispersione controllata delle particelle di zeolite SAPO-34 all'interno della matrice di poli(eter etere chetone) solfonato (S-PEEK), così da ottenere un composito omogeneo con buone proprietà meccaniche e ottimale permeabilità al vapore. Questa operazione è essenziale per garantire la piena interazione tra filler e matrice, condizione fondamentale per le prestazioni adsorbenti del materiale finale. Il procedimento ha inizio con la pesatura di 3 grammi di PEEK non trattato. Per garantire precisione nella misura, si procede alla taratura della bilancia elettronica utilizzando un becher come contenitore di riferimento. Una volta azzerato il peso del contenitore, il materiale viene pesato direttamente al suo interno.

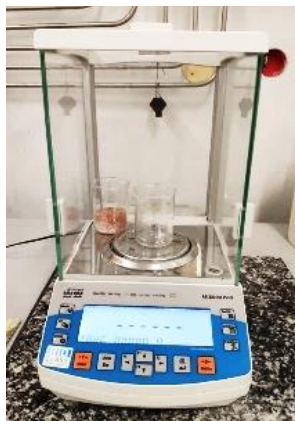


Figura 168: Bilancia tarata con becher.

Viene selezionato il pallone reattivo destinato alla solfonazione e posizionato su un supporto in sughero al fine di garantirne la stabilità durante le fasi operative.



Figura 169: Pallone per la solfonazione.

Successivamente, si procede al riempimento del cristallizzatore con acqua deionizzata a temperatura ambiente. Il cristallizzatore viene collocato su una piastra riscaldante dotata di funzione di agitazione magnetica. La temperatura del bagno deve essere regolata a 30 °C, mentre la velocità di agitazione va impostata in un intervallo compreso tra 200 e 300 rpm, al fine di garantire un'adeguata omogeneizzazione termica. È fondamentale inserire una termocoppia per il monitoraggio continuo della temperatura. Per avviare la funzione di riscaldamento, è necessario tenere premuto il tasto "heat on" fino all'attivazione del sistema.



Figura 170: Piastra con cristallizzatore.

Viene impiegata una pipetta graduata dotata di bulbo in gomma per il dosaggio dei reagenti. Per mantenere le condizioni di sottovuoto all'interno del pallone reattivo, si attiva il pulsante "a" e si procede con l'inserimento del pallone nella pipetta. Successivamente, si prelevano 110 grammi di acido solforico concentrato. Durante la manipolazione del reagente, è obbligatorio l'uso di dispositivi di protezione individuale (DPI), tra cui maschera, occhiali protettivi e guanti resistenti agli agenti corrosivi. L'acido viene prelevato dall'apposito armadio per sostanze pericolose. Il riempimento della pipetta avviene mediante pressione del pulsante "s", mentre lo svuotamento nel recipiente di reazione si effettua premendo il pulsante "e". Le operazioni di trasferimento sono supportate dall'impiego di una spatola metallica, quando necessario.



Figura 171: Pipetta graduata con un bulbo di gomma.

L'acido solforico viene trasferito lentamente nel pallone reattivo, precedentemente posizionato all'interno del cristallizzatore, lasciandolo scivolare lungo le pareti del recipiente per evitare brusche reazioni esotermiche localizzate. In una fase iniziale,

si introducono due o tre spatolate di PEEK nel pallone, avendo cura di distribuirle uniformemente. Successivamente, l'aggiunta del materiale prosegue in modo graduale, con una o due spatolate ogni dieci minuti. L'intero processo di inserimento del PEEK, corrispondente a una massa totale di 3 grammi, deve essere completato entro un intervallo massimo di due ore, in modo da garantire un controllo efficace della cinetica di solfonazione.



Figura 172: Set up di solfonazione.

Nel caso in cui i granuli di PEEK tendano ad accumularsi lungo le pareti interne del pallone reattivo, si procede ad aumentare leggermente la velocità di agitazione per favorirne la dispersione omogenea. Per garantire condizioni operative sicure, si attivano l'illuminazione e il sistema di aspirazione all'interno della cappa chimica. Durante l'aggiunta del reagente, la velocità di agitazione viene temporaneamente ridotta per evitare schizzi o turbolenze e successivamente riportata al valore precedentemente impostato. Al termine della reazione, tutti gli strumenti impiegati vengono lavati prima con acqua corrente e successivamente con acqua distillata. L'impiego di etanolo può facilitare la fase di asciugatura. La reazione di solfonazione viene interrotta dopo un tempo variabile, in funzione del grado di solfonazione desiderato, dopodiché si avvia la procedura di lavaggio del PEEK modificato. In una bacinella si versa acqua fredda, all'interno della quale si collocano due bottiglie contenenti acqua refrigerata per mantenere stabile la temperatura del bagno. Si predispone quindi un becher da 1 litro riempito con 600 ml di acqua distillata, nel quale viene inserito un agitatore magnetico di grandi dimensioni. L'agitazione deve essere sufficientemente vigorosa da generare un vortice stabile. Successivamente, la soluzione contenente acido solforico viene

aggiunta gradualmente, goccia a goccia, inclinando opportunamente il pallone reattivo per agevolare la discesa controllata del liquido all'interno del becher.

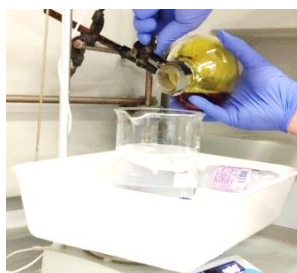


Figura 173: Fase di lavoro.

Segue la fase di lavaggio del materiale. Una piastra viene collocata in prossimità del lavandino per predisporre l'area di lavoro, mentre un secondo becher da 3 litri viene impiegato per raccogliere l'acqua derivante dai primi cicli di lavaggio, contenente elevate concentrazioni acide e pertanto da neutralizzare successivamente. Il liquido viene filtrato attraverso un colino, agitando simultaneamente i granuli di S-PEEK mediante l'utilizzo di una spatola, al fine di favorire il rilascio di residui acidi. Il pallone reattivo viene abbondantemente risciacquato con acqua, e i granuli sono sottoposti a quattro cicli di lavaggio in becher per garantire la rimozione di eventuali residui acidi. Successivamente, si riempie uno spruzzatore con acqua distillata da utilizzare all'interno del becher, dove viene mantenuta l'agitazione. I granuli vengono quindi trasferiti in uno scolino, continuando l'agitazione per ulteriori 3-4 cicli di lavaggio, eseguiti alternativamente nel becher e nel lavandino. Per la neutralizzazione della soluzione acida contenuta nel becher da 3 litri, si impiegano 80 grammi di idrossido di sodio. Una prima quantità pari a 70 grammi viene aggiunta in un'unica soluzione, mentre la quantità restante viene integrata in modo incrementale, monitorando costantemente il pH della soluzione. Un ulteriore becher viene posto sulla bilancia di precisione, tarato, e riempito con cautela con l'idrossido di sodio, evitando il contatto diretto con la pelle per via della sua elevata causticità. A causa della natura igroscopica del composto, si effettuano due pesate rapide per garantire l'accuratezza della massa prelevata. L'intero quantitativo viene successivamente trasferito nel becher da 3 litri contenente la soluzione da neutralizzare. Si attende il completo scioglimento dell'idrossido, verificando l'avvenuta neutralizzazione

tramite l'impiego di cartine indicatrici universali (tornasole), previamente ritagliate in piccole porzioni per testare sia il liquido nel becher da 3 litri sia i granuli solidi. Una volta che i granuli risultano completamente neutralizzati, vengono adagiati su carta assorbente per l'asciugatura e ricoperti con ulteriore carta al fine di favorire l'evaporazione residua. Il grado di solfonazione (DS) della matrice polimerica è stato determinato mediante titolazione, ottenendo un valore del 44,9%.

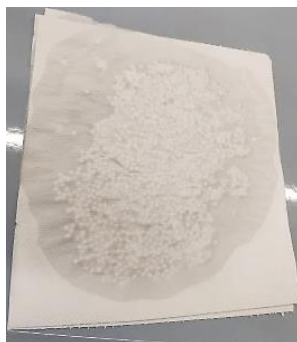


Figura 174: Granuli di S-PEEK.

Una volta ottenuti i granuli di S-PEEK, si procede alla loro dissoluzione in presenza del materiale di riempimento (filler), finalizzato all'accumulo di energia termica. Per tale scopo, è stata selezionata la zeolite come materiale funzionale per lo storage. Di seguito si riportano le quantità utilizzate per la preparazione di 2 g di miscela contenente l'80% in peso di filler:

- 0,40 g di S-PEEK
- 1,89 g di zeolite
- 3,71 g di N,N-dimetilformammide (DMF)

In fase preliminare, la zeolite viene pesata con bilancia di precisione, seguita dalla misurazione della massa dell'S-PEEK. Successivamente, il solvente DMF viene aggiunto al composto e si introduce un nottolino magnetico all'interno del recipiente per l'agitazione meccanica. Il sistema viene agitato per un tempo pari a circa 15 minuti, assicurandosi della completa dissoluzione del polimero. Al termine della fase di dissoluzione, il nottolino viene rimosso e si procede con l'eliminazione manuale dei residui non disciolti, utilizzando una spatola metallica. Una volta verificata la formazione di una soluzione omogenea, si aggiunge la zeolite come filler; quindi, la miscela così ottenuta viene colata all'interno dello stampo.



Figura 175: Fase di lavoro.

3.7.2.3.2 Realizzazione dello stampo mediante tecniche di additive manufacturing
 Per la realizzazione dello stampo del reticolo adsorbente è stato impiegato un filamento idrosolubile in alcol polivinilico (PVA). La stampa è stata effettuata con i seguenti parametri operativi: temperatura di estrusione 180 °C, percentuale di riempimento 10%, altezza dello strato 0,12 mm, velocità di stampa 50 mm/s e temperatura del piano di lavoro 60 °C. La preparazione dei file GCODE è stata eseguita mediante il software Ultimaker CURA (versione 5.7.2), opportunamente configurato per ridurre al minimo i movimenti non necessari dell'ugello e prevenire difetti superficiali dello stampo. La stampa è stata realizzata con una macchina Sidewinder X2 (Artillery 3D Technology Co., Ltd., Shenzhen, Cina) dotata di ugello da 0,4 mm di diametro.

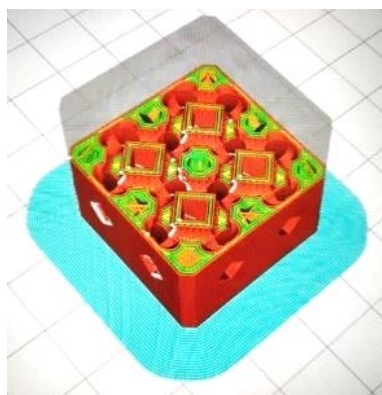


Figura 176: Anteprima di stampa tramite codice GCODE

3.7.2.3.3 Valutazione sperimentale della capacità di adsorbimento e caratterizzazione morfologica delle strutture composite

Le capacità di adsorbimento dei campioni composti sono state valutate mediante un sistema termogravimetrico a vapore dinamico (Surface Measurements Systems DVS Vacuum), dotato di una microbilancia ad alta precisione (sensibilità di 0,1 µg) e di un sistema di regolazione del flusso di vapore all'interno della camera di analisi. In primo luogo, i campioni sono stati degassati e portati a peso costante riscaldandoli gradualmente fino a 130 °C (1 °C/min) e mantenendo tale temperatura per circa 6 ore sotto vuoto spinto (10^{-1} Pa). Successivamente, l'evaporatore contenente acqua liquida è stato messo in comunicazione con la camera dei campioni, consentendo il passaggio del vapore a pressione controllata (11 mbar), mantenuta costante da una valvola a farfalla automatica e da una pompa per vuoto posta a valle. Le prove sono state condotte in condizioni isobare a 11 mbar, variando la temperatura da 30 a 120 °C. La capacità di adsorbimento è stata calcolata secondo la relazione:

$$w\left(\frac{g}{g}\right) = \frac{m(p_{H_2O}, T_S) - m_0}{m_0}$$

Dove $m(p_{H_2O}, T_S)$ rappresenta la massa a equilibrio del campione alla pressione e temperatura considerate, mentre m_0 è la massa del campione anidro. La caratterizzazione morfologica delle strutture composite stampate in 3D è stata effettuata tramite microscopia elettronica a scansione ambientale (ESEM) con un Quanta 450 (FEI, Hillsboro, OR, USA), operando a 10 kV e mantenendo una pressione in camera di 50 Pa. I campioni sono stati analizzati nello stato "as produced", senza alcun trattamento preliminare della superficie.

3.7.2.4 Risultati e discussioni

3.7.2.4.1 Progettazione e stampa 3D di strutture reticolari adsorbenti

Questa sezione descrive in dettaglio il processo di fabbricazione della struttura adsorbente reticolare realizzata tramite stampa 3D, illustrando in maniera completa le fasi operative principali. Le strutture reticolari sono configurazioni tridimensionali leggere, resistenti e in grado di assorbire energia, costituite da unità cellulari ripetute. Esse sono generalmente composte da elementi lineari (travi o

montanti) interconnessi in corrispondenza di nodi, assumendo la forma di griglie o reticoli tridimensionali. Tali strutture consentono di ridurre al minimo lo spreco di materiale e il consumo energetico in fase di produzione, mantenendo al contempo leggerezza, robustezza, adeguate proprietà meccaniche e capacità di smorzamento delle vibrazioni. La manifattura additiva rappresenta la tecnologia più idonea per la realizzazione di queste geometrie complesse. Nell'ambito di questo studio è stata scelta una configurazione reticolare basata sulla geometria del cubottaedro, un solido geometrico caratterizzato da facce quadrate e triangolari. Il cubottaedro presenta otto facce triangolari e sei quadrate, unite da ventiquattro spigoli di uguale lunghezza, e possiede simmetria cubica con dodici vertici in cui si incontrano facce di entrambe le tipologie. Per adattare tale geometria alla realizzazione del reticolo, i vertici del cubottaedro sono stati trasformati in elementi cilindrici, generando una cella unitaria di base, successivamente replicata per ottenere l'intera struttura reticolare. La particolare conformazione del cubottaedro ha permesso di ottenere una struttura tridimensionale leggera, meccanicamente resistente e capace di assorbire energia. In questa configurazione, le celle cubottaedriche sono disposte in una griglia cubica tridimensionale, in cui ogni elemento è collegato ai propri adiacenti. Il processo di fabbricazione della struttura reticolare adsorbente stampata in 3D può essere suddiviso in quattro fasi principali.

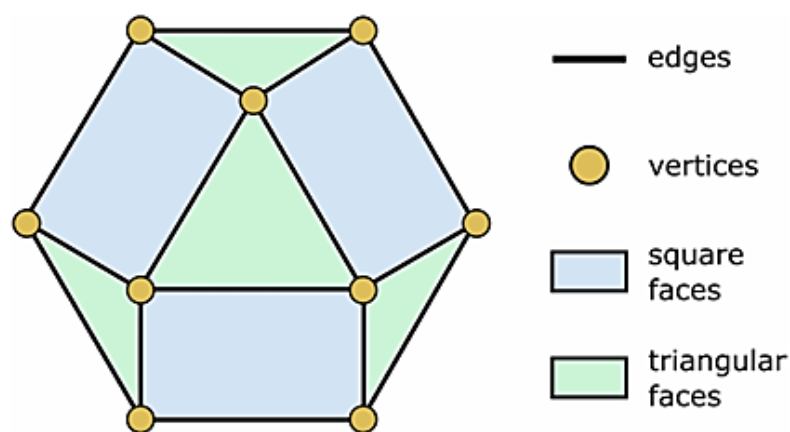


Figura 177: Rappresentazione schematica di un cubottaedro con indicazione di vertici, spigoli e facce triangolari e quadrate.

Fase 1. Il processo prende avvio con la progettazione accurata in ambiente CAD, finalizzata alla creazione di un modello parametrico della cella unitaria del reticolo.

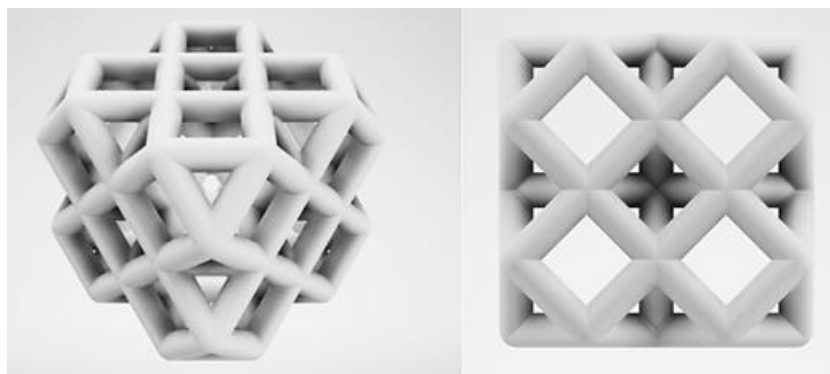


Figura 178: Struttura reticolare cubottaedro in ambiente CAD

Questo modello tridimensionale, con dimensioni complessive pari a $2 \times 2 \times 2$ unità, costituisce la base geometrica per l'intera struttura. Sulla base di prove preliminari volte a individuare il diametro ottimale per l'iniezione del materiale nello stampo, è stato stabilito un valore di 3 mm per lo spessore dei rami. Le dimensioni finali della cella progettata risultano pari a 25,686 mm per lato. Il modello parametrico proposto fornisce una rappresentazione standardizzata della cella reticolare, garantendo uniformità dimensionale e ripetibilità durante tutte le fasi di produzione. Tale uniformità è essenziale per assicurare il mantenimento della geometria e delle proprietà previste per la struttura adsorbente. Inoltre, l'approccio parametrico offre un'elevata flessibilità progettuale, consentendo di modificare agevolmente la configurazione della cella al fine di ottimizzare le prestazioni di adsorbimento della struttura e la sua efficienza complessiva. Un ulteriore vantaggio di questa metodologia risiede nella possibilità, in fasi successive, di collegare direttamente il modello parametrico a simulazioni numeriche o a dati sperimentali, così da guidare un'ottimizzazione basata sull'analisi dei risultati. In tal modo, la geometria del reticolo può essere adattata alle caratteristiche di molecole bersaglio o ad applicazioni specifiche.

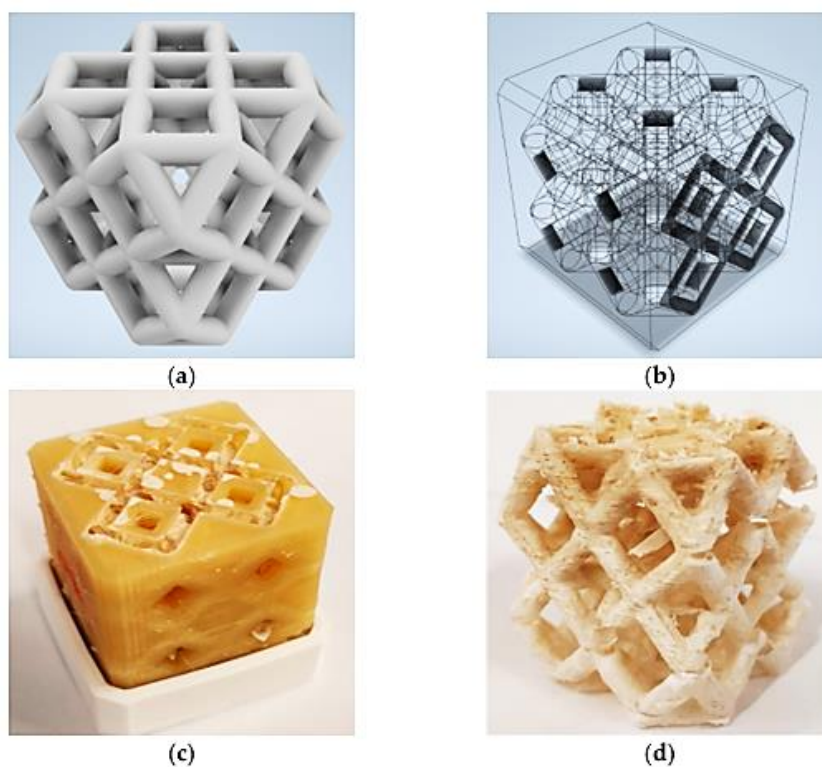


Figura 179: Realizzazione della struttura reticolare adsorbente stampata in 3D: (a) definizione parametrica della cella unitaria; (b) stampo negativo della cella; (c) stampo negativo in polimero PVA riempito con sospensione composita SAPO-34/S-PEEK; (d) struttura.

Fase 2. Una volta definita la geometria del reticolo, si procede alla progettazione dello stampo mediante operazioni booleane di sottrazione tra solidi, così da ottenere il negativo della struttura.

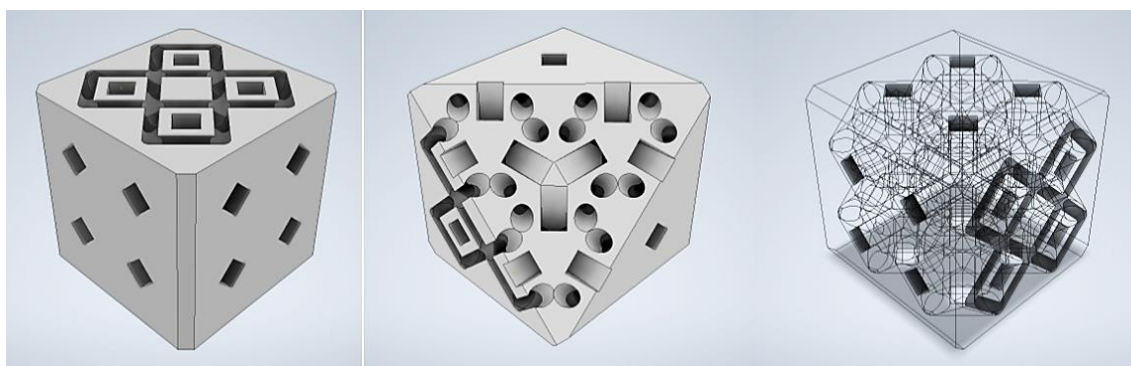


Figura 180: CAD stampo.

In questa fase si lascia intenzionalmente un'apertura nella parte superiore per l'accesso del materiale e si realizzano percorsi di drenaggio nella porzione inferiore dello stampo per agevolare la fuoriuscita di eventuali eccedenze.

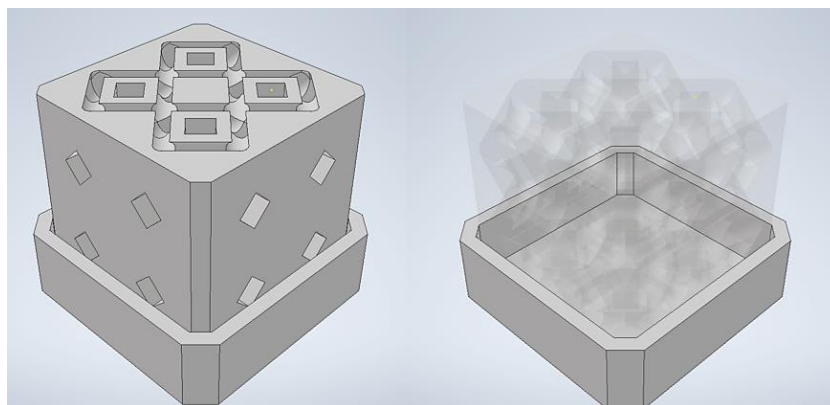


Figura 181: CAD stampo con controstampo.

Il modello generato costituisce una replica esatta della configurazione reticolare, garantendo la fedeltà geometrica richiesta.

Fase 3. La fabbricazione dello stampo negativo viene eseguita tramite manifattura additiva, impiegando un supporto idrosolubile in PVA. Questo materiale funge da struttura temporanea durante il riempimento con il composito zeolite–S-PEEK, consentendo la creazione di un reticolo cavo. Contestualmente si realizza anche un controstampo, destinato a raccogliere l’eventuale materiale in eccesso fuoriuscente dai fori inferiori. Tali fori sono progettati anche per facilitare la successiva dissoluzione in acqua del PVA. La fase di riempimento prevede l’impiego di una sospensione costituita da particelle di zeolite SAPO-34, responsabili delle proprietà adsorbenti, disperse in resina polimerica S-PEEK, che conferisce stabilità meccanica e durabilità al materiale. La sospensione viene introdotta con precisione all’interno dello stampo negativo mediante microsiringa, assicurando una distribuzione uniforme all’interno della complessa geometria reticolare. Una volta completato il riempimento, lo stampo viene posto in forno a 40 °C per 24 ore.

