

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

Tesi di Laurea Magistrale

# Progettazione e sviluppo tramite stampa 3D di inserti di stampi per Injection Molding



**Politecnico  
di Torino**

**Relatore**

Prof. Alberto Frache

**Correlatori**

Dott. Daniele Battezzore

Dott.ssa Giulia Bernagozzi

**Candidato**

Alvaro Maggio

Ottobre 2024



## Indice

<b>1. Stato dell'arte</b> .....	<b>1</b>
1.1. Sviluppo delle tecnologie di Additive Manufacturing .....	2
1.2. Il processo di Additive Manufacturing: dal progetto all'applicazione .....	2
1.3. Vantaggi della Produzione Additiva .....	5
1.4. Classificazione dei Processi di Additive Manufacturing.....	7
1.5. Material Extrusion (MEX) .....	8
1.6. Rapid Prototyping, Rapid Tooling e Rapid Manufacturing .....	14
1.6.1. Soft Tooling.....	17
1.6.2. Hard Tooling.....	18
1.6.3. Direct Rapid Tooling .....	18
1.6.4. Indirect Rapid Tooling.....	19
1.7. Lo Stampaggio ad Iniezione per la produzione di oggetti in materiale polimerico.	20
1.7.1. Tempo Ciclo e Costo di produzione per pezzo stampato.....	24
1.7.2. Produzione mediante Additive Manufacturing di inserti e stampi per lo Stampaggio ad Iniezione .....	26
<b>2. Materiali e Metodi</b> .....	<b>31</b>
2.1. Materiali utilizzati per la realizzazione degli inserti .....	31
2.1.1. FILOALFA ® GRAFYLON ® 3D.....	31
2.1.2. FILOALFA ® ALFAOMNIA .....	32
2.1.3. FILOALFA ® ALFANYLON CF .....	34
2.1.4. Roboze ® Carbon PA .....	36
2.1.5. GEEETECH ® PLA .....	40
2.1.6. Lega di Alluminio Ergal 7075 .....	40
2.1.7. Acciaio I.2083.....	40
2.2. Materiali utilizzati per lo stampaggio ad iniezione .....	41
2.2.1. ENI Versalis Riblene ® MR 10 R .....	41
2.2.2. LyondellBasell Moplen HP500N.....	42
2.2.3. NaturePlast PBE 003 .....	42
2.2.4. NatureWorks ® Ingeo™ 3251D .....	43
2.2.5. Maip IamNature B6A13 .....	44
2.2.6. Blend Polimerici.....	44
2.3. Strumenti utilizzati per la realizzazione dei blend, degli inserti di stampi e degli stampati ad iniezione.....	45
2.3.1. Compounding: Estrusore bivate co-rotante Thermo Fisher Scientific™ Process 11 .....	45

2.3.2.	<i>Produzione dei provini per prove reologiche: Pressa a piani paralleli riscaldati Collin P200 T</i>	46
2.3.3.	<i>Produzione degli inserti: Stampante 3D Roboze One &amp; Software Simplify 3D</i>	47
2.3.4.	<i>Produzione degli stampati: Stampante ad iniezione “Wittmann Battenfeld SmartPower50”</i>	51
2.3.5.	<i>Produzione degli stampati: lo stampo ad iniezione</i>	52
2.4.	<i>Strumenti utilizzati per la caratterizzazione dei materiali</i>	54
2.4.1.	<i>Caratterizzazione reologica: Reometro a piatti piani paralleli TA Instruments Ares</i>	54
2.4.2.	<i>Caratterizzazione morfologica: SEM Zeiss EVO 15</i>	56
2.4.3.	<i>Prove di conducibilità termica: Hot Disk ® TPS 2500 S</i>	57
2.4.4.	<i>Caratterizzazione meccanica: Dinamometro Zwick – Roell Z100</i>	59
2.4.5.	<i>Caratterizzazione morfologica degli stampati ad iniezione: Profilometro Mahr MarSurf CD120</i>	61
2.4.6.	<i>Caratterizzazione morfologica degli stampati ad iniezione: Rugosimetro HommelTester T1000</i>	63
2.4.8.	<i>Caratterizzazione termica: Calorimetria differenziale a scansione (DSC) TA Instruments DSCQ20</i>	66
2.4.9.	<i>Caratterizzazione termica: Termocamera Optris PI 640i &amp; software Optris PIX Connect</i>	67
2.4.10.	<i>Prove dinamico – meccaniche: TA Instruments DMA Q800</i>	68
<b>3.</b>	<b>Risultati e Discussione</b>	<b>73</b>
3.1.	<i>Produzione di inserti di stampi per stampaggio ad iniezione mediante Fused Filament Fabrication (FFF)</i>	73
3.1.1.	<i>Parametri di processo per la realizzazione di provini per la caratterizzazione del materiale e di inserti di stampi</i>	73
3.1.2.	<i>Caratterizzazione dei materiali: stato “as printed”</i>	74
3.1.2.1.	<i>Caratterizzazione termica: DSC</i>	74
3.1.2.2.	<i>Caratterizzazione dinamico – meccanica: DMA</i>	76
3.1.1.1.	<i>Conducibilità termica: Hot Disk</i>	79
3.1.2.	<i>Trattamento termico sui materiali</i>	81
3.1.3.	<i>Caratterizzazione dei materiali dopo l’esecuzione del trattamento termico</i>	81
3.1.3.1.	<i>Caratterizzazione termica: DSC</i>	82
3.1.2.3.	<i>Caratterizzazione dinamico – meccanica: DMA</i>	85
3.1.2.4.	<i>Conducibilità termica: Hot Disk</i>	89
3.1.3.	<i>Realizzazione degli inserti di stampi finali da impiegare nel processo di stampaggio ad iniezione</i>	91
3.2.	<i>Materiali commerciali e blend polimerici per Stampaggio ad Iniezione</i>	93

3.2.1.	<i>Caratterizzazione termica: DSC</i> .....	93
3.2.2.	<i>Caratterizzazione reologica</i> .....	95
3.3.	<i>Stampaggio ad Iniezione</i> .....	97
3.3.1.	<i>Produzione degli stampati ad iniezione in LDPE: parametri di processo</i> .....	98
3.3.1.1	<i>Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto in Acciaio 1.2083</i> .....	98
3.3.1.3	<i>Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in R-CPA</i> .....	101
3.3.1.4	<i>Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in F-ANY</i> .....	102
3.3.1.5	<i>Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in F-G3D TT80X60</i> 104	
3.3.1.6	<i>Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in F-G3D TT50X30</i> 106	
3.3.1.7	<i>Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto G-PLA</i> .....	108
3.3.2	<i>Effetto della Pressione di Mantenimento sul peso degli stampati ad iniezione</i> .	113
3.3.3	<i>Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali</i> .....	118
3.3.2	<i>Produzione degli stampati ad iniezione in PBS: parametri di processo</i> .....	122
3.3.2.1	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in Acciaio 1.2083</i> .....	123
3.3.2.2	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in Ergal 7075</i> .....	125
3.3.2.3	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in F-AOM</i> .....	126
3.3.2.4	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in R-CPA</i> .....	128
3.3.2.5	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in F-ANY</i> .....	130
3.3.2.6	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in F-G3D TT50X30</i> ..	131
3.3.2.7	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in G-PLA</i> .....	133
3.3.2.8	<i>Monitoraggio del peso degli stampati ad iniezione in PBS</i> .....	136
3.3.3	<i>Produzione degli stampati ad iniezione in PBS90PHBH10: parametri di processo</i> .....	142
3.3.3.1	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 con inserto in Acciaio 1.2083</i> ..	142
3.3.3.2	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 con inserto prodotto in R-CPA</i>	144
3.3.3.3	<i>Monitoraggio del peso degli stampati in PBS90PHBH10</i> .....	145
3.3.5.3	<i>Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali</i> .....	146
3.3.4	<i>Produzione degli stampati ad iniezione in PBS80PHBH20: parametri di processo</i> .....	149
3.3.4.1	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 con inserto in Acciaio 1.2083</i> ..	149
3.3.4.2	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 con inserto prodotto in R-CPA</i>	150
3.3.4.3	<i>Monitoraggio del peso degli stampati in PBS80PHBH20</i> .....	153
3.3.4.4	<i>Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali</i> .....	153

3.3.5	<i>Produzione degli stampati ad iniezione in PBS90PLA10: parametri di processo...</i>	156
3.3.5.1	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 con inserto in Acciaio 1.2083</i>	156
3.3.5.2	<i>Stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 con inserto prodotto in R-CPA</i>	157
3.3.5.3	<i>Monitoraggio del peso degli stampati in PBS90PLA10</i>	159
3.3.5.4	<i>Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali</i>	160
3.3.6	<i>Produzione degli stampati ad iniezione in PP: parametri di processo</i>	162
3.3.6.1	<i>Stampaggio ad iniezione di PP con inserto in Acciaio 1.2083</i>	162
3.3.6.2	<i>Stampaggio ad iniezione di PP con inserto in Ergal 7075</i>	163
3.3.6.3	<i>Stampaggio ad iniezione di PP con inserto prodotto in R-CPA</i>	164
3.3.6.4	<i>Stampaggio ad iniezione di PP con inserto "Zipper" prodotto in R-CPA</i>	165
3.3.6.5	<i>Monitoraggio del peso degli stampati in PP</i>	167
3.3.6.6	<i>Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali</i>	169
3.4.	<i>Monitoraggio delle dimensioni degli inserti</i>	171
3.4.1.	<i>Dimensioni dell'inserto in Acciaio 1.2083</i>	172
3.4.2.	<i>Dimensioni dell'inserto in Ergal 7075 ("AL")</i>	172
3.4.3.	<i>Dimensioni dell'inserto in F-AOM</i>	172
3.4.4.	<i>Dimensioni dell'inserto in R-CPA</i>	173
3.4.5.	<i>Dimensioni dell'inserto in F-ANY</i>	175
3.4.6.	<i>Dimensioni dell'inserto in F-G3D TT80X60</i>	177
3.4.7.	<i>Dimensioni dell'inserto in F-G3D TT50X30</i>	178
3.4.8.	<i>Dimensioni dell'inserto in G-PLA</i>	179
3.4.9.	<i>Monitoraggio delle dimensioni degli inserti: analisi dei dati</i>	180
3.5.	<i>Cicli di stampaggio ad iniezione: monitoraggio della temperatura dello stampo</i>	182
3.5.1.	<i>Cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE</i>	182
3.5.2.	<i>Cicli di stampaggio ad iniezione di PBS</i>	200
3.5.3.	<i>Cicli di stampaggio ad iniezione dei blend polimerici</i>	213
3.5.4.	<i>Cicli di stampaggio ad iniezione di PP</i>	222
3.6.	<i>Caratterizzazione meccanica degli inserti: prove a compressione</i>	230
<b>4.</b>	<b>Conclusioni e Prospettive Future</b>	<b>235</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>239</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>249</b>

## 1. Stato dell'arte [1,2]

I mercati moderni, in continua evoluzione, impongono requisiti sempre più severi e stringenti ai processi di sviluppo e produttivi: oltre prodotti qualitativamente migliorati, più performanti e flessibilità nello sviluppo e nella progettazione, si richiede l'ottimizzazione della produzione stessa, che si coniuga nella riduzione dei tempi di prototipizzazione, di realizzazione e dei costi ad essa connessi.

Per soddisfare le richieste produttive dell'era industriale moderna, a partire dalla seconda metà degli anni '80 sono stati sviluppati i processi di *Additive Manufacturing* (AM), attraverso cui è possibile realizzare l'oggetto finale tramite aggiunta progressiva di materiale, strato per strato.

Secondo lo standard terminologico ISO/ASTM 52900:2021, [3] prodotto dall'International Organization for Standardization (ISO) e dall'American Society for Testing Materials (ASTM), il termine Additive Manufacturing viene definito come “il termine generale per quelle tecnologie che gradualmente giungano materiale per realizzare oggetti a partire da dati di un modello 3D, solitamente strato per strato, in opposizione alle metodologie di produzione sottrattiva”.

Dunque, è la metodologia di produzione la connotazione che permette di differenziare le tecniche additive dalle sottrattive, più tradizionali: mentre le ultime consentono di ottenere l'oggetto nella forma e dimensioni finali per progressiva asportazione di materiale da un blocco di dimensioni superiori rispetto al componente da realizzare, contenente la geometria da ricavare, le prime sfruttano la produzione di certo numero di sezioni trasversali bidimensionali che riproducono insieme il modello tridimensionale del oggetto da produrre.

Storicamente, i moderni processi di AM sono stati sfruttati principalmente per il *Rapid Prototyping* (RP), espressione ampiamente utilizzata in una grande varietà di ambiti produttivi ed industriali per descrivere i processi di realizzazione di un prodotto fisico (inteso come un modello base o parti dello stesso), in tempi celeri, partendo direttamente dalla definizione tridimensionale dell'oggetto mediante un progetto di *Computer Aided Design* (CAD).

Lo scopo principale del RP è migliorare o rimpiazzare un prodotto già realizzato in precedenza in modo più rapido rispetto alle tecniche di produzione convenzionali, non solo riferendosi alla velocità con cui tali oggetti possono essere prodotti, ma all'intero processo di realizzazione, dalla progettazione alla commercializzazione, snellendone gli step produttivi. Realizzando in breve tempo un primo modello di un prodotto, si possono valutare le caratteristiche estetiche, geometriche, funzionali e tecniche, e si possono valutare tempi e costi costruttivi, ottimizzandone il ciclo di produzione.

Successivamente, l'applicazione delle tecniche di AM ha riguardato il *Rapid Tooling* (RT) ovvero la realizzazione rapida di interi utensili, stampi o loro porzioni principali: in questo modo si è riusciti a sfruttare la semplicità della realizzazione *layer by layer* per ridurre significativamente tempo di produzione e costo di parti geometricamente più impegnative di utensili e stampi, senza la necessità di provvedere a delle scorte di produzione.

Ulteriori sviluppi nelle procedure di AM hanno interessato la *Rapid Manufacturing* (RM): le tecniche di produzione additiva sono state valorizzate sia nella produzione diretta di prodotti in tiratura limitata, su piccola scala, sia nella realizzazione di singoli prodotti, senza la necessità di dover utilizzare successivi utensili per ultimare la produzione.

### 1.1. *Sviluppo delle tecnologie di Additive Manufacturing*

Le tecniche di produzione additiva sono nate dall'integrazione di differenti tecnologie:

- *Computers*: la loro funzione principale è quella di garantire la corretta integrazione tra diversi componenti o differenti processi, assicurando un accurato controllo della macchina e una precisa movimentazione e posizionamento degli strumenti durante le fasi di produzione. Possono accogliere nel sistema enormi quantità di dati che vengono condivisi con i macchinari deputati alla realizzazione fisica del componente e garantiscono prestazioni incomparabili a livello di potenza di processo e di calcolo per poter maneggiare, modificare i files ed impostare le configurazioni dei macchinari per la produzione.

La disposizione di un'ottimizzata interfaccia grafica per l'utilizzatore, (GUI, Graphical User Interface), permette sia una configurazione, un utilizzo e una manutenzione più agevoli dei macchinari, ma anche la visualizzazione di immagini 3D e, quindi, il poter impiegare in modo esteso l'invenzione del CAD, fondamentale per lo sviluppo delle tecniche di Additive Manufacturing.

- *Tecnologia CAD*: assiste in modo veloce e accurato la fase di sviluppo di nuovi progetti, consentendo di realizzare anche piccole parti complesse e dettagliate su oggetti e sistemi di dimensioni molto maggiori senza perdere l'integrità dei dati; viene prodotta un'immagine tridimensionale realistica dell'oggetto, utile per la visualizzazione completa del modello, calcolandone proprietà come massa, volume, valutando la possibilità di accoppiamento con altre parti (tolleranze). In alcuni casi, in output può esser prodotto un file già suddiviso in un numero variabile di layer, pronto per la realizzazione mediante tecniche di produzione additiva;
- *Conversione CAM*: i modelli virtuali sviluppati mediante tecnologia CAD possono essere convertiti nei prodotti fisici attraverso la *Computer – Aided Manufacture* (CAM); viene prodotto un codice per i macchinari che combina dati sulle coordinate di un dato sistema di riferimento (solidale al macchinario) con comandi sulla selezione e l'impiego di particolari strumenti, in modo automatizzato.

### 1.2. *Il processo di Additive Manufacturing: dal progetto all'applicazione*

In generale, il processo di produzione additiva che porta dal progetto CAD al modello fisico del prodotto può essere suddiviso in differenti step [4]:

- *Realizzazione CAD*: è un modello solido, tridimensionale o bidimensionale del componente da realizzare, ottenuto tramite particolari software di computer grafica adatti a supportare la fase di progettazione.

Disporre di un progetto CAD completo permette di rendere più efficienti le fasi di progettazione e produzione: infatti, possono attuarsi non solo modifiche al progetto iniziale in modo semplice ed economico (perché tali cambiamenti possono essere eseguiti virtualmente sul software e non direttamente sul prodotto fisico) ma anche dei test preliminari accoppiando il software CAD con altri pacchetti software tipo *Finite Element Method* (FEM), metodo numerico di simulazione per calcolare le proprietà di un componente operando una discretizzazione dell'intero volume dell'oggetto con la creazione di un numero finito di sottodomini geometricamente più semplici, o, più in generale, software tipo *Computer – Aided Engineering* (CAE) per calcolare le proprietà di un progetto, studiandone il comportamento sotto determinate condizioni: questi approcci, combinati con esperimenti fisici sui componenti realizzati per produzione additiva, permettono di prevedere in modo approfondito il comportamento di un pezzo o di un prodotto. Un'ulteriore considerazione che deve essere fatta è sulla possibilità di eliminare il materiale di supporto durante la produzione (essenzialmente un materiale sacrificale che viene rimosso in seguito ed utile per il sostegno di particolari sezioni durante la realizzazione del prodotto): questo può essere sostituito con parti permanenti, che non vengono rimosse nello step successivo alla produzione.

- *Conversione in file STL*: il modello CAD deve essere convertito in un file che contiene esclusivamente informazioni in merito la superficie esterna della geometria dell'oggetto rappresentato dal modello tridimensionale. Il tipico formato a cui si fa riferimento è STL, ovvero *Standard Tessellation Language*: tale processo di conversione consiste nello scomporre l'intera superficie del modello CAD in forme geometriche primitive, ad esempio triangoli o quadrati, senza che rimangano spazi vuoti, lacune o che ci siano sovrapposizioni (con una procedura idealmente simile a quella di una piastrellatura di un pavimento) e infine passare al software di slicing.

Considerando il caso di entità geometriche triangolari per rappresentare la superficie di un componente che deve essere costruito, ogni triangolo nel file in formato STL è descritto da tre punti e un vettore normale uscente dalla faccia del triangolo così descritta.

Nella Figura 1 viene rappresentato il modello CAD di una tazzina (sinistra) e il modello convertito in un file STL (destra).



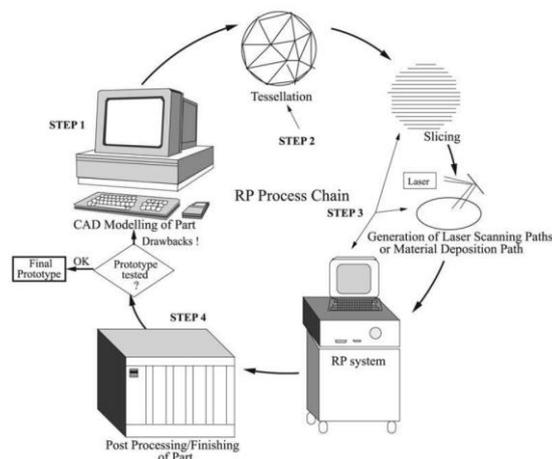
**Figura 1:** Modello CAD di una tazzina (sinistra) e relativa conversione in file STL (destra). [2]

- *Trasferimento del file al macchinario di Additive Manufacturing e manipolazione del file STL*: l'oggetto viene preparato per la fase di costruzione vera e propria andando a modificare orientazione, posizionamento ed eventualmente anche le dimensioni. L'orientazione specifica dell'oggetto nel volume di costruzione è lo step decisivo per la realizzazione dell'oggetto: tale decisione determina la direzione di anisotropia, definisce le proprietà meccaniche, di finitura superficiale, la potenziale formazione di difettosità, la velocità di realizzazione e l'eventuale necessità di strutture di supporto. Non esiste un orientamento ottimale, ma bisogna scegliere un preciso orientamento, valutando, caso per caso, gli effetti sulla realizzazione della parte e sulla necessità di una successiva elaborazione dopo la produzione, al fine di adattare le proprietà ottenute all'utilizzo finale, che estende i tempi di consegna ed aumenta di costi complessivi di produzione.
- *Configurazione della macchina*: vengono designate le impostazioni che determinano i parametri di costruzione come la sorgente energetica, i vincoli del materiale, l'altezza dello strato. L'algoritmo associato al software di *slicing* provvede a suddividere il volume dell'oggetto in un certo numero di sezioni trasversali e a salvare tale informazione in un file che verrà eseguito dalla macchina durante la fase di produzione: maggiore è lo spessore delle singole sezioni trasversali in cui il componente viene suddiviso, minore sarà la finitura superficiale dell'oggetto completato. La possibilità di scomporre un oggetto complesso e articolato tridimensionale in una serie di più semplici sezioni trasversali bidimensionali dotate di uno specifico spessore nominale, semplifica il processo produttivo che può essere semplificato come il processo di giunzione tra le singole *cross section* lungo un ben preciso percorso: ciò rende possibile il realizzare geometrie piuttosto complesse, aspetto non facilmente realizzabile con i metodi di produzione convenzionali. È necessario ottimizzare i parametri di processo al fine di limitare la formazione di possibili difettosità nei pezzi finiti (come la formazione di piccoli vuoti, un'adesione non ottimale tra le sezioni trasversali adiacenti, degradazione del materiale durante le fasi di realizzazione).
- *Costruzione del componente*: l'oggetto viene realizzato con un processo automatizzato, in cui l'operatore ha il compito di verificare che non vi siano errori macroscopici o anomalie nel funzionamento del macchinario.
- *Rimozione del componente prodotto*: l'operatore provvede alla rimozione dell'oggetto dal macchinario di Additive Manufacturing nelle condizioni di sicurezza prescritte dall'utilizzo del macchinario stesso.
- *Post – processing*: al fine di ottenere un componente dalle proprietà meccaniche, estetiche e funzionali desiderate, dopo la fase di costruzione *layer by layer* dell'oggetto, sono necessarie delle ulteriori lavorazioni (ad esempio la sabbiatura, la verniciatura, la rimozione dei supporti sfruttati in fase di costruzione, trattamenti termici per rilasciare le tensioni accumulate nella fase di produzione, eliminazione della porosità residua mediante infiltrazione o sinterizzazione, assemblaggio di varie parti meccaniche o elettroniche etc.). Tale step richiede una diligente manipolazione perché le parti prodotte potrebbero essere ancora sufficientemente deboli o avere caratteristiche che devono essere ulteriormente modificate.

- *Applicazione*: gli oggetti prodotti sono pronti per poter essere testati e, successivamente, utilizzati; le proprietà dei prodotti ottenuti per Additive Manufacturing sono anisotrope, ovvero assumono valori differenti in funzione della direzione considerata per la valutazione della proprietà stessa, ma ciò può essere una caratteristica desiderabile in alcune applicazioni.

Dunque, gli step di produzione tramite *Additive Manufacturing* sono abbastanza articolati. È richiesta un'attenta manutenzione dei macchinari coinvolti nella produzione e un'accorta pulizia dello stesso macchinario e dell'ambiente in cui viene posizionato, affinché possano lavorare in modo corretto: programmando periodicamente dei controlli è possibile evitare costose sostituzioni della strumentazione malfunzionante.

I materiali impiegati nelle tecniche di fabbricazione additiva, inoltre, devono essere maneggiati e gestiti con cautela e prudenza poiché possono avere una limitata *shelf-life* o possono incorrere in reazioni indesiderate o possono degradare se esposti all'umidità, alla luce solare, a reagenti o particolari contaminanti. Nella Figura 2 viene rappresentato in modo sintetico e completo il classico ciclo di *Rapid Prototyping*.



**Figura 2:** Schematizzazione del ciclo di Rapid Prototyping. [5]

### 1.3. Vantaggi della Produzione Additiva

I vantaggi connessi all'utilizzo di processi di AM sono diversi e interessano sia la fase progettuale di sviluppo di un prodotto che quella della produzione vera e propria, entrambe semplificate, abbattendone tempi e i costi. [6,7,8]

Tali benefici, più nel dettaglio, riguardano:

1. *Sviluppo del prodotto*: il tempo per la prototipazione è molto ridotto, per cui si possono agevolmente identificare e correggere eventuali errori durante lo sviluppo, si può testare in anticipo la resistenza e la durabilità del prodotto al fine di ottimizzarne le caratteristiche qualora non siano funzionalmente adeguate. Si dispone di grande libertà nel design: possono realizzarsi geometrie molto complesse con dettaglio e accuratezza, anche con l'obiettivo di alleggerire la struttura, svuotando

parti piene o creando strutture reticolari (impensabile da attuare con le tecniche di lavorazione tradizionalmente impiegate) e possono prodursi componenti dalle funzionalità migliorate, realizzato nelle sue parti, fatte anche di materiali differenti in varie combinazioni, senza un successivo assemblaggio.

2. *Produzione*: il controllo strato per strato sulla fase produttiva permette di individuare facilmente fasi critiche o errori nel sistema di produzione, correggendo tempestivamente gli step di esecuzione, al fine di migliorare le proprietà del prodotto finito; l'oggetto viene progettato, realizzato e testato in modo rapido e preciso, snellendo le fasi della produzione; inoltre, rispetto alle classiche tecniche di produzione sottrattive, utilizzando le tecniche di produzione additive si riducono fortemente gli scarti complessivi di lavorazione, rendendo più efficiente la produzione. La tecnologia additiva può essere considerata come una tecnica che permette di produrre un oggetto in un singolo stadio, contrariamente ai processi che impiegano macchinari *Computerized Numerical Control* (CNC), la cui produzione è considerata a stadi multipli, richiedendo spesso il riposizionamento o il ricollocamento dell'oggetto su diversi macchinari prima del completamento finale del componente stesso. Sia le tecniche di produzione additiva che di produzione sottrattiva sono delle tecniche computerizzate e per entrambe è necessario programmare la sequenza di azioni che il macchinario deve svolgere in modo automatizzato: se per le tecniche tradizionali tale step è molto complesso, perché è necessario scegliere l'utensile adeguato alla lavorazione da svolgere, posizionamento, velocità e angolo di avvicinamento della macchina, per le tecniche additive la gamma di variabili da impostare sono inferiori. Inoltre, eventuali errori porteranno esclusivamente ad oggetti non costruiti adeguatamente, quindi, a scarti, mentre invece nel caso delle tecniche di produzione sottrattive, una programmazione errata di un macchinario può causare gravi danni al macchinario e consistere in gravi rischi per l'operatore specializzato. In aggiunta, la redditività per le tecniche di manifattura tradizionale è basata sulla realizzazione di un numero elevato di esemplari, mentre lo scopo delle tecniche additive è incentrato su una produzione customizzata e in tempi di consegna brevi: per questi obiettivi, infatti, tali processi risultano essere economicamente vantaggiosi anche perché gli approcci di AM non richiedono l'impiego di una strumentazione particolarmente costosa per cui risulta necessario puntare ad una produzione su larga scala, al fine di recuperare i costi di investimento iniziali.
3. *Qualità*: possono essere eliminati punti critici del processo, nella realizzazione di uno strumento o nella fabbricazione di uno stampo, ottenendo in modo rapido un prototipo fisico; può essere verificata in modo celere la conformità a standard e/o certificazioni, controllando anche la possibilità di disassemblaggio del prodotto per un successivo riciclo e/o per uno smaltimento a fine vita.

Le tecniche di Additive Manufacturing permettono l'attuazione di piccole modifiche progettuali, senza dover ripartire dallo step iniziale di progettazione, in modo economico ed ecocompatibile, garantendo riproducibilità e grande controllo sulla qualità della produzione.

4. *Posizionamento dell'azienda sul mercato:* grazie ai tempi di prototipazione notevolmente ridotti, la fase di testing è considerevolmente anticipata così come il lancio del prodotto sul mercato di un progetto affidabile e ottimizzato nelle sue caratteristiche. Le tempistiche suddette, fortemente ridotte, permettono di programmare, con rilevante anticipo, ulteriori ricerche di mercato e campagne di marketing del prodotto.

La *Supply Chain* viene notevolmente semplificata, servendosi di una produzione che segue la logica *Just-in-Time* (JIT), producendo quanto richiesto in tempi brevi, eliminando la necessità di disporre di stock elevati e, quindi, di un magazzino, riducendone i costi di mantenimento, stoccaggio e movimentazione connessi.

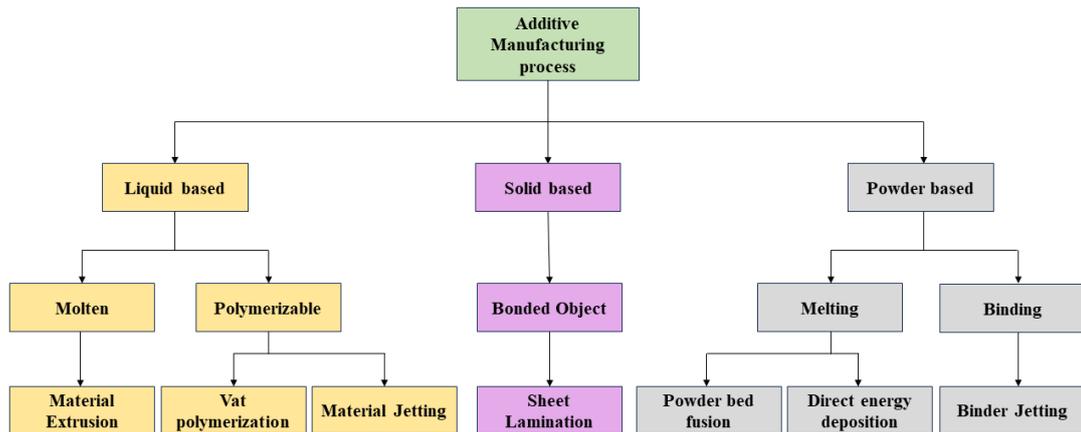
Al netto dei vantaggi presentati, i processi di produzione additiva, in generale, non sono di per sé economici: al costo finale concorrono il tempo della produzione, il costo dei macchinari, la manutenzione degli stessi, il lavoro dell'operatore specializzato, il post-processing, la pulizia ed il costo dei materiali.

Un criterio semplice che può permettere di scegliere in modo efficiente gli approcci di produzione additiva per la produzione di un componente riguarda la complessità geometrica e funzionale di un prodotto: man mano che tale caratteristica aumenta risulta sempre più conveniente ricorrere a tecniche di Additive Manufacturing sia per una questione di costo che per una questione di precisione di realizzazione. Infatti, le forme più complesse possono essere realizzate mediante i processi di Additive Manufacturing senza aumentare significativamente il costo della produzione, mentre i costi per la progettazione e la produzione dello stesso oggetto, ricorrendo ad approcci produttivi tradizionali, vedrebbe aumentare il costo esponenzialmente. [1]

#### 1.4. *Classificazione dei Processi di Additive Manufacturing*

Secondo la *International Organization for Standardization* (ISO) e l'*American Society for Testing Materials* (ASTM), nella norma ISO/ASTM 52900, [3] i processi di Additive Manufacturing possono essere classificati in sette classi, presentate di seguito: tra le categorie elencate, verranno trattati più approfonditamente i concetti teorici relativi alla classe di tecniche di *Material Extrusion* (MEX) perché di maggior interesse per il presente lavoro di tesi.

Nella Figura 3 viene presentata in modo sintetico la classificazione delle tecniche di Additive Manufacturing secondo la ISO/ASTM 52900 [3]: le sette categorie in cui i processi di produzione additiva risultano suddivisi sono *Material Extrusion* (MEX), *Vat Polymerization* (VPP), *Material Jetting* (MJT), *Sheet Lamination* (SHL), *Powder Bed Fusion* (PBF), *Direct Energy Deposition* (DED) e *Binder Jetting* (BJT).



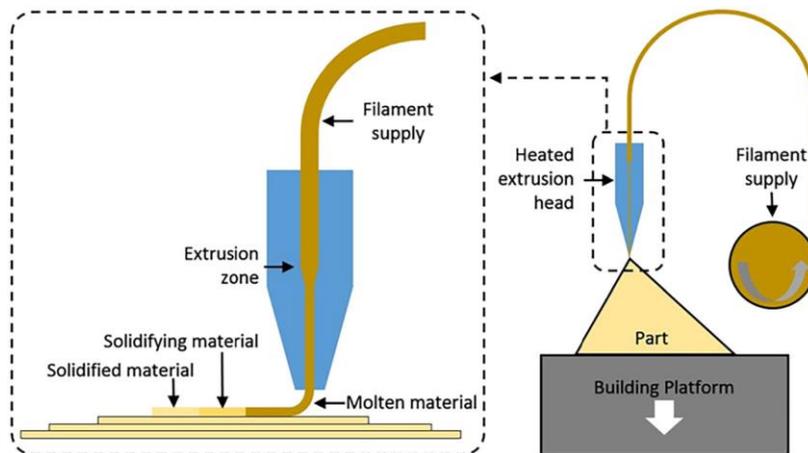
**Figura 3:** Classificazione dei processi di Additive Manufacturing secondo lo standard ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM). [3]

### 1.5. Material Extrusion (MEX)

Materiali polimerici termoplastici, metalli e vetri bassofondenti, slurry ceramici e sospensioni contenenti nanoparticelle, vengono portati ad alta temperatura per produrne la fusione o il rammollimento, e sono depositati selettivamente, applicando una forza o una pressione e seguendo un percorso di deposizione predeterminato, attraversando un estrusore o un ugello. Una volta depositato, il materiale solidifica, mantenendo forma e posizionamento impartiti e realizzando, progressivamente, strato per strato, le sezioni trasversali che riproducono il componente finito.

Quando una generica sezione trasversale viene completata, la piattaforma su cui il materiale viene depositato si abbassa di un'altezza pari allo spessore della successiva sezione trasversale da realizzare, in modo tale da permettere la collocazione di un altro strato (alternativamente, la piattaforma può rimanere alla medesima altezza mentre l'estrusore o l'ugello si elevano dell'altezza pari a quella dello strato successivo da realizzare): in questo modo l'ugello percorre il percorso predefinito depositando il materiale richiesto sulla sezione realizzata precedentemente.

Le tecniche commercialmente utilizzate appartenenti a questa categoria sono la *Fused Deposition Modeling* o la *Fused Filament Fabrication* (FDM o FFF). Il processo FDM o FFF viene rappresentato schematicamente nella Figura 4: il filamento alimenta un estrusore impiegando dei rulli di presa, viene rammollito nell'attraversare l'estrusore e depositato attraverso un ugello sul piatto di stampa.



**Figura 4:** Rappresentazione del processo di Fused Deposition Modelling (FDM). [9]

Le funzioni comuni ai processi di Additive Manufacturing che sfruttano l'estrusione come principio base sono:

- *Caricamento del materiale* (che può essere allo stato liquido, sotto forma di un filamento continuo o come pellet);
- *Rammollimento o liquefazione del materiale:* caso per caso è necessario valutare le condizioni operative di temperatura più opportune per garantire costanza di flusso ed evitare la degradazione del materiale. Infatti, se la temperatura per l'intero processo non dovesse essere controllata adeguatamente, conseguentemente potrebbero formarsi residui nella camera che possono essere difficili da rimuovere e possono contaminare le successive deposizioni;
- *Movimentazione del materiale* mediante applicazione di una pressione o di una forza;
- *Estrusione:* si realizza la deposizione del materiale seguendo un percorso predefinito, facendo aderire il materiale su un layer precedentemente prodotto. Per produrre geometrie particolarmente complesse, è necessario contemplare la realizzazione di strutture di supporto alla stampa delle medesime.

La dimensione dell'estrusore funge da limite inferiore alla dimensione di realizzazione di particolari dell'oggetto: nessuna caratteristica o funzionalità di dimensione inferiore al diametro dell'ugello può essere realizzata. Una dimensione dell'ugello maggiore assicura un flusso di materiale più rapido, producendo un pezzo dall'accuratezza e precisione dimensionale inferiori rispetto al CAD di progetto.

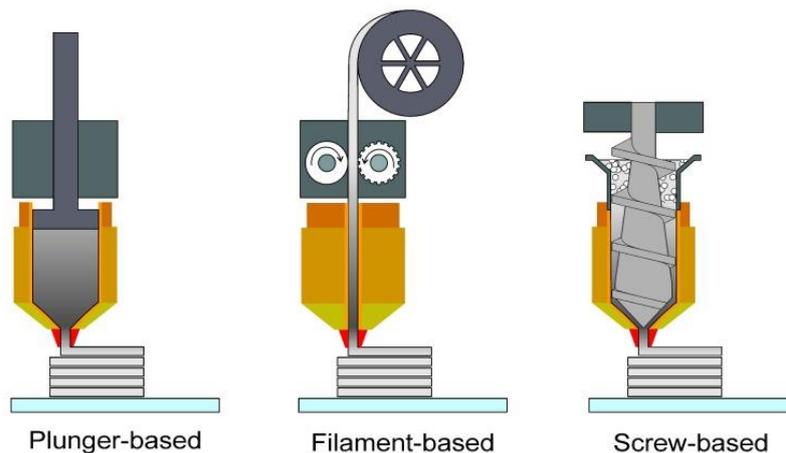
Turner et al. [10] hanno dimostrato come le forze che sono legate alla fase di alimentazione dipendono dal modulo elastico del materiale: in particolare, quanto più il materiale in input è fragile, tanto più è difficoltoso il passaggio nell'ugello: un modulo maggiore si configura in un aumento della pressione e, di conseguenza, una forza superiore esercitata dai rulli di presa, potendo più facilmente incorrere in slittamenti del materiale in ingresso o in una mancata corrispondenza tra le portate in entrata e in uscita dall'estrusore, generando instabilità o un mancato flusso in ingresso del sistema di

alimentazione. Per questo tipo di materiali deve essere controllata in modo più preciso la velocità di avanzamento del materiale nello stadio di alimentazione. Inoltre, durante la deposizione del materiale, per generare la generica sezione, la testa di estrusione si muove nel piano, cambiando direzione, accelerando e decelerando: la portata di materiale deve corrispondere a queste variazioni di traiettoria affinché la quantità di materiale depositato nella sezione in produzione rimanga costante. Per garantire ciò è necessario impiegare una velocità di movimentazione della testa più lenta, in modo da garantire un flusso costante.

- *Solidificazione*: teoricamente, una volta depositato per estrusione, il materiale deve solidificare e legarsi al materiale adiacente depositato in precedenza, mantenendo forma e dimensioni impartite; tuttavia, la tensione superficiale può indurre il materiale a modificare la forma impartita e un raffreddamento non lento e graduale (che si verifica quando la differenza di temperatura tra la camera di deposizione e l'atmosfera circostante non è trascurabile) può causare una variazione delle dimensioni ottenute con la deposizione, provocando il restringimento del pezzo realizzato e la generazione di distorsioni. Inoltre, l'energia termica fornita deve essere sufficiente per garantire l'adesione delle regioni di materiale adiacenti ma non eccessiva al fine di non perdere il controllo sulla portata di materiale depositata, producendo una parte poco definita ed accurata.

A seconda della tipologia di estrusore impiegata, la deposizione del materiale sul piatto di stampa viene eseguita sfruttando o un sistema di alimentazione basato su pistoni, o su filamenti o su viti. [11,12]

Queste differenti tecnologie di deposizione di materiale per le tecniche di Additive Manufacturing basate sull'estrusione sono riportate nella Figura 5.



**Figura 5:** *Differenti approcci per tecniche di produzione additiva basate sull'estrusione.* [11]

- *Sistema con pistoni*: il materiale viene caricato in cartucce e il pistone spreme il materiale con un funzionamento molto simile a quello di una siringa; il materiale

depositato in questa modalità deve avere le caratteristiche di *shear thinning*, ovvero diminuzione della viscosità all'aumentare della velocità di deformazione quando sottoposto a sollecitazione meccanica, e alto carico di snervamento una volta depositato, in modo tale che, una volta avvenuta la deposizione, la solidificazione o l'essiccamento del materiale, non si registri un importante restringimento nelle dimensioni. I materiali comunemente utilizzati vengono chiamati "inchiostri" e sono sospensioni colloidali altamente concentrate e gel colloidali, contenenti materiali metallici, polimerici, bioattivi, ceramici e compositi termoplastici, la cui composizione viene adeguatamente progettata per ottenere le proprietà reologiche richieste.

- *Sistema con filamenti*: è la metodologia più impiegata a causa dell'ampia disponibilità di materiali commerciali, della semplicità di utilizzo della strumentazione e del basso costo dei macchinari.

Camera e letto di stampa sono mantenuti ad una temperatura adeguata, al di sotto del punto di fusione del materiale e superiore alla temperatura ambiente, per ottimizzare la deposizione, promuovendo l'adesione tra i vari layer e riducendo stress di natura termica: una coppia viene generata da motori e trasferita alle ruote dentate all'interno dell'estrusore che esercitano una forza adeguata a trascinare il filamento del materiale attraverso l'estrusore, posto ad una predeterminata temperatura. Il filamento deve disporre di proprietà meccaniche adatte ad essere avvolto sotto forma di bobine, in modo compatto, in modo tale da alimentare il processo in modo continuo, a mantenere la forma e ad impedirne la rottura quando interagisce con le ruote dentate durante l'attraversamento dell'estrusore.

Non tutti i materiali possono soddisfare tali requisiti: tra i materiali polimerici termoplastici non rinforzati, i più impiegati sono acrilonitrile – butadiene – stirene (ABS), acido polilattico (PLA), poliammide (PA), polipropilene (PP), policarbonato (PC), polifenilsulfone (PPSU), polietere etere chetone (PEEK), polietilene tereftalato (PET) vergine o riciclato (rPET), polieterimmide (PEI), poliossimetilene (POM); tra i compositi a matrice polimerica, alcuni esempi di materiali commercialmente disponibili per la tecnica FFF riguardano ABS rinforzato con fibre di carbonio, PP rinforzato con fibre di vetro, PLA rinforzato con fibre di carbonio oppure con grafite o acciaio o acciaio inossidabile, rame o fibre di legno; PA rinforzata con fibre di carbonio e PET rinforzato con fibre di carbonio (il contenuto di seconda fase in questi compositi può variare da 5 al 55 %vol.).

L'estrusione di filamenti come tecnica di Additive Manufacturing è stata brevettata dall'azienda Stratasys, sotto il nome del marchio registrato di *Fused Deposition Modelling* (FDM<sup>TM</sup>), sebbene questa denominazione possa essere impiegata ad altre tecniche di Additive Manufacturing che prevedono la fusione del materiale e la conseguente deposizione su una sezione di materiale precedentemente depositata. Una terminologia alternativa per descrivere la tecnica è quella di *Fused Filament Fabrication* (FFF);

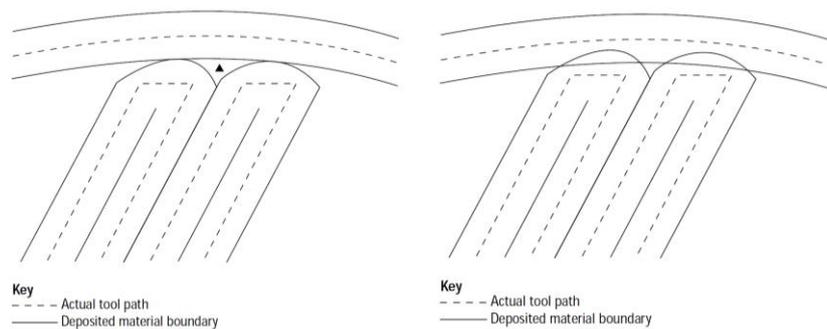
- *Sistema con viti*: non tutti i materiali possono essere prodotti sotto forma di filamenti, modalità con cui si alimenta il sistema garantendo proprietà reologiche ottimali e

costanza di deposizione e, allo stesso tempo, essere sufficientemente rigidi per poter essere efficientemente spinti dai meccanismi di caricamento dei comuni macchinari FFF. Per questo motivo, viene utilizzato un estrusore a vite che impiega in input pellet di materiali polimerici termoplastici di dimensione controllata, rappresentanti la formulazione desiderata: questi vengono rammolliti per effetto della temperatura del barrell dell'estrusore e per effetto dell'attrito e vengono pompato dalla zona di alimentazione alla testa dell'estrusore, depositando in modo continuo la formulazione progettata.

I macchinari richiesti per le tecniche MEX sono economici, rapidi e facili da utilizzare per la produzione di prototipi in una grande varietà di materiali. Il vantaggio principale di questa classe di tecniche di produzione additiva consiste nella possibilità di produrre geometrie piuttosto complesse: gli svantaggi connessi a tale categoria, invece, riguardano accuratezza e velocità inferiori rispetto ad altre tecniche di AM, una superficie più rugosa determinata dal raggio dell'ugello, anisotropia delle proprietà meccaniche dell'oggetto ottenuto a causa della minore coesione degli strati depositati perpendicolarmente alle sezioni trasversali generate e necessità, in alcuni casi, di strutture di supporto da rimuovere una volta completato il componente.

Inoltre, le parti prodotte sono indebolite dalla generazione di spazi vuoti tra le zone estruse, mentre invece i cambiamenti di direzione dell'estrusore nel seguire percorso di deposizione possono creare delle sovrapposizioni di materiale che migliorano la resistenza della parte provocando un rigonfiamento locale e colmando parte degli spazi vuoti con un eccesso di materiale, ma, di contro, ne diminuiscono l'accuratezza di realizzazione della geometria del componente finito. [13]

Nella Figura 6 viene riportata la rappresentazione del processo di estrusione seguendo un percorso di deposizione che mira all'ottenimento di un componente dall'elevata accuratezza o di un componente che possiede una maggiore resistenza.



**Figura 6:** Rappresentazione del processo di estrusione massimizzando o l'accuratezza della parte realizzata (sinistra) o la resistenza del componente realizzato (destra) controllando la produzione di vuoti. [13]

Il processo di *Fused Deposition Modelling* viene performato in modo migliore con polimeri amorfi più che semicristallini: infatti, i primi vengono estrusi nella forma di una pasta molto viscosa poiché non dispongono di un punto di fusione distinto e preciso ma il materiale,

aumentando la temperatura a cui viene sottoposto, progressivamente rammollisce diminuendo man mano sempre più la sua viscosità.

A raffreddamento, i polimeri amorfi non mostrano una variazione netta del volume: le catene rimangono orientate in modo casuale, il sistema non si riorganizza in modo ordinato, attuando un allineamento delle catene polimeriche stesse, come avviene invece nel caso dei polimeri semicristallini.

Per i suddetti motivi, i polimeri amorfi riescono ad essere estrusi con una viscosità piuttosto elevata garantendo sia che la forma di deposizione venga mantenuta dopo l'estrusione, solidificando e raffreddandosi rapidamente, sia che lo stato depositato possa più facilmente legarsi ad un layer precedentemente realizzato: queste sono caratteristiche cruciali per ottenere un componente stampato 3D dalla qualità elevata.

L'elevato ritiro volumetrico, che concerne i polimeri semicristallini, è problematico non solo per la fase di raffreddamento dell'estruso, comportando distorsioni e delaminazioni del componente realizzato, ma complica anche la fase di produzione del filamento utilizzato per alimentare il processo produttivo: un raffreddamento non uniforme del filamento estruso porterebbe ad una sezione non circolare e costante dello stesso, che può comportare problemi nella fase di stampa in merito alla corretta deposizione del materiale attraverso la testa dell'estrusore interrompendola. [14]

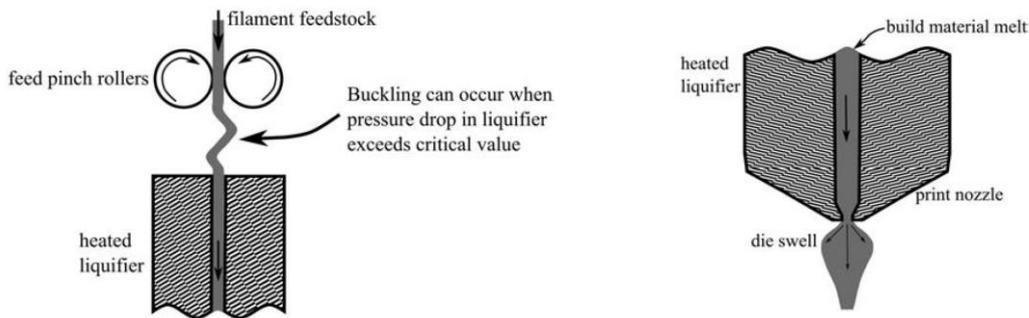
Un ulteriore problema connesso all'impiego dei polimeri semicristallini riguarda le proprietà reologiche possedute, che non ne agevolano affatto lo sfruttamento nei processi FDM o FFF. Infatti, il materiale ideale per un processo FDM o FFF che garantisce una deposizione agevole e il mantenimento della forma impartita senza colare deve avere un comportamento Non – Newtoniano con alto aumento di viscosità (*yield stress*) a bassi shear rate e di elevato *shear thinning* ad elevati shear rate. [15]

Il mancato aumento di viscosità per bassi shear rate (condizione che si verifica nei cambi di traiettoria dell'estrusore o quando la deposizione viene momentaneamente interrotta) può portare al fenomeno dell'*oozing*, ovvero la fuoriuscita non voluta di materiale dall'ugello. Altri due fenomeni reologici che concorrono al difficoltoso utilizzo dei polimeri semicristallini sono il *buckling* e il *die swelling*, riportati graficamente nella Figura 7:

- il *buckling*: al di sopra dei rulli di alimentazione, il filamento è posto in trazione; al di sotto dei rulli il filamento è in compressione poiché viene spinto contro l'apertura dell'ugello e tale compressione limita la velocità di avanzamento, controllata in modo da garantire una portata volumetrica di materiale depositato costante. [16]  
Il fenomeno del buckling si presenta quando la pressione applicata dai rulli di alimentazione, che trascinano il filamento lungo l'estrusore applicando una tensione, supera un valore limite; tale problema può essere superato se il rapporto tra il modulo elastico e la viscosità apparente del fuso ( $E/\eta$ ) risulta essere maggiore di un valore critico compreso tra  $3 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$  e  $5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ ; [10]
- *die swelling*, o rigonfiamento dell'estruso, per cui il materiale estruso in uscita dalla testa dell'estrusore presenta un diametro superiore rispetto a quello dell'ugello da cui è uscito. Il polimero fuso, una volta fuoriuscito dalla testa dell'estrusore, non risulta più

vincolato dalle sue pareti, e rilassa tensioni agenti in precedenza e l'energia elastica immagazzinata, comportando un'espansione radiale del fuso stesso. Il fenomeno del rigonfiamento dell'estruso può essere ridotto introducendo particelle ceramiche [17] o fibre di carbonio [18].

Tale fenomeno svolge un ruolo cruciale nel determinare la risoluzione raggiungibile in un processo di Additive Manufacturing basato sull'estrusione. Per i motivi precedentemente esposti, i materiali altamente cristallini sono più adeguati a processi di produzione additiva di tipo *Powder Bed Fusion* o *Selective Laser Sintering*.



**Figura 7:** Fenomeni di die swelling e buckling durante un processo FDM. [10]

In conclusione, il processo di deposizione mediante estrusore è un complesso compromesso tra differenti parametri: per avere un controllo sul flusso di materiale e, quindi, sulla precisione della parte realizzata è necessario considerare pressione in ingresso (o forza applicata sul materiale) che influenza la portata depositata, temperatura (esistono delle piccole fluttuazioni di temperatura che comportano scostamenti nelle caratteristiche del flusso di materiale teorico depositato), diametro dell'ugello, caratteristiche reologiche del materiale da depositare, tempo di raffreddamento differenziale in base alla variazione del rapporto superficie volume delle parti estruse, pulizia periodica dell'ugello e regolare manutenzione del macchinario.

### 1.6. *Rapid Prototyping, Rapid Tooling e Rapid Manufacturing* [19 – 23]

Nel frenetico mondo industriale moderno, *time to market*, differenziazione ed innovazione sono fattori chiave decisivi, che determinano il successo di un prodotto: per battere la concorrenza in un mercato globale, le aziende devono riuscire a sviluppare prodotti più performanti, più innovativi, con budget più bassi e tempistiche di ricerca e sviluppo inferiori.

L'approccio alla progettazione e alla produzione che comprime la durata del ciclo di produzione tradizionale, che rende più efficiente lo sviluppo di prodotto, evitando costose modifiche e onerosi acquisti in attrezzature è definito *Rapid Prototyping*, o Prototipazione Rapida (RP): tale metodologia consente di fabbricare velocemente e in modo economico un prototipo fisico tridimensionale, o un modello in scala, migliorati, che dispongono di un grado di innovazione maggiore e richiedono un minor tempo per arrivare sul mercato, a partire da un progetto CAD.

In questo modo, un maggior numero di prototipi può essere prodotto in modo più semplice e con minori vincoli di costo.

I vantaggi di un approccio additivo al *Rapid Prototyping* riguardano:

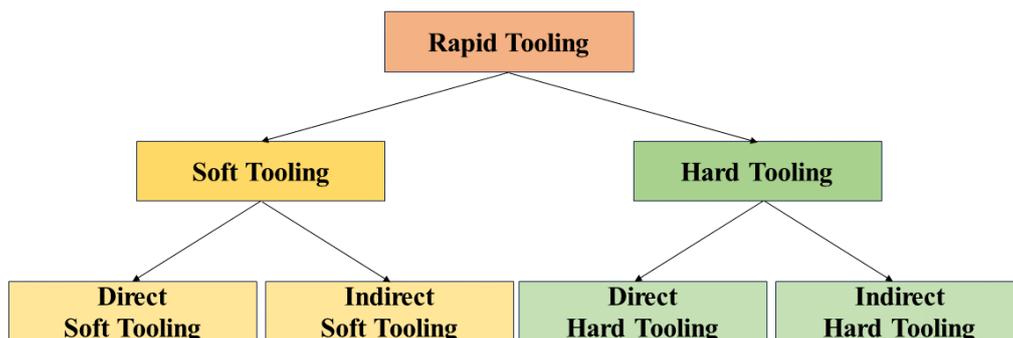
- *Riduzione del time to market*: il ciclo produttivo del componente è fortemente ridotto; i progetti possono essere valutati ed iterati velocemente, facilitando lo sviluppo di ulteriori prodotti e aumentando il vantaggio competitivo dell'azienda sul mercato;
- *Riduzione drastica di tempi e costi dello sviluppo del prodotto*: i sistemi di RP non sono di per sé poco onerosi, ma risultano economicamente vantaggiosi se confrontati con le metodologie produttive basate sui metodi tradizionali di fabbricazione. Il componente viene prodotto, ispezionato e testato per evidenziare rapidamente punti deboli o eventuali errori di produzione: in questo modo, vengono eventualmente effettuate correzioni nel design con l'obiettivo di ottenere oggetti funzionalmente più performanti o esteticamente migliorati. Quindi, possono essere ridotti drasticamente i costi connessi ad errori e a scarti di produzione, liberando ulteriori risorse, durante la fase di progettazione, all'inizio del ciclo di produzione, quando l'impatto economico di una correzione risulta ancora poco significativa, rispetto ad una modifica attuata nelle fasi di sviluppo più avanzate. La riduzione del costo associata ai metodi RP si realizza anche nel non dover chiedere particolari utensili o un magazzino per lo stoccaggio delle materie prime e dei prodotti realizzati;
- *L'impiego di un progetto CAD* per veicolare i dati permette di eliminare qualsiasi possibilità di fraintendimento del disegno e di limitare, quindi, gli errori di produzione;
- *Maggiore creatività e libertà di design*: l'ampia varietà di tecnologie e di materiali disponibili concede al progettista soluzioni multiple per soddisfare le più varie esigenze produttive. Dunque, aumenta qualità dei prodotti, vengono sperimentate nuove idee e design originali, proprio perché costi e tempi di consegna sono abbattuti rispetto ai metodi di produzione tradizionali, in cui i progettisti sono limitati a testare ed approvare un numero inferiore di prototipi relativi a progetti più conservativi, al fine di migliorare la possibilità di successo di un singolo prodotto. La metodologia RP incoraggia i progettisti ad esplorare nuove configurazioni e di percorrere nuove strade progettuali, più audaci e innovative: sarà il processo di prototipazione rapida stesso a filtrare le soluzioni più promettenti ed attrattive;
- *Sviluppo del processo di progettazione e produzione "in – house"*: le esigenze di sviluppo vengono coperte internamente all'azienda, provvedendo ad una migliorata riservatezza dei dati di progettazione durante il processo produttivo, non dovendo correre il rischio di una fuga di informazioni affidandosi ad un fornitore esterno di servizi.

Le applicazioni del RP riguardano principalmente tre fasi nel ciclo di produzione:

- *realizzazione di prototipi fisici o oggetti utilizzabili* a partire dall'idea concettuale, rappresentata dal modello CAD, in un tempo ridotto al minimo; si può valutare in modo completo il valore del prodotto, integrando e modificando il progetto per renderlo più funzionale all'applicazione stabilita, più durevole e più appetibile esteticamente;

- *verifica dell'idoneità dell'oggetto fisico*: deve essere verificato che l'eventuale accoppiamento con altri componenti, in sistemi più complessi, rispetti i requisiti di durabilità e funzionalità del componente, controllando la corrispondenza tra le dimensioni reali e le tolleranze prescritte nel progetto e che i pezzi realizzati dispongano delle proprietà meccaniche adeguate a sopravvivere integri al processo di montaggio;
- *valutazione funzionale del prototipo*: viene simulato il normale utilizzo, provando che il prodotto finito funzioni come desiderato, resistendo ai carichi meccanici, termici e alle condizioni ambientali a cui potrebbe essere sottoposto durante la vita utile, e che risulti desiderabile dal mercato.

Le tecniche di *Rapid Prototyping*, unite al parallelo sviluppo di materiali sempre più performanti e innovativi, sono state utilizzate nella produzione di utensili, fondamentali nel trasformare le materie prime in prodotti finiti: in questo caso, riferendosi al processo di progettazione e sviluppo di stampi o utensili necessari alla produzione, ci si riferisce al processo di *Rapid Tooling* (RT). Tali procedure possono portare alla realizzazione di utensili morbidi (*Soft Tooling*) o di utensili duri (*Hard Tooling*), ottenibili impiegando procedure di RT dirette (*Direct Rapid Tooling*) o indirette (*Indirect Rapid Tooling*): tale classificazione, relativa alle tecniche di RT, viene riportata nella Figura 8.



**Figura 8:** Classificazione dei processi di Rapid Tooling.

Le caratteristiche che differenziano utensili *hard* e *soft* riguardano il materiale impiegato, il volume di prodotti con esso realizzabile, la durabilità, le condizioni di impiego, la finitura superficiale, il costo di produzione dello strumento e dell'oggetto finale fabbricato da porre sul mercato.

In generale, il *Soft Tooling* permette alla produzione di adeguarsi alle variazioni progettuali in modo flessibile ed economico, al fine di permettere al prodotto di raggiungere celermente il mercato e perfezionare il prototipo con i feedback ricevuti: gli *Hard Tools*, invece, richiedono un maggior tempo e costo di produzione a fronte di una durabilità potenziata. Indipendentemente dalla classe di appartenenza, la finitura superficiale degli oggetti ottenuti, operando con uno stampo realizzato mediante RT, dipende dalle proprietà elastiche del materiale impiegato, dalle proprietà di rilascio dello stampo, dallo smorzamento delle vibrazioni, dalla resistenza all'usura oltre che alla compatibilità chimica o all'abrasività dei materiali coinvolti.

### 1.6.1. *Soft Tooling*

Per definire questa categoria di utensili, possono essere sfruttati o i materiali di cui sono costituiti, utilizzando la terminologia di utensili morbidi (*Soft Tooling*) o contemplando la breve vita utile degli stessi, utilizzando le espressioni di *Short – Run Tooling* o *Short – Term Tooling*.

Le tecniche impiegate per la realizzazione di tali utensili, permettono di fabbricare rapidamente, con un processo economico e composto da poche fasi, uno stampo, un inserto o un utensile, utilizzando il quale, può essere prodotto un numero di esemplari limitato, tipicamente da 1 a 100 unità.

Il basso prezzo e la produzione rapida giustificano la frequente sostituzione di questi *tools* a causa di danneggiamenti verificatisi per la scarsa resistenza all'usura, per la modesta resistenza chimica o alle condizioni di pressione e temperatura di lavoro, ma anche per l'accoppiamento con materiali particolarmente abrasivi: per le caratteristiche di resistenza e durabilità citate in precedenza, l'approccio più vantaggioso, in termini di costi e tempi, è quello dell'*Additive Manufacturing*.

Dunque, si ottiene una replica meno precisa delle caratteristiche superficiali più articolate, che siano proprietà superficiali richieste puramente estetiche o necessarie per un successivo accoppiamento funzionale dei componenti realizzati mediante il *tool*.

L'approccio realizzativo di strumenti *soft* può consistere in uno step preliminare che precede la transizione verso una metodologia produttiva di *Hard Tools*, che, invece, lascia spazio alla produzione in serie. L'impiego di *Soft Tools* è la scelta più conveniente quando:

- è necessario garantire una produzione economica, con scadenza a breve termine, di un numero limitato di componenti e prototipi, facili da realizzare, adatti per la convalida e il testing; vengono creati strumenti temporanei, meno durevoli, con materiali facili da lavorare come i siliconi, i compositi rinforzati con fibre di carbonio o fibre di vetro, che dispongono anche di geometrie più complesse, la cui realizzazione, seguendo altri processi, sarebbe estremamente dispendiosa in termini di tempi e costi;
- il progetto su cui si sta lavorando potrebbe ancora essere suscettibile di frequenti modifiche, per gestire variazioni ed interazioni in modo efficiente e celere, impiegando una quantità limitata di risorse, gestendo agevolmente la produzione di geometrie e dettagli complessi.

Tuttavia, la scelta di questa classe di strumenti non è la più adeguata quando l'obiettivo è la produzione di massa: le proprietà di durabilità e resistenza ad usura possedute ne richiederebbero una sostituzione molto frequente, ostacolando l'intero processo produttivo. Infatti, questa tipologia di inserti e stampi si deforma più velocemente, soprattutto se le sollecitazioni nelle condizioni di impiego risultano particolarmente elevate. Per questo motivo, ogni qual volta lo strumento viene utilizzato, è necessario eseguire un'ispezione al fine di verificare l'eventuale danneggiamento e, qualora fosse necessario, proseguire con la riparazione o la sostituzione.

Al canonico tempo di processo per la produzione di inserti e stampi, quindi, è necessario aggiungere il tempo di smontaggio, per il raffreddamento, per eseguire i controlli, il tempo

relativo alla possibile sostituzione e alla nuova impostazione del settaggio del macchinario, tutti step aggiuntivi che aumentano i tempi di fermo produzione e che inevitabilmente influiscono sulla produttività e i costi complessivi.

Infine, i *Soft Tools* consentono un minore ritorno sull'investimento primario: il costo complessivo dello stampo per unità prodotta è più elevato poiché, sebbene il costo iniziale sia inferiore rispetto a quello registrato per la realizzazione di *Hard Tools*, la breve vita utile degli utensili prodotti richiede sostituzioni frequenti, che incrementano la voce di spesa totale ripartita sui singoli pezzi realizzati.

### 1.6.2. *Hard Tooling*

Le terminologie di *Hard Tools*, utensili duri, o di *Long – Run Tooling* o *Long – Term Tooling*, ovvero utensili di lunga durata, vengono impiegate per riferirsi a stampi in grado di assicurare un elevato volume produttivo, dell'ordine del milione di esemplari, prima che la sostituzione sia necessaria, garantendo fattori indispensabili di precisione e replica dei pezzi prodotti.

Gli *Hard Tooling* dispongono di proprietà di durezza, resistenza al calore e all'usura particolarmente elevate rispetto agli oggetti che, attraverso il loro impiego, vengono realizzati sia per l'uso di materiali metallici come acciai, leghe di nichel e leghe di alluminio, che per il processo produttivo seguito, che contempla l'esecuzione di step aggiuntivi alla realizzazione fisica degli utensili stessi, come trattamenti termici e operazioni di post – lavorazione. In questo modo, questi strumenti possono garantire un utilizzo prolungato nel tempo prima di effettuare riparazioni o sostituzioni, nell'ordine di centinaia di migliaia di cicli di produzione, possono offrire un migliore controllo sulla finitura superficiale dello stampo e rispetto delle tolleranze, degli standard funzionali ed estetici di progetto, a fronte, però, di un investimento economico e di una tempistica realizzativa più consistenti se confrontati con le relative voci impiegate nella realizzazione di *Soft Tooling*.

Per i motivi citati in precedenza, risulta sconveniente utilizzare *Hard Tools* per la produzione di lotti dal modesto numero di esemplari o quando è richiesto un *time to market* molto ridotto, mentre è la scelta più conveniente per conseguire produzioni di progetti ben definiti: infatti, sarebbe poco vantaggioso impiegare questa classe di utensili durante la prototipazione iniziale, fase del ciclo produttivo in cui è richiesta un'elevata flessibilità realizzativa, non eccessivamente onerosa, in risposta ai test o alle revisioni progettuali.

Infine, alloggiando più cavità negli stampi per utensili duri, possono essere prodotte simultaneamente più parti ad ogni ciclo di stampaggio, aumentando la produttività del processo e riducendo i costi a lungo termine, sfruttando proprio l'elevata longevità degli utensili in opera.

### 1.6.3. *Direct Rapid Tooling*

Un numero limitato di utensili o stampi dalle geometrie semplici viene prodotto direttamente, in "*a single shot*", in un unico passaggio, in modo veloce, estremamente flessibile, potendo cambiare celermente il design del prodotto richiedendo un quantitativo limitato di risorse, coinvolgendo pochi step realizzativi ed impiegando tecniche di

produzione tradizionali o le più moderne tecniche di produzione additiva a partire da un file CAD. I prototipi realizzati sono meno durevoli e, per questo, più prone a danneggiamenti, motivo per cui è richiesta una sostituzione in opera più frequente.

L'approccio di *Direct Rapid Tooling* (DRT) è impiegato maggiormente per la produzione a breve termine, o per i primi step di progettazione, per cui non è necessario che lo strumento si dimostri particolarmente durevole o robusto, oppure per poter testare rapidamente uno stampo o un inserto che non dispone di geometrie complesse o di dettagli particolarmente intricati.

Gli svantaggi riguardano la minore accuratezza realizzativa, un'inferiore robustezza ed una più bassa durabilità rispetto agli utensili prodotti per via indiretta, che si configura in una possibilità di più facile danneggiamento o rottura, e, nel caso di modifica del materiale usato, la necessità di dover ripartire dall'inizio del processo produttivo. Queste caratteristiche potrebbero portare a costi maggiori di sviluppo di prodotto, soprattutto nel caso in cui sia necessario realizzare progetti piuttosto complessi, o che richiedono la realizzazione di stampi che dispongono anche solo piccole modifiche nel design rispetto al modello base.

#### 1.6.4. *Indirect Rapid Tooling*

La realizzazione degli utensili o degli stampi passa attraverso l'integrazione di macchinari tipici di metodi produttivi tradizionali con quelli generalmente impiegati per la prototipazione rapida.

I processi di *Indirect Rapid Tooling* (IRI) vengono per lo più impiegati durante la fase di prototipazione perché pensati per la sperimentazione e il testing di uno stesso prototipo, detto *master*, modello originale dettagliato, che permette di fabbricare un certo numero di utensili, *Hard* o *Soft*, variandone alcune peculiarità, come i materiali impiegati, con lo scopo di identificare il miglior candidato per raggiungere le proprietà richieste: infatti, tutte le declinazioni di strumenti realizzabili prevedono delle piccole modifiche del *master* iniziale e, dal momento che questo approccio implica un numero maggiore di interazioni nella produzione, tale metodologia coinvolge delle tempistiche realizzative più lunghe.

I vantaggi connessi alle metodologie di IRT riguardano l'impiego di un prototipo originale molto durevole, che raramente si danneggia durante il processo di prototipazione, da cui possono realizzarsi utensili o stampi hard o soft in base ai bisogni produttivi, in grado di garantire alta riproducibilità delle caratteristiche dei prodotti finiti ed elevata accuratezza.

Gli svantaggi riguardano una produzione più dispendiosa in termini di costi e tempi rispetto alla metodologia di DRI: sono coinvolti materiali di alta qualità, per garantire robustezza e longevità agli utensili e agli stampi, e sono contemplati step processuali aggiuntivi che possono configurarsi in costi maggiorati. L'approccio IRT non è il più adatto se è probabile che il progetto iniziale cambi significativamente durante la prototipazione.

Nella categoria delle tecniche di prototipazione e attrezzaggio rapido, scegliere tra IRI e DRI dipende esclusivamente dal punto di partenza della fase di progettazione a cui i progettisti si trovano e dal prodotto finale che si vuole ottenere. Tuttavia, al fine di completare il processo di prototipazione in modo efficiente, è necessaria

una valutazione più profonda, aderente al caso specifico in analisi, contemplando la spesa economica da affrontare, le risorse disponibili, le tempistiche produttive, la complessità progettuale, i materiali da utilizzare, la necessità d'impiego di utensili duri o morbidi, le tolleranze e il livello di finitura superficiale raggiungibile.

In ogni caso, impiegare tecniche di *Additive Manufacturing* per la realizzazione di *Soft* o *Hard Tooling* è vantaggioso considerando i brevi tempi di reazione e gli step di produzione semplificati, che permettono di adattare in modo efficiente la produzione alle perturbazioni del processo di sviluppo e alle richieste di mercato.

Poiché il Rapid Tooling viene impiegato maggiormente per realizzare inserti o stampi per lo Stampaggio ad Iniezione, nel paragrafo successivo verranno analizzati i principi generali di tale tecnica produttiva e, successivamente, verrà approfondito l'approccio di prototipazione rapida per la realizzazione di inserti e stampi ad iniezione mediante tecniche di *Additive Manufacturing* al posto dei metodi sottrattivi tradizionalmente usati per la produzione degli stessi.

### *1.7. Lo Stampaggio ad Iniezione per la produzione di oggetti in materiale polimerico [24,25]*

L'*Injection Molding*, o Stampaggio ad Iniezione, è uno dei processi più comuni per la produzione di oggetti in plastica che consiste nel fondere i granuli di un determinato materiale polimerico e nel successivo rapido riempimento di uno stampo, la cui cavità ricalca il negativo del volume della parte da riprodurre, seguito dal raffreddamento e dalla successiva espulsione del pezzo.

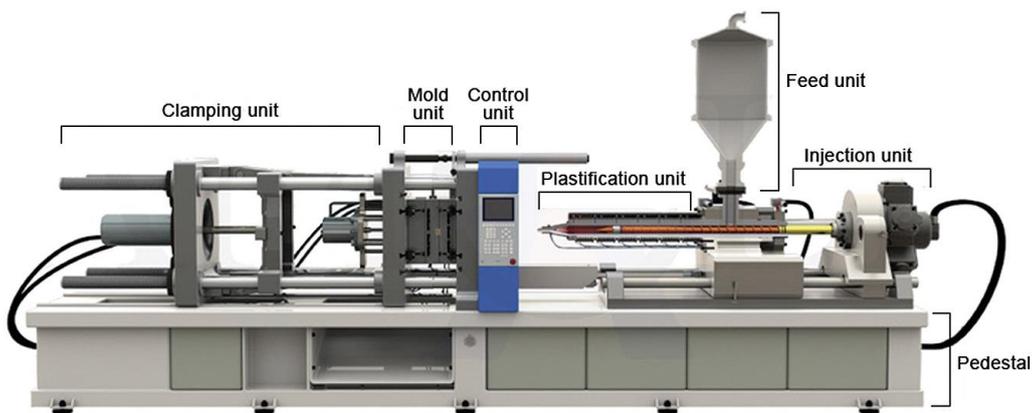
L'attrezzatura standard per lo Stampaggio ad Iniezione è composta da un elevato numero di strumenti che possono ripetersi nei diversi layout produttivi adottati, ma il punto critico del sistema consiste nello stampo, di volta in volta unico. Infatti, questo deve essere in funzione per molti anni, garantendo accuratezza nella riproduzione, elevata ripetibilità delle caratteristiche dei prodotti e rispetto delle tolleranze dei pezzi realizzati fino all'ultima stampata, con un modello di business che prevede una produzione in continuo per poter ottenere profitto.

I generici dispositivi di cui la strumentazione tipica è composta non cambiano tra le varie produzioni, ma si adattano, di volta in volta, al nuovo stampo installato nell'unità di lavoro, che, invece, è uno strumento unico, la cui corretta progettazione, unita ad un ottimale funzionamento e ad una regolare manutenzione, permette di ottenere pezzi stampati dalla qualità e dalla durabilità migliorate. Nella sua forma più semplice, uno stampo è composto da due metà che si incontrano ad un piano di separazione: una volta che il materiale fuso viene iniettato e sufficientemente raffreddato, al fine di conferire al pezzo la rigidità tipica dei materiali solidi, lo stampo si apre e il prodotto può essere rimosso manualmente dall'operatore o espulso automaticamente mediante appositi estrattori.

Ogni stampo è formato da una serie di elementi base, ognuno dei quali ha un determinato scopo: una o più cavità, un sistema per il convogliamento del materiale polimerico fuso allo stampo, sfianti per l'evacuazione dell'aria dallo stampo, sistema per il raffreddamento del materiale già iniettato e per l'espulsione del prodotto stampato, interfaccia per il

collegamento alla macchina di stampaggio, sistema di allineamento di cavità e nuclei con relativo sistema di guida, piastre di supporto rigido e trasporto dell'intera strumentazione.

Componenti base dello stampo e parti costitutive aggiuntive devono essere progettate al fine di assicurare una regolare ed agevole manutenzione dell'unità stessa, senza la necessità di rimuovere dal banco l'intero stampo: in questo modo, possono ridursi i costi di inattività per l'ispezione e la riparazione dei costituenti, o l'eventuale sostituzione, ma anche i costi di manutenzione straordinaria derivanti da una mancata regolare cura della strumentazione. L'attrezzatura per il processo di stampaggio ad iniezione è riportata nella Figura 9 e può essere suddivisa nelle parti principali di pressa e stampo.



**Figura 9:** Schematizzazione in vista laterale della strumentazione di un macchinario per lo stampaggio ad iniezione. [24]

La pressa si compone di gruppo di plastificazione, *plastification unit*, che permette di portare il materiale ad uno stato viscoso, e gruppo di iniezione, *injection unit*. Lo stampo, invece, è composto dal gruppo di chiusura, *clamping unit*, che provvede ai movimenti di apertura e serraggio dello stampo, ed è formato da una piastra fissa, una mobile e da una testata di reazione: quest'ultima comprende delle colonne di scorrimento entro cui la piastra mobile si muove, avanzando per arrivare a battuta sulla fissa, serrando lo stampo con una determinata forza di chiusura, oppure arretrando per produrre l'estrazione del pezzo stampato; inoltre, lo stampo possiede un sistema di alimentazione, un impianto di raffreddamento e un apparato di estrazione molto articolato.

Il materiale, disponibile in polvere o in granuli, segue un preciso iter durante il processo produttivo:

- *Essiccazione:* il granulo, durante le fasi di trasporto e stoccaggio, può assorbire umidità sia per le condizioni ambientali a cui viene esposto e sia per le caratteristiche intrinseche di affinità del materiale polimerico con l'acqua stessa; il passaggio di essiccazione risulta utile per ridurre la possibilità di formazione di difetti e di potenziali punti di innesco della cricca nell'oggetto finale, ma anche per limitare pericolose reazioni di idrolisi, che portano alla degradazione del materiale impiegato, ottenendo un pezzo che dispone di minori proprietà meccaniche, più incline alla formazione di difetti estetici e strutturali;

- *Plasticizzazione*: i granuli di materiale polimerico allo stato solido, contenuti nella tramoggia, passano in un cilindro termoregolato, in cui ruota una vite senza fine, a passo costante, con diametro del nocciolo variabile. All'interno del cilindro, i granuli vengono sottoposti ad uno stress termomeccanico e ad una duplice fonte di calore. Una quota predominante del calore prodotto è di natura *meccanica* e si trasferisce uniformemente interessando tutta la massa di materiale in lavorazione, rendendola fisicamente e termicamente omogenea, producendo fusione del materiale (se semicristallino) o il rammollimento del materiale polimerico (se amorfo): questa quota di calore è generata dall'attrito del materiale nel suo moto di scorrimento e dalla compressione che esso subisce con l'avanzamento nella vite nella fase di plastificazione. Una fonte di calore meno consistente è di natura *termica*: il cilindro di plastificazione viene riscaldato da resistenze elettriche poste esternamente allo stesso, producendo un trasferimento di calore non uniforme, poiché interessa esclusivamente la quantità esigua di materiale fisicamente a contatto con il cilindro e la parete della vite;
- *"Metering" o Dosaggio*: la massa di materiale plastico fusa o rammollita viene sottoposta all'azione meccanica di miscelazione e di accumulo in testa, per poi procedere con il successivo step di iniezione nello stampo. Inizialmente, la vite punzonante del gruppo di plastificazione arretra ruotando, accumulando una quantità di materiale adeguata a riempire lo stampo, addizionata di un volume di materiale aggiuntivo, definito *cuscinio di materiale*, che ha l'obiettivo di conferire una certa pressione di compattamento al materiale che già si trova nello stampo. Successivamente la vite avanza senza ruotare, iniettando il materiale nell'ugello di alimentazione e, quindi, nello stampo, riempiendo il volume della cavità fino al 98%: a questo punto, si assiste al passaggio *velocità – pressione*, in cui il processo non viene regolato più dalla velocità di avanzamento della vite ma da una pressione indotta dalla vite sul cuscinio di materiale, quindi, sul materiale contenuto nello stampo. In questo modo, viene esercitata una *pressione di mantenimento* applicata per un lasso di tempo definito *tempo di mantenimento*, per permettere al materiale fuso di fluire nella cavità per riempire la quota di volume rimanente e compensare le contrazioni di volume causate dal raffreddamento. La corretta regolazione della pressione e del tempo di mantenimento permette di evitare difetti legati ad un non ottimale riempimento dello stampo e la generazione di tensioni e deformazioni nei pezzi che portano a rotture improvvise;
- *Raffreddamento*: questa fase inizia già quando il materiale entra nello stampo e prosegue sia durante il progressivo riempimento della cavità che nella fase di mantenimento, fino all'ottenimento di una temperatura adeguata all'estrazione del materiale, idonea ad ottenere una rigidità strutturale del pezzo prodotto atta ad impedire deformazioni.

I principali vantaggi legati all'impiego dell'*Injection Moulding* consistono in:

- *Produttività ed efficienza*: vengono realizzati elevati volumi di oggetti che replicano con estrema precisione la cavità dello stampo in un solo step, in modo automatizzato; la tecnica è ampiamente consolidata e il processo è rapido: gli stampi con cavità multiple permettono di aumentare la produttività ad ogni ciclo produttivo;

- *Economicità*: il ciclo produttivo viene studiato al fine di ottenere un prodotto dall'elevata qualità nel minor tempo e costo possibili;
- *Produzione consistente e altamente ripetibile*: lo stampaggio ad iniezione permette di riprodurre prodotti esattamente identici, ricalcando i più piccoli dettagli, realizzando parti con finiture molto strette e tolleranze molto elevate, garantendo estrema affidabilità nella produzione di massa;
- *Ampia scelta di materiale*: è disponibile una vasta gamma di materiali polimerici facili da trasportare e sicuri da maneggiare per provvedere all'alimentazione della pressa, di volta in volta configurata per la specifica materia prima in input;
- *Minori tassi di scarto*: riproducendo esattamente la cavità dello stampo, che ricalca il negativo del volume dell'oggetto da riprodurre, gli scarti sono ridotti al minimo; eventuale materiale in eccesso (bave, materozze) può essere semplicemente riciclato nei successivi cicli di stampaggio, tritandolo e mescolandolo ai granuli di materiale polimerico vergine, secondo specifiche percentuali determinate dal controllo qualità;
- *Alta precisione*: iniettando il materiale polimerico fuso ad elevata pressione nello stampo, si può ottenere la riproduzione fedele di forme molto complesse e dei più piccoli dettagli;
- *Post - lavorazione ridotta*: si richiedono pochissimi interventi di post – produzione a causa della buona finitura e rispetto delle tolleranze più strette garantiti dal processo produttivo.

Gli svantaggi connessi a tale tecnologia di produzione riguardano:

- *Investimento iniziale*: il costo di capitale iniziale per assicurare macchinari, utensili, attrezzature e resine per una produzione su larga scala può essere particolarmente significativo e prima di riuscire a recuperare il capitale iniziale e registrare un ritorno economico potrebbe essere necessario un tempo elevato;
- *Limiti di progettazione*: il processo di design è complesso e la produzione deve soddisfare i requisiti meccanici, funzionali ed estetici richiesti e per evitare la formazione di difetti, derivanti da uno svolgimento non ottimale delle fasi di processo; a tale scopo risulta utile impiegare degli accorgimenti quali utilizzare angoli di spoglia e raggi di raccordo per facilitare l'estrazione dei pezzi, evitare sottosquadri o spigoli vivi, progettare uno spessore delle pareti uniforme per garantire un raffreddamento omogeneo, controllare il posizionamento del punto di iniezione e la tipologia del sistema di espulsione; inoltre, un'importante limitazione riguarda le dimensioni riproducibili, sia per le macchine che per gli stampi utilizzati nel processo;
- *Rischio di difetti di produzione*: se lo stampo non viene progettato correttamente o se i parametri di processo non vengono adeguatamente impostati, possono verificarsi dei difetti nei pezzi stampati, che devono essere successivamente scartati.

### 1.7.1. *Tempo Ciclo e Costo di produzione per pezzo stampato* [24,25]

L'obiettivo di qualunque produzione è quello di ottenere la migliore qualità del prodotto al costo più basso: per garantire ciò, nel caso dell'*Injection Molding* è necessario monitorare i parametri del tempo ciclo e del costo di produzione per singolo pezzo stampato.

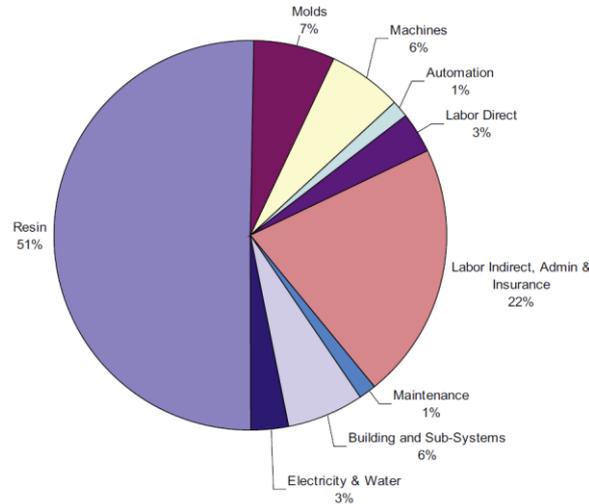
Il tempo ciclo, dato dalla somma del tempo di chiusura dello stampo, di iniezione del materiale polimerico fuso, di raffreddamento e di estrazione del pezzo stampato, permette di stimare il tempo necessario per recuperare l'investimento iniziale.

Tra i vari contributi concorrenti al computo complessivo del tempo ciclo, l'apporto maggiormente impattante consiste nel tempo di raffreddamento: per diminuire tale apporto, aumentando la produttività del processo, si possono utilizzare materiali che dispongono o di una diffusività termica maggiore o di una temperatura di fusione più bassa, quindi, materiali che riescono a raggiungere uno stato di solidificazione adeguato all'estrazione in un tempo minore. Inoltre, un ulteriore parametro che incide sul tempo di raffreddamento è lo spessore del pezzo da realizzare: per questo, in fase di progettazione, risulta rilevante diminuire per quanto possibile i grandi spessori.

Analizzando le voci di costo connesse allo svolgimento di un processo standard di Stampaggio ad Iniezione, il cui obiettivo riguarda la fabbricazione di elevati volumi produttivi, il costo del materiale iniettato rappresenta la voce principale del costo totale del singolo prodotto, mentre il contributo dello stampo diviene tanto meno significativo quanto maggiore è il numero di pezzi generati. In ragion di ciò, quando la produzione riguarda elevate tirature, il focus principale è sulla riduzione del peso del pezzo da produrre: iniettare una minore quantità di materiale si traduce in una riduzione costo connesso alla materia prima e in un ciclo di stampaggio più celere e, di conseguenza, ad un aumento di produttività del processo tecnologico.

Il rendimento produttivo migliorato, unito alla riduzione del peso del pezzo da produrre, porta alla riduzione del costo dello stampo, di utilizzo della macchina e dei costi accessori ad essa connessi (intesi come i costi di installazione dell'impianto, dei servizi, del denaro utile all'investimento iniziale, dell'acqua di raffreddamento, dell'alimentazione dell'aria compressa e della corrente elettrica, ripartiti sul numero di ore che si prevede la macchina possa essere mantenuta in funzione).

Nella Figura 10, in un diagramma circolare, viene riportato un esempio relativo alla modalità in cui differenti voci di costo concorrono alla generazione del costo complessivo finale di un processo di stampaggio ad iniezione.



**Figura 10:** Ripartizione dei costi di un tipico processo di Injection Moulding orientato alla realizzazione di elevati volumi produttivi. [24]

Come si evince dalla figura, il contributo più corposo al costo finale per pezzo prodotto è quello relativo alla materia prima, mentre lo stampo concorre con un apporto minoritario, sebbene sia la quota più incisiva delle voci relative alla strumentazione.

Qualora la produzione richieda d'esser garantita per un tempo particolarmente esteso, è conveniente pensare di automatizzare il processo, diminuendo consecutivamente il contributo del costo del lavoro diretto, inteso come manodopera, ed indiretto, che contempla le attività che sostengono il lavoro diretto quali la gestione, la qualità, la manutenzione e la spedizione.

Diversamente, quando è necessario produrre piccoli lotti di stampati dalle caratteristiche altamente personalizzate, il costo dello stampo rappresenta una porzione importante del costo del prodotto, come riportato nella Tabella 1, mentre il costo effettivo dello stampo per unità si riduce notevolmente quando le esigenze produttive riguardano una produzione di massa, proprio come messo in evidenza precedentemente.

**Tabella 1:** Relazione tra il costo dello stampo per unità di pezzo prodotta e i requisiti della produzione totale. [24]

Number of cavities [#]	Mold cost [\$]	Estimated total production [#]			
		10 <sup>4</sup> [\$]	10 <sup>5</sup> [\$]	10 <sup>6</sup> [\$]	10 <sup>7</sup> [\$]
1	20000	2,0000	0,2000	0,0200	0,0020
2	36000	3,6000	0,3600	0,0360	0,0036
4	64800	6,4800	0,6480	0,0648	0,0065
8	116640	11,1600	1,1160	0,1116	0,0112

Più di frequente, a causa dell'elevato costo degli stampi, si richiedono nuove strategie e più innovativi metodi di progettazione e sviluppo per mirare a caratteristiche potenziate per gli stampi e gli stampati, ad una maggiore produttività, ad un design più efficiente, ad un layout più semplificato o ad una considerevole riduzione dei costi connessi al processo.

Tipicamente il processo stampaggio ad iniezione viene impiegato per soddisfare una produzione in serie, ma tale tecnica è ugualmente utilizzabile per fabbricare oggetti in serie ridotta. In tal caso, l'investimento iniziale risulterebbe particolarmente sfavorevole nell'ambito della prototipazione, fase in cui possono registrarsi molteplici modifiche progettuali, ma anche nella realizzazione di piccole tirature di pezzi altamente personalizzati: in entrambi i casi, infatti, i costi iniziali inciderebbero fortemente sul costo unitario per pezzo prodotto.

Per evitare di sostenere un dispendioso investimento iniziale e di affrontare una lunga attesa necessaria per la fabbricazione dello stampo, è possibile ricorrere a soluzioni alternative come l'impiego di stampi e inserti realizzati in alluminio o prodotti mediante tecniche di fabbricazione additiva (FDM) in materiale composito a matrice polimerica o metallico: in questo modo, si può evitare di sostenere un dispendioso investimento iniziale e di affrontare una lunga attesa necessaria per la fabbricazione dello stampo, riducendo tempi e costi produttivi.

Tale approccio produttivo risulta particolarmente vantaggioso anche nella produzione di oggetti macroscopicamente simili che si differenziano per piccole porzioni superficiali ben definite e circoscritte (come singole personalizzazioni o l'indicazione del brand di riferimento): in questi casi, infatti, risulta particolarmente conveniente mantenere quasi interamente il corpo dello stampo in materiale metallico, andando a sostituire, con un inserto appositamente prodotto, esclusivamente la parte originale da riprodurre che differenzia i singoli lotti.

### *1.7.2. Produzione mediante Additive Manufacturing di inserti e stampi per lo Stampaggio ad Iniezione*

Tra le più recenti, una delle principali innovazioni nel campo dello Stampaggio ad iniezione, che desta particolarmente interesse, consiste nella realizzazione di inserti di stampi in materiali compositi a matrice polimerica, sfruttando le tecnologie di produzione additiva, al fine di realizzare porzioni specifiche dello stampo altamente customizzate, pur mantenendo il corpo centrale realizzato in materiale metallico. Infatti, le tecniche di *Additive Manufacturing*, a causa delle loro caratteristiche uniche di affidabilità, piena libertà nel design, efficienza e convenienza, sono state significativamente integrate in vari processi produttivi.

In riferimento al processo di Injection Moulding, poiché la realizzazione dello stampo richiede un ingente sforzo economico e una lunga attesa a fronte di un'elevata specificità del prodotto, le tecniche di produzione additiva vengono sfruttate per la fabbricazione di inserti di stampi ad iniezione per semplificare la fase di prototipazione o per assolvere alla produzione di piccoli e medi lotti di prodotti altamente personalizzati.

In questo paragrafo, poiché tale lavoro di tesi riguarda l'impiego di tecniche additive appartenenti alla classe di *Material Extrusion* (MEX), come la *Fused Filament Fabrication* (FFF) o la *Fused Deposition Modeling* (FDM), verrà fornita una panoramica dello stato dell'arte relativamente al suddetto aspetto: negli ultimi anni, infatti, in risposta alle esigenze produttive di oggetti complessi e multifunzionali con un limitato *time to market*, le tecniche FFF e FDM sono state utilizzate spesso per la fabbricazione di stampi e inserti sia *Soft* che *Hard*.

Sebbene gli inserti prodotti mediante tecniche additive dispongano di una vita utile inferiore rispetto a quelli prodotti con tecniche produttive convenzionali, è bene specificare come le tecniche di *Additive Manufacturing* risultino promettenti alternative per la produzione di stampi o di inserti di stampi per lo Stampaggio ad Iniezione: prima di poter evolvere in una strategia produttiva valida e consistente, si necessitano ulteriori progressi per migliorare il comportamento del materiale alle sollecitazioni cicliche termiche e meccaniche a cui viene sottoposto in opera.

Allo stato dell'arte attuale, la letteratura scientifica dispone di un numero modesto di studi in merito al *Rapid Tooling* di inserti di stampi ad iniezione impiegando tecniche di FFF o FDM: i tratti salienti di alcuni tra i più interessanti lavori accademici sono riportati in seguito.

Gohn et al. [26] hanno sviluppato un processo di prototipazione per la realizzazione di dispositivi di *drug delivery* a lungo termine: tali strumenti sono stati fabbricati o per semplice estrusione oppure mediante stampaggio ad iniezione sfruttando l'utilizzo di inserti in acciaio e di inserti prodotti tramite tecniche additive di FDM, utilizzando un composito a matrice polimerica rinforzato con fibre di carbonio corte (PA 6/CF). Sono state studiate le proprietà e la finitura superficiale degli stampati, registrando, per il design dimostratosi più performante, integrità strutturale per una produzione continuativa di 15 pezzi prima che le sollecitazioni termo – meccaniche, a cui l'inserto è stato sottoposto durante il processo produttivo, ne hanno causato la deformazione permanente.

Hanemann, et al. [27] hanno valutato l'influenza dei parametri di stampa, le proprietà di stabilità meccanica, di bassa rugosità superficiale, di elevata conducibilità termica per compositi a matrice polimerica (PEEK) e differenti seconde fasi (6% wt di nanotubi di carbonio – CNT, 6%wt. e 10%wt. di particelle di rame), realizzati mediante FFF, come elegibili per la realizzazione di inserti di stampi per lo stampaggio ad iniezione di materiali polimerici.

Simpson et al. [28] hanno condotto uno studio di fattibilità sullo sviluppo di utensili realizzati in materiale polimerico commerciale, sfruttando le tecniche di produzione additiva PolyJet e FDM, confrontando le proprietà degli stampati in seguito ottenuti con le parti realizzate con convenzionali stampi in materiale metallico. È stato evidenziato come la velocità di raffreddamento differente, ottenuta nei diversi casi studio, influenzi le proprietà finali dei pezzi stampati, concentrandosi sulla necessità di adottare tecniche ausiliarie per garantire una produzione che qualitativamente possa avvicinarsi alle produzioni tradizionali, con stampi esclusivamente in materiale metallico.

Rodriguez [29] ha progettato, sviluppato e testato tre differenti stampi ad iniezione fino al raggiungimento del guasto dell'utensile, ovvero fino al raggiungimento dell'inutilizzabilità dello stampo o all'ottenimento di un pezzo stampato non rispettante la qualità di produzione attesa, dimostrando l'adeguatezza di tale tecnologia per soddisfare la produzione di cicli brevi o di prototipi funzionali.

Siemiński et al. [30] hanno prodotto inserti di stampi ad iniezione mediante tecnica FDM/FFF in PLA, valutando sia l'influenza benefica sulla vita utile dell'inserto di un trattamento termo – chimico che la variazione della geometria degli stampati nei successivi cicli produttivi, confrontandone le proprietà per parti ottenute impiegando stampi in acciaio e stampi con inserti in materiale polimerico.

Dizon et al. [31] hanno studiato un processo di *Hybrid Manufacturing*, combinando le tecniche di FFF, SLA, PolyJet, per la realizzazione dello stampo, con lo stampaggio ad iniezione di PLA, confrontando, poi, la qualità degli stampati per mezzo di essi ottenuti. In particolare, per la tecnica di FFF, è stato utilizzato del PEEK, notando che il prototipo cede per delaminazione degli strati costitutivi: infatti, i cicli di apertura e chiusura dello stampo, uniti alle elevate temperature raggiunte durante l'iniezione e mantenute fino al completamento del raffreddamento, sottopongono l'oggetto a sollecitazioni termomeccaniche elevate, che portano ad un indebolimento complessivo della parte che cede nei punti particolarmente più difettosi.

Chung et al. [32] hanno proposto un protocollo per la progettazione, la realizzazione, l'assemblaggio e l'utilizzo dei componenti di uno stampo realizzato per FDM da impiegare in un processo di *Liquid Injection Moulding* (LIM) per la realizzazione di dispositivi biomedicali in elastomero: le soluzioni proposte riguardano l'ABS e il PC.

Dizon et al. [33] hanno comparato la qualità di pezzi stampati in PLA utilizzando uno stampo realizzato mediante SLA e uno mediante FDM: sono stati valutati sia il meccanismo di danneggiamento e l'accuratezza dimensionale degli stampati. Le difettosità riscontrate nello stampo realizzato mediante FDM mettono in luce la necessità di migliorare i processi produttivi e di disporre di materiali perfezionati, al fine di affinare le performance alle temperature di utilizzo e migliorare la resistenza alla frattura e alla delaminazione.

Farioli et al. [34] hanno approfondito l'impiego della tecnica FDM per produrre inserti polimerici utilizzando un grado commerciale del PEI e iniettando PP e POM. Gli inserti prodotti in PEI sono stati testati sottoponendoli a successivi cicli produttivi di stampaggio ad iniezione, fino all'osservazione di danni strutturali della parte stampata, raggiungendo un massimo di 20 cicli di stampaggio.

Nel presente lavoro di tesi è stata studiata la prototipazione rapida di inserti per lo stampaggio ad iniezione utilizzando differenti materiali commerciali compositi rinforzati con fibre di carbonio corte: la scelta adottata è giustificabile dal fatto che per poter garantire una buona resistenza del materiale, è necessario che questo disponga proprietà meccaniche e termiche migliorate, che i materiali compositi a matrice polimerica possono garantire rispetto alla matrice tale e quale. Per perfezionare ancor di più le proprietà richieste, gli inserti stampati mediante tecnica additiva di FFF sono stati sottoposti a differenti trattamenti

termici e a successiva caratterizzazione, al fine di identificare un optimum tra tempo di produzione e proprietà raggiunte. Successivamente si è proceduto all'inserimento nell'unità dello stampo, sostituendo la corrispondente parte in materiale metallico, e si è proceduto con lo stampaggio ad iniezione.

Infine, è stata valutata la finitura superficiale degli stampati confrontando differenti parametri con pezzi stampati impiegando l'intera cavità dello stampo in acciaio, valutando il materiale che permette di ottenere degli stampati dalla qualità migliorata. Seguirà una parte descrittiva inerenti agli strumenti e ai materiali utilizzati e un'ultima parte recante i risultati ottenuti e la loro discussione critica.



## 2. Materiali e Metodi

Nel seguente capitolo verranno analizzati e descritti i materiali impiegati e gli strumenti adoperati per lo svolgimento del lavoro di tesi.

### 2.1. *Materiali utilizzati per la realizzazione degli inserti*

Per una caratterizzazione più accurata dei filamenti commerciali impiegati per la realizzazione degli inserti di stampi ad iniezione, la corrente sezione è provvista dei termogrammi recanti la variazione percentuale in massa (%) in funzione della temperatura, risultanti dall'esecuzione dell'analisi termogravimetrica (TGA), attraverso cui è stato valutato il quantitativo di residuo a fine prova, i cui valori, insieme ad altri parametri ottenuti dall'analisi TGA quali la temperatura a cui si registra una perdita del 2% del peso del campione ( $T_{2\%}$ ) e la temperatura di massima velocità di perdita in peso ( $T_{MAX}$ ), sono riportati nella Tabella 3.

Successivamente, il residuo a fine prova è stato sottoposto ad analisi SEM per la valutazione delle dimensioni medie di lunghezza e diametro delle fibre di carbonio, i cui valori sono riportati in Tabella 4.

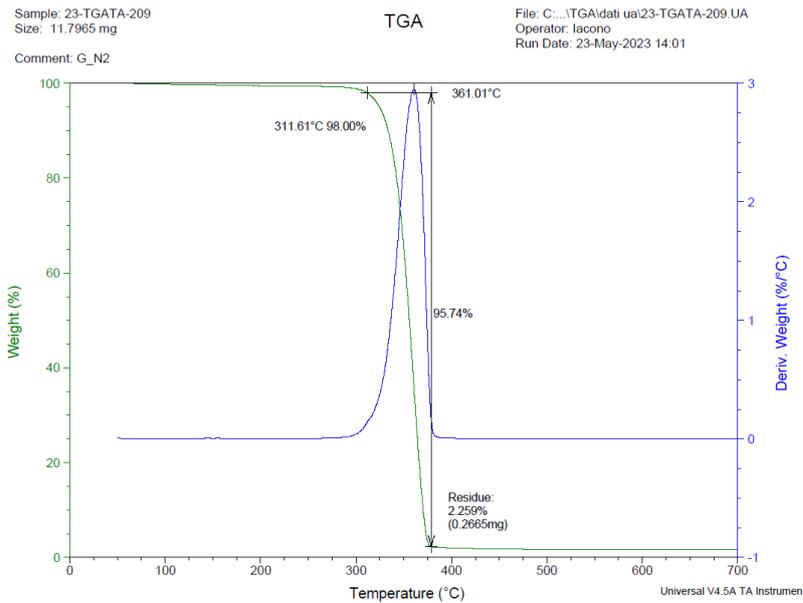
Nelle Figure 11, 14, 17, 19 sono riportati, rispettivamente, i termogrammi relativi ai filamenti commerciali F-G3D, F-AOM, F-ANY e R-CPA; nelle Figure 12, 15, 18, 20 sono presentate, rispettando il medesimo ordine, le micrografie ottenute con il microscopio elettronico a scansione (SEM) sui residui ottenuti dall'analisi TGA.

#### 2.1.1. *FILOALFA® GRAFYLON® 3D* [35]

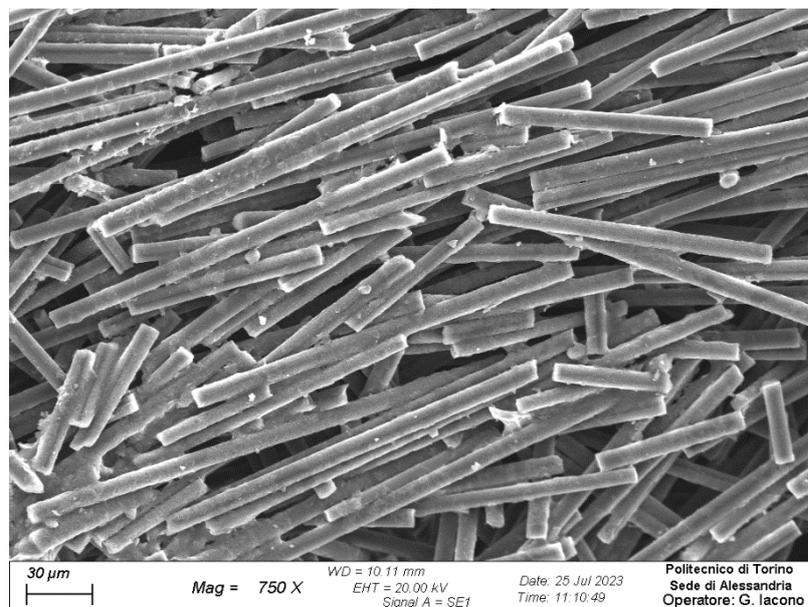
Grafylon® 3D (F-G3D) è un filamento commerciale del marchio FILOALFA® per la stampa 3D, composto da una matrice in PLA additivata con Graphene Plus, rinforzante prodotto da *Directa Plus*, uno tra i più grandi fornitori di prodotti a base grafene del mondo, consistente in nanolamelle di grafene (GNPs). Rispetto ad un filamento in PLA tradizionale, Grafylon® 3D offre proprietà migliorate: +34% per il modulo elastico, +23% per la resistenza a trazione, +28% per l'allungamento, +100% per la conducibilità termica (in particolare, a partire da 0,1915 a 0,385  $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ ) e una migliorata finitura superficiale, ottenibile proprio grazie ad una conducibilità termica potenziata.

Il filamento è completamente atossico ed inodore e permette di coniugare le proprietà di resistenza meccanica elevata, di alta conducibilità termica e di una finitura superficiale definita.

I parametri di stampa consigliati dal produttore prevedono la temperatura di estrusione compresa tra 170 – 210°C, la temperatura della piattaforma di stampa tra 0 – 50°C e l'accensione della ventola.



**Figura 11:** Analisi TGA per il campione di filamento commerciale Filoalfa® Grafylon 3D.



**Figura 12:** Micrografia SEM del residuo a fine prova TGA del filamento commerciale F-G3D.

### 2.1.2. FILOALFA® ALFAOMNIA [36]

Alfaomnia (F-AOM) è un filamento per la stampa 3D, prodotto dal marchio FILOALFA®, facile da stampare e dalle elevatissime prestazioni meccaniche e termiche. Il filamento è composto da una matrice di PET – G, arricchita di fibre di carbonio, rinforzante che conferisce elevata rigidità, finitura opaca ed una superiore resa estetica.

Le principali proprietà del filamento sono fornite nella scheda tecnica del materiale commerciale, riportata in Figura 13; i parametri di stampa suggeriti dal produttore riguardano:

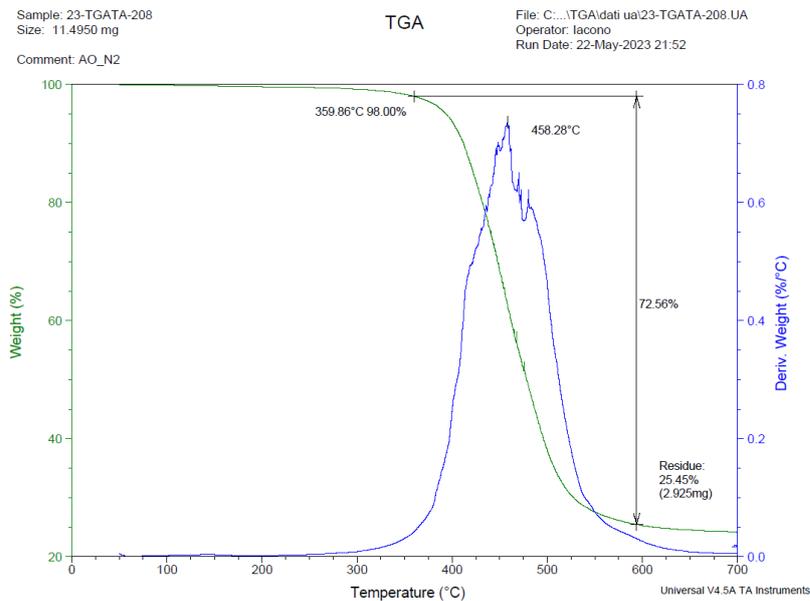
- Temperatura di estrusione: 240 – 260°C;
- Temperatura della piattaforma di stampa: 0 – 70°C;
- Ventola: OFF.



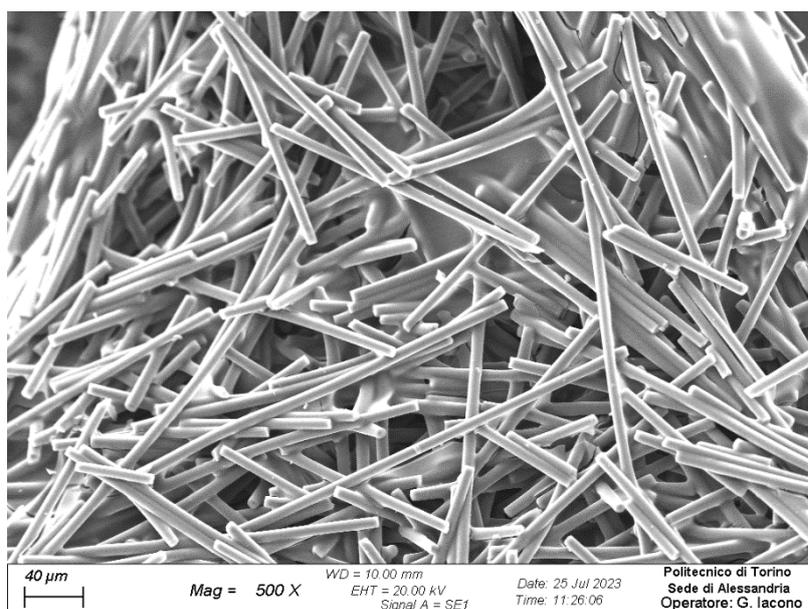
Oct. 2019

TECHNICAL DATE SHEET		ALFAOMNIA	
BASE MATERIAL: PET-G + 10% carbon fiber + additives			
PROPERTIES			
PROPERTIES	VALUE	METOD AND CONDUCTION	
PHYSICAL & MECHANICAL	Density	1,19 g/cm3	ISO 1183
	Tensile module	7740 Mpa	ISO 527
	Tensile strength at break	111 Mpa	ISO 527
	Tensile Elongation	3,2%	ISO 527
	CHARPY	13 kJ/m2	ISO 527
THERMAL	Melting point	/	/
	Heat Deflection Temperature	109°C	/
	Viscat Softening Temperature	105°C	ISO 306
	Electrical properties:		
	Volume resistivity	/	/
Dielectric strength	/	/	
SUGGESTED PRINTER SETTING			
	VALUE	UNIT	
Extruder Temperature	240 – 260	°C	
Print Speed	40 – 60	mm/sec	
Bed Material	0 – 70	°C	
Recommended nozzle	steel, ruby or tungsten.		
PRODUCT DETAILS & CERTIFICATION			
Diameter	1,75 mm 2,85 mm	Tolerance ± 0,05mm Tolerance ± 0,10mm	
Major Benefits	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mechanically high-performance material</li> <li>- High impact resistance with low temperature ductility</li> <li>- High strength</li> <li>- Excellent printability and resolution</li> <li>- Excellent resistance to high temperatures</li> </ul>		

Figura 13: Scheda tecnica filamento commerciale F-AOM. [36]



**Figura 14:** Analisi TGA per il campione di filamento commerciale F-AOM.



**Figura 15:** Micrografia SEM del residuo a fine prova TGA del filamento commerciale F-AOM.

### 2.1.3. *FILOALFA*® *ALFANYLON CF* [37]

Il filamento per stampa 3D Alfanylon CF, prodotto dal marchio *FILOALFA*®, è un filamento in PA rinforzato con fibre di carbonio corte. Le principali proprietà consistono in elevata resistenza agli urti, alle scalfitture e agli agenti chimici, che permettono di ottenere oggetti e prototipi dalle elevate proprietà meccaniche con un'ottima stabilità dimensionale.

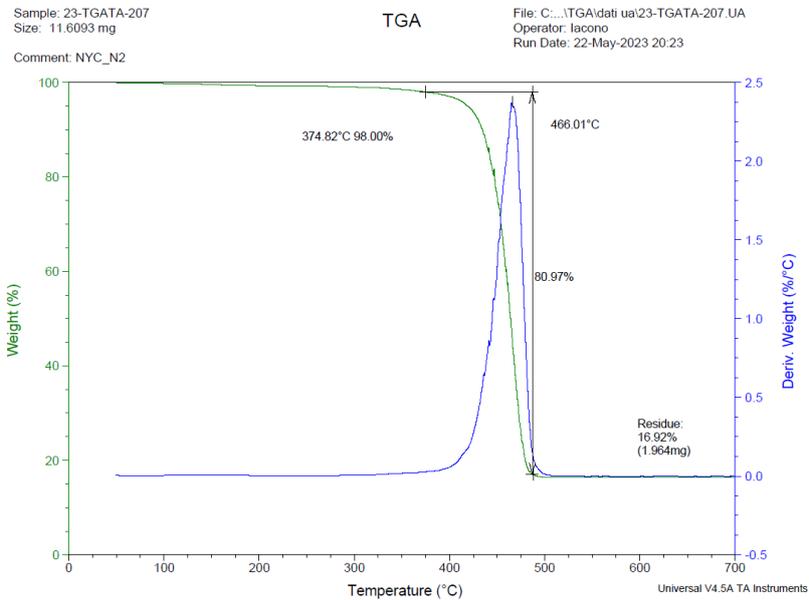
I parametri operativi di stampa suggeriti dal produttore risultano essere:

- Temperatura di estrusione: 240 – 260°C;
- Temperatura della piattaforma di stampa: 70 – 110°C;
- Ventola: OFF.

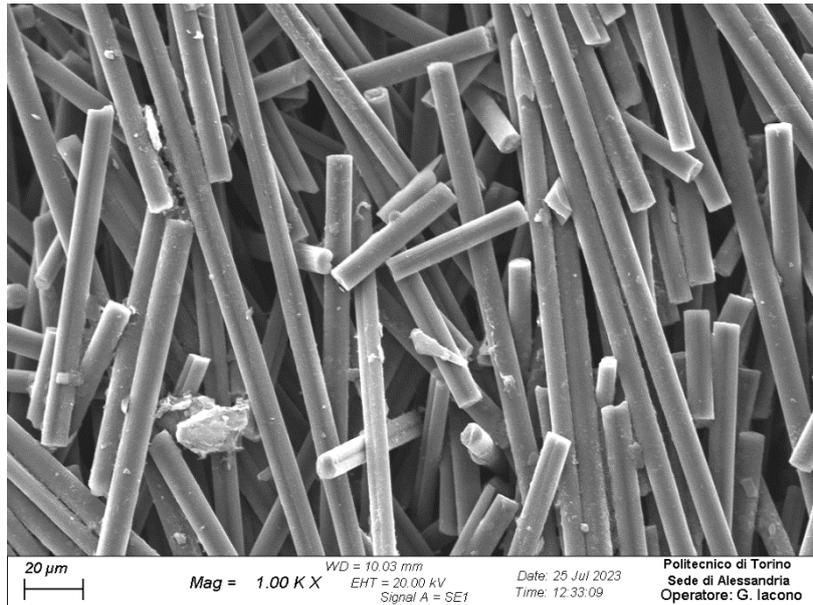
Nella Figura 16 è riportata la scheda tecnica del filamento.

TECHNICAL DATE SHEET		ALFANYLON CF (LT)	
<b>PROPERTIES</b>			
PROPERTIES	VALUE	METOD AND CONDICTION	
<b>PHYSICAL &amp; MECHANICAL</b>	Density	1,08 g/cm3	ISO 1183
	Impact Strength	60 Kj/m2	ISO 179/2-1eU
	Tensile strength	125 Mpa	ISO 527
	Tensile Modulus	8900 Mpa	ISO 527
	Elongation at break	4,90%	ISO 527
<b>THERMAL</b>	Heat Deflection Temperature	163 °C	ISO 75
	Vicat	171°C	ISO 306
	Flammability:	HB	
<b>SUGGESTED PRINTER SETTING</b>			
	VALUE	UNIT	
Extruder Temperature	250 - 270	°C	
Print Speed	30 -50	mm/s	
Bed Material	60 - 70	°C	
Drying Temperature	80 - 90	°C for 4-6 hr	
<b>PRODUCT DETAILS &amp; CERTIFICATION</b>			
Diameter	1,75 mm 2,85 mm	Tolerance ± 0,05mm Tolerance ± 0,05mm	

**Figura 16:** Scheda tecnica del filamento commerciale **FILALFA**® **ALFANYLON CF**. [37]



**Figura 17:** Analisi TGA per il campione di filamento commerciale **F-ANY**.



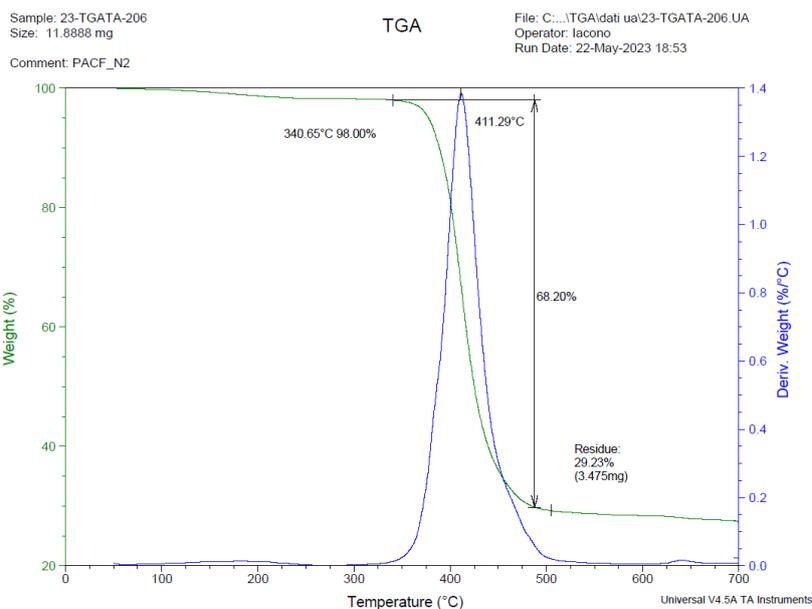
**Figura 18:** Micrografia SEM del residuo a fine prova TGA del filamento commerciale F-ANY.

#### 2.1.4. Roboze ® Carbon PA [38]

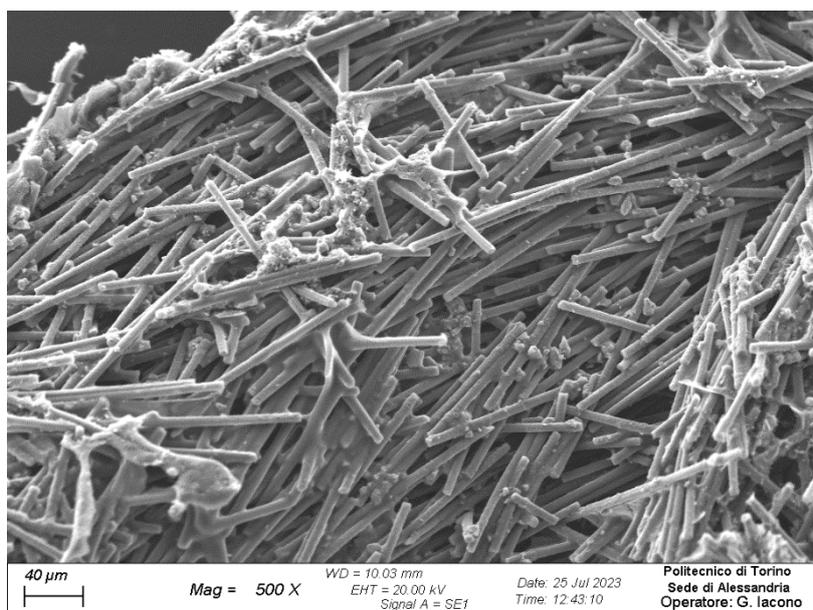
Il filamento commerciale per FFF Carbon PA, prodotto dalla Roboze ®, è in PA6 rinforzata con fibre di carbonio corte: è il materiale ideale per la sostituzione di leghe leggere in metallo grazie alle sue potenziate proprietà meccaniche, riassunte nella Tabella 2, redatta a partire dalla scheda tecnica fornita dal produttore in riferimento alle proprietà dei pezzi ottenuti mediante stampa 3D del filamento (per le caratteristiche meccaniche si considerano pezzi che vengono realizzati con un'orientazione XY). Inoltre, tale filamento possiede una HDT (Temperatura di inflessione sotto carico) di 240°C ed un'elevata qualità estetica.

**Tabella 2:** Proprietà del filamento R-CPA.

<b>Caratteristica</b>	<b>Valore</b>
Resistenza a trazione	136 MPa
Modulo elastico	15,5 GPa
Allungamento a rottura	1,62%
Resistenza a flessione	100 MPa
Modulo a flessione	5 GPa
Massima temperatura per esercizio continuo	150°C
Densità	1,4 g/cm <sup>3</sup>



**Figura 19:** Analisi TGA per il campione di filamento commerciale R-CPA.



**Figura 20:** Micrografia SEM del residuo a fine prova TGA del filamento commerciale R-CPA.

Nella Tabella 3 sono riportati tutti i parametri di interesse ottenuti dall'esecuzione dell'analisi TGA, mentre nella Tabella 4 sono riportati i valori medi di lunghezza e diametro calcolati mediante l'impiego del software *ImageJ* a partire dalle micrografie realizzate al microscopio elettronico a scansione (SEM) sul residuo conseguito a fine prova TGA.

**Tabella 3:** Risultati ottenuti dall'esecuzione dell'analisi termogravimetrica sui campioni di filamento commerciale utilizzato per la realizzazione di inserti di stampi ad iniezione.

<b>Campione</b>	<b>T<sub>2%</sub></b> <b>[°C]</b>	<b>T<sub>max</sub></b> <b>[°C]</b>	<b>Variazione</b> <b>% massa</b>	<b>Residuo</b>
R-CPA	341	411	68,20	29,23 % (3,475 mg)
F-ANY	373	466	80,97	16,92 % (1,964 mg)
F-AOM	360	458	72,56	24,45 % (2,925 mg)
F-G3D	312	361	95,74	2,259 % (0,2665 mg)

**Tabella 4:** Valori medi di lunghezza, diametro e aspect ratio delle fibre di carbonio utilizzate come rinforzante nei filamenti commerciali, valutati dalle micrografie SEM performate sui residui a fine prova ottenuti dall'esecuzione dell'analisi termogravimetrica (TGA).

<b>Filamento commerciale</b>	<b>Lunghezza</b> <b>[µm]</b>	<b>Diametro</b> <b>[µm]</b>	<b>Aspect Ratio</b> <b>(L/D)</b>
R-CPA	143,4 ± 28,3	6,4 ± 0,3	22,6 ± 5,3
F-ANY	141,0 ± 71,3	8,4 ± 0,2	16,9 ± 9,0
F-AOM	140,3 ± 43,2	8,3 ± 0,4	17,0 ± 6,0
F-G3D	146,3 ± 55,8	8,4 ± 0,3	17,5 ± 7,2

I valori di T<sub>2%</sub> sono identificativi dell'onset della degradazione termica del materiale, quindi, conferiscono informazioni in merito alla stabilità termica dello stesso.

Analizzando i valori riportati nella Tabella 3, si evince come il filamento che mostra una maggiore stabilità termica sia F-ANY, con una temperatura a cui si ottiene una perdita del 2% in peso pari a 373 °C, mentre il filamento che possiede una minore stabilità termica risulta essere F-G3D, con una temperatura di 312 °C.

L'analisi TGA, performata in azoto, è stata utilizzata per determinare il contenuto di fibre di carbonio nei vari filamenti commerciali impiegati per la produzione di inserti di stampi ad iniezione, inteso pari al contenuto di residuo a fine prova, sottoposto successivamente ad un'indagine al SEM per la valutazione delle dimensioni caratteristiche medie delle fibre di carbonio (lunghezza e diametro) contenute nei filamenti commerciali designati.

Tra i filamenti commerciali studiati in questo lavoro di tesi, il candidato più adatto alla realizzazione di inserti di stampi ad iniezione è quello in grado di sostenere in modo efficiente alle sollecitazioni:

- termiche, dissipando in modo efficiente il calore, evitando incrementi di temperatura localizzati nelle porzioni a contatto con il polimero fuso, che conducono ad una

diminuzione delle proprietà meccaniche tanto più consistente quanto più ci si avvicina alla temperatura di transizione vetrosa del materiale stesso;

- meccaniche a cui l'inserto viene sottoposto in opera con le ripetute fasi di chiusura dello stampo, iniezione del polimero fuso e mantenimento del ciclo produttivo.

In questo senso, per individuare il materiale commerciale più performante, si è pensato di studiare il comportamento termico e meccanico di filamenti in materiale composito a matrice polimerica rinforzato con fibre di carbonio corte. Infatti, le fibre di carbonio corte (SCF) vengono ampiamente impiegate come rinforzanti per la realizzazione di compositi a matrice polimerica a causa delle proprietà meccaniche possedute: ad esse sono attribuiti elevati valori di modulo elastico, elevata resistenza a trazione, una buona stabilità e conducibilità termiche, ma, di contro, posseggono un comportamento fragile. [39]

Dunque, aumentando il contenuto di SCF come rinforzante della matrice polimerica si consegue un miglioramento in resistenza, modulo elastico, stabilità termica e durezza, contrariamente alle proprietà di duttilità e allungamento del materiale, che subiscono, invece, una decrescita. [40]

L'introduzione di fibre di carbonio corte per la realizzazione di un composito a matrice polimerica, comporta una modifica della risposta termica e meccanica della matrice polimerica vergine. [41]

Per quanto concerne le complessive proprietà meccaniche, è possibile osservare un aumento di rigidità, stabilità termica, durezza e resistenza insieme ad una diminuzione di tenacità duttilità e flessibilità aumentando il contenuto di SCF nella matrice polimerica. [40]

Tra i fattori che conferiscono un maggiore contributo all'effetto di rafforzamento meccanico della matrice polimerica è l'Aspect Ratio (AR), inteso per le fibre come il rapporto tra la lunghezza delle fibre e il loro diametro. Se aumenta l'AR, aumenta globalmente di superficie di fibra a contatto con le catene polimeriche, assicurando un più efficiente trasferimento della sollecitazione meccanica alla fibra ed un effetto di blocco della propagazione dello sforzo nella matrice.

Per quanto riguarda le proprietà termiche, l'inserimento delle fibre di carbonio corte comporta l'incremento della stabilità termica rispetto alla matrice tale e quale materiale. [42]

Infatti, questo risultato si raggiunge a causa della maggiore capacità di assorbimento del calore delle fibre di carbonio rispetto ai polimeri, che comporta la necessità di esporre il materiale composito a valori di energia termica superiori prima di poter attivare i processi di degradazione termica dello stesso.

Il comportamento conduttivo nei materiali compositi dipende dall'ottimale quantitativo di fibre e cariche conduttive e dalla loro omogenea dispersione e distribuzione nella matrice polimerica.

Se le cariche conduttive riescono a formare nella matrice un network tridimensionale continuo superando la soglia di percolazione, allora è possibile aumentare la conducibilità termica della matrice polimerica e dissipare più efficacemente il calore, mantenendo

temperature globalmente più contenute durante i cicli del processo produttivo ed evitando che il degrado delle proprietà meccaniche, nello specifico per questo lavoro di tesi, possa minare l'accurata riproduzione dell'oggetto per stampaggio ad iniezione.

Pertanto, il quantitativo di fase rinforzante e conduttiva deve essere idealmente contenuto, al fine di garantire distribuzione e dispersioni ottimali nella matrice polimerica; tuttavia, essendo quella di conducibilità termica una proprietà tipica della sola carica inserita, il contenuto da aggiungere deve essere comunque sufficientemente elevato per garantire il contatto tra le fibre, generando, quindi, un percorso continuo di scarico e dissipazione del calore.

I valori di Aspect Ratio medi calcolati, riportati nella Tabella 4, e il contenuto di fibre di carbonio, riportati nella Tabella 3, suggeriscono che il miglior candidato per la realizzazione dell'inserito risulti essere il filamento commerciale R-CPA.

#### 2.1.5. *GEEETECH*® PLA [43]

Il GEEETECH® PLA è un filamento in PLA puro, economico e facile da stampare, che permette di coniugare elevata resistenza e alta precisione di stampa.

Le condizioni ottimali di stampa prevedono una temperatura dell'estrusore compresa tra 185 – 210°C, una temperatura della piattaforma di stampa compresa tra 25 – 60°C. Per l'impiego di tale materiale commerciale, al fine di ottenere una stampa di qualità elevata, è fondamentale considerare l'igroscopicità del filamento stesso, che rende necessaria una fase preliminare di essiccazione.

#### 2.1.6. *Lega di Alluminio Ergal 7075* [44]

Il nome commerciale Ergal si riferisce alla lega Alluminio 7075, standard europeo EN AW-7075, la cui composizione annovera, oltre all'alluminio (86.9 – 91.4%) zinco (5.1 – 6.1%), magnesio (2.1 – 2.9%) e rame (1.2 – 2.0%).

Tale lega trova applicazione in campo aeronautico, nella costruzione di apparecchiature sottoposte a significativi sforzi statici e dinamici, ma anche nella costruzione di stampi da produzione: risulta essere particolarmente leggera (densità 2,81 g/cm<sup>3</sup> a 20°C), resistente agli urti, alla torsione e avere conducibilità termica elevata (130 W/mK) e ottima lavorabilità alle macchine utensili.

#### 2.1.7. *Acciaio 1.2083* [45]

L'acciaio 1.2083 (UNI X40Cr14) è un acciaio inossidabile, martensitico ad alta temprabilità, contraddistinto da ottima lavorabilità, buona lucidabilità, resistenza alla corrosione, all'usura e all'ossidazione a caldo: possiede una densità di 7.8 g/cm<sup>3</sup> e una conducibilità termica a 20°C di 16.5 W/mK. La tipica composizione chimica dell'acciaio in questione prevede C 0.40%, Si 0.80%, Mn 0.50%, Cr 14.50% e V 0.30%.

Tale materiale è tra i principali utilizzati per la realizzazione di stampi a caldo per lo stampaggio di materie plastiche: infatti le proprietà possedute consentono la realizzazione di uno stampo dalla durata maggiore, in grado di mantenere la finitura originaria per lungo tempo d'esercizio.

## 2.2. Materiali utilizzati per lo stampaggio ad iniezione

### 2.2.3. ENI Versalis Riblene ® MR 10 R [46]

Il Riblene ® MR 10 R è una resina di Low Density Polyethylene (LDPE), idonea alle applicazioni di stampaggio ad iniezione e compounding: a causa della sua fluidità, tale resina può essere impiegata come base per la preparazione di masterbatches.

Nella Figura 21 viene riportata la scheda tecnica fornita dal produttore.

**eni versalis**  
www.versalis.eni.com info.polyethylene@versalis.eni.com

**RIBLENE ®** **MR 10 R**  
LDPE Low density polyethylene

Riblene MR 10 R is a high fluidity low density polyethylene resin (LDPE).  
Parts made by Riblene MR 10 R are characterised by a high flexibility.

**Main Application**  
Riblene MR 10 R is suitable for injection moulding and compound applications. Riblene MR 10 R is recommended for large complex mouldings, artificial flowers and low thickness articles. Because of its fluidity, the resin can be used as base for masterbatches.

**Main Properties**

Resin Properties	Value	Unit	Test Method
Melt Flow Rate (190 °C/2.16 kg)	20	g/10min	ISO 1133
Melt Flow Rate (190 °C/5 kg)	-	g/10min	ISO 1133
Melt Flow Rate (190 °C/21.6 kg)	-	g/10min	ISO 1133
Density	0.918	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Melting point	107	°C	Metodo interno
Brittleness temperature	<- 20	°C	ASTM D 746
Vicat softening point (1 kg)	84	°C	ISO 306/A

Mechanical Properties *	Value	Unit	Test Method
Tensile stress at yield	10	MPa	ISO 527
Tensile stress at break	-	MPa	ISO 527
Tensile strain at yield	-	%	ISO 527
Elongation at break	-	%	ISO 527
Flexural modulus	120	MPa	ISO 178
Hardness Shore D	45	-	ISO 868 A
Falling Weight:	-	J/mm	ISO 6603-2
Izod impact strength, notched	-	J/m	ISO 180/A
Environmental Stress Cracking Resistance (ESCR)	-	h	ASTM 1693/B

(\*) Values are referred to injection moulded specimens. Actual properties are typical and may vary depending upon operating conditions. R= Made in Ferrara (Italy)

**Figura 21:** Scheda tecnica Riblene ® MR10 R di Versalis.

Le temperature di lavorazione dipendono da diversi parametri come la geometria della parte che deve essere realizzata, la localizzazione del gate di iniezione, dal macchinario utilizzato per lo stampaggio ad iniezione e dal raffreddamento dello stampo.

Tuttavia, tipiche condizioni di processo risultano essere:

- Profilo di Temperatura del cilindro: 160 – 210°C;
- Temperatura dello stampo: 10 – 30°C.

Tale materiale viene fornito nella forma di granuli e deve essere conservato in un ambiente asciutto, a temperature al di sotto dei 50°C, e al riparo dall'esposizione alla luce solare, per evitare che il materiale possa degradare, cambiando colore e diminuendo le proprietà fisiche del prodotto stesso.

### 2.2.2. *LyondellBasell Moplen HP500N* [47]

Il Moplen HP500N, fornito dalla LyondellBasell, è il nome commerciale di un grado di polipropilene omopolimero utilizzato generalmente per lo stampaggio ad iniezione. Le principali proprietà del materiale in questione sono riassunte nella scheda tecnica, fornita dal produttore, riportata nella Figura 22.

<b>Technical Data Sheet</b>			
<b>Moplen HP500N</b>			
Polypropylene, Homopolymer			
<b>Product Description</b>			
Moplen HP500N is a homopolymer used for general purpose injection moulding applications. It exhibits good flow and stiffness. Moplen HP500N is suitable for food contact.			
<b>Regulatory Status</b>			
For regulatory compliance information, see Moplen HP500N <a href="#">Product Stewardship Bulletin (PSB) and Safety Data Sheet (SDS)</a> .			
<b>Status</b>	Commercial: Active		
<b>Availability</b>	Africa-Middle East; Asia-Pacific; Europe		
<b>Application</b>	Furniture; Housewares		
<b>Market</b>	Compounding; Consumer Products; Rigid Packaging		
<b>Processing Method</b>	Compounding; Injection Blow Molding		
<b>Attribute</b>	Medium Flow; Medium Stiffness		
<b>Typical Properties</b>			
	<b>Nominal Value</b>	<b>Units</b>	<b>Test Method</b>
<b>Physical</b>			
Melt Flow Rate, (230 °C/2.16 kg)	12	g/10 min	ISO 1133-1
Density	0.90	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183-1
<b>Mechanical</b>			
Tensile Modulus	1400	MPa	ISO 527-1, -2
Tensile Stress at Yield	35	MPa	ISO 527-1, -2
Tensile Strain at Break	> 50	%	ISO 527-1, -2
Tensile Strain at Yield	10	%	ISO 527-1, -2
<b>Impact</b>			
Charpy Impact Strength - Notched, (23 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)	4	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
<b>Thermal</b>			
Vicat Softening Temperature (A/50 N)	153	°C	ISO 306
(B50)	85	°C	ISO 306
Heat Deflection Temperature B, (0.45 MPa, Unannealed)	95	°C	ISO 75B-1, -2

**Figura 22:** Scheda tecnica del Moplen HP500N di LyondellBasell.

### 2.2.3. *NaturePlast PBE 003* [48]

Il PBE003, prodotto dalla NaturePlast, è un grado di PBS, le cui proprietà sono sintetizzate nella Tabella 5, redatta a partire dalla scheda tecnica fornita dal produttore, recante le caratteristiche principali di tutti i biopoliesteri prodotti dall'azienda, che possono essere prodotti parzialmente utilizzando biomassa.

Tali poliesteri possono essere utilizzati per vari processi, quali estrusione, termoformatura e stampaggio ad iniezione per soddisfare le richieste di diversi mercati come quello del packaging flessibile e rigido, dei beni di consumo e dell'agricoltura.

*Tabella 5: Proprietà del PBE003 della NaturePlast estrapolate dalla scheda tecnica fornita dal produttore.*

<b>Grade PBE003</b>	
<b>Biobased [%]</b>	50
<b>Density [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,26
<b>MFI (g/10min, 190°C e 2,16 kg)</b>	5
<b>Tensile Modulus [MPa]</b>	720
<b>Tensile Elongation [%]</b>	330
<b>Charpy Impact Unnotched [kJ/m<sup>2</sup>]</b>	No Break
<b>Thermal Resistance (HDT B)</b>	90

#### 2.2.4. NatureWorks ® Ingeo™ 3251D [49]

Il biopolimero Ingeo™ 3251D, fornito dalla NatureWorks ®, è un grado di PLA realizzato per l'applicazione nel processo di stampaggio ad iniezione, la cui scheda tecnica è riportata in Figura 23: infatti, questo grado possiede una capacità di Melt Flow maggiore rispetto ai gradi delle altre resine Ingeo presenti sul mercato e ciò permette una replica più precisa delle parti con spessori più sottili. Prima di poter essere utilizzato nel processo di stampaggio ad iniezione, si raccomanda una fase di essiccazione fino a raggiungere un contenuto di umidità inferiore ai 100 ppm (0,010%) per evitare la degradazione del polimero.

<b>Typical Material &amp; Application Properties</b>		
<b>Physical Properties</b>	<b>Ingeo 3251D</b>	<b>ASTM Method</b>
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	80	D1238
MFR, g/10 min (190°C, 2.16kg)	35	D1238
Relative Viscosity	2.5	
Crystalline Melt Temperature (°C)	155-170	D3418
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	D3418
Clarity	Transparent	
<b>Mechanical Properties</b>		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,000 (62)	D638
Tensile Elongation, %	3.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength (MPa)	15,700 (108)	D790
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

*Figura 23: Scheda tecnica del PLA 3251D di Ingeo™ Nature Natureworks.*

### 2.2.5. Maip IamNature B6A13 [50]

IamNATURE B6A13 è il nome commerciale di un grado di PHBH fornito dalla Maip generalmente impiegato per estrusione e stampaggio ad iniezione.

Le principali proprietà e le caratteristiche termiche e meccaniche di interesse sono riportate nella scheda tecnica in Figura 24.

Prima della lavorazione del materiale è consigliata una preliminare fase di essiccazione al fine di eliminare il contenuto di umidità assorbita.

PROPRIETÀ	PROPERTIES	METODO	UNITA'	COND.PROVA	
		STANDARD	UNIT	TEST COND.	
<b>PROPRIETÀ GENERALI</b>	<b>BASIC PROPERTIES</b>				
Contenuto di carica	Ash content	ISO 3451-1	%	Met. A	-
Densità	Density	ISO 1183-1	g/cm <sup>3</sup>	23° Met. A	1.20
Indice di fluidità	Melt Mass Flow (MFR)	ISO 1133-2	g/10min	165°C; 5 Kg	7
Ritiro allo stampaggio long.	Parallel mould shrinkage	ISO 294-5	%		-
Ritiro allo stampaggio trasv.	Across mould shrinkage	ISO 294-5	%		-
<b>PROPRIETÀ TERMICHE</b>	<b>THERMAL PROPERTIES</b>				
CLTE longitudinale	CLTE parallel	ISO 11359	10 <sup>-6</sup> /K	23°-55°	-
CLTE trasversale	CLTE across	ISO 11359	10 <sup>-6</sup> /K	23°-55°	-
Temperatura di fusione	Melting point	ISO 11357	°C	DSC (10°C/min)	145
Temperatura di transizione vetrosa	Glass Transition Temp.	ISO 11357	°C	DSC (10°C/min)	2
Vicat, Temp. di rammollimento	Vicat, Softening Temp.	ISO 306	°C	1/5kg-50°C/h	128/99
Temp.di distorsione sotto carico	Heat Distorsion Temp.	ISO 75	°C	0.45/1.8 MPa	110/-
<b>PROPRIETÀ MECCANICHE</b>	<b>MECHANICAL PROPERTIES</b>				
Resistenza a snervamento	Stress at yield	ISO 527-1-2	MPa	v=50mm/min	-
Modulo elastico a trazione	Tensile Modulus	ISO 527-1-2	MPa	v=1mm/min	-
Carico di rottura a trazione	Tensile stress at break	ISO 527-1-2	MPa	v=50mm/min	25
Allungamento a trazione	Strain at break	ISO 527-1-2	%	v=50mm/min	5
Carico a flessione	Flexural strength	ISO 178	MPa	v=2mm/min	35
Modulo elastico a flessione	Flexural modulus	ISO 178	MPa	v=2mm/min	1.400
Urto Izod senza intaglio	Izod impact strength	ISO 180-1U	kJ/m <sup>2</sup>	23°C	-
Urto Izod con intaglio	Izod notched impact	ISO 180-1A	kJ/m <sup>2</sup>	23°C	2,5
Urto Charpy con intaglio	Charpy notched impact	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	23°C	-
<b>ALTRE PROPRIETÀ</b>	<b>OTHER PROPERTIES</b>				
Grado di infiammabilità	Flammability	UL-94	Class.	/mm	HB
Velocità di combustione	Burning rate	ISO 3795	mm/min	FMVSS302	<100
G.W.F.I.	G.W.F.I.	IEC 60695	°C/mm		-
Resistività superficiale /Volume	Surface / Volume Resistivity	IEC 60093	ohm-ohm/cm		-/-
Conducibilità termica	Thermal conductivity		W/(mK)	in/trough plane	-
Durezza (Shore)	Hardness (Shore)	ISO 868	D	15 sec.	-
Trasmittanza	Transmittance	ISO 13468	%	/mm	-
Opacità H	Haze H	ISO 14782	% / GU	/mm	-
Gloss G	Gloss G	Erichsen		60° angle	-
<b>PARAMETRI DI LAVORAZIONE</b>	<b>PROCESSING CONDITIONS</b>				
Temperatura di essiccazione	Drying temperature	-	°C		80
Tempo di essiccazione	Drying time	-	h		3-9
Contenuto di umidità	Moisture content	internal	ppm		200-400
Temperatura massa fusa	Melt temperature	-	°C		135-155
Temperatura stampo	Mould temperature	-	°C		25-35

Figura 24: Scheda tecnica Maip IamNATURE B6A13.

### 2.2.6. Blend Polimerici

Al fine di testare la validità degli inserti prodotti in range di temperature intermedie tra le temperature di lavorazione di due dei principali materiali designati (PBS, PP), sono stati realizzati dei blend polimerici, le cui composizioni sono schematizzate nella Tabella 6, utilizzando l'estrusore bivate modello Process 11 di Thermo Fisher Scientific™.

*Tabella 6 – Composizioni dei blend polimerici realizzati e relativi nomi commerciali dei costituenti.*

<b>Codice</b>	<b>Composizione (%wt.)</b>	<b>Materiali commerciali</b>
<b>PBS90PHBH10</b>	PBS 90% PHBH 10%	NaturePlast PBE003 Maip IamNATURE B6A13
<b>PBS80PHBH20</b>	PBS 80% PHBH 20%	NaturePlast PBE003 Maip IamNATURE B6A13
<b>PBS90PLA10</b>	PBS 90% PLA 10%	NaturePlast PBE003 NatureWorks® Ingeo™ 3251D

### 2.3. *Strumenti utilizzati per la realizzazione dei blend, degli inserti di stampi e degli stampati ad iniezione*

#### 2.3.1. *Compounding: Estrusore bivate co-rotante Thermo Fisher Scientific™ Process 11 [51]*

Per preparare i blend polimerici è stato utilizzato l'estrusore bivate modello Process 11 di Thermo Fisher Scientific™, riportato nella Figura 25.



**Figura 25:** Estrusore bivate co-rotante Process 11 della Thermo Fisher Scientific™, dosatore volumetrico, vasca di solidificazione e taglierina per la pellettizzazione del filamento estruso.

L'estrusore è caratterizzato da due viti co-rotanti, che dispongono di un diametro di 11 mm e sono posizionate all'interno di un cilindro di lunghezza di 40 L/D avente 7 zone riscaldate; inoltre, lo strumento è fornito di un dosatore di tipo volumetrico.

Il materiale che fuoriesce dalla testa dell'estrusore come un filamento viene raffreddato in una vasca contenente acqua per una certa lunghezza di percorso e, successivamente, tagliato per produrre dei pellets.

Lo strumento è dotato di un pannello touchscreen tramite cui è possibile regolare le temperature delle singole zone del cilindro e la velocità delle viti.

I parametri di processo impostati per la realizzazione dei blend polimerici prodotti nella forma di pellets per alimentare il processo di stampaggio ad iniezione sono riassunti nella Tabella 7.

**Tabella 7:** Parametri di processo utilizzati all'estrusore bivate per la realizzazione dei blend polimerici.

Blend polimerico	Temperatura delle sette zone	Velocità vite
<b>PBS90PHBH10</b>	160 °C	100 rpm
<b>PBS80PHBH20</b>	160 °C	100 rpm
<b>PBS90PLA10</b>	180 °C	100 rpm

I pellet di materiale vergine, impiegati nella realizzazione dei blend polimerici, prima di poter essere miscelati nei rapporti predefiniti e inseriti nel dosatore volumetrico per poter alimentare il processo di estrusione, sono stati essiccati per 5 ore ad 80°C.

Dopo aver pesato la quota adeguata dei singoli componenti del blend e aver miscelato manualmente i pellet dei due materiali vergini, è stata settata una velocità della vite della tramoggia al fine di garantire una quantità di materiale estruso, da usare nel successivo processo di stampaggio ad iniezione, di almeno 0,500 kg (portata 0,500 kg/h).

L'ugello adoperato ha dimensione pari a 2 mm e le temperature designate per l'estrusione, per uno stesso materiale, sono state mantenute costanti in tutte e sette le zone termicamente controllate. Infine, è stata impostata una velocità della ruota della taglierina di 7, al fine di produrre dei pellet del blend polimerico di dimensioni non troppo sottili.

### 2.3.2. Produzione dei provini per prove reologiche: Pressa a piani paralleli riscaldati Collin P200 T

Successivamente all'operazione di pellettizzazione dell'estruso, si procede con lo stampaggio a compressione per la realizzazione dei provini della forma desiderata per eseguirne la caratterizzazione reologica, utilizzando la pressa a piani paralleli riscaldati P200 T della Collin, riportata in Figura 26 (a).



**Figura 26:** (a) Pressa a piani paralleli riscaldati Collin P200 T, (b) tipologia di campione realizzato con la pressa a piani paralleli riscaldati per l'esecuzione delle prove reologiche.

Tale strumento è composto da due piatti, di cui uno è fisso e l'altro mobile e, all'interno dei quali vengono posizionate due lastre metalliche; tra tali piastre metalliche, ricoperte da uno strato di Teflon, si inseriscono due fogli di alluminio e, infine, si alloggiavano gli stampi desiderati.

Lo stampo utilizzato per produrre i campioni di materiale da sottoporre a caratterizzazione reologica è costituito da una piastra munita di quattro fori di forma cilindrica, con diametro di 25 mm e spessore di 1 mm: nella Figura 17 (b) è riportato un tipico campione realizzato per l'esecuzione delle prove reologiche, che viene rifinito delle bave in eccesso prima dell'esecuzione della caratterizzazione.

I parametri impiegati per la produzione di tali campioni sono riportati nella Tabella 6.

Dopo aver impostato la temperatura di entrambi i piani riscaldati, viene pesata una quantità di pellet adeguata a riempire il volume della cavità degli stampi circolari, in funzione della densità del materiale scelto, per permettere un ottimale riempimento degli stampi stessi senza produrre la formazione di bave eccessive, che renderebbero difficile il demolding dei provini dopo lo stampaggio.

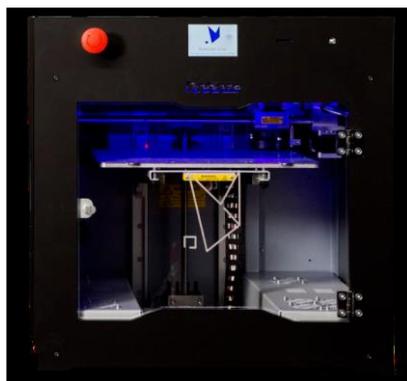
Si procede con una fase iniziale di preriscaldamento per produrre una prima fusione dei pellet, seguita da uno step di degasaggio manuale dopo aver impostato la pressione desiderata, la pressatura e, infine, una fase di raffreddamento seguita dalla rimozione manuale delle lastre dai piatti e dei provini di forma cilindrica dagli stampi.

*Tabella 6: Parametri utilizzati alla pressa a piani paralleli riscaldati per la preparazione dei provini su cui eseguire la caratterizzazione reologica.*

<b>Campione</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Pressione [bar]</b>	<b>Tempo di preriscaldamento [s]</b>	<b>Tempo di pressatura [s]</b>
<b>LDPE</b>	140	100	180	120
<b>PBS</b>	170	100	180	120
<b>PBS90/PHBH10</b>	170	100	180	120
<b>PBS80/PHBH20</b>	170	100	180	120
<b>PBS90/PLA10</b>	170	100	180	120
<b>PP</b>	190	100	180	180

### *2.3.3. Produzione degli inserti: Stampante 3D Roboze One & Software Simplify 3D [52]*

La stampante utilizzata per la realizzazione degli inserti è il modello ONE della Roboze, riportato nella Figura 27: è una stampante semichiusa poiché dispone di un coperchio removibile per movimentare manualmente l'estrusore, potendo inserire manualmente il filamento da stampare.



**Figura 27:** Stampante 3D ONE prodotta da Roboze ®.

Tale strumento dispone di un piatto di stampa delle dimensioni 28 cm x 34 cm, ancorato al supporto fisso magneticamente al fine di poter eseguire una più facile estrazione del pezzo stampato con rimozione del piatto mobile, che può essere riscaldato fino alla temperatura di 100°C.

L'ugello di estrusione può essere riscaldato fino a 300°C e può avere diametro di 0,4 mm o di 0,6 mm: in questo lavoro di tesi, è stato utilizzato sempre un ugello in acciaio con diametro di 0,4 mm.

Lo strumento, nella parte frontale, è dotato di un pannello di controllo, riportato in Figura 28, che permette di eseguire le seguenti operazioni:



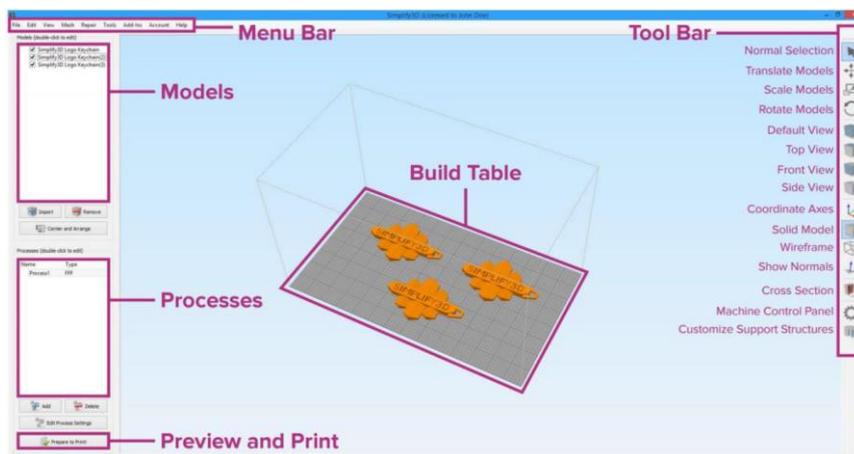
**Figura 28:** Pannello di controllo della stampante Roboze One.

- *Movimentazione:* permette di impostare la posizione dell'estrusore nel piano x-y e del piatto di stampa lungo l'asse z; inoltre, permette di eseguire l'azzeramento degli assi (*homing*);
- *Temperature:* tale comando permette di regolare la temperatura dell'ugello e del letto di stampa;
- *Estrusione:* comando che permette di azionare due meccanismi inversi, ovvero quello che tira il filo a partire dalla bobina fino all'ugello e quello che permette di rimuovere il filo dall'estrusore, una volta terminato il processo di stampa;

- *Livellamento*: consente di regolare manualmente l'altezza del piatto di stampa, per garantire una distanza costante e adeguata tra l'ugello e il piatto di stampa. Tale operazione viene svolta in seguito al preriscaldamento della piattaforma, servendosi di una lima metallica, che viene fatta scorrere manualmente tra il piatto di stampa e l'ugello in corrispondenza dei quattro vertici della piattaforma; quattro viti poste nella parte inferiore del piatto di stampa permettono di regolare l'altezza della piattaforma;
- *Ventole*: comando che permette di regolare il flusso d'aria delle ventole poste nei pressi dell'ugello.

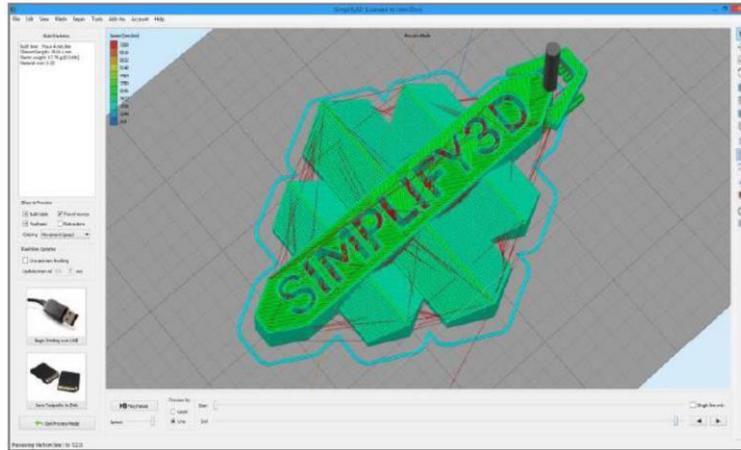
Il pannello di controllo, inoltre, consente di avviare la stampa caricando il file dell'oggetto da produrre su una scheda SD direttamente inseribile nella macchina: il software impiegato è *Simplify 3D*, che permette di impostare i parametri di stampa e di modificare le dimensioni e il posizionamento dell'oggetto da riprodurre.

L'interfaccia del software, riportata nella Figura 29, è divisa in diverse sezioni:



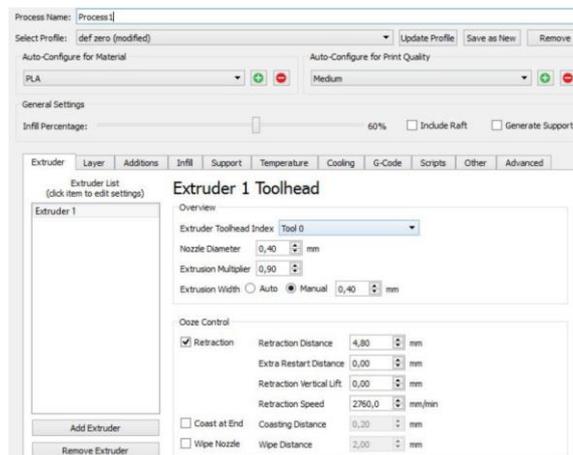
**Figura 29:** *Interfaccia principale del software Simplify 3D.*

- *Models*: in tale sezione è possibile inserire i modelli CAD degli oggetti da stampare; per questo lavoro di tesi, tali modelli CAD sono stati prodotti mediante l'impiego del software SOLIDWORKS;
- *Processes*: tale riquadro permette di modificare il processo di stampa;
- *Build Table*: permette di visionare il posizionamento dell'oggetto da riprodurre sulla piattaforma di stampa;
- *Tool Bar*: sezione che permette di eseguire diverse operazioni sull'oggetto una volta inserito nel software;
- *Preview and Print*: riquadro che permette di accedere all'anteprima di stampa, riportata in Figura 30, che può essere animata presentando come l'oggetto, layer by layer, verrà realizzato, recando anche informazioni sulla stampa quali lunghezza del filamento necessario per la produzione, peso dell'oggetto, costo del materiale e tempo di costruzione.



**Figura 30:** Anteprima di stampa del software Simplify 3D.

Prima di procedere con la stampa vera e propria, è necessario impostare tutti i parametri di stampa dal pannello creazione del processo, riportato nella Figura 31, suddiviso in varie sezioni, di seguito riportate:



**Figura 31:** Riquadro per l'impostazione dei parametri di stampa.

- *Extruder*: sezione che comprende i parametri di estrusione e per il controllo del fenomeno di sbavatura (*oozing*);
- *Layer*: pannello che contiene i parametri concernenti lo spessore dei layer da depositare con la stampa, la base e la cima dell'oggetto, zone che presenteranno un riempimento del 100% e parametri connessi alla presenza di perimetri esterni;
- *Additions*: sezione che contiene i parametri riguardanti le strutture esterne dell'oggetto da stampare, come il raft, base dell'oggetto utile per migliorare l'adesione al piatto di stampa;
- *Infill*: pannello contenente parametri riguardanti il riempimento, ovvero la percentuale indicante la densità degli strati depositati, e la sovrapposizione dei layer sul perimetro esterno;

- *Support*: pannello utile per regolare le strutture di supporto di stampa;
- *Temperature*: sezione che permette di impostare le temperature dell'ugello e del piatto di stampa;
- *Cooling*: pannello che permette di definire l'intensità di funzionamento delle ventole, dando anche la possibilità di impostare per quali layer azionarne il funzionamento;
- *G – Code & Scripts*: sezioni che contengono le istruzioni specifiche per il funzionamento della stampante;
- *Speeds*: pannello per la definizione della velocità di stampa, controllandola anche per particolari sezioni come le strutture di supporto, le pareti e il primo strato;
- *Other e Advanced*: pannelli che contengono parametri avanzati sulla tipologia di filamento oppure criteri da considerare nel caso in cui si desideri stampare più pezzi in contemporanea o un pezzo con più di un singolo processo.

#### 2.3.4. *Produzione degli stampati: Stampante ad iniezione Wittmann Battenfeld SmartPower 50 [53]*

Per realizzare gli oggetti stampati ad iniezione è stata utilizzata la pressa SmartPower 50 (con diametro vite 25 mm) della Wittmann Battenfeld, riportata in Figura 32.



**Figura 32:** *Pressa per stampaggio ad iniezione SmartPower 50 Wittmann Battenfeld.*

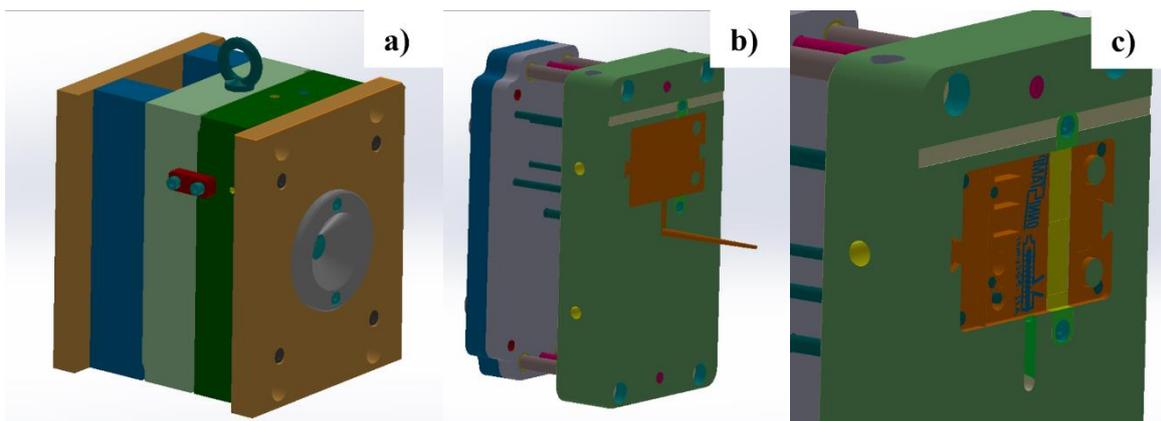
Le principali caratteristiche della pressa utilizzata, che appartiene alla categoria delle presse servo – idrauliche, vengono di seguito riportate:

- possiede un sistema di chiusura idraulico bilanciato a quattro colonne, con trasmissione della forza mediante pistone centrale, che permette una rapida generazione ed un'uniforme e simmetrica distribuzione della forza di chiusura, garantendo elevata protezione dello stampo, ed un'area disponibile per il montaggio dello stampo elevata, ottimale per l'installazione di qualunque stampo ad iniezione e per un'agevole connessione dei fluidi;
- è dotata di un gruppo di plastificazione / iniezione di facile accesso, compatti e ruotabili dal lato operatore;

- dispone di un ingombro molto ridotto, grazie ad un design compatto e rigido, e un'unità di governo *Unilog B8*, che offre diverse modalità di controllo e documentazione del processo ma anche di assistenza allo stampaggio, per facilitare i cicli di processo più complessi; il PC industriale integrato, infatti, è dotato di uno schermo touchscreen orientabile ingrandito e un pannello di comando manuale con pulsanti di comando e movimentazione operativi; con il fine di fornire assistenza all'operatore, inoltre, lo strumento è fornito di un'ampia libreria di supporto integrata e di un database per il *QuickSetup*, ovvero l'impostazione assistita dei parametri di processo mediante un database di materiali integrato;
- possiede il dispositivo brevettato KERS, sistema per il recupero dell'energia cinetica durante la fase di frenata, convertita in energia elettrica e immagazzinata nel macchinario per provvedere ai bisogni energetici del macchinario stesso (come il riscaldamento del cilindro stesso).

### 2.3.5. *Produzione degli stampati: lo stampo ad iniezione*

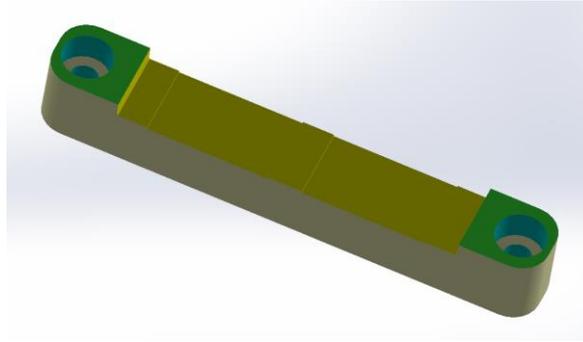
Lo stampo utilizzato per questo lavoro di tesi, riportato in Figura 33, è realizzato in Acciaio 1.2083, tipico materiale utilizzato per la produzione di stampi a caldo.



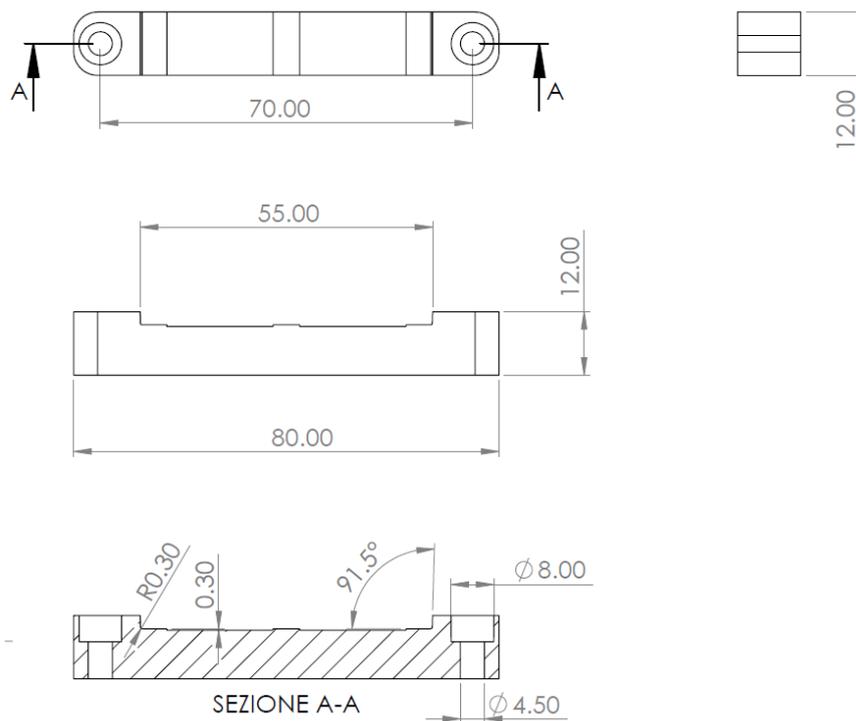
**Figura 33:** *Stampo utilizzato per questo lavoro di tesi: (a) configurazione a stampo chiuso, (b) stampo aperto raffigurante la cavità riempita dotata ancora di materozza, (c) dettaglio sulla cavità dello stampo con porzione dell'inserto sostituita evidenziata in giallo e verde chiaro.*

Lo stampo, dunque, è costituito da un acciaio inossidabile martensitico ad alta temprabilità, caratterizzato da buona resistenza alla corrosione e all'ossidazione a caldo e viene impiegato nello stampaggio di materie plastiche. Tale stampo dispone di una piastra per l'inserto dello stampo di 230 x 130 x 40 mm. I canali di raffreddamento di cui è fornito hanno diametro di dimensioni 6 mm e può essere garantito un flusso d'acqua a 10 L/min.