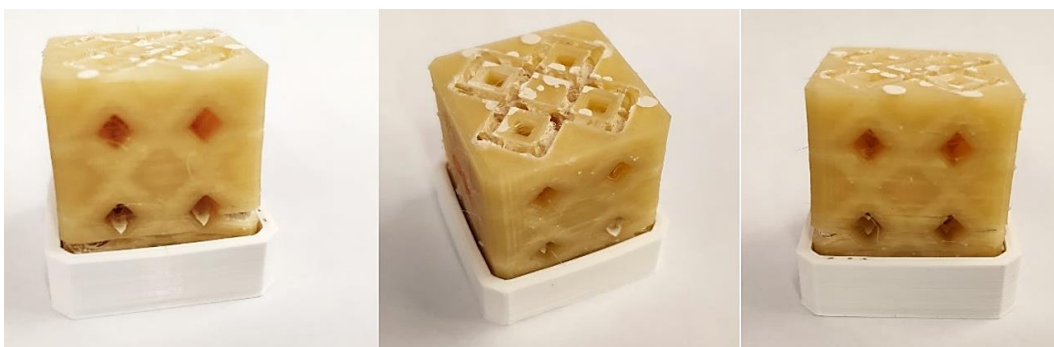


Figura 182: Stampo con controstampo dopo l’asciugatura.

Questo trattamento termico controllato e prolungato favorisce l'evaporazione completa del solvente DMF, permettendo la piena solidificazione del composito e prevenendo la formazione di fessurazioni o deformazioni che potrebbero comprometterne la funzionalità.

Fase 4. Per estrarre la struttura reticolare ormai solidificata dal negativo in PVA, si adotta un processo di dissoluzione.

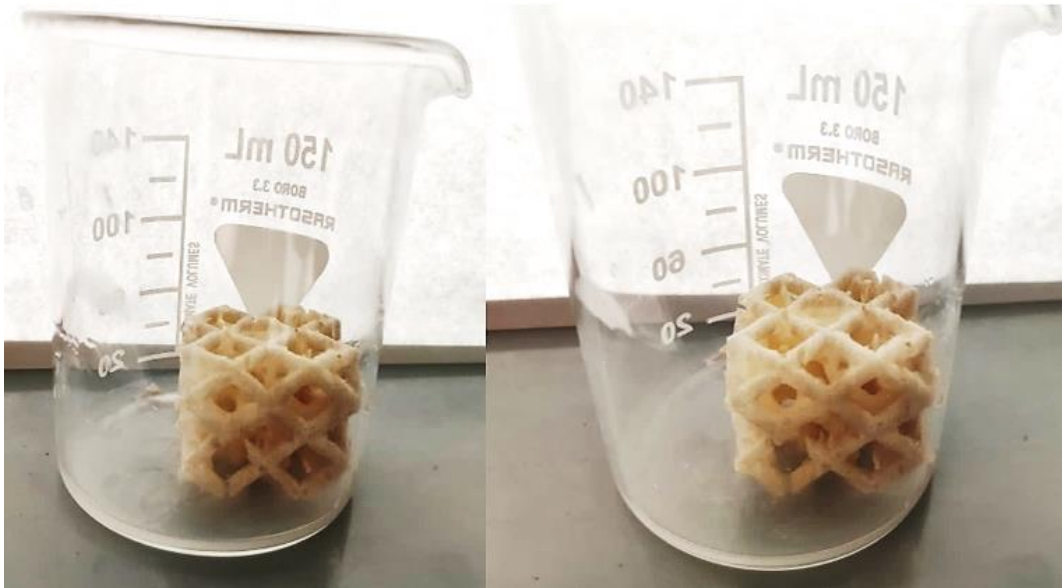


Figura 183: Struttura reticolare dopo il bagno in ultrasuoni.

Lo stampo viene immerso in un bagno a ultrasuoni mantenuto a 70 °C per 5 ore. L'azione combinata delle vibrazioni ultrasoniche e della temperatura favorisce la rapida degradazione e dissoluzione del PVA, consentendo la rimozione delicata del reticolo. Il materiale ottenuto è un composito zeolite-S-PEEK che riproduce fedelmente la geometria originaria del progetto.

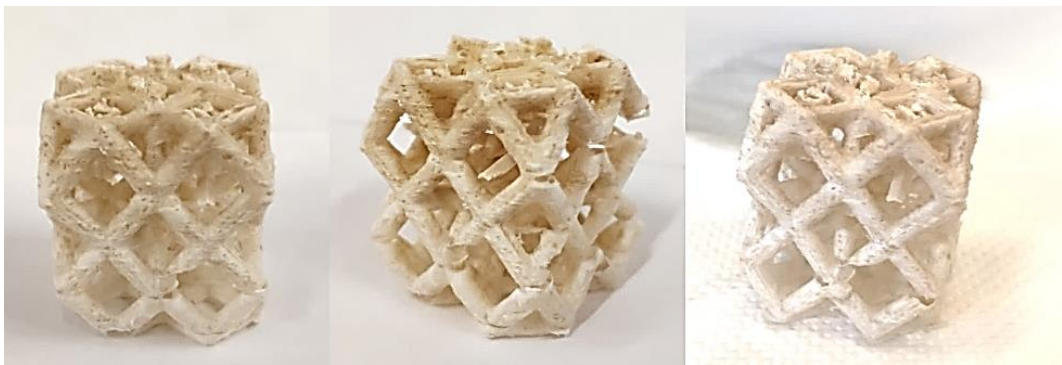


Figura 184: Struttura reticolare finita

Le principali caratteristiche geometriche della struttura reticolare composita 3D realizzata sono riportate nella tabella seguente.

Caratteristica geometrica	Tipo/Unità	Valore
Volume della struttura composita	cm ³	6,59
Volume totale 3D	cm ³	19,46
Volume vuoto	cm ³	12,87
Rapporto di forma*	—	2,96
Percentuale di volume vuoto	%	66,14
Diametro/Lunghezza dei canali	mm	3 / 8,3
Peso	g	1,936

Tabella 22: Principali caratteristiche geometriche della struttura reticolare composita 3D.

In questa fase dell'attività sperimentale è stata progettata una struttura caratterizzata da un rapporto tra volume solido e volume vuoto tale da garantire un'ampia interconnessione tra i canali solidi e quelli cavi. Questa configurazione è stata scelta per consentire un controllo più efficace sia nella fase di iniezione del materiale sia nella successiva fase di estrazione dal modello, oltre a permettere una migliore comprensione delle dinamiche associate a queste operazioni di fabbricazione. La struttura reticolare 3D selezionata presenta una porosità pari al 66,14%. Considerando un peso complessivo di 1,936 g e una composizione del materiale costituita per l'80% in peso da zeolite, si può calcolare che il contenuto di zeolite all'interno dell'unità prodotta è pari a 0,08 g/cm³. Questi parametri sono comunque modificabili già in fase di progettazione, variando le grandezze geometriche della struttura reticolare (ad esempio dimensione della cella, diametro e lunghezza dei canali), così da ottenere un'ampia versatilità nella realizzazione di configurazioni con contenuto di vuoto fino a circa il 20% (corrispondente all'80% di materiale composito nell'intero reticolo 3D), condizione che incrementa positivamente la quantità massima di zeolite per unità di volume.

3.7.2.4.2 Ottimizzazione del processo di fabbricazione e risoluzione delle criticità operative nella produzione degli stampi in PVA

Nel corso della sperimentazione sono stati individuati tre aspetti critici del processo che richiedono ottimizzazione:

1. Imperfezioni durante la fase di stampa;
2. Frattura dello stampo durante la fase di essiccamento;
3. Difficoltà nella dissoluzione del materiale dello stampo.

Il polivinilalcol (PVA), impiegato per la produzione degli stampi, presenta proprietà fisiche che rendono complessa l'estrusione mediante additive manufacturing. Sono state condotte numerose prove sperimentali al fine di individuare la temperatura ottimale per una corretta estrusione, la quale è stata fissata a 173 °C. Un'ulteriore criticità riscontrata è stata la presenza marcata del fenomeno dello stringing: tale difetto consiste nella formazione di sottili filamenti polimerici residui, causati dalla fuoriuscita non intenzionale del materiale fuso durante gli spostamenti dell'ugello in assenza di estrusione attiva. La presenza di tali filamenti all'interno dello stampo avrebbe compromesso l'integrità della struttura finale, rendendone indispensabile la completa eliminazione. Per ovviare a questo problema, si è proceduto all'ottimizzazione del codice di controllo della stampante (G-code), con l'obiettivo di impedire il passaggio dell'ugello all'interno delle cavità dello stampo durante i movimenti di riposizionamento. Questa strategia ha permesso di ottenere superfici interne dello stampo prive di irregolarità o difetti, garantendo un livello qualitativo adeguato alle finalità progettuali. Al fine di evitare la frattura dello stampo durante la fase di essiccamento, è stato implementato un elemento di contenimento aggiuntivo, anch'esso realizzato mediante tecnologia di additive manufacturing. Tale componente, concepito come una gabbia realizzata in acido polilattico (PLA), ha esercitato una pressione meccanica uniforme sullo stampo, garantendone la coesione strutturale e contrastando le sollecitazioni generate durante la fase di asciugatura del materiale contenuto. L'impiego di questo accorgimento ha efficacemente impedito fenomeni di dilatazione e successiva frattura del corpo dello stampo. Contestualmente, è stata introdotta una variazione nella modalità di essiccazione con l'obiettivo di ridurre le sollecitazioni termiche indotte. In particolare, si è optato per un'asciugatura a temperatura ambiente anziché in stufa,

estendendo il tempo di evaporazione del solvente (N,N-Dimetilformammide, DMF) a tre giorni, al fine di evitare stress termici localizzati. Relativamente alla criticità associata alla dissoluzione dello stampo in polivinilalcol (PVA), si è proceduto alla riprogettazione del modello CAD con particolare attenzione alla riduzione del volume complessivo di materiale impiegato. Tale ottimizzazione ha avuto lo scopo di semplificare e accelerare il processo di rimozione tramite solubilizzazione in acqua. A supporto di questa strategia, è stata inoltre adottata la scelta di realizzare, in una fase iniziale di test, strutture reticolari costituite da una singola cella unitaria, al fine di monitorare e migliorare progressivamente l'intero processo produttivo. Sebbene le soluzioni di ottimizzazione individuate siano già state sperimentalmente verificate, un'analisi approfondita e sistematica dei relativi risultati sarà oggetto di studi futuri.



Figura 185: Stampo singola cella ottimizzato.

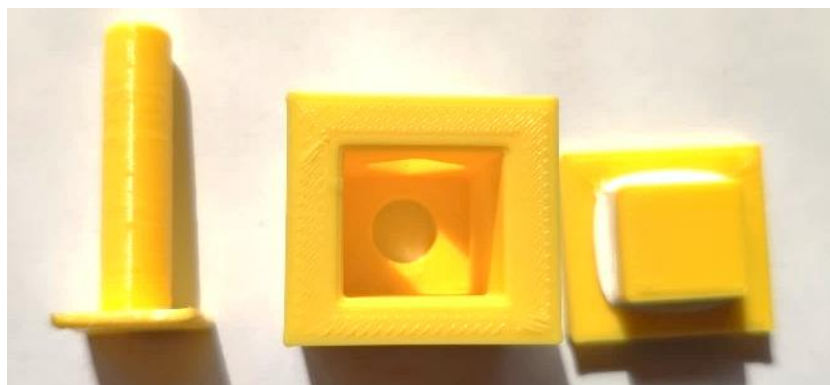


Figura 186: Gabbia per stampo.



Figura 187: Stampo inserito nella gabbia per l'asciugatura

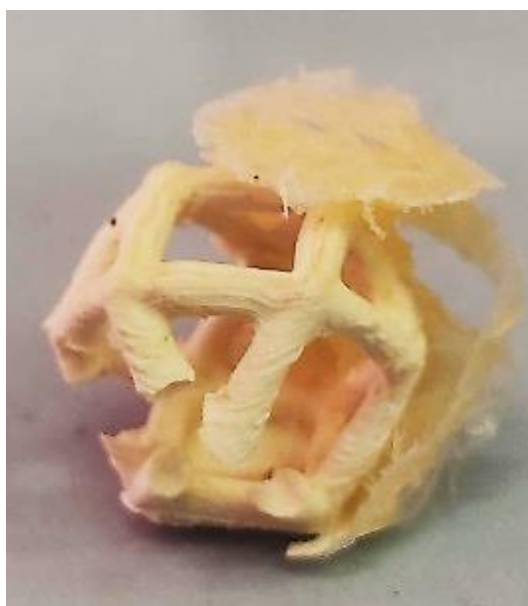


Figura 188: Struttura singola cella

3.7.2.4.3 Caratterizzazione morfologica della struttura

La struttura reticolare 3D ottenuta è stata sottoposta a un'analisi morfologica e strutturale al fine di definire in modo accurato le caratteristiche del materiale sintetizzato, la sua omogeneità e l'integrità complessiva. L'osservazione a ingrandimento ravvicinato di un bordo di cella cubottaedrica mostra una conformazione assimilabile a un tubo sottile con superficie irregolare. Tale area è caratterizzata dalla presenza superficiale di numerosi fori e discontinuità, che non vanno interpretati come difetti, bensì come canali di passaggio del vapore acqueo tra l'esterno e l'interno del tubo.

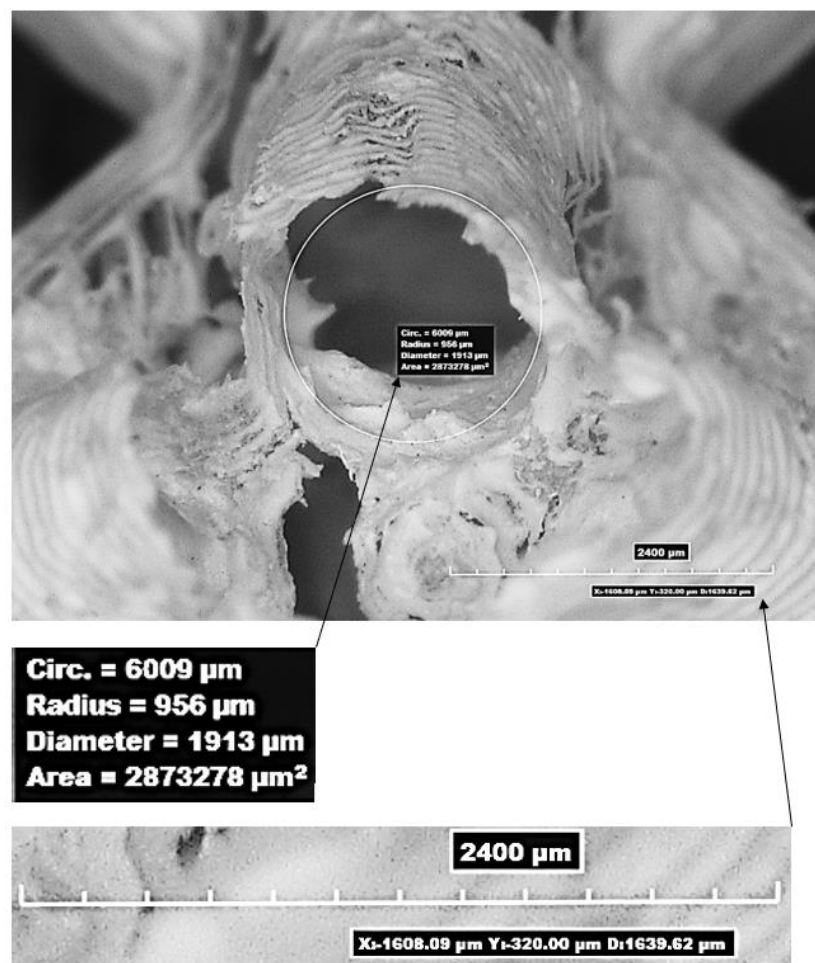


Figura 189: Immagine catturata al microscopio ottico della struttura in s-peek.

In alcune zone si rileva un'elevata concentrazione di tali aperture, con valori prossimi a quattro fori per mm^2 e dimensioni massime fino a 0,4 mm. Sebbene queste discontinuità possano influire, in misura limitata, sul comportamento meccanico della struttura, non compromettono la stabilità complessiva del reticolo, che mantiene robustezza e idoneità all'applicazione prevista anche in presenza di tali irregolarità localizzate. All'interno del composito stampato in 3D, la distribuzione del filler risulta uniforme e ordinata, con grani di zeolite ben interconnessi e saldamente inglobati nella matrice polimerica. Ciò evidenzia una forte e stabile interazione tra la zeolite e il polimero S-PEEK. La superficie del materiale presenta una morfologia marcatamente ruvida, caratteristica attribuibile principalmente alla stratificazione tipica della tecnica di fabbricazione a filamento. Tale stratificazione genera una topografia distinta, costituita da rilievi e avvallamenti che si dispongono seguendo il percorso di deposizione del controstampo in PVA. Questa conformazione superficiale contribuisce ad aumentare l'area di contatto complessiva e può influenzare le modalità di interazione del materiale con l'ambiente circostante.

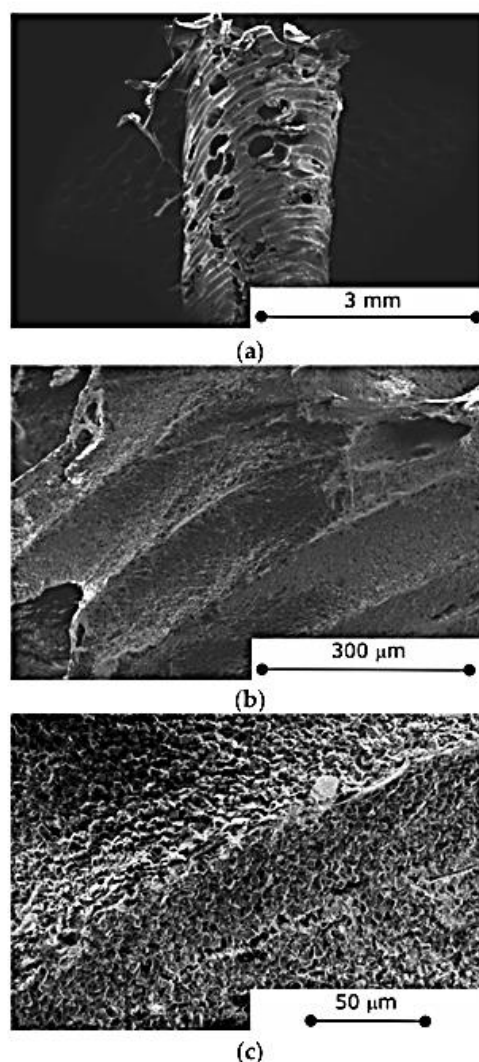


Figura 190: Immagini morfologiche del materiale adsorbente stampato in 3D: (a) a basso ingrandimento, (b) a medio ingrandimento e (c) ad alto ingrandimento.

La presenza di microvuoti distribuiti in maniera casuale all'interno della massa del composito, insieme a cricche superficiali o poco profonde generate dal ritiro del materiale durante l'essiccazione e visibili sulla superficie, non compromette la stabilità complessiva del materiale. Al contrario, tali vuoti possono favorire la formazione di percorsi preferenziali per il flusso di vapore acqueo, migliorando così la dinamica dei processi di adsorbimento e desorbimento. L'elevata permeabilità al vapore acqueo del polimero S-PEEK, che avvolge completamente le particelle di zeolite, riduce inoltre il rischio di effetti barriera nei confronti dei fenomeni di scambio. Il S-PEEK mostra un'eccellente capacità filmogena, in grado di riprodurre fedelmente le complesse caratteristiche geometriche della superficie zeolitica. Le catene polimeriche aderiscono in modo uniforme alla superficie del filler, formando

un film continuo e coerente che ricalca la morfologia della zeolite. Ciò indica che la matrice di S-PEEK, impiegata come legante tra le particelle di zeolite, possiede una natura prevalentemente viscoelastica e flessibile, sufficiente a mantenere l'integrità del materiale sia sotto sollecitazioni termiche dovute ai cicli di adsorbimento/desorbimento, sia in presenza di vibrazioni e urti durante l'esercizio. In questa configurazione reticolare, la porosità intrinseca fornisce un'ampia superficie specifica per l'adsorbimento, mentre la resistenza meccanica del S-PEEK e la sua affinità con il filler zeolitico garantiscono la stabilità strutturale del composito. Il contatto diretto e continuo tra polimero e zeolite favorisce fenomeni di trasporto di massa stabili all'interno della matrice, assicurando un'efficace conduzione dei processi di adsorbimento e desorbimento alla base dell'accumulo e della conversione di energia termica. L'elevato grado di interazione strutturale tra il film di S-PEEK e il reticolo della zeolite incrementa le prestazioni complessive del composito, migliorandone la capacità di sorzione e la stabilità nel tempo.

3.7.2.4.4 Valutazione delle prestazioni di adsorbimento/desorbimento

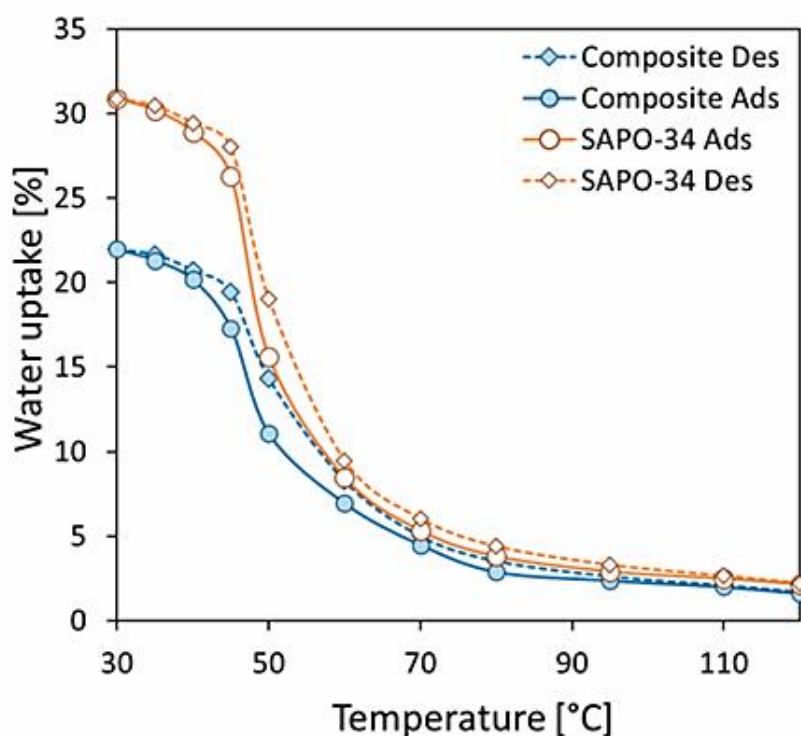


Figura 191: Isobare di adsorbimento dell'acqua (marcatori circolari—linee continue) e di desorbimento (marcatori a losanga—linee tratteggiate) a 11 mbar per materiale polimerico S-PEEK con 80% in peso di zeolite SAPO-34 e per polvere di zeolite SAPO-34 pura.

Per valutare il potenziale del materiale nei processi di trasformazione termica a sorzione, è stata analizzata la capacità del filler zeolitico di scambiare vapore acqueo con l'ambiente, anche quando è inglobato all'interno della matrice polimerica. Le isobare di adsorbimento e desorbimento dell'acqua, ottenute per il materiale composito con contenuto di filler adsorbente pari all'80% in peso e per la polvere di zeolite SAPO-34 pura, entrambe testate a una pressione di vapore acqueo di 11 mbar, evidenziano la capacità del materiale di assorbire e rilasciare efficacemente il vapore, confermando il suo potenziale per applicazioni in processi di sorzione termicamente attivati. In accordo con quanto riportato in letteratura, il composito a base di SAPO-34 presenta una curva di tipo sigmoide con un incremento netto della capacità di adsorbimento a basse temperature ($T < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$), mentre le isobare di desorbimento non mostrano fenomeni di isteresi. Un comportamento analogo è stato osservato in altri compositi contenenti SAPO-34. Come prevedibile, la capacità di adsorbimento d'acqua del composito risulta inferiore rispetto a quella della zeolite SAPO-34 pura in tutto l'intervallo di temperatura, a causa della minore quantità di fase adsorbente presente. In particolare, a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, i valori massimi di capacità di adsorbimento sono pari al 30,88% per la polvere di SAPO-34 e al 21,96% per il materiale composito. Tuttavia, quest'ultimo valore è coerente con la percentuale di filler impiegata, suggerendo che la zeolite sia ben integrata nella matrice polimerica e mantenga la propria capacità di adsorbire vapore acqueo. Sebbene in questa fase non siano stati approfonditi gli aspetti cinetici, le misure termogravimetriche a equilibrio effettuate non hanno evidenziato differenze apprezzabili nei tempi di raggiungimento dell'equilibrio tra la zeolite pura e la struttura stampata in 3D. Ciò può indicare, seppur qualitativamente e in via preliminare, che il processo di stampa 3D non abbia influenzato in modo significativo la velocità di reazione. Indagini più specifiche e approfondite sulla cinetica di adsorbimento e desorbimento saranno oggetto di future attività di ricerca. A questo proposito, è stato introdotto un ulteriore parametro utile a valutare in modo più accurato il contributo dei grani di zeolite all'interno del materiale composito, definito secondo la seguente equazione:

$$FZE_{Ti} = 100 \cdot \left(\frac{ZWU_{comp}}{WU_{SAPO}} - 1 \right)$$

L'efficienza della zeolite inglobata (FZETi) rappresenta la percentuale di zeolite presente nel composito adsorbente che partecipa attivamente ai processi di adsorbimento e desorbimento a ciascuna temperatura Ti. La capacità di adsorbimento di vapore acqueo del composito (ZWUcomp) è definita come la quantità di vapore assorbita, normalizzata rispetto al contenuto di zeolite nel campione e alla temperatura Ti, confrontata con lo stato anidro. Analogamente, la capacità di adsorbimento di vapore acqueo della zeolite SAPO-34 pura (WUSAPO) è la quantità di vapore assorbita dalla polvere di zeolite, sempre rapportata allo stato secco, per la stessa temperatura. Un valore positivo di FZETi indica che la zeolite incorporata nel composito mostra una capacità di sorzione superiore a quella della zeolite pura alla temperatura considerata; al contrario, un valore negativo segnala una capacità inferiore rispetto alla zeolite non inglobata. La struttura porosa stampata in 3D consente un facile accesso del vapore in tutto il volume del materiale, favorendo un'adsorbimento efficace anche alle alte temperature. I canali porosi di dimensioni rilevanti e i sottili film polimerici contenenti zeolite agevolano il trasporto di vapore acqueo, determinando un'elevata capacità di adsorbimento su tutto l'intervallo di temperatura analizzato. Alle basse temperature, dove l'assorbimento d'acqua raggiunge il massimo, l'indice FZE è pari a circa -10, il che equivale a dire che circa il 90% della zeolite SAPO-34 partecipa attivamente al processo di adsorbimento. Inoltre, la struttura reticolare adsorbente mostra, alle alte temperature, valori di FZE prossimi allo zero o leggermente superiori rispetto alla zeolite pura, suggerendo prestazioni di adsorbimento quasi equivalenti. I dati dell'indice FZE in questo intervallo risultano leggermente dispersi a causa della bassa capacità di sorzione tipica della SAPO-34 in queste condizioni, fenomeno che porta a una maggiore variabilità e ampiezza nella distribuzione dei valori misurati. Questa caratteristica intrinseca si traduce in dati meno concentrati e più eterogenei, senza che ciò implichi un reale peggioramento delle prestazioni del materiale.

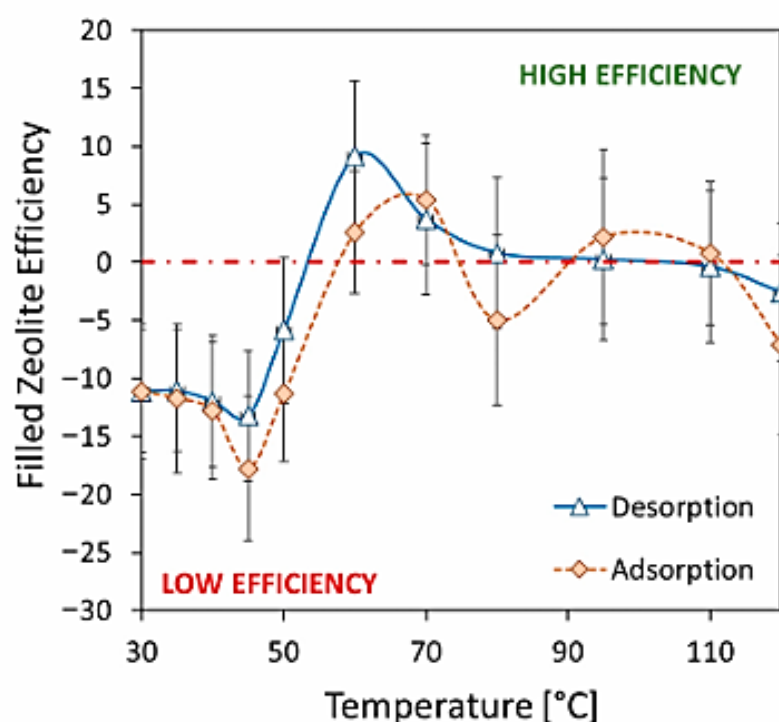


Figura 192: Efficienza della zeolite inglobata al variare della temperatura nei processi di adsorbimento e desorbimento del materiale composito.

La struttura porosa presente ai bordi del composito, costituita da tubi a parete sottile rivestiti da film polimerici contenenti zeolite, favorisce il passaggio del vapore acqueo attraverso l'intero campione, garantendo così un'elevata capacità di adsorbimento su un ampio intervallo di temperature. I valori positivi osservati dell'indice FZETi in questa fascia di temperatura non rappresentano un reale aumento dell'efficienza intrinseca della zeolite, ma sono piuttosto attribuibili alla dispersione dei dati sperimentali, come confermato dall'andamento delle barre d'errore. Le caratteristiche prestazionali della zeolite in queste condizioni comportano infatti una maggiore variabilità delle misure, facendo apparire l'indice FZETi positivo più per effetto della dispersione che per un effettivo miglioramento delle prestazioni. Alle basse temperature, in corrispondenza della massima capacità di adsorbimento d'acqua, l'efficienza della zeolite raggiunge circa il 90%, indicando che la SAPO-34 contribuisce in maniera significativa alla capacità di sorzione del composito. Anche ad alte temperature, la capacità del materiale di catturare e trattenere vapore acqueo si avvicina a quella della zeolite in polvere; tuttavia, in questo intervallo, le forze di attrazione e i meccanismi di trasporto del

vapore si riducono notevolmente, limitando i fenomeni diffusivi attraverso la matrice polimerica. Ciò è dovuto al fatto che la fase adsorbente, responsabile dell'intrappolamento del vapore, presenta una bassa capacità di assorbimento alle alte temperature. La presenza di valori di FZE prossimi allo zero conferma comunque l'elevata permeabilità al vapore offerta dalla struttura reticolare stampata in 3D. Nonostante agisca da legante, il polimero non interferisce con il meccanismo di adsorbimento/desorbimento del vapore acqueo, consentendo al materiale di mantenere un'elevata efficienza di adsorbimento. Ciò è dovuto all'eccellente permeabilità al vapore del S-PEEK, che permette la diffusione senza ostacoli e garantisce il coinvolgimento attivo dei grani di zeolite, anche quando sono completamente inglobati nella matrice polimerica, nei processi di adsorbimento e desorbimento. Questi risultati confermano il potenziale di questa nuova classe di materiali come valida alternativa ai letti di zeolite sfusa per la realizzazione di adsorbitori con prestazioni termodinamiche superiori. Le future attività di ricerca saranno indirizzate a indagare la stabilità idrotermale e la cinetica di adsorbimento del materiale composito, al fine di valutarne la durabilità e le prestazioni in condizioni operative reali. Un'analisi comparativa con materiali compositi simili riportati in letteratura evidenzia che, nel caso di strutture in schiuma permeabile contenenti SAPO-34 (ad esempio a base siliconica), le prestazioni di equilibrio risultano simili a quelle misurate per la struttura stampata in 3D, a causa di una riduzione pressoché lineare della capacità di sorzione all'aumentare della quantità di legante impiegata. Tuttavia, le schiume devono contenere almeno il 30–40% in peso di legante per garantire un'adeguata resistenza meccanica, con conseguente riduzione della capacità di adsorbimento effettiva. Anche per altre strutture composite, come i rivestimenti adsorbenti applicati su scambiatori di calore, le prestazioni di equilibrio risultano allineate a quanto osservato in questo studio, con isobare di adsorbimento proporzionalmente ridotte in funzione della quantità di legante. Analizzando l'efficienza della SAPO-34 inglobata nella zona ad alta capacità di adsorbimento, sia i rivestimenti sia le strutture 3D mostrano uno scostamento di circa il 10% rispetto alla capacità massima teorica, effetto attribuibile alla natura del legante utilizzato. In sintesi, la struttura composita

stampata in 3D sviluppata presenta una capacità di adsorbimento in linea con quanto riportato per composizioni simili già documentate in letteratura.

Contenuto di filler (% in peso)	Densità (kg/m ³)	Δw (% in peso)	Rapporto di forma (–)	Volume (cm ³)	Peso (g)	Qads (J)
80	257,6	18,4	2	9,73	2,51	1300
80	257,6	18,4	3	6,49	1,67	866
80	257,6	18,4	4	4,87	1,25	650
85	288,2	20,4	2	9,73	2,80	1613
85	288,2	20,4	3	6,49	1,87	1076
85	288,2	20,4	4	4,87	1,40	807
90	293,5	22,4	2	9,73	2,86	1805
90	293,5	22,4	3	6,49	1,90	1204
90	293,5	22,4	4	4,87	1,43	903
95	310,6	24,5	2	9,73	3,02	2082
95	310,6	24,5	3	6,49	2,01	1388
95	310,6	24,5	4	4,87	1,51	1041

Tabella 23: Calore di adsorbimento per strutture stampate in 3D a diverso contenuto di filler e geometria.

$$Q_{ads} = \Delta H \cdot W \cdot \Delta w$$

Equazione 3

Per valutare l'influenza dei parametri geometrici e delle caratteristiche del materiale composito sulla capacità di accumulo energetico della struttura, sono stati riportati nella Tabella 23 i valori di calore di adsorbimento di un solido stampato in 3D, la cui geometria complessiva corrisponde a quella descritta in precedenza. Il calore di adsorbimento, espresso in kJ, è stato calcolato utilizzando Equazione 3 considerando l'entalpia di reazione della zeolite SAPO-34 ($\Delta H = 2816,6$ kJ/kg), la massa del composito disidratato (W) e la percentuale di acqua adsorbita (Δw) in un ciclo termodinamico di riferimento. Quest'ultimo è stato definito mantenendo la stessa pressione di vapore acqueo sia in fase di adsorbimento (pressione dell'evaporatore) sia in fase di desorbimento (pressione del condensatore), pari a

11 mbar, corrispondente a una sorgente o pozzo termico esterno a 10 °C, condizione tipica di un accumulo funzionante in regime invernale. Le temperature operative considerate variavano da 30 °C in adsorbimento a 80 °C in desorbimento. Variando il contenuto di filler e il rapporto di forma, mantenendo invariata la geometria di base, sono state analizzate le capacità di adsorbimento della struttura. I risultati evidenziano una correlazione significativa tra percentuale di filler e calore di adsorbimento: un incremento del contenuto di filler dall'80% al 95% in peso comporta un aumento di circa il 60% del calore di adsorbimento, mentre una variazione del rapporto di forma da 2 a 4 determina una riduzione di circa il 50%. Questa relazione inversa tra rapporto di forma e capacità di adsorbimento è coerente con l'interpretazione teorica secondo cui rapporti di forma elevati generano un maggiore volume di vuoti interni nella struttura composita 3D, riducendo la quantità di materiale effettivamente coinvolta nell'adsorbimento delle molecole di vapore acqueo. La configurazione più performante è stata ottenuta con un composito contenente il 95% di filler e rapporto di forma pari a 2, con un calore di adsorbimento pari a 208,2 kJ. Tale valore è in buon accordo con quello atteso per la zeolite pura, per la quale, assumendo una densità apparente di 826 kg/m³ e considerando l'intero volume della cella, si ottiene un calore di adsorbimento di circa 2600 J. Questa coerenza suggerisce che, anche all'interno del composito, le proprietà intrinseche della zeolite restano predominanti nelle prestazioni complessive, confermando l'affidabilità dei risultati sperimentali. Questa configurazione implica per le molecole di vapore un percorso complesso e tortuoso all'interno del materiale, con un'influenza diretta sulle prestazioni complessive di adsorbimento. Tuttavia, il filler zeolitico può generare percorsi preferenziali per la diffusione del vapore acqueo all'interno della massa e verso i siti adsorbenti. Ciò risulta particolarmente efficace nelle strutture reticolari tridimensionali con elevato contenuto di zeolite, dove l'impaccamento fitto suggerisce un'elevata interconnessione tra particelle e la presenza di potenziali microcavità in grado di agevolare il processo diffusivo. Allo stesso tempo, poiché la matrice polimerica scelta è permeabile al vapore, la diffusione può avvenire anche attraverso il polimero, persino in zone prive di zeolite. Questo si verifica in strutture tridimensionali con basso contenuto di filler, in cui la maggiore quantità di matrice

comporta una distribuzione più dispersa del filler all'interno del volume; in tali casi, grazie alla buona permeabilità della matrice, anche le particelle di zeolite completamente inglobate e non direttamente esposte all'umidità possono partecipare ai processi di adsorbimento e desorbimento. Il fenomeno è ulteriormente favorito dalla presenza di difetti superficiali, vuoti e dalla geometria tubolare complessa, che fornisce macro-canali aggiuntivi per facilitare la diffusione del vapore acqueo. Tali considerazioni trovano conferma nei valori elevati di efficienza della zeolite inglobata (FZE) ottenuti durante le misure di adsorbimento, paragonabili a quelli della zeolite pura, a dimostrazione che il materiale composito sfrutta efficacemente la capacità adsorbente della zeolite nonostante la presenza della matrice polimerica. Questi risultati evidenziano l'efficacia di questo approccio progettuale nello sviluppo di strutture adsorbenti personalizzate. Il controllo mirato della geometria, in particolare del rapporto di forma, e della composizione del materiale, in termini di contenuto di filler, permette di realizzare componenti ottimizzati per specifici requisiti di progetto e condizioni operative. Lo sviluppo di strutture reticolari adsorbenti tridimensionali in composito SAPO-34/S-PEEK mediante manifattura additiva ha aperto nuove prospettive per il miglioramento delle prestazioni dei sistemi energetici a sorzione. Tali strutture offrono una maggiore capacità di adsorbimento e una migliore stabilità strutturale rispetto agli adsorbenti zeolitici convenzionali. Con l'avanzare delle ricerche, è prevedibile che queste strutture reticolari giocheranno un ruolo rilevante nello sviluppo di tecnologie di accumulo e conversione di energia basate sulla sorzione, caratterizzate da efficienza e sostenibilità superiori. Saranno tuttavia necessari ulteriori studi per ottimizzarne la progettazione, la fabbricazione e le prestazioni, esplorando tecniche AM avanzate, materiali zeolitici alternativi e l'influenza di differenti geometrie reticolari e condizioni operative. Grazie alla flessibilità offerta in termini di progettazione e realizzazione di reattori a sorzione, questa metodologia risulta adatta sia per sistemi a sorzione aperti sia chiusi. Come riportato in letteratura, un primo esempio di processo a sorzione in cui potrebbe essere applicata questa tecnologia è rappresentato da cicli aperti operanti a pressione ambiente, come l'accumulo termico a sorzione aperta, la raccolta di acqua dall'aria, l'essiccazione e la cattura diretta di CO₂. In tali applicazioni, una struttura 3D complessa che

occupa un ampio volume permetterebbe di massimizzare la capacità di sorzione per unità di volume e, operando a pressione ambiente, il ruolo delle resistenze al trasferimento di massa nel reattore potrebbe essere gestito tramite una progettazione mirata della porosità interna. Per rendere la tecnologia adatta anche a cicli chiusi operanti a bassa pressione, saranno necessarie analisi di simulazione più approfondite per progettare in modo adeguato sia la porosità strutturale del reticolo sia lo spessore della struttura, tenendo conto delle resistenze al trasferimento di massa che si oppongono alla diffusione del vapore acqueo. Questi aspetti costituiranno l'obiettivo di ulteriori indagini e di attività di progettazione e sperimentazione su reattori in scala di laboratorio.

3.7.2.5 Conclusioni

In questo studio è stata sviluppata una nuova struttura tridimensionale per applicazioni di trasformazione termica a sorzione, realizzata mediante tecnologia di manifattura additiva utilizzando un materiale composito adsorbente costituito da zeolite come fase attiva e poli(eter etere chetone) solfonato come matrice polimerica. La geometria reticolare è stata progettata e ottimizzata con l'obiettivo di migliorare sia la tecnica di sintesi sia la stabilità del materiale nel tempo. I risultati principali ottenuti possono essere così sintetizzati. La struttura reticolare tridimensionale interconnessa è stata realizzata senza alcuna necessità di rinforzi metallici o plastici, ottenendo un rapporto di volume vuoto pari al 66,14% e un rapporto pieno/composito pari a 2,96. Le indagini morfologiche hanno confermato l'integrità strutturale del composito: a livello macroscopico, il bordo della cella cubottaedrica appare come un tubo a parete sottile e superficie irregolare, caratterizzato da fori che agiscono come canali di collegamento tra l'esterno e l'interno; a livello microscopico, il filler di SAPO-34 risulta densamente impaccato e distribuito in modo omogeneo, con una buona adesione alla matrice termoplastica. Inoltre, le isobare di adsorbimento di vapore acqueo, determinate a 11 mbar in condizioni di equilibrio per un intervallo di temperatura compreso tra 30 e 120 °C, hanno evidenziato un'elevata capacità di adsorbimento/desorbimento: il composito ha mostrato un uptake massimo di acqua pari al 21,96% a 30 °C, in linea con il contenuto di filler. In particolare, alle basse temperature, l'indice di efficienza della zeolite inglobata è risultato pari a circa -10, corrispondente a un coinvolgimento

attivo di circa il 90% del SAPO-34 nel processo di adsorbimento. L'analisi teorica ha inoltre indicato che un incremento del contenuto di filler dall'80% al 95% in peso comporta un aumento del calore di adsorbimento del 60%, mentre un aumento del rapporto di forma da 2 a 4 provoca una riduzione di circa il 50%, a causa dell'incremento dei volumi vuoti interni che riducono la quantità di materiale effettivamente attivo nel processo. La configurazione più performante è risultata quella con il 95% di filler e rapporto di forma pari a 2, con un calore di adsorbimento pari a 208,2 kJ per la geometria selezionata. Va inoltre sottolineato che, sebbene l'analisi microscopica della superficie, particolarmente evidente nelle immagini ESEM, mostri la presenza di microfessure e vuoti, tali difetti non compromettono l'integrità strutturale del materiale; questo aspetto, comunque, sarà oggetto di ulteriori verifiche in studi futuri. Le curve di adsorbimento in equilibrio non mostrano riduzioni della capacità di adsorbimento, indicando in modo definitivo l'assenza di ostruzioni al flusso o di resistenze significative alla diffusione del vapore all'interno del materiale. Tali evidenze confermano il potenziale di questa nuova classe di materiali come valida alternativa ai letti di grani di zeolite sfusa per la realizzazione di adsorbitori. L'uso della manifattura additiva per creare strutture reticolari tridimensionali adsorbenti a base di composito SAPO-34/S-PEEK apre nuove possibilità per migliorare le prestazioni dei sistemi energetici a sorzione, con prospettive di applicazione in dispositivi di nuova generazione caratterizzati da maggiore efficienza e sostenibilità.

3.7.2.6 Sviluppi futuri

Questa prima fase esplorativa dedicata alla progettazione strutturale di compositi adsorbenti stampati in 3D fornisce una base solida per sviluppi futuri. Le prossime ricerche si concentreranno sull'analisi approfondita di parametri fondamentali quali la conducibilità termica effettiva, le resistenze al trasferimento di massa e la dinamica di sorzione, valutando in che misura la geometria specifica della struttura e il contenuto di filler influenzino questi aspetti critici, in particolare in vista della realizzazione di morfologie tridimensionali più grandi e complesse per prestazioni potenziate in condizioni operative reali. Verranno inoltre condotti studi per valutare la durabilità e la funzionalità a lungo termine dei materiali compositi, ponendo attenzione sia alla stabilità sia alla cinetica dei processi. L'ottimizzazione del design

reticolare, della fabbricazione e delle prestazioni sarà perseguita mediante l'impiego di tecniche avanzate di manifattura additiva, l'esplorazione di materiali zeolitici alternativi e l'analisi di differenti geometrie e condizioni operative in funzione del processo target. In prospettiva, sarà di interesse anche valutare l'integrazione di queste strutture in configurazioni ibride o multiscala, nonché lo sviluppo di strategie di progettazione assistita da simulazioni multifisiche per correlare i parametri costruttivi con le prestazioni termodinamiche e di trasporto, al fine di ottenere componenti ottimizzati sia per sistemi a sorzione aperti sia chiusi. Un'ulteriore evoluzione del presente studio coinvolge sia l'aspetto dei materiali impiegati che le tecnologie di produzione adottabili. Il materiale funzionale allo stoccaggio termochimico di energia, rappresentato in questo caso dalla zeolite, si presenta in forma polverulenta e necessita dell'interazione con vapore acqueo per attivare i processi di adsorbimento e desorbimento. Affinché tale interazione possa avvenire efficacemente, è necessario che il materiale ospitante sia permeabile al vapore; in tal senso, il Sulfonated Poly Ether Ether Ketone (S-PEEK) costituisce un'opzione idonea. Anche materiali siliconici rientrano in questa categoria di supporti permeabili. Pertanto, si ipotizza la possibilità di realizzare strutture geometricamente complesse mediante tecnologie di additive manufacturing basate su stereolitografia (SLA), utilizzando resine siliconiche caricate con polvere di zeolite. Questo approccio offre il vantaggio di una risoluzione di stampa estremamente elevata, che può raggiungere livelli fino a 14K, valore attualmente consolidato nei sistemi SLA di ultima generazione. Un'ulteriore prospettiva è rappresentata dall'impiego di stampanti dedicate alla lavorazione diretta del silicone, che, integrate con zeolite, consentirebbero la fabbricazione efficiente di componenti funzionali destinati allo stoccaggio termico. In aggiunta, si valuta la possibilità di sviluppare filamenti customizzati per tecnologie FDM, ottenuti combinando polveri di zeolite con polimeri permeabili al vapore. Tali filamenti permetterebbero la stampa diretta delle strutture target tramite sistemi additivi a basso costo e ampia diffusione, offrendo la possibilità di produrre componenti su larga scala, sia in termini di dimensioni che di complessità morfologica.

3.8 Manifattura additiva a supporto della deposizione uniforme nei MEA

3.8.1 Introduzione al capitolo

Il presente capitolo è dedicato allo sviluppo di metodologie innovative per la fabbricazione di Membrane Electrode Assembly (MEA) destinate agli elettrolizzatori a membrana a scambio protonico (PEMWE), dispositivi chiave per la produzione sostenibile di idrogeno verde. Dopo una panoramica sulle criticità dei metodi convenzionali di deposizione del catalizzatore, viene presentato un approccio originale basato sull'integrazione della manifattura additiva e, in particolare, di una testina di estrusione stampata in 3D, progettata per garantire maggiore uniformità, ripetibilità ed efficienza nell'applicazione dell'inchiostro catalitico. Attraverso la progettazione, la realizzazione e la validazione sperimentale del sistema, si dimostra come tale soluzione possa superare i limiti delle tecniche tradizionali, riducendo gli sprechi di materiale e aprendo la strada a processi più scalabili e industrializzabili. Il capitolo fornisce quindi un contributo significativo all'avanzamento delle tecnologie PEMWE, ponendo le basi per una più ampia diffusione dell'idrogeno come vettore energetico pulito.