Per il lavoro di tesi, si è sostituita la porzione di stampo riportata in Figura 34 con un inserto della medesima geometria ma realizzato mediante la stampante Roboze One adoperando differenti filamenti commerciali composti: tutti dispongono di una matrice polimerica differente rinforzata con un contenuto variabile di fibre di carbonio. Le dimensioni nominali dell'inserto da riprodurre sono riportate nella Figura 35.



**Figura 34:** Inserto prodotto in acciaio 1.2083 sostituito da un analogo inserto, stampato mediante tecnica FFF, in materiale composito a matrice polimerica rinforzato con fibre di carbonio corte.



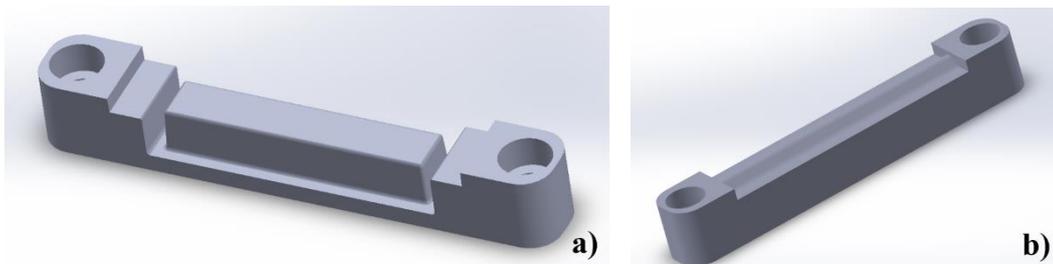
**Figura 35:** CAD dell'inserto quotato: tutte le quote presenti sono in millimetri.

Inoltre, è stato prodotto un ulteriore inserto, dalla medesima geometria, in lega Alluminio 7075: la produzione di questo inserto aggiuntivo è stata utile per avere un'ulteriore tipologia di strumento, realizzato con i metodi tradizionali di produzione CNC, da adoperare per un confronto più approfondito e dettagliato delle proprietà degli inserti prodotti con i metodi di Additive Manufacturing e delle caratteristiche degli stampati con essi prodotti.

Infine, come ultima prova, sono stati realizzati con il filamento commerciale risultato più performante alle sollecitazioni termiche, di compressione e più resistente al fenomeno di usura, due inserti dalla geometria modificata rispetto all'originale. Entrambi i nuovi inserti prodotti sono stati testati con l'iniezione di solo due materiali (LDPE e PP), stampabili rispettivamente alla più bassa e alla più alta temperatura di iniezione, al fine di valutare la

resistenza degli inserti in configurazioni operative in cui il normale flusso di materiale polimerico fuso iniettato venga intralciato dalla geometria più complessa dell'inserto (e quindi dalla forma della cavità da riempire), incontrando ostacoli e complicazioni di percorso precedentemente non presenti, aumentando le sollecitazioni a cui l'inserto viene sottoposto in opera:

- Inserto "Pool", riportato in Figura 36 (a): l'oggetto stampato ad iniezione riproduce una sorta di vasca; in questo caso il flusso del polimero iniettato ad alta temperatura, raggiungendo la zona dell'inserto, incontra uno spessore centrale precedentemente non presente e il polimero fuso è costretto a distribuirsi in un volume molto sottile per continuare a riempire la cavità, lungo il perimetro del blocco centrale;
- Inserto "Zipper", riportato in Figura 36 (b): l'oggetto prodotto per stampaggio ad iniezione riproduce un restringimento della sezione trasversale lungo tutta l'estensione dell'inserto stesso, generato da un assottigliamento del volume percorribile durante il riempimento della cavità da parte del polimero fuso.



**Figura 36:** Inserti dalla geometria modificata per lo studio di condizioni di flusso ostacolate del materiale polimerico fuso durante il ciclo di stampaggio ad iniezione: (a) Inserto "Pool", (b) Inserto "Zipper".

## 2.4. Strumenti utilizzati per la caratterizzazione dei materiali

### 2.4.1. Caratterizzazione reologica: Reometro a piatti piani paralleli TA Instruments Ares

Per eseguire la caratterizzazione reologica, sono stati realizzati dapprima i campioni relativi ai materiali da stampare ad iniezione (LDPE, PBS, PBS90PHBH10, PBS80PHBH20, PBS90PLA10, PP) mediante l'utilizzo della pressa a piani caldi P200 T della Collin, descritta nel paragrafo 2.3.2. Una volta prodotti i campioni dei materiali oggetto di studio, è stato impiegato un reometro a piatti piani paralleli Ares, commercializzato dall'azienda TA Instruments, riportato nella Figura 37.



**Figura 37:** Reometro Ares della TA Instruments.

Lo strumento, che funziona in controllo di deformazione, è composto da un piatto inferiore messo in rotazione da un motore, che permette di imporre la deformazione al materiale in analisi, e un piatto superiore che, connesso ad un trasduttore di forza, permette di misurare lo sforzo causato dalla deformazione del materiale analizzato. Il sistema composto dai due piatti è inserito in una camera a pareti refrattarie, ad atmosfera (azoto o aria) e temperatura controllate: inserito nella camera, il campione da testare viene riscaldato attraverso delle resistenze fino a raggiungere la temperatura designata della prova, che corrisponde alla temperatura di lavorazione.

Per questo lavoro di tesi, sono state effettuate due tipologie di prove:

- *Dynamic Strain Sweep Test, DSST*: tale prova viene eseguita a temperatura e frequenza costanti (con frequenza pari al massimo valore consentito di 100 rad/s, rappresentativo delle condizioni più critiche). Mediante l'esecuzione di tale prova, è possibile misurare lo Storage Modulus  $G'$  (o Modulo Elastico) e il Loss Modulus (o Modulo di perdita), entrambi in funzione della deformazione:  $G'$  è rappresentativo dell'energia immagazzinata nella componente elastica del materiale,  $G''$  rappresenta la quantità di energia dissipata nel campione (quindi la parte viscosa). L'esecuzione di tale prova è fondamentale per individuare la zona viscoelastica lineare del campione, che è la zona in cui si registra un andamento costante dei due moduli. L'identificazione della zona viscoelastica del campione permette di individuare la massima deformazione sopportabile dal campione, il cui valore è stato utilizzato nella successiva prova di *Dynamic Frequency Sweep Test*;
- *Dynamic Frequency Sweep Test, DFST*: tale prova è stata condotta a deformazione e temperatura costanti, ma a frequenza variabile (crescente o decrescente). Dall'esecuzione di tale prova si ottengono le curve che relazionano  $G'$ ,  $G''$ ,  $\eta^*$  (viscosità) con la frequenza (o con la velocità di deformazione, *shear rate*). Poiché dimensionalmente la frequenza è l'inverso del tempo, la curva che si ottiene mediante tale test correla la risposta meccanica dipendente dal tempo: a tempi brevi corrisponde un'alta frequenza, con un comportamento di tipo solido e a tempi lunghi, a cui corrisponde una bassa frequenza, ad un comportamento di tipo liquido.

Nella Tabella 7 sono riportati i parametri utilizzati per le prove di Strain Sweep per i diversi materiali utilizzati, mentre nella Tabella 8 i parametri impiegati per le prove di Frequency Sweep.

**Tabella 7:** Parametri utilizzati per l'esecuzione delle prove reologiche di DSST.

Materiali	Parametri prove Dynamic Strain Sweep Test (DSST)				
	Temperatura [°C]	Frequenza [rad/s]	Range deformazione [%]	Gap [mm]	Punti per decade
LDPE	120	10	0,1 – 100	Variabile	5
PBS	140	10	0,1 – 300	Variabile	5
PBS90/PHBH10	140	10	0,1 – 300	Variabile	5
PBS80/PHBH20	140	10	0,1 – 300	Variabile	5
PBS90/PLA10	140	10	0,1 – 300	Variabile	5
PP	180	10	0,1 – 300	Variabile	5

**Tabella 8:** Parametri utilizzati per l'esecuzione delle prove reologiche di DFST.

Materiali	Parametri prove Dynamic Frequency Sweep Test (DFST)				
	Temperatura [°C]	Frequenza [rad/s]	Deformazione [%]	Gap [mm]	Punti per decade
LDPE	120	100 – 0,1	10%	Variabile	10
	140				
	160				
PBS	140	100 – 0,1	50%	Variabile	10
	160				
	180				
PBS90/PHBH10	140	100 – 0,1	50%	Variabile	10
	160				
	180				
PBS80/PHBH20	140	100 – 0,1	40%	Variabile	10
	160				
	180				
PBS90/PLA10	140	100 – 0,1	20%	Variabile	10
	160				
	180				
PP	180	100 – 0,1	10%	Variabile	10
	200				
	220				

#### 2.4.2. Caratterizzazione morfologica: SEM Zeiss EVO 15

Al fine di poter analizzare meglio i filamenti utilizzati per la realizzazione degli inserti mediante tecnica FFF, conoscendone la morfologia delle fibre corte di carbonio utilizzate come rinforzante della differente matrice polimerica, i residui dei campioni di filo, sottoposti ad analisi termogravimetrica (TGA), sono stati analizzati mediante il

Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) EVO 15, riportato in Figura 38 e prodotto da Zeiss.

Lo strumento impiega un fascio di elettronico che, dopo aver attraversato delle lenti elettromagnetiche e bobine di deflessione, interagisce con la superficie del materiale.



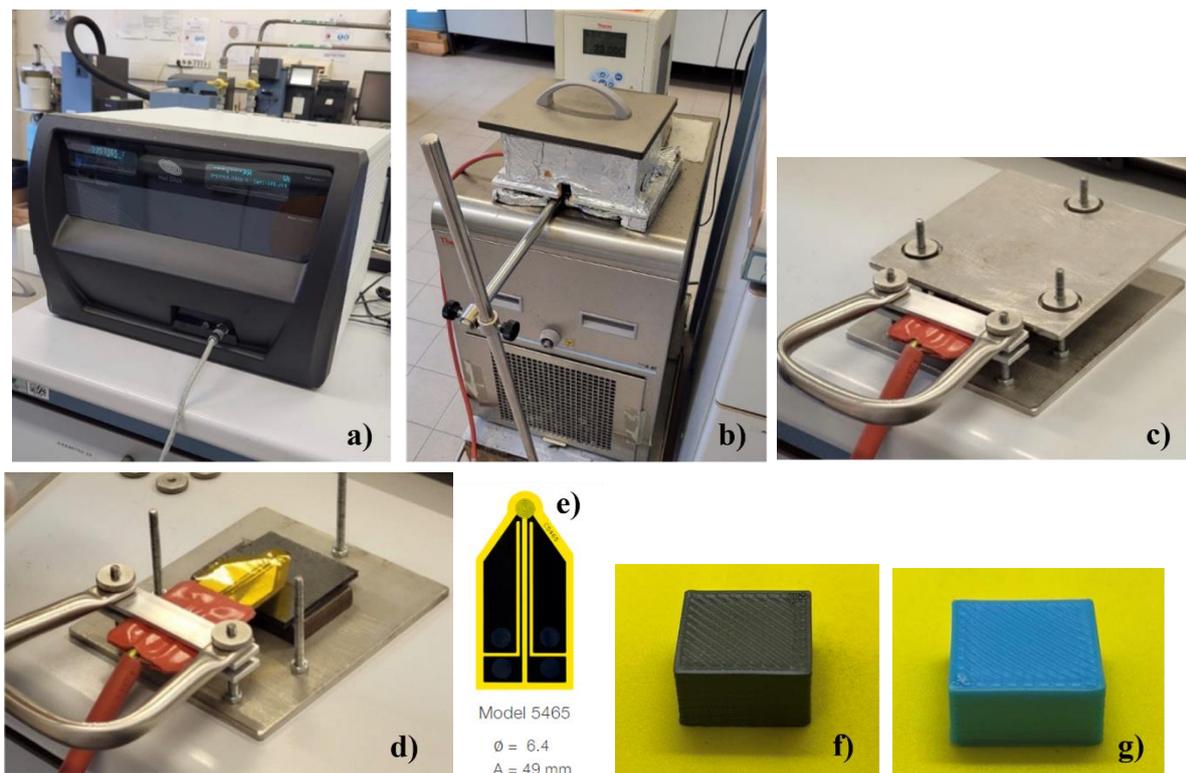
*Figura 38: Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) EVO 15 prodotto da Zeiss.*

In seguito all'interazione tra fascio primario e campione analizzato, si possono verificare differenti tipologie di emissione, i cui segnali possono essere rilevati da specifici detector:

- *Elettroni secondari*: prodotti da urti anelastici tra fascio di elettroni primario ed elettroni del campione analizzato, conferiscono informazioni tipicamente topologiche mediante la produzione di immagini tridimensionali;
- *Elettroni retrodiffusi (backscattered)*: generati da collisioni elastiche tra gli elettroni del fascio primario e i nuclei degli atomi del campione in esame, restituendo informazioni di tipo composizionale; l'immagine prodotta è in scala di grigi: il numero di elettroni retrodiffusi che giunge al detector risulta proporzionale al numero atomico degli atomi coinvolti nell'interazione, per cui a zone più scure dell'immagine corrispondono elementi a peso atomico minore, zone più chiare, invece, vengono relazionate ad elementi dal peso atomico maggiore;
- *Raggi X*: originati in seguito ad urto anelastico tra il fascio elettronico primario e gli elettroni del campione analizzato; poiché dispongono di un'energia caratteristica, permettono di individuare, in modo qualitativo e semi – quantitativo, gli elementi di cui il campione analizzato è composto; accoppiando i raggi X alla sonda EDS è possibile mappare la distribuzione elementare e valutare l'abbondanza degli elementi presenti.

#### 2.4.3. Prove di conducibilità termica: Hot Disk® TPS 2500 S

Per eseguire le misure di conducibilità termica, è stato utilizzato lo strumento Hot Disk® TPS 2500 S, riportato nella Figura 39, seguendo la normativa ISO 22007-2. [54]



**Figura 39:** Apparato strumentale per analisi di conducibilità termica: (a) Hot Disk TPS 2500 S; (b) chiller; (c) sensore 5465 in Kapton (3,189 mm); (d, e) disposizione dei provini da testare e il sensore tra le due piastre metalliche; (f, g) tipologia di provino realizzato per misurarne la conducibilità termica, mediante tecnica FFF.

Lo strumento esegue un'analisi non distruttiva delle proprietà di trasporto termico, può essere eseguita su qualsiasi tipo di materiale (solidi, liquidi, polveri, paste e schiume) in campioni dalle più varie forme (fogli, lastre, film sottili, rivestimenti, strati adesivi, materiali isotropici, anisotropi e dalla struttura a strati) e permette di misurare simultaneamente, con una singola misurazione, varie proprietà, quali la conducibilità termica, la diffusività termica e il capacità termica specifico del campione di materiale analizzato.

Lo strumento in questione permette di sondare i valori di conducibilità termica compresi tra 0,005 e 1800 W/m K, i valori di diffusività termica in un range tra 0,01 e 1200 mm<sup>2</sup>/s e di calore specifico fino ad un massimo di 5 MJ/m<sup>3</sup>K in un intervallo di temperatura compresa tra -35 e 200°C.

Inoltre, la caratteristica unica dello strumento è la possibilità di determinazione dell'omogeneità del campione, potendo sondare la conducibilità termica in funzione della profondità del campione stesso.

Il software associato allo strumento *Hot Disk Thermal Analyser* incorpora strumenti che permettono di eseguire misurazioni automatizzate e per l'esportazione dei risultati, con la possibilità di poter realizzare un'elaborazione aggiuntiva o un'analisi statistica. [55]

Per eseguire l'analisi è necessario disporre di due campioni, di forma qualsiasi, ma aventi la superficie quanto più liscia possibile: tra i due campioni, infatti, viene disposto un sensore e, per performare una misura in modo adeguato, evitando che l'aria presente tra le valli di superfici particolarmente scabrose o in difetti superficiali alteri la misura stessa, è necessario assicurare un contatto ottimale tra le superfici dei campioni e il sensore stesso andando a levigare la superficie dei provini da testare.

Nella fase sperimentale di questo lavoro di tesi, sono stati utilizzati provini a base quadrata delle dimensioni di 20 x 20 x 10 mm, a titolo esemplificativo ne è stato riportato uno nella Figura 39 (a), ed in tutte le prove è stato impiegato il sensore 5465 in Kapton, costituito da un circuito a doppia spirale in Nickel, avente raggio di 3,189 mm, riportato nella Figura 39 (b).

Il sensore è stato frapposto tra le superfici dei due campioni da analizzare e questi ultimi, a loro volta, sono stati bloccati tra due lastre metalliche, formando una sorta di "sandwich", nell'ordine porta campione – campione – sensore – campione – porta campione, come mostrato in Figura 39 (c) e (d): tutto l'apparato viene inserito all'interno del *chiller*, riportato in Figura 39 e, in un apposito contenitore, inserito a sua volta in un bagno, a termostatare per circa 20 – 30 minuti prima di dar inizio alla misurazione, al fine di garantire una temperatura omogenea di tutti i componenti; per questo lavoro di tesi, in tutte le prove eseguite all' Hot Disk la temperatura del *chiller* è stata mantenuta a 23°C.

Il metodo di prova designato per le misurazioni è stato il *bulk – isotropic* e i parametri impostati per l'esecuzione della prova sono stati riassunti nella Tabella 9; è stato deciso di performare 3 misurazioni in sequenza per poter disporre di risultati maggiormente affidabili:

**Tabella 9:** Parametri impostati per l'esecuzione delle misure di conducibilità all'Hot Disk TPS 2500 S.

Parametri	Valori
Heating Power [W]	0,030
Tempo di misura [s]	160
Profondità di analisi [mm]	3
Temperatura [°C]	23
Sensore	Kapton 5465 – 3,189 mm
Tipologia di campione	Unknown or Low Density
Numero di misurazioni	tre scansioni
Attesa tra due misurazioni consecutive [s]	300
Cable Holder	Red Cable (max. 180°C)

#### 2.4.4. Caratterizzazione meccanica: Dinamometro Zwick – Roell Z100 [56]

I provini di cui è stata valutata la conducibilità termica all'Hot Disk, successivamente, sono stati sottoposti a test meccanici a compressione: il candidato ideale per la realizzazione dell'inserito, infatti, è un materiale che in opera riesce a dissipare velocemente il calore derivante dall'iniezione del polimero fuso, mantiene una buona stabilità dimensionale

rispetto alle temperature e ai cicli di fatica termica a cui viene sottoposto e resiste alla compressione e ai relativi cicli di fatica derivanti dalla chiusura dello stampo e dal riempimento della cavità dello stampo stesso.

Le prove a compressione sono state eseguite al raggiungimento di una deformazione prestabilita (2mm) e non sono state condotte fino alla rottura del provino, perché è di interesse capire quale dei provini impiegati risulta disporre di migliore fattura (o la ottiene per mezzo del trattamento termico a cui viene sottoposto) che permette di rallentare la deformazione generatasi con i cicli di pressione e rilascio della pressa ad iniezione e i cicli termici tra più iniezioni consecutive.

Il limite di fine prova di 2 mm di deformazione è stato fissato per studiare il comportamento del materiale in un intervallo maggiore di deformazione, sebbene già dopo 1 mm di deformazione registrata l'inserto perda la capacità di replicare fedelmente la geometria nelle successive stampate, rendendo gli oggetti con esso prodotti degli scarti.

Con i provini utilizzati, i 2 mm constano nel 20% della dimensione nominale teorica del campione, condizione di perdita della capacità di replica dell'inserto e della produzione di stampati qualitativamente accettabili.

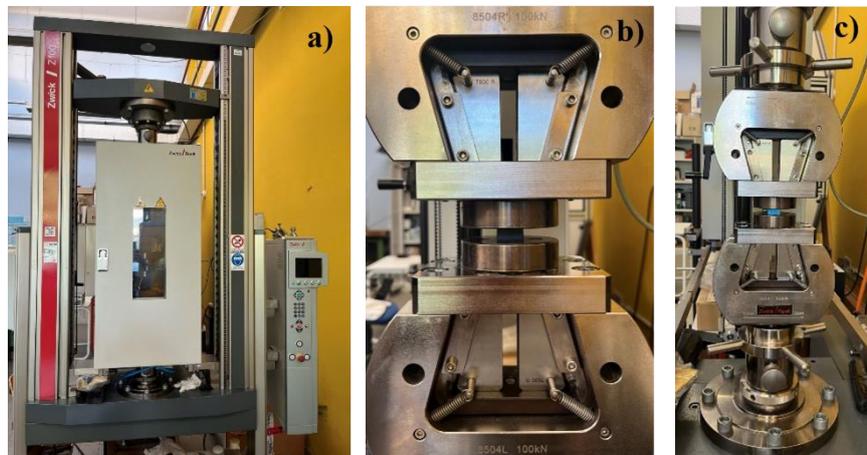
Gli oggetti prodotti mediante stampante 3D sono composti da cilindri di filo depositati secondo un preciso infill di deposizione e nel realizzare il provino lasciano dei vuoti che vengono "recuperati" una volta che la pressa si chiude con il tipico tonnellaggio e una volta che viene iniettato il polimero ad elevata temperatura ad una determinata pressione di iniezione e viene esercitato il mantenimento. Le precedenti, infatti, sono tutte sollecitazioni meccaniche che schiacciano l'inserto nella sede in cui è inserito, facendogli cambiare posizione all'interno dell'alloggiamento e dimensioni nominali ottenute a valle del processo di produzione, comprimendolo.

Sono state eseguite due prove a temperature diverse per sottolineare il fatto che un materiale elegibile per la realizzazione dell'inserto, sebbene a temperatura ambiente mostri un comportamento migliore degli altri, in realtà deve essere testato alle temperature a cui è sottoposto in opera, durante i cicli di stampaggio ad iniezione, e non è detto che mantenga tale primato mostrato in precedenza, poiché le temperature in gioco potrebbero avvicinarsi alla Temperatura di transizione vetrosa ( $T_g$ ) causando una diminuzione drastica delle proprietà meccaniche: le temperature designate per eseguire i test a compressione di 25 °C e 75°C, sono state scelte in base ai risultati ottenuti con la termocamera e il software Optrix durante l'esecuzione dei cicli di stampaggio ad iniezione.

La norma di riferimento per l'esecuzione dei test a compressione su materiali polimerici è la ISO 604. [57]

Il macchinario utilizzato per eseguire i test a compressione è il dinamometro Zwick – Roell Z100 (Zwick – Roell GmbH & Co, Ulm – Eisingen, Germany), riportato in Figura 40, equipaggiato con cella di carico da 100 kN: tale macchinario è definito universale perché consente di effettuare la caratterizzazione meccanica standardizzata a flessione, trazione e compressione.

Le condizioni operative per l'esecuzione delle prove di compressione sono riportate nella Tabella 10.



**Figura 40:** (a) Dinamometro Zwick – Roell Z100 per l'esecuzione dei test a compressione con camera di condizionamento inserita, (b, c) esecuzione di una prova di compressione a temperatura ambiente.

**Tabella 10:** Parametri operativi per l'esecuzione delle prove a compressione.

Parametri operativi	Valori
Precarico [MPa]	0,1
Velocità prova [mm/s]	1
Cella di carico [kN]	100
Soglia termine prova	Raggiungimento 2 mm di deformazione
Dimensioni teoriche provini	20 x 20 x 10

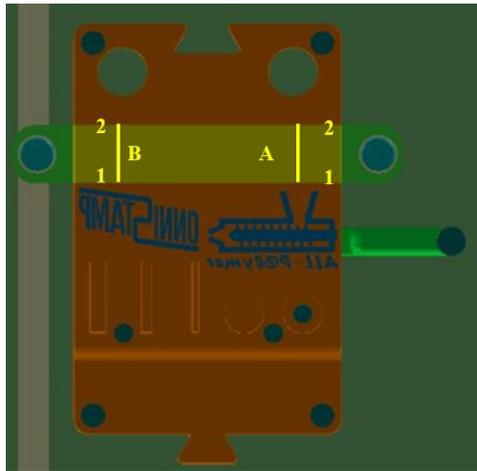
#### 2.4.5. Caratterizzazione morfologica degli stampati ad iniezione: Profilometro Mahr MarSurf CD120

La porzione di oggetto stampato che viene prodotta a contatto con l'inserto realizzato per Additive Manufacturing possiede una forma rettangolare, rialzata rispetto alle porzioni limitrofe del volume dell'oggetto stampato: al fine di disporre di una valutazione più completa dell'andamento della qualità di riproduzione delle forme e delle geometrie da parte dell'inserto con i successivi cicli di processo di stampaggio ad iniezione, è stata valutata l'altezza del "gradino" della parte rettangolare prodotta per il primo e il decimo stampato in punti ben specifici, riportati nella Figura 41, in cui si evidenziano i punti di riferimento sullo stampato utili per eseguire una misura dettagliata e ripetibile con il profilometro.

In particolare, sono state valutate per stampato due corse della lunghezza di 20 mm, identificate con le lettere "A" e "B" nella Figura 41, partendo dal punto 1 e raggiungendo il

punto 2, per un totale di 4 misurazioni per stampato, al fine di operare un confronto accettabile tra le misure realizzate tra i diversi stampati.

Inoltre, la misura è stata eseguita con una velocità di scansione di 0,5 mm/s, al fine di evitare che l'elevata velocità di scansione della punta della sonda restituisse valori meno dettagliati e ripetibili dell'altezza del gradino a causa dell'impatto sul gradino stesso, durante la percorrenza della corsa stabilita, ad una velocità superiore.



**Figura 41:** Identificazione dei punti utili per eseguire una misura ripetibile dell'altezza della porzione stampata con l'inserto prodotto mediante tecnica FFF.

Lo strumento utilizzato per eseguire tali misurazioni è il *Mahr MarSurf CD 120* (Mahr GmbH, Esslingen, Germania), fornito di un tastatore e un braccio in fibra di carbonio. Gli stampati sono stati posizionati su un apposito supporto, come mostrato in Figura 42, e si è proceduto con la campionatura delle 4 corse per singolo stampato. Per evitare che lo stampato si potesse spostare durante la corsa del tastatore, si è fermato il campione sul supporto mediante l'impiego di un peso, come riportato nella Figura 42.



**Figura 42:** Esecuzione delle prove di misurazione del profilo mediante profilometro Mahr Marsurf CD 120.

#### *2.4.6. Caratterizzazione morfologica degli stampati ad iniezione: Rugosimetro HommelTester T1000*

L'apparecchio mobile HOMMEL TESTER T1000 consente di misurare grandezze superficiali della rugosità, di ondulazione e del profilo superficiale, secondo le norme DIN, ISO e JIS. Tale strumento è stato designato per lo studio della variazione della qualità superficiale degli stampati nel tempo nella porzione di stampato prodotta con l'inserto prodotto tramite stampa 3D.

Infatti, in opera, l'inserto sperimenta sollecitazioni cicliche termiche e meccaniche che possono portare ad uno spostamento all'interno della sede in cui l'inserto stesso è alloggiando, modificando la geometria della cavità riempita dal polimero iniettato, o sperimentare fenomeni di usura favoriti dall'iniezione del materiale polimerico ad alta temperatura.

Per la misura della rugosità è stato utilizzato lo strumento riportato nella Figura 43, fornito del piano di appoggio su cui eseguire le misurazioni delle caratteristiche superficiali.



*Figura 43: HOMMEL TESTER T1000 (HOMMELWERKE GmbH).*

La scansione meccanica della superficie è basata sul rilevamento mediante trasduttore di spostamento di tipo induttivo: una punta di diamante sfiora la superficie da misurare, raccogliendo informazioni sulle grandezze di interesse.

La punta di scansione, fissata ad un braccio che può ruotare rispetto al piano di scansione: sulla parte superiore del braccio del tastatore sono presenti due piastrine di ferrite e due bobine, installate nell'alloggiamento del tastatore. Su queste bobine viene alimentata una tensione sinusoidale: una qualunque escursione della punta di scansione, causata dal rilevamento della rugosità superficiale, produce una variazione dell'induttanza nelle bobine; tali oscillazioni di tensione vengono convertite in un segnale proporzionale all'escursione, quindi, visualizzate come parametro di superficie.

Tra i sistemi di scansione disponibili, è stato impiegato il sistema di scansione ad un pattino per la misurazione di superfici piane, ondulazioni e perforazioni.

Le condizioni operative impiegate per l'esecuzione delle prove sperimentali nella Tabella 11.

**Tabella 11:** Parametri operativi per eseguire le misure di rugosità degli stampati ad iniezione.

Parametri operativi	Valore
Corsa di scansione [mm]	4,8
Lunghezza di <i>Cut Off</i> [mm]	0,8
Range di misura [ $\mu\text{m}$ ]	80
Norma di riferimento	ISO – 4287 / UNI ISO 1879

I parametri di superficie in output, elaborati tramite il software *Turbo Datawin*, consistono in:

- *Altezza massima del profilo di rugosità ( $R_z$ )*, secondo normativa DIN EN ISO 4287: è la somma dell'altezza del picco più alto e della profondità più grande del profilo di rugosità vagliato, entro un tratto di misurazione singolo;  $R_z$  è la distanza verticale del punto più alto al punto più profondo sul profilo e consiste in un parametro per valutare l'ampiezza del range di dispersione dei valori delle ordinate di rugosità, molto utile per il controllo della produzione;
- *Media aritmetica di Rugosità ( $R_a$ )*, secondo normativa DIN EN ISO 4287: è la media aritmetica dei valori assoluti delle ordinate del profilo di rugosità; statisticamente,  $R_a$  corrisponde allo scostamento medio dei valori di rugosità delle ordinate dalla linea mediana; picchi e valli estremi del profilo sondato non influiscono minimamente sul valore di  $R_a$ , che consiste in uno strumento efficace per la valutazione di variazioni graduali della superficie, dovute, a titolo esemplificativo, a fenomeni di usura degli utensili;
- *Rugosità quadratica media ( $R_q$ )*, secondo normativa DIN EN ISO 4287: è la media quadratica dei valori delle ordinate del profilo di rugosità; poiché  $R_q$  corrisponde allo scostamento standard delle ordinate del profilo dalla linea mediana del profilo di rugosità, esso è un parametro notevolmente più rappresentativo di  $R_a$ .

#### 2.4.7. Caratterizzazione termica: TA Instruments TGA Discovery

L'analisi termogravimetrica (TGA) consta nella determinazione della variazione di massa di un campione durante un processo di riscaldamento, seguendo una programmata della temperatura; alternativamente, tale tecnica permette anche di valutare la perdita in peso nel tempo ad una determinata temperatura. In ogni modo, si può registrare una variazione di peso, segnale che corrisponde a modifiche chimiche irreversibili nel campione, con formazione di prodotti volatili che abbandonano il sistema.

Per questo lavoro di tesi, lo strumento utilizzato è stato la TGA Discovery della TA Instruments, riportata in Figura 44.

La misura viene realizzata impiegando una microbilancia analitica, sensibile alle variazioni di massa, mentre il campione è posto in una fornace. Per valutare il comportamento del

campione sottoposto ad una temperatura crescente, si utilizza la derivata della curva (DTA) che rappresenta la velocità di degradazione.



*Figura 44: TA Instruments TGA Discovery.*

I campioni realizzati, che consistono in porzioni di filamenti commerciali non estruse, del peso di circa 10 mg, sono stati sottoposti all'analisi sperimentale in atmosfera inerte ( $N_2$ ) al fine di valutare il residuo a fine prova, con l'obiettivo di stimare il contenuto di rinforzante dei fili commerciali utilizzati per la produzione dell'inserto.

L'output dell'analisi è un termogramma che riporta sulle ascisse la temperatura e su un primo asse delle ordinate la variazione percentuale in massa (%), sul secondo la velocità di perdita in peso ( $\%/^{\circ}C$ ). La rampa di temperatura impostata per i campioni è stata da 50 a 700°C a 10°C/min, in atmosfera inerte (azoto).

Oltre al residuo valutato a fine prova, ma valutabile a qualsiasi altra temperatura raggiunta durante l'espletamento della prova, altri parametri che si ottengono con l'esecuzione di tale analisi sono:

- la temperatura a cui si registra una perdita del 2% del peso del campione ( $T_{2\%}$ ): una volta che il campione viene caricato nel crogiolo, è possibile rechi con sé dell'umidità presente nell'atmosfera; tale contributo fisisorbito può essere importante se si considera che la superficie del campione possa essere elevata; valutando tale temperatura, elimino il contributo nella perdita in peso di residui di monomeri, piccoli oligomeri e acqua fisisorbita, in modo da garantire che il meccanismo di degradazione che sta realizzandosi sia il principale che si desidera studiare; tale parametro permette di valutare la stabilità termica del materiale;
- la temperatura di massima velocità di perdita in peso ( $T_{MAX}$ ): corrisponde al picco della derivata della perdita in peso rispetto alla temperatura, è il punto di flesso dal quale in poi, il processo di degradazione inizia a rallentare e tale temperatura può essere associata alla reazione più importante del meccanismo di degradazione.

#### 2.4.8. Caratterizzazione termica: Calorimetria differenziale a scansione (DSC) TA Instruments DSCQ20

L'analisi DSC permette di misurare la differenza di flusso di calore associato alle transizioni termiche tra il campione da analizzare ed un campione di riferimento, quando entrambi sono sottoposti ad un programma controllato di temperatura: in questo modo, è possibile determinare gli intervalli di temperature a cui avvengono le transizioni e misurare quantitativamente le energie associate ad eventuali transizioni esotermiche o endotermiche, evidenziate da picchi o da minimi. Lo strumento utilizzato per eseguire l'analisi DSC è il Q20 della TA Instruments, riportato in Figura 45.



*Figura 45: DSC Q20 della TA Instruments.*

I campioni da analizzare vengono posti all'interno di un crogiolo in alluminio, mentre il riferimento è costituito da un crogiolo vuoto: l'analisi DSC fornisce la velocità di flusso di calore, intesa come la variazione di calore nel tempo ( $dQ/dt$ ) in funzione della temperatura, permettendo di ottenere le temperature caratteristiche del materiale analizzato (come la temperatura di transizione vetrosa, la temperatura di fusione, la temperatura di cristallizzazione) e le entalpie di fusione e cristallizzazione.

Per eseguire tale prova sperimentale, sono stati prodotti dei campioni, dal peso di circa 8 mg, di filo commerciale estruso (a partire da una placchetta geometricamente simile a quella prodotta per eseguire analisi DMA, ma dalle dimensioni dimezzate) e dei blend prodotti mediante estrusore bivate co-rotante.

Per tutti i campioni è stata eseguita un'analisi DSC con doppio ciclo (ovvero con una velocità di  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ : con il primo ciclo di riscaldamento, seguito da un'isoterma alla massima temperatura designata per il campione analizzato, al fine di ottenere il rilassamento delle macromolecole, eliminando gli stress presenti nel materiale; successivamente si procede con un raffreddamento controllato, fornendo informazioni sull'entalpia e temperatura di cristallizzazione e, infine, si effettua il terzo ciclo, ovvero il secondo ed

ultimo riscaldamento, utile per lo studio del comportamento termico del campione, quindi utile per la determinazione delle temperature caratteristiche del campione.

La cristallinità è un parametro espresso in percentuale che è possibile calcolare applicando l'Equazione 1, [58] di seguito riportata:

$$\chi (\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{(1 - wt\%_{fiber}) \cdot \Delta H_m^0} \quad (\text{Eq. 1})$$

In cui  $\Delta H_m$  [J/g] rappresenta l'entalpia di fusione,  $\Delta H_{cc}$  [J/g] è l'entalpia di *cold crystallization*,  $\Delta H_m^0$  [J/g] l'entalpia di fusione del polimero puro al 100% e  $wt\%_{fiber}$  la frazione in peso di carica. In letteratura sono stati trovati i valori di entalpia di fusione dei polimeri 100% cristallini, di seguito riportati:

- PA 6 (R-CPA):  $\Delta H_m^0$  (PA6) = 240 J/g [59];
- PLA (F-G3D, G-PLA):  $\Delta H_m^0$  (PLA) = 93,7 J/g [60];
- PETG (F-AOM):  $\Delta H_m^0$  (PETG) = 88 J/g [61];
- PA 12 (F-ANY):  $\Delta H_m^0$  (PA 12) = 209,2 J/g [62].

Le metodologie di analisi impiegate sono riportate nella Tabella 12.

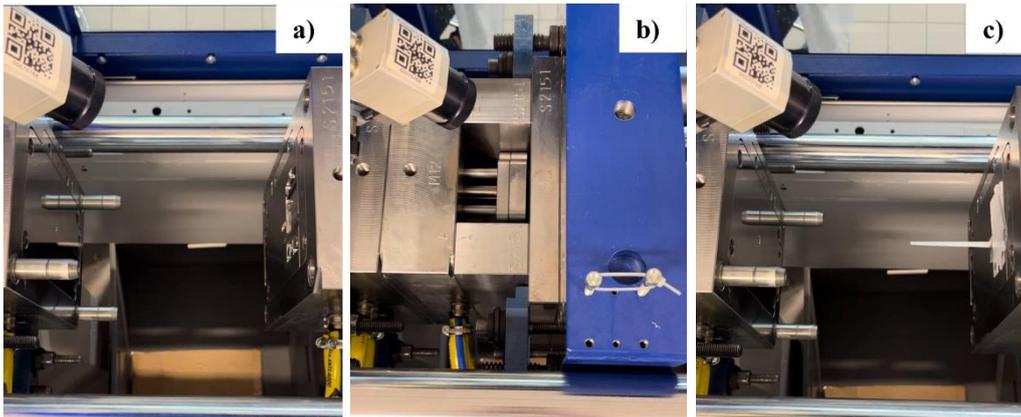
**Tabella 12:** Metodologie d'esecuzione analisi DSC per i campioni di filo commerciale e di blend analizzati.

<b>Denominazione Campione</b>	<b>Metodo d'analisi</b>
Carbon PA Roboze ®	da 0 a 300°C, 10°C/min, tre cicli
Nylon Carbon Filoalfa ®	da 0 a 300°C, 10°C/min, tre cicli
Grafylon Filoalfa ®	da 0 a 200°C, 10°C/min, tre cicli
Alfaomnia Filoalfa ®	da 0 a 300°C, 10°C/min, tre cicli
Blend PBS90/PLA10	da 0 a 220°C, 10°C/min, tre cicli
Blend PBS90 / PHBH10	da 0 a 220°C, 10°C/min, tre cicli
Blend PBS80 / PHBH20	da 0 a 220°C, 10°C/min, tre cicli

#### 2.4.9. Caratterizzazione termica: Termocamera Optris PI 640i & software Optris PIX Connect [63]

Al fine di studiare l'andamento delle temperature in varie porzioni dello stampo, evidenziando le differenze nella dissipazione del calore delle porzioni dello stampo prodotte in acciaio 1.2083 e in quelle prodotte mediante filamenti commerciali compositi a matrice polimerica e rinforzati con fibre di carbonio corte, durante il processo di stampaggio ad iniezione sono stati utilizzati la termocamera ad infrarossi Optris PI 640i e il software Optris PIX Connect.

Per eseguire questo tipo di monitoraggio, la termocamera ad infrarossi è stata montata nella parte superiore della pressa ad iniezione, puntandola verso lo stampo, come riportato in Figura 46, proprio per poter rilevare le variazioni di temperatura all'apertura dello stampo in diverse zone, al variare del tempo.



**Figura 46:** Termocamera ad infrarossi Optris PI 640i montata sulla parte superiore della pressa ad iniezione per rilevare le temperature della cavità dello stampo durante il ciclo di stampaggio ad iniezione; nella Figura riportata si notano differenti fasi del ciclo produttivo: stampo aperto immediatamente dopo l'espulsione del pezzo (a), stampo chiuso per iniezione del polimero fuso e mantenimento (b) ed estrazione del pezzo (c).

La termocamera Optris PI 640i (Optris GmbH, Germany), riportata in Figura 39, è la più piccola e compatta telecamera ad infrarossi VGA esistente: infatti ha dimensioni di 45x56x90 mm e un peso variabile dipendente dall'obiettivo montato, tra 269 e 340g; dispone di una risoluzione ottica di 640x480 pixel e offre immagini radiometriche e video in tempo reale. I dati tecnici specifici della termocamera sono riportati nella Tabella 13.

**Tabella 13:** Scheda tecnica termocamera ad infrarossi Optris PI 640i (Optris GmbH, Germany).

<b>Termocamera Optris PI 640i</b>	
Risoluzione ottica	640 x 480 pixels
Detector	FPA, uncooled (17 x 17 $\mu\text{m}$ )
Range spettrale	8 – 14 $\mu\text{m}$
Range di Temperatura	from -20 to 100°C, from 0 to 250°C
Frame Rate	32 Hz / 125 HZ a 640 x 120 pixels
Thermal sensitivity (NETD)	40 mK
Accuratezze	$\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ o $\pm 2\%$ , whichever is greater
Ambient Temperature	0 – 50 $^\circ\text{C}$
Storage Temperature	from -40 to 85°C
Relative humidity	20 – 80%, non – condensing
Weight	269 – 340 g (depending on lens)
Power supply	VIA usb
Interchangeable lenses	15°, 33°, 60°, and 90°

#### 2.4.10. Prove dinamico – meccaniche: TA Instruments DMA Q800

L'analisi meccanica dinamica (DMA) è una tecnica impiegata per misurare le proprietà meccaniche di un'ampia gamma di materiali: in particolare misura le proprietà viscoelastiche utilizzando prove oscillatorie transitorie o dinamiche. Lo strumento

impiegato per eseguire le prove dinamo – meccaniche è il TA Instruments Q800, riportato in Figura 47, le cui principali caratteristiche tecniche specifiche sono riassunte nella Tabella 14.

Tale strumento risulta più accurato rispetto ad altri dispositivi per misurare le proprietà meccaniche sia perché lavora nel range di viscoelasticità lineare che perché permettono di concentrarsi sia sulla componente viscosa che sulla componente elastica, aspetto non comune a tutti i dispositivi di categoria, che spesso si concentrano esclusivamente a valutare la componente elastica.



*Figura 47: Strumento DMA TA Instrument Q800.*

*Tabella 14: Caratteristiche tecniche specifiche dello strumento TA Instrument Q800.*

<b>Technical Specifications</b>	<b>Value</b>
Forza Minima – Massima [N]	0,001 – 18
Risoluzione in Forza [N]	0,0001
Risoluzione in Deformazione [nm]	1
Range di Modulo [Pa]	$10^3 - 3 \cdot 10^{12}$
Precisione Modulo [%]	$\pm 1$
Tan $\delta$ Range	0,0001 to 10
Tan $\delta$ Sensitivity	0,0001
Tan $\delta$ Resolution	0,00001
Dynamic Sample Deformation Range [ $\mu\text{m}$ ]	$\pm 0,5$ to 10,000
Temperature Range [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-150 to 600
Heating Rate [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]	0,1 – 20
Cooling Rate [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]	0,1 – 10
Frequency Rate [Hz]	0,01 – 200
Isothermal Stability [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\pm 0,1$
Automated Furnace Movement	Yes
Time / Temperature Superposition Software	Yes

Tali aspetti sono importanti proprio perché i materiali studiati con tale strumento, campioni

realizzati con i materiali commerciali con cui sono stati realizzati gli inserti degli stampi ad iniezione, sono realizzati in materiale polimerico che dispone di un comportamento viscoelastico, ovvero si comportano sia come un solido elastico che come un fluido viscoso.

Tale strumento offre le principali modalità di deformazione necessarie per caratterizzare campioni dalle differenti morfologie come barre solide, elastomeri, schiume morbide, film sottili e fibre. Tali modalità di deformazione comprendono la piegatura (*bending*), il taglio (*shear*), la compressione (*compression*) e la tensione (*tension*).

Tra gli output dell'analisi si annoverano quelli funzionali allo studio condotto con questo lavoro di tesi, ovvero Storage Modulus, Loss Modulus, Tan Delta ( $\delta$ ) e Temperatura.

La modalità di operazione degli esperimenti è definita come *Multi-Frequency Mode*, configurazione sperimentale che permette di valutare le proprietà viscoelastiche in funzione della frequenza mentre l'ampiezza di oscillazione è mantenuta costante.

I campioni analizzati mediante lo strumento TA Instrument Q800, riportati a titolo d'esempio in Figura 48, sono stati realizzati mediante tecnica FFF con lo strumento Roboze One e hanno le dimensioni 35x10x2 mm.



**Figura 48:** Campioni realizzati mediante tecnica FFF con strumento Roboze One sottoposti a DMA.

La modalità di analisi è definita *Single Cantilever*, la modalità migliore per valutare le proprietà di materiali termoplastici ed altamente smorzati (come gli elastomeri).

In tale configurazione, il campione viene bloccato ad entrambe le estremità e flessò ad una delle due estremità stesse (modalità simile a quella di una trave a mensola, in cui una clamp rimane ferma, mentre l'altra è mobile).

Tra le taglie di clamp *Single Cantilever* disponibili per il bloccaggio dei campioni, è stata scelta la clamp che dispone delle seguenti dimensioni 17.5 mm (lunghezza), fino a 15 mm (larghezza) e 5 mm di spessore.

I parametri utilizzati per eseguire i test sono riportati nella Tabella 15: poiché è importante che durante l'esecuzione della prova il campione non fonda e poiché i materiali sottoposti a caratterizzazione dispongono di temperature caratteristiche differenti, come criterio di fine prova è stato fissato il raggiungimento di uno *Storage Modulus* strettamente inferiore a 10 MPa, al posto del raggiungimento di una temperatura comune.

**Tabella 15:** Parametri di processo per il test DMA comuni per i campioni dei vari filamenti commerciali.

<b>Parametri</b>	<b>Valori</b>
Mode	Multi-Frequency Strain
Test	Temp ramp / Freq Sweep
Load	Strain
Start Temperature [°C]	Room temperature (e.g. 25 – 35°C)
Final Temperature [°C]	250
Strain [%]	0,05
Preload Force [N]	0,01
Ramp Rate [°C/min]	3°C/min fino a $G' < 10\text{MPa}$
Frequency [Hz]	1

Tale tipo di analisi è stata condotta principalmente per disporre dei valori di *Storage Modulus*, al variare della temperatura, e della *Glass Transition Temperature* del materiale candidato per la realizzazione degli inserti in modo da comprendere il range di temperature in cui l'inserto, una volta realizzato, potesse offrire adeguata resistenza ai carichi meccanici e termici a cui verrebbe normalmente sottoposto durante i comuni cicli di lavoro di un processo di stampaggio ad iniezione.



### 3. Risultati e Discussione

In questo capitolo verranno presentati e discussi i risultati delle lavorazioni e delle analisi sperimentali svolte durante il lavoro di tesi.

La prima sezione del presente capitolo riporta la caratterizzazione termica, dinamico – meccanica e di conducibilità termica di provini ottenuti mediante il processo di *Fused Filament Fabrication* dei filamenti commerciali scelti e tratta lo studio degli effetti prodotti da diverse tipologie di trattamento termico.

La seconda sezione del capitolo sviluppa la caratterizzazione termica e reologica dei materiali che sono stati stampati ad iniezione, inclusi i blend polimerici realizzati.

La terza sezione approfondisce la fase di stampaggio ad iniezione in presenza dell'inserto, presentando l'effetto dei parametri di processo, la caratterizzazione morfologica degli stampati e, infine, il monitoraggio della temperatura dello stampo con termocamera ad infrarossi.

#### *3.1. Produzione di inserti di stampi per stampaggio ad iniezione mediante Fused Filament Fabrication (FFF)*

##### *3.1.1. Parametri di processo per la realizzazione di provini per la caratterizzazione del materiale e di inserti di stampi*

I parametri di processo comuni a tutti i filamenti commerciali, impiegati per la produzione dei provini per la caratterizzazione, e, in seguito, degli inserti, sono riportati nella Tabella 16: i parametri di stampa che differiscono tra i vari filamenti, quali la temperatura dell'estrusore ( $T_{EXTR}$ ), la temperatura del letto di stampa ( $T_{BED}$ ), la procedura di essiccamento e le modalità di impiego della ventola, sono stati riportati nella Tabella 17.

Le caratteristiche dei provini realizzati per la misura della conducibilità termica, mediante Hot Disk® TPS 2500 S, sono state descritte nel paragrafo 2.4.3: in seguito, gli stessi campioni sono stati sottoposti a prove di compressione a 25°C, 50°C e 75°C; mentre la geometria dei campioni sottoposti ad analisi DMA, mediante strumento TA Instrument Q800, è stata presentata nella sezione 2.4.10.

**Tabella 16:** Parametri del processo di FFF comuni a tutti i filamenti usati per la produzione di provini ed inserti.

Parametri di processo	Valori
Nozzle diameter	0,60 mm
Printing speed	50 mm/s
Layer height	0,2 mm
Infill percentage	100%
Internal/External fill pattern	Rectilinear
Internal/External Infill Angle	±45
Offset	0/90/45
Raft	No
Top/Bottom solid layers	3/3

**Tabella 17:** Parametri del processo di FFF specifici per ciascun filamento commerciale.

Filamento commerciale	T <sub>EXTR</sub>	T <sub>BED</sub>	Velocità della ventola	Essiccamento
R-CPA	250°C	70°C	60%	50°C
F-ANY	250°C	70°C	OFF	50°C
F-AOM	250°C	70°C	OFF	40°C
F-G3D	220°C	50°C	0% (1 <sup>st</sup> layer) 50% (from 2 <sup>nd</sup> layer)	40°C
G-PLA	220°C	50°C	0% (1 <sup>st</sup> layer) 50% (from 2 <sup>nd</sup> layer)	40°C

### 3.1.2. Caratterizzazione dei materiali: stato “as printed”

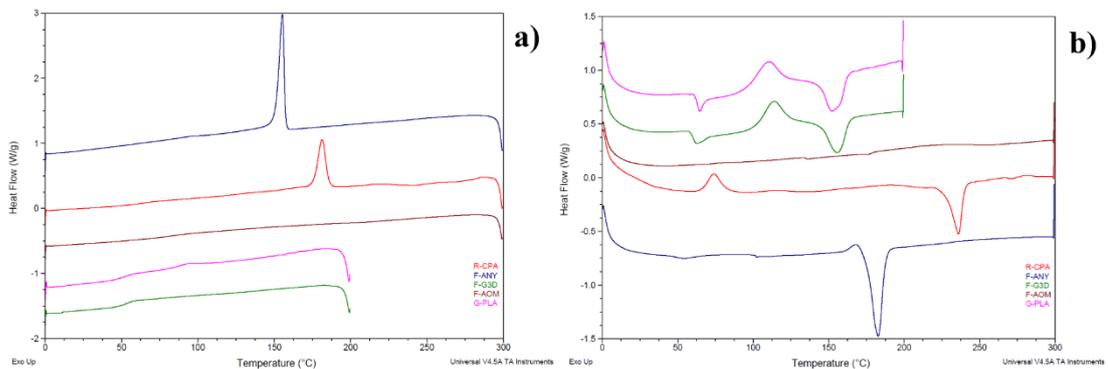
In questo paragrafo verranno dettagliati i risultati derivanti dalle operazioni di caratterizzazione termica (DSC), dinamico – meccanica (DMA) e di conducibilità termica (Hot Disk) dei filamenti commerciali, mediante l’impiego di appositi provini, nella condizione “as printed”, ovvero prodotti tramite FFF e non sottoposti ad alcun successivo step di post – processing.

#### 3.1.2.1. Caratterizzazione termica: DSC

È stata condotta l’analisi DSC per caratterizzare le possibili differenti transizioni termiche nei campioni di materiale commerciale, ricavandone la temperatura di transizione vetrosa (T<sub>g</sub>), la temperatura di fusione (T<sub>m</sub>), la temperatura di cristallizzazione (T<sub>c</sub>), i valori di entalpia di fusione (ΔH<sub>m</sub>), di entalpia di cristallizzazione (ΔH<sub>c</sub>), entalpia di *cold crystallization* (ΔH<sub>cc</sub>) e di cristallinità (χ).

Determinare la temperatura di transizione vetrosa è estremamente importante dal punto di vista operativo per poter definire il range di temperature in cui è possibile adoperare un materiale polimerico.

Nella Figura 49 si riportano le curve DSC dei filamenti commerciali per il ciclo di raffreddamento (a) e per il secondo ciclo di riscaldamento (b): i valori dei parametri di interesse, precedentemente citati, sono stati proposti nella Tabella 18.



**Figura 49:** Curve DSC dei filamenti commerciali relative al ciclo di raffreddamento (a) e al primo ciclo di riscaldamento (b).

**Tabella 18:** Valori di entalpia di fusione ( $\Delta H_m$ ), temperatura di fusione ( $T_m$ ), temperatura di transizione vetrosa ( $T_g$ ), entalpia di cristallizzazione ( $\Delta H_c$ ), entalpia di cold crystallization ( $\Delta H_{cc}$ ), temperatura di cristallizzazione ( $T_c$ ) e cristallinità ( $\chi$ ) per i materiali commerciali studiati per la realizzazione dell'inserto.

Filamento	Base polimerica	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]	$T_c$ [°C]	$\Delta H_m$ [J/g]	$\Delta H_c$ [J/g]	$\Delta H_{cc}$ [J/g]	$\chi$ [%]
F-G3D	PLA	60	156	-	22,6	-	15,9	7,4
F-AOM	PET-G	83	-	-	-	-	-	-
R-CPA	PA6	51	236	181	22,5	27,6	10,5	7,1
F-ANY	PA12	49	183	155	38,5	44,0	-	22,2
G-PLA	PLA	60	153 157	94	27,1	1,7	21,2	6,3

Esaminando le curve DSC e i valori dei parametri caratteristici da esse ricavati, è possibile notare che il filamento commerciale F-AOM presenti la  $T_g$  più alta (83°C), quindi può essere impiegato a temperature più elevate rispetto agli altri materiali commerciali studiati: tale filamento, inoltre, plastifica ma non mostra né il picco di fusione né di cristallizzazione, per cui non si rileva la presenza di un ordine cristallino nel range di temperature indagato.

I valori di temperatura di transizione vetrosa ( $T_g$ ) e temperatura di fusione ( $T_m$ ) identificati per il filamento F-ANY suggeriscono che la matrice del filamento sia una PA12 [64,65].

Nel termogramma DSC, entrambi i filamenti a base PLA (F-G3D, G-PLA) mostrano un picco esotermico associato al fenomeno di *cold crystallization*, che si presenta a 107°C per il G-PLA, mentre per il F-G3D a 113°C.

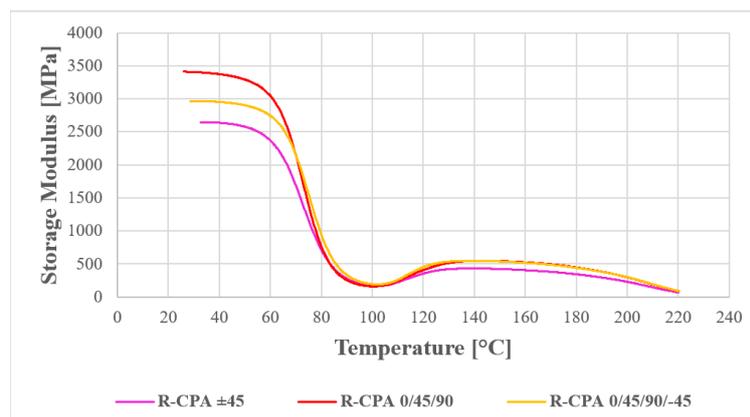
Per il filamento G-PLA, durante il primo ciclo di riscaldamento, si nota la presenza di due picchi endotermici ravvicinati alle temperature di 153°C e 157°C, associabili alla presenza di due fasi cristalline differenti,  $\alpha'$  e  $\alpha$ , ottenibili, in generale, sia attraverso la *cold crystallization*, che mediante il raffreddamento a partire da fuso. La presenza del primo picco è imputabile alla struttura cristallina  $\alpha'$  che fonde e ricristallizza nella forma  $\alpha$ , più densa ed ordinata, mentre il secondo picco rappresenta la fusione della fase cristallina  $\alpha$  sviluppata nel processo di ricristallizzazione [66,67].

Infine, anche nel termogramma DSC relativo al secondo ciclo di riscaldamento del filamento commerciale R-CPA è identificabile un picco esotermico a 74°C associato al fenomeno di *cold crystallization*.

### 3.1.2.2. Caratterizzazione dinamico – meccanica: DMA

Con uno studio preliminare, è stato valutato l'andamento dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura per i soli materiali commerciali R-CPA e F-G3D, caratterizzandone provini realizzati con tre diversi pattern di deposizione. Successivamente, l'analisi DMA è stata eseguita sui rimanenti filamenti commerciali impiegando provini prodotti con il pattern di deposizione che, nello studio preparatorio, ha permesso di conferire al pezzo una rigidità maggiore.

Nella Figura 50 è riportato l'andamento dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura per il filamento commerciale R-CPA, per provini prodotti con pattern di deposizione  $\pm 45$ , 0/45/90 e 0/45/90/-45.



**Figura 50:** Caratterizzazione del filamento R-CPA mediante analisi meccanica dinamica (DMA), variando la direzione di deposizione nella realizzazione dei provini ( $\pm 45$ , 0/45/90, 0/45/90/-45).

Gli andamenti dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura riportati nella Figura 50 sono tipici di un materiale polimerico semicristallino con basso grado di cristallinità

evidenziato da una significativa diminuzione dello *Storage Modulus* al raggiungimento della  $T_g$  del materiale studiato.

Nella regione vetrosa del diagramma, prima del raggiungimento della  $T_g$  del R-CPA, il provino che ha conseguito una maggior rigidità è stato quello realizzato secondo l'architettura di deposizione 0/45/90.

Le differenze nelle rigidità misurate potrebbero essere imputabili alle diverse architetture di produzione dei provini, che permettono di ottenere un numero differente di layer realizzati con il medesimo pattern di deposizione, ognuno dei quali offre un contributo specifico alla rigidità misurata con i test DMA.

Infatti, il *raster angle* utilizzato durante il processo di FFF possiede un ruolo significativo nel determinare la rigidità e, quindi, anche lo *Storage Modulus* del pezzo prodotto [68].

I layer prodotti con *raster angle*  $90^\circ$  forniscono un contributo minore alla rigidità del provino perché lo stress agisce parallelamente agli strati depositati, agendo sulle giunzioni tra filamenti adiacenti, porzioni di layer dalle ridotte proprietà meccaniche: infatti, con la deposizione il filamento si raffredda velocemente, ostacolando la diffusione delle catene polimeriche tra filamenti vicini ed impedendo la produzione di un forte legame tra le superfici a contatto.

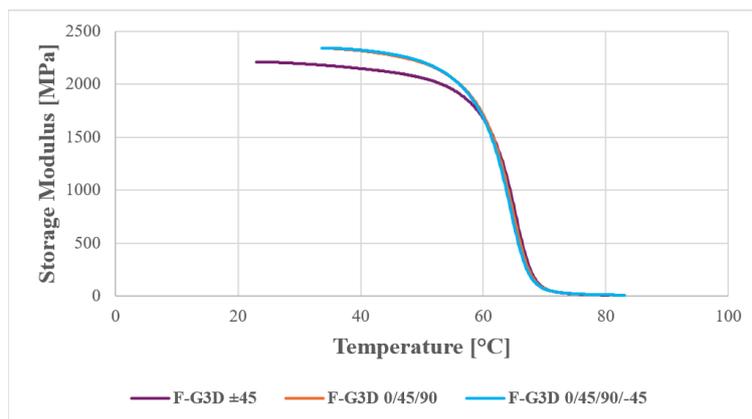
Per i layer prodotti con *raster angle*  $0^\circ$ , lo stress viene esercitato in modo perpendicolare alla disposizione dei filamenti e delle fibre in essi contenute, per cui tale tipologia di layer possiede il più alto valore di *Storage Modulus* e contribuisce in modo determinante alla rigidità complessiva del provino [69].

I layer prodotti con pattern di deposizione  $\pm 45^\circ$ , invece, forniscono alla rigidità del provino un contributo intermedio tra quello fornito da layer prodotti con *raster angle* di  $90^\circ$  e quelli con *raster angle* di  $0^\circ$ , poiché i filamenti depositati sono disposti a  $\pm 45^\circ$  rispetto al piano di sollecitazione dei test DMA.

Per produrre i 10 layer previsti per la realizzazione dei provini, impiegando un'altezza del singolo layer di 0,2 mm, l'architettura dei provini 0/45/90 prevede la produzione complessiva di 4 strati depositati a  $0^\circ$ , 3 strati depositati a  $+45^\circ$  e 3 strati depositati a  $90^\circ$ ; l'architettura dei provini 0/45/90/-45, invece, prevede la realizzazione complessiva di 3 strati a  $0^\circ$ , 3 strati a  $+45^\circ$ , 2 strati orientati a  $90^\circ$  e 2 orientati a  $-45^\circ$ .

Dunque, i provini 0/45/90 possiedono un numero maggiore di layer realizzati con *raster angle*  $0^\circ$ , che permette di conferire alla struttura del provino una maggiore rigidità.

Nella Figura 51 è riportato l'andamento dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura, per campioni realizzati in F-G3D con differenti orientazioni di deposizione.

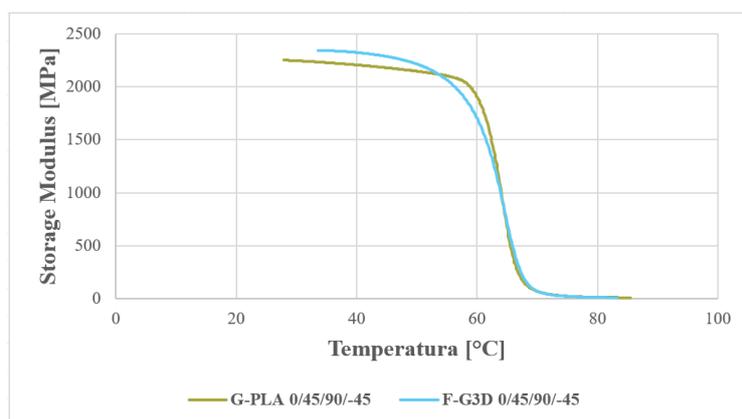


**Figura 51:** Caratterizzazione del filamento F-G3D mediante analisi meccanica dinamica (DMA), variando la direzione di deposizione nella realizzazione dei campioni testati ( $\pm 45$ , 0/45/90, 0/45/90/-45).

Nella regione vetrosa del diagramma, i provini realizzati con le architetture 0/45/90 e 0/45/90/-45 dispongono di layer depositati con *raster angle* di  $0^\circ$  e, dunque, possiedono valori di *Storage Modulus* maggiori.

Tuttavia, non si notano differenze significative nell'andamento delle curve dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura per i provini realizzati con architetture 0/45/90/-45 e 0/45/90.

Nella Figura 52 è presentato l'andamento dello *Storage Modulus* rispetto alla temperatura per i due materiali a base PLA, G-PLA e F-G3D, impiegando la medesima architettura di deposizione (0/45/90/-45) per la produzione dei provini.



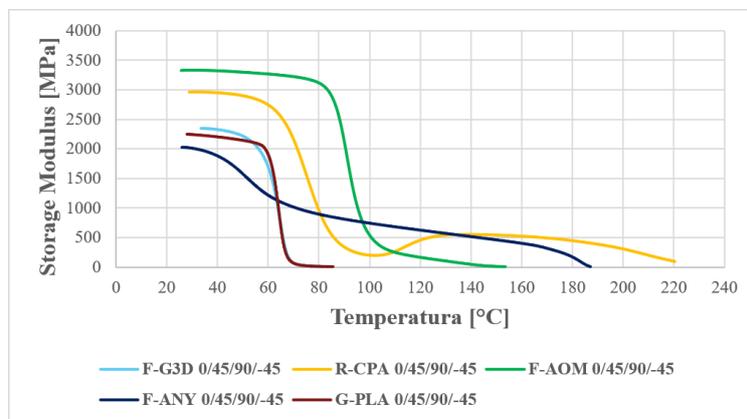
**Figura 52:** Confronto tra l'andamento dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura per i due filamenti a base PLA, il G-PLA, non rinforzato, e il F-G3D, rinforzato con fibre di carbonio corte, a parità di angolo di deposizione impiegato.

L'introduzione di un filamento a base PLA non rinforzato (G-PLA) tra i materiali commerciali studiati nel presente lavoro di tesi è stata operata con l'obiettivo di valutare la convenienza dell'utilizzo di un filamento rinforzato (F-G3D), a parità di matrice

considerata, per la produzione di inserti di stampi per *Injection Molding*, adatti ad assicurare una produzione in serie ridotta di stampati ad iniezione economica ed efficiente.

Nella regione vetrosa del diagramma, i provini realizzati con G-PLA mostrano uno *Storage Modulus* leggermente inferiore rispetto a quello misurato per il F-G3D: lo *Storage Modulus* di provini realizzati con un filamento composito a matrice polimerica può essere incrementato dalla presenza di un rinforzante adeguatamente disperso, che dispone di una rigidità maggiore rispetto alla matrice, e che può limitare la mobilità delle catene polimeriche [68,70].

Nella Figura 53 sono riportate le curve dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura per i filamenti commerciali oggetto di studio, ottenute mediante analisi dinamico – meccanica (DMA) condotte su provini prodotti mediante un’architettura di deposizione di 0/45/90/-45.



**Figura 53:** Comparazione tra gli andamenti dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura per i filamenti commerciali studiati, a parità di architettura di realizzazione dei provini caratterizzati (0/45/90/-45).

Il materiale commerciale che può essere impiegato a temperature maggiori in opera è il F-AOM: inoltre, confrontando i valori di rigidità registrati nelle relative regioni vetrose delle curve, i provini realizzati con F-AOM hanno evidenziato valori di *Storage Modulus* maggiori rispetto a quelli posseduti dagli altri filamenti commerciali.

### 3.1.2.3. Conducibilità termica: Hot Disk

Per valutare la conducibilità termica di provini di filamenti commerciali prodotti mediante FFF, sono state svolte delle analisi all’Hot Disk.

Inizialmente, è stata valutata la sola conducibilità termica dei campioni realizzati con i filamenti R-CPA e F-G3D, variando esclusivamente l’architettura di deposizione nella produzione dei diversi layer: successivamente, si è deciso di estendere la misurazione della conducibilità termica ai rimanenti materiali commerciali, a parità di architettura di deposizione (0/45/90/-45).

Tra i filamenti commerciali caratterizzati è stato incluso anche il G-PLA, materiale polimerico non rinforzato a base PLA, per poterne confrontare la conducibilità termica con

quella misurata per il F-G3D, materiale composito di pari matrice, rinforzata con il 2,26% in peso di fibre di carbonio corte e nanolamelle di grafene.

Nella Tabella 19 sono riportati i valori medi di conducibilità termica ottenuti dall'esecuzione di tre misure per ogni campione.

**Tabella 19:** Valori di conducibilità termica misurati all'Hot Disk per i differenti filamenti commerciali.

<b>Materiale commerciale</b>	<b>Architettura di deposizione</b>	<b>Conducibilità termica media [W/mK]</b>
R-CPA	± 45	0,551 ± 0,010
R-CPA	0/90/45	0,562 ± 0,027
R-CPA	0/45/90/-45	0,515 ± 0,007
F-G3D	± 45	0,240 ± 0,001
F-G3D	0/90/45	0,230 ± 0,001
F-G3D	0/45/90/-45	0,237 ± 0,004
F-ANY	0/45/90/-45	0,540 ± 0,005
F-AOM	0/45/90/-45	0,354 ± 0,007
G-PLA	0/45/90/-45	0,214 ± 0,001

Indipendentemente dall'architettura di deposizione impiegata durante il processo di FFF per la produzione dei provini, il materiale commerciale che registra il valore maggiore di conducibilità termica è il R-CPA ( $0,562 \pm 0,027 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

La formazione di un network percolativo più efficiente per i provini realizzati in R-CPA, rispetto a quello generato da provini prodotti con altri filamenti commerciali, potrebbe derivare dal maggior contenuto di rinforzante posseduto, che occupa una frazione più estesa nel volume del materiale depositato, e dall'effetto sinergico prodotto dall'impiego di seconde fasi conduttive che dispongono di una morfologia differente: i rinforzanti conduttivi guidano il trasferimento del calore attraverso il materiale, con le fibre corte di carbonio che realizzano un "ponte termico", che agevola il contatto tra altre fibre di carbonio e particelle di magnetite [71-77].

Confrontando i valori di conducibilità termica registrati per i filamenti G-PLA e F-G3D, è possibile notare come la presenza, seppur esigua, del rinforzante conduttivo migliori leggermente la proprietà caratterizzata: impiegando l'architettura di deposizione 0/45/90/-45, il G-PLA esibisce una conducibilità termica di  $0,214 \pm 0,001 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ , mentre il F-G3D presenta una conducibilità termica di  $0,237 \pm 0,004 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

A parità di materiale commerciale considerato, la possibilità di ottenere valori di conducibilità termica maggiori variando l'architettura di deposizione dipende dall'area di contatto che si stabilisce tra i filamenti depositati tra layer adiacenti e dalla casuale produzione di difettosità nelle fasi di deposizione: inoltre, la presenza di porosità *inter-beads* allineate lungo la *build direction* e l'allineamento delle fibre di carbonio corte nella

*raster direction* sono caratteristiche introdotte mediante il processo di FFF che limitano i valori di conducibilità termica misurabili nella *build direction*. [78-80]

### 3.1.3. *Trattamento termico sui materiali*

Sono stati eseguiti tre differenti trattamenti termici su appositi provini realizzati mediante FFF con i soli filamenti commerciali composti e con architettura di deposizione 0/45/90/-45: al fine di valutarne l'influenza sulle proprietà termiche, dinamico-meccaniche e di conducibilità termica, tali campioni, sono stati sottoposti alle medesime operazioni di caratterizzazione a cui sono stati sottoposti i provini "*as printed*", trattati nella sezione 3.1.2.

Per la realizzazione del trattamento termico, è stata utilizzata la stufa Memmert ULE 500 oven: una volta raggiunta la temperatura target del trattamento, sono stati inseriti i campioni nella stufa e, trascorso il tempo designato per il trattamento, i campioni sono stati estratti e lasciati raffreddare in aria.

Le tipologie di trattamento termico eseguite e i materiali commerciali trattati sono stati riportati nella Tabella 20.

**Tabella 20:** *Trattamenti termici condotti e filamenti commerciali trattati.*

<b>Trattamento termico</b>	<b>Abbreviazione del trattamento termico</b>	<b>Materiali commerciali trattati</b>
80°C per 60 minuti	TT80x60	F-ANY F-AOM F-G3D R-CPA
140°C per 30 minuti	TT140x30	F-ANY F-AOM F-G3D R-CPA
140°C per 60 minuti	TT140x60	F-ANY F-AOM F-G3D R-CPA

### 3.1.4. *Caratterizzazione dei materiali dopo l'esecuzione del trattamento termico*

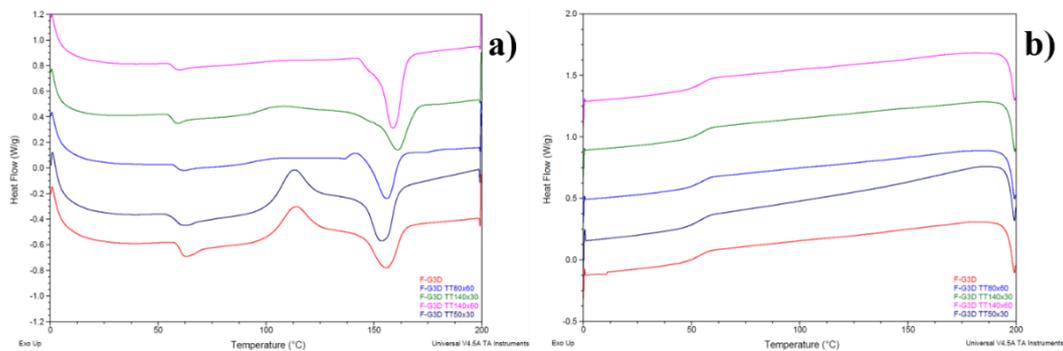
In questo paragrafo verranno dettagliati i risultati derivanti dalle operazioni di caratterizzazione termica (DSC), dinamico – meccanica (DMA) e di conducibilità termica (Hot Disk) dei filamenti commerciali designati, mediante l'impiego di appositi provini prodotti con la medesima architettura di deposizione, 0/45/90/-45, e sottoposti a tre differenti trattamenti termici (80°C per 60 minuti, 140°C per 30 minuti e 140°C per 60 minuti).

### 3.1.4.1. Caratterizzazione termica: DSC

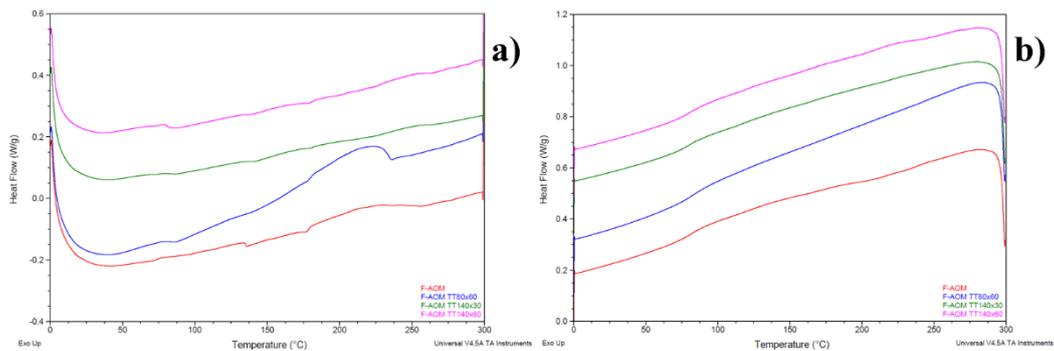
Le operazioni di caratterizzazione termica sono state realizzate seguendo la metodologia d'esecuzione impiegata per i provini "as printed", descritta nel paragrafo 2.4.8.

Nelle Figure 54, 55, 56, 57 sono riportate le curve DSC dei filamenti commerciali "as printed" e sottoposti ai trattamenti termici, rispettivamente per F-G3D, F-AOM, F-ANY e R-CPA per il primo ciclo di riscaldamento (a) e per il ciclo di raffreddamento (b).

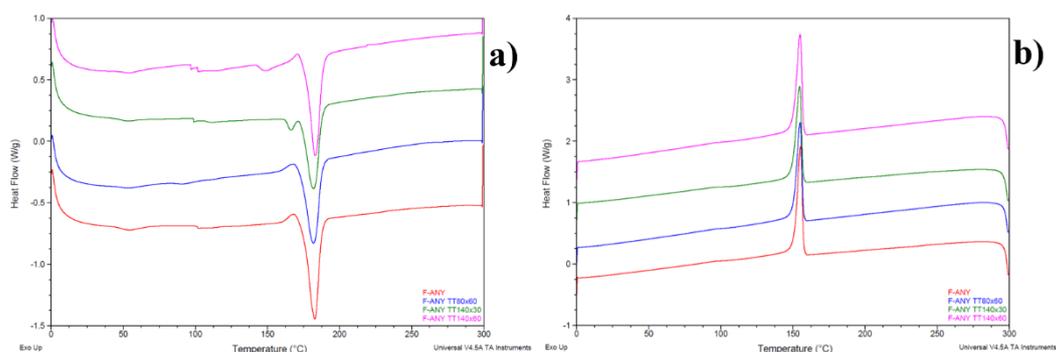
Nella Tabella 21 sono riportati i valori della temperatura di transizione vetrosa ( $T_g$ ), della temperatura di fusione ( $T_m$ ) e di entalpia di fusione ( $\Delta H_m$ ) ricavati dal primo ciclo di riscaldamento e i valori della temperatura di cristallizzazione ( $T_c$ ) e dell'entalpia di cristallizzazione ( $\Delta H_c$ ) ricavati dal ciclo di raffreddamento.



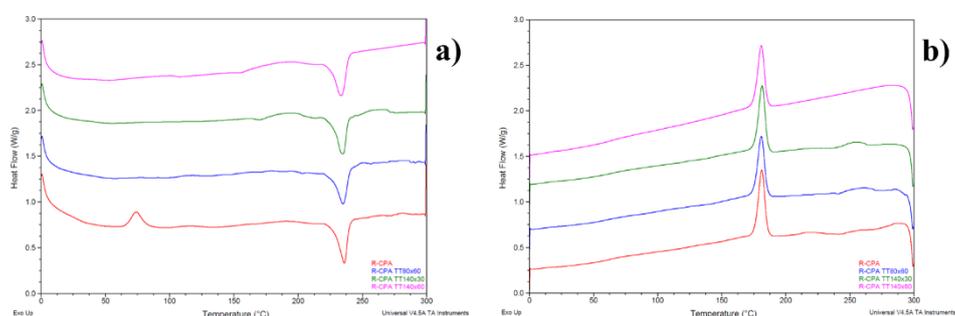
**Figura 54:** Curve DSC del filamento F-G3D "as printed", trattato termicamente ad 80°C per 60 minuti, a 140°C per 30 minuti e trattato a 140°C per 60 minuti, per il primo ciclo di riscaldamento (a) e a raffreddamento (b).



**Figura 55:** Curve DSC del filamento F-AOM "as printed", trattato termicamente ad 80°C per 60 minuti, a 140°C per 30 minuti e trattato a 140°C per 60 minuti, per il primo ciclo di riscaldamento (a) e a raffreddamento (b).



**Figura 56:** Curve DSC del filamento F-ANY “as printed”, trattato termicamente ad 80°C per 60 minuti, a 140°C per 30 minuti e trattato a 140°C per 60 minuti, per il primo ciclo di riscaldamento (a) e a raffreddamento (b).



**Figura 57:** Curve DSC del filamento R-CPA “as printed”, trattato termicamente ad 80°C per 60 minuti, a 140°C per 30 minuti e trattato a 140°C per 60 minuti, per il primo ciclo di riscaldamento (a) e a raffreddamento (b).

**Tabella 21:** Valori di entalpia di fusione ( $\Delta H_m$ ), temperatura di fusione ( $T_m$ ), temperatura di transizione vetrosa ( $T_g$ ), entalpia di cristallizzazione ( $\Delta H_c$ ), temperatura di cristallizzazione ( $T_c$ ) e cristallinità ( $\chi$ ) per i materiali commerciali sottoposti ai trattamenti termici.

Materiale commerciale (Trattamento Termico)	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]	$T_c$ [°C]	$\Delta H_m$ [J/g]	$\Delta H_c$ [J/g]	$\chi$ [%]
F-G3D (NO TT)	60	156	-	22,6	-	7,4
F-G3D (TT50x30)	59	154	-	22,8	-	9,3
F-G3D (TT80x60)	59	156	-	21,6	-	23,6
F-G3D (TT140x30)	57	161	-	28,2	-	30,8
F-G3D (TT140x60)	57	159	-	34,9	-	38,1
F-AOM (NO TT)	83	-	-	-	-	-

F-AOM (TT80x60)	83	-	-	-	-	-
F-AOM (TT140x30)	83	-	-	-	-	-
F-AOM (TT140x60)	83	-	-	-	-	-
R-CPA (NO TT)	51	236	181	22,5	27,6	7,1
R-CPA (TT80x60)	52	235	181	23,2	26,6	13,7
R-CPA (TT140x30)	51	228	182	25,5	27,1	15,0
R-CPA (TT140x60)	50	234	181	25,2	27,1	14,8
F-ANY (NO TT)	49	183	155	38,5	44	22,2
F-ANY (TT80x60)	48	182	155	39,2	44,3	22,6
F-ANY (TT140x30)	48	182	155	40,3	44,5	23,2
F-ANY (TT140x60)	48	183	155	41,3	46,8	23,8

Per ogni campione è stato analizzato il primo ciclo di riscaldamento, perché è quello che permette di studiare la struttura cristallina sviluppata con l'esecuzione del trattamento termico, e il ciclo di raffreddamento.

Per il materiale commerciale F-G3D è possibile notare che il picco di *cold crystallization*, identificato a 113°C per il campione “*as printed*”, risulti presente per i campioni sottoposti ai trattamenti termici della durata di 30 minuti a 50°C e 140°C, ma assente per i provini che hanno subito un trattamento termico della durata di 60 minuti, indicando che la cristallizzazione durante i trattamenti termici TT80x60 e TT140x60 sia stata completata.