3.8.2 Progettazione e realizzazione di componenti stampati in 3D per il miglioramento del processo di produzione di MEA in elettrolizzatori PEMWE¹⁰



3.8.2.1 Presentazione progetto

Nell'ambito delle attività di ricerca descritte in questa sezione, è opportuno presentare il contesto progettuale di riferimento, illustrando finalità, obiettivi e caratteristiche principali dell'iniziativa. "ProMEA" è un progetto innovativo sviluppato congiuntamente dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e dal Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Messina, finalizzato alla trasformazione dei processi produttivi dei componenti per elettrolizzatori a membrana polimerica (PEM), dispositivi comunemente impiegati per la generazione di idrogeno verde. Il progetto, avviato in data 30 novembre, è stato finanziato con un contributo pari a 236.253,00 euro nell'ambito del bando "PRIN 2022 PNRR", promosso dal Ministero dell'Università e della Ricerca. L'obiettivo principale consiste nello sviluppo di un processo automatizzato per la fabbricazione degli MEA (Membrane Electrode Assembly), che costituiscono il nucleo funzionale della tecnologia PEM. Tali componenti sono costituiti da una membrana polimerica estremamente sottile e trasparente, sulla quale vengono depositati catalizzatori attivi per le reazioni elettrochimiche. Le attuali tecnologie di produzione si basano su metodologie manuali o tecniche di spruzzatura automatica, entrambe caratterizzate da limiti significativi in termini di omogeneità di distribuzione del materiale attivo e tempi di lavorazione prolungati. Il nuovo approccio proposto si fonda sull'impiego di una testa di estrusione in grado di depositare e distribuire in modo controllato il catalizzatore direttamente sulla superficie della membrana, adottando una logica di stratificazione ispirata alla manifattura additiva, in particolare alle tecniche di stampa 3D. Questo sistema consentirà una deposizione

¹⁰ Gli studi descritti nella seguente sezione sono stati pubblicati in [96]. Per i riferimenti bibliografici completi e ulteriori approfondimenti si rimanda alla versione originale dell'articolo.

omogenea, rapida, automatizzata e facilmente scalabile. Il dosaggio del materiale catalitico sarà regolato tramite una siringa di precisione, mentre una piastra sottovuoto garantirà la stabilità dimensionale della membrana durante l'intero processo, minimizzando i fenomeni di deformazione. La piastra sarà inoltre riscaldata per migliorare l'adesione e l'interfaccia di contatto tra il catalizzatore e la membrana. Dopo la deposizione e l'asciugatura del primo strato catalitico, la membrana sarà predisposta per il successivo ciclo di applicazione. Il progetto prevede anche un'attività di caratterizzazione mirata a studiare la reologia e la viscosità degli inchiostri catalitici, l'interazione fisico-chimica tra inchiostro e membrana e le prestazioni elettrochimiche complessive dei MEA ottenuti mediante la nuova tecnica. I risultati saranno confrontati in maniera sperimentale con quelli ottenuti attraverso processi convenzionali, al fine di valutarne criticamente l'efficienza e la riproducibilità. Tra gli obiettivi attesi figurano l'ottenimento di un'efficienza di cella superiore all'80% e la validazione del processo in termini di scalabilità e industrializzabilità per la produzione su larga scala.

3.8.2.2 Abstract

L'elettrolisi dell'acqua con membrana a scambio protonico (PEMWE) rappresenta una delle tecnologie più promettenti per la produzione sostenibile di idrogeno ad alta purezza, grazie alla sua elevata efficienza, compattezza e capacità di integrarsi con fonti energetiche rinnovabili. Il cuore funzionale di questa tecnologia è l'assemblato elettrodico (MEA – Membrane Electrode Assembly), componente in cui avvengono le reazioni elettrochimiche e che risulta determinante per le prestazioni complessive dell'elettrolizzatore. Le tecniche di fabbricazione tradizionali dei MEA, come processi manuali o sistemi di spruzzatura automatica, presentano limitazioni significative in termini di uniformità della deposizione del catalizzatore, spreco di materiale, tempi di lavorazione e riproducibilità. In questo contesto, il presente lavoro esplora un approccio innovativo basato sulla manifattura additiva, con l'integrazione di una testa di estrusione 3D progettata su misura per la deposizione controllata di inchiostro catalitico su membrane polimeriche. La soluzione sviluppata impiega un sistema di dosaggio di precisione combinato con una piastra sottovuoto riscaldata, allo scopo di garantire adesione uniforme, stabilità dimensionale e riduzione delle deformazioni della membrana durante il processo.

Questa combinazione progettuale consente inoltre di ridurre l'intervento manuale dell'operatore, migliorare la ripetibilità della deposizione e ottimizzare l'impiego del materiale catalitico, minimizzando le perdite. L'attività sperimentale ha incluso fasi di caratterizzazione dell'inchiostro catalitico, prove di ottimizzazione della geometria delle cartucce di deposizione e affinamento dei parametri operativi per ottenere uno strato attivo omogeneo e privo di difetti macroscopici. I risultati preliminari evidenziano un miglioramento significativo nell'uniformità e nella regolarità dello strato catalitico rispetto ai metodi convenzionali, suggerendo la potenzialità di questa tecnologia come base per processi di fabbricazione più efficienti, scalabili e a ridotto impatto economico, con prospettive di integrazione in linee produttive semi-automatizzate o industriali.

3.8.2.3 Introduzione

Negli ultimi anni, la transizione verso un sistema energetico a basse emissioni di carbonio ha posto l'idrogeno al centro delle strategie globali per la decarbonizzazione. Grazie alla sua versatilità e alla possibilità di essere prodotto da fonti rinnovabili, l'idrogeno si configura come vettore energetico chiave in numerosi settori industriali, nei trasporti e nello stoccaggio di energia. A differenza delle fonti fossili, la produzione di idrogeno tramite elettrolisi dell'acqua non genera emissioni dirette di CO₂, consentendo l'ottenimento di un combustibile pulito quando alimentata da energia rinnovabile. Tra le diverse tecnologie di elettrolisi, quella a membrana a scambio protonico (PEMWE – Proton Exchange Membrane Water Electrolysis) si distingue per l'elevata efficienza energetica, la compattezza dell'architettura e la capacità di produrre idrogeno ad alta purezza. Inoltre, la risposta rapida alle variazioni di carico e la compatibilità con la generazione intermittente da fonti eoliche e solari la rendono particolarmente adatta a scenari di produzione distribuita e "power-to-gas". Il componente centrale di un sistema PEMWE è l'assemblato elettrodico (MEA), costituito da una membrana polimerica conduttrice di protoni – tipicamente in Nafion® – e da strati catalitici per le reazioni di evoluzione dell'idrogeno (HER) e dell'ossigeno (OER). Per massimizzare le prestazioni elettrochimiche e ridurre le perdite per trasporto di massa, è fondamentale che il catalizzatore sia distribuito in modo omogeneo e con un carico ottimizzato. La qualità e l'affidabilità del MEA dipendono quindi in

maniera diretta dal processo di fabbricazione adottato, che deve garantire ripetibilità, efficienza d'uso del materiale attivo e scalabilità industriale. Le tecniche tradizionali di deposizione del catalizzatore, quali verniciatura manuale, spray coating, doctor blade e varianti come l'ultrasonic spray o lo slot-die coating, presentano vantaggi e svantaggi specifici, ma tutte mostrano difficoltà nel bilanciare velocità di produzione, uniformità del rivestimento e riduzione degli sprechi di materiale. Nel contesto del progetto ProMEA, sviluppato congiuntamente dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e dall'Università di Messina, l'attenzione è stata rivolta alla progettazione di un sistema innovativo capace di superare queste limitazioni, integrando tecniche di manifattura additiva per la realizzazione di componenti personalizzati destinati alla deposizione controllata dell'inchiostro catalitico. L'obiettivo è migliorare l'uniformità dello strato attivo, ridurre le perdite di materiale, ottimizzare l'ergonomia e la ripetibilità del processo e velocizzare le fasi di prototipazione, ponendo le basi per una futura integrazione in processi di produzione automatizzati e su larga scala.

3.8.2.3.1 Limiti dei metodi convenzionali di fabbricazione dei MEA

La realizzazione di un MEA ad alte prestazioni richiede che gli strati catalitici siano depositati in modo uniforme sulla membrana, garantendo un'ottimale utilizzazione del materiale attivo e una riduzione delle perdite per trasporto di massa. I metodi di deposizione tradizionalmente impiegati per questo scopo presentano caratteristiche differenti, ma nessuno di essi riesce a combinare in maniera efficace velocità produttiva, omogeneità del rivestimento e minimizzazione degli sprechi di catalizzatore. Tra le tecniche comunemente adottate si annoverano l'applicazione manuale (pittura o stampa), che consente un certo grado di controllo sulla distribuzione del catalizzatore ma è fortemente dipendente dall'abilità dell'operatore e soggetta a scarsa riproducibilità, con conseguente spreco elevato di materiale e tempi di lavorazione incompatibili con la produzione su larga scala; lo spray coating, che automatizza il processo migliorando la regolarità del deposito rispetto alle metodologie manuali, ma richiede tempi lunghi e comporta perdite di materiale dovute all'overspray, con difficoltà nel mantenere costante lo spessore su tutta la superficie della membrana; la tecnica doctor blade, che offre un controllo più accurato dello spessore rispetto allo spray coating ma a scapito della velocità di

produzione e con la necessità di regolare con precisione viscosità dell'inchiostro e parametri di deposizione; e l'ultrasonic spray coating, che riduce lo spreco di materiale e migliora la distribuzione del catalizzatore ma introduce complessità impiantistica e richiede un controllo accurato dei parametri. In ambito industriale si impiegano anche tecniche come lo slot-die coating e la serigrafia: la prima garantisce produttività elevata e ottimo controllo dello spessore del rivestimento, ma spesso richiede processi di trasferimento decal per evitare problemi di deposizione diretta sulla membrana; la seconda offre buona ripetibilità su superfici estese, a patto di ottimizzare con precisione la formulazione dell'inchiostro e le caratteristiche della rete di stampa. Nonostante la diffusione di questi approcci, le criticità comuni riguardano la formazione di strati catalitici non uniformi, con possibili degradazioni localizzate delle prestazioni, aumento delle sovratensioni e riduzione dell'efficienza complessiva. Questi limiti spingono la ricerca verso soluzioni in grado di migliorare il controllo del processo, ridurre gli sprechi e offrire maggiore flessibilità nella personalizzazione delle geometrie di deposizione.

3.8.2.3.2 Innovazioni introdotte e contributo originale di questo studio

Per superare i limiti intrinseci delle tecniche di fabbricazione convenzionali, negli ultimi anni è emersa la manifattura additiva – in particolare la stampa 3D – come soluzione in grado di migliorare la qualità e l'efficienza del processo di deposizione del catalizzatore. A differenza degli approcci tradizionali, che si concentrano esclusivamente sull'ottimizzazione dei parametri di deposizione, la stampa 3D consente di intervenire anche a livello di progettazione dell'intero sistema, permettendo la realizzazione di componenti personalizzati capaci di ottimizzare il flusso produttivo in modo più ampio e strategico. Grazie alla possibilità di creare forme complesse e geometrie su misura, è possibile sviluppare sistemi di deposizione che migliorano il controllo del flusso dell'inchiostro catalitico, riducono gli sprechi di materiale e incrementano l'efficienza d'uso del catalizzatore. Questo approccio consente inoltre di integrare in maniera più efficace il processo di deposizione in contesti di produzione automatizzata e di ottimizzare parametri operativi difficilmente raggiungibili con le tecniche convenzionali. Un vantaggio rilevante della manifattura additiva risiede nella rapidità di prototipazione: attraverso iterazioni veloci, è possibile affinare sia la progettazione meccanica del

sistema di deposizione sia la formulazione dell'inchiostro catalitico, con un conseguente abbattimento di tempi e costi sperimentali. L'integrazione di testine di estrusione e piattaforme di deposizione progettate ad hoc apre inoltre la strada a una maggiore riproducibilità e scalabilità del processo. L'approccio adottato in questo lavoro mira a mitigare criticità ricorrenti, come la formazione di strati non uniformi, l'eccesso di catalizzatore in aree localizzate e la dispersione di materiale fuori dall'area utile di deposizione. Attraverso la personalizzazione del sistema di erogazione e il miglioramento dell'interazione meccanica con la membrana, si punta a ottenere rivestimenti più omogenei, tempi di lavorazione ridotti e costi produttivi più contenuti. Sebbene il metodo proposto sia ancora in fase di sviluppo, i risultati preliminari ne evidenziano il potenziale come piattaforma flessibile e adattabile sia alla produzione in piccola scala sia alla prototipazione rapida. In prospettiva, ulteriori ottimizzazioni potrebbero consentire l'integrazione in flussi di produzione semi-automatizzati o continui, contribuendo a ridurre il divario tra le attività di ricerca in laboratorio e le esigenze della produzione industriale.

3.8.2.3.3 Obiettivi dello studio

Il presente lavoro si propone di integrare tecnologie di manifattura additiva all'interno del processo di produzione dei MEA, sviluppando in particolare una nuova testa di estrusione dedicata alla deposizione dell'inchiostro catalitico. La soluzione progettata combina un sistema di dosaggio a controllo di precisione con una piastra sottovuoto riscaldata, al fine di garantire un'adesione ottimale del catalizzatore alla membrana e una distribuzione uniforme dello strato attivo. L'attività di ricerca ha previsto la progettazione e realizzazione di un sistema di deposizione personalizzato, ottenuto mediante stampa 3D e dotato di cartucce intercambiabili, e l'ottimizzazione dei parametri di processo come portata dell'inchiostro, velocità di movimento della testina e temperatura di lavoro, con l'obiettivo di ridurre fenomeni di deformazione della membrana e migliorare la ripetibilità della deposizione. È stata condotta una valutazione comparativa tra le prestazioni del nuovo sistema e quelle ottenute con tecniche convenzionali, considerando uniformità, omogeneità e aderenza dello strato catalitico, e sono state elaborate linee guida per la futura integrazione in processi semi-automatizzati o di produzione continua, in vista di una scalabilità industriale. L'analisi comparativa e

la validazione sperimentale mirano a fornire un contributo concreto allo sviluppo di metodologie di fabbricazione dei MEA più efficienti, scalabili e a ridotto impatto economico, supportando l'evoluzione delle tecnologie PEMWE per la produzione di idrogeno verde.

3.8.2.4 Materiali e metodi

L'attività sperimentale sviluppata nell'ambito di questo lavoro ha previsto la progettazione, la realizzazione e il collaudo di un sistema di deposizione innovativo, concepito per ottimizzare il processo di fabbricazione dei MEA destinati a elettrolizzatori PEMWE. Il fulcro dell'innovazione è costituito da una testa di estrusione realizzata mediante tecniche di manifattura additiva, integrata in un apparato di laminazione modificato per accoglierla e per consentire un controllo preciso dei parametri operativi. Questa configurazione ha permesso di condurre prove comparative con metodologie convenzionali e di valutare le prestazioni della nuova soluzione in termini di uniformità, ripetibilità e affidabilità del processo.

3.8.2.4.1 Configurazione sperimentale

Il sistema sperimentale è stato incentrato sulla progettazione, costruzione e validazione di una testa di estrusione prodotta tramite stampa 3D, destinata alla deposizione controllata di inchiostro catalitico su membrane Nafion® per applicazioni in elettrolizzatori PEMWE. L'intero apparato è stato sviluppato per incrementare la precisione e la ripetibilità della fase di rivestimento, affrontando le criticità tipiche delle tecniche convenzionali. Come base di partenza è stato utilizzato un laminatore modello MTI Corporation MSK-AFA-I, fornito dal CNR-ITAE, originariamente concepito come coater a nastro automatico per la produzione di film a spessore controllato tramite applicatori regolabili o fissi. La macchina è dotata di un piano sottovuoto integrato per il fissaggio del substrato, elemento essenziale per garantire la stabilità durante la deposizione.

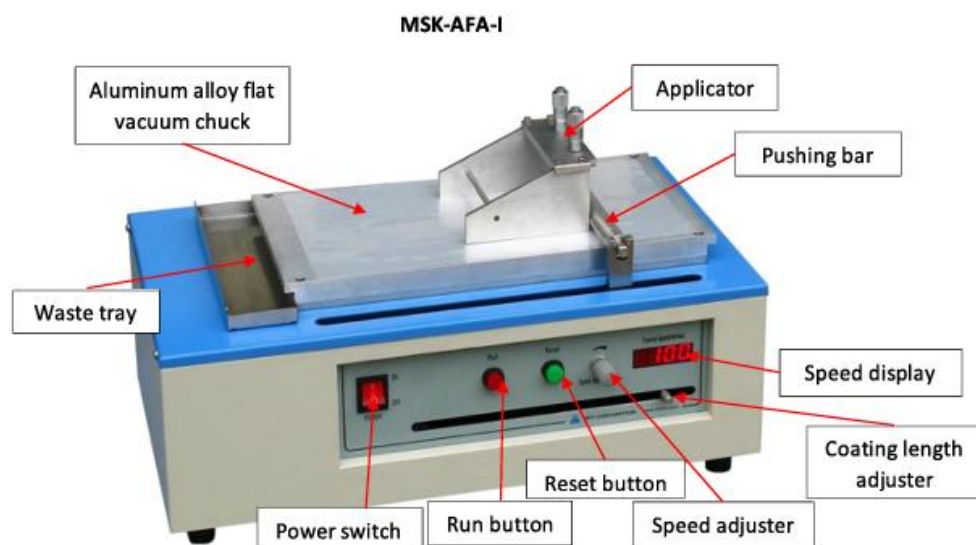


Figura 193: Apparato di laminazione MTI Corporation MSK-AFA-I.

È stata effettuata un'attività di reverse engineering meccanico ed elettronico per integrare in maniera ottimale la nuova testa, mantenendo la possibilità di regolare con precisione i parametri di processo e assicurando un allineamento accurato con la superficie della membrana. La testa di estrusione, sviluppata appositamente per questo studio, è stata montata in sostituzione dell'applicatore originale, consentendo di testare diverse configurazioni geometriche e impostazioni di flusso per raggiungere una deposizione uniforme, stabile e priva di difetti macroscopici. La manifattura additiva ha permesso di realizzare prototipi iterativi e introdurre modifiche progettuali rapide, migliorando progressivamente la precisione della deposizione e l'adattamento del sistema alla membrana polimerica.

3.8.2.4.2 Progettazione e realizzazione della testa di deposizione stampata in 3D
 In una fase iniziale dello sviluppo, la testa di estrusione era costituita da una semplice zona di raccolta nella quale l'inchiostro catalitico veniva versato e lasciato colare per gravità sulla membrana.

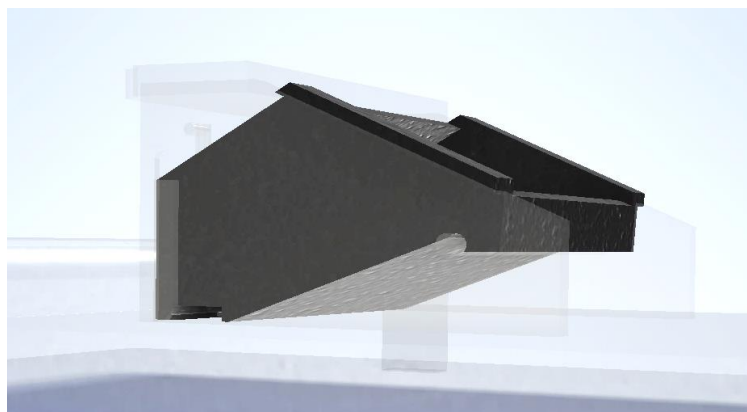


Figura 194: Primo prototipo di testa di estrusione (rendering).

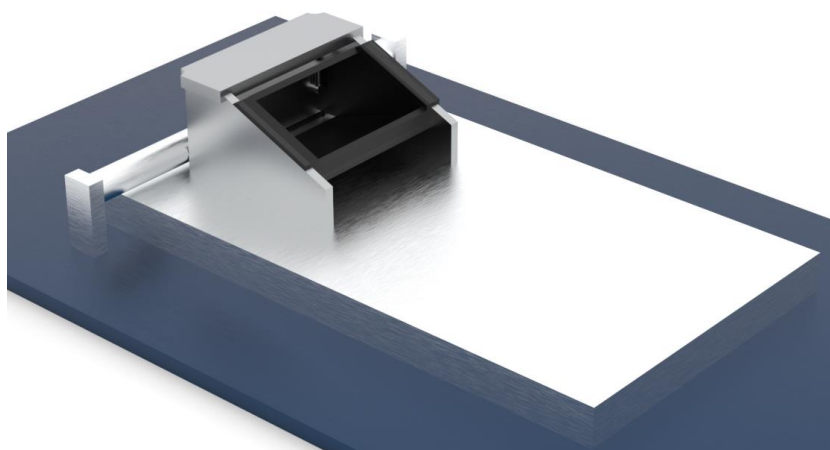


Figura 195: Gemello digitale del laminatore provvisto di primo prototipo di testa (rendering fotorealistico).

Questa soluzione, pur consentendo una deposizione di base, ha evidenziato limiti significativi in termini di uniformità e controllo dello spessore, portando alla realizzazione di un secondo prototipo più evoluto. In quest'ultimo, l'inchiostro viene alloggiato in una siringa e spinto forzatamente attraverso cartucce intercambiabili, progettate con geometrie differenti al fine di individuare la configurazione più idonea a garantire una distribuzione ottimale del materiale attivo. Nel secondo prototipo, oggetto degli studi a seguire, la testa di deposizione sviluppata è costituita da un telaio principale e da cartucce intercambiabili, soluzione che consente modifiche rapide alle geometrie di erogazione e facilita il confronto sperimentale tra configurazioni diverse. Il telaio, realizzato in PLA tramite tecnologia di stampa Fused Deposition Modeling (FDM), è stato progettato

con software CAD per assicurare robustezza strutturale, compatibilità con il laminatore e precisione di allineamento rispetto al substrato.

deposizione del catalizzatore omogenea e ripetibile.

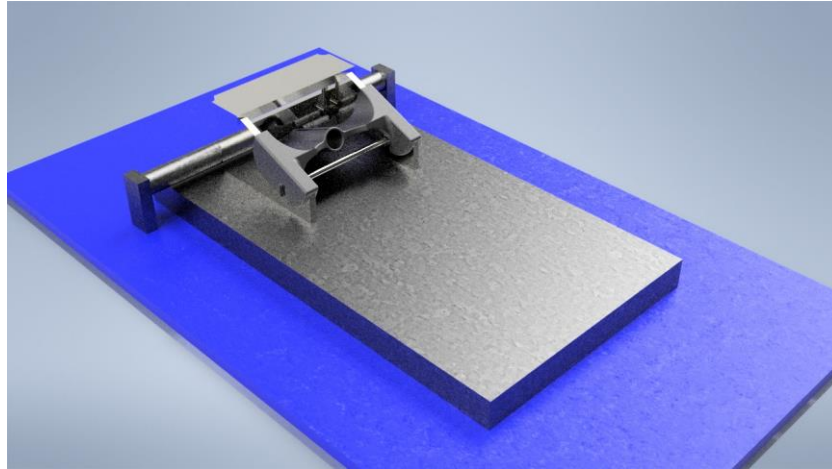


Figura 196: Rendering del gemello digitale del laminatore provvisto di testa di deposizione.

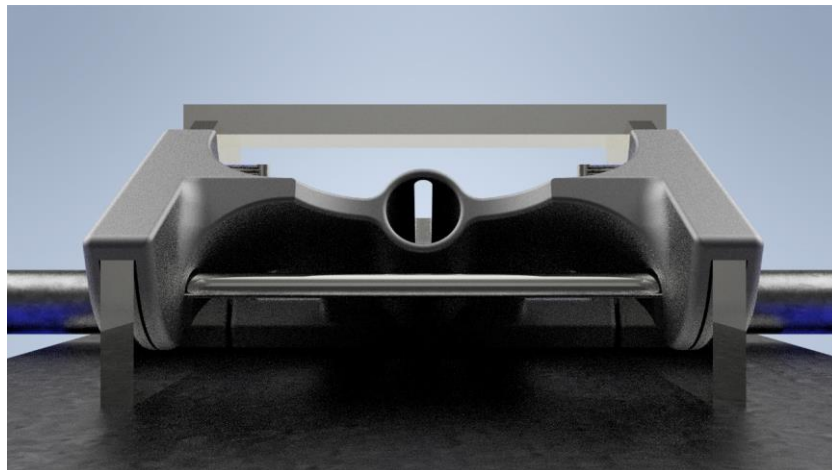


Figura 197: Testa di deposizione, vista frontale (rendering).

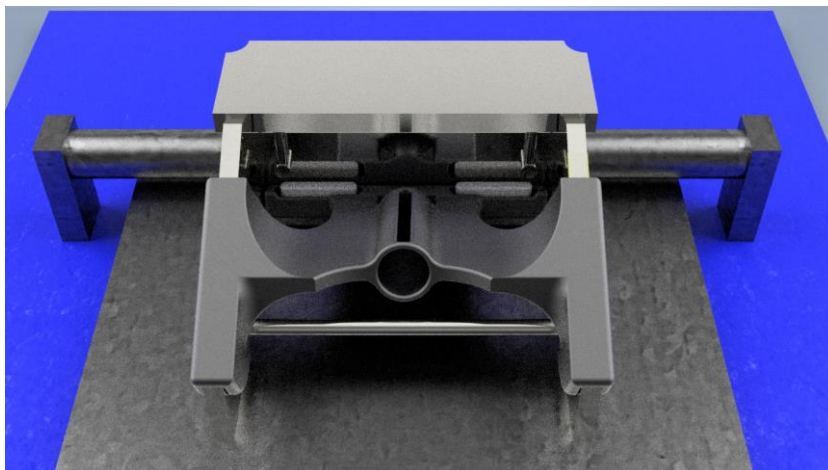


Figura 198: Testa di deposizione, vista superiore (rendering).

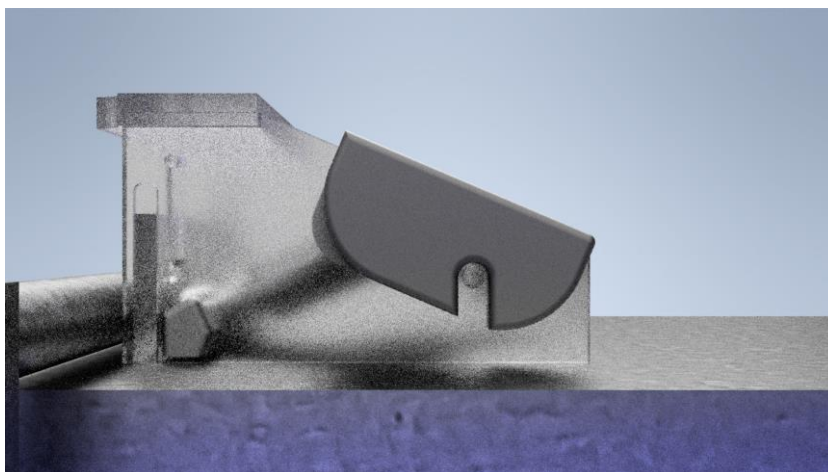


Figura 199: Testa di deposizione, vista laterale (rendering trasparente).

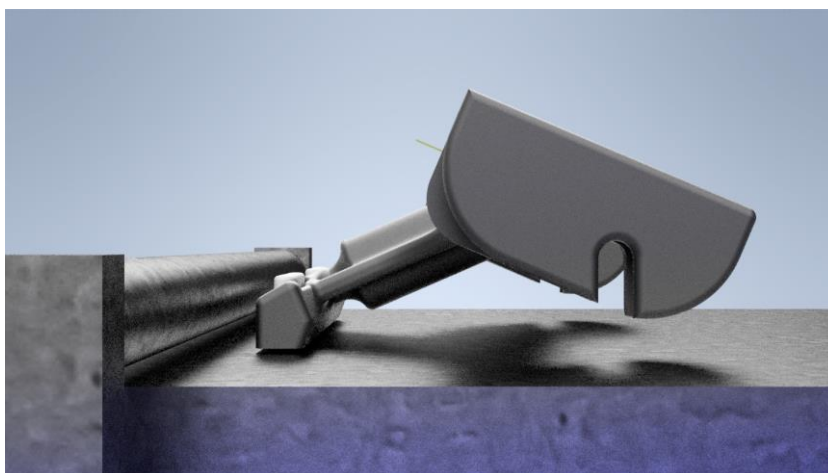


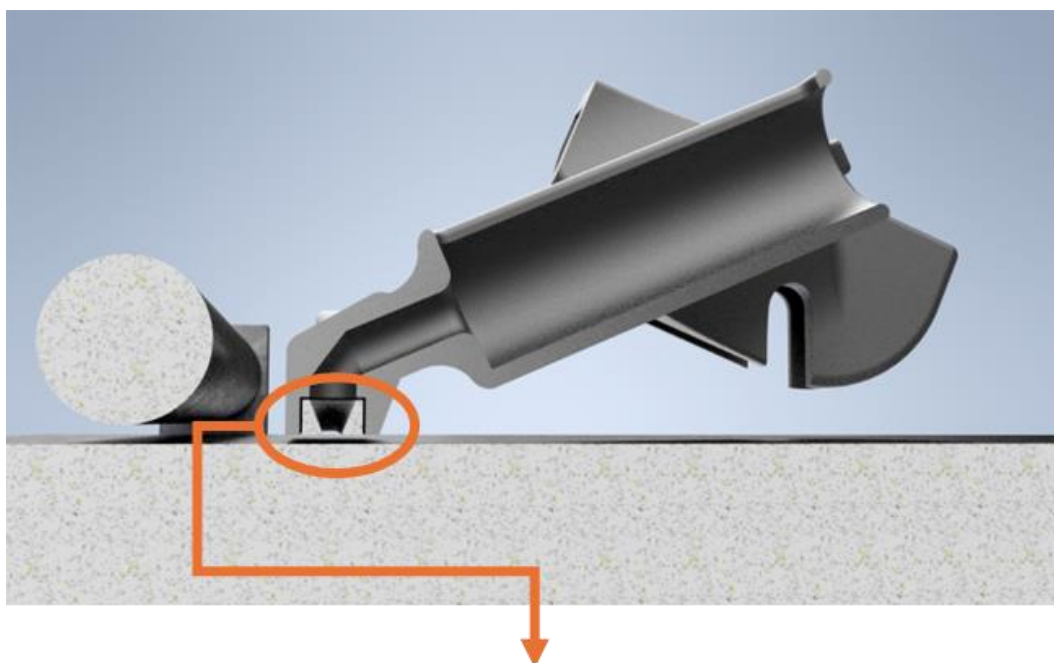
Figura 200: Testa di deposizione isolata, vista laterale (rendering).

All'interno del telaio è collocata una siringa collegata a una pompa peristaltica, che garantisce un'alimentazione regolare dell'inchiostro catalitico e un controllo

accurato della portata. Le cartucce, anch'esse in PLA, sono state prodotte in varianti con lame di ampiezza pari a 0,5 mm, 1,0 mm e 1,5 mm, per valutare l'influenza della larghezza dell'elemento spalmante sulla qualità e l'uniformità del rivestimento.



Figura 201: Diverse configurazioni di cartucce (rendering)



Vista in sezione della “cartuccia” inserita nel sistema aggiuntivo creato tramite tecniche di additive.

Figura 202: Sezione testa di deposizione (telaio con cartuccia-rendering).

Ogni cartuccia è stata dotata di canali di flusso progettati per garantire una distribuzione omogenea dell'inchiostro, riducendo accumuli e discontinuità. La produzione delle componenti è avvenuta utilizzando una stampante Bambu Lab X1 - Carbon con ugello Volcano, impostata a 190 °C per l'estrusione e 60 °C per il piano di stampa, parametri scelti per assicurare una buona adesione tra i layer e stabilità dimensionale.

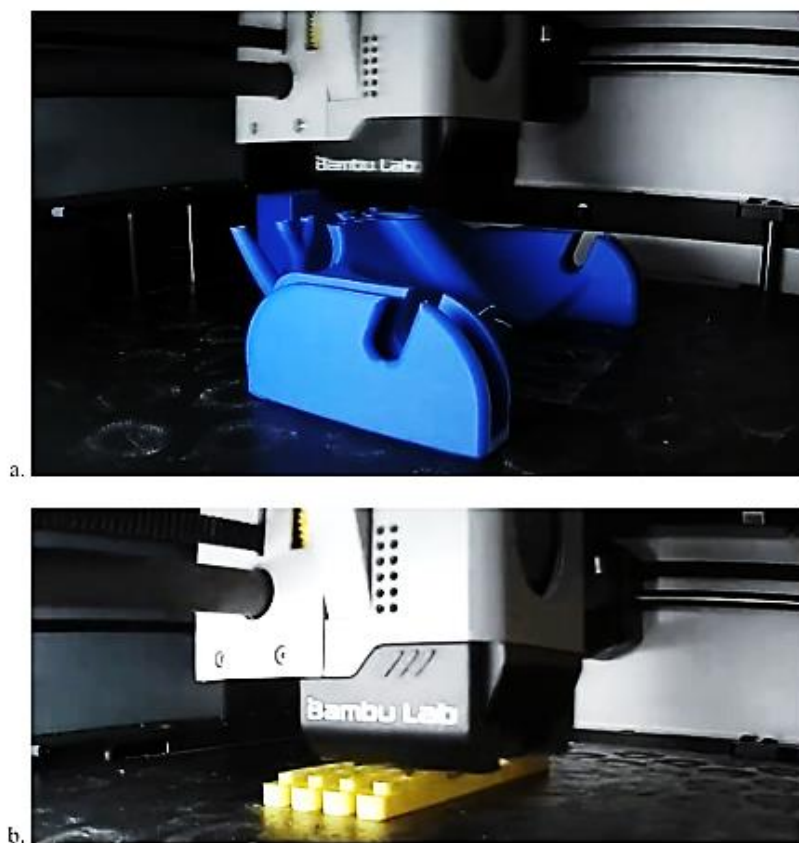


Figura 203: Fasi di realizzazione dei due componenti principali: a) telaio prodotto mediante stampa 3D; b) cartucce intercambiabili.

La scelta del PLA è stata dettata dalla sua facilità di lavorazione, dalla resistenza meccanica adeguata alle sollecitazioni previste e dalla sua natura biodegradabile, contribuendo alla sostenibilità complessiva del processo. La modularità del sistema ha permesso di ridurre i tempi di test, introdurre rapidamente modifiche progettuali e ottimizzare in modo mirato le prestazioni senza dover ricostruire l'intera struttura.

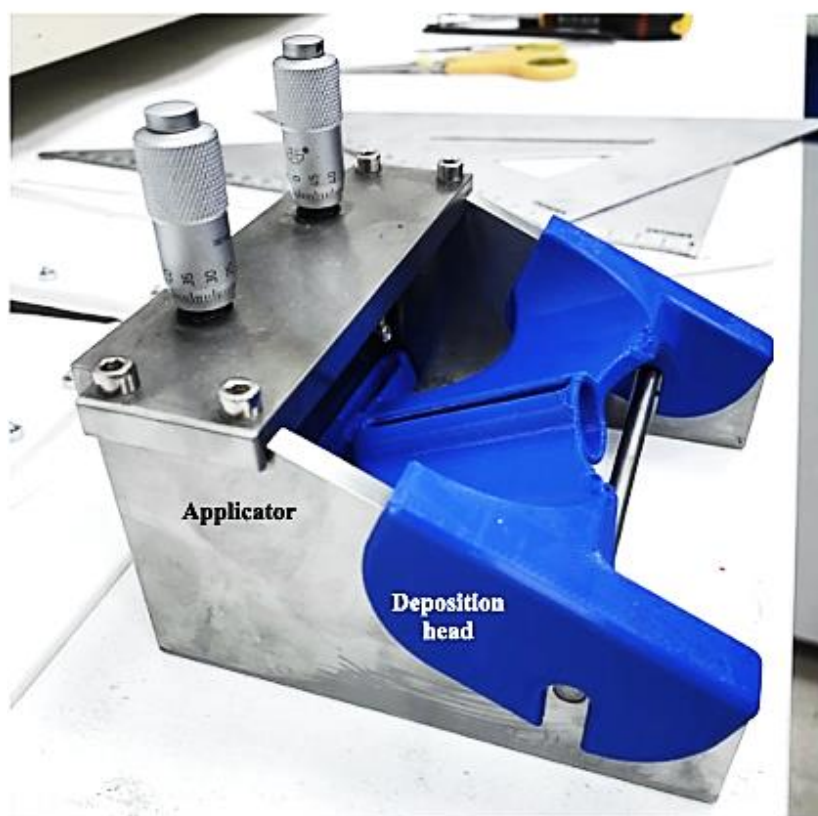


Figura 204: Testa di deposizione appena installata sull'applicatore, progettata per garantire un allineamento preciso e una deposizione del catalizzatore stabile e uniforme.

3.8.2.4.3 Ottimizzazione del processo

Le prime prove sperimentali hanno evidenziato criticità legate alla tenuta idraulica del sistema e alla stabilità della membrana durante la deposizione. In particolare, sono state rilevate perdite di inchiostro in corrispondenza del collegamento tra la siringa di alimentazione e la cartuccia di distribuzione, con effetti negativi sulla regolarità del flusso e sulla quantità di materiale utilizzato.

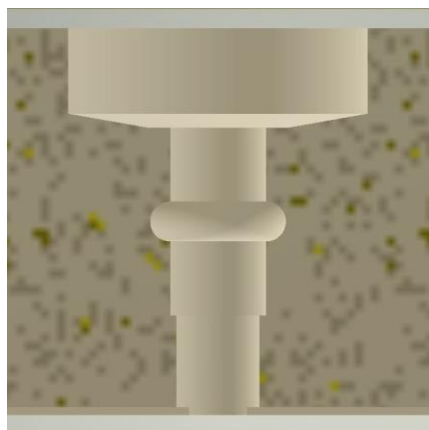


Figura 205: Sezione del canale di inserimento fra cartuccia e siringa con sede per o-ring

Per ovviare a ciò, sono stati introdotti sistemi di tenuta migliorati, come guarnizioni aggiuntive e meccanismi di serraggio ottimizzati, che hanno incrementato l'efficacia dell'accoppiamento e ridotto le perdite. Un'ulteriore criticità ha riguardato la deformazione del substrato in Nafion®, dovuta a lievi movimenti durante l'asciugatura, soprattutto ai bordi. Nonostante l'uso del piano sottovuoto riscaldato avesse già contribuito a stabilizzare la membrana, si è ritenuto necessario introdurre supporti periferici supplementari per mantenere costante la tensione del film durante l'intero processo. Questi interventi hanno permesso di ottenere un fissaggio più stabile e di ridurre le irregolarità superficiali, migliorando la continuità del rivestimento. Le prove successive hanno mostrato un progresso significativo rispetto alla configurazione iniziale, anche se sono emersi ulteriori margini di miglioramento nella distribuzione dell'inchiostro e nell'eliminazione totale delle micro-perdite. L'esperienza maturata ha fornito indicazioni utili per l'affinamento dei parametri operativi e per le fasi successive di sviluppo.

3.8.2.5 Risultati e discussione

3.8.2.5.1 Ottimizzazione della composizione dell'inchiostro e processo di deposizione del catalizzatore

La fase di ottimizzazione ha previsto un'analisi approfondita di diverse formulazioni di inchiostro catalitico, con l'obiettivo di individuare una composizione capace di garantire una deposizione omogenea, stabile e con la densità superficiale desiderata per ottenere prestazioni elettrochimiche ottimali. Nei test iniziali, la concentrazione del polimero Aquivion è stata mantenuta costante al

25%, mentre si è variato il rapporto tra il contenuto di carbon black e la quantità di solvente, al fine di comprendere l'influenza della viscosità e della fluidità sulla fase di estrusione e distribuzione dell'inchiostro. I dati sperimentali hanno mostrato che spessori di deposizione maggiori, come 700 μm , portano a una densità superficiale più elevata rispetto a spessori ridotti di 500 μm , per via di un volume maggiore di inchiostro rilasciato per unità di superficie. Tuttavia, strati più sottili si sono dimostrati più facili da controllare e in grado di garantire una maggiore uniformità, pur richiedendo passaggi multipli per raggiungere il carico catalitico target.

	Spreading thickness 500 μm						Spreading thickness 700 μm					
	CB10	CB09	CB08	CB07	CB06	CB11	CB05	CB04	CB03	CB02	CB01	CB12
Carbon Black [g]	0.0215	0.0400	0.0633	0.0852	0.1030	0.1082	0.0232	0.0452	0.0600	0.0827	0.1072	0.1013
Aquivion [μL]	125	250	400	500	625	625	125	250	400	500	625	625
Isopropanol [μL]	575	450	300	200	75	75	575	450	300	200	75	75
Surface deposition [mg/cm^2]	0.0601	0.1374	0.1845	0.2668	0.5427	0.6285	0.0477	0.1006	0.1544	0.2528	0.7924	0.6731
Yield [%]	39.94%	42.94%	36.44%	39.14%	65.86%	65.35%	35.97%	38.94%	40.52%	38.20%	66.53%	74.76%
Aquivion in deposition [%]	23.34%	24.66%	24.87%	23.51%	24.12%	23.23%	22.01%	22.46%	25.88%	24.05%	23.39%	24.42%

Figura 206: Prova di stesura effettuata variando lo spessore.

La formulazione identificata come più performante, denominata CB06, ha permesso di ottenere una densità di 0,5 mg/cm^2 su un'area utile di 50 cm^2 , con un equilibrio tra capacità di spandimento e omogeneità della distribuzione. Per isolare gli effetti della composizione dell'inchiostro da quelli derivanti dall'interazione con la membrana, le prove iniziali sono state condotte su fogli di alluminio, supporto che ha consentito un'analisi gravimetrica più accurata della quantità di materiale depositato.

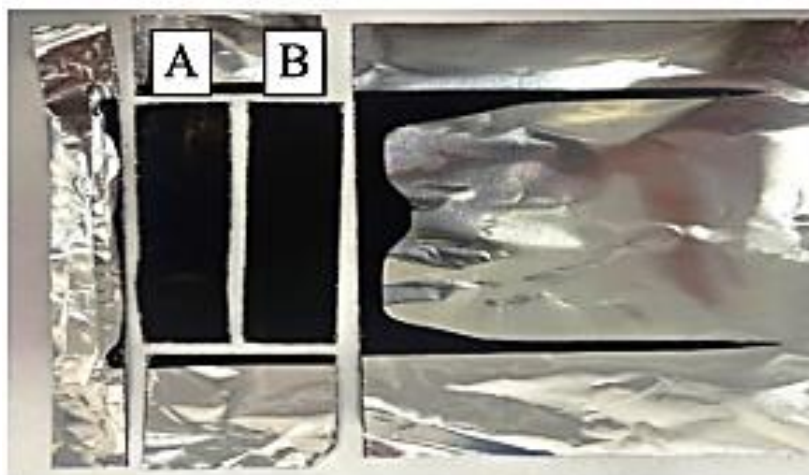


Figura 207: Campione CB06.

Una volta validata la formulazione CB06, i test sono stati estesi a membrane Nafion® 117, valutando adesione, deformazione e comportamento durante la fase di asciugatura. È stato osservato che l'umidità residua nella membrana incide in maniera determinante sulla stabilità dimensionale, rendendo necessario un pretrattamento di asciugatura e un fissaggio in trazione durante il processo di stesura. Per risolvere il problema delle ondulazioni, è stata impiegata una cornice in teflon capace di mantenere la membrana in tensione per l'intera durata della deposizione e dell'essiccazione. Questo dispositivo ha permesso anche di ridurre la quantità di isopropanolo nella miscela e di migliorare la stendibilità dell'inchiostro, favorendo un'essiccazione più controllata e minimizzando la deformazione del supporto polimerico. Nel complesso, questa fase ha fornito indicazioni precise per il controllo dei parametri di formulazione e deposizione, fondamentali per garantire la qualità e la ripetibilità del processo produttivo dei MEA.

3.8.2.5.2 Distribuzione del catalizzatore e confronto tra configurazioni di deposizione

Le prove comparative hanno messo in evidenza differenze marcate nella distribuzione del catalizzatore a seconda della configurazione di deposizione utilizzata. La configurazione originaria, priva della nuova testa stampata in 3D, prevedeva il rilascio dell'inchiostro al momento del contatto con il substrato, con una distribuzione affidata al successivo movimento dell'applicatore. Questo comportava un eccesso di materiale nella zona iniziale e una diffusione non

controllata lungo la superficie rivestita, determinando variazioni di spessore e riducendo l'uniformità complessiva dello strato.

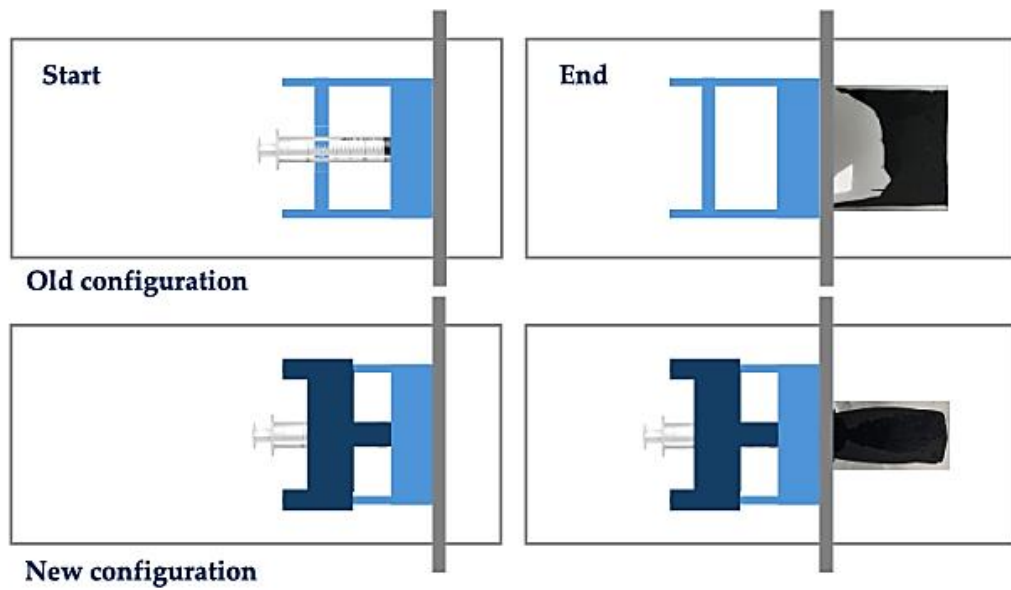


Figura 208: Confronto tra la configurazione originale della testa di deposizione (in alto) e la nuova testa stampata in 3D (in basso).

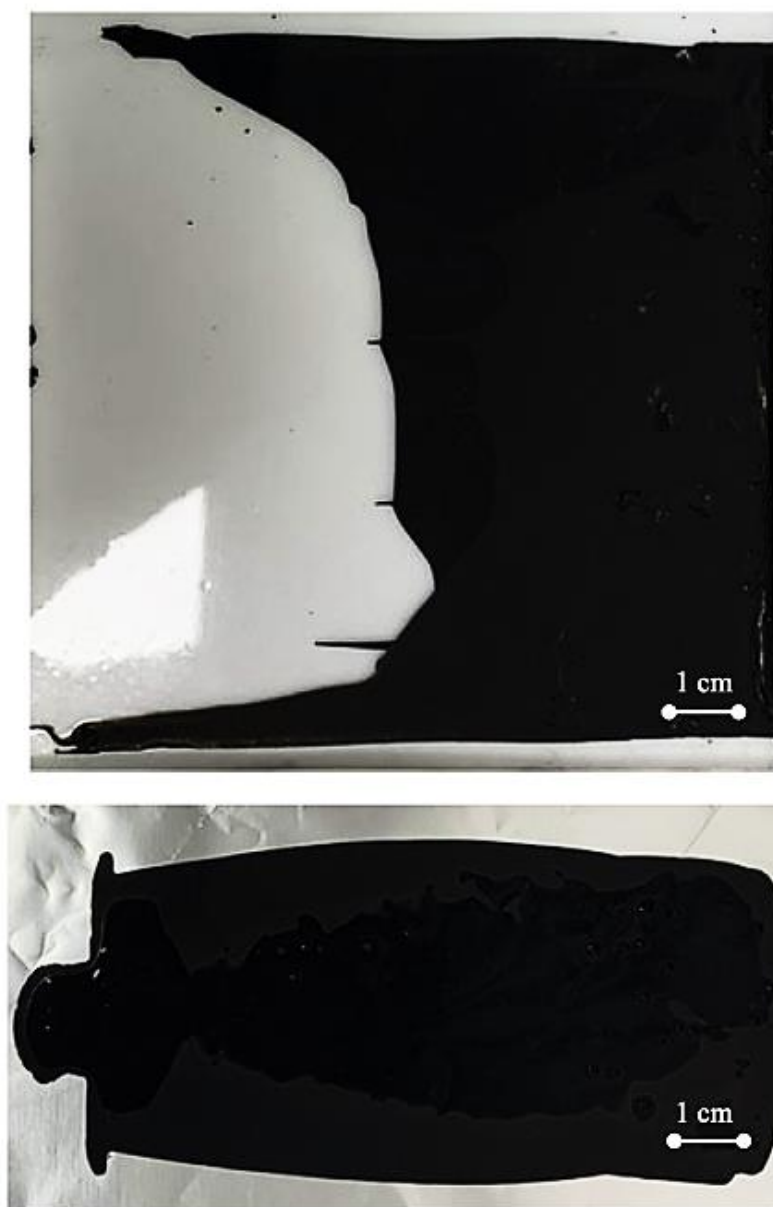


Figura 209: Deposizione di inchiostro con due metodi differenti: senza la nuova testa (sopra); con la nuova testa di deposizione (sotto).

L'adozione della nuova testa con cartucce intercambiabili ha modificato in modo sostanziale questo comportamento: la distribuzione dell'inchiostro avviene progressivamente durante lo spostamento della testina, permettendo un controllo più accurato dello spessore e una riduzione degli eccessi localizzati. La geometria ottimizzata delle cartucce, con canali di flusso studiati per evitare accumuli e dispersioni ai bordi, ha contribuito a minimizzare fenomeni di overspray e a migliorare l'efficienza nell'uso del catalizzatore. Le analisi visive e fotografiche delle membrane trattate hanno confermato un netto miglioramento dell'omogeneità

del rivestimento, con implicazioni positive sul rendimento elettrochimico e sulla riproducibilità del processo. L'incremento di uniformità ottenuto dimostra come la personalizzazione del sistema di deposizione tramite manifattura additiva sia una strategia efficace per migliorare la qualità del prodotto finale e ridurre i costi legati allo spreco di materiale.