Per il campione prodotto con il filamento F-G3D e sottoposto al trattamento termico a 50°C per 30 minuti, è stato rilevato un picco esotermico associabile alla *cold crystallization* a 113°C, che evidenzia come il trattamento termico realizzato sia inefficace a promuovere il completamento della cristallizzazione.

Per quanto concerne il provino realizzato in F-G3D trattato termicamente a 140°C per 30 minuti, è possibile notare un picco esotermico associabile alla *cold crystallization* a 107°C, che conferma che la durata del trattamento termico (30 minuti), a differenza dei trattamenti eseguiti per una durata maggiore (60 minuti), indipendentemente dalle temperature di trattamento adoperate, sia stata insufficiente a completare la cristallizzazione.

Relativamente alla curva DSC del provino di F-G3D TT80x60, la presenza del picco esotermico a 142°C prima del picco endotermico di fusione potrebbe essere rappresentativo dello sviluppo della sola fase  $\alpha'$  durante il trattamento termico [81].

Il doppio picco endotermico esibito sia dal provino F-G3D TT140x30 che dal provino F-G3D TT140x60 indica la compresenza delle fasi  $\alpha$  e  $\alpha'$ : il picco presente a temperature inferiori (147°C per entrambi i provini) rappresenta sia la fusione dei cristalli di fase  $\alpha$  sviluppati durante il trattamento termico che la ricristallizzazione della fase  $\alpha'$  in  $\alpha$ , mentre il secondo picco di fusione (identificato a 161°C per il provino F-G3D TT140x30 e a 159°C per il provino F-G3D TT140x60) rappresenta la fusione dei cristalli di fase  $\alpha$  sviluppati durante il processo di ricristallizzazione [81].

Tutti i trattamenti termici performati sui provini di F-G3D permettono di aumentare la cristallinità rispetto a quella valutata per il provino “*as printed*”, che mostra valori più bassi a causa del veloce raffreddamento subito dal filamento depositato durante il processo di FFF: in particolare, il trattamento termico TT140x60 permette di ottenere il più alto valore di cristallinità (38,1%).

Per quanto concerne il filamento F-AOM, non si rileva la presenza di un ordine cristallino nel range di temperature indagato.

Per il filamento commerciale F-ANY, tutti i trattamenti termici realizzati permettono di produrre un leggero aumento della cristallinità dei provini caratterizzati: in particolare, il trattamento TT140x60 permette di raggiungere il valore di cristallinità maggiore (23,8%) rispetto a quello esibito dal provino “*as printed*” (22,2%).

La curva relativa al filamento F-ANY TT140x30, mostra un doppio picco endotermico, a 166°C e a 182°C, relativo, rispettivamente, alla presenza delle fasi cristalline  $\alpha$  e  $\gamma$  nella matrice polimerica [82].

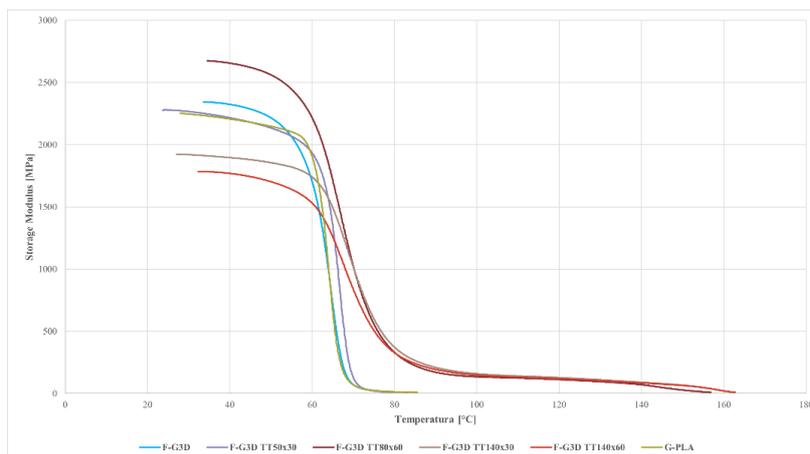
Per il materiale commerciale R-CPA, le curve DSC dei provini sottoposti ai differenti trattamenti termici non mostrano la presenza di un picco di *cold crystallization*, indicando che la cristallizzazione è stata completata durante i trattamenti termici eseguiti.

Rispetto al provino di R-CPA “*as printed*”, i provini che sono stati sottoposti ai differenti trattamenti termici mostrano un incremento nella cristallinità: il trattamento che permette di registrare il maggior aumento in cristallinità è quello eseguito a 140°C per 30 minuti (15,0 % rispetto al 7,1 % esibito dal provino R-CPA “*as printed*”).

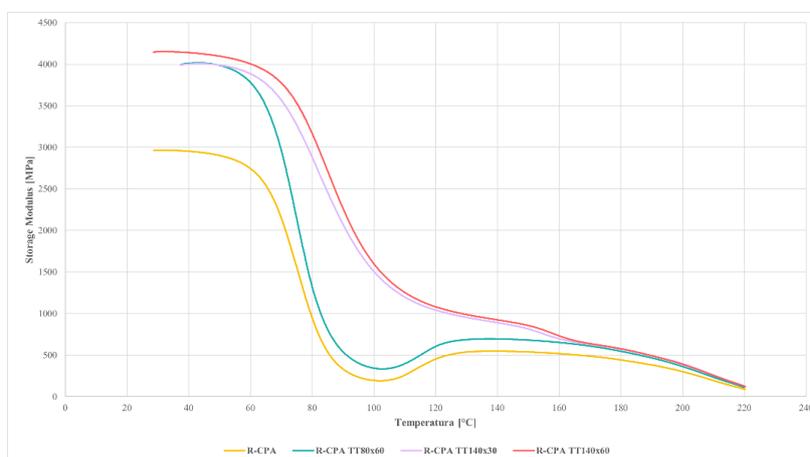
#### 3.1.4.2. Caratterizzazione dinamico – meccanica: DMA

La caratterizzazione dinamico – meccanica (DMA) è stata eseguita su provini ottenuti dalla stampa di filamenti commerciali compositi, prodotti con pari architettura di deposizione (0/45/90/-45) e sottoposti a differenti trattamenti termici.

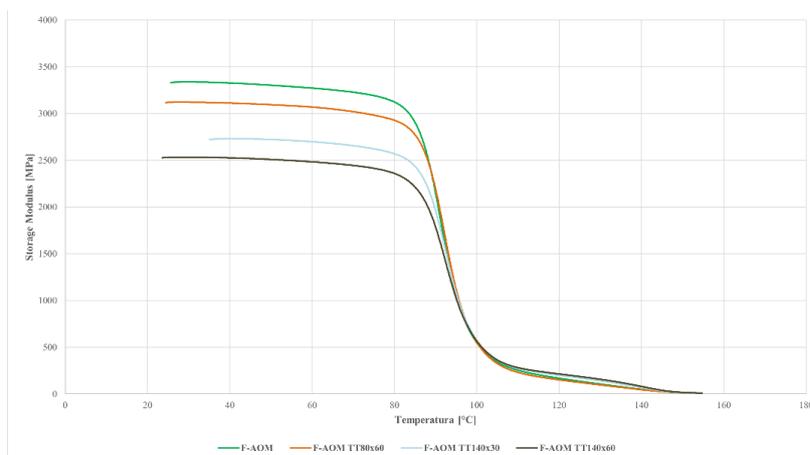
Nelle Figure 58, 59, 60, 61 sono riportati, rispettivamente, gli andamenti dello *Storage Modulus* in funzione della temperatura dei filamenti F-G3D, R-CPA, F-AOM e F-ANY, per campioni “*as printed*” e per i campioni sottoposti ai trattamenti termici.



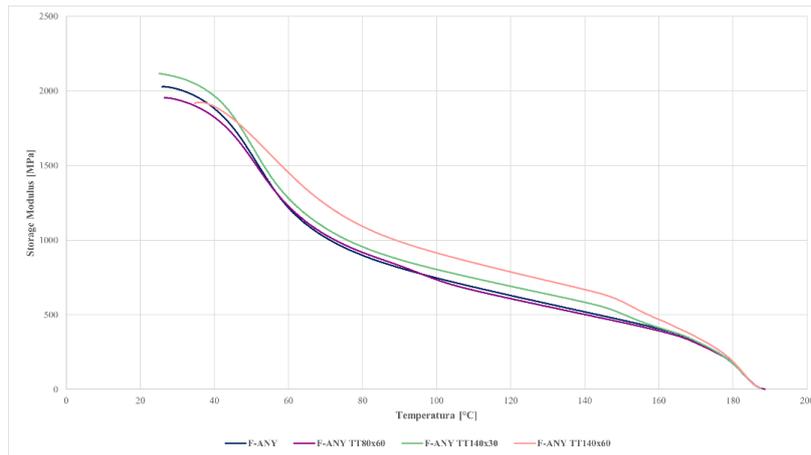
**Figura 58:** Andamento dello Storage Modulus in funzione della temperatura per campioni in F-G3D “as printed” e trattati termicamente, prodotti con architettura 0/45/90/-45.



**Figura 59:** Andamento dello Storage Modulus in funzione della temperatura per campioni in R-CPA “as printed” e trattati termicamente, prodotti con architettura 0/45/90/-45.



**Figura 60:** Andamento dello Storage Modulus in funzione della temperatura per campioni in F-AOM “as printed” e trattati termicamente, prodotti con architettura 0/45/90/-45.



**Figura 61:** Andamento dello Storage Modulus in funzione della temperatura per campioni in F-ANY “as printed” e trattati termicamente, prodotti con architettura 0/45/90/-45.

Per quanto concerne il filamento commerciale F-G3D, il trattamento termico TT80x60 permette di ottenere un materiale che da temperatura ambiente a 70°C mostra il maggior incremento dello *Storage Modulus* rispetto al F-G3D “as printed”: tale risultato può essere imputato ad un effetto sinergico di incremento della cristallinità della matrice polimerica (che passa dal 7,4 % del materiale “as printed” al 23,6 % per il provino trattato termicamente ad 80°C per 60 minuti) e alla parziale riduzione dei vuoti *inter – beads* e *intra – beads*, per lo più a livello superficiale, che vengono ridotti a causa del rammollimento del materiale riscaldato ad una temperatura maggiore della temperatura di transizione vetrosa [83,84,85].

I provini sottoposti ai trattamenti TT140x30 e TT140x60 hanno ottenuto un valore dello *Storage Modulus*:

- superiore rispetto al valore registrato per il provino “as printed” soltanto a partire dalle temperature di 60°C (TT140x30) e 62°C (TT140x60);
- maggiore rispetto al valore del provino sottoposto al trattamento TT80x60 per temperature superiori a 70°C (TT140x30) e 80°C (TT140x60).

Il significativo aumento di cristallinità registrato per i provini TT140x30 (30,8 %) e TT140x60 (38,1%), rispetto al materiale “as printed” (7,4 %) e TT80x60 (23,6 %), potrebbe aver compromesso la qualità del legame generato tra filamenti adiacenti, interessando le zone di contatto tra i filamenti depositati, portando ad un’interfaccia meno resistente e, quindi, a valori di *Storage Modulus* minori a temperature inferiori [86].

Il provino TT50x30 è stato realizzato con l’obiettivo di studiare le proprietà dinamico – meccaniche ottenute con un trattamento eseguito ad una temperatura inferiore alla  $T_g$  del materiale e per un tempo minore, per evitare l’inutilizzo dell’inserito a valle del trattamento termico a causa di distorsioni significative: tale aspetto verrà dettagliato nel paragrafo 3.1.4.

Lo *Storage Modulus* misurato per il provino TT50x30 è inferiore a quello del provino “as printed” per temperature inferiori della  $T_g$  del materiale. Probabilmente il trattamento è in grado di alleviare solo parzialmente gli stress e le deformazioni introdotte mediante il processo di FFF, non migliorando l’adesione all’interfaccia tra filamenti adiacenti e non

promuovendo una parziale riduzione dei vuoti generati durante la deposizione, a causa della bassa temperatura di trattamento, inferiore alla  $T_g$  del materiale.

Per il materiale commerciale R-CPA, tutti i trattamenti termici realizzati permettono di ottenere valori di rigidità maggiori rispetto al provino “*as printed*” nel range di temperature studiato: tale incremento diventa più significativo per i trattamenti termici eseguiti a temperatura maggiore (TT140x30 e TT140x60).

Il provino TT140x60 registra i valori di *Storage Modulus* più elevati nel range di temperature studiato, beneficiando, probabilmente, del parziale decremento delle porosità e del miglioramento del contatto fisico tra filamenti adiacenti, realizzati con il rammollimento della matrice, e, principalmente giovando dell’incremento in cristallinità della matrice polimerica, che raggiunge il 14,8 % per il provino TT140x60, contro il 7,1 % del provino “*as printed*” [83,85].

Tuttavia, la parziale riduzione di porosità, ottenibile mediante l’esecuzione di un trattamento termico a temperatura inferiore alla temperatura di fusione della matrice polimerica, è limitata ai layer più esterni [84].

Per il filamento commerciale F-AOM, l’esecuzione dei trattamenti termici consente di ottenere valori di rigidità inferiori rispetto a quelli registrati per il provino “*as printed*” fino al raggiungimento della  $T_g$  del materiale polimerico.

Gli stress di compressione nella direzione dello spessore dei layer e le deformazioni di stiramento accumulate durante l’esecuzione del processo produttivo di FFF, mantenute a causa del rapido raffreddamento delle parti depositate, possono essere rilasciate mediante l’esecuzione del trattamento termico: in questo modo, il rilassamento delle catene polimeriche potrebbe comportare l’ottenimento di *Storage Modulus* inferiori rispetto a quello registrato per i provini “*as printed*” [83].

Incrementando temperatura e durata del trattamento termico è possibile aumentare l’entità del rilassamento, che si manifesta con valori dello *Storage Modulus* progressivamente inferiori, fino al raggiungimento della  $T_g$  del materiale.

Per il materiale commerciale F-ANY, il provino TT140x60 permette di registrare valori di rigidità superiori, a partire dalla  $T_g$  del materiale fino alla conclusione della prova, a causa della cristallinità incrementata della matrice polimerica (23,8 %) rispetto agli altri provini.

Tuttavia, a temperature inferiori della  $T_g$  del materiale, il provino che permette di raggiungere valori dello *Storage Modulus* superiori è il provino TT140x30: l’esecuzione di tale trattamento potrebbe aver migliorato leggermente la diffusione tra i layer depositati, incrementando l’adesione tra filamenti adiacenti e riducendo parzialmente le porosità introdotte con il processo di FFF, permettendo l’ottenimento di una struttura più rigida prima del raggiungimento della  $T_g$ .

Nella Tabella 22 sono stati riassunti gli effetti sullo *Storage Modulus* dei tre trattamenti termici sui materiali commerciali caratterizzati mediante DMA, rispetto ai relativi valori registrati per i provini “*as printed*”.

**Tabella 22:** Confronto tra i valori dello Storage Modulus dei provini trattati termicamente e i relativi provini “as printed”.

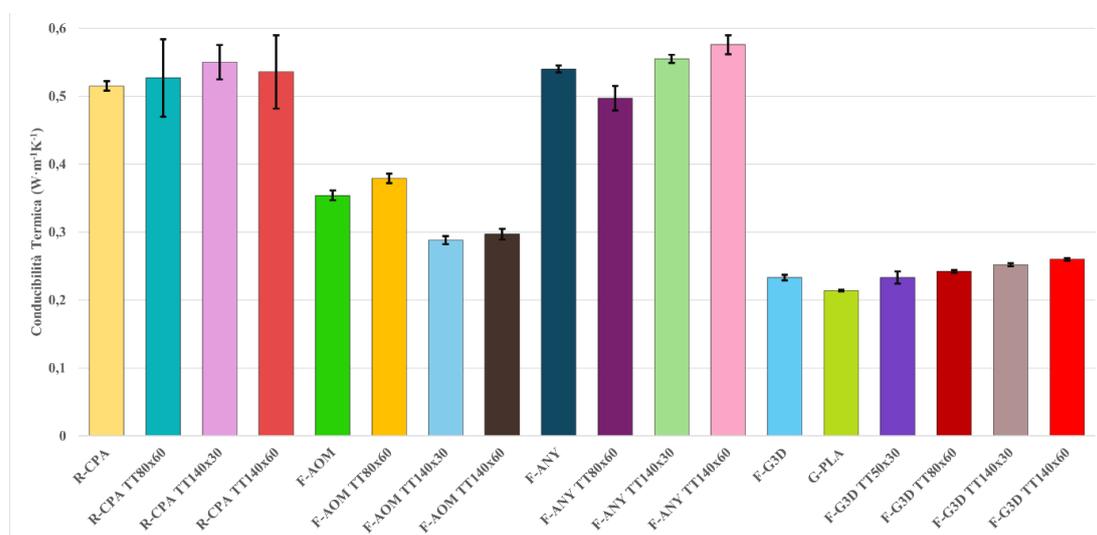
<b>Materiale commerciale</b>	<b>TT50X30</b>	<b>TT80x60</b>	<b>TT140x30</b>	<b>TT140x60</b>
F-AOM	/	–	– –	– – –
F-ANY	/	=	+	++
F-G3D	=	+++	+	+
R-CPA	/	+	+++	+++

### 3.1.4.3. Conducibilità termica: Hot Disk

Sono state eseguite delle misure di conducibilità termica sui campioni di filamenti commerciali prodotti impiegando la medesima architettura di deposizione (0/45/90/-45) e sottoponendo i provini ai trattamenti TT50x30, TT80x60, TT140x30 e TT140x60.

I valori ricavati da tale caratterizzazione sono stati riassunti nella Figura 62, che riporta il valore medio di conducibilità termica calcolato considerando l’esecuzione di tre misure per ogni campione.

Per un più immediato confronto, la Figura 62 riporta anche i valori medi di conducibilità termica misurati sia sul campione a base PLA non rinforzato (G-PLA) che sui provini dei filamenti commerciali “as printed”.



**Figura 62:** Valori di conducibilità termica misurati mediante analisi Hot Disk su provini dei filamenti commerciali realizzati con architettura di deposizione 0/45/90/-45.

Dall’analisi dei valori riportati nella Figura 62, emerge che lo svolgimento dei trattamenti termici proposti non permette di conseguire esclusivamente un incremento nella proprietà di conducibilità termica rispetto al materiale “as printed”.

Il materiale che ha registrato il valore più alto di conducibilità termica è il filamento F-ANY TT140x60 ( $0,576 \pm 0,014 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), mentre il materiale che possiede il valore di conducibilità termica inferiore è il G-PLA ( $0,214 \pm 0,001 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

Per il filamento R-CPA, l'incremento maggiore nella conducibilità termica, prodotto mediante il trattamento TT140x30, è responsabile dell'incremento più elevato nella conducibilità termica ( $0,550 \pm 0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) rispetto al provino "*as printed*" ( $0,515 \pm 0,007 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ): il maggior contenuto di fase cristallina permette l'ottenimento di una migliorata conducibilità termica, a causa di un libero cammino medio dei fononi maggiore e, quindi, di un più significativo contributo al trasferimento del calore nel solido [87,88,89].

Invece, i provini R-CPA TT80x60 e TT140x60 hanno registrato valori di conducibilità termica leggermente superiori al valore misurato per il provino "*as printed*", ma inferiori rispetto al TT140x30, rispettivamente  $0,527 \pm 0,057 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  e  $0,536 \pm 0,054 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

Anche per il filamento commerciale F-G3D, l'incremento della cristallinità prodotto mediante i trattamenti termici ha prodotto un miglioramento della conducibilità termica: il provino che ha registrato il maggior incremento in conducibilità termica rispetto al provino "*as printed*" ( $0,233 \pm 0,004 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) è il TT140x60 ( $0,260 \pm 0,002 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

I provini F-G3D TT80x60 e TT140x30 dispongono di valori leggermente maggiori di conducibilità termica rispetto al provino "*as printed*", rispettivamente  $0,242 \pm 0,002 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , e  $0,252 \pm 0,002 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , a causa dell'incremento di cristallinità ottenuto con l'esecuzione dei trattamenti termici; tuttavia, tali valori di conducibilità termica risultano inferiori rispetto alla misura ottenuta per il TT140x60, a causa del minore contenuto di fase cristallina prodotta a valle del trattamento termico.

Per il filamento commerciale F-AOM, il trattamento che ha realizzato un network percolativo del calore più efficiente è il TT80x60 ( $0,379 \pm 0,007 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

La proprietà di conducibilità termica è fortemente dipendente dall'area di contatto, dalla qualità dell'adesione dei filamenti depositati [90] e dalla presenza di difetti e porosità nella parte prodotta tramite FFF [91]: il rilassamento degli stress e delle deformazioni, realizzato durante i trattamenti termici condotti a temperatura maggiore, unito ad una riduzione poco significativa delle porosità mediante il trattamento termico, potrebbe aver diminuito la qualità dell'interfaccia di contatto tra filamenti adiacenti, ostacolando la creazione di un cammino percolativo del calore continuo e tridimensionale, facendo registrare per i campioni in F-AOM TT140x30 e TT140x60 valori di conducibilità termica inferiori (rispettivamente  $0,288 \pm 0,006 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  e  $0,297 \pm 0,008 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) rispetto al provino "*as printed*" ( $0,354 \pm 0,007 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

Per quanto concerne il filamento F-ANY, il provino che ha riportato il più elevato miglioramento nella conducibilità termica rispetto al campione "*as printed*" ( $0,540 \pm 0,005 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) è il TT140x60 ( $0,576 \pm 0,014 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), a causa del maggiore incremento di cristallinità presentato rispetto agli altri campioni a base F-ANY.

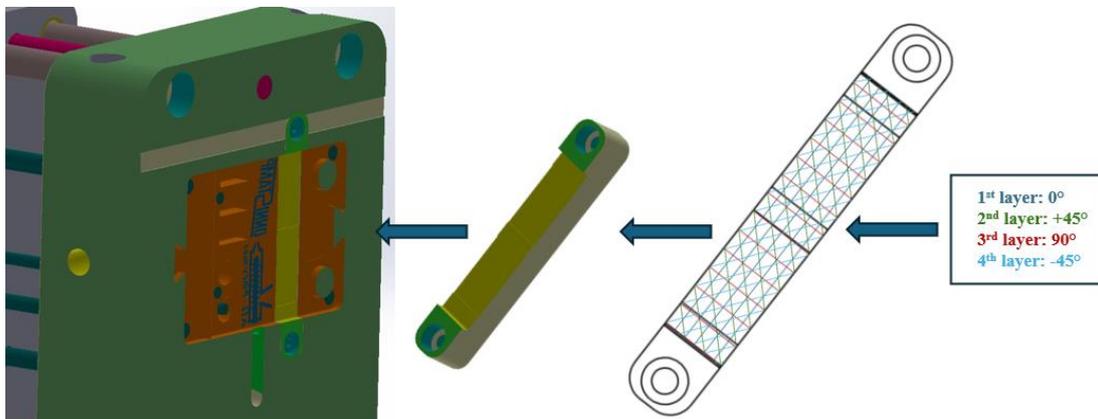
Il provino F-ANY TT80x60 non ha prodotto un network di dissipazione del calore più efficiente rispetto a quello del provino "*as printed*", registrando valori di conducibilità inferiori ( $0,497 \pm 0,018 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

Infine, il provino F-ANY TT140x30 ha registrato un modesto incremento dei valori di conducibilità termica ( $0,555 \pm 0,006 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) rispetto al campione “*as printed*”, a causa del contenuto incremento in cristallinità ottenuto a valle del trattamento termico.

### 3.1.5. Realizzazione degli inserti di stampi finali da impiegare nel processo di stampaggio ad iniezione

Per la realizzazione dei provini è stata adottata una direzione di crescita “*Flat 0°*”, impiegando un’architettura di deposizione che ha previsto l’alternanza dei raster angle  $0/45/90/-45$ , fino al raggiungimento dell’altezza stabilita dell’oggetto.

Tale configurazione di stampa è stata designata in funzione dell’applicazione finale dell’inserto, schematizzata in Figura 63, per beneficiare, in opera, di un’ottimale distribuzione del carico tra i layer e un comportamento più isotropo della parte prodotta mediante FFF.



**Figura 63:** Schematizzazione dell'alloggiamento dell'inserto, rappresentato con le differenti raster orientation adottate con il processo di deposizione.

In base ai risultati delle caratterizzazioni dinamico – meccaniche, termiche e di conducibilità termica condotte sui materiali commerciali, per la realizzazione degli inserti da testare nei cicli di stampaggio ad iniezione, sono stati definiti i trattamenti termici riportati nella Tabella 23.

**Tabella 23:** Scelta dei trattamenti termici ottimali per i materiali commerciali, in base ai risultati ottenuti mediante le operazioni di caratterizzazione.

<b>Materiale commerciale</b>	<b>Trattamento termico</b>
F-AOM	No
F-ANY	No
F-G3D	80°C per 60 minuti 50°C per 30 minuti
G-PLA	No
R-CPA	140°C per 30 minuti

La ratio a sostegno delle scelte riportate è basata sul concetto di *Rapid Tooling* declinato alla specifica applicazione finale: il processo produttivo dell'inserto deve consentire il rapido raggiungimento di proprietà adeguate a garantire una produzione di piccoli lotti, senza complicare eccessivamente le fasi realizzative.

Inoltre, l'introduzione di step aggiuntivi nel ciclo di fabbricazione del *tool* viene giustificata esclusivamente dal raggiungimento di miglioramenti particolarmente significativi nelle caratteristiche funzionali, senza impattare eccessivamente le tempistiche produttive.

Per quanto riguarda il materiale commerciale F-G3D, i trattamenti finali designati per la realizzazione degli inserti sono il TT80x60, che permette di conciliare l'ottenimento di una migliorata rigidità e di un'incrementata conducibilità termica rispetto al materiale nella condizione "*as printed*", e il TT50x30.

I provini trattati termicamente a 50°C per 30 minuti sono stati sottoposti alle medesime operazioni di caratterizzazione al fine di studiare l'effetto di un secondo trattamento termico, dalla durata e temperatura inferiori, sulla stabilità dimensionale dell'inserto a valle del trattamento termico.

Infatti, producendo gli inserti in F-G3D con i parametri di stampa precedentemente definiti e sottoponendoli al TT80x60, sebbene i due inserti prodotti siano stati realizzati in successione e disposti insieme nella stufa per l'esecuzione del trattamento termico, in posizione centrale e a breve distanza reciproca, al fine di garantire le medesime condizioni di trattamento, è stata notata la produzione di:

- una leggera deformazione per il primo inserto realizzato, ravvisata esclusivamente al momento del montaggio sullo stampo ad iniezione, che non ne ha ostacolato l'alloggiamento;
- un imbarcamento più evidente per il secondo inserto, riportato in Figura 64, che ne ha impedito l'utilizzo perché dimensionalmente troppo piccolo non risultava alloggiabile nello stampo mediante apposite viti.



**Figura 64:** Inserto prodotto in F-G3D e sottoposto al trattamento termico TT80x60, a valle del quale ha mostrato imbarcamento.

Per il filamento R-CPA, il trattamento finale determinato per la produzione dell'inserto è il TT140x30, che permette di realizzare l'incremento maggiore in conducibilità termica e di ottenere proprietà dinamico – meccaniche migliorate rispetto al provino "*as printed*".

Sebbene il provino in R-CPA sottoposto al trattamento TT140x60 abbia mostrato un contenuto incremento in *Storage Modulus* rispetto al provino trattato con TT140x30 nel range di temperature studiato, il trattamento TT140x60 non è risultato conveniente sia dal punto di vista della conducibilità termica conseguita, inferiore rispetto ai valori ottenuti con il campione TT140x30, che per la durata maggiore del post – processing, che incrementa il complessivo tempo produttivo necessario alla realizzazione dell’inserto.

Per quanto concerne il materiale commerciale F-ANY, si è deciso di non sottoporre ad alcun trattamento termico gli inserti prodotti.

Gli inserti prodotti in F-ANY sottoposti ai trattamenti TT140x60 e TT140x30, dalle proprietà dinamico – meccaniche e di conducibilità termica migliori tra i provini di F-ANY proposti, sono stati scartati perché non montabili sullo stampo ad iniezione a causa di imbarcamento.

Il contenuto incremento nelle proprietà dinamico – meccaniche e la ridotta conducibilità termica ottenute con il materiale trattato con il TT80x60 rispetto al materiale “*as printed*” non hanno reso conveniente l’esecuzione di uno step produttivo aggiuntivo per la produzione di piccoli lotti di stampati ad iniezione.

Per il materiale F-AOM, l’inserto da testare nei cicli di stampaggio ad iniezione è stato prodotto senza l’esecuzione di alcun trattamento termico, a causa della minor rigidità registrata dai provini trattati termicamente rispetto al materiale “*as printed*” e per un poco significativo incremento della conducibilità termica per il solo F-ANY TT80x60.

### 3.2. *Materiali commerciali e blend polimerici per Stampaggio ad Iniezione*

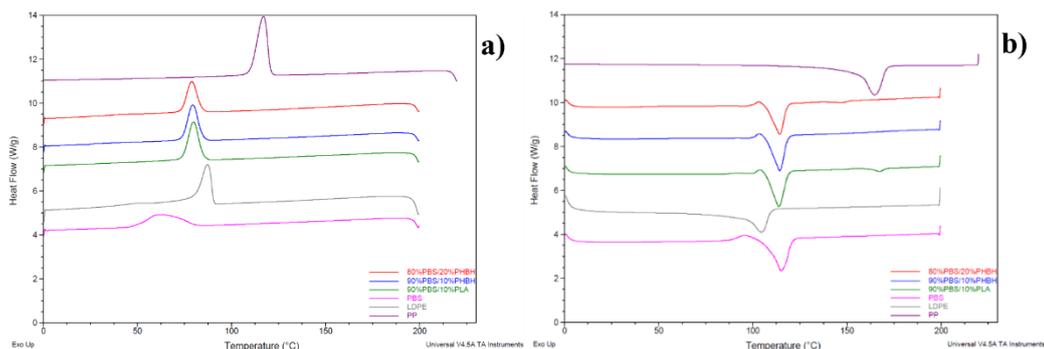
Nel seguente paragrafo viene proposta la caratterizzazione termica (DSC) e reologica dei materiali commerciali e dei blend polimerici prodotti che sono stati stampati ad iniezione.

#### 3.2.1. *Caratterizzazione termica: DSC*

Con il fine di disporre di materiali polimerici stampabili ad iniezione a temperature intermedie tra il PBS e il PP, sono stati realizzati dei blend polimerici, la cui composizione è stata descritta nel paragrafo 2.2.6 e la modalità di produzione mediante estrusore bivate co-rotante è stata dettagliata nel paragrafo 2.3.1.

L’introduzione nel blend di polimeri più altofondenti rispetto al polimero base comporta l’esecuzione di cicli di stampaggio ad iniezione a temperature maggiori, al fine di garantire l’ottenimento di un materiale da iniettare completamente fuso: in questo modo, in esercizio, gli inserti possono essere sottoposti a temperature progressivamente maggiori.

Nella Figura 65 sono riportate le curve DSC del ciclo di raffreddamento (a) e del secondo ciclo di riscaldamento (b) per i materiali studiati e, nella Tabella 24 sono riportati i relativi valori di temperatura di fusione ( $T_m$ ), di temperatura di cristallizzazione ( $T_c$ ) e le entalpie di fusione e cristallizzazione (rispettivamente  $\Delta H_m$  e  $\Delta H_c$ ).



**Figura 65:** Curve DSC a raffreddamento (a) e al secondo ciclo di riscaldamento (b) dei materiali commerciali e dei blend prodotti stampati ad iniezione.

**Tabella 24:** Parametri di temperatura di fusione ( $T_m$ ), temperatura di cristallizzazione ( $T_c$ ), entalpia di fusione ( $\Delta H_m$ ) e di entalpia cristallizzazione ( $\Delta H_c$ ) per i materiali commerciali stampati ad iniezione ricavati da analisi DSC. Le diciture <sup>(I)</sup> e <sup>(II)</sup> si riferiscono, rispettivamente, ai picchi endotermici rilevati a temperatura inferiore e superiore nel termogramma.

Materiale	$T_m$ [°C]	$T_c$ [°C]	$\Delta H_m$ [J/g]	$\Delta H_c$ [J/g]	$\chi$ [%]
LDPE	105	87	93,7	86,2	32,9
PBS	115	61	93,6	68,6	84,8
PP	165	117	100,9	106,5	53,1
90%PBS10%PHBH	114 <sup>(I)</sup>	79	70,9 <sup>(I)</sup>	67,3	71,4
	148 <sup>(II)</sup>		1,7 <sup>(II)</sup>		
80%PBS20%PHBH	114 <sup>(I)</sup>	78	62,3 <sup>(I)</sup>	58,2	70,6
	148 <sup>(II)</sup>		2,1 <sup>(II)</sup>		
90%PBS10%PLA	114 <sup>(I)</sup>	80	72,9 <sup>(I)</sup>	69,7	73,4
	167 <sup>(II)</sup>		4,3 <sup>(II)</sup>		

I valori del grado di cristallinità ( $\chi$ ) per il PBS, per i blend base PBS, per LDPE e per PP sono stati valutati secondo l'Equazione 2 (Eq. 2), considerando i valori di entalpia di fusione dei polimeri 100% cristallini ( $\Delta H_0$ ), l'entalpia di fusione ( $\Delta H_m$ ) misurata dai termogrammi DSC e la frazione in peso del PBS nel blend ( $w$ ):

$$\chi = \frac{\Delta H}{\Delta H_0 \cdot w} \cdot 100 \quad (\text{Eq.2})$$

I valori di  $\Delta H_0$  trovati in letteratura risultano pari a 110,3 J/g [92] per il PBS, 285 J/g per LDPE [93] e 190 J/g per il PP [94].

Dall'analisi dei risultati riportati nella Tabella 9, si evince che realizzando i blend si produce una diminuzione della cristallinità rispetto a quella valutata per il PBS "neat", evidenziata dalla diminuzione dei valori di entalpia rilevati dai termogrammi.

Tale risultato potrebbe essere causato da un effetto di diluizione tra le fasi, prodotto dall'introduzione di un materiale dalla minore cristallinità intrinseca, che interferisce con il processo di cristallizzazione del PBS [95].

Inoltre, incrementando il contenuto di PHBH nel blend, il picco di cristallizzazione si sposta a temperatura leggermente inferiore: la cristallizzazione del PBS potrebbe essere limitata dalla presenza del PHBH [96].

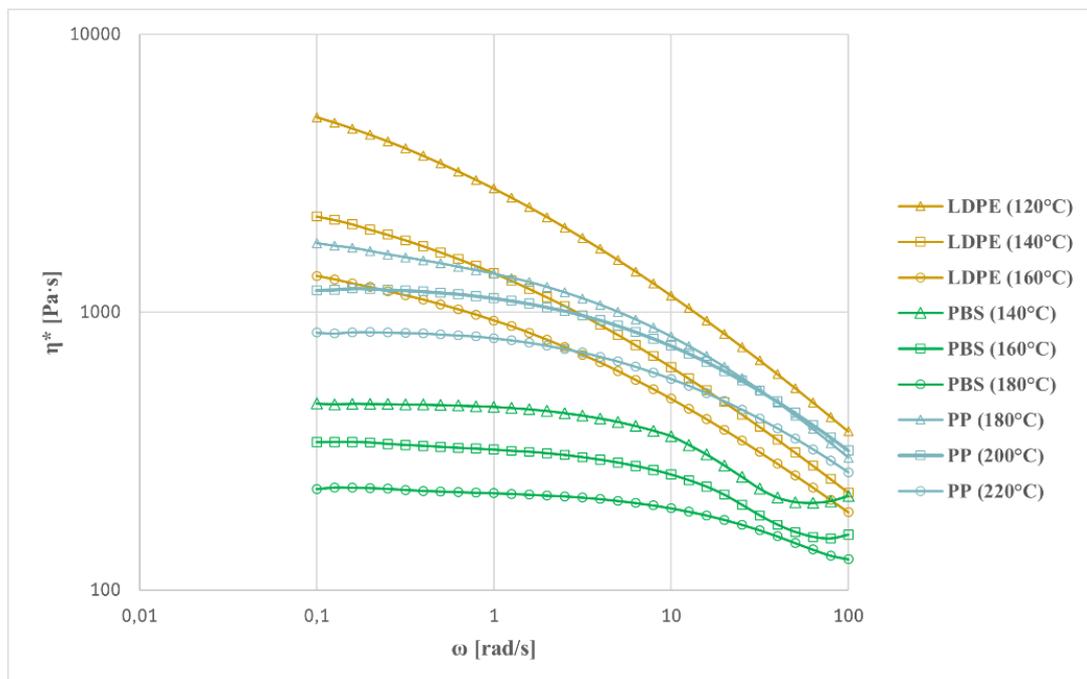
Infine, nei termogrammi DSC durante il secondo ciclo di riscaldamento dei tre blend è possibile identificare, per ogni curva, due picchi endotermici: il primo a temperature minori (114°C) imputabile alla presenza del PBS nel blend, e picchi a temperature maggiori, imputabili ai componenti presenti in minor tenore nel blend binario, quali PLA e PHBH, che possiedono, rispettivamente, temperature di fusione di 167°C e 148°C.

### 3.2.2. Caratterizzazione reologica

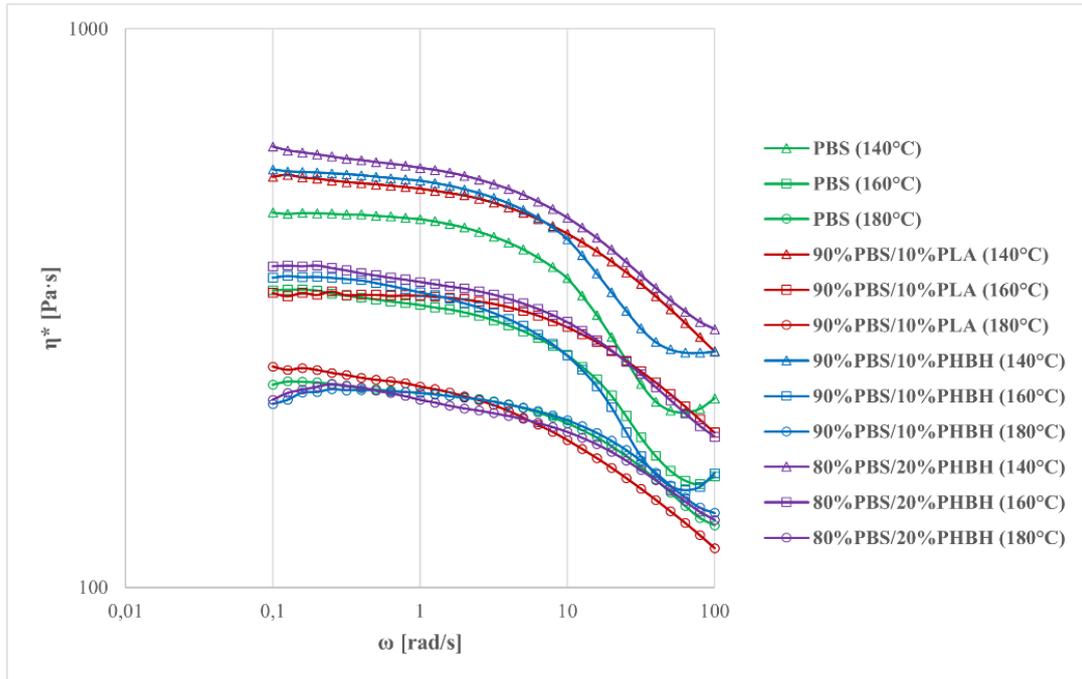
I blend polimerici prodotti e i materiali commerciali sono stati sottoposti a caratterizzazione reologica.

Nelle Figure 66 e 67 sono riportate le curve ottenute dalle prove di *Dynamic Frequency Sweep Test (DFST)*, rispettivamente, per i materiali polimerici commerciali tali e quali e i blend prodotti.

Le modalità di produzione dei campioni per le prove reologiche sono state dettagliate nel paragrafo 2.3.2, mentre le condizioni di prova per i materiali polimerici studiati sono state descritte nel paragrafo 2.4.1.



**Figura 66:** Curve reologiche ottenute mediante prova DFST per LDPE, PBS e PP.



**Figura 67:** Confronto tra le curve reologiche mediante prova DFST per i blend polimerici prodotti e PBS.

I dati ottenuti mediante l'esecuzione delle prove di *Frequency Sweep* sono stati fittati utilizzando il modello di *Cross* modificato, [97] adatto per i materiali che esibiscono un comportamento non newtoniano, la cui formulazione matematica è riportata nell'Equazione 3 (Eq.3):

$$\eta(\omega) = \frac{\eta_0}{(1 + (\lambda \cdot \omega)^{1-n})} \quad (\text{Eq. 3})$$

in cui  $\eta_0$  è la viscosità a zero shear,  $\omega$  è la frequenza,  $\lambda$  è il tempo di rilassamento,  $n$  è un parametro legato al coefficiente angolare della curva della viscosità nella zona di *shear thinning*.

Nella Tabella 25 sono riportati i valori di viscosità a zero shear ( $\eta_0$ ), del tempo di rilassamento ( $\lambda$ ) e dell'esponente  $n$ , ricavati dal fitting dei dati raccolti con l'analisi DFST.

**Tabella 25:** Valori di viscosità a zero shear ( $\eta_0$ ), del tempo di rilassamento ( $\lambda$ ) e dell'esponente  $n$ , ricavati dal fitting dei dati raccolti con l'analisi DFST.

Materiali	Temperatura DFST [°C]	$\eta_0$ [Pa·s]	$\lambda$ [s]	$n$
LDPE	120	7336	2,5	0,47
LDPE	140	2946	1,2	0,48
LDPE	160	1644	0,57	0,50
PBS	140	502	0,029	0,40
PBS	160	354	0,022	0,40
PBS	180	235	0,0081	0,37
PBS90PHBH10	140	597	0,025	0,46
PBS90PHBH10	160	374	0,024	0,39

PBS90PHBH10	180	226	0,0066	0,28
PBS80PHBH20	140	630	0,016	0,48
PBS80PHBH20	160	385	0,012	0,43
PBS80PHBH20	180	232	0,0064	0,47
PBS90PLA10	140	604	0,017	0,50
PBS90PLA10	160	414	0,015	0,53
PBS90PLA10	180	260	0,015	0,52
PP	180	1853	0,15	0,40
PP	200	1276	0,05	0,34
PP	220	888	0,04	0,34

Analizzando le curve della viscosità complessa ( $\eta^*$ ) in funzione della frequenza, è possibile notare che i materiali polimerici proposti per l'*Injection Molding* mostrino un comportamento non newtoniano pseudoplastico: per bassi valori del gradiente di deformazione la viscosità non mostra alcuna variazione con lo *shear rate*, assume un valore costante (*viscosità newtoniana* o anche *viscosità a zero – shear,  $\eta_0$* ), corrispondente alla viscosità che il materiale avrebbe se mostrasse un comportamento newtoniano; a valori di velocità di deformazione crescenti, il materiale esibisce una diminuzione più o meno ripida della viscosità (*shear thinning*).

Incrementando la temperatura a cui le prove *DFST* sono state condotte, si ottengono valori di *zero shear viscosity* ( $\eta_0$ ) decrescenti, una leggera transizione del *plateau newtoniano* verso *shear rate* maggiori, incrementando leggermente la zona di *shear rate* a cui il materiale mostra un comportamento newtoniano, e una diminuzione del tempo di rilassamento ( $\lambda$ ) del materiale polimerico.

A temperatura inferiore, le macromolecole sono dotate di minor mobilità, impiegano più tempo a rilassare.

A temperatura più elevata, invece, essendo stata fornita un'energia maggiore, si produce un aumento della mobilità delle macromolecole, che possono disporre di dinamiche di rilassamento più veloci: diminuendo il tempo di rilassamento del materiale polimerico, aumenta l'intervallo di tempo in cui si riesce a stabilire l'equilibrio dinamico tra *entanglements* sciolti e riformati, riscontrando una variazione non significativa della viscosità per valori più elevati dello *shear rate*.

### 3.3. Stampaggio ad Iniezione

In questo paragrafo verranno approfonditi i risultati relativi alle prove di stampaggio ad iniezione condotte utilizzando inserti di stampi prodotti secondo quanto prescritto nel paragrafo 3.1.3.

In particolare, la prima sezione del paragrafo sarà dedicata allo studio dell'effetto della pressione di mantenimento sul peso e sulla finitura superficiale degli stampati ad iniezione. Successivamente, verranno riportati i risultati dello studio della finitura superficiale per gli stampati ad iniezione prodotti a parità di parametri operativi.

### 3.3.1. Produzione degli stampati ad iniezione in LDPE: parametri di processo

Per l'iniezione del solo LDPE è stata variata esclusivamente la pressione di mantenimento nei primi 6 cicli di stampaggio ad iniezione (1 - 50 - 100 - 200 - 400 - 600 bar). Per i successivi 4 cicli, invece, è stata applicata una pressione di mantenimento costante (600 bar).

Gli ulteriori parametri di processo utilizzati per l'iniezione sono riportati nella Tabella 26.

**Tabella 26:** Parametri di processo impiegati per l'iniezione di LDPE.

Parametri	Valori
Temperatura del fuso (LDPE)	120°C
Temperatura dello stampo	30°C
Tempo di mantenimento	8 s
Tempo di raffreddamento	15 s
Tempo ciclo	85 s
Tempo di riempimento	0,91s
Pressione di Iniezione	600 bar

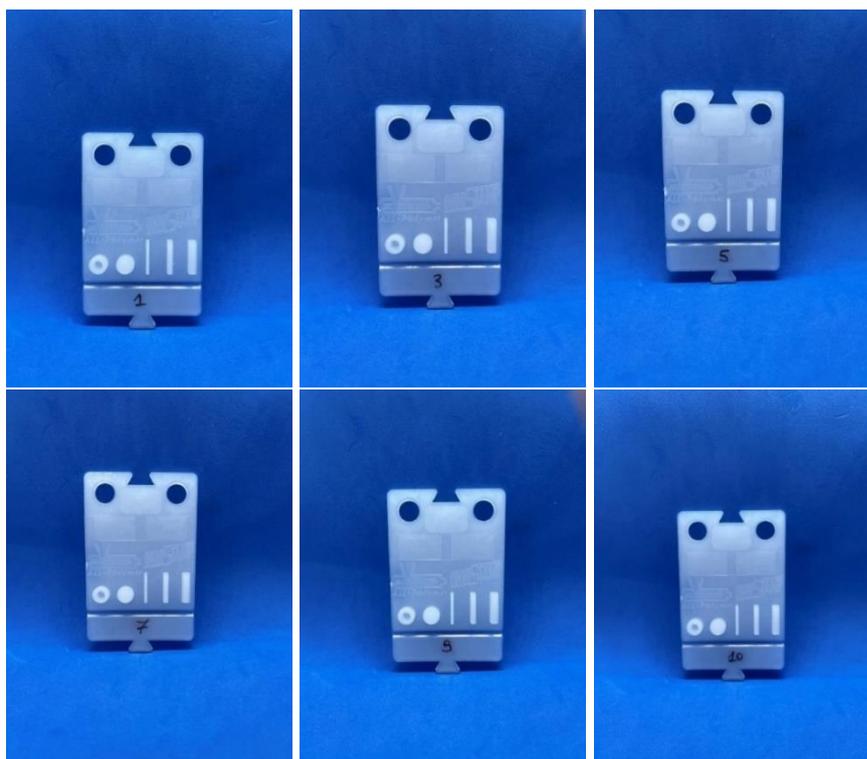
#### 3.3.1.1 Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto in Acciaio 1.2083

Nella Tabella 27 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in Acciaio 1.2083.

**Tabella 27:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE realizzati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,55	5,00	610	1	64
2	15,56	5,00	612	50	64
3	15,58	4,99	604	100	107
4	16,12	5,00	609	200	202
5	16,67	5,01	612	400	407
6	17,15	5,00	634	600	625
7	17,14	5,00	634	600	625
8	17,28	4,99	638	600	633
9	17,22	4,99	638	600	627
10	17,20	5,00	635	600	627

Nella Figura 68 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in LDPE utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 68:** Parti in LDPE stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

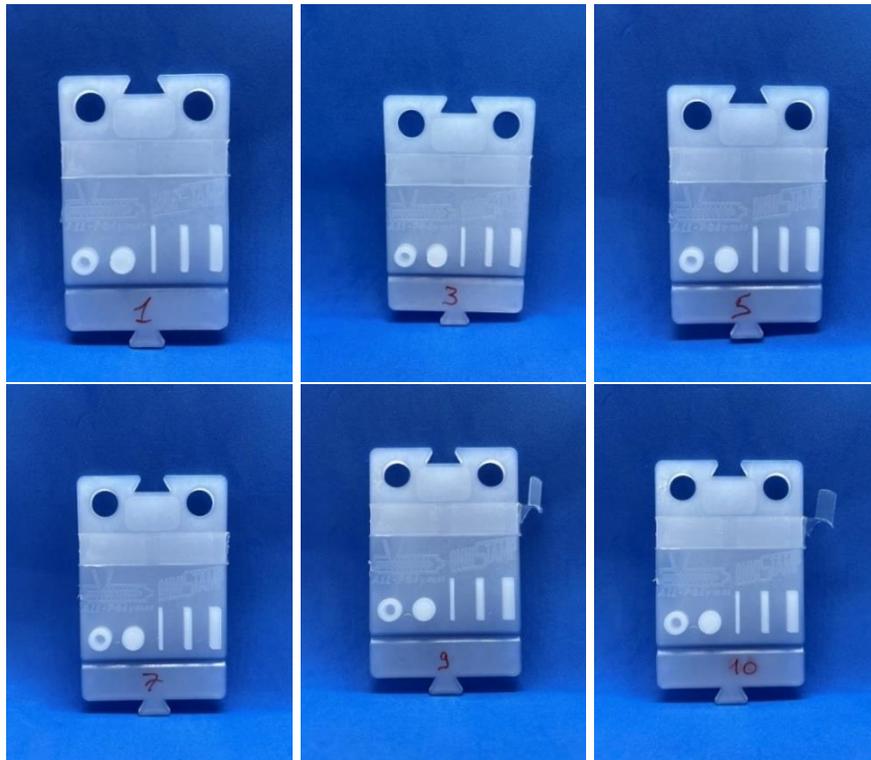
### 3.3.1.2 Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in F-AOM

Nella Tabella 28 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti con lo stampo fornito dell'inserto in F-AOM.

**Tabella 28:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE eseguiti con stampo fornito di inserto prodotto mediante FFF in F-AOM.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,57	5,00	618	1	65
2	15,52	4,99	621	50	64
3	15,54	4,99	617	100	107
4	15,99	5,00	621	200	202
5	16,57	4,99	624	400	404
6	17,38	5,00	633	600	624
7	17,21	5,00	633	600	625
8	17,24	4,99	634	600	626
9	17,19	4,99	633	600	625
10	17,20	4,99	633	600	626

Nella Figura 69 sono riportati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in LDPE usando lo stampo fornito di inserto in F-AOM.



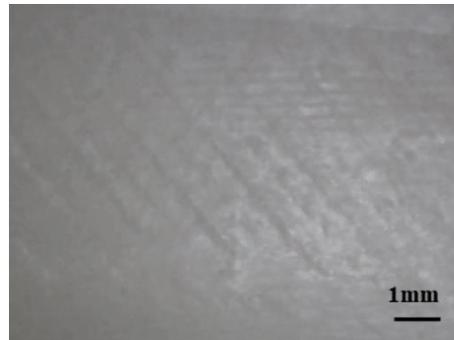
*Figura 69: Parti in LDPE stampate ad iniezione utilizzando lo stampo fornito di inserto in F-AOM.*

Per i cicli di produzione 6 e 7, il pezzo ha richiesto l'estrazione manuale al momento dell'apertura dello stampo, a causa della formazione di bave nella zona di alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserto nello stampo, come riportato in Figura 70.



*Figura 70: Formazione di bave nella zona dell'alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserto nello stampo ad iniezione che ha richiesto l'estrazione manuale dei pezzi 6 e 7.*

L'ispezione al microscopio ottico della superficie riprodotta dall'inserto ha evidenziato una leggerissima asportazione di porzioni di inserto concentrata nei picchi e nelle valli della finitura superficiale della superficie dello stampato, come riportato in Figura 71.



**Figura 71:** Micrografie ottenute al microscopio ottico che evidenziano un'asportazione molto contenuta di porzioni di inserto con i cicli di stampaggio ad iniezione.

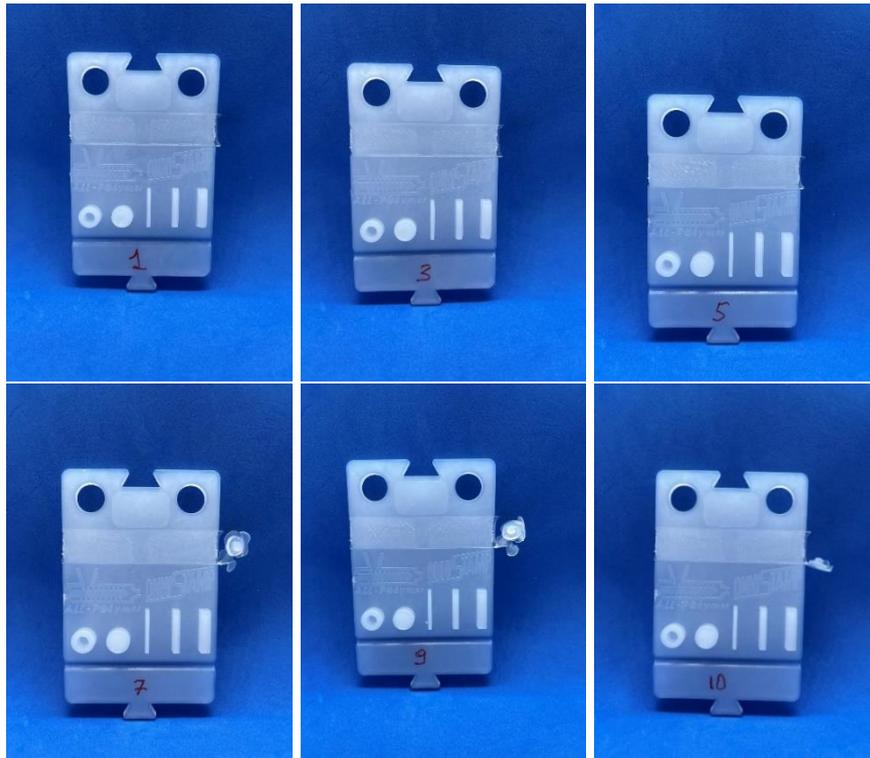
### 3.3.1.3 Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in R-CPA

Nella Tabella 29 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti equipaggiando lo stampo con l'inserto in R-CPA.

**Tabella 29:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE realizzati con stampo equipaggiato di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

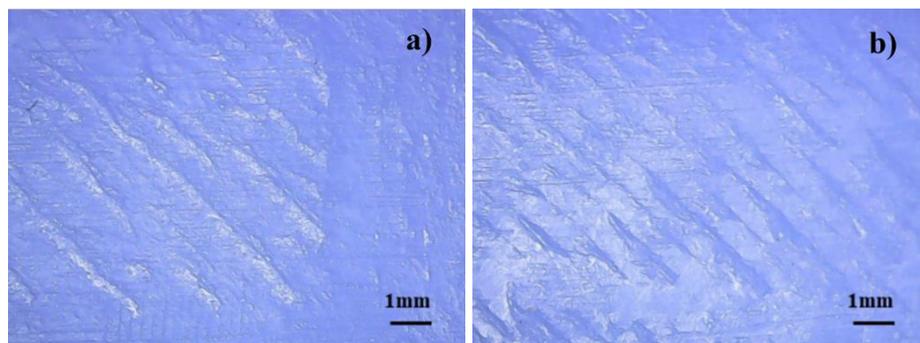
Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,52	5,00	627	1	67
2	15,52	4,99	622	50	65
3	15,54	4,99	625	100	109
4	15,85	4,99	626	200	202
5	16,43	5,00	629	400	403
6	17,25	5,00	630	600	621
7	17,12	5,00	629	600	621
8	17,17	5,00	629	600	620
9	17,18	5,00	630	600	620
10	17,39	4,99	636	600	630

Nella Figura 72 sono riportati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in LDPE, impiegando lo stampo equipaggiato di inserto in R-CPA.



**Figura 72:** Parti in LDPE stampate ad iniezione utilizzando lo stampo equipaggiato di inserto in R-CPA.

Ispezionando con il microscopio ottico la superficie degli stampati riprodotta dall'inserto, è stata identificata una leggera asportazione di porzioni di inserto, in corrispondenza delle asperità del profilo superficiale, come mostrato nella Figure 73 a) e 73 b).



**Figura 73:** Micrografie ottenute al microscopio ottico della superficie degli stampati ad iniezione riprodotta dall'inserto nella zona prossima all'alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserto nello stampo (a) e nella zona centrale della superficie stampata (b).

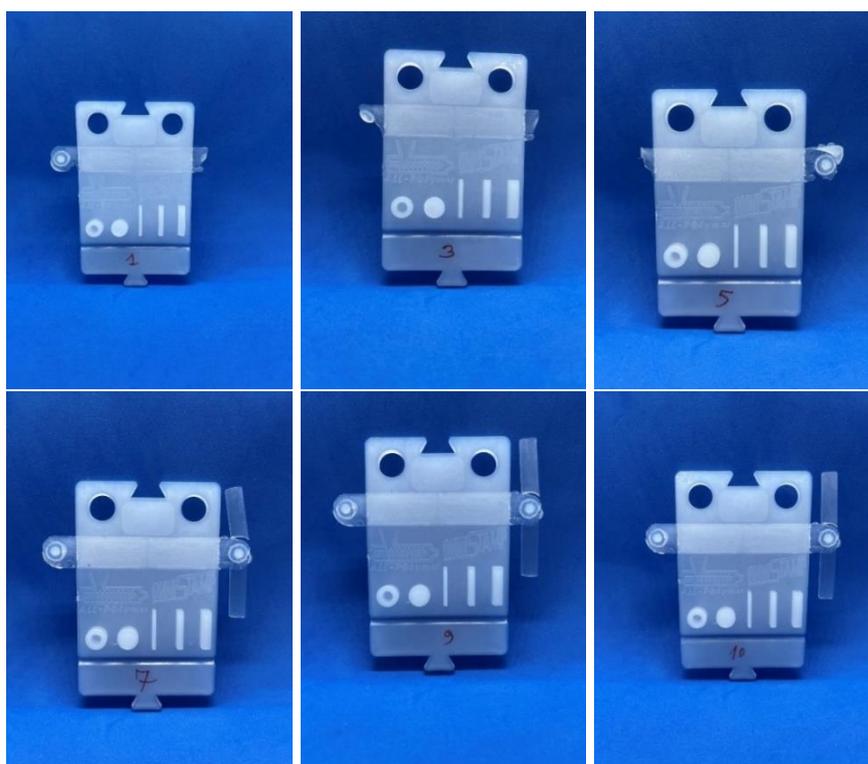
#### 3.3.1.4 Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in F-ANY

Nella Tabella 30 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti munendo lo stampo dell'inserto realizzato in F-ANY.

**Tabella 30:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE con stampo munito di inserto prodotto mediante FFF in F-ANY.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,56	5,01	627	1	65
2	15,56	5,00	616	50	63
3	15,58	5,00	615	100	107
4	16,06	5,00	618	200	202
5	17,05	5,00	614	400	407
6	17,98	5,00	626	600	624
7	17,90	4,99	636	600	635
8	17,94	4,99	637	600	636
9	17,89	5,00	634	600	634
10	17,93	4,99	637	600	636

Nella Figura 74 sono riportati gli stampati 1-3-5-7-9-10 prodotti in LDPE, usando lo stampo munito di inserto in F-ANY.

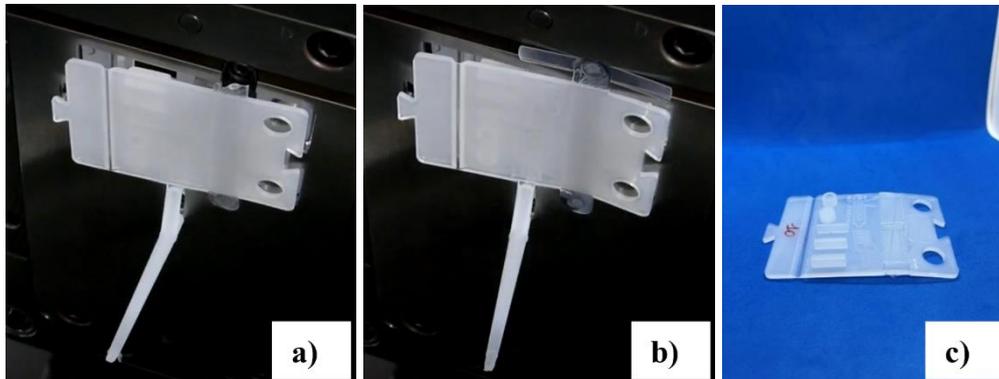


**Figura 74:** Parti in LDPE stampate ad iniezione utilizzando lo stampo munito di inserto in F-ANY.

Per tutti i cicli di stampaggio ad iniezione, ad eccezione dei cicli 2 e 3, è stata richiesta un'estrazione manuale della parte prodotta.

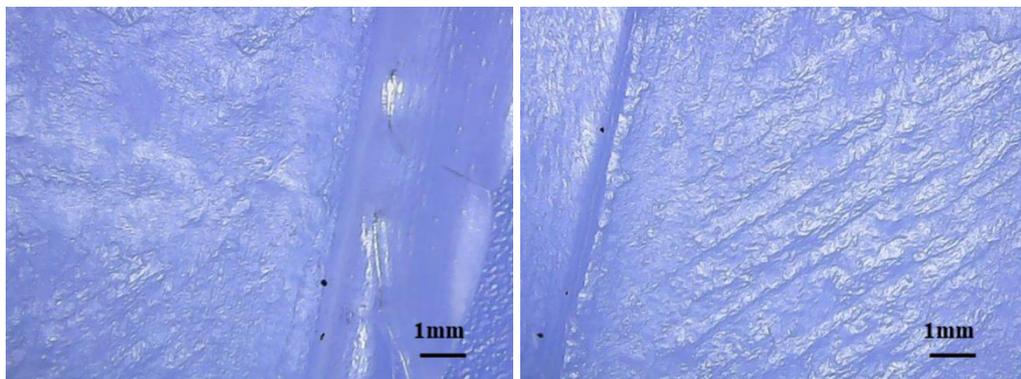
Infatti, il pezzo, all'apertura dello stampo, è risultato adeso alla superficie dell'inserto, in modo parziale (per i cicli di produzione 1, 4, 7, 9, 10) o in modo completo (per i cicli di produzione 5, 6, 8), come dimostrato, rispettivamente, nella Figure 75 a) e 75 b).

L'operazione di estrazione manuale ha prodotto l'imbarcamento delle parti stampate ad iniezione, come riportato nella Figura 75 c).



**Figura 75:** Adesione parziale (a) e completa (b) della parte stampata alla superficie dell'inserto prodotto in F-ANY, che ne ha richiesto l'estrazione manuale; c) imbarcamento della parte prodotta a causa dell'estrazione manuale realizzata.

L'ispezione al microscopio ottico della superficie degli stampati riprodotta dall'inserto ha rivelato la presenza di porzioni di inserto asportate nella zona laterale, in prossimità dell'alloggiamento delle viti, e, in modo diffuso, nella zona centrale della superficie della parte stampata, come riportato, rispettivamente, nelle Figura 76 a) e 76 b).



**Figura 76:** Asportazione di porzioni di inserto rilevate nella zona laterale (a) e centrale (b) della superficie delle parti prodotte.

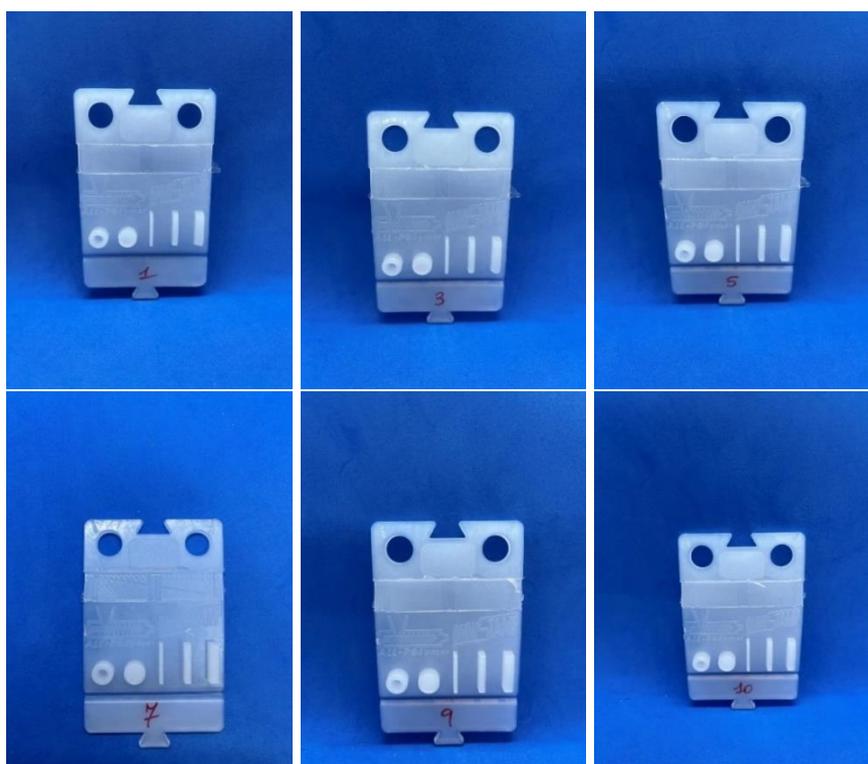
### 3.3.1.5 Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in F-G3D TT80X60

Nella Tabella 31 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in F-G3D TT80X60.

**Tabella 31:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE con stampo dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-G3D TT80X60.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,52	4,99	606	1	63
2	15,51	4,99	600	50	63
3	15,56	4,97	610	100	107
4	16,04	5,00	624	200	202
5	16,65	5,00	640	400	406
6	17,30	5,00	636	600	629
7	17,20	5,00	635	600	627
8	17,26	5,00	636	600	627
9	17,24	5,00	635	600	629
10	17,31	5,00	636	600	631

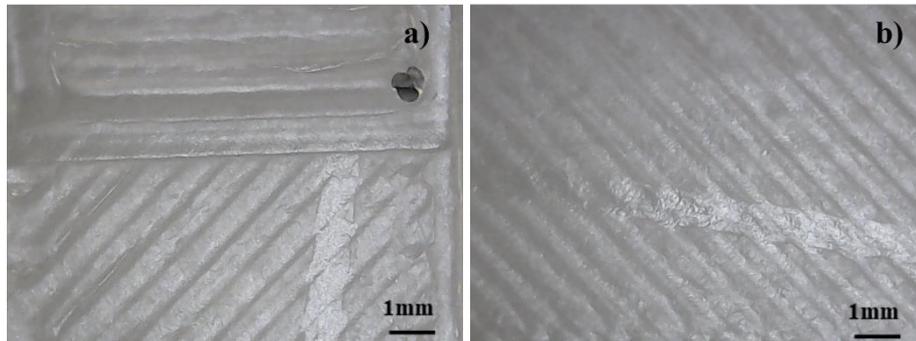
Nella Figura 77 sono riportati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in LDPE utilizzando lo stampo dotato di inserto in F-G3D TT80X60.



**Figura 77:** Parti in LDPE stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto in F-G3D TT80X60.

Mediante l'ispezione al microscopio ottico della superficie degli stampati riprodotta dall'inserto, è stato possibile verificare la presenza di porzioni di inserto asportate nella zona

laterale, in prossimità dell'alloggiamento delle viti, come riportato, nelle Figura 78 a) e, in modo diffuso, nella zona centrale della superficie stampata, in corrispondenza dei picchi e delle valli del profilo superficiale, come presentato in Figura 78 b).



**Figura 78:** Asportazione di porzioni di inserto rilevate nella zona laterale (a) e centrale (b) della superficie riprodotta degli stampati.

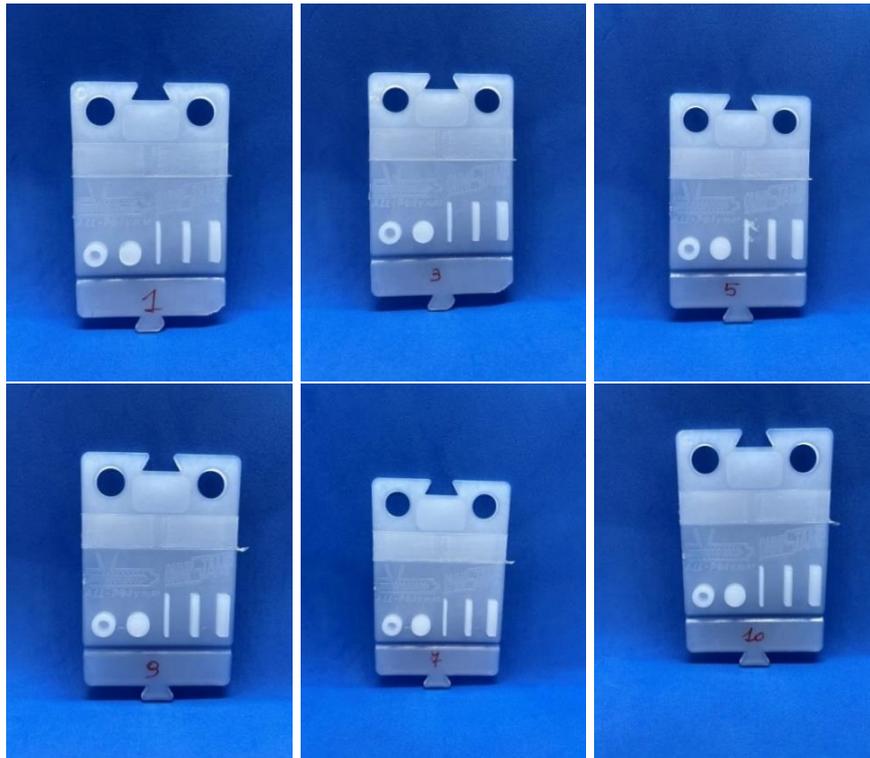
### 3.3.1.6 Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto prodotto in F-G3D TT50X30

Nella Tabella 32 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti corredando lo stampo dell'inserto in F-G3D TT50X30.

**Tabella 32:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE con stampo corredato di inserto prodotto mediante FFF in F-G3D TT50X30.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,52	4,99	615	1	64
2	15,56	5,00	643	50	65
3	15,57	5,00	649	100	100
4	15,87	5,00	659	200	202
5	16,74	5,00	652	400	403
6	17,50	5,00	653	600	622
7	17,10	5,00	663	600	621
8	17,03	5,00	671	600	620
9	17,02	5,00	667	600	620
10	16,98	5,00	674	600	617

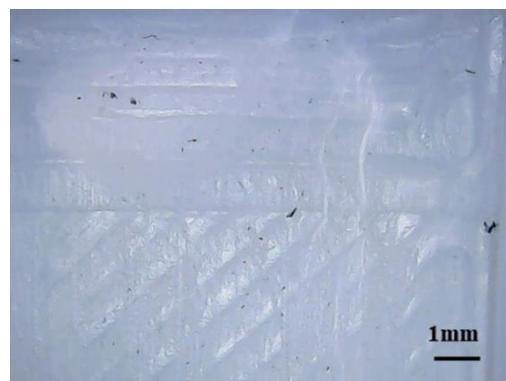
Nella Figura 79 sono riportati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in LDPE impiegando lo stampo corredato di inserto in F-G3D TT50X30.



**Figura 79:** Parti in LDPE stampate ad iniezione usando lo stampo corredato di inserto in F-G3D TT50X30.

Gli stampati 1 e 3 non hanno mostrato un completo riempimento della cavità nella parte inferiore della parte prodotta, come dimostrato nella Figura 79: l'incremento della pressione di mantenimento nei cicli successivi è stato sufficiente a garantire l'ottenimento di parti dalla geometria completa a partire dal 4 ciclo di produzione.

L'ispezione al microscopio ottico della superficie riprodotta dall'inserto ha dimostrato la presenza di porzioni di inserto asportate nella zona laterale della parte prodotta, in prossimità dello spigolo vivo, sito nelle vicinanze della zona di alloggiamento delle viti, e, in modo diffuso, sulle asperità del profilo superficiale, come riportato nella Figura 80.



**Figura 80:** Asportazione di porzioni di inserto rilevate nella zona laterale e centrale della superficie riprodotta.

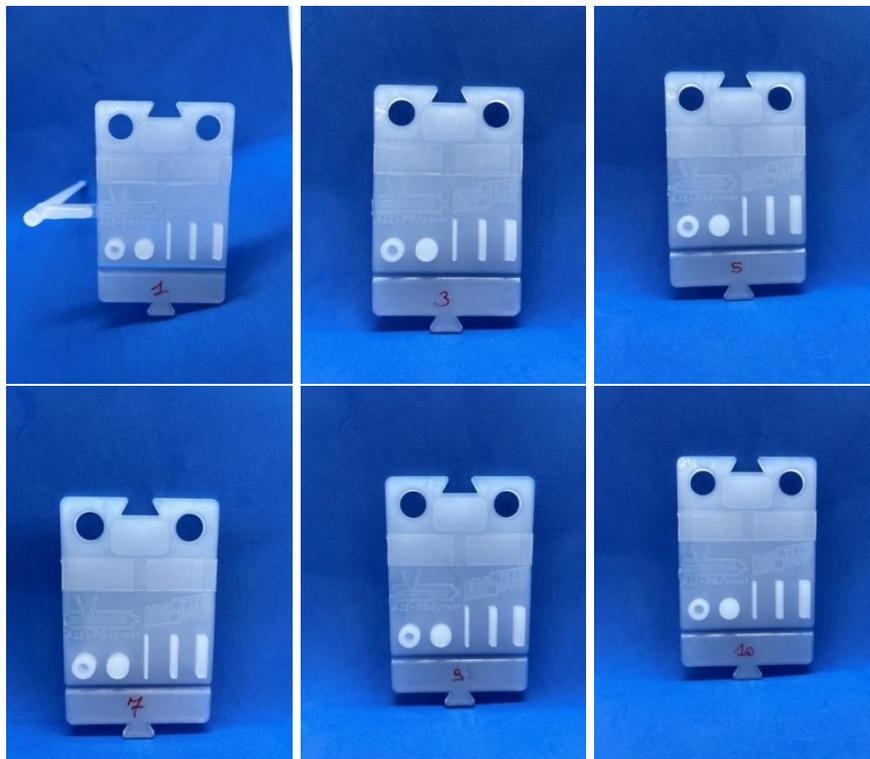
### 3.3.1.7 Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserto G-PLA

Nella Tabella 33 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in G-PLA.

**Tabella 33:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE con stampo dotato di inserto prodotto mediante FFF in G-PLA.

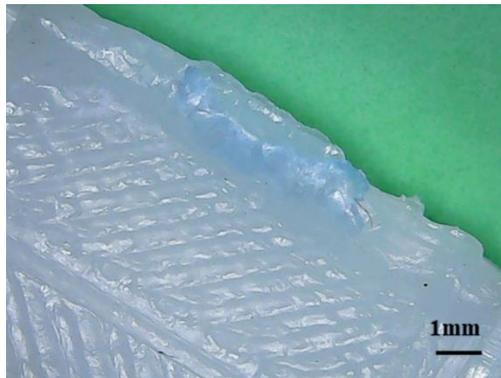
Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,51	4,99	619	1	69
2	15,53	5,00	631	50	71
3	15,55	5,00	633	100	112
4	15,65	5,00	624	200	202
5	16,47	5,00	627	400	402
6	17,22	5,00	625	600	611
7	17,00	5,00	628	600	621
8	17,02	4,99	628	600	619
9	16,99	4,99	628	600	619
10	16,96	5,00	629	600	619

Nella Figura 81 sono riportati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in LDPE usando lo stampo dotato di inserto in G-PLA.



**Figura 81:** Parti in LDPE stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto in G-PLA.

Attraverso l'ispezione al microscopio ottico della superficie degli stampati riprodotta dall'inserito, è stata constatata la presenza di porzioni di inserto asportate nella zona laterale dello stampato, in prossimità dell'alloggiamento delle viti, come riportato nella Figura 82.



**Figura 82:** *Asportazioni di porzioni di inserto rilevate nella zona laterale della superficie riprodotta.*

### 3.3.1.8 Stampaggio ad iniezione di LDPE con inserti “Pool” e “Zipper” in R-CPA

Gli inserti dalla geometria dello stampo modificata “Pool” e “Zipper”, le cui caratteristiche sono state dettagliate nel paragrafo 2.3.5, sono stati prodotti in R-CPA.

Per tali inserti sono state eseguite esclusivamente le prove di stampa e un'ispezione al microscopio ottico degli stampati.

Nella Tabella 34 e nella Tabella 35 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo, rispettivamente, dell'inserto “Pool” e dell'inserto “Zipper”.

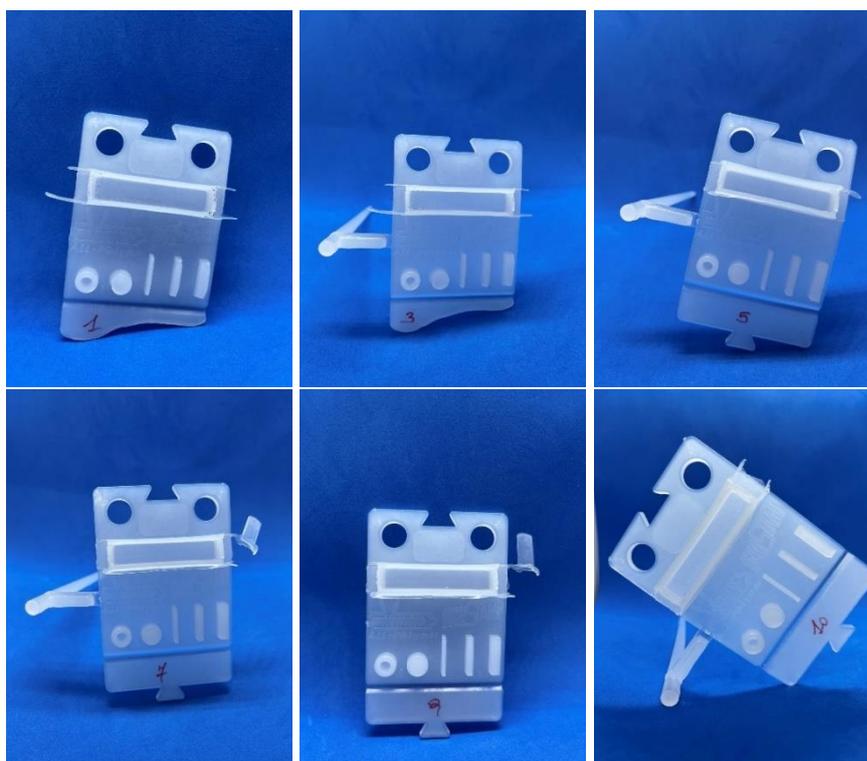
**Tabella 34:** *Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE con stampo dotato di inserto “Pool” prodotto mediante FFF in R-CPA.*

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,55	5,00	569	1	62
2	15,56	5,00	567	50	62
3	15,63	5,00	581	100	106
4	16,58	5,00	581	200	202
5	18,13	5,00	581	400	411
6	18,86	5,00	652	600	652
7	18,71	5,00	654	600	654
8	18,71	5,00	655	600	655
9	18,65	5,00	654	600	654
10	18,60	5,00	654	600	654

**Tabella 35:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE con stampo dotato di inserto “Zipper” prodotto mediante FFF in R-CPA.

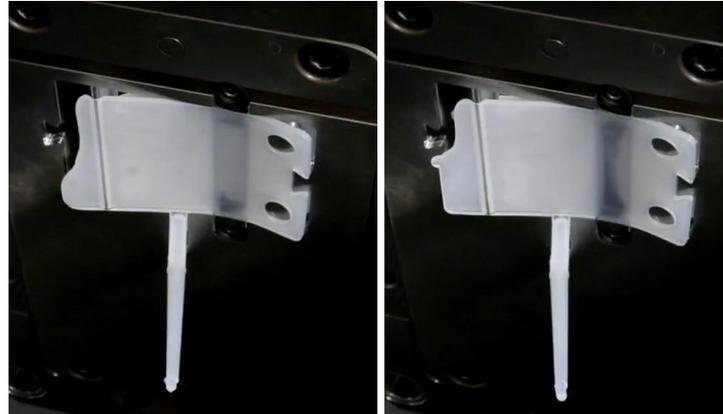
Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	15,51	4,99	619	1	69
2	15,53	5,00	631	50	71
3	15,55	5,00	633	100	112
4	15,65	5,00	624	200	202
5	16,47	5,00	627	400	402
6	17,22	5,00	625	600	611
7	17,00	5,00	628	600	621
8	17,02	5,00	628	600	619
9	16,99	4,99	628	600	619
10	16,96	4,99	629	600	619

Nella Figura 83 e nella Figura 87, sono riportati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in LDPE usando, rispettivamente, lo stampo in R-CPA “Pool” e “Zipper”.



**Figura 83:** Parti in LDPE stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto “Pool” in R-CPA.

Per tutti i cicli di stampaggio ad iniezione realizzati attraverso l'impiego dell'inserto "Pool", l'estrazione della parte prodotta è avvenuta manualmente, poiché il pezzo, al momento dell'apertura dello stampo, è rimasto saldamente adeso all'inserto, come riportato in Figura 84.



**Figura 84:** Adesione completa degli stampati 1 (a) e 4 (b) alla superficie dell'inserto "Pool" al momento dell'apertura dello stampo.

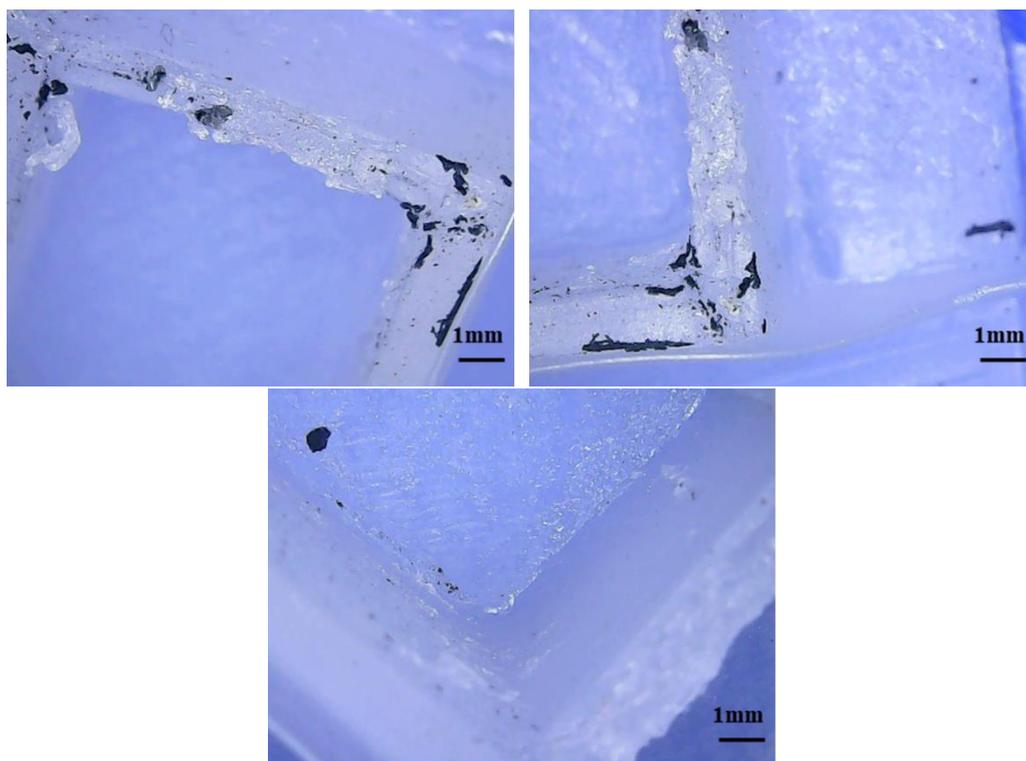
Gli stampati prodotti con i cicli 1, 2, 3, 4 sono risultati incompleti, come evidenziato in Figura 83, per gli stampati 1 e 3, e in Figura 85, per gli stampati 2 e 4.



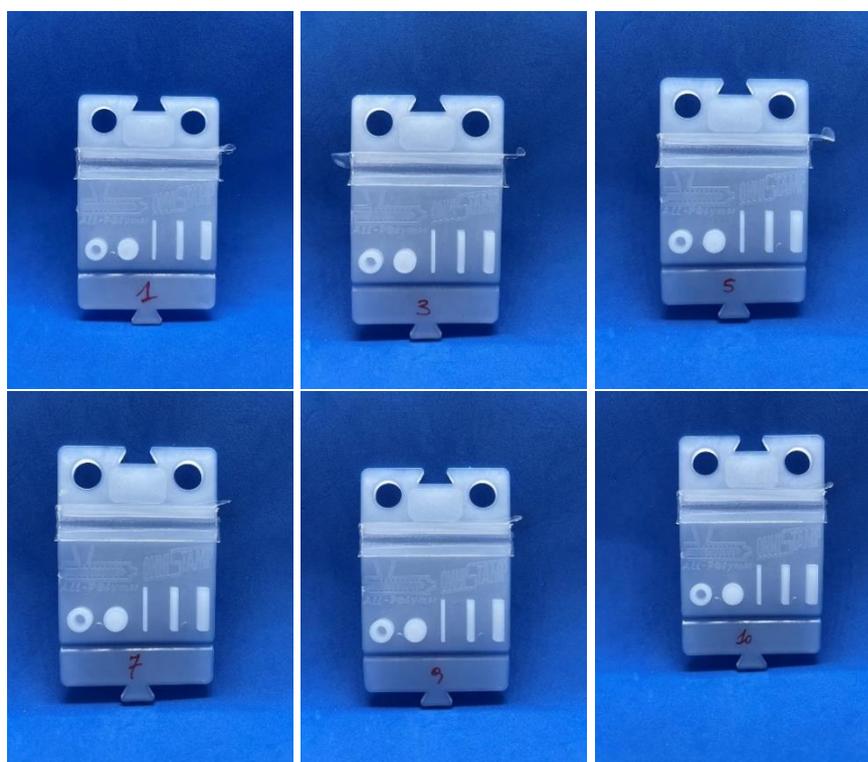
**Figura 85:** Parti incomplete in LDPE realizzate con i cicli di stampaggio 2 (a) e 4 (b) utilizzando lo stampo dotato di inserto "Pool" in R-CPA.

A partire dal 5 ciclo, l'incremento del tempo di raffreddamento a 20 s e l'applicazione di una pressione di mantenimento maggiorata rispetto a quella applicata nei cicli precedenti (402 bar) hanno garantito l'ottenimento di parti dalla geometria completa.

L'ispezione al microscopio ottico della superficie degli stampati ha rivelato la presenza di estese porzioni di inserto asportate in corrispondenza della zona perimetrale ed asportazioni isolate nella porzione centrale, come riportato, rispettivamente in Figura 86 (a, b) e (c).

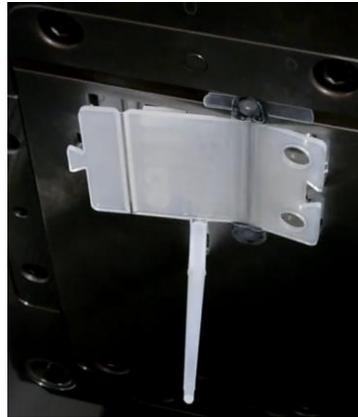


**Figura 86:** Asportazione di porzioni di inserto nella zona perimetrale (a, b) e centrale (c) delle superfici degli stampati prodotti mediante inserto “Pool” in R-CPA.



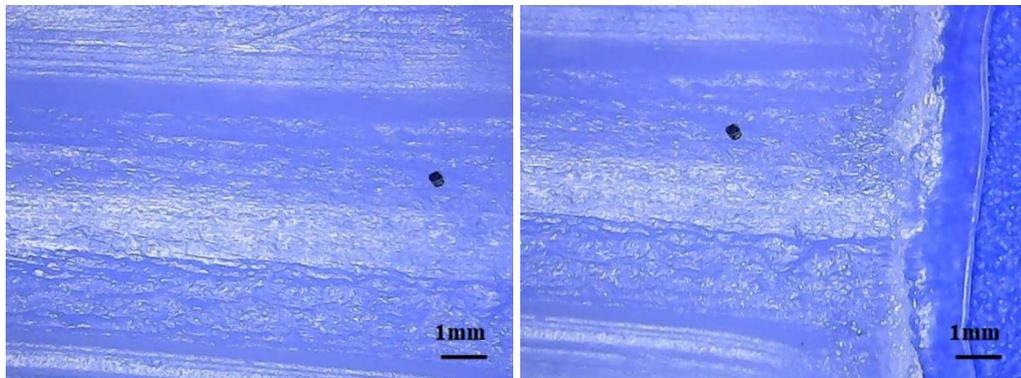
**Figura 87:** Parti in LDPE stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto “Zipper” in R-CPA.

Per i cicli di stampaggio ad iniezione eseguiti impiegando l'inserto "Zipper" in R-CPA, l'esecuzione del solo ciclo 6 ha richiesto l'estrazione manuale della parte prodotta: all'apertura dello stampo, il pezzo stampato è risultato completamente adeso alla superficie dell'inserto, come riportato nella Figura 88.



**Figura 88:** Adesione completa dello stampato 6 alla superficie dell'inserto "Zipper" al momento dell'apertura dello stampo.

L'ispezione al microscopio ottico della superficie degli stampati ha identificato la presenza di asportazioni di porzioni di inserto nelle zone centrale e laterale della superficie riprodotta, come presentato, rispettivamente nella Figura 89 (a) e (b).



**Figura 89:** Asportazione di porzioni di inserto "Zipper" in R-CPA identificate nella zona centrale (a) e laterale (b) della superficie degli stampati.

### 3.3.2 Effetto della Pressione di Mantenimento sul peso degli stampati ad iniezione

Nelle Tabelle 36 - 44, sono riportate le misure del peso degli stampati per 10 cicli di processo, realizzati, rispettivamente, con lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083, F-AOM, R-CPA, F-ANY, F-G3D TT80x60, F-G3D TT50X30, G-PLA, "Pool" e "Zipper" in R-CPA.

**Tabella 36:** Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto in Acciaio I.2083.

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (64)	9,8628 ± 0,0001
2	50 (64)	9,9140 ± 0,0001
3	100 (107)	10,0933 ± 0,0001
4	200 (202)	10,4329 ± 0,0001
5	400 (407)	10,6323 ± 0,0001
6	600 (625)	10,8003 ± 0,0001
7	600 (625)	10,8058 ± 0,0001
8	600 (633)	10,8091 ± 0,0001
9	600 (627)	10,8032 ± 0,0001
10	600 (627)	10,8075 ± 0,0001

**Tabella 37:** Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-AOM.

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (65)	9,9921 ± 0,0001
2	50 (64)	9,9726 ± 0,0001
3	100 (107)	10,1437 ± 0,0001
4	200 (202)	10,4541 ± 0,0001
5	400 (404)	10,6821 ± 0,0001
6	600 (624)	10,8908 ± 0,0001
7	600 (625)	10,8911 ± 0,0001
8	600 (626)	10,8933 ± 0,0001
9	600 (625)	10,8931 ± 0,0001
10	600 (626)	10,8941 ± 0,0001

**Tabella 38:** Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (67)	9,9903 ± 0,0001
2	50 (65)	9,9898 ± 0,0001
3	100 (109)	10,1302 ± 0,0001
4	200 (202)	10,3821 ± 0,0001

5	400 (403)	10,6101 ± 0,0001
6	600 (621)	10,8976 ± 0,0001
7	600 (621)	10,8985 ± 0,0001
8	600 (620)	10,8940 ± 0,0001
9	600 (620)	10,8953 ± 0,0001
10	600 (630)	10,9077 ± 0,0001

*Tabella 39: Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-ANY.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (65)	10,0929 ± 0,0001
2	50 (63)	10,0651 ± 0,0001
3	100 (107)	10,2185 ± 0,0001
4	200 (202)	10,5012 ± 0,0001
5	400 (407)	10,7741 ± 0,0001
6	600 (624)	11,0655 ± 0,0001
7	600 (635)	11,0858 ± 0,0001
8	600 (636)	11,0865 ± 0,0001
9	600 (634)	11,0872 ± 0,0001
10	600 (636)	11,0846 ± 0,0001

*Tabella 40: Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-G3D TT80X60.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (63)	9,8464 ± 0,0001
2	50 (63)	9,8519 ± 0,0001
3	100 (107)	9,8926 ± 0,0001
4	200 (202)	10,3032 ± 0,0001
5	400 (406)	10,5432 ± 0,0001
6	600 (629)	10,7305 ± 0,0001
7	600 (627)	10,7296 ± 0,0001
8	600 (637)	10,7300 ± 0,0001
9	600 (629)	10,7303 ± 0,0001
10	600 (631)	10,7313 ± 0,0001

**Tabella 41:** Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-G3D TT50X30.

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (64)	9,9894 ± 0,0001
2	50 (65)	10,0160 ± 0,0001
3	100 (100)	10,2181 ± 0,0001
4	200 (202)	10,5386 ± 0,0001
5	400 (403)	10,7710 ± 0,0001
6	600 (622)	10,9636 ± 0,0001
7	600 (621)	10,9642 ± 0,0001
8	600 (620)	10,9660 ± 0,0001
9	600 (620)	10,9638 ± 0,0001
10	600 (617)	10,9666 ± 0,0001

**Tabella 42:** Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in G-PLA.

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (64)	9,9522 ± 0,0001
2	50 (64)	10,0688 ± 0,0001
3	100 (107)	10,1277 ± 0,0001
4	200 (202)	10,3950 ± 0,0001
5	400 (407)	10,6307 ± 0,0001
6	600 (625)	10,8507 ± 0,0001
7	600 (625)	10,8562 ± 0,0001
8	600 (633)	10,8597 ± 0,0001
9	600 (627)	10,8568 ± 0,0001
10	600 (627)	10,8599 ± 0,0001

**Tabella 43:** Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto "Pool" prodotto mediante FFF in R-CPA.

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (62)	10,1116 ± 0,0001
2	50 (62)	10,1223 ± 0,0001
3	100 (106)	10,2615 ± 0,0001
4	200 (202)	10,5462 ± 0,0001

5	400 (411)	11,6230 ± 0,0001
6	600 (652)	11,9028 ± 0,0001
7	600 (654)	11,9030 ± 0,0001
8	600 (655)	11,9049 ± 0,0001
9	600 (654)	11,9053 ± 0,0001
10	600 (654)	11,9020 ± 0,0001

**Tabella 42:** *Peso degli stampati in LDPE prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto “Zipper” prodotto mediante FFF in R-CPA.*

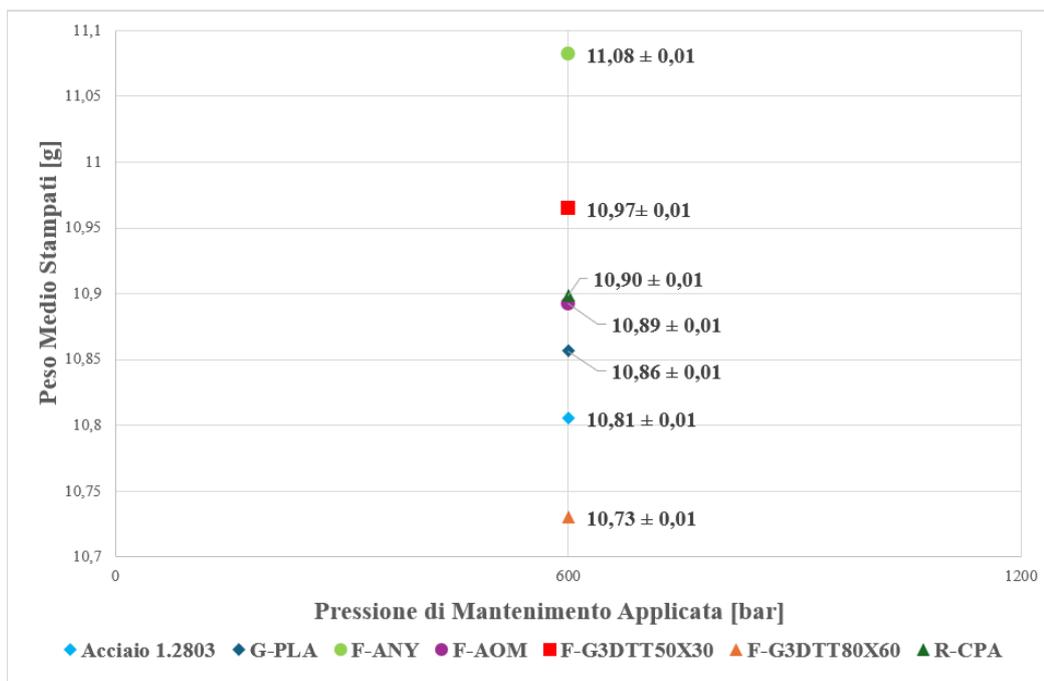
<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	1 (69)	9,8727 ± 0,0001
2	50 (71)	9,9324 ± 0,0001
3	100 (112)	10,0206 ± 0,0001
4	200 (202)	10,2378 ± 0,0001
5	400 (402)	10,4674 ± 0,0001
6	600 (611)	10,6501 ± 0,0001
7	600 (621)	10,6638 ± 0,0001
8	600 (619)	10,6581 ± 0,0001
9	600 (619)	10,6583 ± 0,0001
10	600 (619)	10,6580 ± 0,0001

Analizzando i risultati riportati nelle Tabelle 36 – 44, è possibile notare come l’incremento della pressione di mantenimento comporti il progressivo aumento del peso delle parti prodotte.

Infatti, applicando una pressione di mantenimento gradualmente maggiore (cicli di stampaggio 1 - 6) è possibile inserire nello stampo un quantitativo maggiore di materiale polimerico, che ne compensa il ritiro dovuto al raffreddamento nella cavità dello stampo.

Mantenendo la pressione costante, invece, (cicli 6 - 10) il quantitativo di materiale inserito nello stampo è circa lo stesso e, dunque, il peso degli stampati si mantiene grossomodo costante. [98]

Nel grafico riportato nella Figura 90 sono stati riportati i pesi medi valutati per gli stampati in LDPE, prodotti a parità di pressione di mantenimento applicata (600 bar), riprodotti con gli inserti utilizzati per le prove di stampaggio.



**Figura 90:** *Peso medio degli stampati riprodotti a parità di pressione di mantenimento applicata (600 bar).*

Analizzando i valori riportati nel grafico presentato in Figura 108, l'inserto in F-AOM ha permesso di riprodurre stampati dal peso medio più vicino a quello ottenuto per stampati realizzati con inserto in Acciaio 1.2083.

Solo l'inserto prodotto in F-G3D TT80X60 ha prodotto stampati dal peso medio inferiore a quello registrato per parti prodotte con inserto in Acciaio 1.2083.

### 3.3.3 *Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali*

Nel grafico presentato in Figura 91 sono riportate le misure di rugosità della superficie degli stampati 1-3-5-7-9-10, realizzate utilizzando il rugosimetro dettagliato nel paragrafo 2.4.6.

Per le misura sono stati impiegati un range di misura di 80 µm, una corsa di scansione di 4,80 mm e una lunghezza di cut off di 0.800 mm.



Figura 91: Misure di rugosità della superficie degli stampati in LDPE.

Analizzando i dati riportati nel grafico presentato in Figura 91 è possibile constatare che:

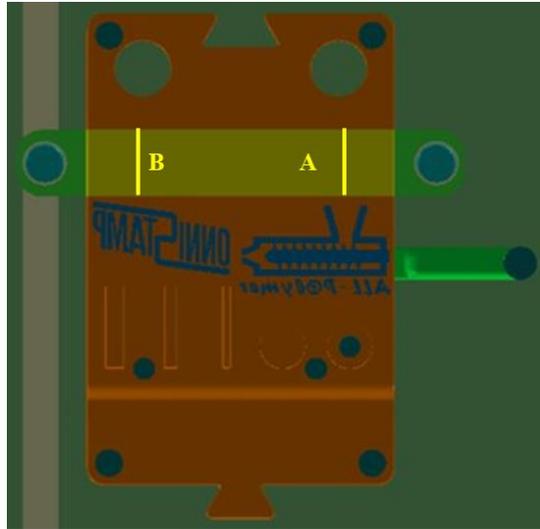
- Nessuno degli inserti realizzati mediante FFF permette di replicare la rugosità superficiale dei pezzi stampati con l'inserto in Acciaio 1.2083.

I valori di rugosità superficiale misurati sugli stampati prodotti con inserti realizzati mediante FFF sono sistematicamente maggiori dei valori registrati per le parti prodotte mediante l'inserto in Acciaio 1.2083: tra i limiti delle tecniche di *Rapid Tooling* a base FFF applicate al processo di *Injection Molding*, si annoverano l'accuratezza e la finitura superficiale, caratteristiche che si riflettono nella qualità superficiale ottenibile degli stampati ad iniezione; [99]

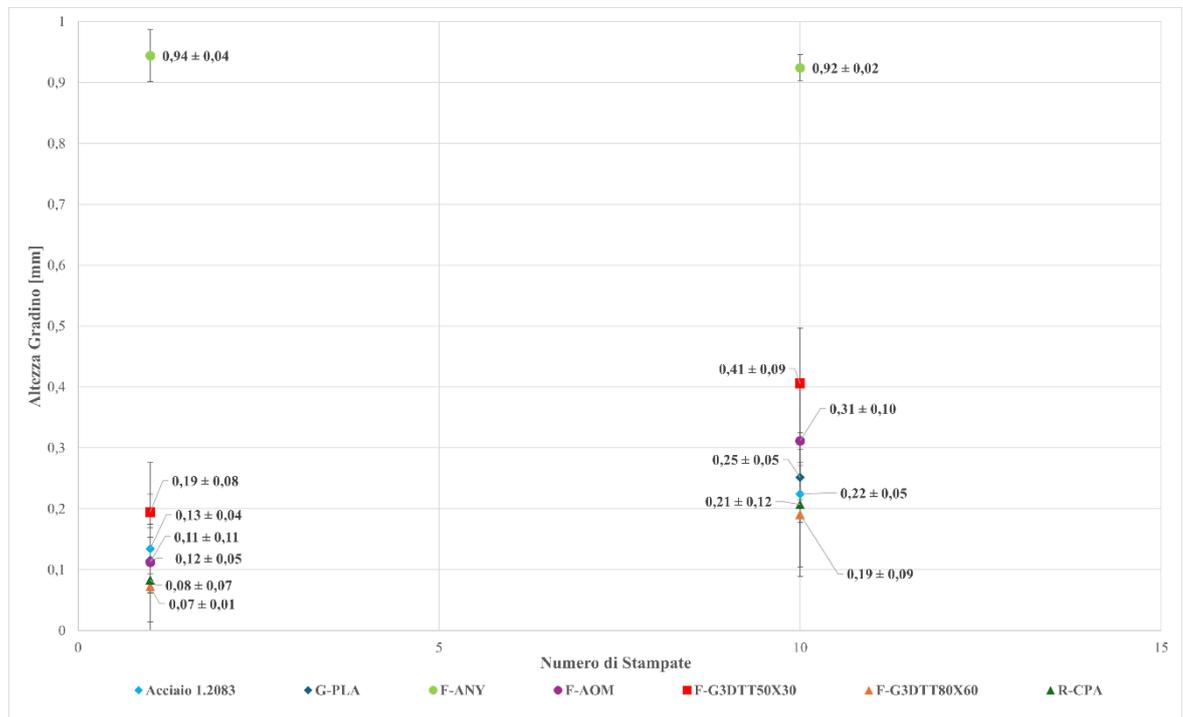
- Le superfici riprodotte mediante inserto in F-G3D TT50X30 hanno ottenuto i valori di Ra più prossimi a quelli valutati per gli stampati realizzati con l'inserto in Acciaio 1.2083 considerando, globalmente, tutti i cicli di stampaggio oggetto di studio.
- Per quanto concerne gli stampati prodotti mediante gli inserti in G-PLA e F-G3D TT50X30, si osserva una tendenza decrescente dei valori di rugosità superficiale misurati sia per i cicli di stampaggio realizzati con una pressione di mantenimento crescente (1-6), che nei successivi cicli di produzione, a parità di condizioni operative (6-10);
- Per quanto riguarda gli stampati prodotti mediante l'inserto in F-AOM, incrementando la pressione di mantenimento applicata si osserva una crescita dei valori di Ra, fino al raggiungimento del ciclo 7, probabilmente dovuta a fenomeni di usura dello stampo. Invece, a partire dal ciclo 7, applicando la massima pressione di mantenimento, i valori di Ra tendono ad abbassarsi con le successive stampate, probabilmente a causa di un appianamento dei picchi del profilo superficiale dell'inserto, operato a causa dell'asportazione di porzioni di inserto realizzate nei successivi cicli di stampaggio;
- Per quanto concerne gli stampati prodotti sia mediante l'inserto in F-ANY che in R-CPA, incrementando la pressione di mantenimento si osserva un decremento dei valori di Ra, probabilmente dovuto allo smussamento delle asperità dei profili di rugosità superficiale degli inserti dei primi cicli di stampaggio ad iniezione; una volta applicata la massima pressione di mantenimento, a partire dal ciclo 7, i valori di Ra tendono ad aumentare con le successive stampate, probabilmente per effetto di fenomeni di usura dello stampo, o dell'eventuale accumulo di stress residui nell'inserto e, per i soli stampati prodotti mediante inserto in F-ANY, anche a causa della deformazione della superficie dello stampato prodotta dall'estrazione manuale richiesta al momento dell'apertura dello stampo;
- Infine, per quanto riguarda gli stampati prodotti mediante inserto in F-G3D TT80X60 è possibile notare una tendenza dei valori di Ra decrescente fino al raggiungimento del 7 ciclo di stampaggio, al quale si raggiunge, per il secondo ciclo consecutivo la massima pressione di mantenimento applicata; per i cicli di stampaggio successivi, i valori di Ra tornano progressivamente a crescere.

Nelle Figure 93 e 94 sono graficati i valori del profilo superficiale, ottenuti mediante l'utilizzo del profilometro dettagliato nel paragrafo 2.4.5, rispettivamente, per le corse di misura "A" e "B", rappresentate nella Figura 92.

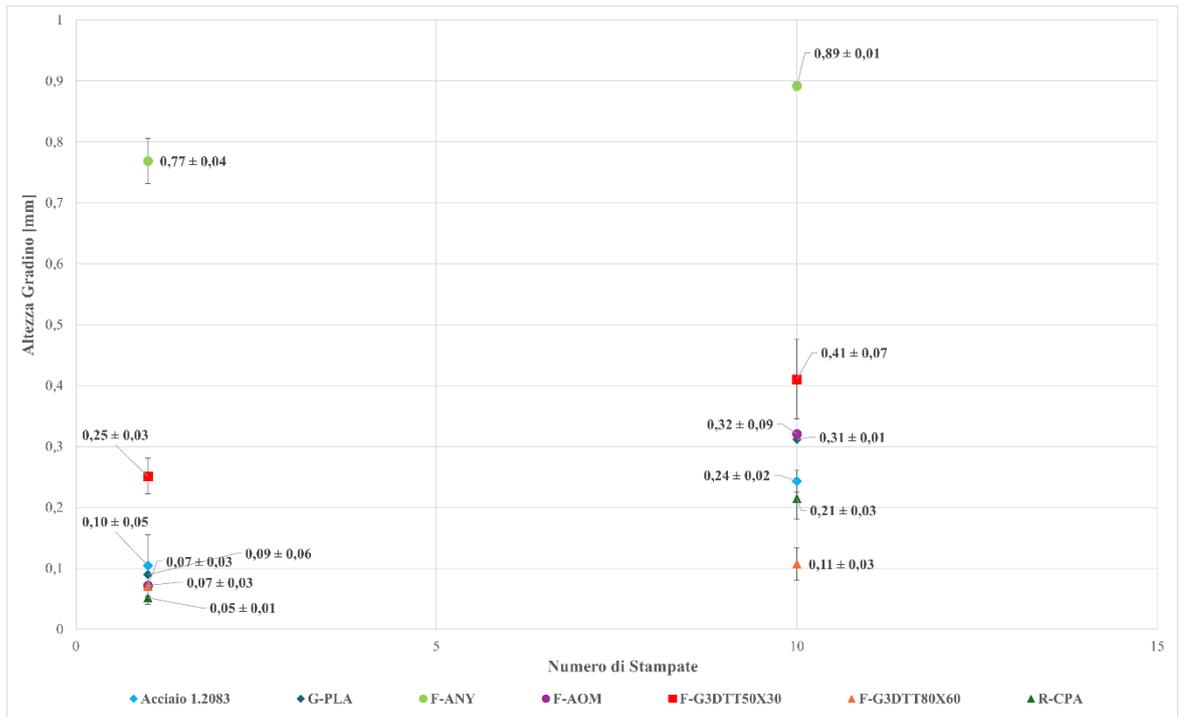
Per la realizzazione delle misure sono state registrate due corse della lunghezza di 20 mm, impiegando una velocità di scansione di 0,5 mm/s.



**Figura 92:** Rappresentazione delle corse registrate per la valutazione dell'altezza della porzione stampata con gli inserti.



**Figura 93:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa "A" per il primo e il decimo stampato.



**Figura 94:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa “B” per il primo e il decimo stampato.

Analizzando i dati riportati nelle Figura 93 e 94, è possibile constatare che:

- Sono riportati valori differenti per la corsa “A” e “B” relativamente alle misure condotte sul primo stampato e sul decimo: tale differenza è dovuta al fatto che la corsa “A” si trova in prossimità del posizionamento del gate di iniezione. Per questo motivo, tale regione di stampo sperimenta una pressione maggiore, sia durante la fase di iniezione che durante la fase di applicazione della pressione di mantenimento, per un tempo più esteso;

- Per tutti gli inserti impiegati per lo stampaggio di LDPE, per entrambe le corse valutate, a parità di inserto impiegato per il processo di stampaggio ad iniezione, l’altezza del primo stampato risulta inferiore dell’altezza misurata per il decimo.

L’applicazione di una pressione di mantenimento più elevata permette di inserire nella cavità dello stampo di un quantitativo di materiale più alto e di realizzare una geometria dello stampato dall’altezza maggiore.

- Al termine dei 10 cicli di stampaggio, sia per la corsa “A” che per la corsa “B”, l’inserto prodotto in R-CPA ha ottenuto i valori di altezza più vicini a quelli registrati per gli stampati prodotti mediante l’inserto in Acciaio 1.2083.

### 3.3.2 Produzione degli stampati ad iniezione in PBS: parametri di processo

Per le prove di stampaggio ad iniezione del PBS sono stati impiegati gli stessi inserti utilizzati per le prove di stampaggio ad iniezione di LDPE (Acciaio 1.2083, F-AOM, F-

ANY, G-PLA, F-G3D TT50X30, R-CPA, R-CPA “Zipper”) e l’inserto in lega d’alluminio Ergal 7075 (“AL”).

L’inserto prodotto in F-G3D TT80X60 non è stato impiegato per prove di stampaggio ulteriori, oltre a quelle realizzate con LDPE, sia perchè l’inserto F-G3D TT50X30 non ha dato particolari problemi nella fase di realizzazione dei trattamenti termici che perchè tale inserto ha permesso lo stampaggio di parti dalla buona finitura superficiale, senza richiedere l’estrazione manuale dei pezzi.

Invece, per quanto riguarda l’inserto “Pool”, prodotto in R-CPA, al momento dell’estrazione dell’inserto, dopo i cicli di stampaggio, è risultato fratturato in corrispondenza della sezione perimetrale, in prossimità dell’alloggiamento delle viti, come mostrato nella Figura 95.



**Figura 95:** Inserto “Pool”, prodotto in R-CPA, fratturatosi al momento dell’estrazione dallo stampo dopo le prove di iniezione di LDPE.

Per l’iniezione del PBS sono stati utilizzati i parametri operativi riportati nella Tabella 43.

**Tabella 43:** Parametri di processo impiegati per l’iniezione del PBS.

<b>Parametri</b>	<b>Valori</b>
Pressione di Iniezione	600 bar
Pressione di mantenimento	600 bar
Temperatura del fuso (PBS)	120°C
Temperatura dello stampo	30°C
Tempo di mantenimento	5 s
Tempo di raffreddamento	20 s
Tempo ciclo	87 s
Tempo di riempimento	0,91s

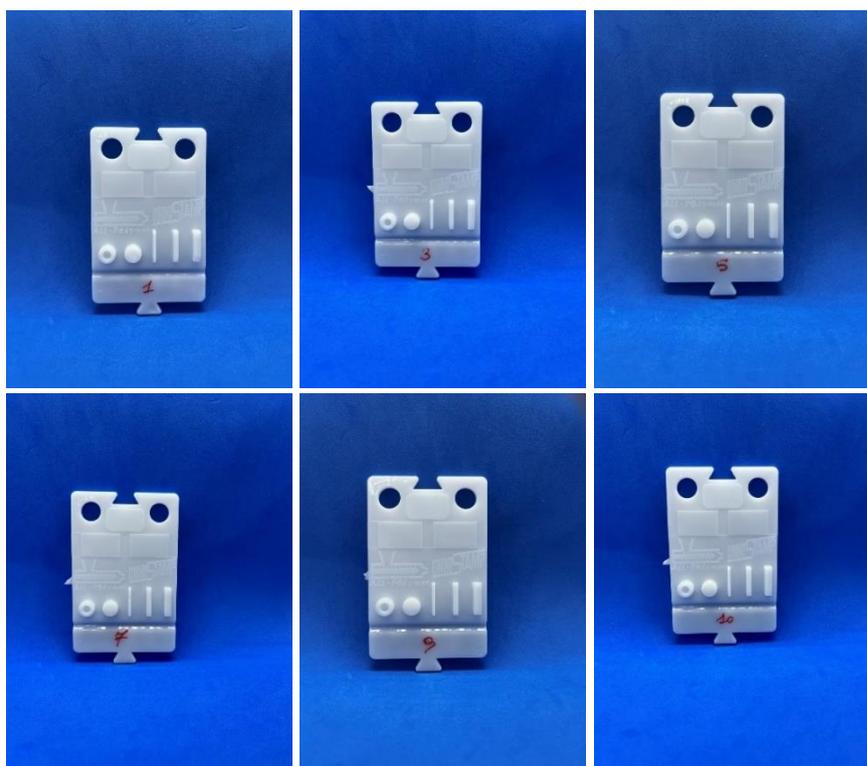
### 3.3.2.1 Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in Acciaio 1.2083

Nella Tabella 44 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell’inserto in Acciaio 1.2083.

**Tabella 44:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS realizzati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,18	4,01	607	600	606
2	16,63	4,02	609	600	606
3	16,49	4,01	608	600	604
4	16,60	4,00	610	600	606
5	16,60	4,00	607	600	606
6	16,73	4,01	612	600	608
7	16,79	4,00	612	600	609
8	16,89	4,00	617	600	611
9	16,89	4,00	617	600	611
10	16,87	4,01	615	600	612

Nella Figura 96 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 96:** Parti in PBS stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

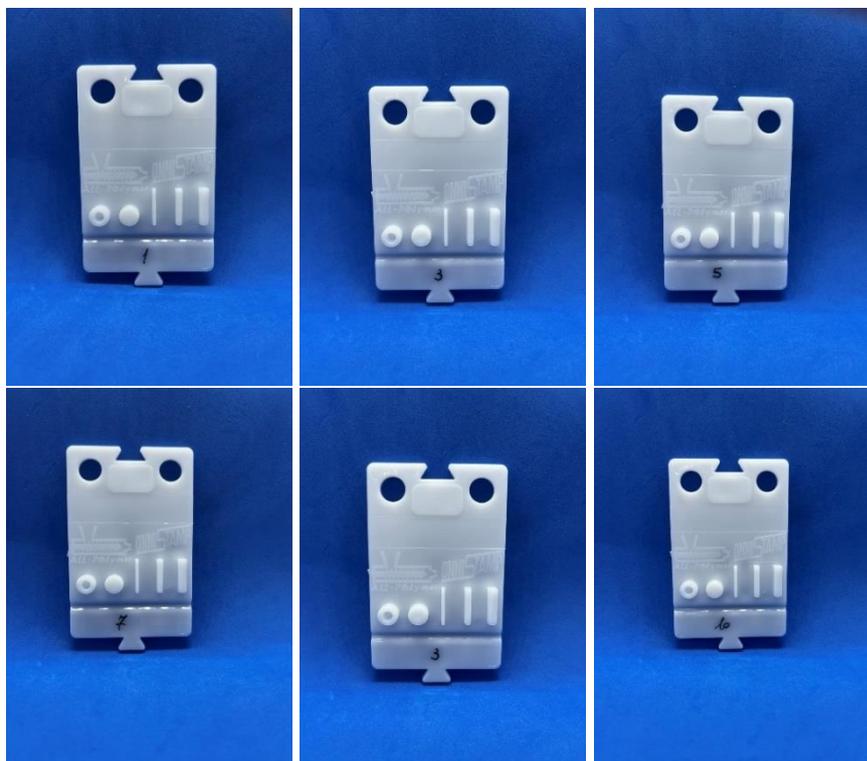
### 3.3.2.2 Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in Ergal 7075

Nella Tabella 45 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in lega di alluminio Ergal 7075.

*Tabella 45: Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS realizzati con stampo dotato di inserto in Ergal 7075.*

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	17,20	4,01	624	600	622
2	17,12	4,01	625	600	625
3	17,05	4,01	625	600	624
4	16,95	4,01	625	600	623
5	16,88	4,02	625	600	620
6	16,73	4,01	626	600	618
7	16,73	4,02	626	600	620
8	16,77	4,02	625	600	621
9	16,84	4,02	625	600	619
10	16,96	4,01	625	600	622

Nella Figura 97 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS utilizzando lo stampo dotato di inserto in Ergal 7075.



*Figura 97: Parti in PBS stampate utilizzando lo stampo dotato di inserto in Ergal 7075.*

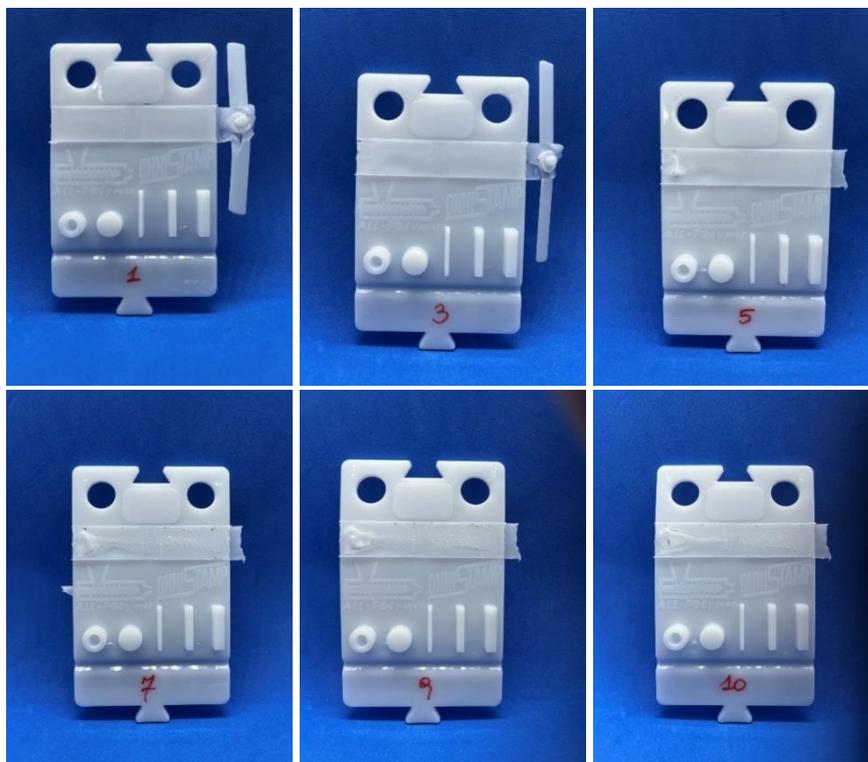
### 3.3.2.3 Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in F-AOM

Nella Tabella 46 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in F-AOM.

**Tabella 46:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS realizzati con stampo dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-AOM.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,81	4,01	630	600	620
2	16,22	4,01	610	600	608
3	16,69	4,00	626	600	612
4	16,63	4,01	623	600	615
5	16,65	4,00	624	600	616
6	16,59	4,01	621	600	614
7	16,58	4,00	620	600	614
8	16,47	4,01	616	600	608
9	16,57	4,01	620	600	610
10	16,69	4,01	626	600	617

Nella Figura 98 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS utilizzando lo stampo dotato di inserto in F-AOM.



**Figura 98:** Parti in PBS stampate utilizzando lo stampo dotato di inserto in F-AOM.

Per i cicli di produzione 1, 2, 3 e 10 è stato necessario rimuovere manualmente il pezzo stampato all'apertura dello stampo, a causa della formazione di bave nella zona di alloggiamento delle viti, come mostrato nella Figura 99.

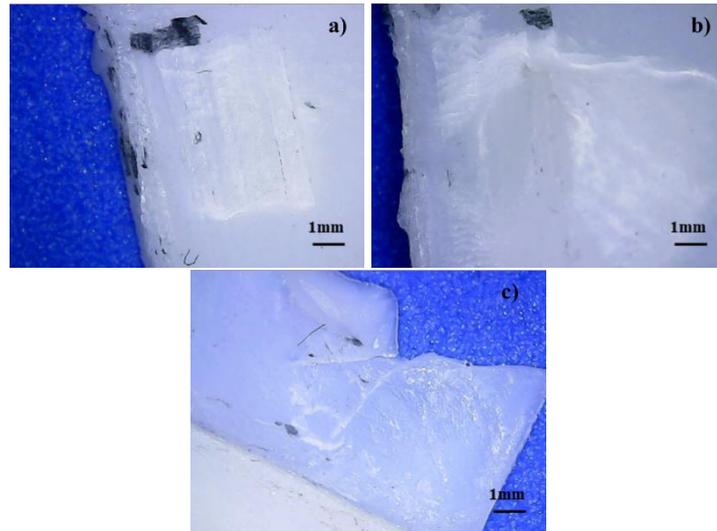
Inoltre, a partire dal terzo pezzo prodotto, è stata identificata la formazione di una zona deformata sulla superficie dello stampato, realizzatasi, probabilmente, sia in seguito all'estrazione manuale delle parti che al deterioramento della qualità superficiale dell'inserito con le successive stampe.



*Figura 99: Formazione di bave nella zona superiore dello stampo, in corrispondenza dell'alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserito nello stampo, che ha richiesto l'estrazione manuale dei pezzi 1, 2, 3 e 10.*

L'ispezione al microscopio ottico ha rivelato estese frazioni di superficie dello stampato in cui si è verificata l'asportazione di porzioni di inserto.

In particolare, le zone interessate da tale fenomeno riguardano l'area laterale della superficie stampata, riportata in Figura 100 a), la zona superficiale deformatasi con le successive stampe, presentata in Figura 100 b), e la regione in cui si sono formate le bave, in prossimità dell'alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserito nello stampo, proposta in Figura 100 c).



**Figura 100:** Asportazione di porzioni di inserto rilevate nella zona laterale (a) e centrale (b) della superficie stampata e nella regione di formazione delle bave (c).

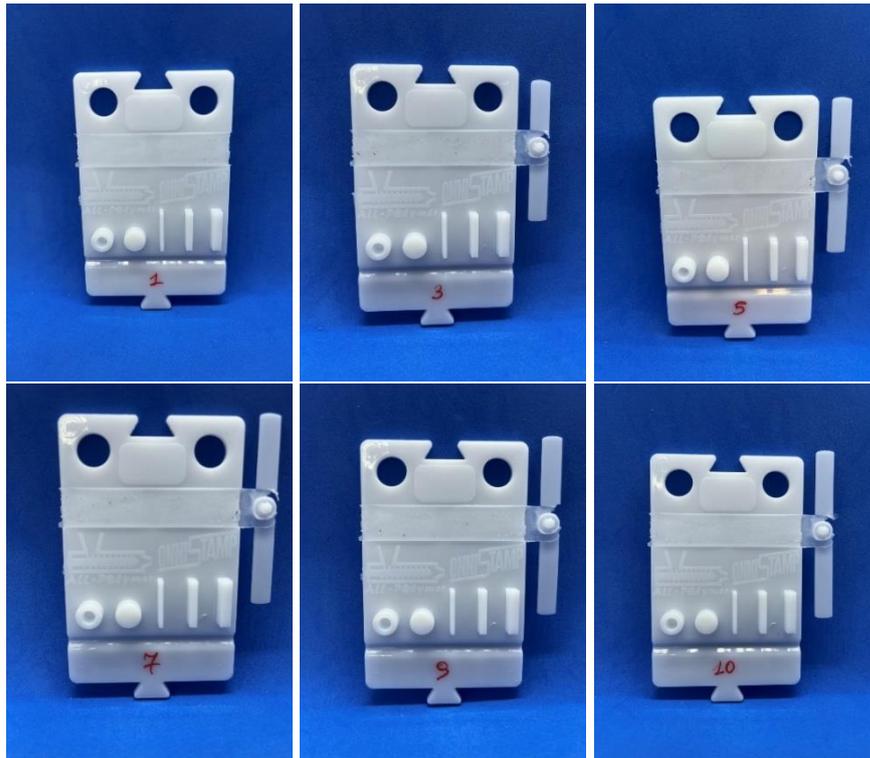
### 3.3.2.4 Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in R-CPA

Nella Tabella 47 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in R-CPA.

**Tabella 47:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS realizzati con stampo dotato di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

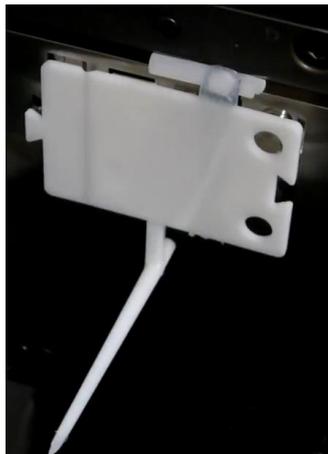
Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,85	4,01	614	600	610
2	16,24	4,02	610	600	607
3	16,37	4,01	610	600	609
4	16,58	4,01	621	600	615
5	16,40	4,01	614	600	607
6	16,56	4,01	620	600	612
7	16,60	4,01	620	600	614
8	16,52	4,01	618	600	609
9	16,41	4,00	611	600	609
10	16,50	4,00	617	600	610

Nella Figura 101 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS utilizzando lo stampo dotato di inserto in R-CPA.



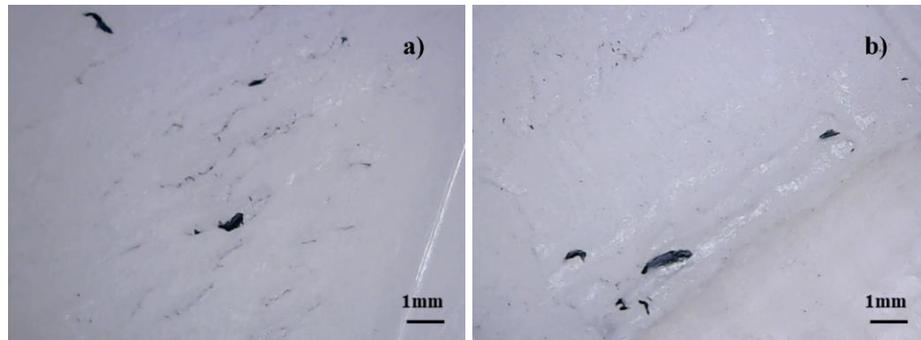
**Figura 101:** Parti in PBS stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto in R-CPA.

Durante i 10 cicli di stampaggio eseguiti, esclusivamente per gli stampati 1 e 2, è stato necessario estrarre manualmente le parti prodotte, poiché sono risultate bloccate nello stampo a causa della formazione di bave nella zona di superiore di alloggiamento delle viti, come mostrato in Figura 102.



**Figura 102:** Adesione degli stampati 1 e 2 nella zona di alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserto nello stampo, che ha richiesto l'estrazione manuale delle parti prodotte.

L'ispezione visiva al microscopio ottico della superficie riprodotta ha dimostrato la presenza di porzioni di inserto asportate in modo diffuso nelle valli del profilo di rugosità superficiale della superficie degli stampati e nella zona laterale della parte stampata, in corrispondenza dello spigolo vivo, posizionato in prossimità della zona di alloggiamento delle viti, come riportato in Figura 103 a) e Figura 103 b).



**Figura 103:** Asportazione di porzioni di inserto rilevate nella zona centrale (a) e laterale (b) della superficie riprodotta.

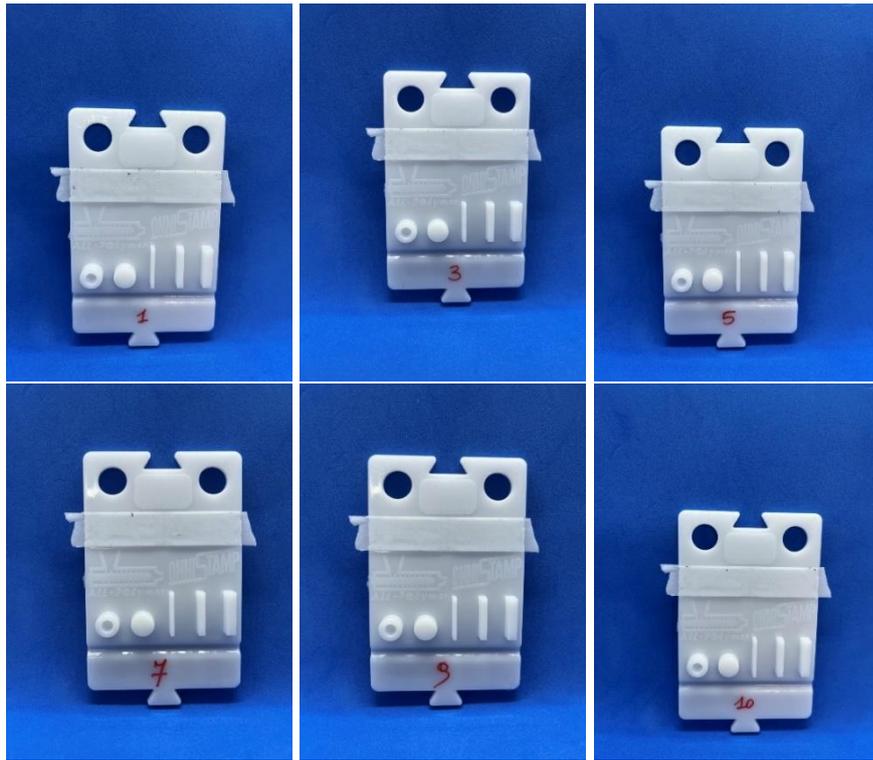
### 3.3.2.5 Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in F-ANY

Nella Tabella 48 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in F-ANY.

**Tabella 48:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS realizzati con stampo dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-ANY.

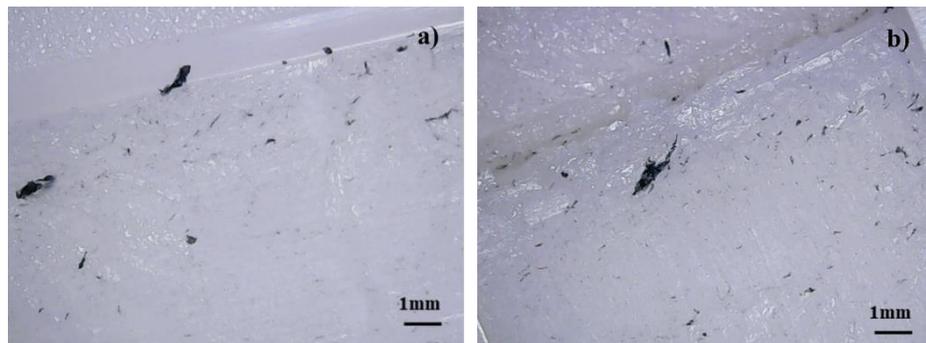
Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,44	4,01	617	600	610
2	16,62	4,01	626	600	616
3	16,42	4,00	617	600	607
4	16,34	4,01	612	600	608
5	16,41	4,00	615	600	608
6	16,51	4,01	629	600	617
7	16,79	4,00	630	600	619
8	16,40	4,02	621	600	614
9	16,33	4,01	616	600	614
10	16,29	4,02	616	600	608

Nella Figura 104 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS utilizzando lo stampo dotato di inserto in F-ANY.



**Figura 104:** Parti in PBS stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto in F-ANY.

Attraverso l'ispezione al microscopio ottico della superficie degli stampati, è stata constatata la presenza di porzioni di inserto asportate nella zona centrale e laterale degli stampati, come presentato nelle Figura 105 a) e Figura 105 b).



**Figura 105:** Asportazione di porzioni di inserto rilevate nella zona centrale (a) e laterale (b) della superficie riprodotta.

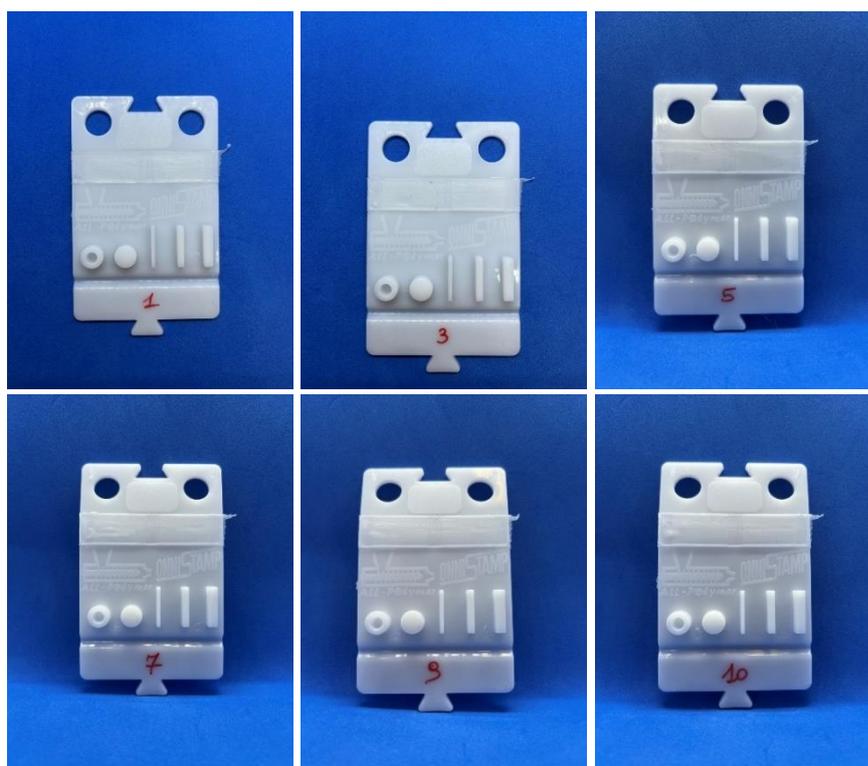
### 3.3.2.6 Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in F-G3D TT50X30

Nella Tabella 49 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in F-G3D TT50X30.

**Tabella 49:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS realizzati con stampo dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-G3D TT50X30.

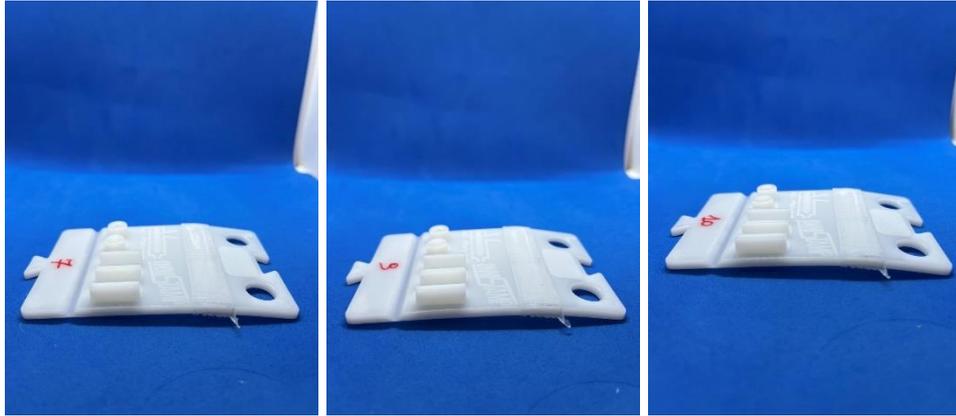
Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,65	4,00	624	600	615
2	17,17	4,00	618	600	617
3	16,96	4,00	630	600	620
4	16,96	4,00	630	600	621
5	16,94	4,00	629	600	618
6	16,85	4,01	625	600	618
7	16,76	4,00	619	600	612
8	16,82	4,00	624	600	616
9	16,89	4,00	626	600	618
10	16,91	4,01	627	600	619

Nella Figura 106 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS utilizzando lo stampo dotato di inserto in F-G3D TT50X30.



**Figura 106:** Parti in PBS stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto in F-G3D TT50X30.

Gli stampati 6, 7, 8, 9 e 10 risultano imbarcati, come dimostrato nella Figura 107: tra i pezzi citati, solo per gli stampati 8, 9 e 10 è stato necessario estrarre manualmente gli stampati.

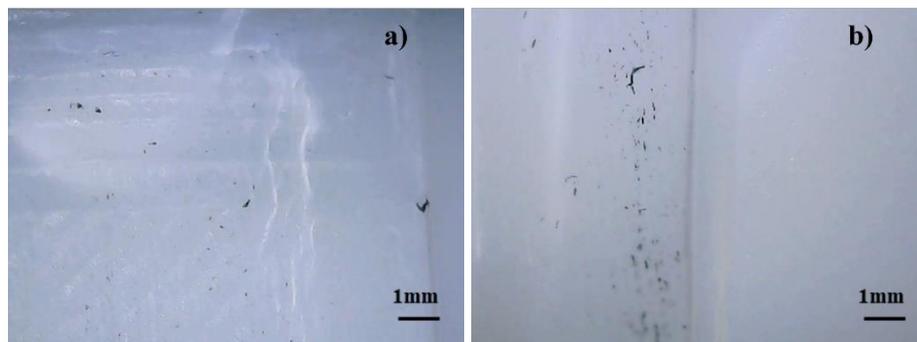


**Figura 107:** Deformazione degli stampati in seguito ad estrazione difficoltosa o manuale dallo stampo.

I pezzi 6 e 7, invece, sono stati estratti mediante gli appositi pin dello stampo, sotto la cui azione è stata prodotta una deformazione della superficie riprodotta dall'inserto a causa della resistenza all'estrazione esercitata da bave formatesi nella regione laterale, in corrispondenza della zona di alloggiamento delle viti.

A partire dal quinto stampato in poi, si nota la produzione di una zona deformata, probabilmente a causa della resistenza all'estrazione esercitata dal pezzo all'apertura dello stampo a causa dell'adesione alla superficie dello stampo.

L'ispezione al microscopio ottico ha evidenziato la presenza di porzioni di inserto asportate nella zona laterale deformata, come riportato nella Figura 108 a), e nella zona centrale dello stampato, presentata in Figura 108 b).



**Figura 108:** Asportazioni di porzioni di inserto identificate nella zona deformata laterale (a) e centrale (b) della superficie degli stampati.

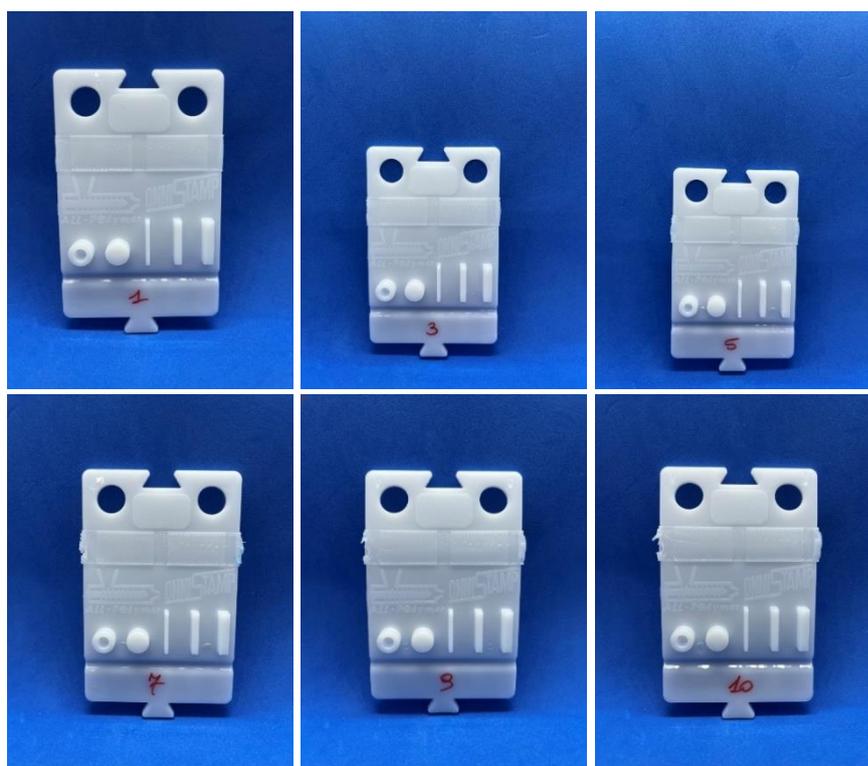
### 3.3.2.7 Stampaggio ad iniezione di PBS con inserto prodotto in G-PLA

Nella Tabella 50 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto in G-PLA.

**Tabella 50:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS realizzati con stampo dotato di inserto prodotto mediante FFF in G-PLA.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,98	4,01	617	600	612
2	16,96	4,00	617	600	615
3	16,89	4,01	614	600	612
4	16,56	4,01	618	600	611
5	16,66	4,01	624	600	616
6	16,66	4,00	624	600	614
7	16,74	4,00	628	600	618
8	16,82	4,00	630	600	620
9	16,81	4,01	630	600	620
10	16,22	4,01	610	600	608

Nella Figura 109 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS utilizzando lo stampo dotato di inserto in G-PLA.

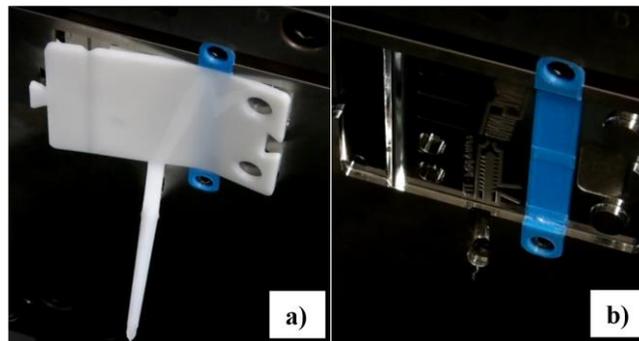


**Figura 109:** Parti in PBS stampate ad iniezione utilizzando lo stampo dotato di inserto in G-PLA.

Per i soli cicli di stampaggio 9 e 10 è stato necessario estrarre manualmente i pezzi all'apertura dello stampo, poiché sono risultati completamente adesi alla superficie dell'inserto, come riportato nella Figura 110 a).

Inoltre, al termine dei processi di stampaggio è stata identificata l'usura dell'inserto in corrispondenza degli spigoli vivi della sezione, in prossimità dell'alloggiamento delle viti, come presentato nella Figura 110 b).

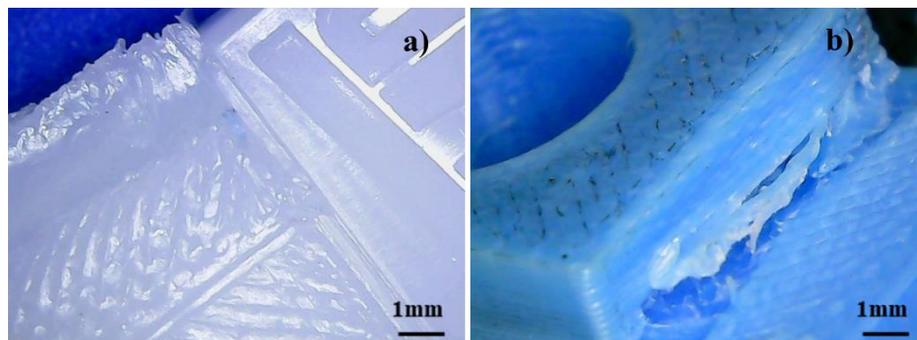
La deformazione dell'inserto così prodotta, la cui entità è cresciuta con i successivi cicli di stampaggio, ha comportato la produzione di stampati deformati in entrambe le zone laterali, recanti evidenti porzioni di inserto asportate a partire dal quinto stampato.



**Figura 110:** (a) Adesione completa della superficie dello stampato all'inserto che ha richiesto l'estrazione manuale dei pezzi 9 e 10; (b) usura dell'inserto che ha comportato l'ottenimento di stampati deformati.

L'ispezione al microscopio ottico della superficie degli stampati ha confermato la presenza di porzioni di inserto asportate esclusivamente nella porzione laterale dell'inserto, in corrispondenza dello spigolo vivo in prossimità della zona di alloggiamento delle viti, come riportato nella Figura 111 a).

L'ispezione visiva della corrispettiva zona dell'inserto ha evidenziato una profonda usura ed erosione dell'inserto nella zona dello spigolo vivo, come presentato nella Figura 111 b), che non ha permesso la riproduzione di una geometria regolare con gli stampati, come riportato nella Figura 111 a).



**Figura 111:** Asportazione di porzioni di inserto in corrispondenza della zona di alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserto nello stampo.

### 3.3.2.8 Monitoraggio del peso degli stampati ad iniezione in PBS

Nelle Tabelle 51 – 57 sono riportate le misure del peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9-10, realizzati con lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083, Ergal 7075, F-AOM, R-CPA, F-ANY, F-G3D TT50X30 e G-PLA.

**Tabella 51:** *Peso degli stampati in PBS prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto in Acciaio 1.2083.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (604)	14,4412 ± 0,0001
3	600 (606)	14,6435 ± 0,0001
5	600 (604)	14,8342 ± 0,0001
7	600 (609)	14,9492 ± 0,0001
9	600 (611)	14,9418 ± 0,0001
10	600 (612)	14,9460 ± 0,0001

**Tabella 52:** *Peso degli stampati in PBS prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto in Ergal 7075.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (622)	14,5264 ± 0,0001
3	600 (624)	14,5293 ± 0,0001
5	600 (620)	14,5333 ± 0,0001
7	600 (620)	14,5410 ± 0,0001
9	600 (619)	14,5380 ± 0,0001
10	600 (622)	14,5230 ± 0,0001

**Tabella 53:** *Peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9-10, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-AOM.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (620)	15,1516 ± 0,0001
3	600 (612)	15,1497 ± 0,0001
5	600 (616)	15,1432 ± 0,0001
7	600 (614)	15,1542 ± 0,0001
9	600 (610)	15,1537 ± 0,0001
10	600 (617)	15,1525 ± 0,0001

**Tabella 54:** *Peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9-10, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (610)	14,9560 ± 0,0001
3	600 (609)	14,9760 ± 0,0001
5	600 (607)	14,9680 ± 0,0001
7	600 (614)	14,9717 ± 0,0001
9	600 (609)	14,9707 ± 0,0001
10	600 (610)	14,9705 ± 0,0001

**Tabella 55:** *Peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9-10, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-ANY.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (610)	15,2879 ± 0,0001
3	600 (607)	15,3324 ± 0,0001
5	600 (608)	15,3325 ± 0,0001
7	600 (619)	15,3325 ± 0,0001
9	600 (614)	15,3446 ± 0,0001
10	600 (608)	15,3392 ± 0,0001

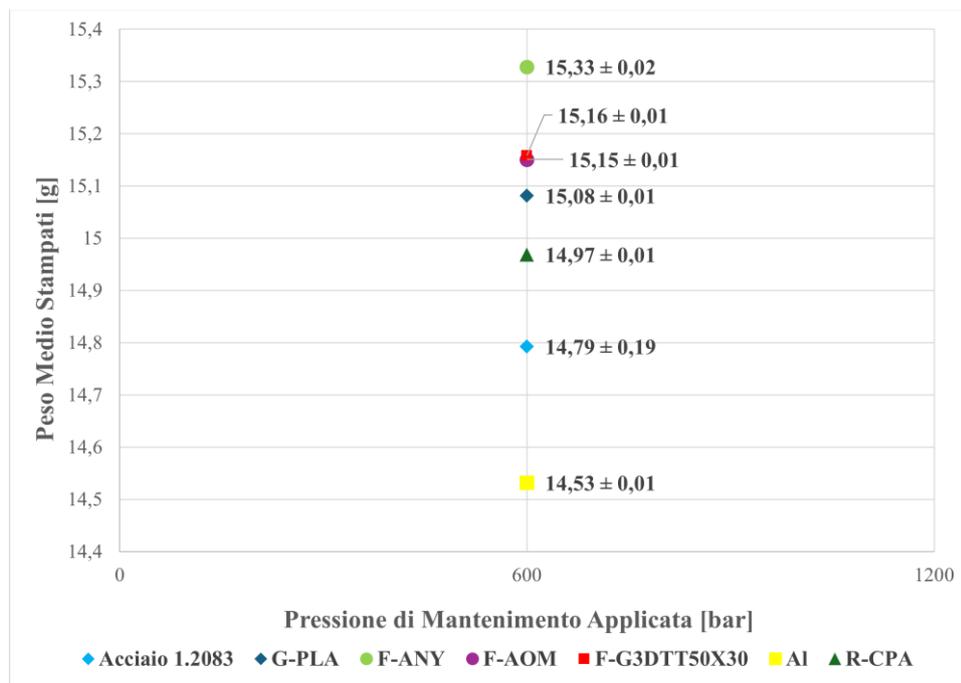
**Tabella 56:** *Peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9-10, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in F-G3D TT50X30.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (615)	15,1594 ± 0,0001
3	600 (620)	15,1571 ± 0,0001
5	600 (618)	15,1554 ± 0,0001
7	600 (612)	15,1638 ± 0,0001
9	600 (618)	15,1564 ± 0,0001
10	600 (619)	15,1578 ± 0,0001

**Tabella 57:** Peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9-10, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in G-PLA.

Numero iniezioni	Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]	Peso [g]
1	600 (612)	15,0667 ± 0,0001
3	600 (612)	15,0799 ± 0,0001
5	600 (616)	15,0800 ± 0,0001
7	600 (618)	15,0843 ± 0,0001
9	600 (620)	15,0886 ± 0,0001
10	600 (608)	15,0885 ± 0,0001

Nel grafico riportato nella Figura 112 sono stati riportati i pesi medi valutati per gli stampati in PBS, prodotti a parità di pressione di mantenimento applicata (600 bar).



**Figura 112:** Peso medio degli stampati riprodotti a parità di pressione di mantenimento applicata (600 bar).

Analizzando i valori riportati nel grafico presentato in Figura 112, gli stampati prodotti con tutti gli inserti realizzati mediante FFF posseggono un peso medio superiore a quello valutato per gli stampati prodotti con inserto in Acciaio 1.2083.

Inoltre, l'inserto in R-CPA ha permesso di riprodurre stampati dal peso medio più vicino a quello ottenuto per stampati realizzati con inserto in Acciaio 1.2083, registrando un aumento in peso del solo 1,21%.

L'inserto F-ANY ha prodotto stampati dal peso medio maggiore, registrando un incremento del 3,65% rispetto al peso medio valutato per parti prodotte con l'inserto in Acciaio 1.2083.

Solo l'inserto prodotto in Ergal 7075 ("AL") ha prodotto stampati dal peso medio inferiore a quello registrato per parti prodotte con inserto in Acciaio 1.2083, rispetto a cui ha registrato una diminuzione di peso media di 1,76%.

### 3.3.2.9 Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali

Nel grafico presentato in Figura 113 sono riportate le misure di rugosità della superficie degli stampati 1-3-5-7-9-10, realizzate utilizzando il rugosimetro dettagliato nel paragrafo 2.4.6. Per le misura sono stati impiegati un range di misura di 80 µm, una corsa di scansione di 4,80 mm e una lunghezza di cut off di 0.800 mm.



Figura 113: Misure di rugosità della superficie degli stampati in PBS.

Analizzando i dati riportati nel grafico presentato in Figura 113 è possibile constatare che:

- Nessuno degli inserti prodotti mediante FFF permette di replicare la rugosità superficiale dei pezzi stampati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083 nel range di cicli di processo valutati. I valori di Ra misurati sulla superficie degli stampati prodotti mediante FFF sono costantemente maggiori dei valori di rugosità misurati per le parti prodotte con inserto in Acciaio 1.2083 e con inserto in lega di alluminio Ergal 7075;
- Considerando complessivamente tutti i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS realizzati, le superfici riprodotte utilizzando l'inserto in F-G3D TT50X30 hanno ottenuto i valori di rugosità superficiale più prossimi a quelli ottenuti mediante l'impiego di inserti metallici.

Analizzando i valori di Ra misurati, fino al raggiungimento del quinto ciclo di stampaggio si osserva una tendenza progressivamente crescente dei valori di rugosità, mentre a partire dal settimo stampato si registra una diminuzione dei valori di rugosità. Inizialmente l'incremento dei valori di Ra potrebbe essere dovuto a fenomeni di usura della superficie dell'inserto, mentre la diminuzione dei valori di Ra potrebbe essere causata da un appianamento dei picchi del profilo superficiale dell'inserto nei successivi cicli di stampaggio;

- Per quanto concerne gli stampati realizzati con inserto in F-AOM, si osserva una tendenza crescente dei valori di rugosità misurati nelle successive stampate. Tale tendenza potrebbe essere dovuta a fenomeni di usura superficiale dell'inserto, che portano alla produzione di una finitura superficiale più irregolare e scabra;
- Per gli stampati prodotti impiegando l'inserto realizzato in F-ANY, non si nota una chiara tendenza. Infatti, considerando cicli successivi, si alternano valori di rugosità superficiale maggiori e minori, probabilmente legati alla presenza diffusa di fenomeni di usura che deteriorano la qualità superficiale dell'inserto e, quindi, la finitura superficiale degli stampati riprodotti;
- Per gli stampati realizzati utilizzando l'inserto prodotto in R-CPA, l'andamento dei valori di rugosità superficiale, fino al quinto stampato, è decrescente.

I valori di Ra si attestano a valori più elevati per lo stampato 7, a partire dal quale tornano a diminuire progressivamente con i cicli di stampaggio.

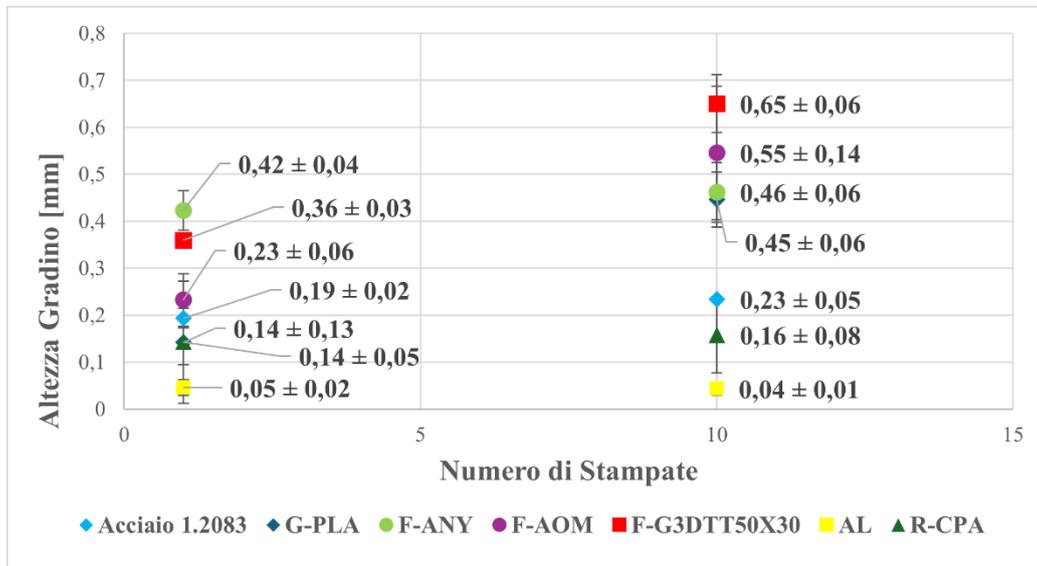
L'incremento nei valori di Ra misurati potrebbe essere dovuto ad un aumento dell'usura della superficie dell'inserto, che comporta l'ottenimento di una qualità superficiale degli stampati meno regolare e aspra.

Invece, la diminuzione dei valori di rugosità superficiale potrebbe essere attribuita a fenomeni di asportazione di porzioni di inserto, realizzati con le successive stampate, che provocano un appianamento dei picchi del profilo di rugosità superficiale dell'inserto;

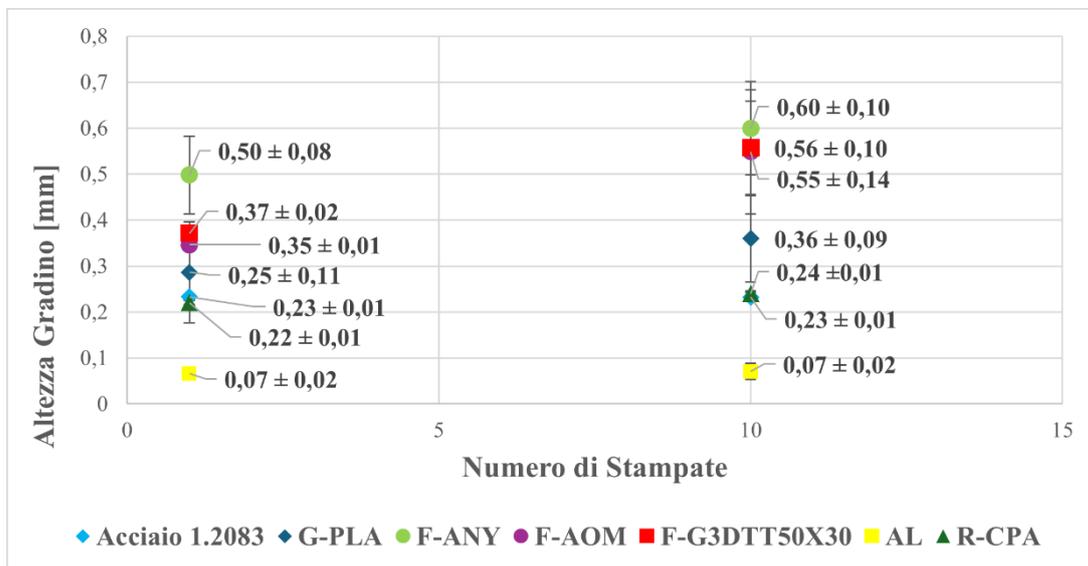
- Per quanto concerne gli stampati riprodotti con inserto in G-PLA, si osserva una progressiva diminuzione dei valori di rugosità superficiale misurati con le successive

stampate: tale tendenza potrebbe esser dovuta all'appianamento dei picchi del profilo superficiale dell'inserto con le successive stampate e, probabilmente, a causa dell'asportazione di porzioni di inserto.

Nelle Figura 114 e 115 sono graficati i valori del profilo superficiale ottenuti mediante l'impiego del profilometro dettagliato nel paragrafo 2.4.5, rispettivamente, per le corse di misura "A" e "B", rappresentate nella Figura 92.



**Figura 114:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa "A" per il primo e il decimo stampato.



**Figura 115:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa "A" per il primo e il decimo stampato.

Analizzando i dati riportati nelle Figure 114 e 115, è possibile rilevare che:

- La differenza tra i valori delle corse "A" e "B" misurati sul primo stampato e sul decimo stampato è dovuta al fatto che la corsa "A" si trova in prossimità del posizionamento del gate di iniezione, regione di stampo che sperimenta una pressione maggiore per il tempo più esteso durante il ciclo di stampaggio ad iniezione;

- Per tutti gli inserti prodotti mediante FFF impiegati per lo stampaggio di PBS, per entrambe le corse valutate, a parità di inserto impiegato per il processo di stampaggio ad iniezione, l'altezza del primo stampato risulta inferiore dell'altezza misurata per il decimo. Probabilmente, a causa delle ripetizioni consecutive dei cicli produttivi, l'inserto potrebbe aver subito usura, producendo l'alterazione delle dimensioni della cavità dello stampo, e, quindi, dell'altezza del gradino riprodotta;
- Tra gli inserti prodotti mediante FFF, valutando complessivamente le misure realizzate, l'inserto prodotto in R-CPA ha permesso di ottenere sia misure più ripetibili tra primo e decimo stampato a parità di corsa considerata, che valori di altezza del gradino più prossimi a quelli misurati per gli stampati replicati con inserto in Acciaio 1.2083.

### 3.3.3 *Produzione degli stampati ad iniezione in PBS90PHBH10: parametri di processo*

Per eseguire le prove di stampa dei blend è stato utilizzato esclusivamente l'inserto R-CPA, perché tra gli inserti prodotti mediante FFF ha permesso di ottenere stampati meno difettosi. Inoltre, per la produzione degli stampati con inserto in Acciaio 1.2083, sono stati riprodotti solo 9 stampati (invece dei 10), per mantenere un quantitativo maggiore di blend per le prove di stampa eseguite con inserto in R-CPA.

Nella Tabella 58 sono presentati i parametri di processo impiegati per l'iniezione del blend PBS90PHBH10.