3.8.2.5.3 Ottimizzazione della tenuta dell'inchiostro e stabilizzazione della membrana

Il miglioramento prestazionale ottenuto con la nuova testa non è attribuibile unicamente alla geometria delle cartucce, ma anche agli interventi mirati per potenziare la tenuta idraulica e la stabilità della membrana. Nelle prime prove si erano verificate perdite in corrispondenza della giunzione tra serbatoio e ugello di estrusione, con irregolarità nella distribuzione e sprechi di inchiostro. Per eliminare questa criticità, è stata introdotta una guarnizione O-ring rinforzata, è stata aumentata la forza di serraggio tra cartuccia e testina e sono stati regolati i parametri di viscosità dell'inchiostro tramite un'ottimizzazione del contenuto di solvente. Sul fronte della stabilizzazione del substrato, sono state apportate modifiche al piano sottovuoto riscaldato: incremento dell'efficienza di aspirazione, ridistribuzione dei fori di aspirazione per eliminare deformazioni localizzate e ottimizzazione della temperatura per favorire adesione e asciugatura controllata. Questi interventi hanno prodotto uno strato catalitico più uniforme e privo di difetti visibili, incrementando l'affidabilità complessiva del processo e creando i presupposti per una produzione di qualità su scala industriale.

3.8.2.5.4 Influenza della larghezza della lama delle cartucce sulla distribuzione del catalizzatore

Per valutare l'impatto della geometria di erogazione sulla qualità del rivestimento, sono stati eseguiti test utilizzando cartucce con lame di larghezza pari a 0,5 mm, 1,0 mm e 1,5 mm.



Figura 210: Deposizione di inchiostro con cartucce dotate di lame di diversa larghezza: a) 1,5 mm; b) 1,0 mm; c) 0,5 mm.

La larghezza della lama influisce direttamente sul profilo di distribuzione dell'inchiostro, regolando la quantità di materiale rilasciata e l'area di copertura. Lame strette come quella da 0,5 mm permettono una deposizione più precisa e localizzata, ideale per configurazioni che richiedono un'elevata definizione del rivestimento o una distribuzione selettiva del catalizzatore, sebbene possano richiedere più passaggi per raggiungere il carico desiderato. Lame larghe come quella da 1,5 mm consentono di coprire superfici più ampie in un unico passaggio, aumentando la produttività ma rendendo più difficile il controllo dei bordi e

contenere eventuali sbordamenti. La configurazione intermedia da 1,0 mm ha rappresentato un compromesso efficace, offrendo una copertura uniforme con ridotti difetti marginali e mantenendo un buon equilibrio tra precisione e produttività. Sono state comunque osservate leggere irregolarità lungo i bordi, suggerendo la necessità di ottimizzare ulteriormente parametri come velocità di avanzamento della testina, viscosità dell'inchiostro e pressione di contatto, al fine di massimizzare l'uniformità e la riproducibilità della deposizione.

3.8.2.5.5 Criticità residue e prospettive di miglioramento

Nonostante i progressi raggiunti, il sistema presenta ancora alcune criticità che dovranno essere affrontate per garantirne piena affidabilità e scalabilità. La tenuta idraulica, pur migliorata con guarnizioni e accorgimenti meccanici, necessita di ulteriori perfezionamenti per eliminare completamente micro-perdite e mantenere costante il flusso anche in condizioni di utilizzo prolungato. Persistono leggere irregolarità ai bordi delle aree rivestite, che suggeriscono un affinamento del disegno delle cartucce e dei parametri operativi. Il sistema di stabilizzazione della membrana, sebbene garantisca una buona planarità, potrebbe beneficiare di un'ulteriore ottimizzazione della distribuzione del vuoto sul piano di supporto per ridurre ogni deformazione residua, in particolare nelle zone periferiche. Le attività future si concentreranno su questi aspetti con l'obiettivo di rendere il processo di deposizione più robusto, ripetibile e compatibile con un contesto produttivo industriale. Sarà inoltre fondamentale integrare test elettrochimici per valutare l'effettivo impatto delle migliorie sulle prestazioni operative dei MEA e consolidare la validità del metodo proposto.

3.8.2.5.6 Impatto potenziale del nuovo metodo sulle prestazioni dei MEA

Sebbene non siano ancora disponibili dati di caratterizzazione elettrochimica sui MEA prodotti con il nuovo sistema, le analisi fisiche hanno evidenziato una distribuzione del catalizzatore più uniforme e omogenea rispetto ai metodi convenzionali, fattore determinante per garantire un'attività catalitica costante sull'intera superficie e ridurre la variabilità tra lotti. Una deposizione regolare contribuisce inoltre a minimizzare le perdite per trasporto di massa e a mantenere basse le resistenze locali, con possibili benefici sull'efficienza complessiva della cella. Per confermare questi vantaggi sarà necessario realizzare e testare MEA

completi in condizioni operative, così da verificare se i miglioramenti strutturali si traducano in incrementi misurabili di prestazioni e durabilità. Il raggiungimento di tali risultati costituirebbe un passo importante verso la validazione del nuovo approccio e la sua adozione in processi industriali di produzione su larga scala.

3.8.2.6 Conclusioni

Il lavoro svolto ha portato allo sviluppo di un approccio innovativo per la deposizione dell'inchiostro catalitico nei processi di fabbricazione dei MEA per elettrolizzatori PEMWE, basato sull'impiego di una testa di estrusione stampata in 3D e dotata di cartucce intercambiabili. L'integrazione di soluzioni progettuali mirate sia alla meccanica sia alla gestione del flusso dell'inchiostro ha consentito di ottenere un'applicazione più controllata e uniforme del catalizzatore, affrontando problematiche comuni come le perdite di materiale e l'instabilità della membrana durante il processo. Le prove condotte hanno messo in evidenza un miglioramento significativo nella regolarità dello strato attivo e nella precisione della deposizione rispetto alle configurazioni tradizionali, confermando la validità della personalizzazione del sistema tramite manifattura additiva. Pur non essendo ancora concepito come sostituto dei metodi industriali consolidati, questo approccio si propone come piattaforma flessibile e adattabile, ideale per attività di prototipazione rapida, valutazione di formulazioni e sviluppo preliminare di processi. I risultati ottenuti indicano che, con ulteriori ottimizzazioni e l'integrazione di test elettrochimici, questa tecnologia potrebbe rappresentare un collegamento efficace tra le esigenze di ricerca in laboratorio e i requisiti di produzione su scala industriale, contribuendo all'evoluzione di processi più efficienti, scalabili e sostenibili per la realizzazione dei MEA.

3.8.3 Sviluppo di un sistema di fissaggio per la stabilizzazione del Nafion® durante il processo di deposizione

3.8.3.1 Abstract

Uno degli aspetti critici emersi nello studio riguarda la necessità di mantenere il film di Nafion® perfettamente planare durante le fasi di trattamento e deposizione, al fine di evitare difetti che possano compromettere l'uniformità dello strato catalitico. Per rispondere a questa esigenza, è stato avviato lo sviluppo di un sistema di fissaggio dedicato.

3.8.3.2 Introduzione

Durante il trattamento, il film di NAFION® è sottoposto a un'immersione in soluzione alcolica seguita da un'asciugatura controllata, procedimento che tende a generare deformazioni superficiali, quali increspature e onde, che compromettono la planarità del supporto. Tali irregolarità rappresentano una criticità produttiva, in quanto interferiscono con l'uniformità della deposizione e con la qualità del prodotto finale. Al fine di mitigare questi effetti indesiderati, in collaborazione con il gruppo di ricerca del CNR-ITAE è stata avviata la progettazione di un sistema meccanico di contenimento capace di mantenere il substrato polimerico in condizioni di planarità durante l'intera fase di attivazione. La soluzione individuata ha previsto la realizzazione di una cornice di fissaggio in teflon, appositamente studiata per garantire l'adesione periferica del foglio di NAFION® senza comprometterne l'integrità superficiale. Tale dispositivo si è dimostrato efficace nel contenere le deformazioni, semplice da utilizzare in fase di montaggio e compatibile con il processo di deposizione mediante tecnica doctor blade, contribuendo a migliorare la ripetibilità e la qualità del rivestimento catalitico.



Figura 211: Elemento di fissaggio Nafion ® prodotto dal gruppo CNR-ITAE

3.8.3.3 Materiali e metodi

Sulla base delle prove sperimentali condotte, è stato sviluppato un modello tridimensionale completo del sistema di deposizione Doctor Blade, comprendente anche un elemento funzionale progettato per replicare in modo coerente le condizioni operative sperimentate dal gruppo del CNR, ma con caratteristiche che ne facilitino la riproducibilità e l'impiego in ambito progettuale. Tale elemento è stato concepito come riferimento tecnico per l'ottimizzazione del processo e come base di partenza per lo sviluppo di soluzioni migliorative future, consentendo una standardizzazione della geometria e dei vincoli funzionali utile alla successiva evoluzione del sistema di deposizione.

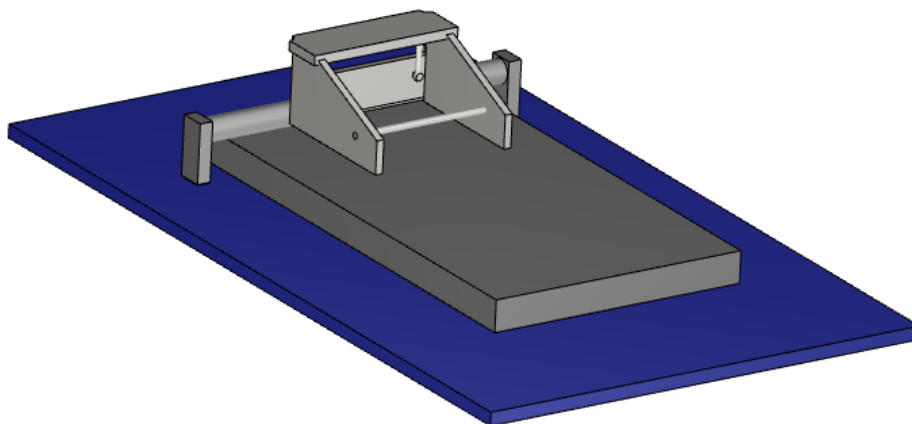


Figura 212: Modello 3d del sistema (“doctor blade”)

A partire dal modello digitale sviluppato, è stata replicata all’interno dell’ambiente CAD la cornice progettata dal gruppo del CNR-ITAE e integrata nel sistema completo, con l’obiettivo di analizzarne criticamente la funzionalità e valutarne l’eventuale evoluzione progettuale.

3.8.3.4 Conclusioni

L’impiego del gemello digitale ha consentito di simulare e verificare diversi aspetti legati al sistema di fissaggio, tra cui l’integrazione di cerniere di chiusura, meccanismi di aggancio a scatto e dettagli costruttivi finalizzati al miglioramento dell’ergonomia e dell’efficacia operativa. Ogni scelta progettuale è stata condivisa e discussa con il gruppo di lavoro in un’ottica di co-progettazione progressiva. Al fine di adottare un approccio incrementale orientato al miglioramento funzionale per successivi affinamenti, si è deciso di procedere inizialmente con una configurazione operativa sostanzialmente equivalente a quella proposta dal CNR-ITAE, introducendo eventuali modifiche solo a valle della validazione sperimentale del primo prototipo. La possibilità di produrre numerose varianti tramite tecnologie di stampa 3D rende tale approccio particolarmente efficace, poiché consente di isolare e analizzare con precisione l’impatto di ogni singola scelta progettuale. La prima modifica introdotta rispetto alla versione prototipale iniziale consiste nell’aggiunta di un fermo con zigrinature progressive, concepito per semplificare e rendere più efficace l’operazione di bloccaggio del foglio polimerico. Altre

modifiche, di carattere più contenuto, includono l'incasso delle teste dei bulloni all'interno della struttura e l'aumento del numero di punti di serraggio equidistanziati lungo il perimetro, al fine di garantire una distribuzione omogenea della forza di bloccaggio e migliorare la stabilità del sistema durante il processo di deposizione.

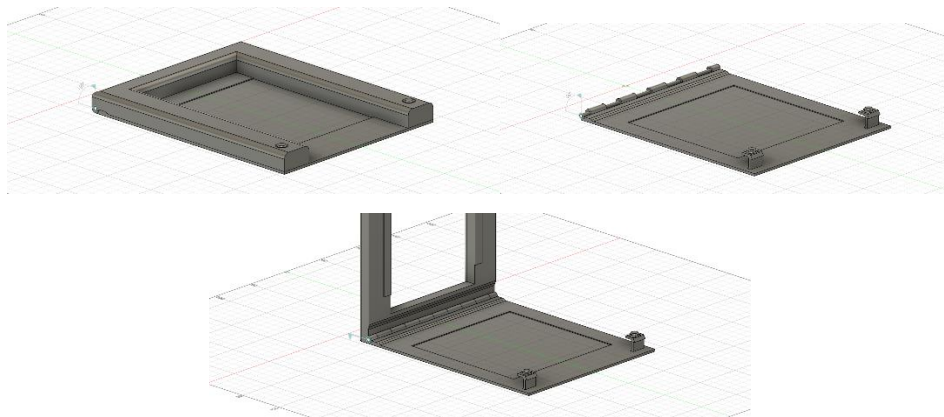


Figura 213: Esempio di valutazione di blocco Nafion ® alternativo

A conclusione dell'attività di progettazione è stato realizzato un modello completo, validato dal gruppo di lavoro e successivamente prodotto mediante tecnologie di manifattura additiva. Il sistema stampato è composto da tre elementi funzionali distinti: una base destinata a fungere da guida per il movimento del doctor blade, garantendo scorrimento lineare e stabilità operativa, e due componenti superiori costituenti la cornice di fissaggio, progettate per assicurare il bloccaggio del substrato polimerico durante la fase di deposizione.

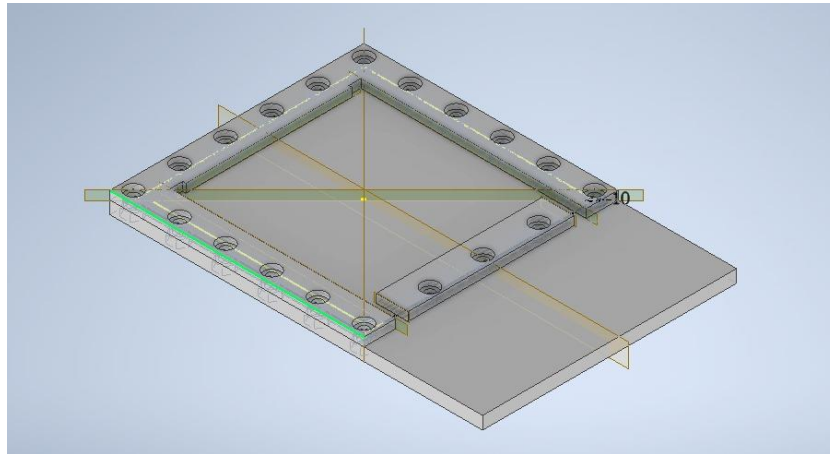


Figura 214: modello definitivo per stampa 3d – vista assonometrica superiore

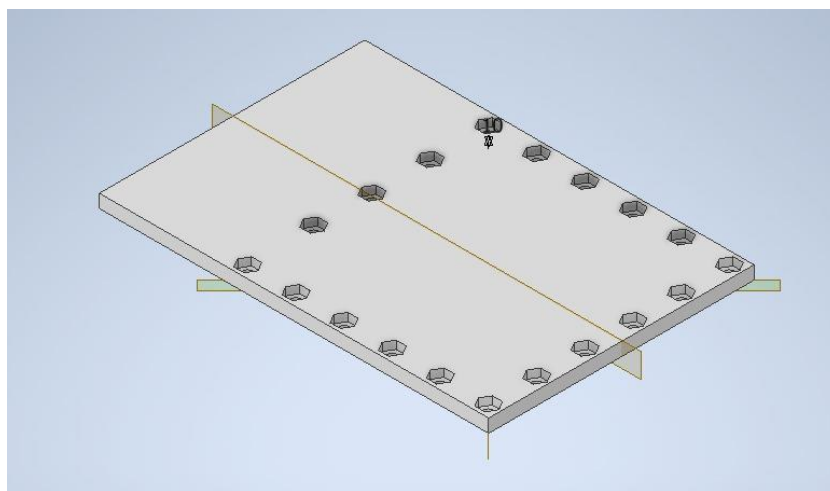


Figura 215: modello definitivo per stampa 3d – vista assonometrica inferiore

Il pezzo stampato è stato sottoposto a controllo funzionale.



Figura 216: Elemento di fissaggio Nafion prodotto in additive manufacturing

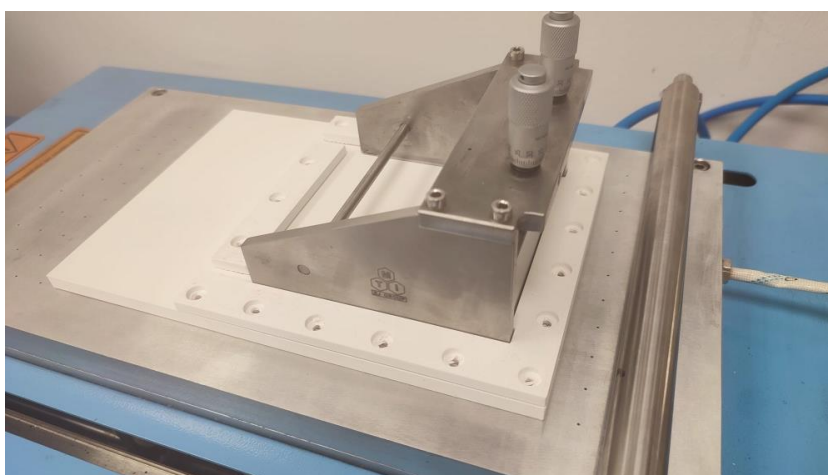


Figura 217: Controlli dimensionali e funzionali.

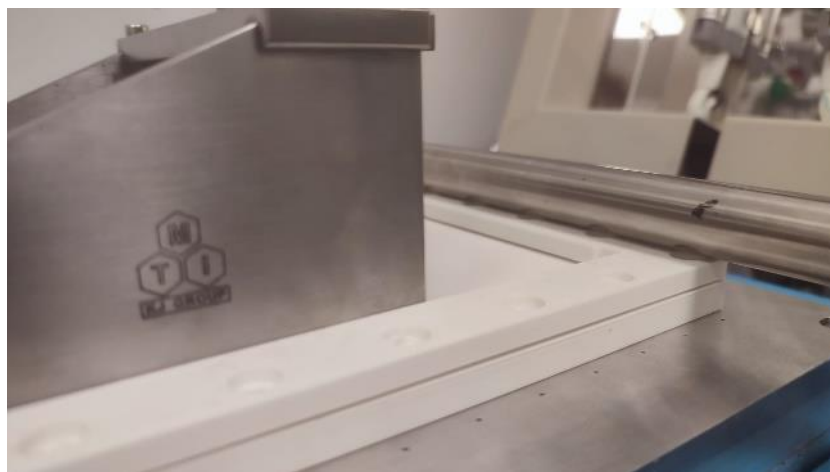


Figura 218: Controlli dimensionali e funzionali.



Figura 219: Controlli dimensionali e funzionali.

3.8.3.5 Sviluppi futuri

Le attività successive saranno orientate verso un'ulteriore automatizzazione del processo di deposizione, con particolare attenzione alla possibilità di realizzare il rivestimento catalitico su entrambe le superfici del substrato polimerico senza la necessità di disassemblare la cornice di fissaggio. Contestualmente, si studieranno soluzioni progettuali per implementare sistemi di bloccaggio più rapidi ed efficienti tra la cornice e la piastra di supporto, al fine di ridurre i tempi operativi e migliorare l'ergonomia del processo. Parallelamente, verrà valutata la realizzazione del componente in metallo, con l'obiettivo di sostituire integralmente la piastra attualmente in uso con una nuova versione che integri un sistema meccanico dedicato al fissaggio del polimero, garantendo maggiore robustezza e durabilità.

4 Sezione conclusiva

4.1 Conclusioni e sviluppi futuri

Le attività di ricerca sviluppate nel corso di questo lavoro di dottorato si collocano all'interno del profondo processo di trasformazione che ha investito il settore manifatturiero negli ultimi anni, un processo guidato dall'affermazione dei paradigmi dell'Industria 4.0 e oggi proiettato verso le prospettive ancora più ampie dell'Industria 5.0. In questo scenario, la manifattura additiva si è dimostrata non soltanto una tecnologia innovativa per la fabbricazione di componenti complessi, ma un vero e proprio fattore abilitante capace di modificare le logiche di progettazione, produzione e gestione dei sistemi industriali. L'intero percorso di ricerca si è sviluppato mosso da questa consapevolezza: l'additive manufacturing non deve essere inteso unicamente come un insieme di strumenti tecnici, bensì come una piattaforma metodologica e concettuale in grado di generare valore in molteplici direzioni, dai materiali all'energia, dalla digitalizzazione alla sostenibilità. L'obiettivo complessivo della tesi è stato quello di esplorare e valutare le potenzialità delle tecniche additive in campi tra loro differenti, ma uniti dal filo conduttore dell'innovazione tecnologica e della ricerca di efficienza. I diversi capitoli hanno offerto l'occasione di affrontare il tema da prospettive eterogenee, mostrando come l'AM possa costituire la base per lo sviluppo di strutture leggere e ad alte prestazioni, per la realizzazione di scambiatori di calore con geometrie avanzate, per l'integrazione di processi di reverse engineering, per la produzione di sistemi di accumulo energetico innovativi e per l'ottimizzazione di componenti destinati alla generazione di idrogeno verde. Questi contributi, pur diversi nelle metodologie e negli obiettivi specifici, si ricompongono in una visione unitaria, che attribuisce alla manifattura additiva il ruolo di tecnologia cardine per una nuova era di sviluppo industriale. Un aspetto che caratterizza l'intero lavoro è l'attenzione alla trasferibilità dei risultati. Ogni progetto è stato condotto con attenzione alla trasferibilità e alla possibilità di integrazione in contesti produttivi concreti, valutando di volta in volta la scalabilità dei processi, la compatibilità con le esigenze produttive e la possibilità di integrare le soluzioni proposte in contesti applicativi

concreti. Ne deriva che i risultati ottenuti non vadano intesi come dimostrazioni di principio chiuse in sé stesse, ma piuttosto come tappe di un percorso che avvicina la ricerca accademica alle esigenze del mondo produttivo, in un'ottica di continua contaminazione e reciproco arricchimento. Dal punto di vista dell'originalità, il lavoro si distingue per il carattere multidisciplinare che ha guidato le diverse linee di indagine. La manifattura additiva è stata affrontata non soltanto dal punto di vista meccanico e strutturale, ma anche in relazione alle sue implicazioni energetiche, ambientali e organizzative. Questo approccio ha permesso di evidenziare come la tecnologia non debba essere confinata a un ambito ristretto, bensì possa rappresentare un linguaggio comune in grado di unire discipline diverse e settori applicativi apparentemente lontani. La possibilità di operare su scale differenti, dal micro al macro, e di connettere progettazione, prototipazione e caratterizzazione sperimentale ha consentito di costruire un quadro ampio e articolato, nel quale ogni tassello si inserisce in una prospettiva di sistema. Nel percorso di ricerca, un primo contributo significativo è stato rappresentato dall'analisi delle strutture sandwich e delle loro possibili configurazioni geometriche realizzabili esclusivamente attraverso tecniche additive. Questo studio ha mostrato come, a parità di materiale e massa impiegata, la variazione della geometria interna del core possa influire in maniera sostanziale sulle prestazioni meccaniche del pannello risultante, aprendo scenari applicativi che vanno ben oltre le soluzioni convenzionali. Le prove hanno evidenziato comportamenti meccanici profondamente differenti, dimostrando che la progettazione del core non deve essere pensata come un semplice riempimento, ma come un vero e proprio strumento di ottimizzazione funzionale. Da qui emerge il ruolo della manifattura additiva come abilitatore di una nuova libertà progettuale, in grado di svincolare la ricerca di prestazioni da vincoli geometrici tradizionali. Un secondo ambito di ricerca ha riguardato la progettazione e l'ottimizzazione di scambiatori di calore, un campo nel quale l'introduzione delle geometrie complesse offerte dalle superfici minimali triplamente periodiche ha consentito di sviluppare configurazioni altamente performanti. La possibilità di modellare e fabbricare strutture porose regolari e controllate ha permesso di ottenere un incremento significativo dell'efficienza termica, pur mantenendo compattezza e leggerezza, due caratteristiche sempre più richieste nei sistemi energetici moderni. L'adozione

di software di progettazione avanzata, basati su geometrie implicite, ha reso possibile esplorare configurazioni difficilmente raggiungibili con i metodi tradizionali, fornendo così non soltanto un risultato applicativo, ma anche un metodo trasferibile ad altri campi dell'ingegneria. Anche in questo caso, la manifattura additiva si è rivelata uno strumento chiave non soltanto per fabbricare un prototipo, ma per aprire nuovi spazi di progettazione. Parallelamente, l'integrazione di tecniche di reverse engineering e di scansione 3D ha dimostrato come l'AM possa dialogare con strumenti digitali avanzati per ottimizzare processi produttivi complessi. La digitalizzazione di geometrie articolate e l'analisi automatizzata dei parametri di processo hanno evidenziato la possibilità di ridurre tempi e costi, incrementando al tempo stesso la qualità del risultato finale. Questo approccio, oltre a dimostrare la validità delle tecniche adottate, ha messo in luce il potenziale di un'integrazione sempre più stretta tra produzione additiva, intelligenza artificiale e metodi di acquisizione digitale, anticipando scenari in cui la catena del valore diventa un flusso continuo di dati e processi interconnessi. Un ulteriore contributo è stato sviluppato nel campo dello stoccaggio energetico, con particolare attenzione ai materiali e alle configurazioni per l'accumulo termochimico. In questo ambito, la manifattura additiva ha consentito di realizzare reticoli complessi basati su compositi zeolitici, capaci di incrementare l'efficienza nei processi di adsorbimento e desorbimento, superando i limiti delle tecniche tradizionali di rivestimento e di impaccamento. I risultati ottenuti hanno confermato che la possibilità di modellare la struttura tridimensionale del materiale consente di ottimizzare simultaneamente il trasferimento di massa e quello di calore, due aspetti che solitamente rappresentano un compromesso difficile da gestire. Si tratta di un risultato che, al di là delle specifiche applicazioni, testimonia come l'AM possa contribuire in maniera diretta al tema, oggi cruciale, della transizione energetica e della valorizzazione di fonti rinnovabili e calore di scarto. Un capitolo di particolare rilevanza è stato infine quello dedicato alla produzione di membrane elettrodiche per elettrolizzatori PEMWE. In questo caso la ricerca ha mostrato come la manifattura additiva possa intervenire in un processo delicato e ad alta specializzazione come quello della deposizione di catalizzatori, migliorando l'uniformità, riducendo gli sprechi e aprendo la strada alla scalabilità industriale.