**Tabella 58:** Parametri di processo impiegati per l'iniezione del PBS90PHBH10.

<b>Parametri</b>	<b>Valori</b>
Pressione di Iniezione	600 bar
Pressione di mantenimento	600 bar
Temperatura del fuso (PBS90PHBH10)	140°C
Temperatura dello stampo	30°C
Tempo di mantenimento	5 s
Tempo di raffreddamento	20 s
Tempo ciclo	90 s
Tempo di riempimento	0,91s

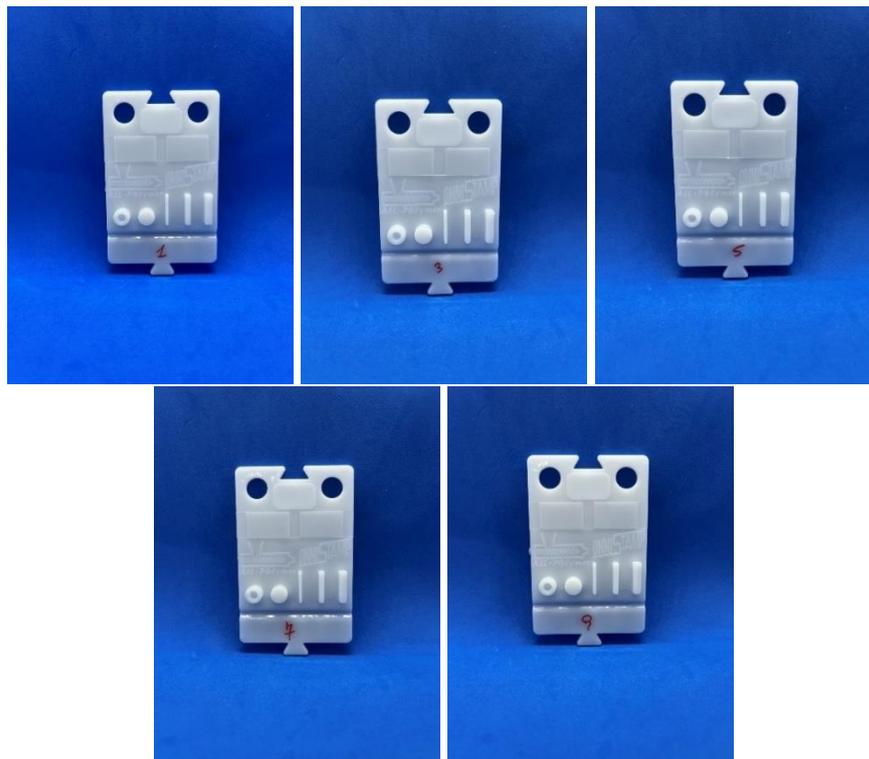
#### 3.3.3.1 *Stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 con inserto in Acciaio 1.2083*

Nella Tabella 59 sono riportati i parametri di processo per i 9 cicli di stampaggio eseguiti utilizzando l'inserto in Acciaio 1.2083.

**Tabella 59:** Parametri di processo per i 9 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 realizzati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,41	4,00	615	600	608
2	16,51	4,01	629	600	617
3	16,79	4,00	630	600	619
4	16,40	4,02	621	600	614
5	16,33	4,01	616	600	614
6	16,29	4,02	616	600	608
7	16,25	4,02	612	600	610
8	16,23	4,01	610	600	606
9	16,17	4,00	607	600	606

Nella Figura 116 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9, prodotti in PBS90PHBH10 utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 116:** Parti in PBS90PHBH10 stampate utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

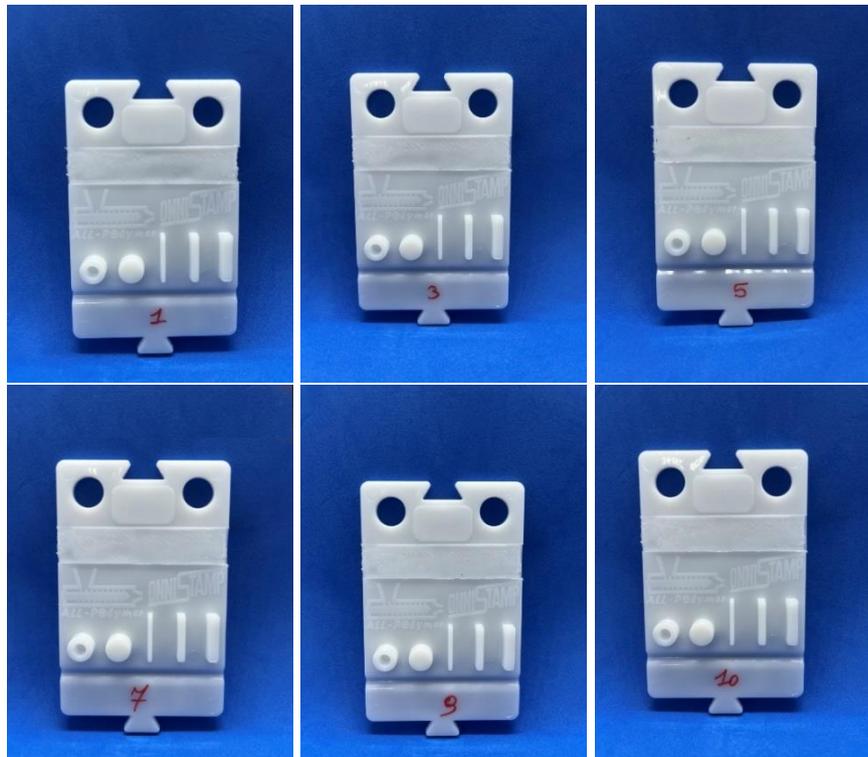
### 3.3.3.2 Stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 con inserto prodotto in R-CPA

Nella Tabella 60 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti con lo stampo dotato dell'inserto in R-CPA.

**Tabella 60:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 eseguiti con stampo fornito di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

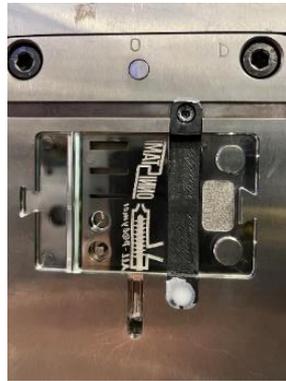
Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,81	4,01	612	600	611
2	16,90	4,01	612	600	612
3	16,65	4,01	612	600	612
4	16,60	4,00	609	600	609
5	16,68	4,02	614	600	612
6	16,71	4,01	615	600	612
7	16,68	4,02	614	600	611
8	16,68	4,02	614	600	611
9	16,68	4,02	614	600	611
10	16,70	4,02	614	600	610

Nella Figura 117 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS90PHBH10 utilizzando lo stampo dotato di inserto realizzato per FFF in R-CPA.



**Figura 117:** Parti in PBS90PHBH10 stampate con lo stampo dotato di inserto in R-CPA.

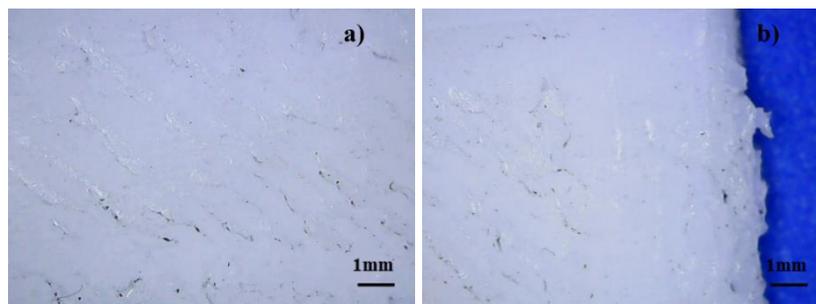
Per gli stampati 1, 3, 5 è stata necessaria l'estrazione manuale delle parti all'apertura dello stampo a causa della formazione di bave in corrispondenza della zona di alloggiamento delle viti, come mostrato in Figura 118, e per l'adesione della parte alla superficie dello stampo. La difficoltosa rimozione manuale ha causato la deformazione della porzione riprodotta dall'inserto.



**Figura 118:** *Formazione di bave nella zona di alloggiamento delle viti che ha ostacolato la rimozione automatica dei pezzi 1, 3, 5 per mezzo dei pin dello stampo.*

L'ispezione al microscopio ottico ha evidenziato la presenza di porzioni di inserto asportate fin dal primo stampato, come riportato nella Figura 119 a).

Inoltre, in corrispondenza dello spigolo vivo della sezione, in prossimità della zona di alloggiamento delle viti, è stata identificata una leggera deformazione della superficie laterale dello stampato, probabilmente formatasi in seguito a fenomeni di usura con le consecutive stampe, come presentato in Figura 119 b).



**Figura 115:** *Asportazione di porzioni di inserto rilevate sulla superficie degli stampati (a) e deformazione della zona laterale delle parti stampate in seguito a fenomeni di usura dell'inserto (b).*

### 3.3.3.3 Monitoraggio del peso degli stampati in PBS90PHBH10

Nelle Tabelle 61 e 62 sono riportati, rispettivamente, i pesi degli stampati in PBS90PHBH10 prodotti con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083 e di inserto in R-CPA.

**Tabella 61:** *Peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto in Acciaio 1.2083.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (608)	14,7184 ± 0,0001
3	600 (619)	14,7279 ± 0,0001
5	600 (614)	14,7024 ± 0,0001
7	600 (610)	14,7082 ± 0,0001
9	600 (606)	14,7064 ± 0,0001

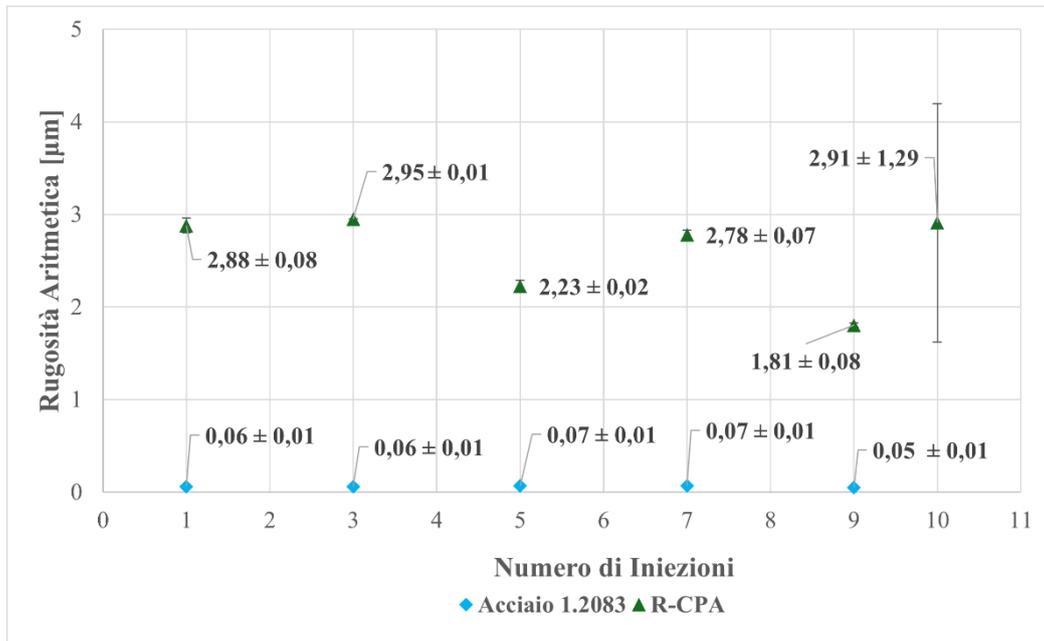
**Tabella 62:** *Peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9-10, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (611)	14,6900 ± 0,0001
3	600 (612)	14,6667 ± 0,0001
5	600 (612)	14,6589 ± 0,0001
7	600 (611)	14,6532 ± 0,0001
9	600 (611)	14,6520 ± 0,0001
10	600 (610)	14,6546 ± 0,0001

### 3.3.5.3 *Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali*

Nel grafico presentato in Figura 120 sono riportate le misure di rugosità della superficie degli stampati, realizzate utilizzando il rugosimetro dettagliato nel paragrafo 2.4.6.

Per le misura sono stati impiegati un range di misura di 80 µm, una corsa di scansione di 4,80 mm e una lunghezza di cut off di 0.800 mm.



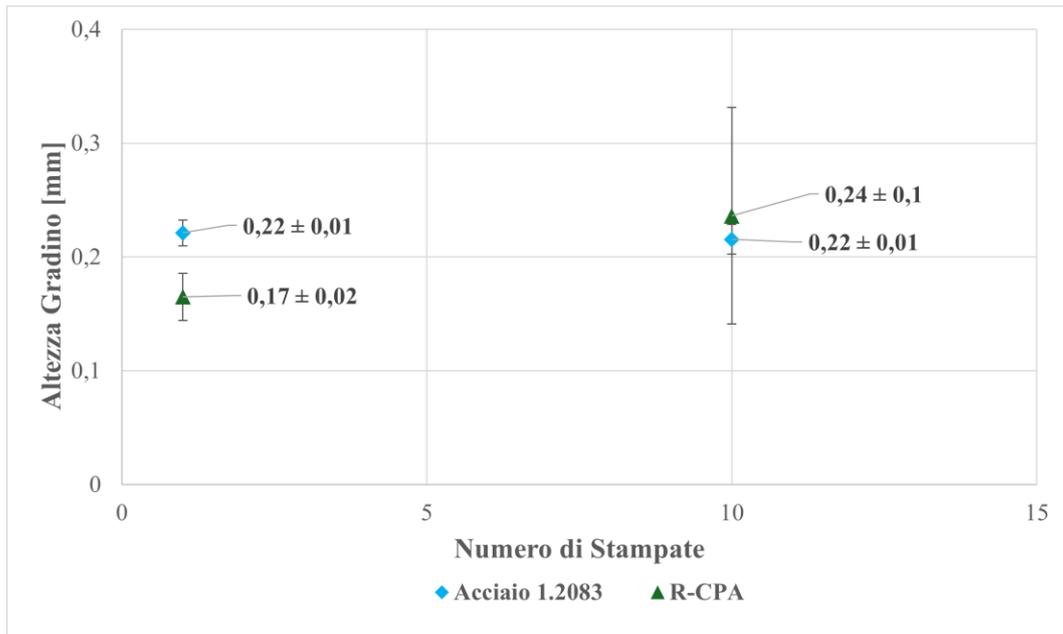
**Figura 120:** Misure di rugosità della superficie degli stampati in PBS90PHBH10.

Dall'analisi dei valori riportati in Figura 120 è possibile constatare che l'inserto prodotto mediante FFF in R-CPA non ha permesso di replicare la rugosità superficiale dei pezzi stampati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083 nel range di cicli di processo valutati.

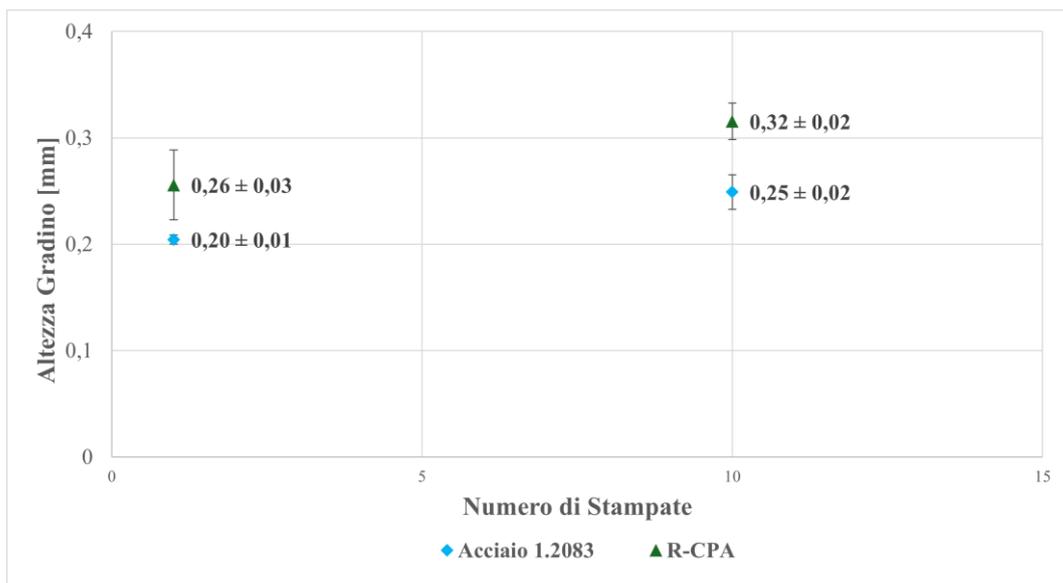
I valori di Ra misurati sulla superficie degli stampati prodotti mediante R-CPA sono sistematicamente maggiori dei valori di rugosità misurati per le parti prodotte con inserto in Acciaio 1.2083.

Inoltre, non si osserva una tendenza costante dell'andamento dei valori di Ra misurati per gli stampati riprodotti con inserto in R-CPA: si alternano valori minori e maggiori tra cicli di stampaggio consecutivi, probabilmente dovuti a fenomeni di usura superficiale dell'inserto.

Nelle Figura 121 e 122 sono graficati i valori del profilo superficiale ottenuti mediante l'impiego del profilometro dettagliato nel paragrafo 2.4.5, rispettivamente, per le corse di misura "A" e "B", rappresentate nella Figura 92.



**Figura 121:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa “A” per il primo e il decimo stampato.



**Figura 122:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa “B” per il primo e il decimo stampato.

Esaminando i dati riportati in Figure 121 e 122, è possibile evidenziare una differenza tra i valori delle corse “A” e “B” misurati sul primo stampato e sul decimo, dovuta al posizionamento della corsa “A” in prossimità del gate di iniezione, regione dello stampo che sperimenta una pressione maggiore per il tempo più esteso durante il ciclo di stampaggio ad iniezione.

Inoltre, per gli stampati riprodotti con inserto in R-CPA, l’altezza del primo stampato risulta inferiore dell’altezza misurata per il decimo. Probabilmente, a causa delle ripetizioni successive dei cicli produttivi, l’inserto potrebbe aver subito usura e, quindi, la produzione di una

variazione locale delle dimensioni della cavità da riprodurre e, quindi, delle dimensioni dell'altezza del gradino realizzate.

### 3.3.4 Produzione degli stampati ad iniezione in PBS80PHBH20: parametri di processo

Nella Tabella 63 sono presentati i parametri di processo impiegati per l'iniezione del blend PBS80PHBH20.

**Tabella 63:** Parametri di processo impiegati per l'iniezione del PBS80PHBH20.

Parametri	Valori
Pressione di Iniezione	600 bar
Pressione di mantenimento	600 bar
Temperatura del fuso (PBS80PHBH20)	160°C
Temperatura dello stampo	30°C
Tempo di mantenimento	8 s
Tempo di raffreddamento	20 s
Tempo ciclo	90 s
Tempo di riempimento	0,91s

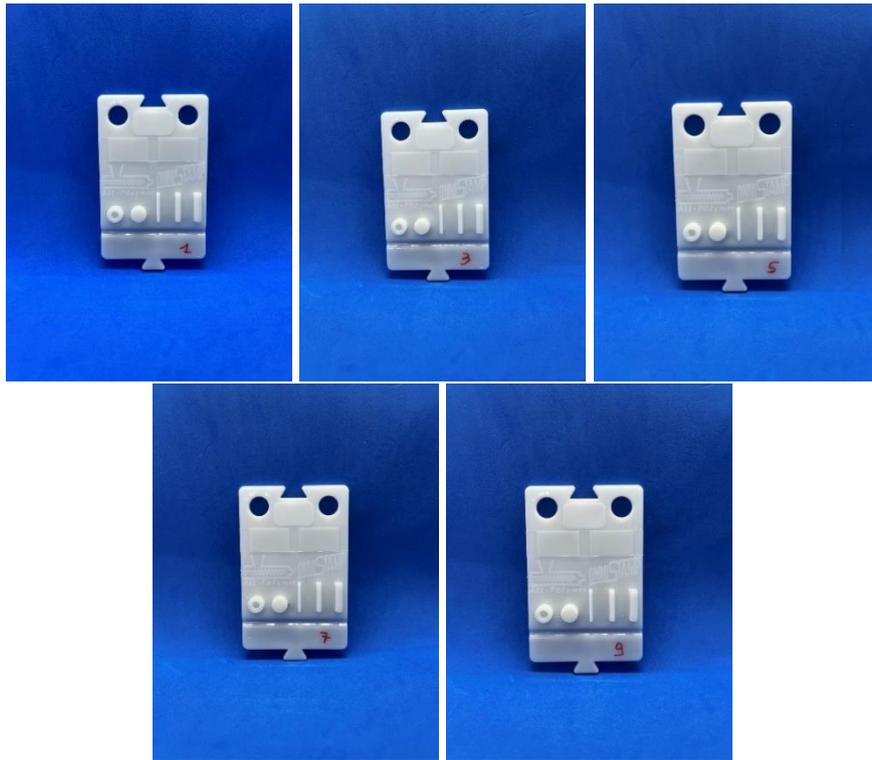
#### 3.3.4.1 Stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 con inserto in Acciaio 1.2083

Nella Tabella 64 sono riportati i parametri di processo per i 9 cicli di stampaggio eseguiti utilizzando l'inserto in Acciaio 1.2083.

**Tabella 64:** Parametri di processo per i 9 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 realizzati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,70	4,02	614	600	610
2	16,30	4,02	619	600	615
3	16,36	4,02	619	600	615
4	16,31	4,01	616	600	611
5	16,46	4,00	616	600	610
6	16,37	4,00	609	600	609
7	16,61	4,02	626	600	616
8	16,79	4,01	624	600	621
9	17,01	4,00	624	600	620

Nella Figura 123 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9, prodotti in PBS80PHBH20 utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 123:** Parti in PBS80PHBH20 stampate ad iniezione con lo stampo dotato di inserto in Acciaio I.2083.

### 3.3.4.2 Stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 con inserto prodotto in R-CPA

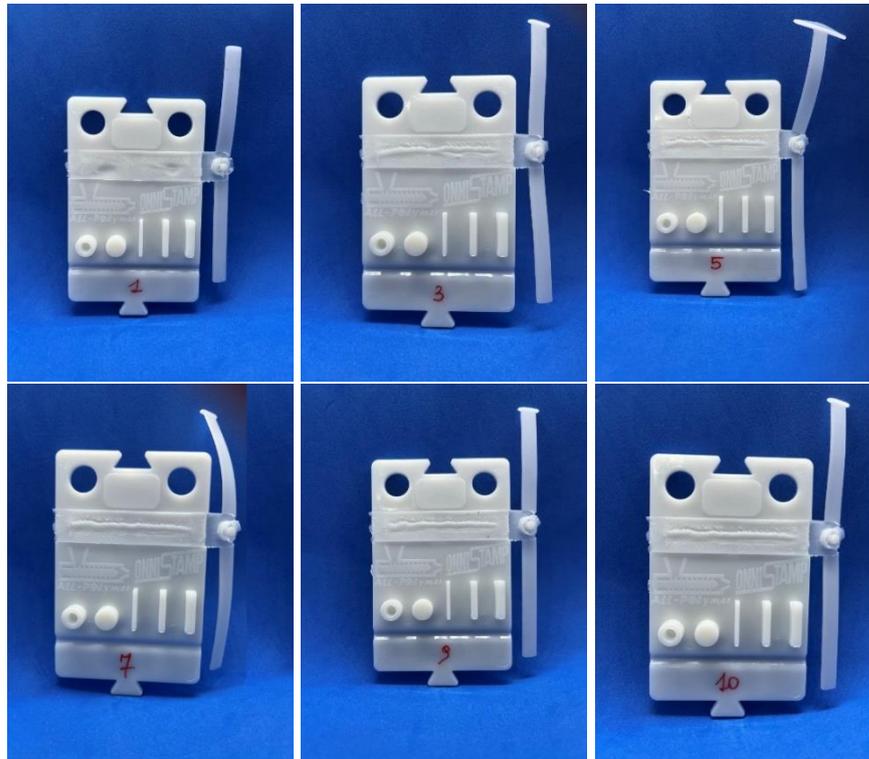
Nella Tabella 65 sono presentati i parametri di processo per i 15 cicli di stampaggio eseguiti con lo stampo dotato dell'inserto in R-CPA.

**Tabella 65:** Parametri di processo per i 15 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 eseguiti con stampo fornito di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,44	4,00	611	600	610
2	16,53	4,01	618	600	615
3	16,43	4,00	611	600	607
4	16,42	4,01	612	600	609
5	16,40	4,00	611	600	609
6	16,41	4,00	614	600	609
7	16,51	4,00	618	600	612
8	16,52	4,00	617	600	612
9	17,34	4,00	621	600	619
10	17,14	4,00	625	600	620
11	17,05	4,00	622	600	619
12	17,10	4,00	623	600	618

13	17,10	4,00	624	600	619
14	17,05	4,00	622	600	620
15	17,01	3,99	621	600	620

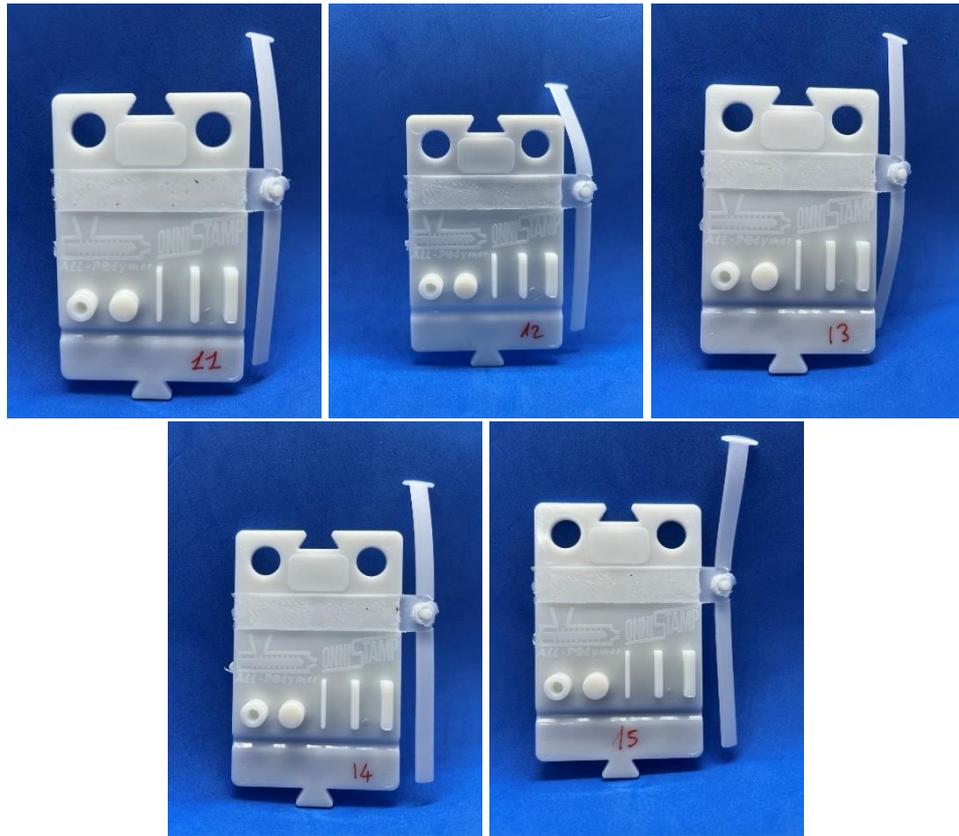
Nella Figura 120 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS80PHBH20 utilizzando lo stampo dotato di inserto realizzato per FFF in R-CPA.



**Figura 124:** Parti in PBS80PHBH20 stampate usando lo stampo dotato di inserto in R-CPA.

Per i primi 10 cicli di stampaggio è stato necessario rimuovere manualmente le parti prodotte all'apertura dello stampo, poiché sono risultate adese alla superficie dell'inserto: la rimozione è stata particolarmente difficoltosa e ha prodotto la deformazione della superficie dello stampato, come riportato in Figura 124.

A partire dalla produzione del pezzo 11, fino allo stampato 15, invece, i pezzi vengono espulsi dallo stampo, in modo automatizzato, mediante gli appositi pin di estrazione di cui lo stampo è dotato, riacquistando una regolarità nella riproduzione superficiale, come evidenziato in Figura 125.



**Figura 125:** Parti 11-12-13-14-15, stampate in PBS80PHBH20 utilizzando inserto in R-CPA.

L'ispezione visiva condotta mediante l'impiego del microscopio ottico ha evidenziato, a partire dallo stampato 9, l'asportazione di isolate porzioni di inserto nella zona centrale e nella zona laterale della superficie riprodotta, in prossimità dell'alloggiamento delle viti, come evidenziato, rispettivamente, nella Figura 126 a) e 126 b), dovute, probabilmente, al verificarsi di fenomeni di usura con i successivi cicli di stampaggio realizzati.

Inoltre, per gli stampati 11, 13 e 14 è stata rilevata la formazione di bolle al di sotto della superficie riprodotta, come mostrato in Figura 126 c).



**Figura 126:** Porzioni di inserto asportate nella zona centrale (a) e laterale (b) della superficie degli stampati; formazione di bolle al di sotto della superficie riprodotta (c).

### 3.3.4.3 Monitoraggio del peso degli stampati in PBS80PHBH20

Nelle Tabella 65 e 66 sono riportati, rispettivamente, i pesi degli stampati in PBS80PHBH20 prodotti con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083 e inserto in R-CPA, prodotto per FFF.

**Tabella 65:** *Peso degli stampati 1-3-5-7-9, prodotti in PBS80PHBH20 utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto in Acciaio 1.2083.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (610)	14,6863 ± 0,0001
3	600 (615)	14,6572 ± 0,0001
5	600 (610)	14,5970 ± 0,0001
7	600 (616)	14,6080 ± 0,0001
8	600 (621)	14,6302 ± 0,0001
9	600 (620)	14,6291 ± 0,0001

**Tabella 66:** *Peso degli stampati 1-3-5-7-9-10-11-13-15, prodotti in PBS80PHBH20 utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto in R-CPA.*

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (610)	14,6836 ± 0,0001
3	600 (607)	14,6734 ± 0,0001
5	600 (609)	14,6843 ± 0,0001
7	600 (612)	14,6698 ± 0,0001
9	600 (619)	14,6723 ± 0,0001
10	600 (620)	14,6757 ± 0,0001
11	600 (619)	14,6727 ± 0,0001
13	600 (619)	14,6735 ± 0,0001
15	600 (620)	14,6745 ± 0,0001

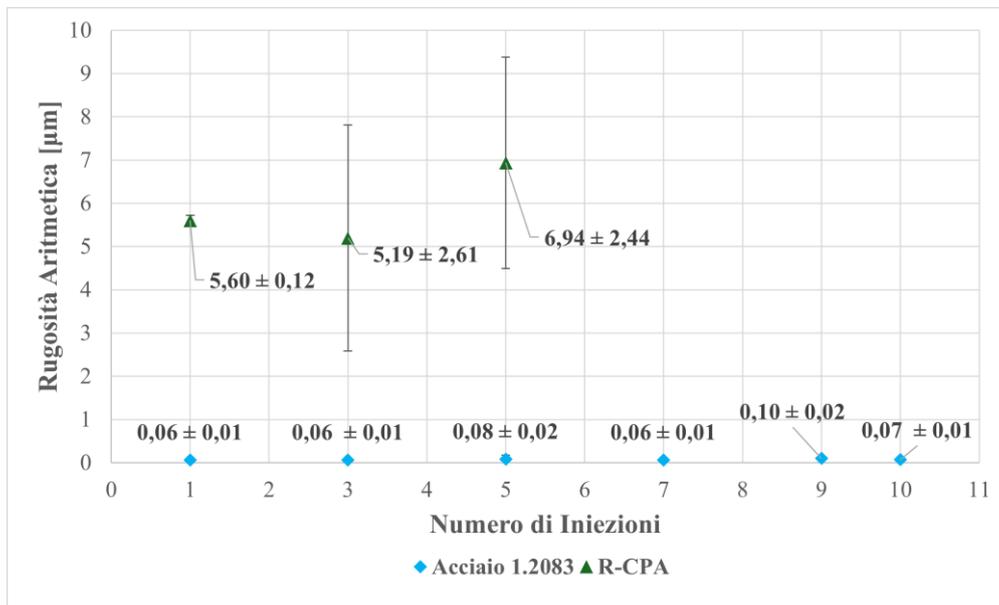
### 3.3.4.4 Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali

Nel grafico presentato in Figura 127 sono riportate le misure di rugosità della superficie degli stampati, realizzate utilizzando il rugosimetro dettagliato nel paragrafo 2.4.6.

Per le misura sono stati impiegati un range di misura di 80 µm, una corsa di scansione di 4,80 mm e una lunghezza di cut off di 0.800 mm.

Per quanto riguarda gli stampati riprodotti impiegando l'inserto in R-CPA, sono stati misurati i valori di rugosità esclusivamente per gli stampati 11, 13 e 15, poiché gli stampati

prodotti con i primi 10 cicli di stampaggio ad iniezione sono stati estratti dallo stampo manualmente, provocandone una forte deformazione nella zona della superficie riprodotta con l'inserto.



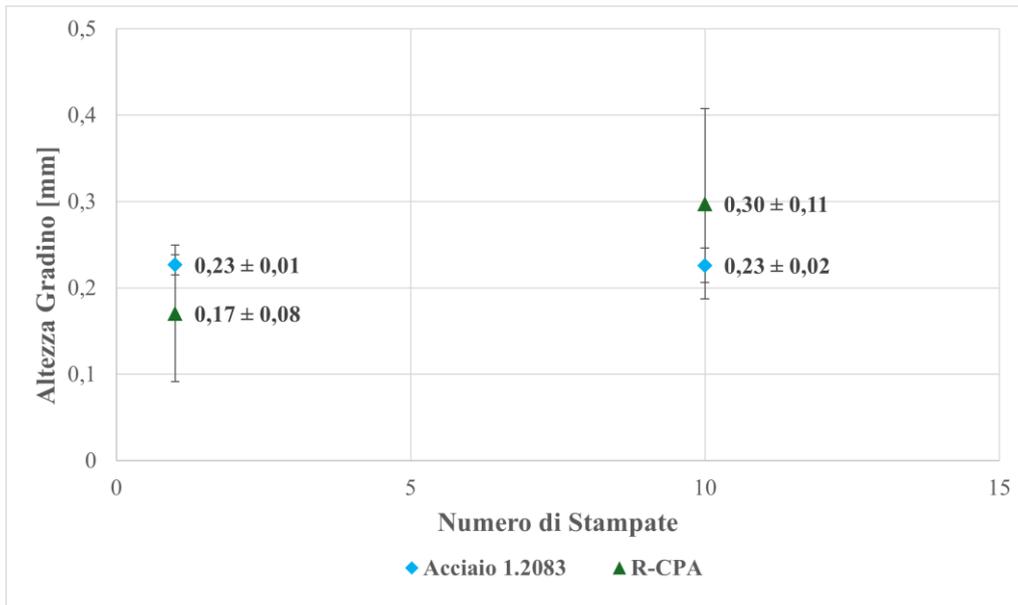
**Figure 127:** Misure di rugosità della superficie degli stampati in PBS80PHBH20.

Dall'analisi dei valori riportati in Figura 127 è possibile notare che l'inserto prodotto mediante FFF in R-CPA non ha permesso di replicare la rugosità superficiale dei pezzi stampati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083 nel range di cicli di stampaggio studiati.

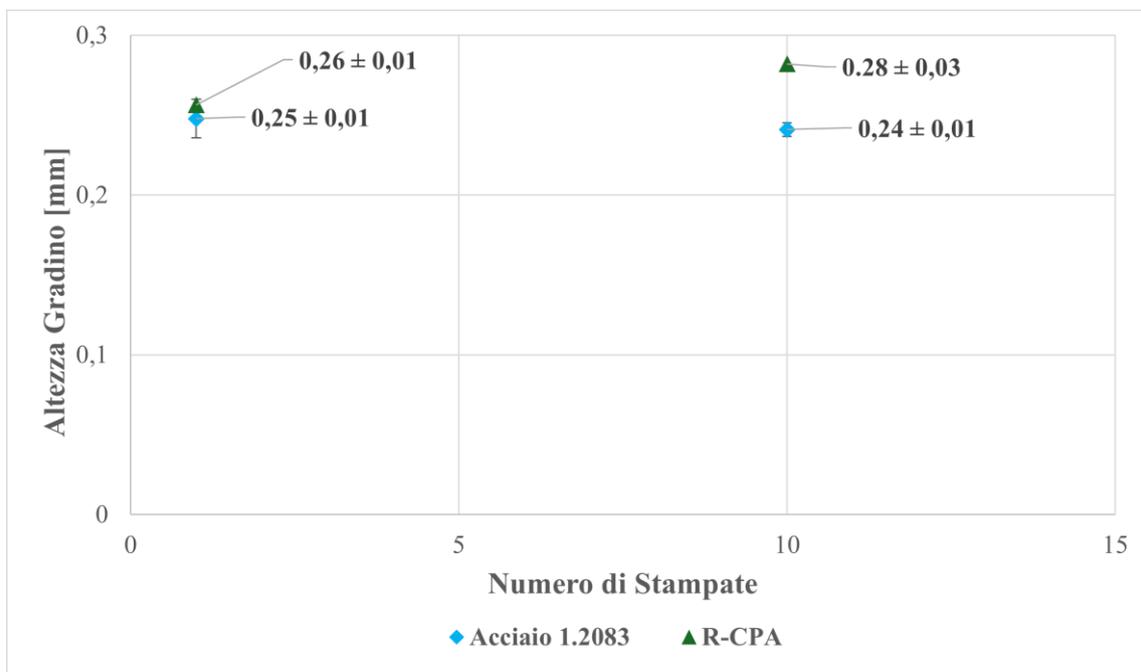
I valori di Ra misurati sulla superficie degli stampati prodotti mediante R-CPA sono sistematicamente maggiori dei valori di rugosità misurati per le parti prodotte con inserto in Acciaio 1.2083.

Non si osserva una tendenza costante dell'andamento dei valori di Ra misurati per gli stampati riprodotti con inserto in R-CPA: si alternano valori minori e maggiori tra cicli di stampaggio consecutivi, probabilmente dovuti a fenomeni di usura superficiale dell'inserto.

Nelle Figure 128 e 129 sono graficati i valori del profilo superficiale ottenuti mediante l'impiego del profilometro dettagliato nel paragrafo 2.4.5, rispettivamente, per le corse di misura "A" e "B", rappresentate nella Figura 92.



**Figura 128:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa “A” per il primo e il decimo stampato.



**Figura 129:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa “B” per il primo e il decimo stampato.

Esaminando i dati riportati in Figura 128 e Figura 129, è possibile evidenziare una differenza tra i valori delle corse “A” e “B” valutati sul primo e sul decimo stampato, dovuta al posizionamento della corsa “A” in prossimità del gate di iniezione, regione dello stampo che sperimenta una pressione maggiore per il tempo più esteso durante il ciclo di stampaggio ad iniezione.

Inoltre, per gli stampati riprodotti con inserto in R-CPA, l’altezza riprodotta con l’esecuzione del primo ciclo di stampaggio risulta inferiore dell’altezza misurata per il decimo, sia per la corsa “A” che per la corsa “B”.

Probabilmente, l'inserto potrebbe esser andato incontro ad usura a causa delle ripetizioni dei consecutivi cicli di stampaggio, provocando una modifica locale del volume della cavità e, quindi, una variazione delle dimensioni dell'altezza del gradino riprodotte.

### 3.3.5 *Produzione degli stampati ad iniezione in PBS90PLA10: parametri di processo*

Nella Tabella 67 sono presentati i parametri di processo impiegati per l'iniezione del blend PBS90PLA10.

**Tabella 67:** Parametri di processo impiegati per l'iniezione del PBS90PLA10.

<b>Parametri</b>	<b>Valori</b>
Pressione di Iniezione	600 bar
Pressione di mantenimento	600 bar
Temperatura del fuso (PBS90PLA10)	170°C
Temperatura dello stampo	30°C
Tempo di mantenimento	8 s
Tempo di raffreddamento	20 s
Tempo ciclo	90 s
Tempo di riempimento	0,91s

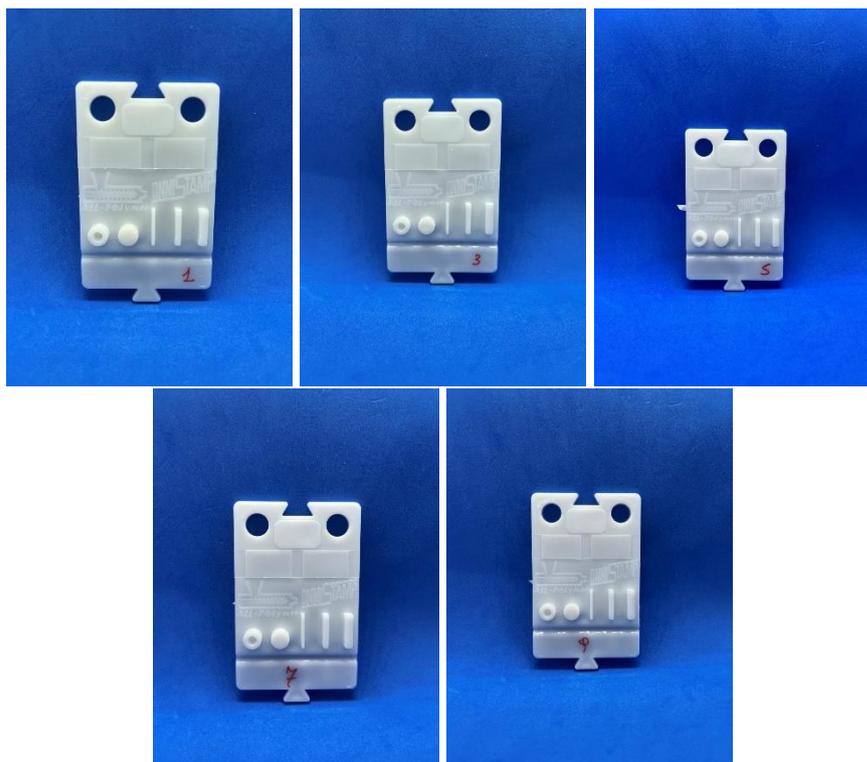
#### 3.3.5.1 *Stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 con inserto in Acciaio 1.2083*

Nella Tabella 68 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti utilizzando l'inserto in Acciaio 1.2083.

**Tabella 68:** Parametri di processo per i 9 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 realizzati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

<b>Numero Iniezioni</b>	<b>Volume Iniezione [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Volume commutazione [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Valore di punta pressione iniezione [bar]</b>	<b>Pressione di mantenimento applicata [bar]</b>	<b>Valore cresta pressione di mantenimento [bar]</b>
1	19,07	4,00	624	600	624
2	17,09	4,00	624	600	622
3	16,89	4,01	625	600	619
4	16,41	4,00	608	600	606
5	16,42	4,00	608	600	607
6	16,30	4,01	622	600	604
7	16,31	4,01	620	600	604
9	16,50	4,01	611	600	610

Nella Figura 130 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9, prodotti in PBS90PLA10 utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 130:** Parti in PBS90PLA10 stampate utilizzando l'inserto in Acciaio 1.2083.

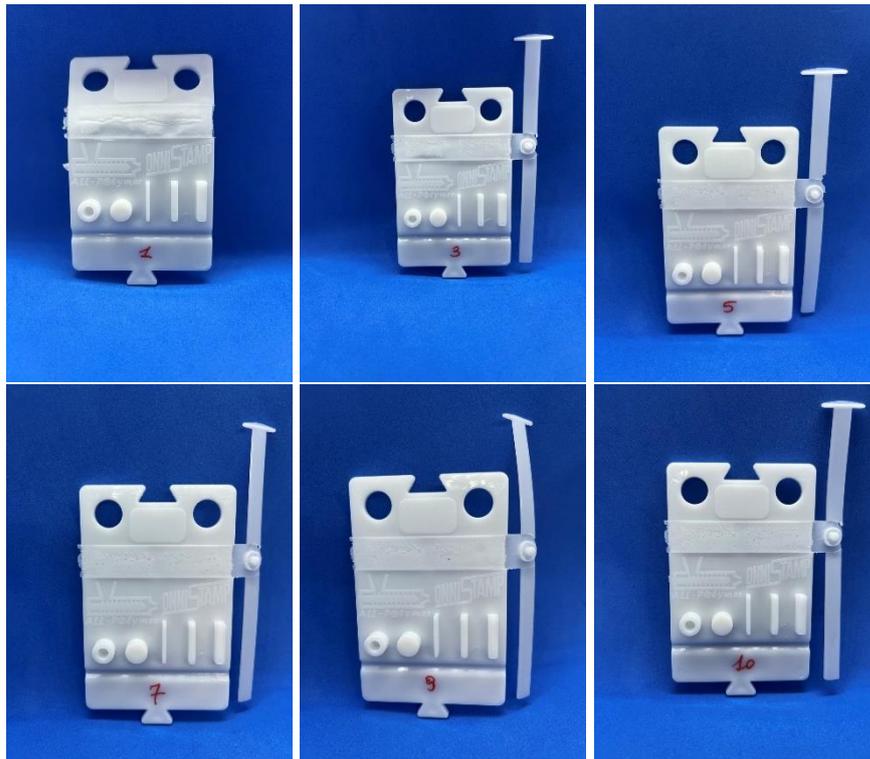
### 3.3.5.2 Stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 con inserto prodotto in R-CPA

Nella Tabella 69 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti con lo stampo dotato dell'inserto in R-CPA.

**Tabella 69:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 eseguiti con stampo fornito di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	17,41	4,01	737	600	603
2	17,08	4,01	620	600	617
3	17,14	4,01	622	600	620
4	17,14	4,00	621	600	620
5	17,14	4,00	622	600	620
6	17,11	4,00	621	600	620
7	17,25	4,00	626	600	623
8	17,30	4,01	626	600	625
9	17,60	4,01	626	600	626
10	17,57	4,01	626	600	626

Nella Figura 131 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PBS90PLA10 utilizzando lo stampo dotato di inserto realizzato per FFF in R-CPA.



**Figura 131:** Parti in PBS90PLA10 stampate utilizzando l'inserto in R-CPA.

Per i cicli di stampaggio 1 e 3 è stato necessario rimuovere manualmente le parti prodotte all'apertura dello stampo: entrambi i pezzi presentano una superficie riprodotta fortemente deformata e le parti sono risultate imbarcate, come mostrato in Figura 132.

È stato ritenuto che il tempo di raffreddamento impostato inizialmente (20 s) fosse troppo breve per garantire un agevole demolding delle parti, senza provocare la deformazione della superficie riprodotta.

Per tale ragione, il tempo di raffreddamento, a partire dal quinto ciclo, è stato impostato a 30 s, per un tempo ciclo complessivo di 100 s.

A partire dal quinto stampato, i pezzi tornano ad essere estratti in modo automatizzato, perdendo la forte deformazione che caratterizza gli stampati 1 e 3.



**Figura 132:** L'estrazione manuale dei pezzi 1 e 3 ha prodotto la deformazione della superficie riprodotta e l'imbarcamento dello stampato.

L'ispezione al microscopio ottico ha evidenziato la presenza di porzioni di inserto asportate sulla superficie di tutti gli stampati realizzati, prodotte, probabilmente, a causa di fenomeni di usura dell'inserto, come riportato nella Figura 133 a) e Figura 129 b), e di bolle, rilevate a partire dalla produzione del quinto stampato, come evidenziato nella Figura 129 c).



**Figura 133:** Porzioni di inserto asportate e rilevate nella zona centrale (a) e laterale (b) della superficie riprodotta; presenza di bolle al di sotto della superficie riprodotta dall'inserto (c).

### 3.3.5.3 Monitoraggio del peso degli stampati in PBS90PLA10

Nelle Tabelle 70 e 71 sono riportati, rispettivamente, i pesi degli stampati in PBS90PHBH10 prodotti con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083 e inserto in R-CPA.

**Tabella 70:** Peso degli stampati in PBS 1-3-5-7-9, prodotti con l'inserto in Acciaio 1.2083.

Numero iniezioni	Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]	Peso [g]
1	600 (624)	14,5710 ± 0,0001
3	600 (619)	14,6679 ± 0,0001
5	600 (607)	14,7191 ± 0,0001
7	600 (604)	14,7256 ± 0,0001
9	600 (610)	14,7325 ± 0,0001

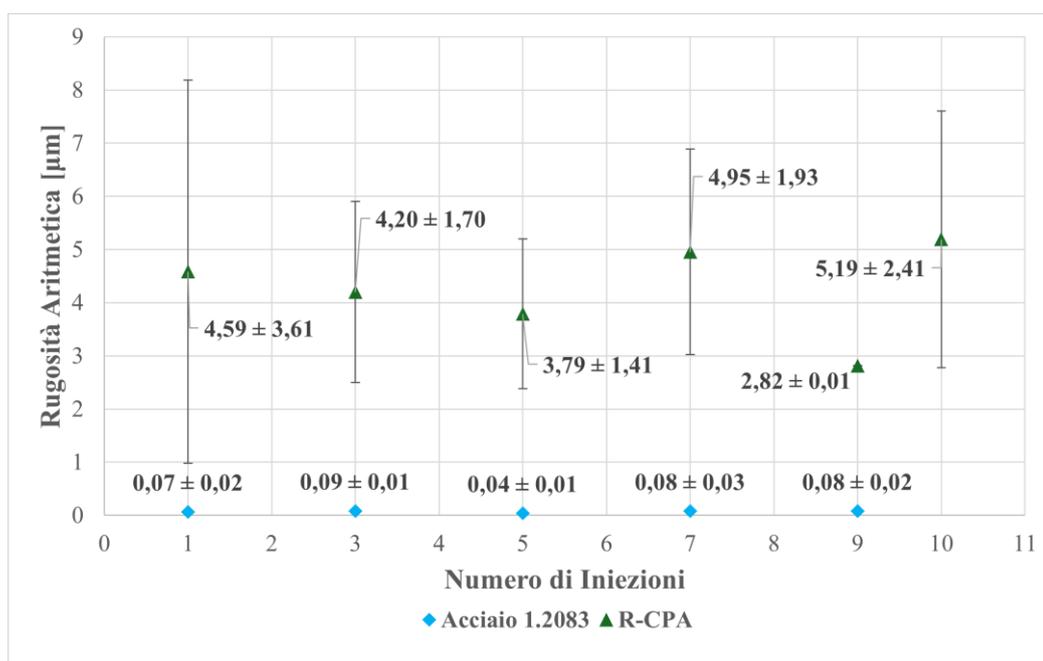
**Tabella 71:** Peso degli stampati in PBS90PLA10 1-3-5-7-9-10, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

Numero iniezioni	Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento), [bar]	Peso [g]
1	600 (603)	14,8489 ± 0,0001
3	600 (620)	14,8138 ± 0,0001
5	600 (620)	14,8138 ± 0,0001
7	600 (623)	14,8240 ± 0,0001
9	600 (626)	14,8234 ± 0,0001
10	600 (626)	14,8228 ± 0,0001

### 3.3.5.4 Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali

Nel grafico presentato in Figura 134 sono riportate le misure di rugosità della superficie degli stampati, realizzate utilizzando il rugosimetro dettagliato nel paragrafo 2.4.6.

Per le misura sono stati impiegati un range di misura di 80 µm, una corsa di scansione di 4,80 mm e una lunghezza di cut off di 0.800 mm.



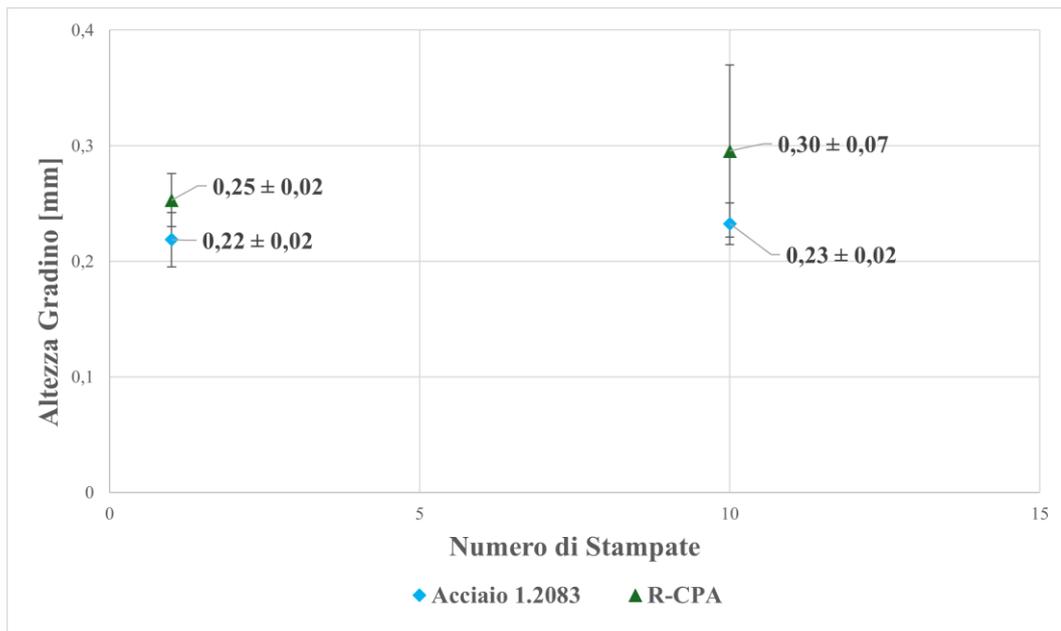
**Figura 134:** Misure di rugosità della superficie degli stampati in PBS90PLA10.

Dall'analisi dei valori riportati in Figura 134 è possibile notare che l'inserto prodotto mediante FFF in R-CPA non abbia permesso di riprodurre la rugosità superficiale dei pezzi stampati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083 nel range di cicli di processo valutati.

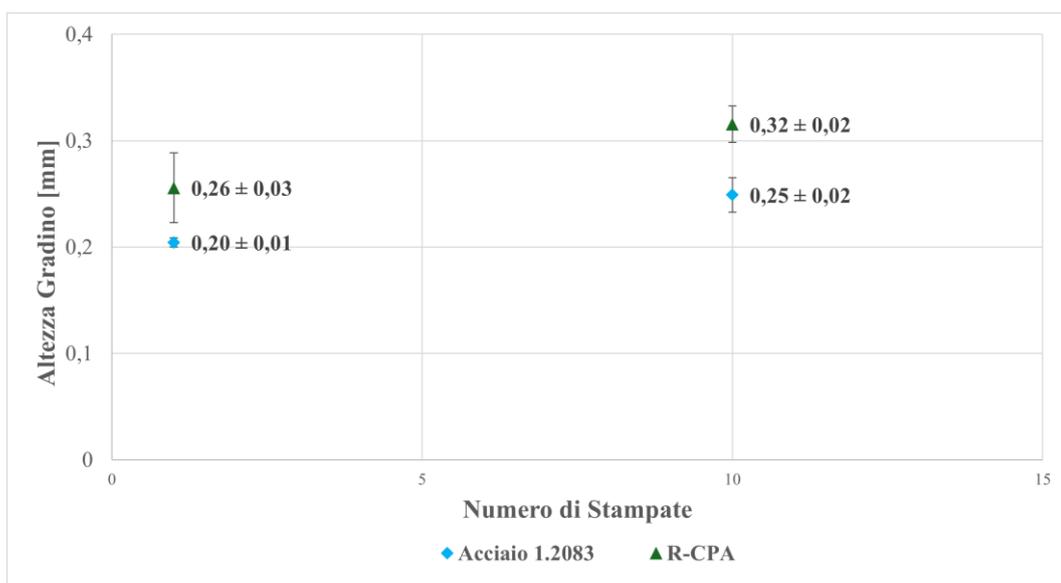
I valori di Ra misurati sulla superficie degli stampati riprodotti utilizzando l'inserto in R-CPA sono costantemente maggiori dei valori di Ra valutati per le parti prodotte con inserto in Acciaio 1.2083.

L'assenza di una tendenza costante dei valori di rugosità superficiale degli stampati realizzati con inserto in R-CPA potrebbe essere attribuita al verificarsi di fenomeni di usura superficiale dell'inserto tra cicli di processo consecutivi.

Nelle Figura 135 e 136 sono graficati i valori del profilo superficiale ottenuti mediante l'impiego del profilometro dettagliato nel paragrafo 2.4.5, rispettivamente, per le corse di misura "A" e "B", rappresentate nella Figura 92.



**Figura 135:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa "A" per il primo e il decimo stampato.



**Figura 136:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa "B" per il primo e il decimo stampato.

Esaminando i dati riportati in Figura 131 e Figura 132, è possibile constatare una differenza tra i valori delle corse “A” e “B” valutati sul primo e sul decimo stampato, dovuta al posizionamento della corsa “A” in prossimità del gate di iniezione.

Anche in questo caso, per gli stampati realizzati con inserto in R-CPA, l’altezza riprodotta con lo svolgimento del primo ciclo di stampaggio risulta inferiore dell’altezza valutata per il decimo, sia per la corsa “A” che per la corsa “B”: tale tendenza potrebbe essere attribuita all’usura dell’inserto, che provoca la riproduzione di particolari dalle dimensioni modificate come conseguenza della variazione delle dimensioni della cavità da riprodurre.

### 3.3.6 Produzione degli stampati ad iniezione in PP: parametri di processo

Nella Tabella 72 sono presentati i parametri di processo impiegati per l’iniezione del PP.

**Tabella 72:** Parametri di processo impiegati per l’iniezione del PP.

Parametri	Valori
Pressione di Iniezione	600 bar
Pressione di mantenimento	600 bar
Temperatura del fuso (PP)	170°C
Temperatura dello stampo	30°C
Tempo di mantenimento	10 s
Tempo di raffreddamento	15 s
Tempo ciclo	87 s
Tempo di riempimento	0,91s

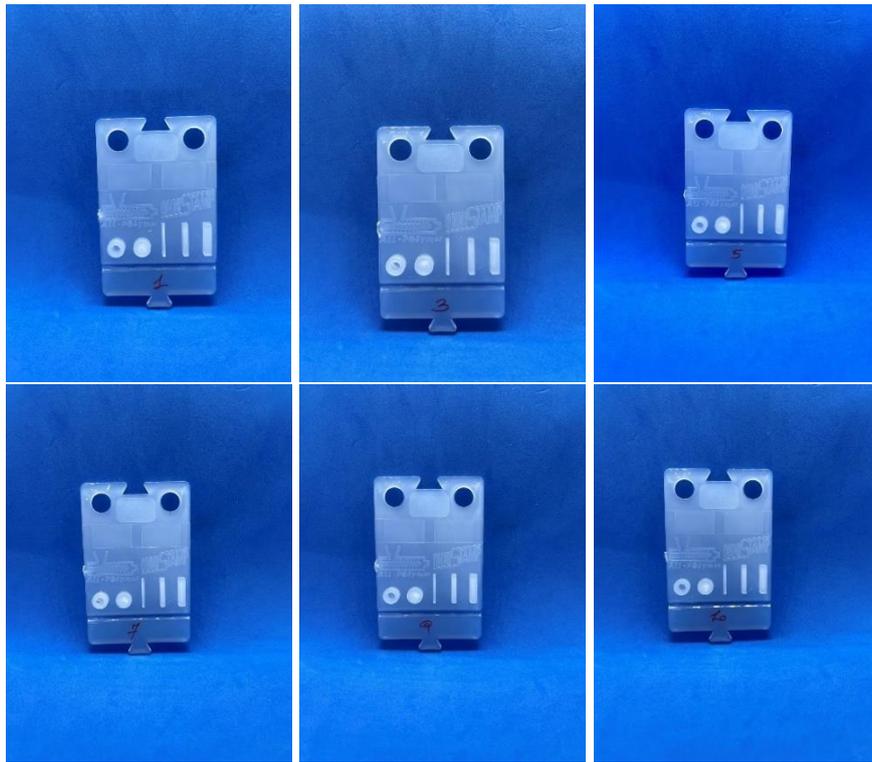
#### 3.3.6.1 Stampaggio ad iniezione di PP con inserto in Acciaio 1.2083

Nella Tabella 73 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti utilizzando l’inserto in Acciaio 1.2083.

**Tabella 73:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PP realizzati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	16,97	5,00	638	600	629
2	17,77	5,00	654	600	653
3	17,85	4,99	652	600	650
4	17,86	4,99	650	600	649
5	17,92	5,00	654	600	654
6	17,79	5,00	653	600	653
7	17,88	5,00	655	600	652
8	17,91	4,99	654	600	646
9	17,91	5,00	653	600	647
10	17,74	5,00	654	600	648

Nella Figura 137 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PP utilizzando lo stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 137:** Parti in PP stampate utilizzando l'inserto in Acciaio 1.2083.

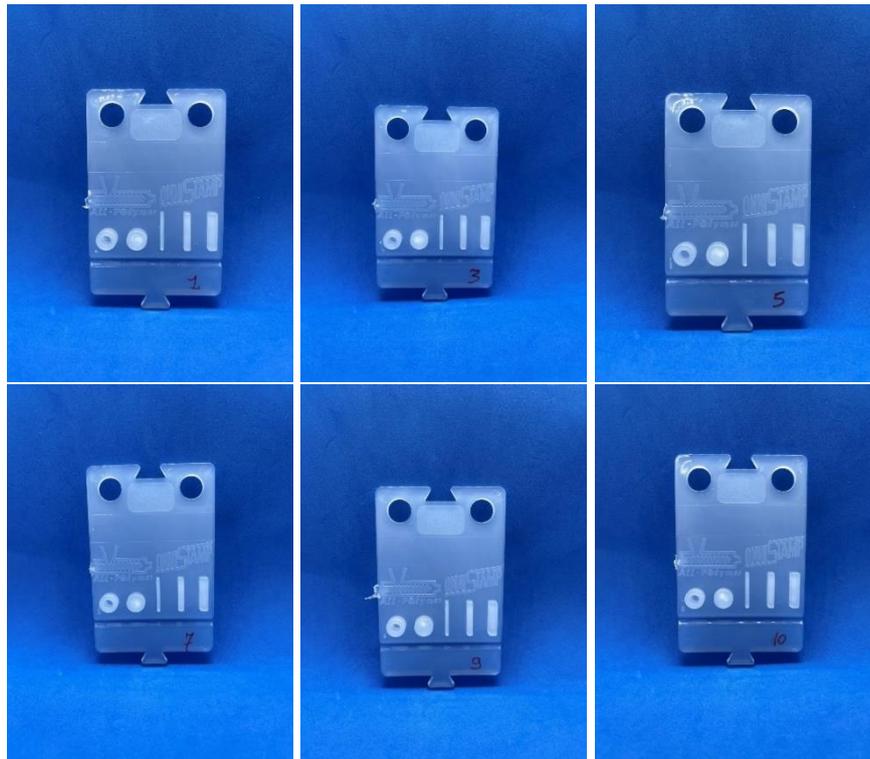
### 3.3.6.2 Stampaggio ad iniezione di PP con inserto in Ergal 7075

Nella Tabella 74 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti utilizzando l'inserto in lega di alluminio Ergal 7075.

**Tabella 74:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PP realizzati con stampo dotato di inserto in lega di alluminio Ergal 7075.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	17,68	5,00	654	600	650
2	17,68	5,01	654	600	649
3	17,60	5,00	650	600	646
4	17,61	5,00	649	600	644
5	17,58	4,99	649	600	644
6	17,58	4,99	649	600	644
7	17,59	5,00	647	600	641
8	17,56	5,00	644	600	638
9	17,58	5,00	644	600	640
10	17,50	5,00	642	600	637

Nella Figura 138 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PP utilizzando lo stampo dotato di inserto in lega d'alluminio Ergal 7075.



**Figura 138:** Parti in PP stampate utilizzando l'inserto in lega d'alluminio Ergal 7075.

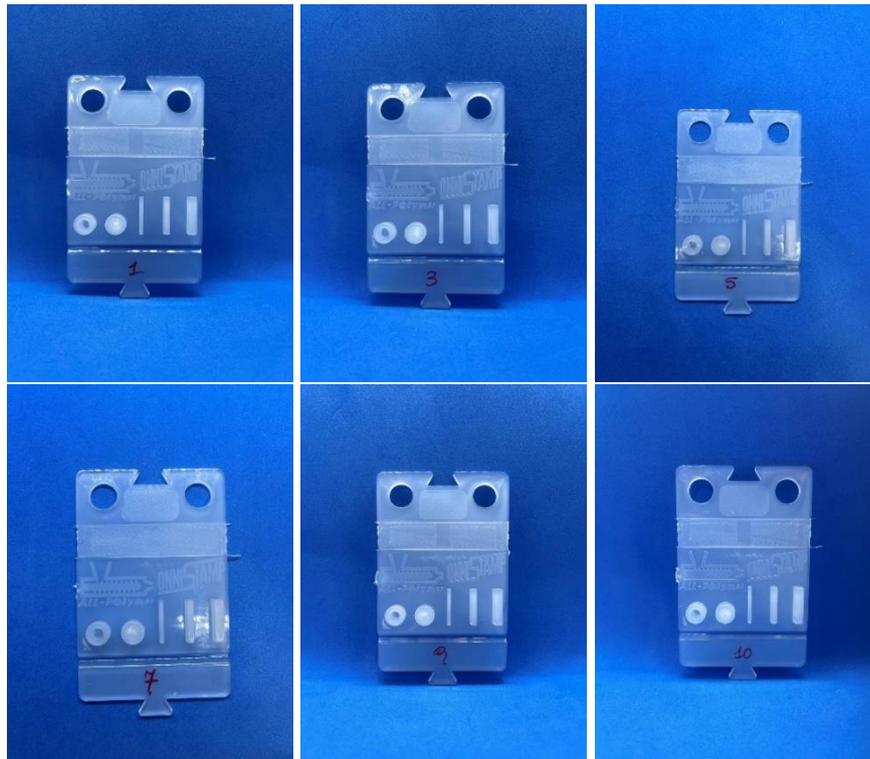
### 3.3.6.3 Stampaggio ad iniezione di PP con inserto prodotto in R-CPA

Nella Tabella 75 sono riportati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti utilizzando l'inserto in R-CPA.

**Tabella 75:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PP eseguiti con stampo fornito di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	17,76	5,00	650	600	648
2	17,76	5,01	653	600	649
3	17,76	5,00	653	600	650
4	17,81	5,00	654	600	652
5	17,80	4,99	653	600	652
6	17,82	5,00	655	600	652
7	17,61	5,00	652	600	646
8	17,73	5,00	654	600	650
9	17,71	5,00	654	600	650
10	17,73	5,00	646	600	641

Nella Figura 139 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PP utilizzando lo stampo dotato di inserto in R-CPA, prodotto mediante FFF.



**Figura 139:** Parti in PP stampate utilizzando l'inserto in R-CPA.

L'ispezione al microscopio ottico condotta sulla superficie degli stampati ha rilevato la presenza di isolate porzioni di inserto asportate nella zona laterale della superficie, in prossimità della zona di alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserto nello stampo, come presentato in Figura 140, probabile conseguenza dell'usura dell'inserto provocata dai continui cicli di stampaggio.



**Figura 140:** Porzioni di inserto asportate rilevate nella zona laterale della superficie degli stampati riprodotta.

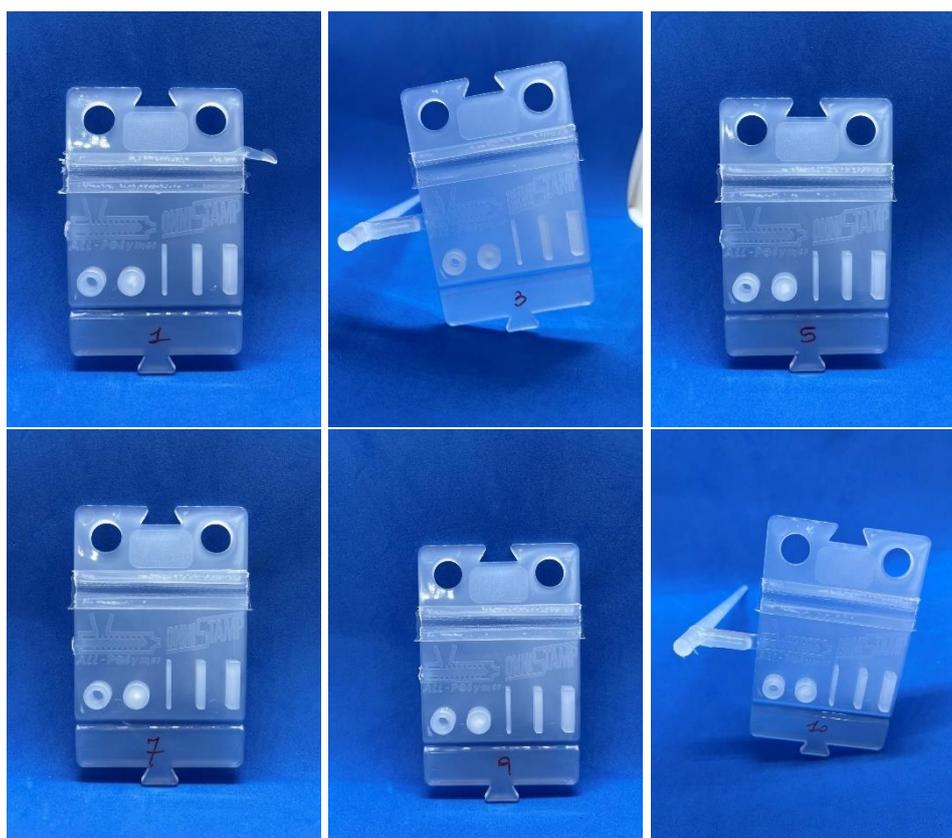
#### 3.3.6.4 Stampaggio ad iniezione di PP con inserto "Zipper" prodotto in R-CPA

Nella Tabella 76 sono presentati i parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio eseguiti dotando lo stampo dell'inserto "Zipper", prodotto in R-CPA e sottoposto al medesimo processo produttivo ottimizzato.

**Tabella 76:** Parametri di processo per i 10 cicli di stampaggio ad iniezione di PP con stampo dotato di inserto “Zipper” prodotto mediante FFF in R-CPA.

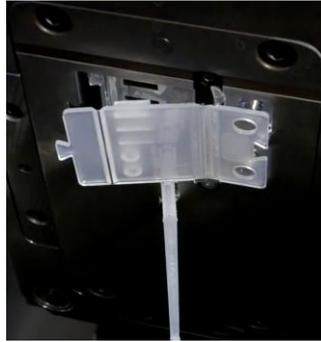
Numero Iniezioni	Volume Iniezione [cm <sup>3</sup> ]	Volume commutazione [cm <sup>3</sup> ]	Valore di punta pressione iniezione [bar]	Pressione di mantenimento applicata [bar]	Valore cresta pressione di mantenimento [bar]
1	17,54	5,00	647	600	644
2	17,57	5,01	649	600	644
3	17,57	5,00	652	600	649
4	17,59	5,00	654	600	649
5	17,65	5,00	653	600	648
6	17,65	5,00	653	600	649
7	17,61	5,00	653	600	648
8	17,62	5,00	654	600	649
9	17,61	5,01	654	600	638
10	17,41	5,00	647	600	646

Nella Figura 141 sono presentati gli stampati 1-3-5-7-9-10, prodotti in PP utilizzando lo stampo dotato di inserto “Zipper” in R-CPA, prodotto mediante FFF.



**Figura 141:** Parti in PP stampate utilizzando l’inserto “Zipper” prodotto in R-CPA.

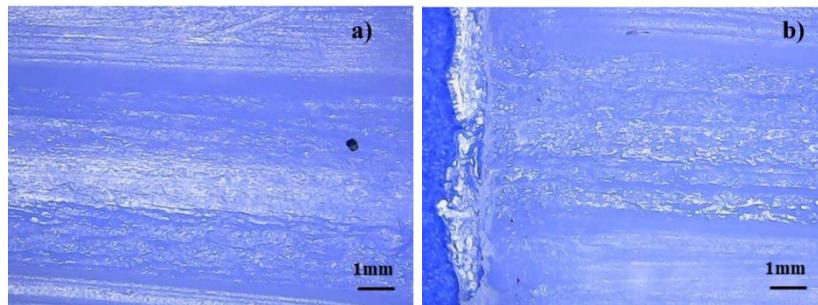
Per i soli cicli di stampaggio 1 e 2 è stato necessario rimuovere manualmente le parti stampate all’apertura dello stampo, poiché i pezzi sono rimasti adesi nella zona di alloggiamento delle viti a causa della formazione di bave, come mostrato in Figura 142.



**Figura 142:** La formazione di bave nella zona di alloggiamento delle viti ha richiesto l'estrazione manuale dei primi due stampati utilizzando l'inserto "Zipper".

Inoltre, è possibile notare la formazione di bolle al di sotto della superficie dello stampato, nelle porzioni adiacenti alla cavità riprodotta dalla cerniera dell'inserto.

L'ispezione al microscopio ottico ha rivelato la presenza di porzioni di inserto asportate in corrispondenza della valle riprodotta negli stampati, come mostrato in Figura 143 a), e nella zona laterale della superficie degli stampati, come riportato in Figura 143 b): tale fenomeno potrebbe essere imputato al verificarsi dell'usura dell'inserto con l'esecuzione dei successivi cicli di stampaggio.



**Figura 143:** Asportazione di porzioni di inserto nella zona della valle (a) e nella zona laterale della superficie degli stampati (b).

### 3.3.6.5 Monitoraggio del peso degli stampati in PP

Nelle Tabelle 77 – 79 sono riportati, rispettivamente, i pesi degli stampati in PP prodotti con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083, in Ergal 7075 e in R-CPA.

**Tabella 77:** Peso degli stampati in PP 1-3-5-7-9-10, prodotti con l'inserto in Acciaio 1.2083.

Numero iniezioni	Pressione di	Peso [g]
	mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]	
1	600 (629)	10,4682 ± 0,0001
3	600 (650)	10,4765 ± 0,0001
5	600 (654)	10,4794 ± 0,0001
7	600 (652)	10,4764 ± 0,0001
9	600 (647)	10,4692 ± 0,0001
10	600 (648)	10,4855 ± 0,0001

**Tabella 78:** Peso degli stampati in PP 1-3-5-7-9-10, prodotti usando l'inserto in Ergal 7075.

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (650)	10,3681 ± 0,0001
3	600 (646)	10,3659 ± 0,0001
5	600 (644)	10,3837 ± 0,0001
7	600 (641)	10,3626 ± 0,0001
9	600 (640)	10,3737 ± 0,0001
10	600 (637)	10,3687 ± 0,0001

**Tabella 79:** Peso degli stampati in PP 1-3-5-7-9-10, prodotti utilizzando lo stampo ad iniezione dotato di inserto prodotto mediante FFF in R-CPA.

<b>Numero iniezioni</b>	<b>Pressione di mantenimento (Valore cresta pressione di mantenimento) [bar]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	600 (648)	10,4662 ± 0,0001
3	600 (650)	10,4747 ± 0,0001
5	600 (652)	10,4776 ± 0,0001
7	600 (648)	10,4799 ± 0,0001
9	600 (650)	10,4800 ± 0,0001
10	600 (641)	10,4733 ± 0,0001

Valutando il peso medio degli stampati realizzati a parità di condizioni operative, le parti prodotte con l'inserto in R-CPA hanno ottenuto un peso medio più prossimo a quello delle parti prodotte con l'inserto in Acciaio 1.2083 (rispettivamente  $10,475 \pm 0,005$  g e  $10,476 \pm 0,006$ ), mentre per i pezzi prodotti con l'inserto in lega d'alluminio Ergal 7075 è stato ottenuto un peso medio leggermente inferiore ( $10,370 \pm 0,070$  g).

L'ottenimento di un peso leggermente inferiore per gli stampati prodotti con inserto in Ergal 7075 potrebbe essere dovuto alla differente conducibilità termica degli inserti (paragrafo 2.1.5 e 2.1.6): la lega di alluminio utilizzata possiede una conducibilità termica significativamente superiore rispetto a quella posseduta dall'acciaio.

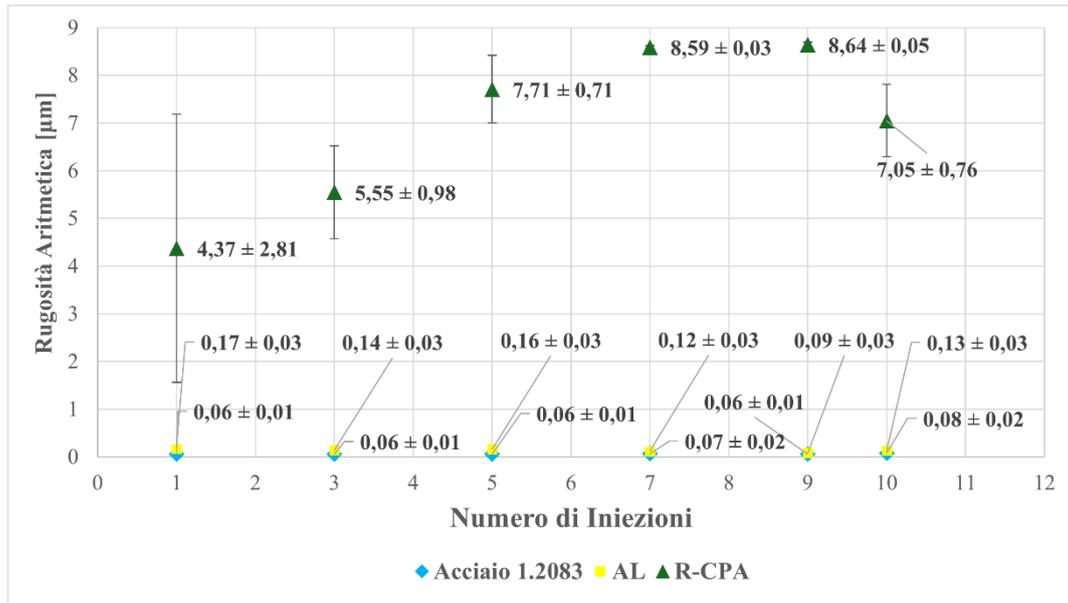
Per questo motivo, l'inserto realizzato in alluminio, dopo esser messo a contatto con il fuso polimerico ad elevata temperatura, dissipa il calore più rapidamente durante la fase di raffreddamento del materiale iniettato.

Quindi, il materiale polimerico tende a solidificarsi più velocemente, probabilmente andando incontro ad un ritiro maggiore, riducendo le dimensioni dei particolari analizzati (altezza del gradino della superficie riprodotta) e il peso della parte stampata ad iniezione.

### 3.3.6.6 Caratterizzazione morfologica degli stampati: misure di rugosità e profilo superficiali

Nel grafico presentato in Figura 144 sono riportate le misure di rugosità della superficie degli stampati, realizzate utilizzando il rugosimetro dettagliato nel paragrafo 2.4.6.

Per le misura sono stati impiegati un range di misura di 80  $\mu\text{m}$ , una corsa di scansione di 4,80 mm e una lunghezza di cut off di 0.800 mm.



**Figura 144:** Misure di rugosità della superficie degli stampati in PP.

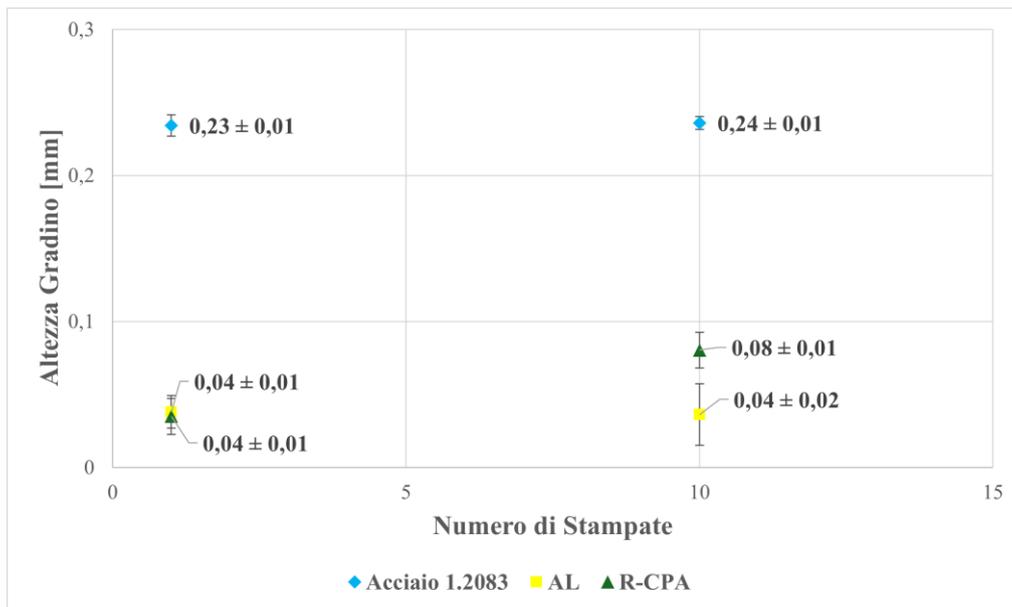
Dall'analisi dei valori riportati in Figura 144 è possibile notare che l'inserto prodotto mediante *Fused Filament Fabrication* in R-CPA non ha permesso di riprodurre la rugosità superficiale dei pezzi stampati con stampo dotato di inserto in Acciaio 1.2083 nel range di cicli di processo valutati.

I valori di Ra misurati sulla superficie degli stampati prodotti mediante inserto in R-CPA sono significativamente maggiori dei valori di Ra registrati per le parti prodotte con inserto in Acciaio 1.2083 o con inserto in Ergal 7075.

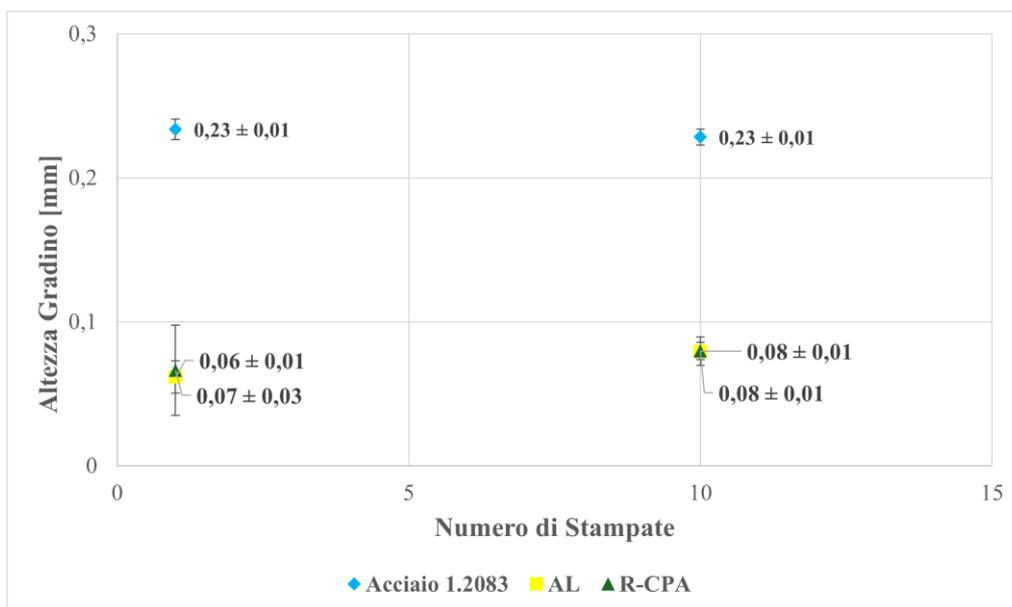
Per gli stampati prodotti con inserto in R-CPA, inizialmente i valori di Ra seguono una tendenza crescente: probabilmente, con le successive stampate, la qualità superficiale dell'inserto si è deteriorata, come conseguenza del verificarsi di fenomeni d'usura.

Tuttavia, tale tendenza si interrompe con l'ultimo stampato, che registra valori di Ra leggermente inferiori, probabilmente in seguito all'appianamento dei picchi del profilo superficiale dell'inserto.

Nelle Figure 145 e 146 sono graficati i valori del profilo superficiale ottenuti mediante l'impiego del profilometro dettagliato nel paragrafo 2.4.5, rispettivamente, per le corse di misura "A" e "B", rappresentate nella Figura 92.



**Figura 145:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa "A" per il primo e il decimo stampato.



**Figura 146:** Valori del profilo superficiale valutati per la corsa "B" per il primo e il decimo stampato.

Analizzando i valori di altezza riprodotti, presentati nelle Figura 140 e Figura 141, è stato possibile verificare che i valori misurati per stampati ottenuti con inserti in Ergal 7075 e R-CPA risultano inferiori rispetto a quelli di riferimento misurati per stampati ottenuti con inserto in Acciaio 1.2083.

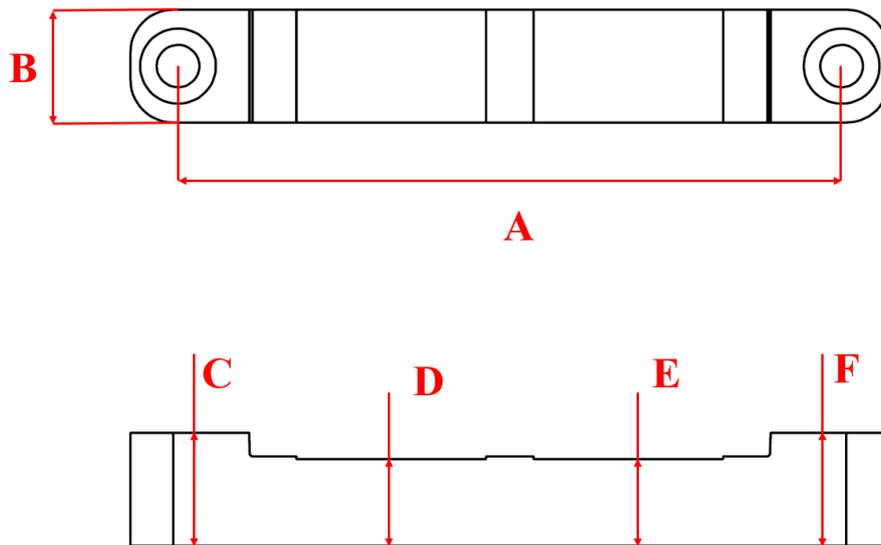
Anche in questo caso, per gli stampati realizzati con inserto in R-CPA, l'altezza riprodotta con l'esecuzione del primo ciclo di stampaggio risulta inferiore dell'altezza misurata per il decimo, sia per la corsa "A" che per la corsa "B": tale effetto potrebbe essere conseguente all'usura dell'inserto, che potrebbe aver subito una modifica della cavità riprodotta a causa

dell'utilizzo per più cicli di stampaggio consecutivi per l'iniezione di fusi polimerici dalla temperatura progressivamente crescente.

### 3.4. Monitoraggio delle dimensioni degli inserti

In questa sezione verrà approfondito il monitoraggio delle dimensioni degli inserti durante il loro processo produttivo e a valle dei cicli di produzione degli stampati.

Nella Figura 147 sono riportate le denominazioni delle lunghezze misurate che verranno riportate in Tabella per gli inserti realizzati in F-AOM, F-ANY, F-G3D TT80X60, F-G3D TT50X30, R-CPA, G-PLA.



**Figura 147:** Indicazioni delle quote dell'inserto valutate durante il processo produttivo degli inserti prodotti mediante FFF e dopo l'impiego nei processi di stampaggio.

Nelle Tabelle 80 – 89, sono state utilizzate delle sigle per descrivere lo stato dell'inserto, in particolare:

- “AP” si riferisce alle dimensioni nello stato “as printed” per gli inserti prodotti mediante *Fused Filament Fabrication*, mentre per gli inserti in materiale metallico indica lo stato *ready – to – use*;
- “TT” dopo l'esecuzione del trattamento termico;
- “L” dopo il processo di levigatura;
- “10s” dopo l'esecuzione dei primi 10 cicli di stampaggio ad iniezione che, per tutti gli inserti, corrispondono ai cicli di stampaggio di LDPE, utilizzando una pressione di mantenimento variabile per i primi 6 stampati e costante per i successivi 4 cicli;
- “20s” dopo l'esecuzione di 20 cicli di stampaggio ad iniezione, corrispondenti per tutti gli inserti impiegati, all'iniezione del PBS, applicando una pressione di mantenimento costante;

- “60s” dopo l’esecuzione di 60 cicli di stampaggio ad iniezione; tra gli inserti prodotti per FFF, solo l’inserto in R-CPA è stato impiegato per il maggior numero di cicli di produzione, venendo impiegato per l’iniezione dei blend e del PP oltre al PBS e LDPE.

### 3.4.1. Dimensioni dell’inserto in Acciaio 1.2083

Nella Tabella 80 sono riportati i valori medi delle quote espresse nella Figura 147 per l’inserto in Acciaio 1.2083.

Per l’inserto in acciaio sono state riportate le dimensioni dell’inserto nelle condizioni di inserto pronto all’utilizzo.

**Tabella 80:** Valori medi delle quote dell’inserto in Acciaio 1.2083.

Quote dell’inserto	Stato dell’inserto
	AP [mm]
A	79,950 ± 0,006
B	11,900 ± 0,006
C	11,992 ± 0,004
D	9,192 ± 0,004
E	9,192 ± 0,004
F	11,992 ± 0,004

### 3.4.2. Dimensioni dell’inserto in Ergal 7075 (“AL”)

Nella Tabella 81 sono riportate i valori medi delle quote espresse nella Figura 147 per l’inserto in lega di alluminio Ergal 7075 (“AL”).

Per l’inserto in Ergal 7075 sono state riportate le dimensioni dell’inserto nelle condizioni di inserto pronto all’utilizzo.

**Tabella 81:** Valori medi delle quote dell’inserto in lega di alluminio Ergal 7075.

Quote dell’inserto	Stato dell’inserto
	AP [mm]
A	79,777 ± 0,033
B	11,910 ± 0,008
C	11,893 ± 0,005
D	9,380 ± 0,014
E	9,380 ± 0,014
F	11,980 ± 0,014

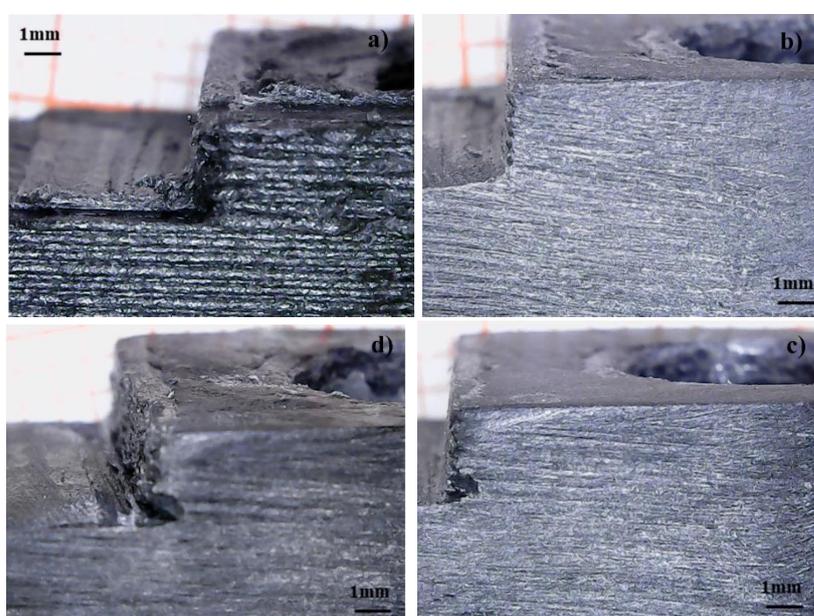
### 3.4.3. Dimensioni dell’inserto in F-AOM

Nella Tabella 82 sono riportate le dimensioni dell’inserto in F-AOM.

**Tabella 82:** Valori medi delle quote dell'inserto prodotto per FFF in F-AOM.

Quote dell'inserto	Stato dell'inserto			
	AP [mm]	L [mm]	10s [mm]	20s [mm]
A	80,697 ± 0,085	79,953 ± 0,009	79,963 ± 0,005	79,986 ± 0,030
B	12,740 ± 0,141	11,893 ± 0,025	11,897 ± 0,005	11,898 ± 0,025
C	12,188 ± 0,107	11,827 ± 0,021	11,810 ± 0,008	11,772 ± 0,040
D	9,363 ± 0,049	9,123 ± 0,005	9,080 ± 0,008	9,062 ± 0,016
E	9,363 ± 0,049	9,123 ± 0,005	9,080 ± 0,008	9,062 ± 0,016
F	12,352 ± 0,091	11,873 ± 0,017	11,863 ± 0,009	11,858 ± 0,026

L'ispezione al microscopio ottico dopo le stampate ha confermato il progressivo deterioramento della porzione di inserto laterale per usura, in prossimità dell'alloggiamento delle viti, per il posizionamento dell'inserto nello stampo, come mostrato in Figura 148.



**Figura 148:** Zona laterale dell'inserto nello stato "as printed" (a), dopo levigatura (b), dopo le prime dieci stampate (c) e dopo le venti stampate (d).

#### 3.4.4. Dimensioni dell'inserto in R-CPA

Nella Tabella 83 sono riportate le dimensioni dell'inserto in R-CPA registrate durante il processo produttivo dell'inserto.

**Tabella 83:** Valori medi delle quote dell'inserto prodotto per FFF in R-CPA.

Quote dell'inserto	Stato dell'inserto		
	AP [mm]	TT [mm]	L [mm]
A	80,587 ± 0,261	80,417 ± 0,103	79,130 ± 0,092
B	13,762 ± 0,139	13,707 ± 0,204	11,877 ± 0,009
C	12,500 ± 0,115	12,575 ± 0,015	11,980 ± 0,022
D	9,822 ± 0,045	9,923 ± 0,052	9,367 ± 0,025
E	9,822 ± 0,045	9,923 ± 0,052	9,367 ± 0,025
F	12,573 ± 0,068	12,680 ± 0,108	12,037 ± 0,019

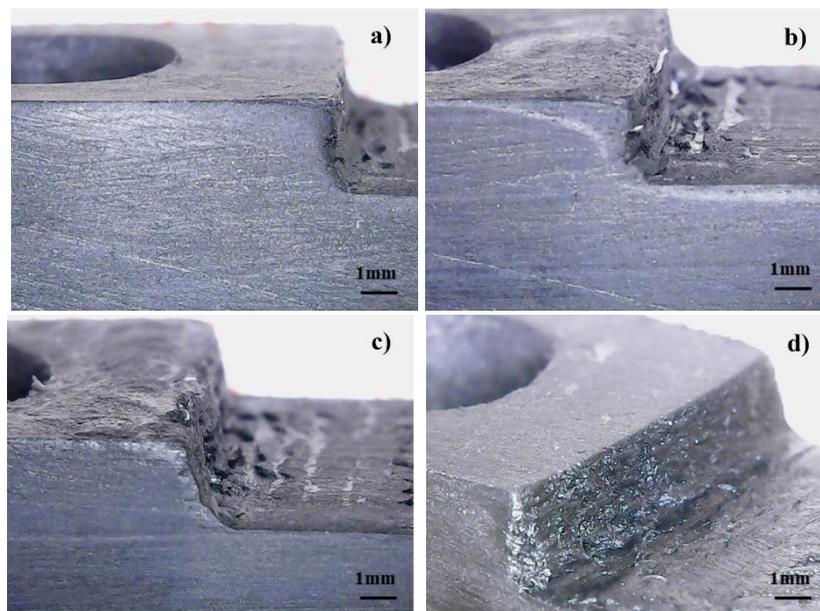
Nella Tabella 84 sono riportate le dimensioni dell'inserto in R-CPA rilevate dopo l'iniezione di LDPE ("10s"), dopo l'iniezione del PBS ("20s") e dopo l'iniezione del PP ("60s").

**Tabella 84:** Valori medi delle quote dell'inserto in R-CPA valutati dopo i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE, PBS e PP.

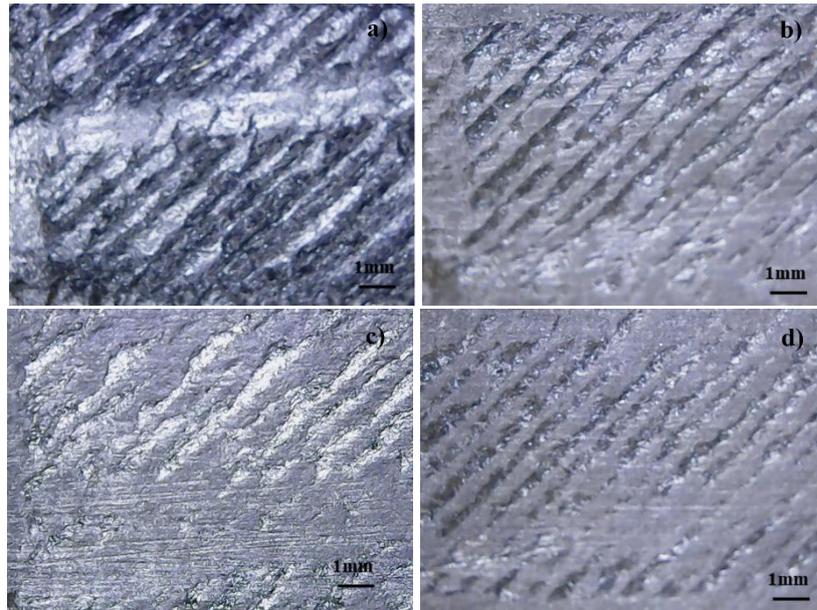
Quote dell'inserto	Stato dell'inserto		
	10s [mm]	20s [mm]	60s [mm]
A	79,163 ± 0,017	78,887 ± 0,005	78,870 ± 0,014
B	11,977 ± 0,005	11,969 ± 0,008	11,953 ± 0,005
C	11,823 ± 0,005	11,910 ± 0,008	12,007 ± 0,005
D	9,247 ± 0,009	9,260 ± 0,008	9,357 ± 0,017
E	9,247 ± 0,009	9,260 ± 0,008	9,357 ± 0,017
F	11,903 ± 0,005	11,910 ± 0,008	12,003 ± 0,005

L'ispezione al microscopio ottico ha evidenziato il deterioramento della porzione laterale dello stampo, in prossimità dell'alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserto nello stampo, come mostrato in Figura 149 a), b), c) e d), che riporta la porzione laterale, rispettivamente subito dopo levigatura, dopo 10, 30 e 60 stampate, e l'usura della porzione centrale della superficie dell'inserto, come riportato in Figura 150 a), Figura 150 b), Figura 150 c) e d).

Le prove di stampaggio realizzate sono state condotte impiegando lo stesso inserto: probabilmente, l'esecuzione dei successivi cicli di stampaggio ha portato a fenomeni di usura dell'inserto, modificandone la qualità della finitura superficiale della superficie esposta nello stampo e riprodotta dagli stampati.



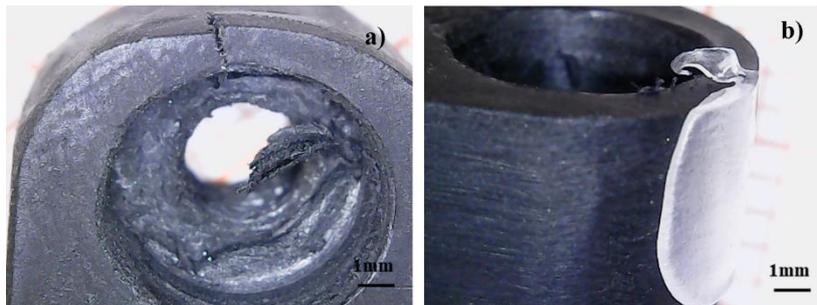
**Figura 149:** Porzione laterale dell'inserto dopo il processo di levigatura (a), dopo le prime 10 stampate (b), dopo 20 stampate (c) e dopo 60 stampate (d).



**Figura 150:** Usura della porzione centrale dell'inserto: confronto della superficie dopo la produzione mediante FFF (a), a valle del processo di levigatura (b), dopo l'esecuzione di 30 cicli di stampaggio ad iniezione (c), e, infine, dopo l'esecuzione di 60 cicli di stampaggio ad iniezione (d).

Inoltre, dopo il primo ciclo di stampaggio, al momento dell'estrazione dell'inserto dallo stampo, è stata notata la formazione di una piccola cricca in corrispondenza dell'alloggiamento delle viti, come mostrato in Figura 151 a).

La formazione di tale difetto, tuttavia, non ha compromesso la continuità del processo produttivo seppur abbia comportato la formazione di bava rimasta adesa alla superficie dell'inserto anche dopo l'estrazione dallo stampo, come mostrato in Figura 151 b).



**Figura 151:** Formazione di una cricca durante l'estrazione dell'inserto dallo stampo (a) che ha comportato la formazione di bave nei cicli di stampaggio successivi (b), senza compromettere l'estrazione continua ed automatizzata delle parti prodotte.

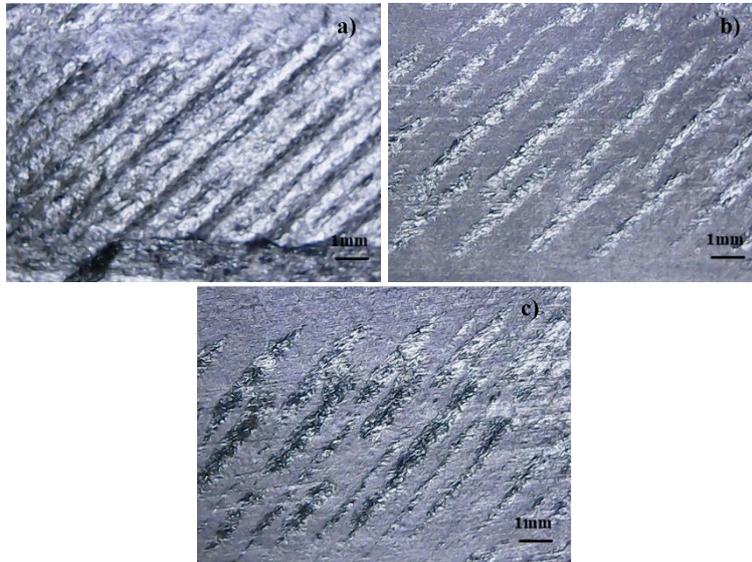
### 3.4.5. Dimensioni dell'inserto in F-ANY

Nella Tabella 85 sono riportate le quote dell'inserto in F-ANY.

**Tabella 85:** Valori medi delle quote dell'inserto prodotto per FFF in F-ANY.

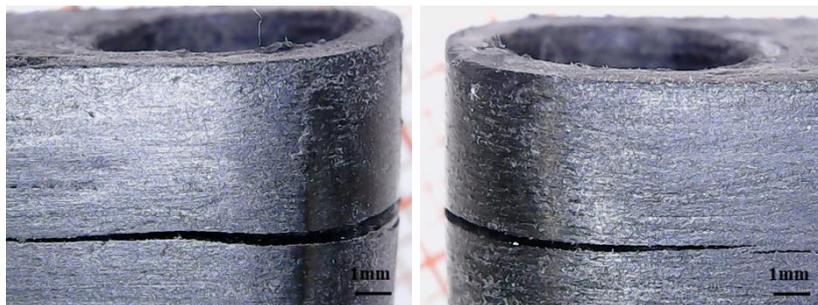
Quote dell'inserto	Stato dell'inserto			
	AP [mm]	L [mm]	10s [mm]	20s [mm]
A	81,007 ± 0,025	79,847 ± 0,067	79,697 ± 0,070	79,710 ± 0,055
B	12,72 ± 0,033	11,933 ± 0,017	11,917 ± 0,041	11,956 ± 0,005
C	12,23 ± 0,024	11,797 ± 0,005	11,590 ± 0,008	11,572 ± 0,048
D	9,367 ± 0,056	9,010 ± 0,008	8,84 ± 0,008	8,85 ± 0,006
E	9,367 ± 0,056	9,010 ± 0,008	8,84 ± 0,008	8,85 ± 0,006
F	12,250 ± 0,073	11,793 ± 0,005	11,600 ± 0,008	11,434 ± 0,059

L'ispezione al microscopio ottico ha evidenziato il deterioramento della porzione centrale della superficie dell'inserto, come mostrato in Figura 152, che riporta la superficie dell'inserto nelle condizioni "as printed", dopo levigatura, e dopo l'esecuzione di 20 cicli di stampaggio ad iniezione.



**Figura 152:** Porzione centrale della superficie dello stampato nelle condizioni "as printed" (a), dopo levigatura (b) e dopo 20 cicli di stampaggio ad iniezione (c).

Inoltre, con l'estrazione dell'inserto dopo l'esecuzione di 20 cicli di stampaggio ad iniezione, si è formata una cricca, partita dalla zona di alloggiamento delle viti per il posizionamento dell'inserto nello stampo, come riportato in Figura 153, che ha reso l'inserto inutilizzabile per successivi cicli produttivi.



**Figura 153:** Cricca formatasi al momento dell'estrazione dell'inserto dallo stampo.

### 3.4.6. Dimensioni dell'inserto in F-G3D TT80X60

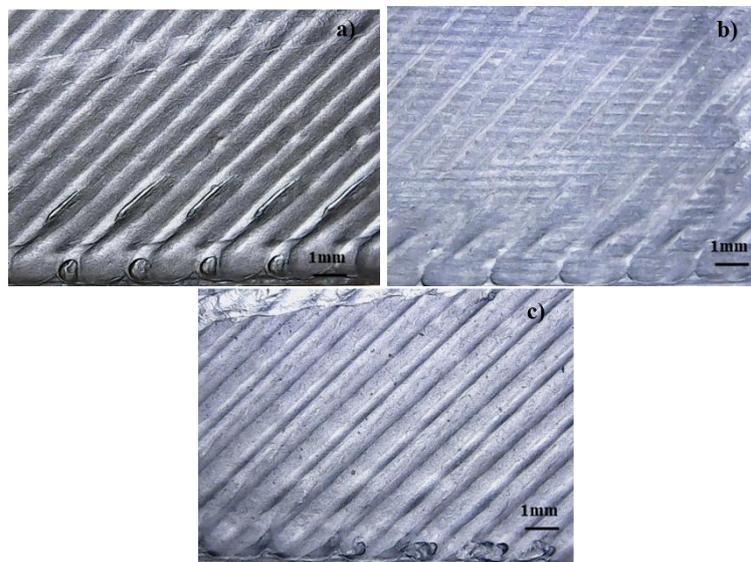
Nella Tabella 86 sono riportate le quote dell'inserto in F-G3D TT80X60.

**Tabella 86:** Valori medi delle quote dell'inserto prodotto per FFF in F-G3D TT80X60.

Quote dell'inserto	Stato dell'inserto			
	AP [mm]	TT [mm]	L [mm]	10s [mm]
A	80,582 ± 0,056	78,947 ± 0,100	78,888 ± 0,106	78,893 ± 0,005
B	12,547 ± 0,070	12,450 ± 0,107	11,824 ± 0,014	11,953 ± 0,005
C	12,607 ± 0,135	13,010 ± 0,051	12,696 ± 0,094	12,200 ± 0,012
D	9,167 ± 0,034	9,707 ± 0,073	9,596 ± 0,010	9,423 ± 0,005
E	9,167 ± 0,034	9,707 ± 0,073	9,596 ± 0,100	9,423 ± 0,005
F	12,380 ± 0,095	13,011 ± 0,149	12,730 ± 0,072	12,157 ± 0,005

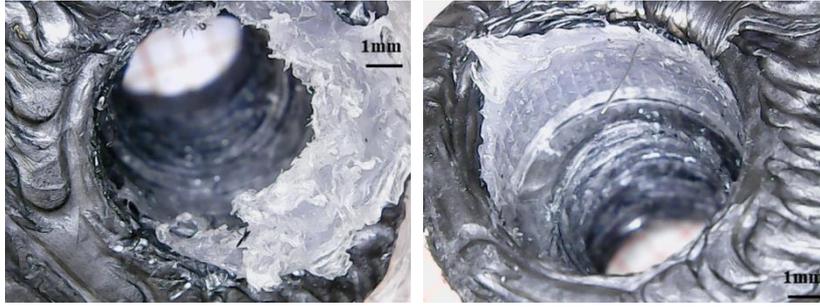
Nella Figura 154 è riportata la finitura superficiale della porzione centrale dell'inserto dopo la realizzazione mediante FFF, dopo la fase di levigatura e dopo le 10 stampate a cui l'inserto è stato sottoposto.

Si evidenziano porzioni di inserto usurate limitate e ristrette, confinate nelle zone periferiche di deposizione: la formazione di piccole cavità potrebbe essere dovuta all'applicazione di sollecitazioni ripetute e, per le prime dieci stampate, di intensità variabile nei cicli successivi di stampaggio, agenti su micro-imperfezioni della superficie, che provocano una concentrazione locale delle sollecitazioni.



**Figura 154:** Superficie centrale dell'inserto nello stato "as printed" (a), dopo l'esecuzione della levigatura (b) e dopo i 10 cicli di stampaggio (c).

L'ispezione al microscopio ottico ha rivelato la presenza di bave all'interno dei fori per l'alloggiamento delle viti, come presentato in Figura 155, che non hanno ostacolato l'estrazione automatizzata degli stampati al momento dell'apertura dello stampo.



**Figura 155:** Formazione di bave nella zona di alloggiamento delle viti.

### 3.4.7. Dimensioni dell'inserto in F-G3D TT50X30

Nella Tabella 87 sono riportate le quote dell'inserto in F-G3D TT50X30 valutate durante la fase di realizzazione dell'inserto.

**Tabella 87:** Valori medi delle quote dell'inserto in F-G3D TT50X30 rilevate durante il processo produttivo.

Quote dell'inserto	Stato dell'inserto		
	AP [mm]	TT [mm]	L [mm]
A	80,137 ± 0,054	79,155 ± 0,044	78,970 ± 0,120
B	12,677 ± 0,045	12,590 ± 0,044	12,113 ± 0,043
C	12,780 ± 0,057	13,096 ± 0,094	12,277 ± 0,008
D	9,143 ± 0,033	9,540 ± 0,070	9,103 ± 0,021
E	9,143 ± 0,033	9,540 ± 0,070	9,103 ± 0,021
F	12,523 ± 0,110	12,967 ± 0,023	12,182 ± 0,060

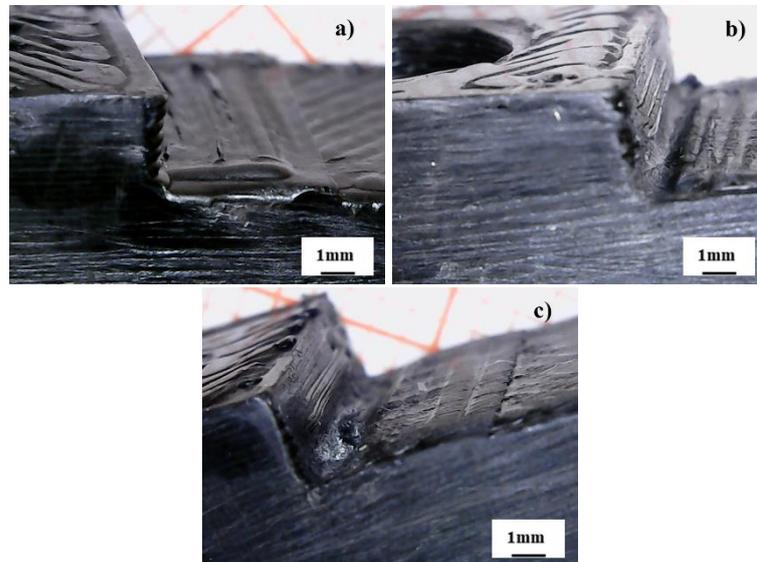
Nella Tabella 88 sono presentate le quote dell'inserto in F-G3D TT50X30 rilevate dopo i cicli di stampaggio di LDPE ("10s") e PBS ("20s").

**Tabella 88:** Valori medi delle quote dell'inserto in F-G3D TT50X30 rilevate dopo i cicli di stampaggio.

Quote dell'inserto	Stato dell'inserto	
	10s [mm]	20s [mm]
A	79,435 ± 0,012	79,953 ± 0,009
B	12,134 ± 0,012	12,162 ± 0,008
C	12,163 ± 0,050	12,010 ± 0,004
D	9,097 ± 0,005	8,937 ± 0,009
E	9,097 ± 0,005	8,937 ± 0,009
F	12,167 ± 0,012	12,161 ± 0,008

L'ispezione al microscopio ottico ha evidenziato l'usura progressiva della porzione laterale della superficie dello stampato, nella zona in prossimità dell'alloggiamento delle viti, come mostrato nella Figura 156, in cui si compara la porzione laterale della superficie dell'inserto nelle condizioni "as printed", dopo lo svolgimento di 10 stampe e dopo l'esecuzione delle 20 stampe.

In quest'ultimo caso si evidenzia la formazione di una cavità, in seguito all'usura della porzione laterale di inserto con i successivi cicli di stampaggio.



**Figura 156:** Superficie laterale dell'inserto nelle condizioni "as printed" (a), dopo lo svolgimento di 10 cicli di stampaggio ad iniezione (b) e dopo l'esecuzione di 20 cicli di stampaggio (c).

### 3.4.8. Dimensioni dell'inserto in G-PLA

Nella Tabella 89 sono riportate le quote dell'inserto in G-PLA.

**Tabella 89:** Valori medi delle quote dell'inserto prodotto per FFF in G-PLA.

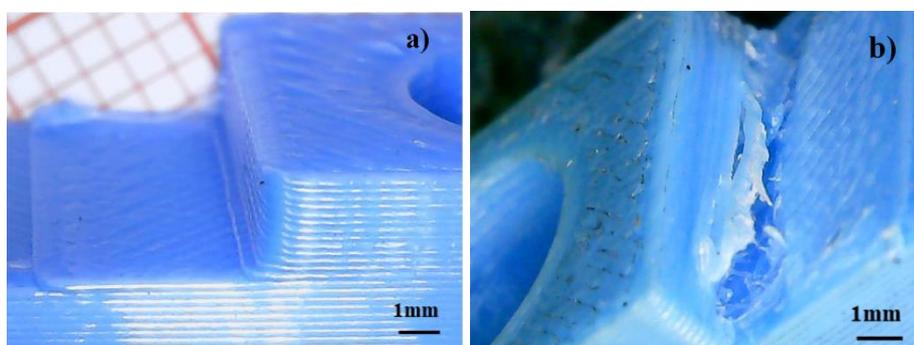
Quote dell'inserto	Stato dell'inserto		
	AP [mm]	10s [mm]	20s [mm]
A	79,910 ± 0,008	79,817 ± 0,012	79,786 ± 0,022
B	12,193 ± 0,005	11,963 ± 0,005	11,948 ± 0,010
C	12,717 ± 0,012	12,480 ± 0,008	12,080 ± 0,006
D	10,640 ± 0,004	10,217 ± 0,012	9,192 ± 0,010
E	10,64 ± 0,004	10,217 ± 0,012	9,192 ± 0,010
F	12,957 ± 0,005	12,100 ± 0,008	12,072 ± 0,007

Al momento dell'estrazione dell'inserto dallo stampo, dopo l'esecuzione delle 20 stampate, è stata notata la perdita di regolarità della superficie laterale dell'inserto, in prossimità della zona di alloggiamento delle viti, come mostrato nella Figura 157.



**Figura 157:** Inserto in G-PLA dopo l'esecuzione di 20 cicli di stampaggio ad iniezione.

Nella Figura 158 sono riportate le micrografie eseguite al microscopio ottico sulla superficie nelle condizioni "as printed" e dopo l'esecuzione dei 20 cicli di stampaggio ad iniezione.



**Figura 158:** Superficie laterale dell'inserto nelle condizioni "as printed" (a) e dopo l'esecuzione di 20 cicli di stampaggio ad iniezione (b).

### 3.4.9. Monitoraggio delle dimensioni degli inserti: analisi dei dati

Analizzando i dati riportati nelle Tabelle 80 – 89, è possibile constatare che per i materiali commerciali R-CPA, F-G3D TT50X30 e F-G3D TT80X60, l'esecuzione del trattamento termico comporta un'espansione dell'altezza degli inserti (asse Z, quote C, D, E, F) e un restringimento delle dimensioni dell'inserto nella lunghezza (asse X, quota A) e nella larghezza (asse Y, quota B).

Tali cambiamenti dimensionali sono dovuti al rilascio degli stress introdotti con il processo di FFF, a causa degli stress meccanici e termici a cui il filamento viene sottoposto durante il processo di deposizione. [83, 100]

Infatti, durante il processo di FFF, il filamento subisce uno stress di compressione nella direzione dello spessore dei layer e di stiramento nella lunghezza e, inoltre, con la deposizione il filamento inizia a raffreddarsi dalla temperatura di estrusione fino a circa la temperatura della camera.

Quando il successivo layer viene depositato, la temperatura del layer sottostante cresce nuovamente ad una temperatura prossima a quella di estrusione, comportandone un'improvvisa espansione, che introduce stress residui di tipo termico. [100]

Dunque, le deformazioni registrate durante il processo produttivo vengono mantenute nel layer a causa del rapido raffreddamento delle parti depositate.

Con l'esecuzione del trattamento termico, tali sollecitazioni residue possono essere rilasciate attraverso un'espansione dello spessore del filamento e un restringimento nella lunghezza e nella larghezza.

A parità di materiale considerato (F-G3D), l'esecuzione di un trattamento termico a temperatura maggiore e per una durata più estesa permette di realizzare un effetto di rilassamento maggiore, portando al restringimento delle dimensioni lungo gli assi X e Y e ad espansioni delle dimensioni rilevate lungo l'asse Z più accentuate. [83]

Per quanto riguarda l'inserto in F-AOM, l'esecuzione dei cicli di stampaggio porta ad una diminuzione delle quote di altezza dell'inserto (C, D, E, F) e un leggero aumento delle quote di lunghezza (A) e larghezza (B), probabilmente generato a causa delle sollecitazioni meccaniche di compressione a cui l'inserto viene sottoposto in esercizio e all'instaurarsi di fenomeni di usura della superficie dell'inserto con i successivi cicli di stampaggio ad iniezione.

Per quanto concerne l'inserto in RCPA, si osservano differenti tendenze. I primi dieci cicli di stampaggio portano ad un decremento delle quote relative all'altezza dell'inserto e ad un leggero incremento dei valori medi di lunghezza e larghezza misurati, probabilmente dovuto alle sollecitazioni meccaniche di compressione che l'inserto sperimenta durante i cicli di stampaggio ad iniezione e a causa di fenomeni d'usura.

Dopo il raggiungimento dei 30 e dei 60 stampati riprodotti, si osserva l'incremento di tutte le quote d'altezza dell'inserto ed una moderata riduzione delle quote di larghezza e lunghezza: tale risultato potrebbe essere dovuto ad un ulteriore effetto di rilassamento degli stress residui, ad opera del riscaldamento subito durante i cicli di stampaggio ad iniezione, realizzati iniettando fusi polimerici ad una temperatura progressivamente crescente.

Analizzando le misure rilevate per l'inserto realizzato in F-ANY, con l'esecuzione delle prime dieci stampate si osserva la diminuzione di tutte le quote misurate, probabilmente a causa di un effetto combinato di rilassamento delle tensioni, usura dell'inserto e applicazione di sollecitazioni di compressione in esercizio.

Con l'esecuzione delle successive dieci stampate, invece, si nota un lieve aumento delle dimensioni di larghezza e lunghezza e una moderata diminuzione delle quote d'altezza dell'inserto, probabilmente conseguente ad un rilassamento delle tensioni operato durante i cicli di riscaldamento che l'inserto subisce in opera: gli stress residui non sono stati precedentemente rilasciati poiché l'inserto non è stato sottoposto ad alcun trattamento termico durante il processo produttivo.

L'inserto in F-G3D TT80X60, invece, rispetto alle dimensioni valutate dopo la levigatura, con l'esecuzione dei primi dieci cicli di stampaggio ad iniezione ha registrato un incremento contenuto dei valori di lunghezza e larghezza dell'inserto e una riduzione lieve delle dimensioni di altezza dell'inserto, probabilmente dovuto ad un ulteriore rilascio degli stress residui accumulati con il processo di FFF.

Per quanto riguarda l'inserto in F-G3D TT50X30, è stata osservata una diminuzione delle quote d'altezza e un incremento delle misure di larghezza e lunghezza sia a valle dei primi 10 cicli di stampaggio, che al termine delle successive 10 stampate.

Tale tendenza potrebbe essere dovuta ad un aggiuntivo effetto di riduzione degli stress residui accumulati durante il processo produttivo e liberati in seguito ai cicli di riscaldamento a cui l'inserto, in opera, viene sottoposto.

Infine, per quanto concerne l'inserto in G-PLA, rispetto alle condizioni "as printed", a valle di entrambi i cicli di stampaggio ad iniezione si registra una diminuzione di tutte le quote valutate, probabilmente a causa sia di un effetto di usura dello stampo che a causa delle sollecitazioni di compressione applicate all'inserto durante i cicli di stampaggio.

Infine, valutando complessivamente le variazioni dimensionali per ogni inserto a valle del processo di levigatura o, per gli inserti non sottoposti a tale step di processo nelle condizioni di inserto "as printed", è stato possibile evidenziare che gli inserti in F-AOM e in R-CPA abbiano mantenuto maggiormente le quote iniziali.

Infatti, considerando globalmente le quote valutate, è stato registrato un massimo scostamento dalla quota di riferimento dell'1,14% per l'inserto in R-CPA e un massimo di 0,67% per l'inserto in F-AOM, dimostrando l'affidabilità dimensionale dei due inserti.

L'inserto in G-PLA ha registrato la peggior ritenzione delle quote iniziali, con un massimo scostamento dalle quote iniziali del 13,1%.

### *3.5. Cicli di stampaggio ad iniezione: monitoraggio della temperatura dello stampo*

In questa sezione verranno presentati i risultati derivanti dal monitoraggio della temperatura dell'inserto a partire dall'apertura dello stampo, eseguito mediante la termocamera ad infrarossi Optris PI 640i e il software Optris PIX Connect, dettagliati nel paragrafo 2.4.9.

Tale analisi è stata condotta con il fine di valutare la differenza nella proprietà di dissipazione del calore degli inserti prodotti in Acciaio 1.2083 e per gli inserti prodotti con i filamenti commerciali compositi a matrice polimerica e rinforzati con fibre di carbonio corte, descritti nel paragrafo 2.1.

#### *3.5.1. Cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE*

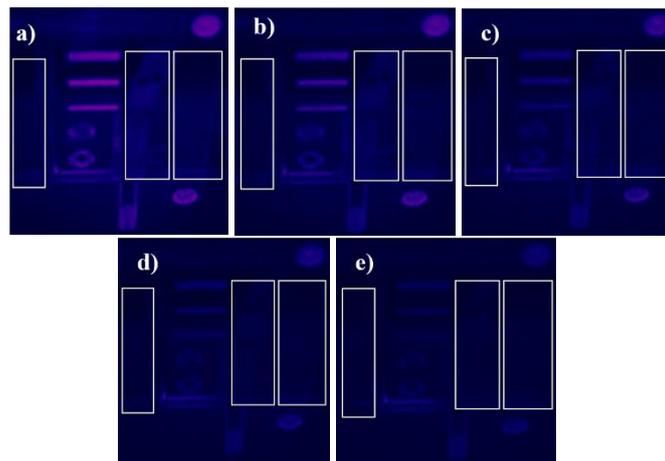
Nella Tabella 90 sono riportate le temperature dell'inserto in Acciaio 1.2083 rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo.

*Tabella 90: Temperatura dell'inserto in Acciaio 1.2083 durante i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE.*

<b>Numero di Stampate</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
1	0	27,1
1	15	26,8
5	0	27,7

5	15	26,9
10	0	27,9
10	15	27,4
10	30	27,2
10	45	26,8
10	60	26,6

Nella Figura 159 sono riportate le acquisizioni ottenute al momento dell'espulsione della parte prodotta (0s) e per i successivi 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto in Acciaio 1.2083.



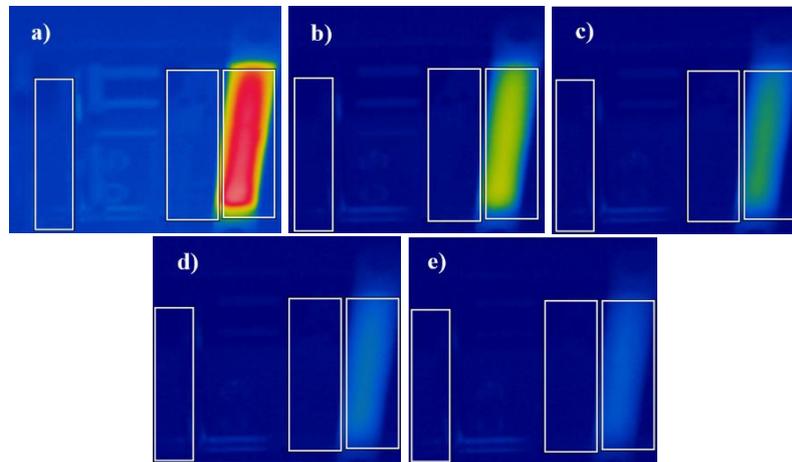
**Figura 159:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio con inserto in Acciaio 1.2083 a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Tabella 91 sono riportate le temperature dell'inserto in F-AOM rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo.

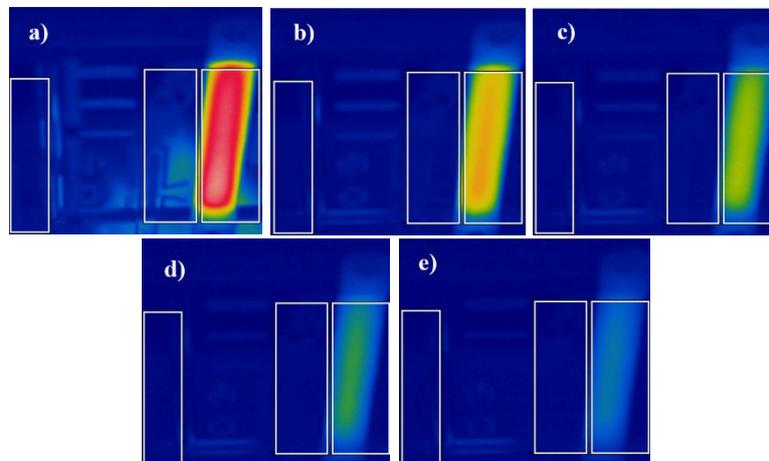
**Tabella 91:** Temperatura dell'inserto in F-AOM per i cicli di stampaggio di LDPE.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	69,1
1	15	46,0
1	30	39,1
1	45	35,0
1	60	32,2
5	0	70,3
5	15	54,8
5	30	45,2
5	45	39,7
5	60	36,1
10	0	72,2
10	15	56,8
10	30	46,4
10	45	40,4
10	60	36,5

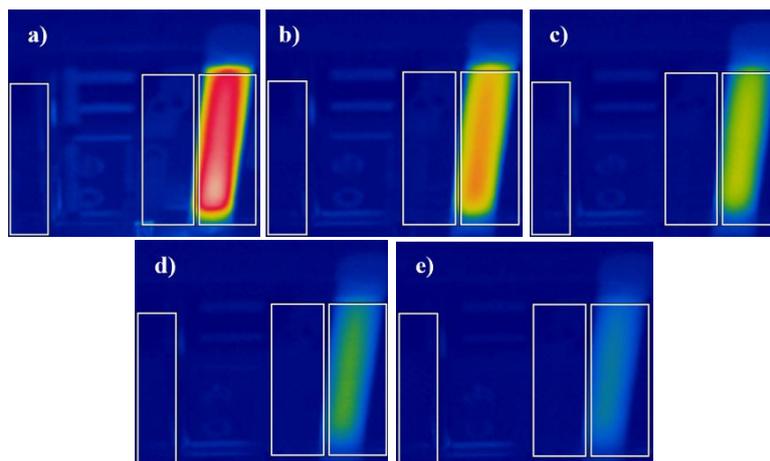
Nelle Figure 160 – 162 sono riportate le acquisizioni ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione dello stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto in F-AOM.



**Figure 160:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-AOM a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figure 161:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-AOM a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figure 162:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-AOM a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

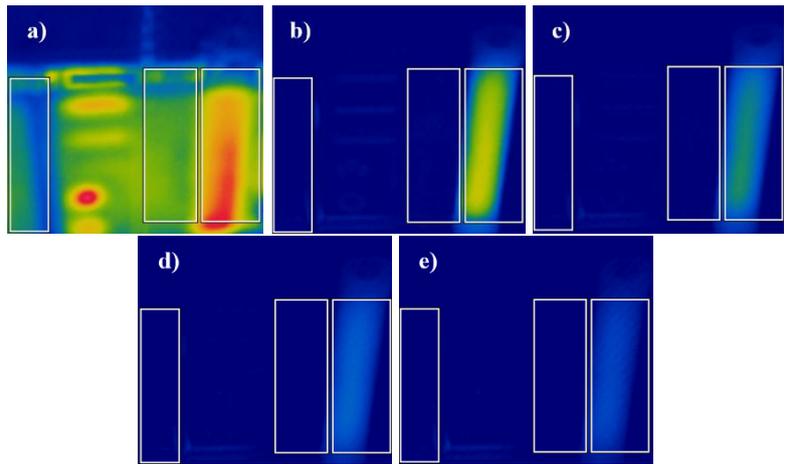
Nella Tabella 92 sono riportate le temperature dell'inserto in F-ANY rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60s dall'apertura dello stampo.

L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

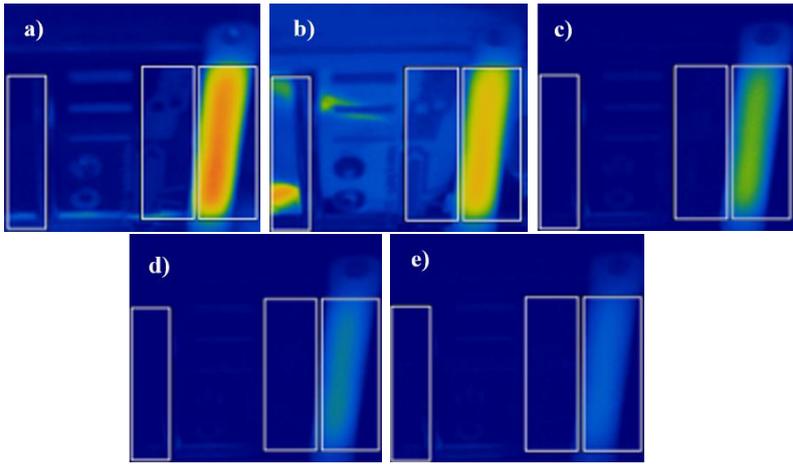
**Tabella 92:** Temperatura dell'inserto in F-ANY durante i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	62,3 *
1	15	47,5
1	30	38,5
1	45	33,9
1	60	31,0
5	0	57,5 *
5	15	53,0
5	30	42,3
5	45	36,8
5	60	33,5
10	0	77,2
10	15	53,5
10	30	43,4
10	45	37,7
10	60	34,0

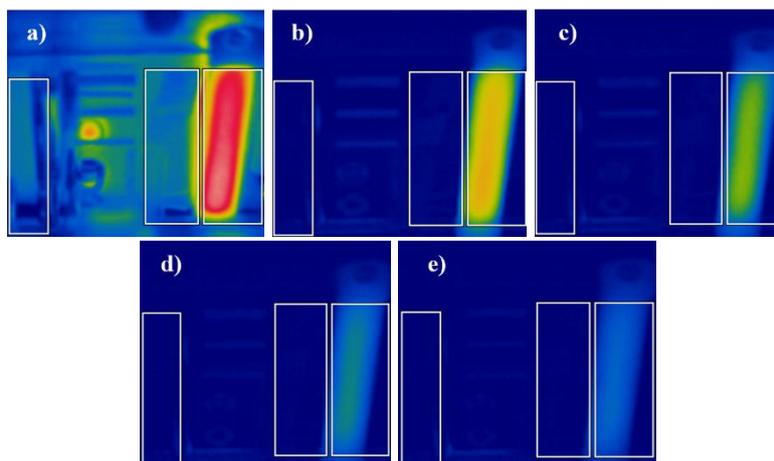
Nelle Figure 163 – 165 sono riportate le acquisizioni ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto in F-ANY.



**Figura 163:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-ANY a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 164:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-ANY a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



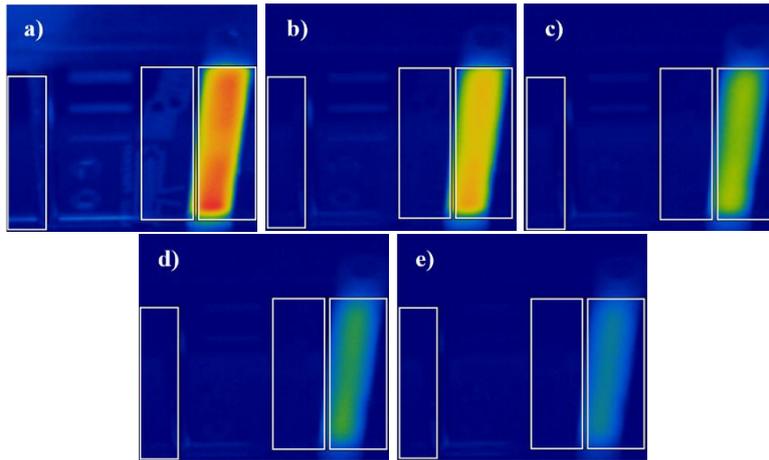
**Figura 165:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio con inserto in F-ANY a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Tabella 93 sono riportate le temperature dell'inserto in F-G3D TT50X30 rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60s dall'apertura dello stampo. L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

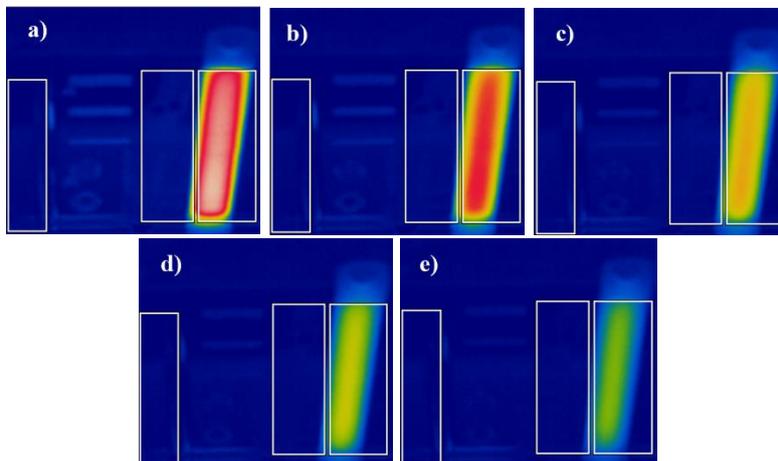
**Tabella 93:** Temperatura dell'inserto in F-G3D TT50X30 durante i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	65,4 *
1	15	54,5
1	30	44,9
1	45	40,1
1	60	36,9
5	0	65,3 *
5	15	60,3
5	30	51,8
5	45	46,2
5	60	42,2
10	0	75,0
10	15	62,4
10	30	53,8
10	45	48,0
10	60	43,1

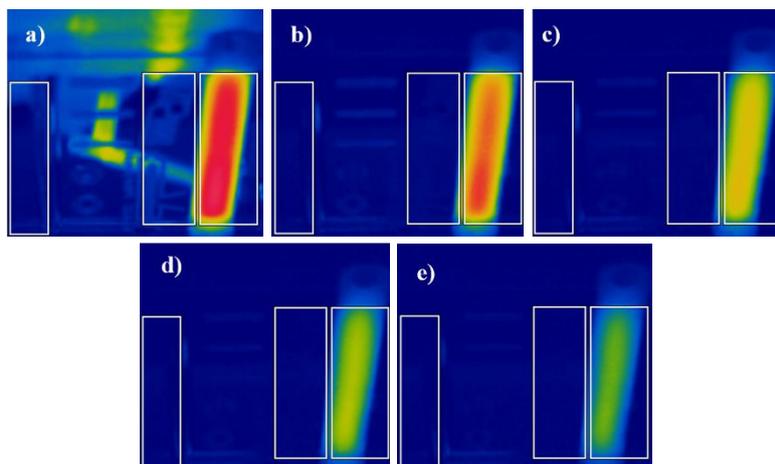
Nelle Figure 161 – 163 sono riportate le acquisizioni ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione della parte prodotta (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto in F-G3D TT50X30.



**Figura 166:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-G3D TT50X30 a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 167:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-G3D TT50X30 a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



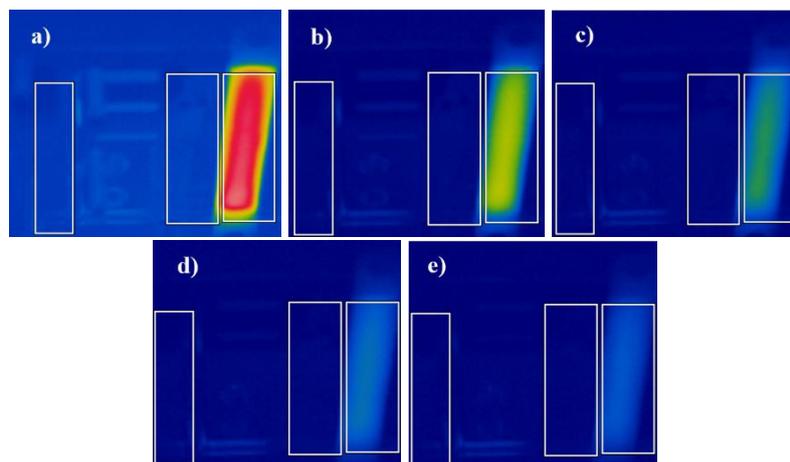
**Figura 168:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-G3D TT50X30 a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Tabella 94 sono riportate le temperature dell'inserto in F-G3D TT80X60 rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60s dall'apertura dello stampo.

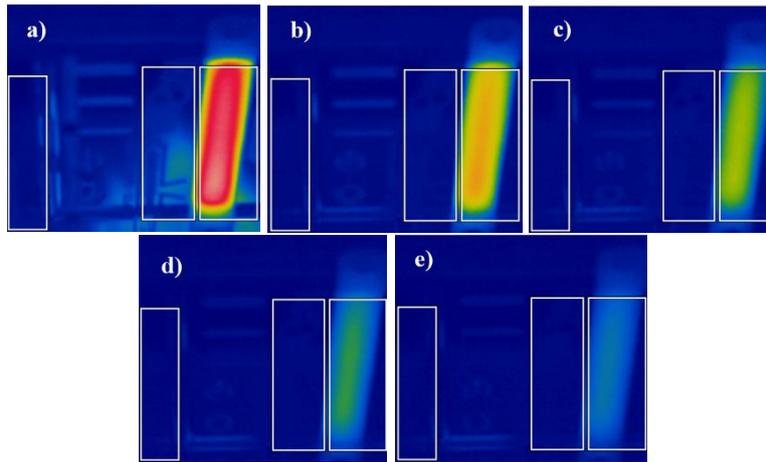
**Tabella 94:** Temperatura dell'inserto in F-G3D TT80X60 durante i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	71,2
1	15	55,1
1	30	45,4
1	45	40,3
1	60	37,0
5	0	77,0
5	15	62,0
5	30	53,2
5	45	47,1
5	60	42,7
10	0	74,0
10	15	62,6
10	30	54,0
10	45	48,0
10	60	43,1

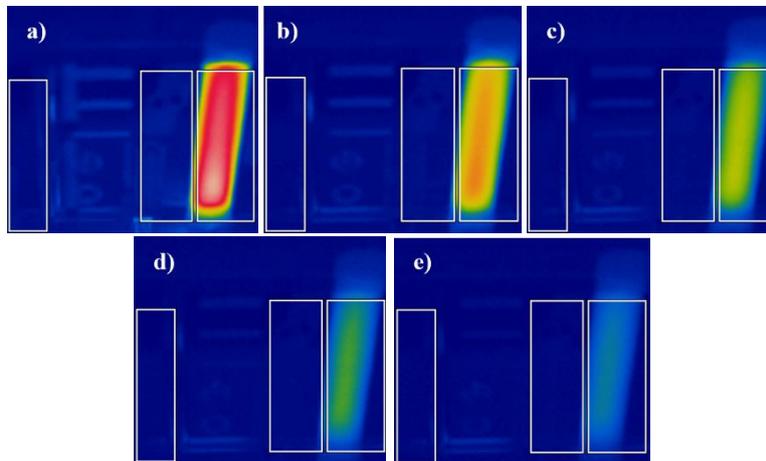
Nelle Figure 169 – 171 sono riportate le acquisizioni ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'estrazione dello stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto in F-G3D TT80X60.



**Figura 169:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-G3D TT80X60 a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 170:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-G3D TT80X60 a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 171:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in F-G3D TT80X60 a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

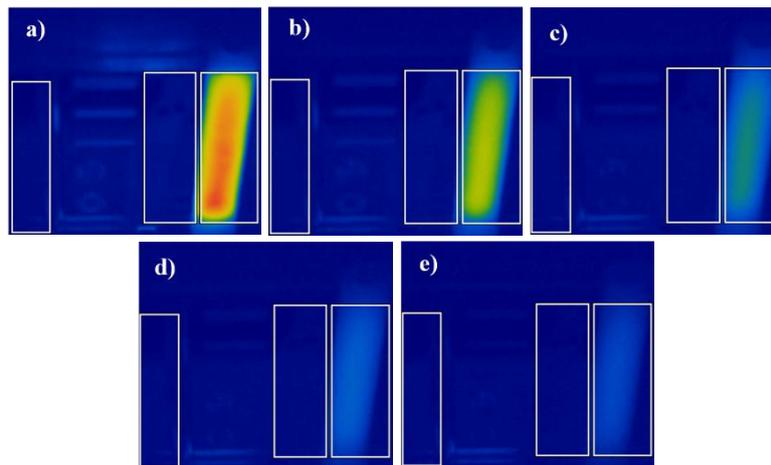
Nella Tabella 95 sono riportate le temperature dell'inserto in R-CPA rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60s dall'apertura dello stampo.

**Tabella 95:** Temperatura dell'inserto in R-CPA durante i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE.

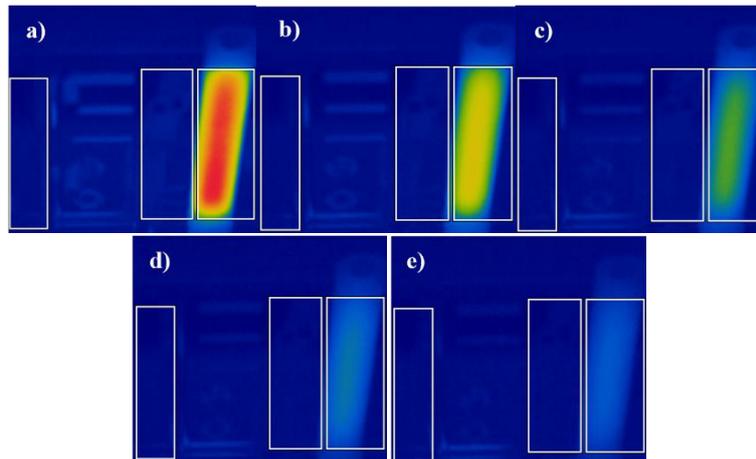
Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	60,4
1	15	46,0
1	30	37,9
1	45	33,7
1	60	31,1
5	0	61,9
5	15	49,8
5	30	40,9
5	45	35,8
5	60	33,1

10	0	64,3
10	15	51,3
10	30	41,4
10	45	36,5
10	60	33,2

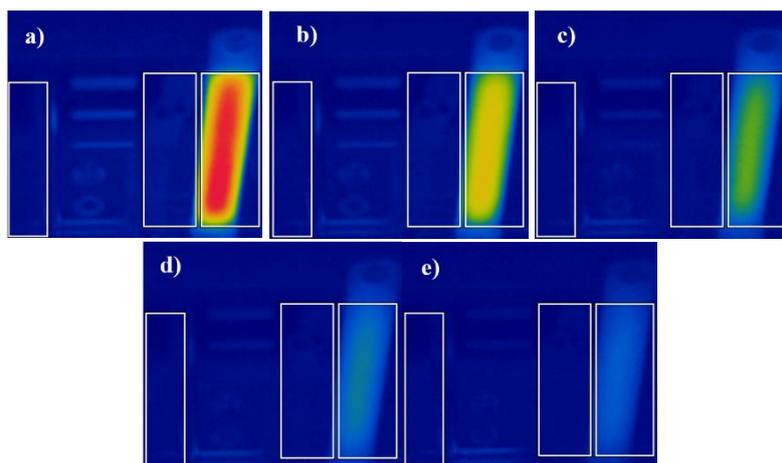
Nelle Figure 172 – 174 sono riportate le acquisizioni ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto in R-CPA.



**Figura 172:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in R-CPA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 173:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in R-CPA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



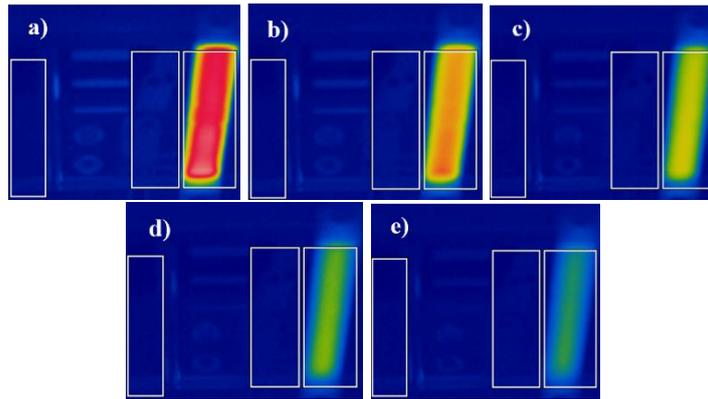
**Figura 174:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in R-CPA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Tabella 96 sono riportate le temperature dell'inserto in G-PLA rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60s dall'apertura dello stampo.

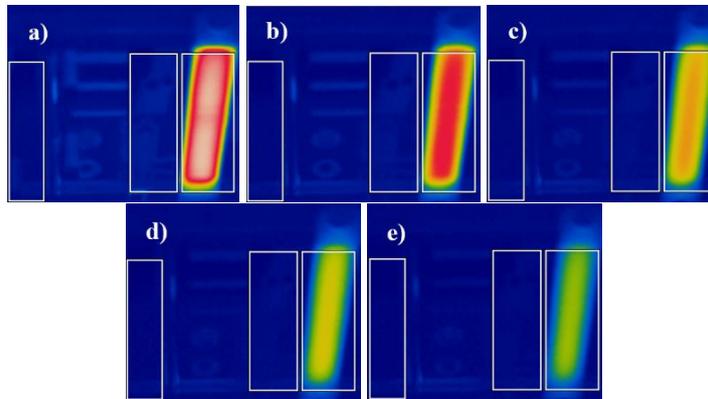
**Tabella 96:** Temperatura dell'inserto in G-PLA durante i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	70,3
1	15	58,7
1	30	48,8
1	45	43,1
1	60	39,4
5	0	75,2
5	15	63,4
5	30	55,2
5	45	49,4
5	60	44,9
10	0	76,7
10	15	64,3
10	30	56,0
10	45	50,3
10	60	45,6

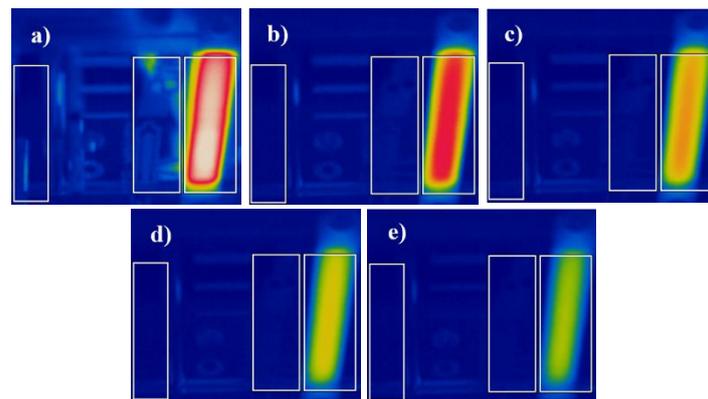
Nelle Figure 175 – 177 sono riportate le acquisizioni ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'estrazione della parte prodotta (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto in G-PLA.



**Figura 175:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in G-PLA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

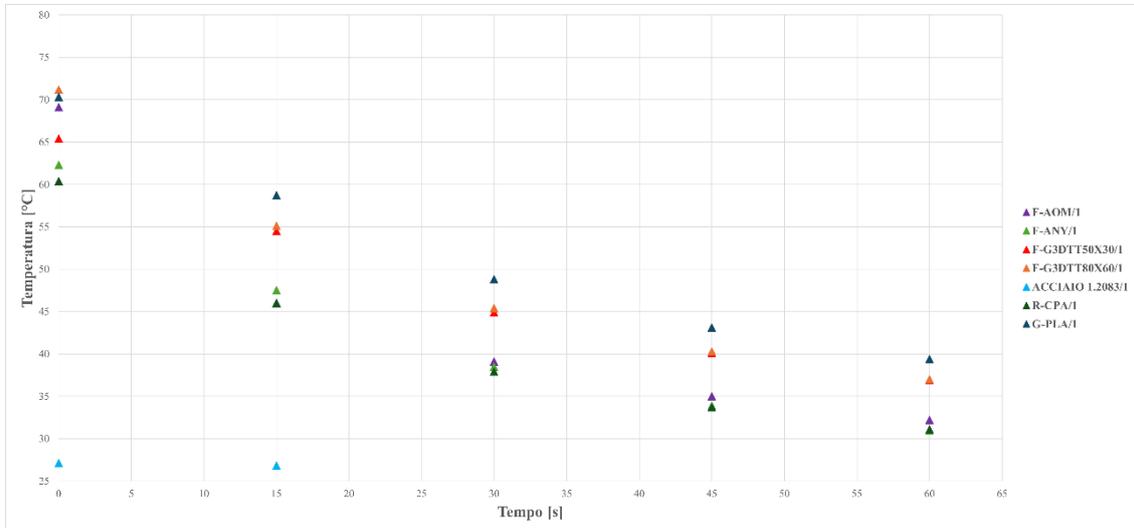


**Figura 176:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio con inserto in G-PLA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

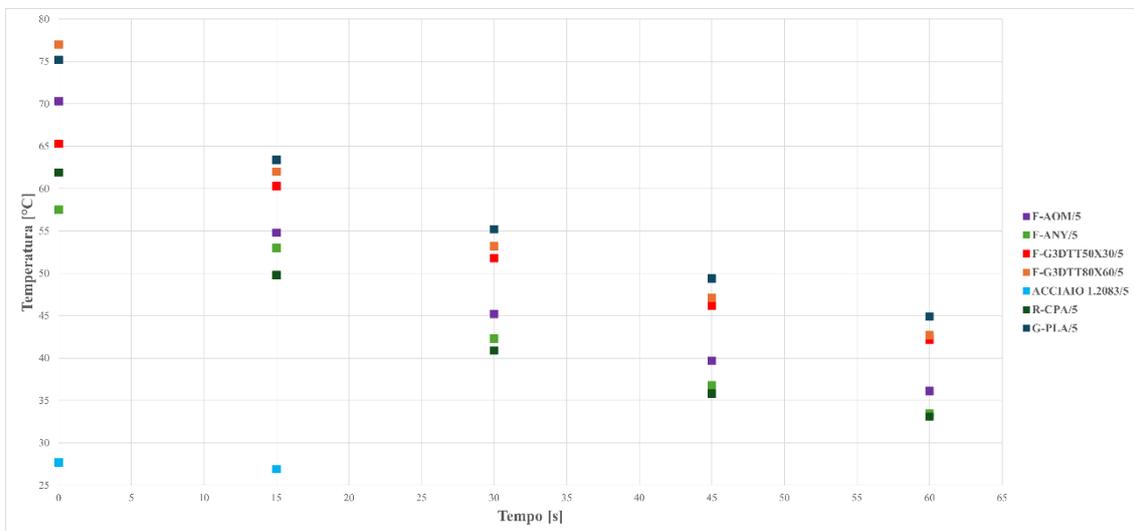


**Figura 177:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in G-PLA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

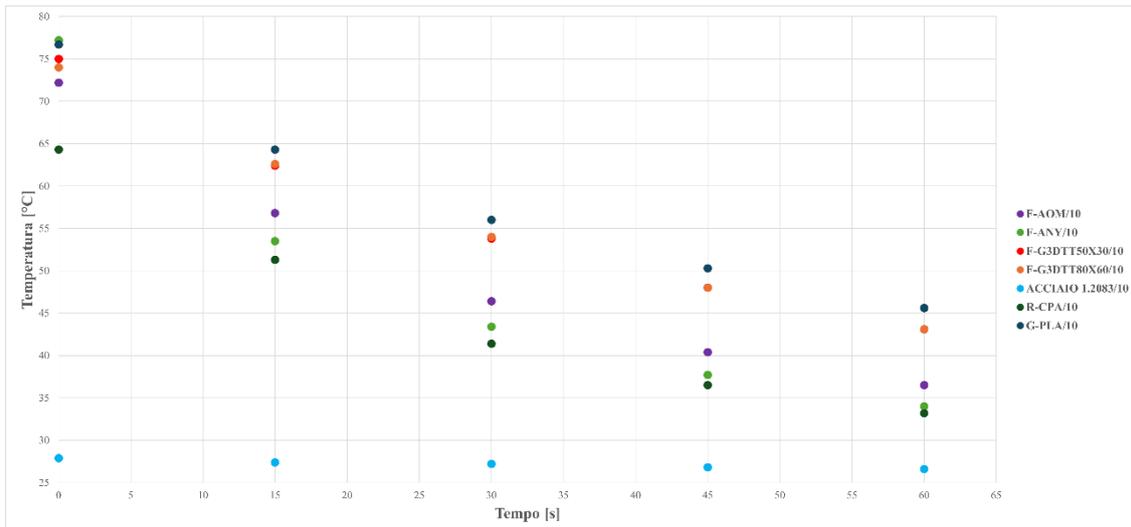
Nelle Figure 178 – 180 sono riportati, rispettivamente, gli andamenti della temperatura dell'inserto per i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE 1-5-10, per gli inserti in Acciaio 1.2083, F-AOM, F-ANY, F-G3D TT50X30, F-G3D TT80X60, R-CPA e G-PLA.



**Figura 178:** Andamento della temperatura dell'inserto per il primo ciclo di iniezione di LDPE.



**Figura 179:** Andamento della temperatura dell'inserto per il secondo ciclo di iniezione di LDPE.



**Figura 180:** Andamento della temperatura dell'inserto per il decimo ciclo di iniezione di LDPE.

Nella Tabella 97 sono riportate le temperature dell'inserto "Pool" realizzato in R-CPA, rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60s dall'apertura dello stampo.

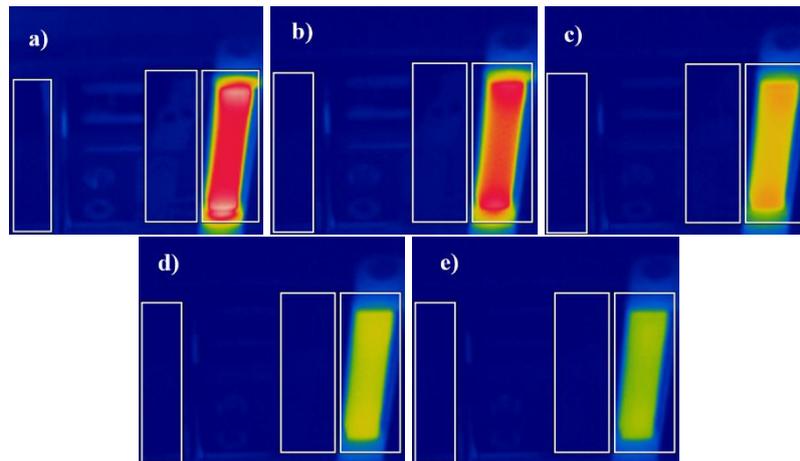
L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

**Tabella 97:** Monitoraggio della temperatura dell'inserto "Pool" durante lo stampaggio ad iniezione di LDPE.

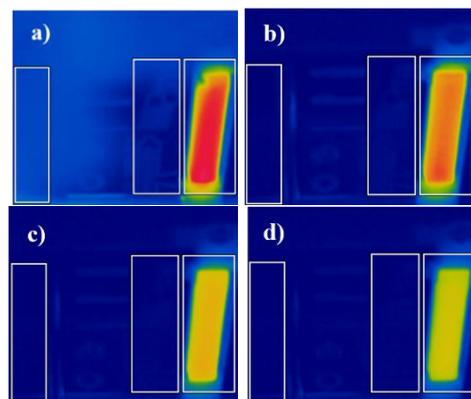
Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	74,5 *
1	15	66,3
1	30	55,5
1	45	48,5
1	60	45,4
5	0	65,0 *
5	15	65,0 *
5	30	59,4
5	45	53,4
5	60	49,0
10	0	60,3 *
10	15	60,3 *
10	30	53,2
10	45	48,6
10	60	45,4

Nelle Figure 181 – 183 sono riportate le acquisizioni ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'estrazione dello stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura

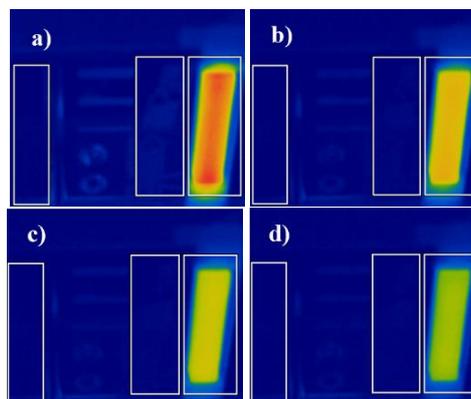
dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto “Pool” prodotto mediante FFF in R-CPA.



**Figura 181:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in G-PLA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 182:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in G-PLA a 0s (a), 30s (b), 45s (c) e 60s (d) dall'apertura dello stampo.



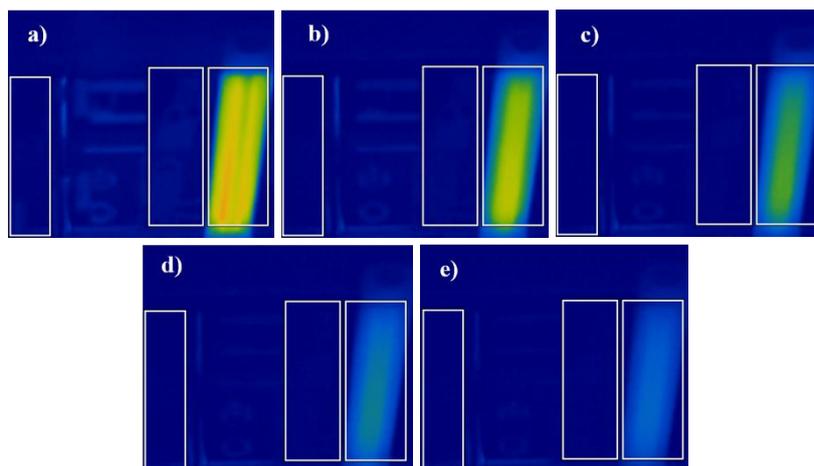
**Figura 183:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in G-PLA a 0s (a), 30s (b), 45s (c) e 60s (d) dall'apertura dello stampo.

Nella Tabella 98 sono riportate le temperature dell'inserto in R-CPA rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo.

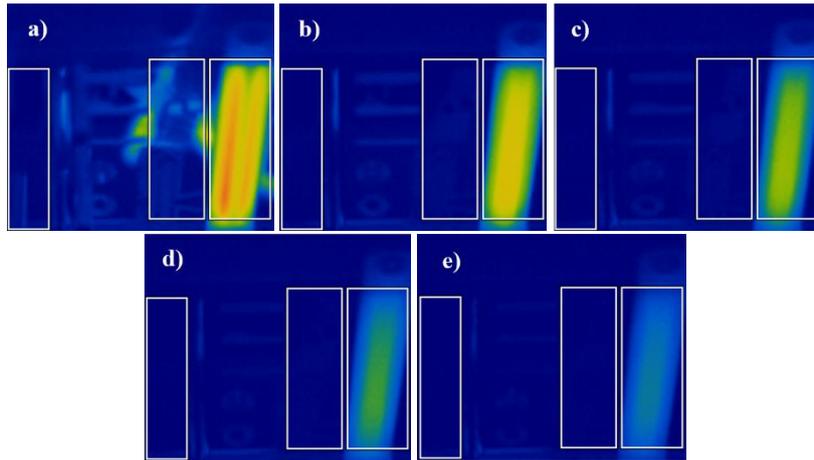
**Tabella 98:** Monitoraggio della temperatura dell'inserto "Zipper" durante i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	53,8
1	15	46,4
1	30	40,7
1	45	36,9
1	60	34,2
5	0	57,7
5	15	50,7
5	30	44,6
5	45	40,0
5	60	36,5
10	0	58,8
10	15	52,0
10	30	45,3
10	45	40,9
10	60	37,5

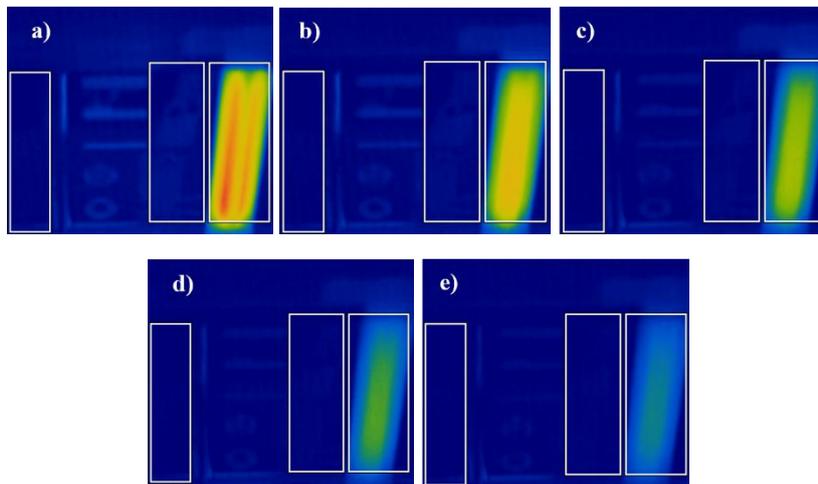
Nelle Figure 184 – 186 sono riportate le acquisizioni ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'estrazione della parte prodotta (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio realizzati con inserto "Zipper" prodotto per FFF in R-CPA.