Lo sviluppo di una testina di estrusione appositamente progettata e realizzata in stampa 3D, unito all'impiego di sistemi di deposizione controllata, ha evidenziato la possibilità di trasformare un processo tradizionalmente manuale e poco ripetibile in un flusso automatizzato, più efficiente e riproducibile. Questo risultato assume un valore strategico nel contesto della produzione di idrogeno verde, uno dei settori chiave per la decarbonizzazione dei sistemi energetici, e dimostra come l'AM possa essere applicata anche in scenari ad alta complessità e con requisiti di affidabilità elevatissimi. Mettendo in relazione i risultati ottenuti nei diversi capitoli, emerge come la manifattura additiva sia un catalizzatore di innovazione trasversale, capace di aprire prospettive inedite in ambiti tra loro molto differenti. In ogni ambito affrontato, dall'ingegneria strutturale all'energia, dai processi di reverse engineering fino alla produzione di componenti elettrochimici, l'AM si è dimostrata capace di aprire nuove possibilità, offrendo soluzioni che altrimenti sarebbero rimaste irraggiungibili con i metodi tradizionali. L'elemento comune che lega tutte queste esperienze è la capacità di superare i vincoli convenzionali di progettazione e produzione, abilitando configurazioni geometriche, proprietà funzionali e processi di fabbricazione che incarnano una nuova logica ingegneristica, fondata sulla complessità controllata e sull'ottimizzazione integrata. Questa trasversalità ha consentito di mettere in luce un secondo aspetto fondamentale: l'AM non agisce mai isolatamente, ma trae la sua massima efficacia quando si integra con altre tecnologie e con approcci metodologici differenti. Nel caso delle strutture sandwich e degli scambiatori di calore, il dialogo con la progettazione parametrica e con software avanzati ha permesso di generare geometrie complesse e allo stesso tempo ottimizzate. L'integrazione con la scansione tridimensionale e con sistemi di intelligenza artificiale ha mostrato come l'AM possa inserirsi all'interno di un flusso digitale continuo, in cui i dati acquisiti vengono trasformati in modelli, i modelli in prototipi e i prototipi in applicazioni reali. Negli studi sull'accumulo termochimico e sulle membrane elettrodiche, il legame con la scienza dei materiali e con la chimica ha aperto la strada a soluzioni che non riguardano soltanto la forma degli oggetti, ma anche la loro funzionalità intrinseca, dimostrando che la manifattura additiva è anche un laboratorio per l'ingegneria dei materiali e per l'energia sostenibile. La ricerca ha quindi mostrato come la manifattura additiva

non sia soltanto una risposta a esigenze produttive, ma un motore di convergenza tra discipline, capace di avvicinare mondi tradizionalmente separati. Essa consente agli ingegneri meccanici di dialogare con i chimici dei materiali, ai progettisti di sistemi energetici di collaborare con gli informatici, ai ricercatori di confrontarsi con chi lavora sulla digitalizzazione e sulla robotica. Questa capacità di creare un terreno comune non è un aspetto secondario, ma costituisce probabilmente il contributo più rilevante della manifattura additiva al panorama contemporaneo della ricerca e dell'industria. Un ulteriore elemento che emerge con chiarezza è la connessione con i grandi temi della sostenibilità e della transizione energetica. In più di un caso, la ricerca ha dimostrato come l'adozione di processi additivi consenta non solo di migliorare le prestazioni tecniche, ma anche di ridurre gli sprechi di materiale, abbattere i costi energetici e favorire la circolarità dei processi. La possibilità di utilizzare polimeri biodegradabili, filamenti rinforzati con fibre naturali o scarti agroalimentari, e di integrare l'AM nella produzione di componenti per lo stoccaggio energetico o per la generazione di idrogeno verde, rappresenta una dimostrazione tangibile di come la tecnologia possa contribuire a un modello produttivo più responsabile e resiliente. In questo senso, i risultati della tesi si collocano pienamente all'interno delle traiettorie che oggi orientano l'industria verso la neutralità climatica e verso un uso più consapevole delle risorse. Il percorso sviluppato dimostra come la manifattura additiva possa essere interpretata non solo come una tecnologia utile per risolvere problemi specifici, ma come un paradigma produttivo che ridefinisce i confini stessi dell'ingegneria contemporanea. Essa introduce un modo diverso di pensare alla progettazione: non più vincolata dalle limitazioni della produzione convenzionale, ma aperta a soluzioni geometriche e funzionali che mettono al centro l'ottimizzazione e l'adattabilità. Questo approccio ha permesso di trasformare componenti apparentemente ordinari – come un pannello sandwich, uno scambiatore di calore o una membrana polimerica – in dispositivi complessi, multifunzionali e più performanti, mostrando in modo concreto la capacità della ricerca di tradursi in risultati applicabili. Un aspetto rilevante che emerge da tutto il lavoro è la capacità dell'AM di fungere da ponte tra ricerca accademica e applicazioni industriali. Ogni risultato sperimentale, pur mantenendo la necessaria solidità scientifica, è stato pensato con attenzione alla

trasferibilità e alla possibilità di essere scalato in contesti produttivi reali. La creazione del laboratorio LIVINGAM va letta proprio in questa prospettiva: non come un semplice spazio attrezzato per la stampa 3D, ma come un ecosistema metodologico in cui conoscenze teoriche, sperimentazione applicata e collaborazione interdisciplinare si intrecciano. LIVINGAM si propone come un ambiente aperto, flessibile e collaborativo, in grado di ospitare progetti diversi e di adattarsi a nuove esigenze, incarnando in maniera esemplare i principi dei Living Lab e della manifattura distribuita. Se la manifattura additiva è stata al centro della cosiddetta Industria 4.0, i risultati ottenuti in questa tesi suggeriscono che il suo ruolo diventerà ancora più rilevante nel passaggio verso l'Industria 5.0, un paradigma che pone al centro non solo l'efficienza e l'automazione, ma anche la dimensione umana, la personalizzazione, la sostenibilità e la resilienza. In questo contesto, la manifattura additiva, integrata con sistemi di Internet of Things, intelligenza artificiale e piattaforme di gestione dati, potrà abilitare nuove forme di produzione flessibile e delocalizzata, in cui il confine tra prototipazione e produzione di serie diventa sempre più labile. Le sperimentazioni descritte nei diversi capitoli – dall'uso di strutture TPMS al deposito controllato di catalizzatori, dalla digitalizzazione di geometrie complesse fino alla creazione di materiali compositi avanzati – rappresentano già oggi esempi concreti di questa evoluzione, e mostrano come sia possibile immaginare una produzione che non si limita a rispondere a esigenze contingenti, ma che si adatta dinamicamente ai cambiamenti dei mercati e della società. Questa prospettiva colloca il lavoro svolto in una dimensione non soltanto tecnica, ma anche strategica. In questa prospettiva, la manifattura additiva si pone come una leva strategica per la resilienza delle catene produttive globali. Essa consente di ripensare la produzione in termini di prossimità, riducendo la dipendenza da logistiche complesse e vulnerabili, e di introdurre logiche di personalizzazione di massa che valorizzano la centralità dell'utente finale senza compromettere l'efficienza industriale. In definitiva, il percorso sviluppato nel corso di questo dottorato ha messo in luce come la manifattura additiva possa assumere un ruolo determinante in molteplici settori dell'ingegneria, offrendo soluzioni innovative a problemi complessi e aprendo possibilità progettuali e produttive altrimenti precluse. I diversi studi affrontati hanno dimostrato che l'AM

non è soltanto una tecnologia utile per la prototipazione rapida, ma uno strumento maturo, capace di supportare la realizzazione di componenti funzionali, di ottimizzare le prestazioni di sistemi energetici e meccanici e di promuovere un approccio più sostenibile e integrato alla produzione industriale. La varietà degli ambiti trattati – dalle strutture sandwich agli scambiatori di calore, dai processi di reverse engineering alle applicazioni nell’accumulo energetico e nell’idrogeno verde – rappresenta non una dispersione, ma una dimostrazione della flessibilità intrinseca di queste tecniche e della loro capacità di adattarsi a contesti tra loro molto diversi. Al tempo stesso, è importante riconoscere i limiti che ancora caratterizzano il settore. La compatibilità dei materiali resta una sfida non trascurabile, così come la necessità di migliorare ulteriormente le proprietà meccaniche e superficiali delle parti prodotte, affinché possano sostituire in maniera sistematica quelle ottenute con processi convenzionali. Anche la scalabilità industriale, nonostante i progressi degli ultimi anni, richiede ulteriori sviluppi, sia in termini di riduzione dei costi sia di standardizzazione dei processi. La ricerca ha mostrato chiaramente che l’AM offre un potenziale straordinario, ma ha anche evidenziato come questo potenziale debba ancora essere pienamente tradotto in realtà industriale su larga scala. Proprio per queste ragioni, il lavoro svolto non si esaurisce nei risultati ottenuti, ma apre a prospettive di sviluppo future. Tra le direzioni più promettenti vi è l’integrazione con l’intelligenza artificiale e con i sistemi di gestione dati, in grado di rendere i processi più predittivi e controllabili che potranno consentire un controllo più accurato dei processi e una maggiore predittività delle prestazioni. L’applicazione dell’AM nel campo dell’energia, già esplorata in questa tesi, potrà estendersi a nuove configurazioni di accumulo e conversione, contribuendo in maniera significativa alla transizione verso sistemi più sostenibili. Allo stesso modo, la possibilità di impiegare materiali biocompositi, conduttivi e multifunzionali apre scenari in cui i componenti non saranno soltanto strutture passive, ma integreranno funzioni aggiuntive, diventando sensori, attuatori o elementi di sistemi intelligenti. Guardando oltre l’orizzonte dell’Industria 4.0, la manifattura additiva si candida dunque a essere uno dei pilastri dell’Industria 5.0, un paradigma che mette al centro la collaborazione tra uomo e macchina, la personalizzazione, la resilienza e la sostenibilità. I risultati ottenuti in questo

dottorato rappresentano un tassello in questa direzione, mostrando come la ricerca accademica possa anticipare scenari industriali futuri e contribuire a costruire modelli produttivi più innovativi e responsabili. Alla luce del percorso complessivo, i risultati emersi possono essere letti come un insieme coerente di contributi che, pur sviluppandosi in direzioni differenti, convergono in una visione unitaria della manifattura additiva e del suo ruolo nell'evoluzione dei sistemi produttivi:

1. La manifattura additiva come piattaforma metodologica e concettuale.

L'intero percorso ha mostrato come l'AM non debba essere interpretata come un insieme di tecniche, ma come un linguaggio progettuale trasversale, in grado di unire forma, materiale e processo in una logica unitaria. Questa prospettiva ha consentito di affrontare campi applicativi diversi – dalla meccanica strutturale all'energia – sotto un'unica visione sistemica, in cui la complessità geometrica diventa strumento di innovazione e non vincolo produttivo.

2. Geometrie TPMS e strutture sandwich.

Lo studio delle superfici minimali triplamente periodiche ha evidenziato il potenziale di tali geometrie come architetture meccanicamente efficienti, capaci di ottimizzare la rigidità e la leggerezza dei pannelli sandwich. Al di là dell'applicazione specifica, l'indagine sul core si è rivelata anche un modello concettuale per comprendere il comportamento di queste geometrie come riempimenti funzionali di componenti meccanici. In questa prospettiva, il core non rappresenta più un semplice volume di riempimento, ma diventa una regione ingegnerizzabile in base alla distribuzione degli sforzi, aprendo la strada a strategie di field-driven design e a configurazioni multimateriale, in cui densità e morfologia variano localmente in funzione del carico.

3. Scambiatori di calore a geometria complessa.

L'applicazione delle TPMS al campo termo-fluidodinamico ha permesso di realizzare scambiatori di calore estremamente compatti e performanti, con efficienze superiori rispetto ai sistemi tradizionali. L'impiego di geometrie implicite regolari e controllabili consente di modulare il comportamento del fluido in funzione della densità e del grado di porosità della struttura, gestendo

in modo preciso il salto di pressione e lo scambio termico. Anche quando realizzati in materiale polimerico, tali dispositivi rappresentano un significativo passo avanti rispetto alle tecniche convenzionali di produzione, e la prospettiva della stampa metallica apre a ulteriori incrementi prestazionali e applicativi.

4. Digitalizzazione, reverse engineering e filiera connessa.

L'integrazione tra scansione tridimensionale, modellazione parametrica e analisi automatizzata dei processi ha mostrato come la manifattura additiva possa inserirsi in una catena digitale continua, in cui i dati vengono trasformati direttamente in modelli e questi in prototipi fisici. Questo approccio, oltre a ridurre tempi e costi, ha messo in luce la potenzialità di una produzione flessibile, reattiva e personalizzabile, basata su una connessione sempre più stretta tra acquisizione, elaborazione e fabbricazione.

5. Accumulo termochimico e strutture porose composite.

Le attività condotte nel campo dello stoccaggio energetico hanno dimostrato come la manifattura additiva consenta di modellare reticoli compositi complessi, migliorando simultaneamente il trasferimento di massa e di calore. L'impiego di compositi zeolitici stampati in 3D ha permesso di superare i limiti delle tecniche convenzionali di rivestimento, fornendo un contributo concreto ai temi della transizione energetica e della valorizzazione del calore di scarto. Questi risultati estendono il ruolo dell'AM oltre la meccanica, rendendola un vero strumento di ingegneria dei materiali funzionali.

6. Deposizione controllata per membrane elettrodiche PEMWE.

La progettazione e la realizzazione di una testina di estrusione dedicata hanno consentito la deposizione precisa e ripetibile di catalizzatori, con un netto miglioramento dell'uniformità e della scalabilità del processo. La ricerca ha evidenziato come la manifattura additiva possa intervenire anche in ambiti ad alta specializzazione, trasformando fasi delicate in processi automatizzati e industrialmente sostenibili. Questo risultato, strettamente legato al tema dell'idrogeno verde, testimonia la maturità tecnologica dell'AM anche in settori ad elevata complessità.

7. Materiali compositi e biocompositi per FFF.

L'indagine sui materiali ha esplorato un ampio spettro di soluzioni, dai filamenti rinforzati con fibre tecniche – come la fibra di carbonio – fino ai biocompositi ottenuti da fibre naturali e filler derivati da scarti agroalimentari. È stato così dimostrato che la manifattura additiva può coniugare prestazioni meccaniche elevate e sostenibilità ambientale, ponendosi come piattaforma per lo sviluppo di materiali avanzati e processi produttivi più responsabili. Il lavoro ha inoltre evidenziato l'importanza delle interazioni tra matrice polimerica e fibre di rinforzo, elemento chiave per ottimizzare le proprietà dei componenti stampati e per orientare le future ricerche verso soluzioni multimateriale e ibride.

8. LIVINGAM: infrastruttura sperimentale e modello operativo.

La creazione del Living Lab for Additive Manufacturing ha rappresentato un risultato trasversale di grande rilievo, fornendo un ambiente integrato per la progettazione, la produzione e la validazione sperimentale. LIVINGAM si configura come ecosistema di ricerca aperto e distribuito, in cui le competenze accademiche e industriali si incontrano, favorendo la trasferibilità dei risultati e lo sviluppo di progetti multidisciplinari orientati all'innovazione collaborativa.

9. Prospettive di sviluppo e direzioni future.

Le sfide ancora aperte riguardano la scalabilità industriale, la qualità dei materiali e la standardizzazione dei processi, aspetti decisivi per il consolidamento della manifattura additiva come tecnologia matura. Le prospettive di ricerca puntano verso l'integrazione dell'AM con la simulazione predittiva, sia numerica (FEM, CFD) sia multi-fisica, per comprendere e anticipare il comportamento meccanico e termodinamico delle strutture cellulari e reticolari. In parallelo, sarà fondamentale l'evoluzione di algoritmi di ottimizzazione e intelligenza artificiale, la sperimentazione di materiali multifunzionali e l'adozione di processi sempre più sostenibili e digitalizzati. Queste linee delineano una traiettoria di ampio respiro, in cui la manifattura additiva si conferma uno degli strumenti più promettenti per guidare la transizione verso un'industria flessibile, resiliente e centrata sull'uomo.

Nel loro insieme, questi risultati evidenziano la coerenza e la continuità di un percorso che ha unito sperimentazione, progettazione e visione sistemica, mostrando come la manifattura additiva possa agire da catalizzatore di innovazione in ambiti tra loro diversi, ponendosi come chiave metodologica per l'ingegneria del futuro. In conclusione, questa tesi dimostra che la manifattura additiva non è semplicemente una tecnologia emergente, ma una leva strategica per ripensare l'ingegneria e la produzione. Il percorso tracciato evidenzia un contributo originale sia sul piano metodologico sia su quello applicativo e suggerisce che le linee esplorate possano essere ulteriormente sviluppate in futuro, dando vita a nuove soluzioni capaci di affrontare le sfide globali della sostenibilità, della digitalizzazione e dell'innovazione industriale.

5 Elenco delle pubblicazioni correlate al lavoro di dottorato

Durante il triennio di dottorato sono stati pubblicati diversi contributi scientifici direttamente connessi alle attività di ricerca presentate in questa tesi. Le pubblicazioni riportate di seguito riflettono e approfondiscono i principali ambiti di studio affrontati, documentando i risultati più significativi conseguiti nel corso del percorso di ricerca. Ulteriori lavori derivati dalle attività sperimentali e di modellazione descritte nel presente elaborato sono attualmente in fase di preparazione o sottomissione a riviste scientifiche internazionali.

1. Marabello, G.; Chairi, M.; Di Bella, G. Interfacial Weaknesses in Multi-Material FFF Sandwich Structures with TPMS Cores: A Comparative Study of PLA and PLA-CF Facesheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2025, doi:10.1007/s00170-025-16884-y.
2. Marabello, G. Field-Driven Design of Functionally Graded TPMS-Based 3D Printed Sandwich Structures: Modeling, Printing and Testing.; 2025; pp. 556–564.
3. Di Dio, Salvatore. *Communities' Sustainable Experiences*; Altralinea edizioni, 2024; ISBN 9791280178992.
4. Marabello, G.; Chairi, M.; Di Bella, G. Optimising Additive Manufacturing to Produce PLA Sandwich Structures by Varying Cell Type and Infill: Effect on Flexural Properties. *Journal of Composites Science* 2024, 8, 360, doi:10.3390/jcs8090360.
5. Marabello, G. Optimizing Additive Manufacturing of Sandwich Structures: Effect of TPMS Cores on Flexural Properties.; 2025; pp. 124–134.
6. Palomba, V. Thermal and Mechanical Performance of TPMS-Based Heat Exchangers Fabricated via Additive Manufacturing: A Focus on Gyroid Structures.; 2025; pp. 114–123.

7. Panfiglio, S. Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Steel Joints in Shipbuilding Using Machine Learning and Finite Element Analysis.; 2025; pp. 1394–1402.
8. Calabrese, L.; Marabello, G.; Chairi, M.; Di Bella, G. Optimization of Deposition Temperature and Gyroid Infill to Improve Flexural Performance of PLA and PLA–Flax Fiber Composite Sandwich Structures. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2025, 9, 31, doi:10.3390/jmmp9020031.
9. Di Bella, G.; Marabello, G.; Panfiglio, S.; Brancato, B.; Frusteri, L.; D’Urso, C.; Briguglio, N. Exploring 3D Printed Components for a New MEA Manufacturing Process in PEMWE Applications. *Sustainable Materials and Technologies* 2025, 44, e01403, doi:10.1016/j.susmat.2025.e01403.
10. Marabello, G.; Mastronardo, E.; Palamara, D.; Frazzica, A.; Calabrese, L. Tailored 3D Lattice SAPO-34/S-PEEK Composite Sorbents by Additive Manufacturing for Sorption Heat Transformation Applications. *Materials* 2025, 18, 3428, doi:10.3390/ma18153428.
11. Di Bella, G.; Chairi, M.; Marabello, G.; Palomba, V. Mechanical Performance of Thin-Walled TPMS Structures Fabricated via MSLA for Advanced Heat Exchangers: Influence of Geometry and Resin. *Journal of Sandwich Structures & Materials* 2025, doi:10.1177/10996362251364961.
12. Panfiglio, S.; Abdalla, E.; Borsellino, C.; Chairi, M.; Denaro, A.; Marabello, G.; Di Bella, G. Implementation of Innovative Strategies in Shipbuilding Production: The Experience of SHIPLEARNING on Friction Stir Welding and Reverse Engineering. In; 2025.
13. Chairi, M.; Marabello, G.; Corigliano, P.; Palomba, G.; Di Bella, G. Adopting Additive Manufacturing in Shipbuilding: Managing the Transition to Innovative Design, Structures and Materials. In; 2025.
14. Marabello, G.; Borsellino, C.; Di Bella, G. Carbon Fiber 3D Printing: Technologies and Performance—A Brief Review. *Materials* 2023, 16, doi:10.3390/ma16237311.

6 Bibliografia

1. Nian, Y.; Wan, S.; Avcar, M.; Yue, R.; Li, M. 3D Printing Functionally Graded Metamaterial Structure: Design, Fabrication, Reinforcement, Optimization. *Int J Mech Sci* 2023, 258, doi:10.1016/j.ijmecsci.2023.108580.
2. Shanmugam, V.; Das, O.; Babu, K.; Marimuthu, U.; Veerasimman, A.; Johnson, D.J.; Neisiany, R.E.; Hedenqvist, M.S.; Ramakrishna, S.; Berto, F. Fatigue Behaviour of FDM-3D Printed Polymers, Polymeric Composites and Architected Cellular Materials. *Int J Fatigue* 2021, 143, doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.106007.
3. Lubombo, C.; Huneault, M.A. Effect of Infill Patterns on the Mechanical Performance of Lightweight 3D-Printed Cellular PLA Parts. *Mater Today Commun* 2018, 17, 214–228, doi:10.1016/j.mtcomm.2018.09.017.
4. Yao, T.; Deng, Z.; Zhang, K.; Li, S. A Method to Predict the Ultimate Tensile Strength of 3D Printing Polylactic Acid (PLA) Materials with Different Printing Orientations. *Compos B Eng* 2019, 163, 393–402, doi:10.1016/j.compositesb.2019.01.025.
5. Li, T.; Wang, L. Bending Behavior of Sandwich Composite Structures with Tunable 3D-Printed Core Materials. *Compos Struct* 2017, 175, 46–57, doi:10.1016/j.compstruct.2017.05.001.
6. Dudescu, C.; Racz, L. Effects of Raster Orientation, Infill Rate and Infill Pattern on the Mechanical Properties of 3D Printed Materials. *ACTA Universitatis Cibiniensis* 2017, 69, 23–30, doi:10.1515/aucts-2017-0004.
7. Sugiyama, K.; Matsuzaki, R.; Ueda, M.; Todoroki, A.; Hirano, Y. 3D Printing of Composite Sandwich Structures Using Continuous Carbon Fiber and Fiber Tension. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2018, 113, 114–121, doi:10.1016/j.compositesa.2018.07.029.
8. Nian, Y.; Wan, S.; Zhou, P.; Wang, X.; Santiago, R.; Li, M. Energy Absorption Characteristics of Functionally Graded Polymer-Based Lattice

Structures Filled Aluminum Tubes under Transverse Impact Loading. *Mater Des* 2021, 209, doi:10.1016/j.matdes.2021.110011.

9. Xie, C.; Wang, D.; Zong, L.; Kong, D. Crashworthiness Analysis and Multi-Objective Optimization of Spatial Lattice Structure under Dynamic Compression. *Int J Impact Eng* 2023, 180, doi:10.1016/j.ijimpeng.2023.104713.
10. Wang, Z.; Yao, G. Nonlinear Vibration and Stability of Sandwich Functionally Graded Porous Plates Reinforced with Graphene Platelets in Subsonic Flow on Elastic Foundation. *Thin-Walled Structures* 2024, 194, doi:10.1016/j.tws.2023.111327.
11. Nian, Y.; Wan, S.; Wang, X.; Zhou, P.; Avcar, M.; Li, M. Study on Crashworthiness of Nature-Inspired Functionally Graded Lattice Metamaterials for Bridge Pier Protection against Ship Collision. *Eng Struct* 2023, 277, doi:10.1016/j.engstruct.2022.115404.
12. Wang, Y.; Liu, F.; Zhang, X.; Zhang, K.; Wang, X.; Gan, D.; Yang, B. Cell-Size Graded Sandwich Enhances Additive Manufacturing Fidelity and Energy Absorption. *Int J Mech Sci* 2021, 211, doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106798.
13. Iranmanesh, N.; Yazdani Sarvestani, H.; Ashrafi, B.; Hojjati, M. Beyond Honeycombs: Core Topology's Role in 3D-Printed Sandwich Panels. *Mater Today Commun* 2023, 37, doi:10.1016/j.mtcomm.2023.107548.
14. Birman, V.; Kardomateas, G.A. Review of Current Trends in Research and Applications of Sandwich Structures. *Compos B Eng* 2018, 142, 221–240.
15. WANG, H.; CHEN, J.; WANG, C.; GUO, G.; AN, Q.; MING, W.; CHEN, M. Burr Formation Mechanism and Morphological Transformation Critical Conditions in Grinding of Nickel-Based Superalloy Honeycomb Cores. *Chinese Journal of Aeronautics* 2023, 36, 434–451, doi:10.1016/j.cja.2023.02.015.

16. Nian, Y.; Wan, S.; Li, X.; Su, Q.; Li, M. How Does Bio-Inspired Graded Honeycomb Filler Affect Energy Absorption Characteristics? *Thin-Walled Structures* 2019, *144*, doi:10.1016/j.tws.2019.106269.
17. Moradi, A.; Ansari, R.; Hassanzadeh-Aghdam, M.K.; Jang, S.H. The Effect of Fuzzy Fiber-Reinforced Composite Skin on Bending Stiffness and Debonding Growth between Skin and Polymeric Foam Core of Sandwich Structures. *European Journal of Mechanics, A/Solids* 2024, *103*, doi:10.1016/j.euromechsol.2023.105182.
18. Xu, F.; Liu, Z.; Selvaraj, R.; Ahsan, M. Bending and Eigenfrequency Analysis of Glass Fiber Reinforced Honeycomb Sandwich Shell Panels Containing Graphene-Decorated with Graphene Quantum Dots. *Eng Struct* 2023, *294*, doi:10.1016/j.engstruct.2023.116685.
19. Sukia, I.; Morales, U.; Esnaola, A.; Aurrekoetxea, J.; Erice, B. Low-Velocity Impact Performance of Integrally-3D Printed Continuous Carbon Fibre Composite Sandwich Panels. *Mater Lett* 2024, *354*, doi:10.1016/j.matlet.2023.135374.
20. Pan, C.; Han, Y.; Lu, J. Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. *Applied Sciences (Switzerland)* 2020, *10*, 1–36.
21. Maconachie, T.; Leary, M.; Lozanovski, B.; Zhang, X.; Qian, M.; Faruque, O.; Brandt, M. SLM Lattice Structures: Properties, Performance, Applications and Challenges. *Mater Des* 2019, *183*.
22. Afshar, M.; Anaraki, A.P.; Montazerian, H.; Kadkhodapour, J. Additive Manufacturing and Mechanical Characterization of Graded Porosity Scaffolds Designed Based on Triply Periodic Minimal Surface Architectures. *J Mech Behav Biomed Mater* 2016, *62*, 481–494, doi:10.1016/j.jmbbm.2016.05.027.
23. Zhang, J.; Chen, X.; Sun, Y.; Yang, J.; Chen, R.; Xiong, Y.; Hou, W.; Bai, L. Design of a Biomimetic Graded TPMS Scaffold with Quantitatively Adjustable Pore Size. *Mater Des* 2022, *218*, doi:10.1016/j.matdes.2022.110665.

24. Fan, X.; Tang, Q.; Feng, Q.; Ma, S.; Song, J.; Jin, M.; Guo, F.; Jin, P. Design, Mechanical Properties and Energy Absorption Capability of Graded-Thickness Triply Periodic Minimal Surface Structures Fabricated by Selective Laser Melting. *Int J Mech Sci* 2021, 204, doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106586.
25. Seharing, A.; Azman, A.H.; Abdullah, S. A Review on Integration of Lightweight Gradient Lattice Structures in Additive Manufacturing Parts. *Advances in Mechanical Engineering* 2020, 12.
26. Marabello, G. Optimizing Additive Manufacturing of Sandwich Structures: Effect of TPMS Cores on Flexural Properties.; 2025; pp. 124–134.
27. Ji, Z.; Li, D.; Xie, Y.M.; Zhao, Y.; Liao, W. Design and Optimization of TPMS-Based Heterogeneous Metastructure for Controllable Displacement Field. *Thin-Walled Structures* 2025, 208, doi:10.1016/j.tws.2024.112784.
28. Baobaid, N.; Ali, M.I.; Khan, K.A.; Abu Al-Rub, R.K. Fluid Flow and Heat Transfer of Porous TPMS Architected Heat Sinks in Free Convection Environment. *Case Studies in Thermal Engineering* 2022, 33, doi:10.1016/j.csite.2022.101944.
29. Ma, X.; Guo, C. Dynamic Compressive Behavior of Functionally Graded Triply Periodic Minimal Surface Meta-Structures. *Thin-Walled Structures* 2024, 205, 112544, doi:10.1016/j.tws.2024.112544.
30. Wang, S.; Zhang, L.; Tang, M.; Cai, C.; Wu, J.; Zhang, Z.; Shi, Y. Field-Driven Design and Performance Evaluation of Dual Functionally Graded Triply Periodic Minimal Surface Structures for Additive Manufacturing. *Mater Des* 2023, 233, doi:10.1016/j.matdes.2023.112257.
31. Ji, Z.; Li, D.; Xie, Y.M.; Zhao, Y.; Liao, W. Design and Optimization of TPMS-Based Heterogeneous Metastructure for Controllable Displacement Field. *Thin-Walled Structures* 2025, 208, doi:10.1016/j.tws.2024.112784.
32. Feng, G.; Li, S.; Xiao, L.; Song, W. Mechanical Properties and Deformation Behavior of Functionally Graded TPMS Structures under Static and

- Dynamic Loading. *Int J Impact Eng* 2023, 176, doi:10.1016/j.ijimpeng.2023.104554.
33. Yang, L.; Li, Y.; Wu, S.; Chen, P.; Wu, H.; Su, J.; Wang, H.; Liu, J.; Yan, C.; Shi, Y. Tailorable and Predictable Mechanical Responses of Additive Manufactured TPMS Lattices with Graded Structures. *Materials Science and Engineering: A* 2022, 843, doi:10.1016/j.msea.2022.143109.
 34. Nguyen-Xuan, H.; Tran, K.Q.; Thai, C.H.; Lee, J. Modelling of Functionally Graded Triply Periodic Minimal Surface (FG-TPMS) Plates. *Compos Struct* 2023, 315, doi:10.1016/j.compstruct.2023.116981.
 35. Qureshi, Z.A.; Addin Burhan Al-Omari, S.; Elnajjar, E.; Al-Ketan, O.; Al-Rub, R.A. On the Effect of Porosity and Functional Grading of 3D Printable Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Based Architected Lattices Embedded with a Phase Change Material. *Int J Heat Mass Transf* 2022, 183, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122111.
 36. Marabello, G.; Chairi, M.; Di Bella, G. Optimising Additive Manufacturing to Produce PLA Sandwich Structures by Varying Cell Type and Infill: Effect on Flexural Properties. *Journal of Composites Science* 2024, 8, doi:10.3390/jcs8090360.
 37. Vasile, A.; Constantinescu, D.M.; Coropețchi, I.C.; Sorohan, Ștefan; Apostol, D.A. Definition, Fabrication, and Compression Testing of Sandwich Structures with Novel TPMS-Based Cores. *Materials* 2024, 17, doi:10.3390/ma17215150.
 38. Ejeh, C.J.; Barsoum, I.; Abu Al-Rub, R.K. Flexural Properties of Functionally Graded Additively Manufactured AlSi10Mg TPMS Latticed-Beams. *Int J Mech Sci* 2022, 223, doi:10.1016/j.ijmecsci.2022.107293.
 39. Zhong, M.; Zhou, W.; Xi, H.; Liang, Y.; Wu, Z. Double-Level Energy Absorption of 3d Printed Tpms Cellular Structures via Wall Thickness Gradient Design. *Materials* 2021, 14, doi:10.3390/ma14216262.

40. Calabrese, L.; Marabello, G.; Chairi, M.; Di Bella, G. Optimization of Deposition Temperature and Gyroid Infill to Improve Flexural Performance of PLA and PLA–Flax Fiber Composite Sandwich Structures. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2025, 9, 31, doi:10.3390/jmmp9020031.
41. Chen, D.; Gao, K.; Yang, J.; Zhang, L. Functionally Graded Porous Structures: Analyses, Performances, and Applications – A Review. *Thin-Walled Structures* 2023, 191.
42. Novak, N.; Borovinšek, M.; Al-Ketan, O.; Ren, Z.; Vesenjak, M. Impact and Blast Resistance of Uniform and Graded Sandwich Panels with TPMS Cellular Structures. *Compos Struct* 2022, 300, doi:10.1016/j.compstruct.2022.116174.
43. Yu, S.; Sun, J.; Bai, J. Investigation of Functionally Graded TPMS Structures Fabricated by Additive Manufacturing. *Mater Des* 2019, 182, doi:10.1016/j.matdes.2019.108021.
44. Lee, J.W.; Oh, S.H.; Jeon, E.; Kim, J.; Park, K. Functional Gradation of the Morphological Properties of TPMS Channel for Enhanced Flow Performance. *Mater Des* 2022, 224, doi:10.1016/j.matdes.2022.111413.
45. Viswanath, A.; Abueidda, D.W.; Modrek, M.; Abu Al-Rub, R.K.; Koric, S.; Khan, K.A. Designing a TPMS Metamaterial via Deep Learning and Topology Optimization. *Front Mech Eng* 2024, 10, doi:10.3389/fmech.2024.1417606.
46. Ismail, K.I.; Yap, T.C.; Ahmed, R. 3D-Printed Fiber-Reinforced Polymer Composites by Fused Deposition Modelling (FDM): Fiber Length and Fiber Implementation Techniques. *Polymers (Basel)* 2022, 14.
47. Fernandes, R.R.; Tamijani, A.Y.; Al-Haik, M. Mechanical Characterization of Additively Manufactured Fiber-Reinforced Composites. *Aerosp Sci Technol* 2021, 113, doi:10.1016/j.ast.2021.106653.

48. Yavas, D.; Zhang, Z.; Liu, Q.; Wu, D. Fracture Behavior of 3D Printed Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Compos Sci Technol* 2021, 208, doi:10.1016/j.compscitech.2021.108741.
49. van de Werken, N.; Tekinalp, H.; Khanbolouki, P.; Ozcan, S.; Williams, A.; Tehrani, M. Additively Manufactured Carbon Fiber-Reinforced Composites: State of the Art and Perspective. *Addit Manuf* 2020, 31.
50. Nawafleh, N.; Celik, E. Additive Manufacturing of Short Fiber Reinforced Thermoset Composites with Unprecedented Mechanical Performance. *Addit Manuf* 2020, 33, doi:10.1016/j.addma.2020.101109.
51. Goh, G.D.; Dikshit, V.; Nagalingam, A.P.; Goh, G.L.; Agarwala, S.; Sing, S.L.; Wei, J.; Yeong, W.Y. Characterization of Mechanical Properties and Fracture Mode of Additively Manufactured Carbon Fiber and Glass Fiber Reinforced Thermoplastics. *Mater Des* 2018, 137, 79–89, doi:10.1016/j.matdes.2017.10.021.
52. Heidari-Rarani, M.; Rafiee-Afarani, M.; Zahedi, A.M. Mechanical Characterization of FDM 3D Printing of Continuous Carbon Fiber Reinforced PLA Composites. *Compos B Eng* 2019, 175, doi:10.1016/j.compositesb.2019.107147.
53. Nugraha, A.D.; Syahril, M.; Muflikhun, M.A. Excellent Performance of Hybrid Model Manufactured via Additive Manufacturing Process Reinforced with GFRP for Sport Climbing Equipment. *Heliyon* 2023, 9, doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14706.
54. Naranjo-Lozada, J.; Ahuett-Garza, H.; Orta-Castañón, P.; Verbeeten, W.M.H.; Sáiz-González, D. Tensile Properties and Failure Behavior of Chopped and Continuous Carbon Fiber Composites Produced by Additive Manufacturing. *Addit Manuf* 2019, 26, 227–241, doi:10.1016/j.addma.2018.12.020.
55. Zhang, Y.; Qiao, J.; Zhang, G.; Li, Y.; Li, L. Prediction of Deformation and Failure Behavior of Continuous Fiber Reinforced Composite Fabricated by

- Additive Manufacturing. *Compos Struct* 2021, 265, doi:10.1016/j.compstruct.2021.113738.
56. Muflikhun, M.A.; Syahril, M.; Mamba'udin, A.; Santos, G.N.C. A Novel of Hybrid Laminates Additively Manufactured via Material Extrusion – Vat Photopolymerization. *Journal of Engineering Research* 2023, 100146, doi:10.1016/j.jer.2023.100146.
 57. Liu, Z.; Wang, Y.; Wu, B.; Cui, C.; Guo, Y.; Yan, C. A Critical Review of Fused Deposition Modeling 3D Printing Technology in Manufacturing Polylactic Acid Parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019, 102, 2877–2889.
 58. Popescu, D.; Zapciu, A.; Amza, C.; Baci, F.; Marinescu, R. FDM Process Parameters Influence over the Mechanical Properties of Polymer Specimens: A Review. *Polym Test* 2018, 69, 157–166, doi:10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.
 59. Tymrak, B.M.; Kreiger, M.; Pearce, J.M. Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers under Realistic Environmental Conditions. *Mater Des* 2014, 58, 242–246, doi:10.1016/j.matdes.2014.02.038.
 60. Kabir, S.M.F.; Mathur, K.; Seyam, A.F.M. The Road to Improved Fiber-Reinforced 3D Printing Technology. *Technologies (Basel)* 2020, 8, doi:10.3390/technologies8040051.
 61. Parandoush, P.; Lin, D. A Review on Additive Manufacturing of Polymer-Fiber Composites. *Compos Struct* 2017, 182, 36–53.
 62. Wang, X.; Jiang, M.; Zhou, Z.; Gou, J.; Hui, D. 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective. *Compos B Eng* 2017, 110, 442–458.
 63. Goh, G.D.; Yap, Y.L.; Agarwala, S.; Yeong, W.Y. Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. *Adv Mater Technol* 2019, 4.

64. Papon, E.A.; Haque, A. Fracture Toughness of Additively Manufactured Carbon Fiber Reinforced Composites. *Addit Manuf* 2019, *26*, 41–52, doi:10.1016/j.addma.2018.12.010.
65. Brenken, B.; Barocio, E.; Favaloro, A.; Kunc, V.; Pipes, R.B. Fused Filament Fabrication of Fiber-Reinforced Polymers: A Review. *Addit Manuf* 2018, *21*, 1–16.
66. Goh, G.D.; Dikshit, V.; Nagalingam, A.P.; Goh, G.L.; Agarwala, S.; Sing, S.L.; Wei, J.; Yeong, W.Y. Characterization of Mechanical Properties and Fracture Mode of Additively Manufactured Carbon Fiber and Glass Fiber Reinforced Thermoplastics. *Mater Des* 2018, *137*, 79–89, doi:10.1016/j.matdes.2017.10.021.
67. Sanei, S.H.R.; Popescu, D. 3d-Printed Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites: A Systematic Review. *Journal of Composites Science* 2020, *4*.
68. van de Werken, N.; Tekinalp, H.; Khanbolouki, P.; Ozcan, S.; Williams, A.; Tehrani, M. Additively Manufactured Carbon Fiber-Reinforced Composites: State of the Art and Perspective. *Addit Manuf* 2020, *31*.
69. Blok, L.G.; Longana, M.L.; Yu, H.; Woods, B.K.S. An Investigation into 3D Printing of Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. *Addit Manuf* 2018, *22*, 176–186, doi:10.1016/j.addma.2018.04.039.
70. Vasile, A.; Constantinescu, D.M.; Coropețchi, I.C.; Sorohan, Ștefan; Apostol, D.A. Definition, Fabrication, and Compression Testing of Sandwich Structures with Novel TPMS-Based Cores. *Materials* 2024, *17*, doi:10.3390/ma17215150.
71. Studart, A.R. Additive Manufacturing of Biologically-Inspired Materials. *Chem Soc Rev* 2016, *45*, 359–376.
72. Caputo, A.C.; Pelagagge, P.M.; Salini, P. Heat Exchanger Design Based on Economic Optimisation. *Appl Therm Eng* 2008, *28*, 1151–1159, doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.08.010.

73. Bell, K.J. Heat Exchanger Design for the Process Industries. *J Heat Transfer* 2004, *126*, 877–885, doi:10.1115/1.1833366.
74. Shah, R.K.; Sekulib, D.R. *HEAT EXCHANGERS*;
75. Stehlik, P.; Wadekar, V. V. Different Strategies to Improve Industrial Heat Exchange. *Heat Transfer Engineering* 2002, *23*, 36–48, doi:10.1080/01457630290098673.
76. Thet, S.; Than, M.; Lin, K.A.; Mon, M.S. *Heat Exchanger Design*;
77. Fakheri, A. Heat Exchanger Efficiency. *J Heat Transfer* 2007, *129*, 1268–1276, doi:10.1115/1.2739620.
78. Attarzadeh, R.; Attarzadeh-Niaki, S.H.; Duwig, C. Multi-Objective Optimization of TPMS-Based Heat Exchangers for Low-Temperature Waste Heat Recovery. *Appl Therm Eng* 2022, *212*, doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118448.
79. Iyer, J.; Moore, T.; Nguyen, D.; Roy, P.; Stolaroff, J. Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Heat Exchangers Based on Triply Periodic Minimal and Periodic Nodal Surfaces. *Appl Therm Eng* 2022, *209*, doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118192.
80. Dixit, T.; Al-Hajri, E.; Paul, M.C.; Nithiarasu, P.; Kumar, S. High Performance, Microarchitected, Compact Heat Exchanger Enabled by 3D Printing. *Appl Therm Eng* 2022, *210*, doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118339.
81. Attarzadeh, R.; Rovira, M.; Duwig, C. Design Analysis of the "Schwartz D" Based Heat Exchanger: A Numerical Study. *Int J Heat Mass Transf* 2021, *177*, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121415.
82. Borjigin, S.; Zhao, W.; Fu, W.; Liang, W.; Bai, S.; Ma, J.; Meng, K.; Baoyin, H. Review of Plate Heat Exchanger Utilized for Gases Heat Exchange. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2025, *210*, 115224, doi:10.1016/j.rser.2024.115224.

83. Li, W.; Yu, G.; Yu, Z. Bioinspired Heat Exchangers Based on Triply Periodic Minimal Surfaces for Supercritical CO₂ Cycles. *Appl Therm Eng* 2020, 179, doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115686.
84. Thomas, N.; Sreedhar, N.; Al-Ketan, O.; Rowshan, R.; Abu Al-Rub, R.K.; Arafat, H. 3D Printed Triply Periodic Minimal Surfaces as Spacers for Enhanced Heat and Mass Transfer in Membrane Distillation. *Desalination* 2018, 443, 256–271, doi:10.1016/j.desal.2018.06.009.
85. Qureshi, Z.A.; Elnajjar, E.; Al-Ketan, O.; Al-Rub, R.A.; Al-Omari, S.B. Heat Transfer Performance of a Finned Metal Foam-Phase Change Material (FMF-PCM) System Incorporating Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). *Int J Heat Mass Transf* 2021, 170, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121001.
86. Qureshi, Z.A.; Al-Omari, S.A.B.; Elnajjar, E.; Al-Ketan, O.; Abu Al-Rub, R. Nature-Inspired Triply Periodic Minimal Surface-Based Structures in Sheet and Solid Configurations for Performance Enhancement of a Low-Thermal-Conductivity Phase-Change Material for Latent-Heat Thermal-Energy-Storage Applications. *International Journal of Thermal Sciences* 2022, 173, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2021.107361.
87. Qureshi, Z.A.; Addin Burhan Al-Omari, S.; Elnajjar, E.; Al-Ketan, O.; Al-Rub, R.A. On the Effect of Porosity and Functional Grading of 3D Printable Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Based Architected Lattices Embedded with a Phase Change Material. *Int J Heat Mass Transf* 2022, 183, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122111.
88. Qureshi, Z.A.; Al-Omari, S.A.B.; Elnajjar, E.; Al-Ketan, O.; Al-Rub, R.A. Using Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)-Based Metal Foams Structures as Skeleton for Metal-Foam-PCM Composites for Thermal Energy Storage and Energy Management Applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2021, 124, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105265.

89. Di Dio, Salvatore. *Communities' Sustainable Experiences*; Altralinea edizioni, 2024; ISBN 9791280178992.
90. Marabello, G.; Chairi, M.; Di Bella, G. Optimising Additive Manufacturing to Produce PLA Sandwich Structures by Varying Cell Type and Infill: Effect on Flexural Properties. *Journal of Composites Science* 2024, 8, 360, doi:10.3390/jcs8090360.
91. Calabrese, L.; Marabello, G.; Chairi, M.; Di Bella, G. Optimization of Deposition Temperature and Gyroid Infill to Improve Flexural Performance of PLA and PLA–Flax Fiber Composite Sandwich Structures. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2025, 9, 31, doi:10.3390/jmmp9020031.
92. Palomba, V. Thermal and Mechanical Performance of TPMS-Based Heat Exchangers Fabricated via Additive Manufacturing: A Focus on Gyroid Structures.; 2025; pp. 114–123.
93. Di Bella, G.; Chairi, M.; Marabello, G.; Palomba, V. Mechanical Performance of Thin-Walled TPMS Structures Fabricated via MSLA for Advanced Heat Exchangers: Influence of Geometry and Resin. *Journal of Sandwich Structures & Materials* 2025, doi:10.1177/10996362251364961.
94. Panfiglio, S. Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Steel Joints in Shipbuilding Using Machine Learning and Finite Element Analysis.; 2025; pp. 1394–1402.
95. Marabello, G.; Mastronardo, E.; Palamara, D.; Frazzica, A.; Calabrese, L. Tailored 3D Lattice SAPO-34/S-PEEK Composite Sorbents by Additive Manufacturing for Sorption Heat Transformation Applications. *Materials* 2025, 18, 3428, doi:10.3390/ma18153428.
96. Di Bella, G.; Marabello, G.; Panfiglio, S.; Brancato, B.; Frusteri, L.; D'Urso, C.; Briguglio, N. Exploring 3D Printed Components for a New MEA Manufacturing Process in PEMWE Applications. *Sustainable Materials and Technologies* 2025, 44, e01403, doi:10.1016/j.susmat.2025.e01403.