**Figura 184:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in G-PLA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

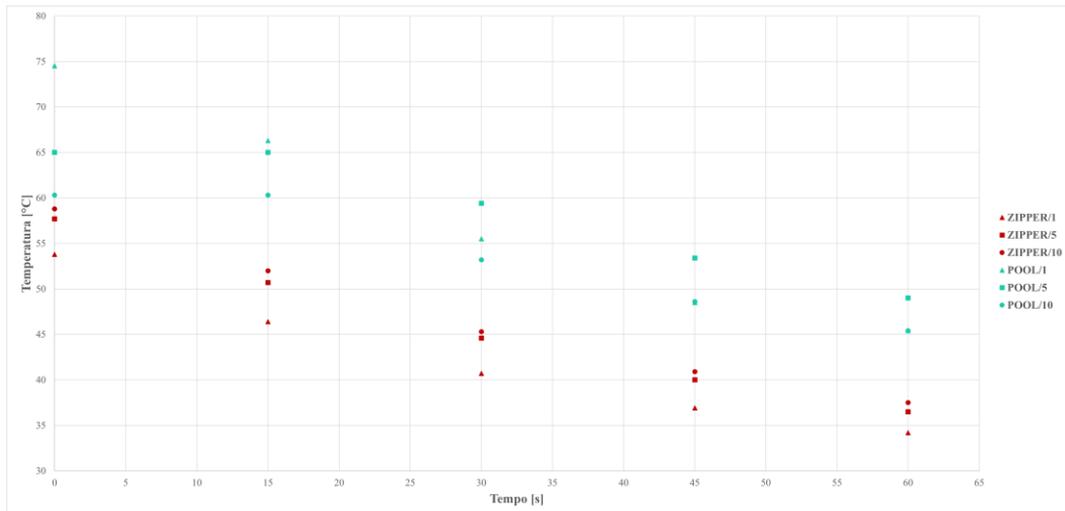


**Figura 185:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in G-PLA a 0s (a), 15s (b), 30 (s), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 186:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione con inserto in G-PLA a 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Figura 187 è presentato l'andamento della temperatura dell'inserto nel tempo per i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE 1-5-10, per gli inserti "Pool" e "Zipper", realizzati mediante FFF in R-CPA.



**Figura 187:** Andamento della temperatura degli inserti “Pool” e “Zipper” in funzione del tempo per i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE.

Per quanto concerne i cicli di stampaggio ad iniezione di LDPE, la temperatura dell’inserto rilevata in tutti gli intervalli di tempo valutati, ha evidenziato una tendenza crescente con le successive stampate.

In particolare, la temperatura rilevata per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell’apertura dello stampo ( $t = 0s$ ), risulta essere inferiore rispetto alla temperatura misurata per il decimo ciclo produttivo.

L’incremento della quantità di fuso polimerico iniettato nella cavità dello stampo, a causa della crescente pressione di mantenimento applicata con i successivi cicli di stampaggio, potrebbe aver comportato un maggior trasferimento di calore dal fuso polimerico all’inserto, portando ad un aumento della temperatura rilevata al momento dell’estrazione delle parti dallo stampo.

Inoltre, l’incremento della pressione di mantenimento potrebbe aver comportato un maggiore trasferimento di calore, come conseguenza di un migliore riempimento dello stampo e una riduzione dei vuoti, comportando un contatto più esteso tra la superficie del fuso polimerico e quella dell’inserto, implicando un maggiore trasferimento di calore durante la fase di mantenimento del ciclo di processo.

In aggiunta, per quanto concerne gli inserti realizzati per FFF, un graduale aumento della temperatura potrebbe essere dovuto a una non completa dissipazione del calore accumulato nel volume dell’inserto durante le fasi di processo, tra cicli di stampaggio consecutivi.

Tale accumulo di calore per gli inserti realizzati con i filamenti commerciali composti è dovuto principalmente ad una conducibilità termica significativamente inferiore rispetto a quella posseduta dalle restanti porzioni di stampo, realizzate in Acciaio 1.2083, come dimostrato nel paragrafo 3.1.2.4 e nel paragrafo 2.1.7.

L’inserto realizzato in R-CPA ha permesso di ottenere, al momento dell’apertura dello stampo e dopo 60 secondi dall’estrazione delle parti prodotte, le temperature più prossime a quelle ottenute con l’inserto in Acciaio 1.2083.

Confrontando le temperature rilevate per gli inserti a base PLA (F-G3D TT80X60, F-G3D TT50X30 e G-PLA) al decimo ciclo di iniezione di LDPE, è possibile notare come il discreto quantitativo di fibre di carbonio contenuto nei filamenti compositi, unito ad una contenuta riduzione delle porosità introdotte con i trattamenti termici a valle del processo di FFF, possa aver portato ad un leggero effetto migliorativo di dissipazione del calore, con una temperatura che si attesta inferiore di 1,7°C e 2,7°C al momento dell'apertura dello stampo, rispettivamente per il F-G3D TT50X30 e per il F-G3D TT80X60.

Infine, considerando gli inserti “Pool” e “Zipper”, realizzati in R-CPA e sottoposti al medesimo trattamento termico a valle del processo di FFF, è possibile notare come la geometria dell'inserto possa influenzare il processo di accumulo del calore durante i cicli di stampaggio ad iniezione.

Infatti, la geometria “Pool” garantisce una superficie di scambio termico tra il fuso polimerico e l'inserto più elevata rispetto a quella offerta dell'inserto “Zipper” e questo garantisce un maggiore trasferimento di calore, responsabile di un sistematico incremento di temperatura rilevata alla superficie dell'inserto “Pool” rispetto a quella registrata per l'inserto “Zipper” a parità di cicli di processo e tempo dall'apertura dello stampo considerati.

### 3.5.2. Cicli di stampaggio ad iniezione di PBS

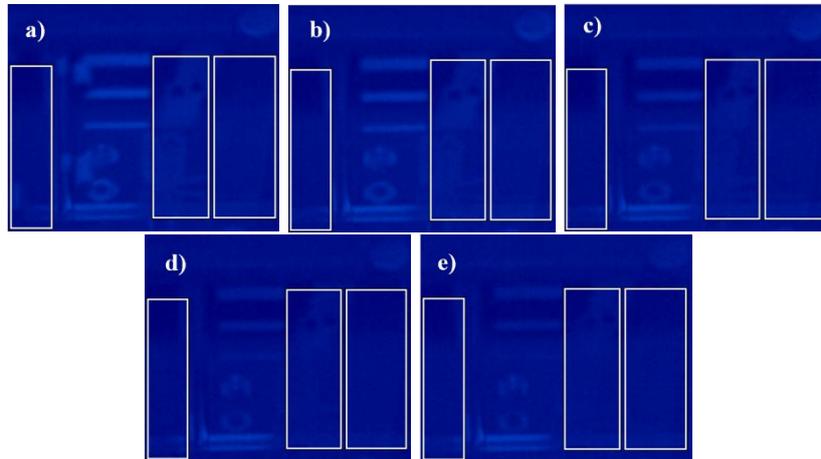
Nella Tabella 99 sono riportate le temperature dell'inserto in Acciaio 1.2083 rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

**Tabella 99:** Temperatura dell'inserto in Acciaio 1.2083 durante l'iniezione di PBS.

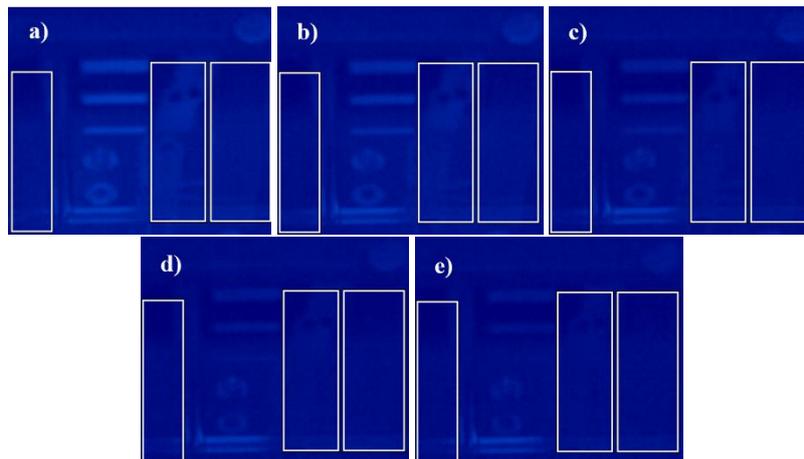
<b>Numero di Stampate</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
1	0	27,1
1	15	26,7
1	30	26,3
1	45	26,2
1	60	26,2
5	0	27,7
5	15	27,2
5	30	27,0
5	45	26,9
5	60	26,7
10	0	27,5
10	15	27,1
10	30	27,1
10	45	27,1
10	60	26,8

Nelle Figure 188 – 190 sono riportate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con l'esecuzione del primo, del quinto e del decimo ciclo di produzione, al

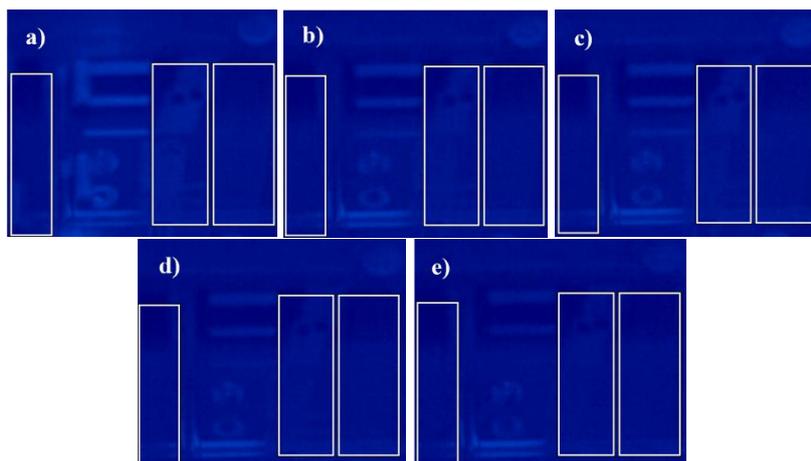
momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio di PBS realizzati con inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 188:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in Acciaio 1.2083 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 189:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in Acciaio 1.2083 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 190:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in Acciaio 1.2083 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

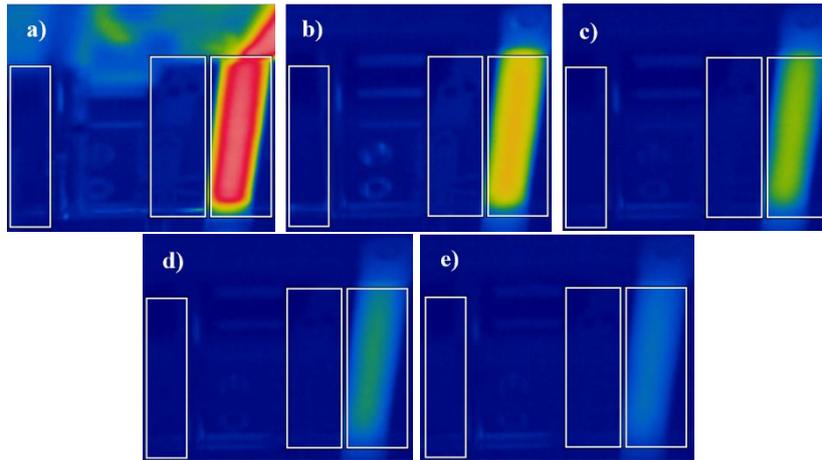
Nella Tabella 100 sono riportate le temperature dell'inserto in F-AOM rilevate al momento dell'estrazione della parte prodotta (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

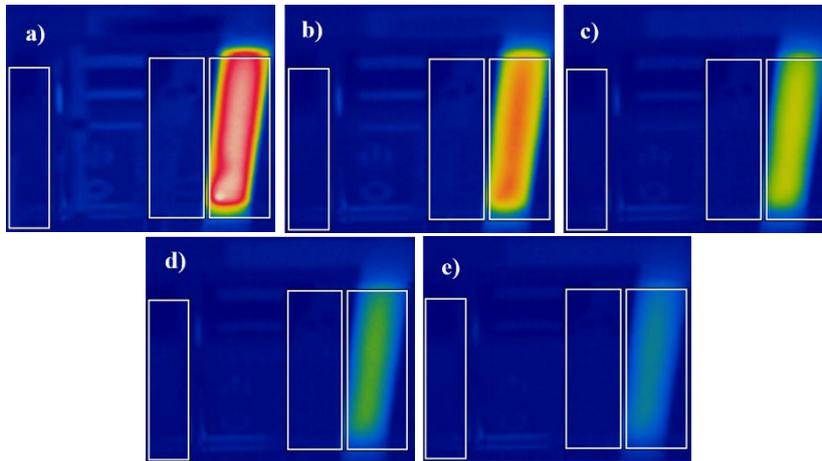
**Tabella 100:** Temperatura dell'inserto in F-AOM durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	69,2 *
1	15	53,0
1	30	43,8
1	45	38,5
1	60	35,3
5	0	80
5	15	58,2
5	30	47,2
5	45	41,0
5	60	36,9
10	0	65,7 *
10	15	52
10	30	41,8
10	45	36,8
10	60	33,4

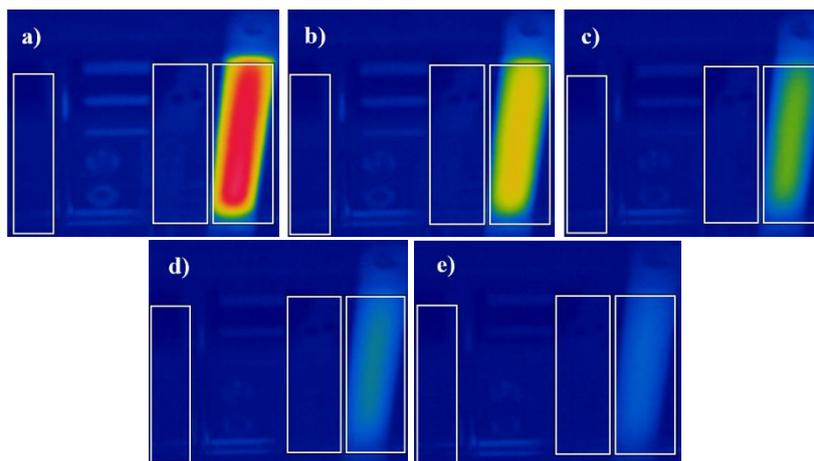
Nelle Figure 191 – 193 sono riportate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione dello stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio di PBS realizzati con inserto in F-AOM.



**Figura 191:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in F-AOM dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 192:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio di PBS con inserto in F-AOM dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



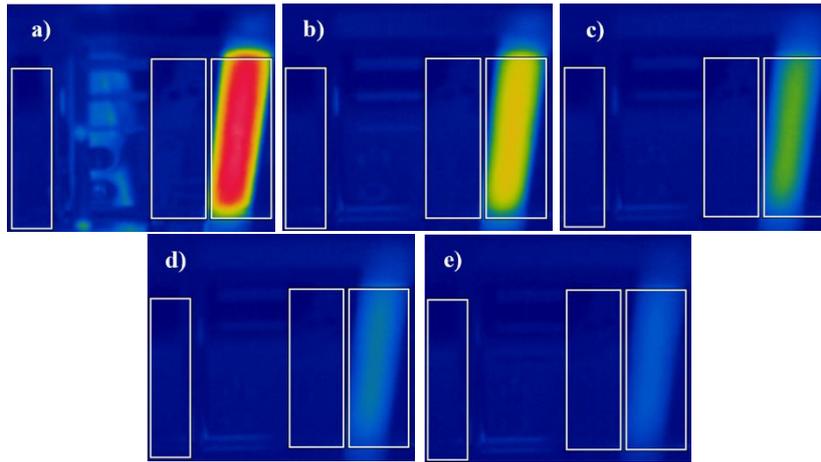
**Figura 193:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in F-AOM dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Tabella 101 sono riportate le temperature dell'inserto in F-ANY rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

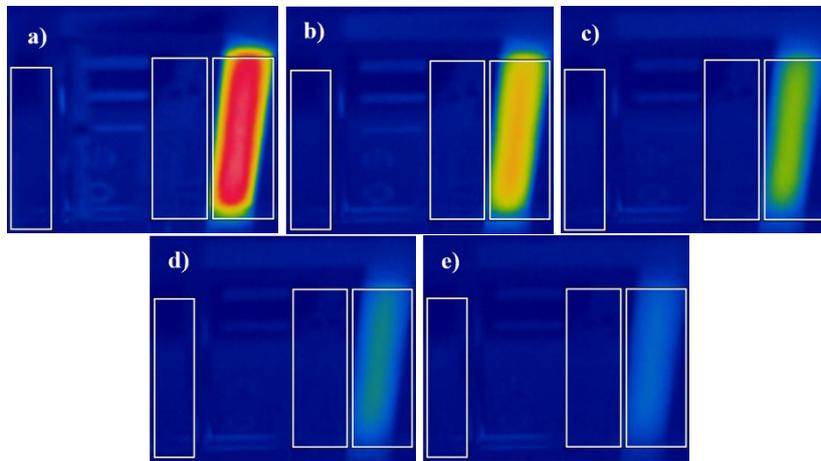
**Tabella 101:** Temperatura dell'inserto in F-ANY durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	72,8
1	15	51,5
1	30	41,4
1	45	36,2
1	60	32,8
5	0	75,3
5	15	53,9
5	30	43,4
5	45	37,7
5	60	34,1
10	0	74,9
10	15	53,7
10	30	43,4
10	45	37,8
10	60	33,9

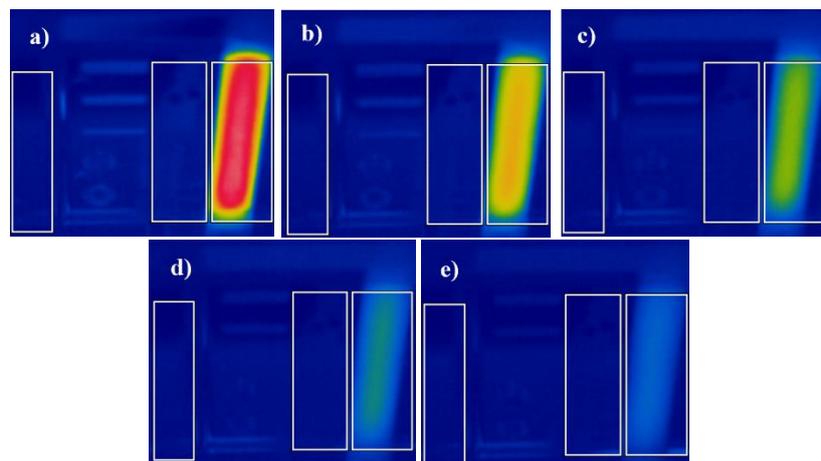
Nelle Figure 194 – 196 sono riportate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio di PBS realizzati con inserto in F-ANY.



**Figura 194:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in F-ANY dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 195:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in F-ANY dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 196:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in F-ANY dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

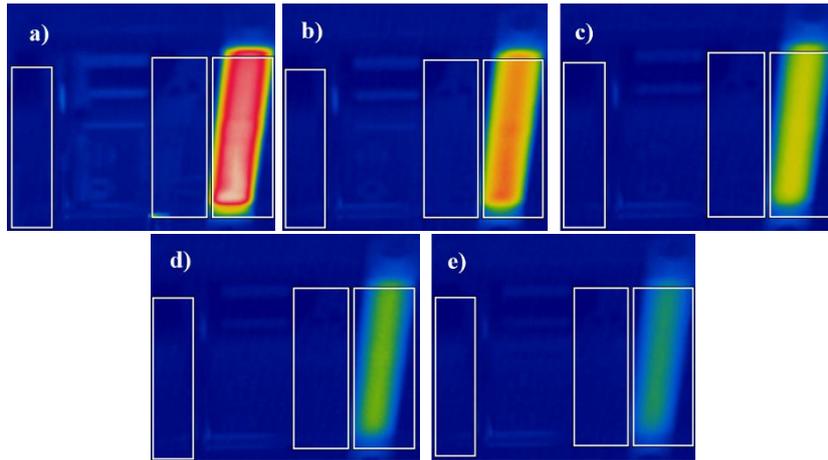
Nella Tabella 102 sono riportate le temperature dell'inserto in F-G3D TT50X30 rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

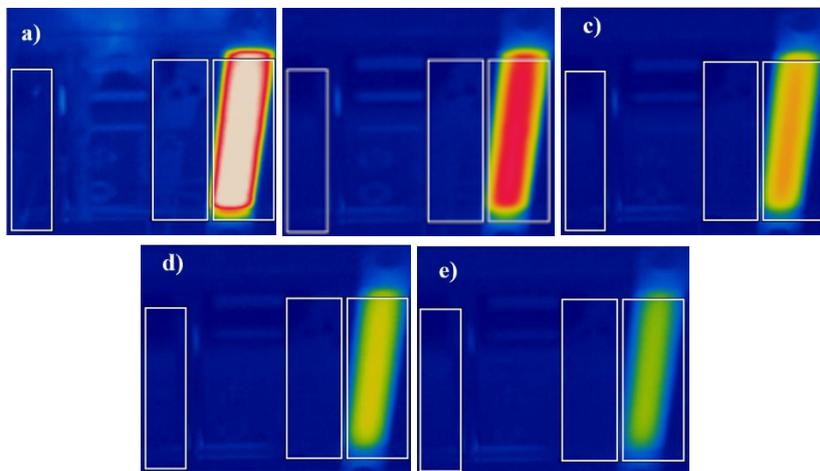
**Tabella 102:** *Temperatura dell'inserto in F-G3D TT50X30 durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.*

<b>Numero di Stampate</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
1	0	72,8
1	15	58,5
1	30	48,3
1	45	42,4
1	60	38,8
5	0	79,6
5	15	64,6
5	30	55,5
5	45	49,2
5	60	44,4
10	0	78,7 *
10	15	67,3
10	30	56,4
10	45	49,9
10	60	44,7

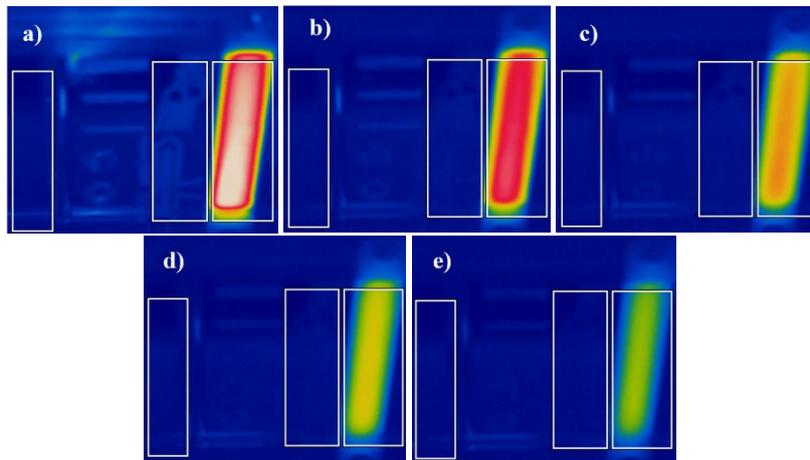
Nelle Figure 197 – 199 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione del pezzo dallo stampo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS, realizzati con inserto in F-G3D TT50X30.



**Figura 197:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in F-G3D TT50X30 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 198:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in F-G3D TT50X30 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 199:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in F-G3D TT50X30 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

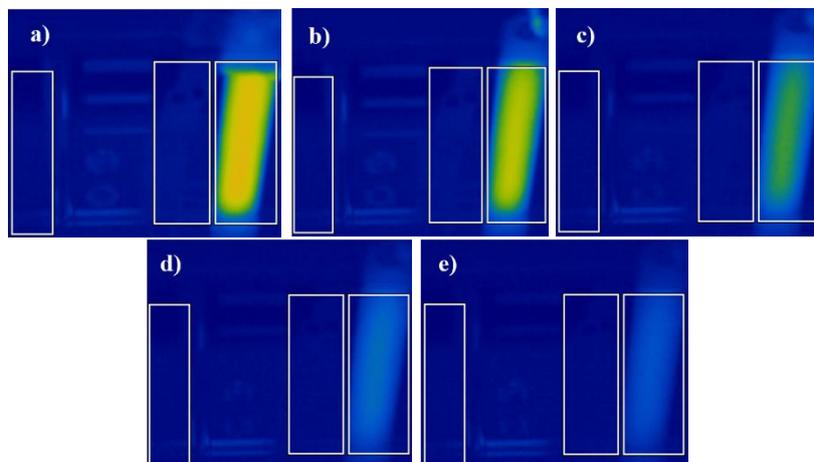
Nella Tabella 103 sono riportate le temperature dell'inserto in R-CPA rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 s dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

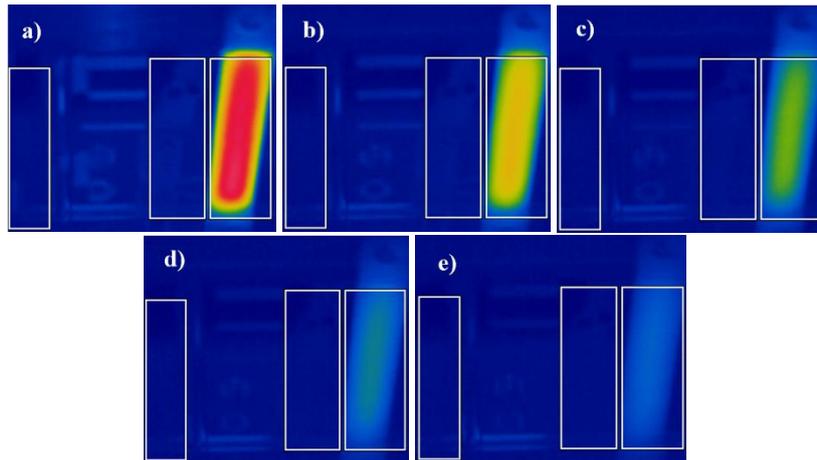
**Tabella 103:** Temperatura dell'inserto in R-CPA durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	57,4 *
1	15	46,8
1	30	39,7
1	45	35,1
1	60	32,2
5	0	66,8
5	15	52,2
5	30	42,4
5	45	37,0
5	60	33,6
10	0	66,4
10	15	52
10	30	43
10	45	36,8
10	60	33,4

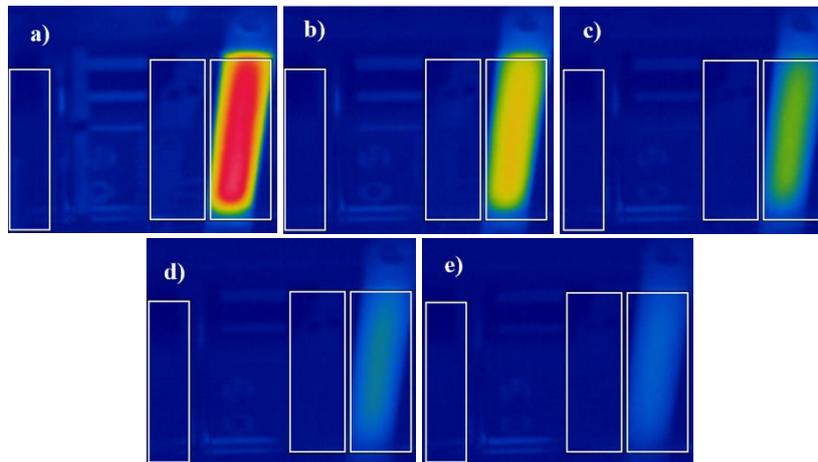
Nelle Figure 200 – 202 sono riportate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione della parte prodotta (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per lo stampaggio di PBS con l'inserto in R-CPA.



**Figura 200:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 201:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 202:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) 60s (e) dall'apertura dello stampo.

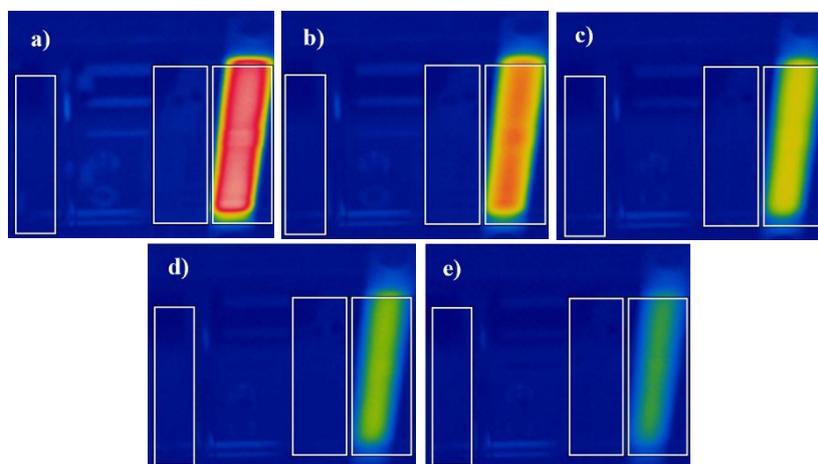
Nella Tabella 104 sono riportate le temperature dell'inserto in G-PLA rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

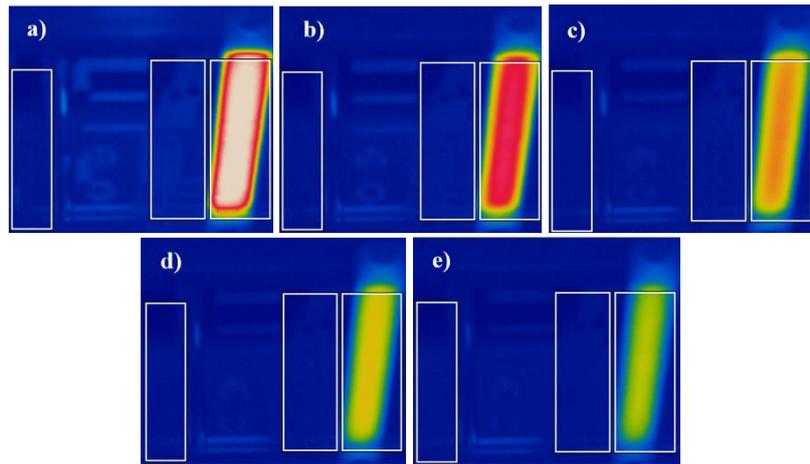
**Tabella 104:** Temperatura dell'inserto in G-PLA durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	72,8
1	15	58,6
1	30	49,4
1	45	44
1	60	40,1
5	0	80,7
5	15	65,8
5	30	57,3
5	45	51,3
5	60	46,7
10	0	78,7 *
10	15	66,8
10	30	57,7
10	45	51,8
10	60	47,1

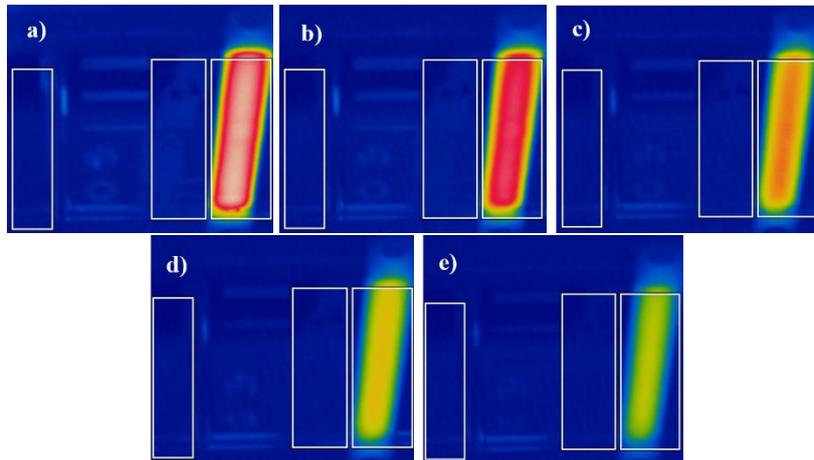
Nelle Figure 203 – 205 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione dello stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio di PBS realizzati con inserto in G-PLA.



**Figura 203:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in G-PLA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

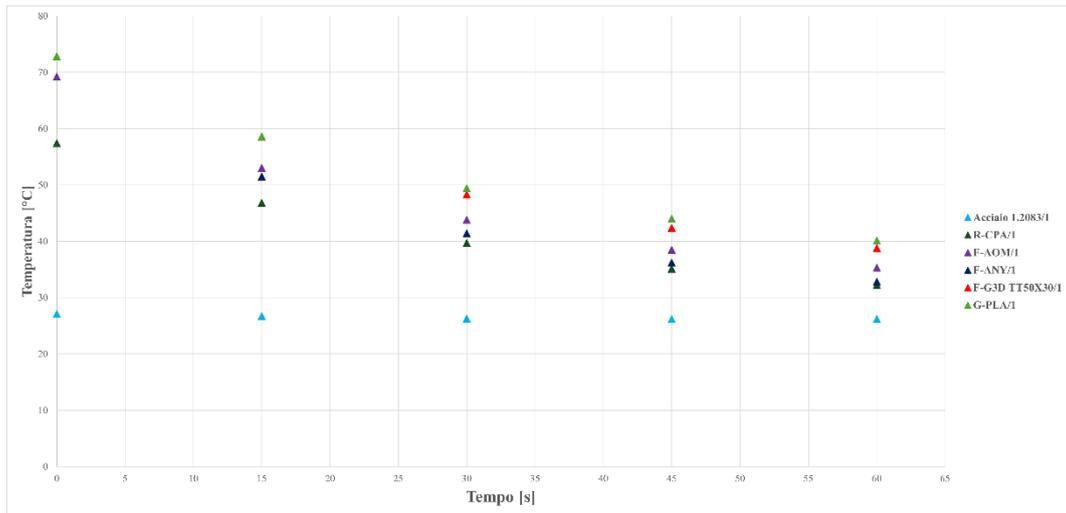


**Figura 204:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in G-PLA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

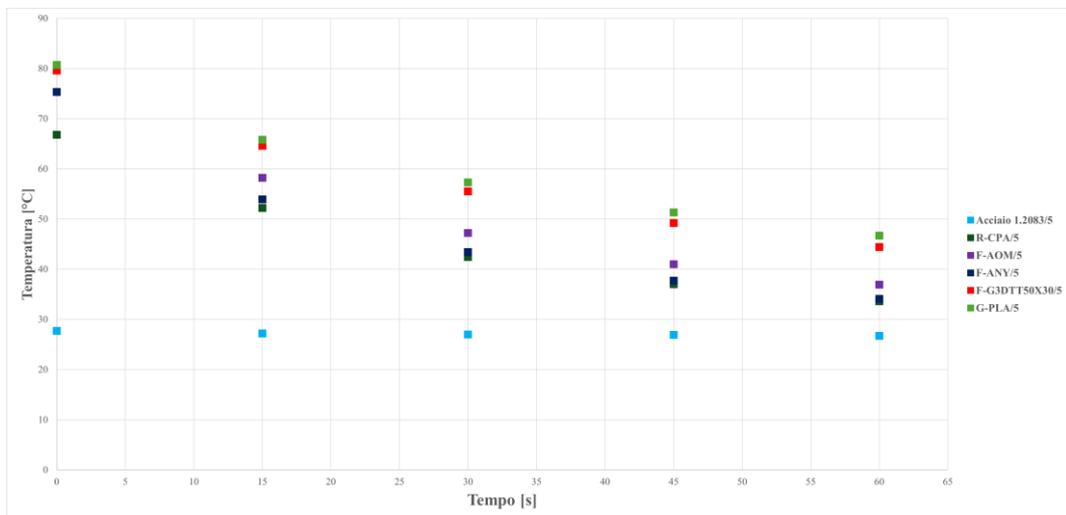


**Figura 205:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS con inserto in G-PLA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) 60s (e) dall'apertura dello stampo.

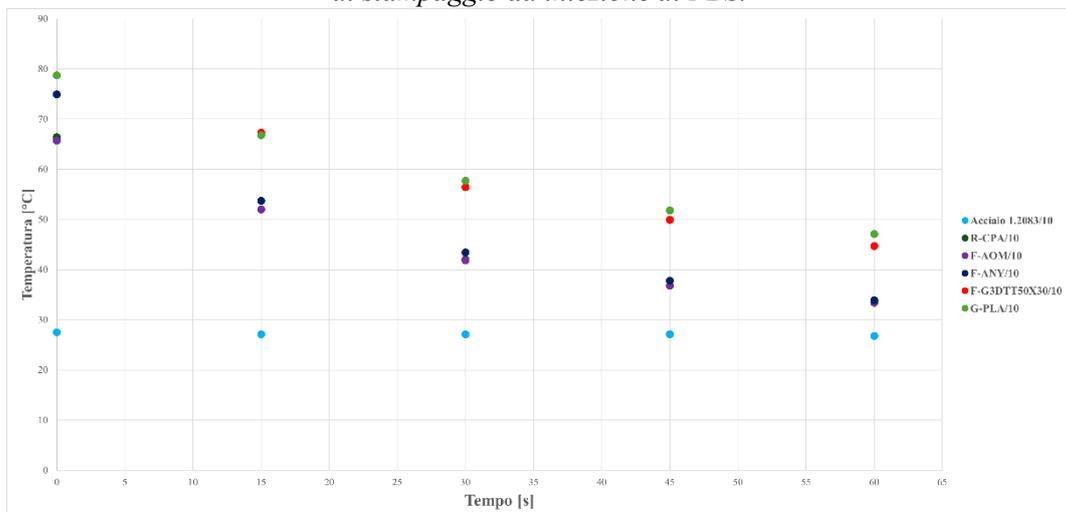
Nella Figure 206 – 208 sono riportati, rispettivamente, gli andamenti della temperatura dell'inserto per i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS 1-5-10, per gli inserti in Acciaio 1.2083, F-AOM, F-ANY, F-G3D TT50X30, R-CPA e G-PLA.



**Figura 206:** Andamento della temperatura dell'inserto per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS.



**Figura 207:** Andamento della temperatura dell'inserto per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS.



**Figura 208:** Andamento della temperatura dell'inserto per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS.

Anche per gli stampati in PBS si evidenzia la crescita della temperatura dell'inserto registrata con i successivi cicli di stampaggio ad iniezione, a causa di fenomeni di accumulo del calore durante il processo, tra cicli di stampaggio consecutivi.

In particolare, gli inserti in F-AOM, G-PLA, F-G3D TT50X30 e F-ANY hanno registrato picchi di temperature dell'inserto al momento dell'apertura dello stampo maggiori di 75°C, evidenziando significativi fenomeni di accumulo del calore durante i cicli di processo.

Considerando i due inserti a base PLA, si evidenzia la migliorata capacità di dissipazione dell'inserto in F-G3D TT50X30 che, per i tre cicli valutati, a 60 secondi dall'apertura dello stampo per l'estrazione delle parti prodotte, permette l'ottenimento di una temperatura dell'inserto inferiore rispetto a quella registrata per l'inserto in G-PLA.

Infatti, l'utilizzo seppur contenuto di fibre corte di carbonio e nanopiastrine di grafene permette di realizzare percorsi dissipativi del calore più efficienti, come dimostrato nel paragrafo 3.1.1.1.

Infine, tra gli inserti prodotti mediante FFF, considerando la temperatura registrata per i cicli monitorati, l'inserto in R-CPA ha permesso di ottenere complessivamente temperature più prossime a quelle valutate per l'inserto in Acciaio 1.2083.

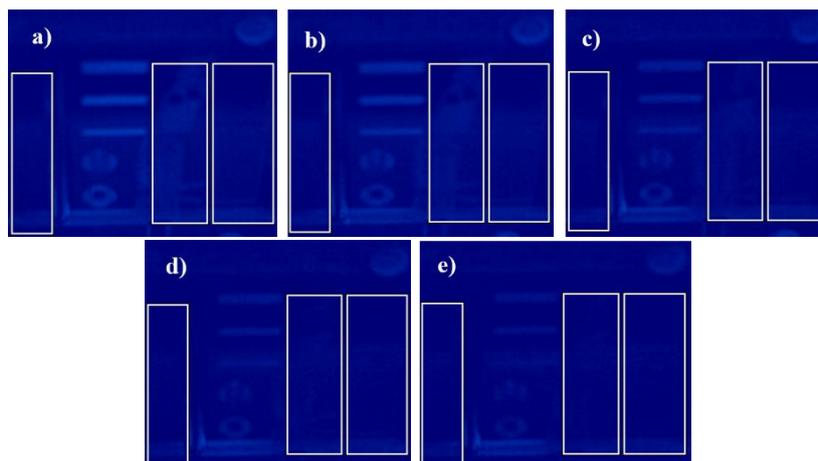
### 3.5.3. *Cicli di stampaggio ad iniezione dei blend polimerici*

Nella Tabella 105 sono riportate le temperature dell'inserto in Acciaio 1.2083 rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PHBH10.

**Tabella 105:** *Temperatura dell'inserto in Acciaio 1.2083 durante i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PHBH10.*

<b>Numero di Stampate</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
1	0	27,2
1	15	27,1
1	30	26,7
1	45	26,6
1	60	26,5

Nella Figura 204 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio del blend PBS90PHBH10, realizzati con inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 209:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PHBH10 con inserto in Acciaio I.2083, dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

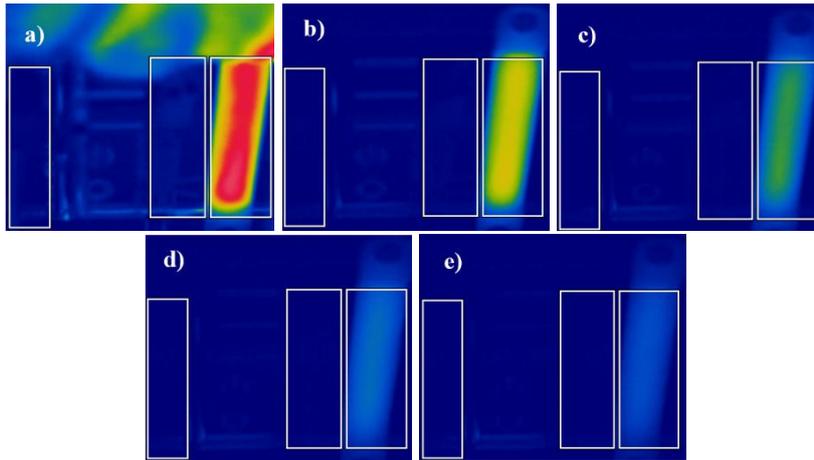
Nella Tabella 106 sono riportate le temperature dell'inserto in R-CPA rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PHBH10.

L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

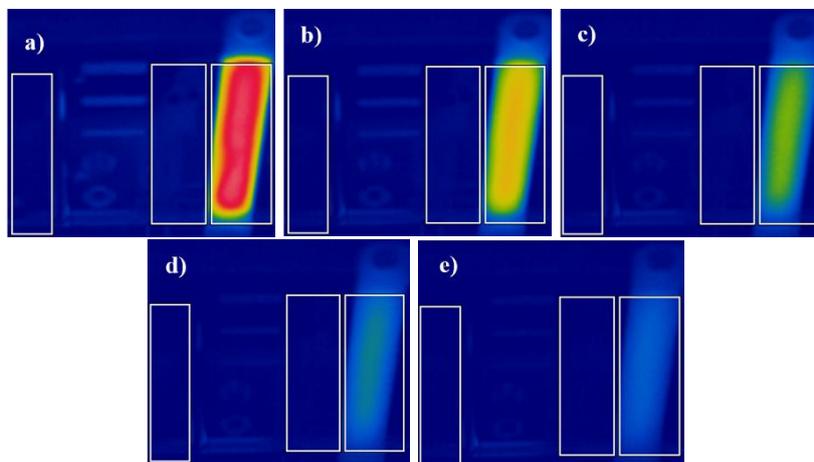
**Tabella 106:** Temperatura dell'inserto in R-CPA durante i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PHBH10.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	66,6 *
1	15	49,9
1	30	40,0
1	45	34,8
1	60	31,8
5	0	68,7
5	15	52,8
5	30	42,6
5	45	37,0
5	60	33,5
10	0	68,4
10	15	53,9
10	30	43,0
10	45	37,1
10	60	33,7

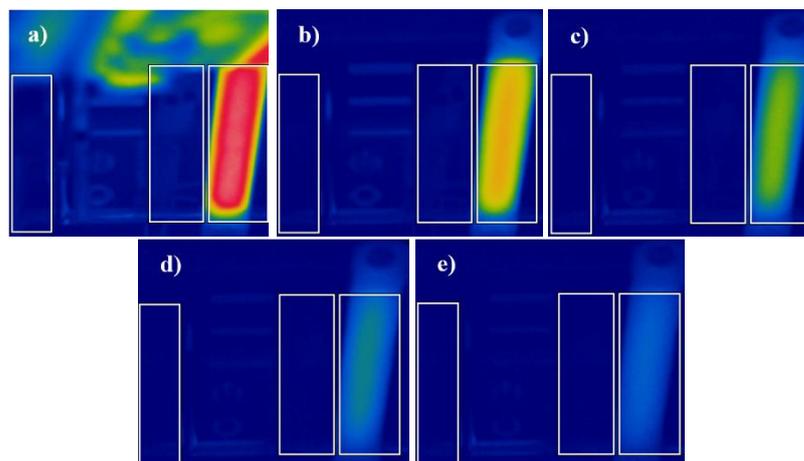
Nelle Figure 210 – 212 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione del pezzo dallo stampo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PHBH10 realizzati con inserto in R-CPA.



**Figura 210:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

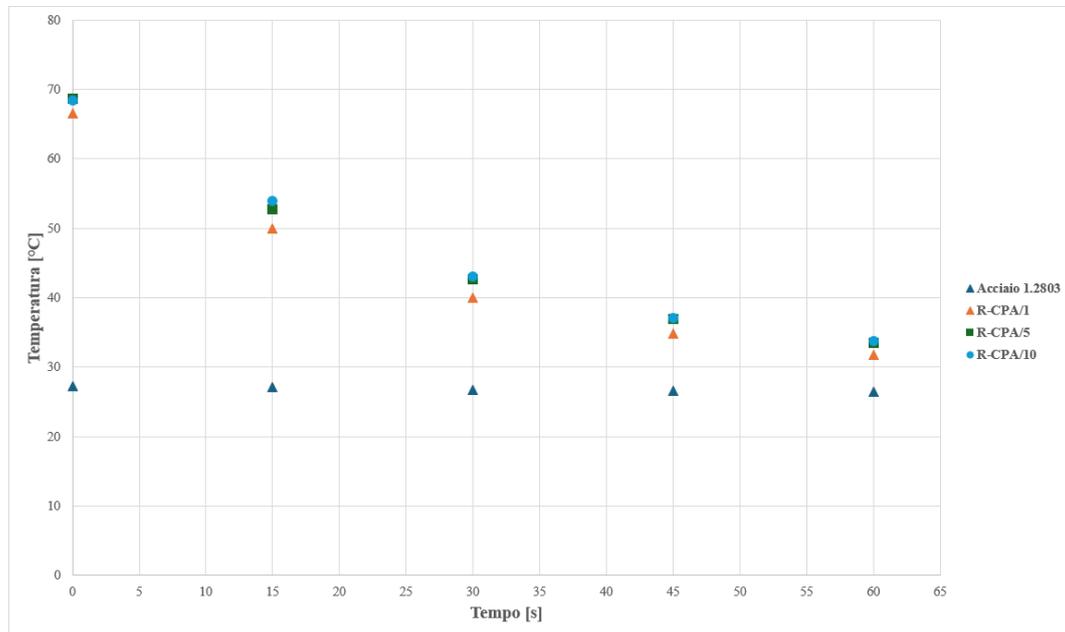


**Figura 211:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 212:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Figura 213 sono riportati gli andamenti della temperatura dell'inserto in Acciaio 1.2083 per il solo primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10; per l'inserto in R-CPA, invece, si riportano gli andamenti della temperatura dell'inserto per i cicli di stampaggio ad iniezione 1-5-10.



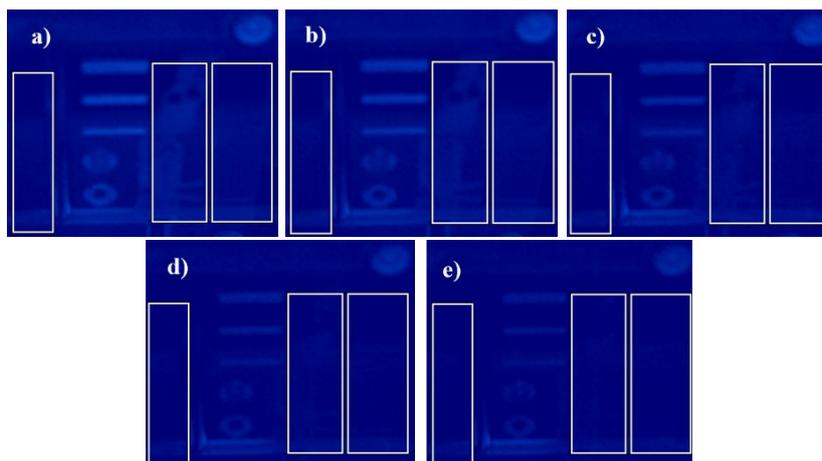
**Figura 213:** Andamento della temperatura dell'inserto per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PHBH10 per l'inserto in Acciaio 1.2083 e per i cicli di stampaggio ad iniezione 1-5-10 per l'inserto in R-CPA.

Nella Tabella 108 sono riportate le temperature dell'inserto in Acciaio 1.2083 rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 s dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS80PHBH20.

**Tabella 108:** Temperatura dell'inserto in Acciaio 1.2083 durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	27,5
1	15	27,1
1	30	26,9
1	45	26,9
1	60	26,4

Nella Figura 214 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione del pezzo prodotto (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio di PBS80PHBH20 realizzati con inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 214:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio di PBS80PHBH20 con inserto in Acciaio 1.2083 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

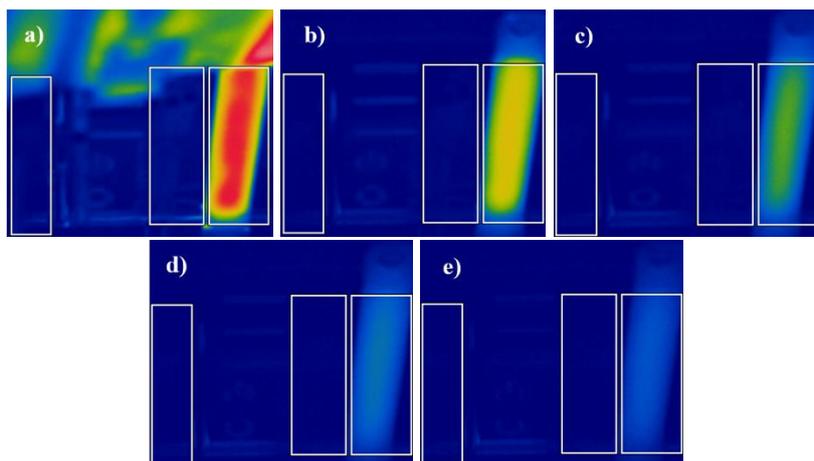
Nella Tabella 108 sono riportate le temperature dell'inserto in R-CPA rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS80PHBH20.

L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

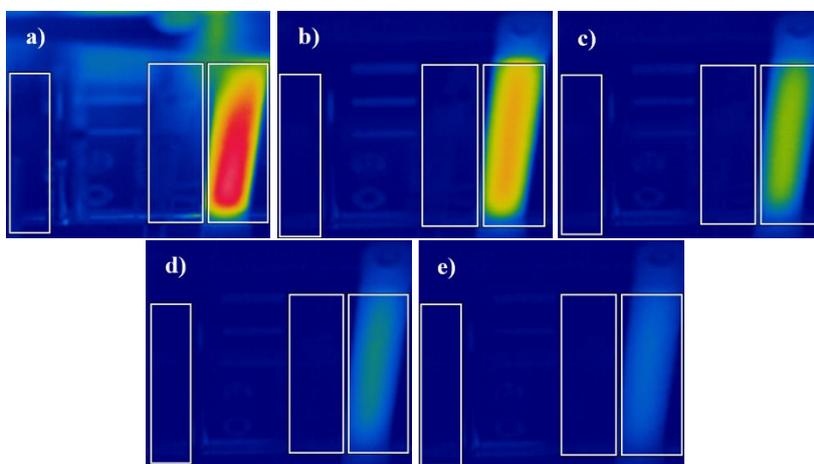
**Tabella 108:** Temperatura dell'inserto in R-CPA durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	69,0 *
1	15	51,1
1	30	41,2
1	45	35,9
1	60	32,5
5	0	66,5 *
5	15	54,6
5	30	43,7
5	45	37,7
5	60	34,1
10	0	67,5 *
10	15	53,4
10	30	43,1
10	45	38,0
10	60	34,1

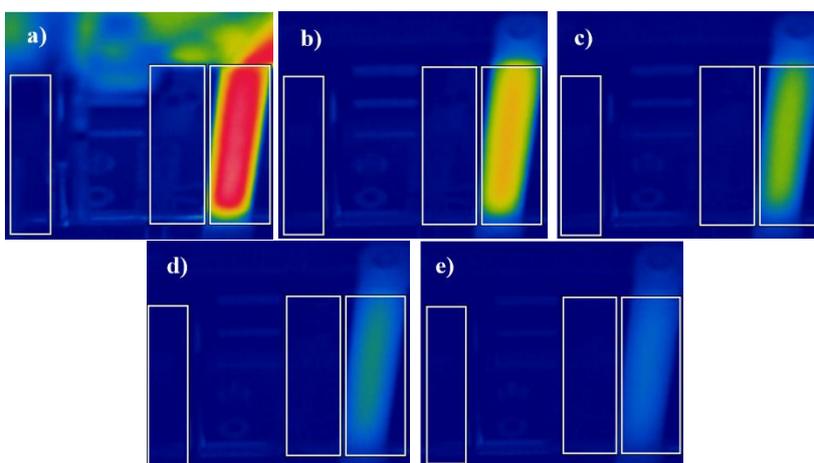
Nelle Figure 214 – 216 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione dello stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio del blend PBS80PHBH20 realizzati con inserto in R-CPA.



**Figura 215:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

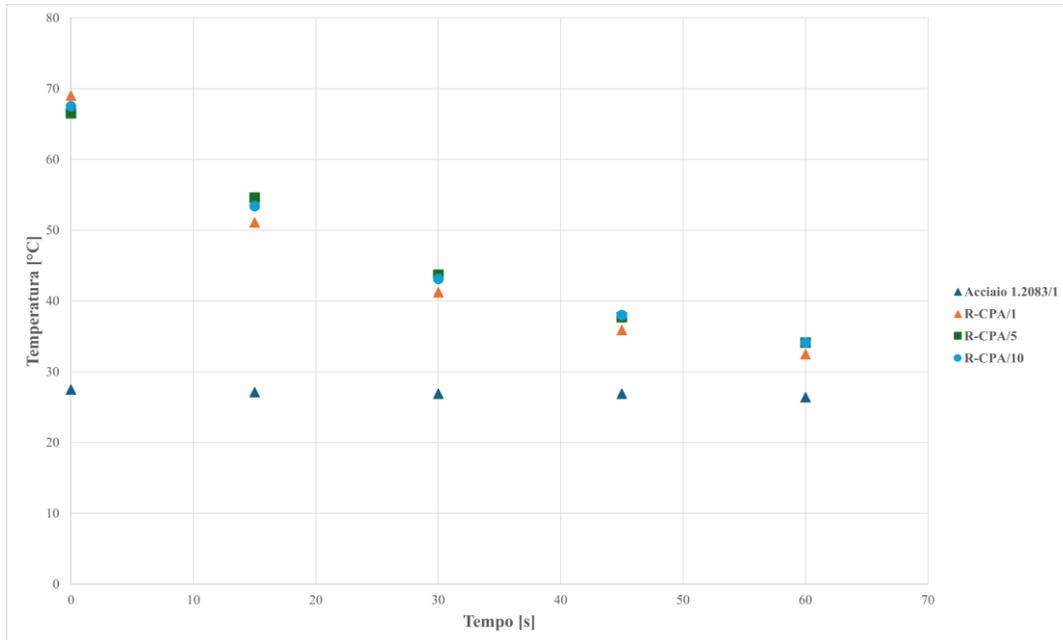


**Figura 216:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 217:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Figura 218 sono riportati, rispettivamente, gli andamenti della temperatura dell'inserto per il solo primo ciclo di stampaggio ad iniezione del blend PBS80PHBH20 per l'inserto in Acciaio 1.2083, mentre per l'inserto in R-CPA per i cicli di stampaggio 1-5-10.



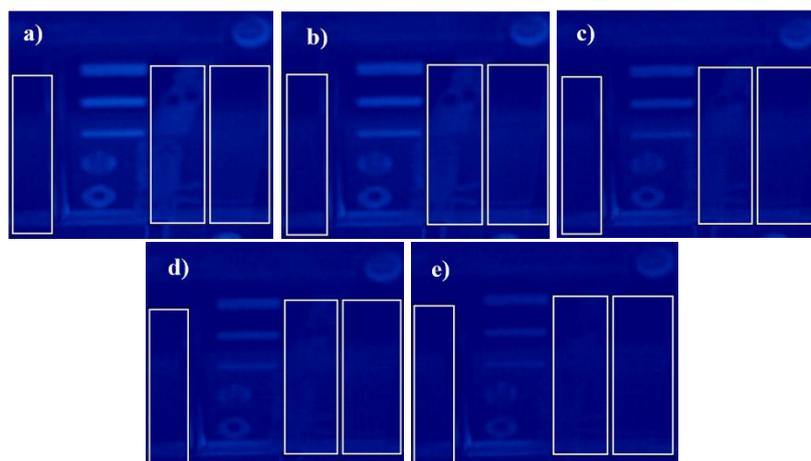
**Figura 218:** Andamento della temperatura dell'inserto per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS80PHBH20 per l'inserto in Acciaio 1.2083 e per i cicli di stampaggio 1-5-10 per l'inserto in R-CPA.

Nella Tabella 109 sono riportate le temperature dell'inserto in Acciaio 1.2083 rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 s dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PLA10.

**Tabella 109:** Temperatura dell'inserto in Acciaio 1.2083 durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	27,9
1	15	27,5
1	30	27,1
1	45	26,8
1	60	26,8

Nelle Figura 219 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione dello stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio del blend PBS90PLA10, realizzati con inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 219:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio di PBS90PLA10 con inserto in Acciaio 1.2083 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

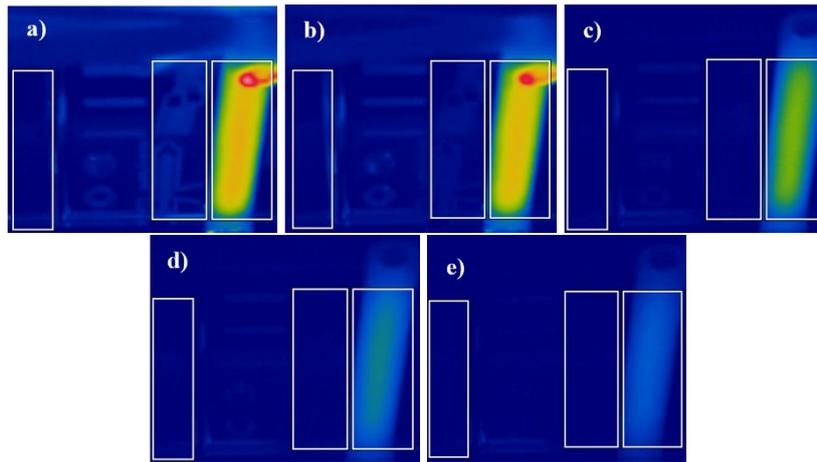
Nella Tabella 110 sono riportate le temperature dell'inserto in R-CPA rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 s dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PLA10.

L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

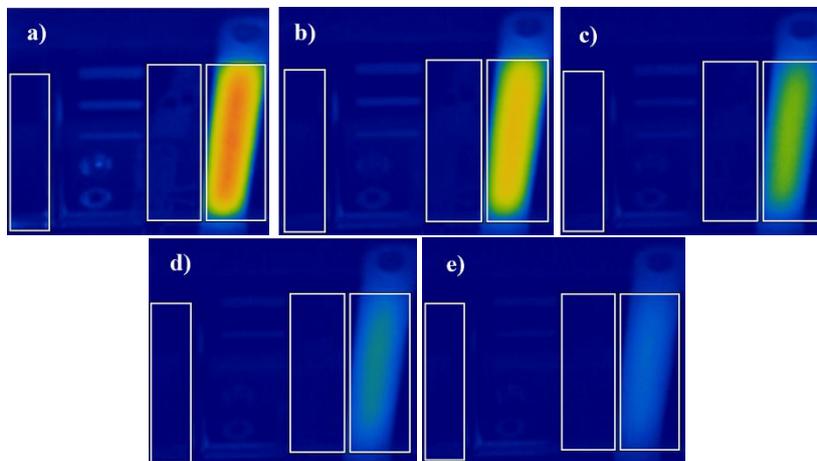
**Tabella 110:** Temperatura dell'inserto in R-CPA durante i cicli di stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	69,0 *
1	15	51,1
1	30	41,2
1	45	35,9
1	60	32,5
5	0	66,5 *
5	15	54,6
5	30	43,7
5	45	37,7
5	60	34,1
10	0	67,5 *
10	15	53,4
10	30	43,1
10	45	38,0
10	60	34,1

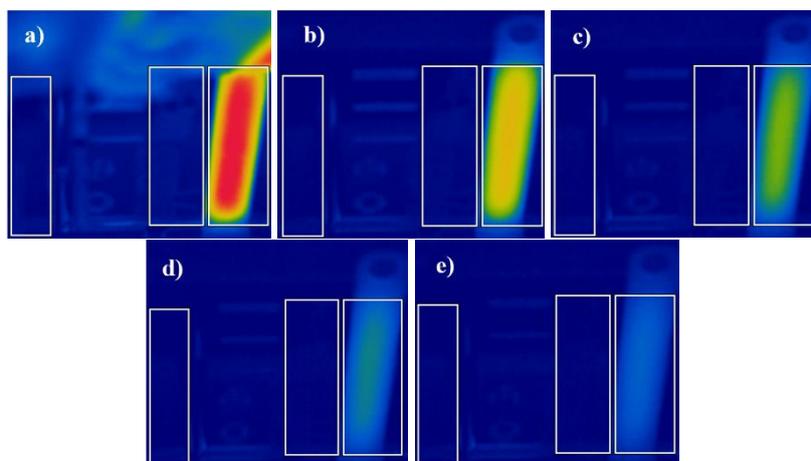
Nelle Figure 220 – 222 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo, del quinto e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione del pezzo dallo stampo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio del blend PBS90PLA10, realizzati con inserto in R-CPA.



**Figura 220:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

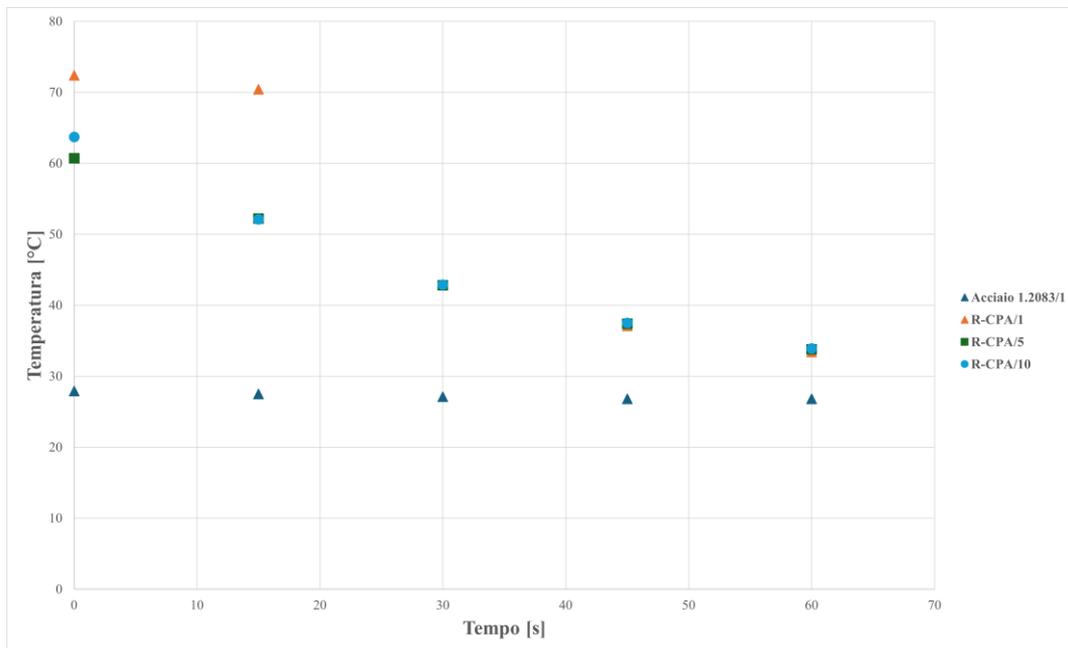


**Figura 221:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 222:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Figura 223 sono riportati, rispettivamente, gli andamenti della temperatura dell'inserto per il solo primo ciclo di stampaggio ad iniezione del blend PBS90PLA10 per l'inserto in Acciaio 1.2083, mentre per l'inserto in R-CPA per i cicli di processo 1-5-10.



**Figura 223:** Andamento della temperatura dell'inserto per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PBS90PLA10 per l'inserto in Acciaio 1.2083 e per i cicli di processo 1-5-10 per l'inserto in R-CPA.

Per quanto concerne i cicli di processo realizzati con i blend polimerici, la frequente estrazione manuale delle parti necessaria al momento dell'apertura dello stampo ha complicato l'accurato monitoraggio della temperatura in tale fase del ciclo produttivo.

Tuttavia, considerando la temperatura dell'inserto a 15 e a 60 secondi dall'apertura dello stampo, è possibile evidenziare una tendenza crescente delle temperature rilevate con i successivi cicli di processo per lo stampaggio ad iniezione di tutti i blend realizzati, che evidenzia un fenomeno di accumulo del calore tra cicli successivi dovuto ad una sola parziale dissipazione del calore nel volume dell'inserto.

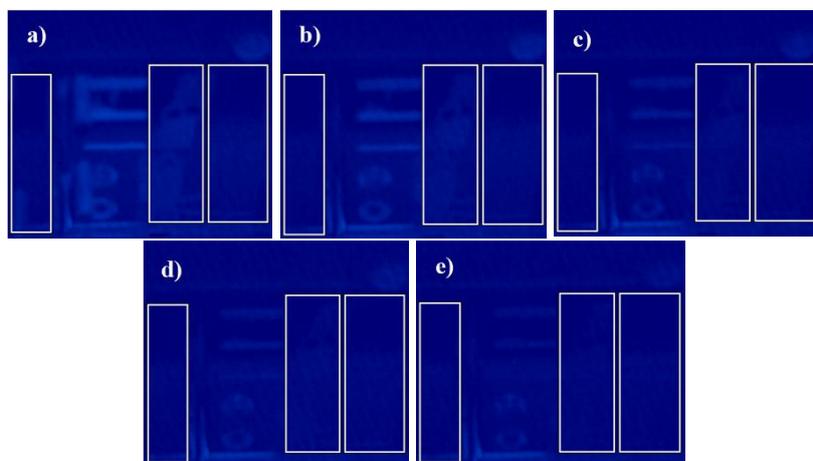
#### 3.5.4. Cicli di stampaggio ad iniezione di PP

Nella Tabella 111 sono riportate le temperature dell'inserto in Ergal 7075 rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione di PP.

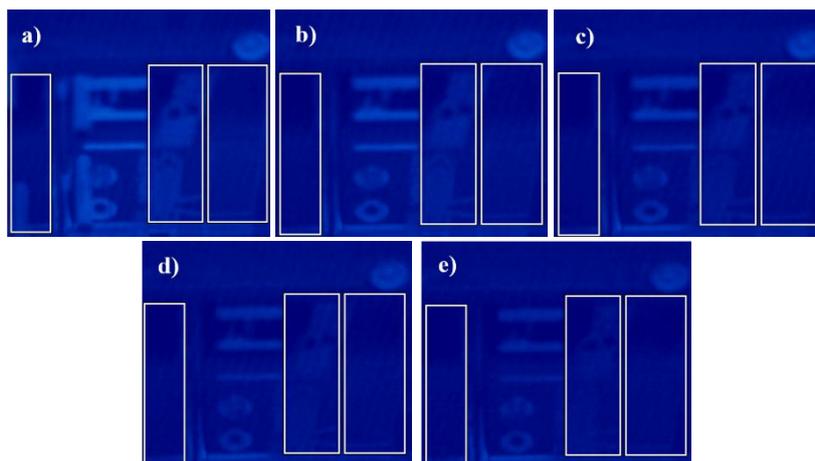
**Tabella 111:** Temperatura dell'inserto in Ergal 7075 per i cicli di stampaggio ad iniezione di PP.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	27,3
1	15	27,2
1	30	27,1
1	45	26,9
1	60	26,8
10	0	27,7
10	15	27,5
10	30	27,1
10	45	27,1
10	60	27,1

Nelle Figure 224 – 225 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione del pezzo stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio di PP realizzati con inserto in Ergal 7075.



**Figura 224:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto in Ergal 7075 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



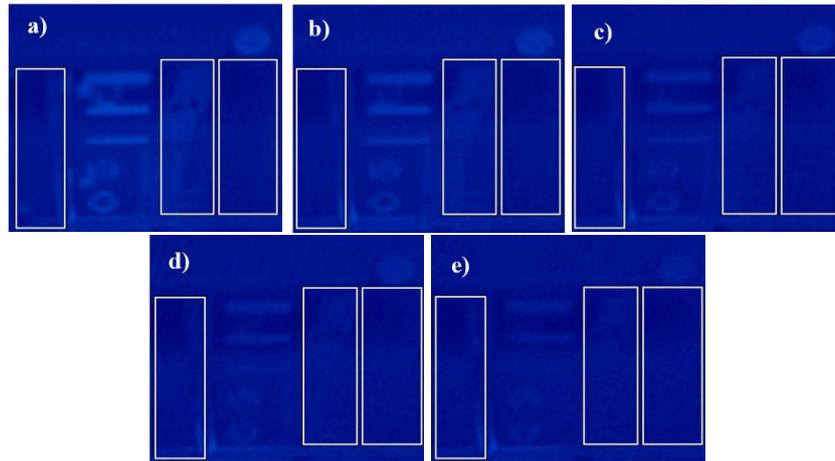
**Figura 225:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto in Ergal 7075 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

Nella Tabella 112 sono riportate le temperature dell'inserto in Acciaio 1.2083 rilevate al momento dell'espulsione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione di PP.

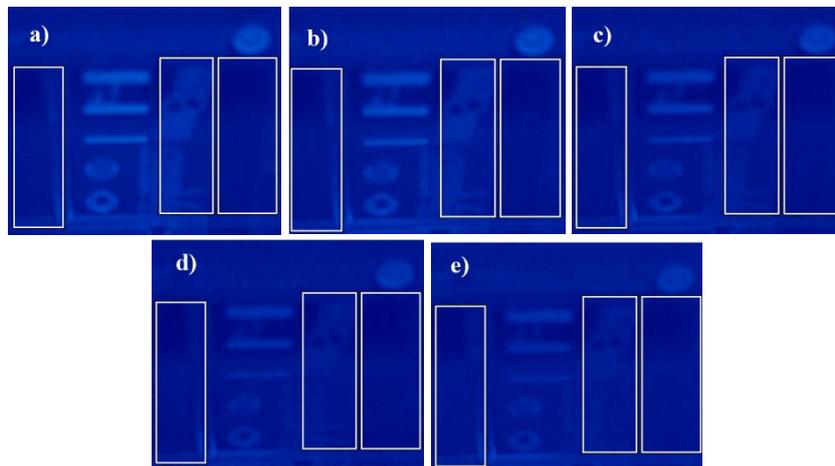
**Tabella 112:** Temperatura dell'inserto in Acciaio 1.2083 per i cicli di stampaggio ad iniezione di PP.

Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	27,4
1	15	26,5
1	30	26,2
1	45	26,3
1	60	26,1
10	0	28,0
10	15	27,5
10	30	27,4
10	45	26,9
10	60	26,7

Nelle Figure 226 – 227 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione della parte prodotta (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio di PP realizzati con inserto in Acciaio 1.2083.



**Figura 226:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto in Acciaio 1.2083 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 227:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto in Acciaio 1.2083 dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.

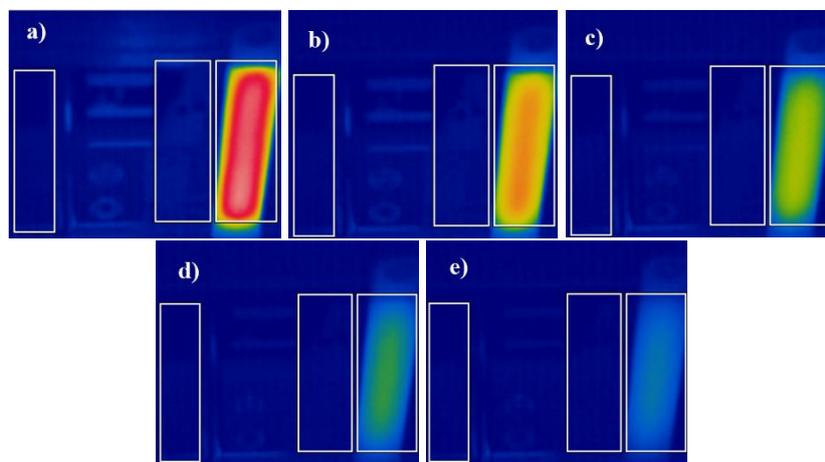
Nella Tabella 113 sono riportate le temperature dell'inserto in R-CPA rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione di PP.

**Tabella 113:** Monitoraggio della temperatura dell'inserto in R-CPA per i cicli di stampaggio ad iniezione di PP.

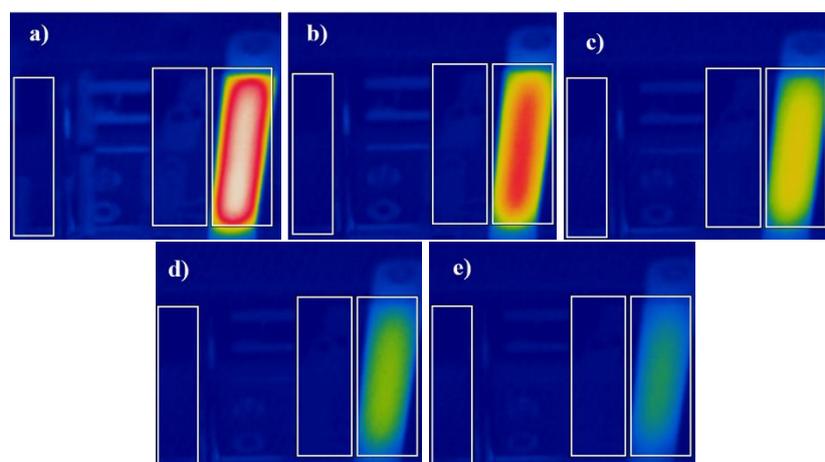
Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	72,5
1	15	57,1
1	30	45,4
1	45	39,7
1	60	35,9
5	0	78,6
5	15	61,3

5	30	50,2
5	45	43,2
5	60	38,8
10	0	79,4
10	15	62,1
10	30	50,3
10	45	43,8
10	60	38,9

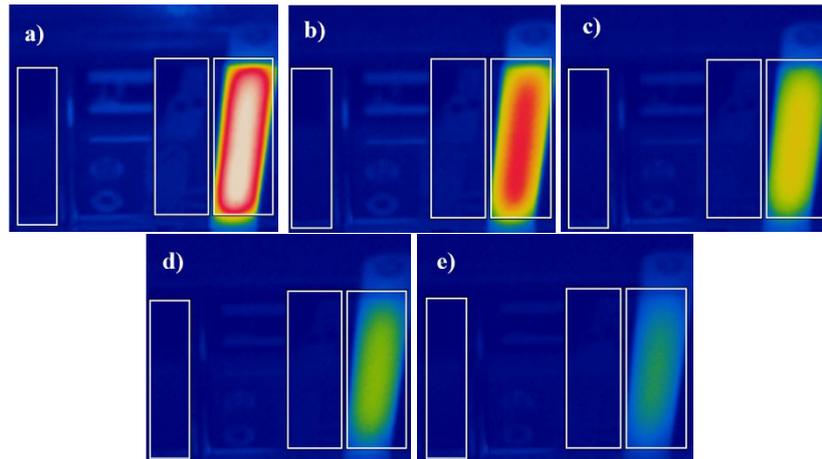
Nelle Figure 228 – 230 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'espulsione dello stampato (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio di PP realizzati con inserto in R-CPA.



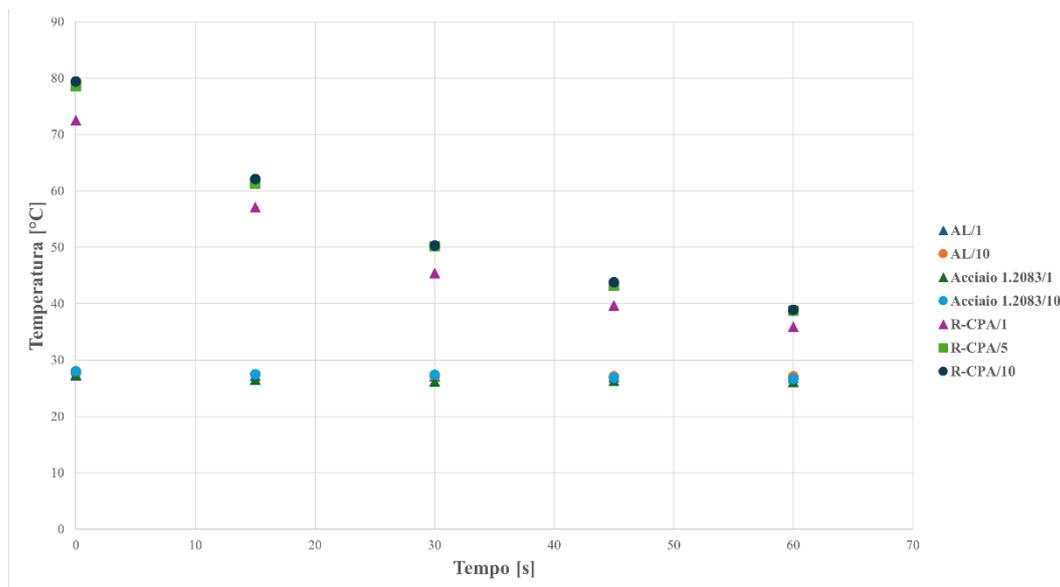
**Figura 228:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 229:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 230:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) 60s (e) dall'apertura dello stampo.



**Figura 231:** Andamento della temperatura dell'inserto per il primo e il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP per l'inserto in Acciaio 1.2083 e in lega di alluminio Ergal 7075 ("AL") e per i cicli di processo 1-5-10 per l'inserto in R-CPA.

Per quanto riguarda gli inserti analizzati, anche in questo caso si rileva una tendenza gradualmente crescente delle temperature dell'inserto rilevate all'apertura dello stampo per cicli di processo progressivi, che evidenzia un fenomeno di accumulo del calore nel volume dell'inserto, dovuto ad una incompleta dissipazione tra cicli successivi.

Tale fenomeno di accumulo del calore è più significativo per l'inserto realizzato per FFF in R-CPA che dispone di una minore conducibilità termica rispetto agli inserti metallici utilizzati.

Le temperature rilevate all'apertura dello stampo per gli inserti in Acciaio 1.2083 e in Ergal 7075 sono molto prossime: tuttavia, è stata registrata una temperatura leggermente inferiore

al momento dell'estrazione degli stampati per l'inserito in Ergal 7075, poiché dispone di una conducibilità termica superiore rispetto a quella posseduta dall'Acciaio 1.2083, e, quindi, è in grado di assicurare un trasferimento del calore più efficace.

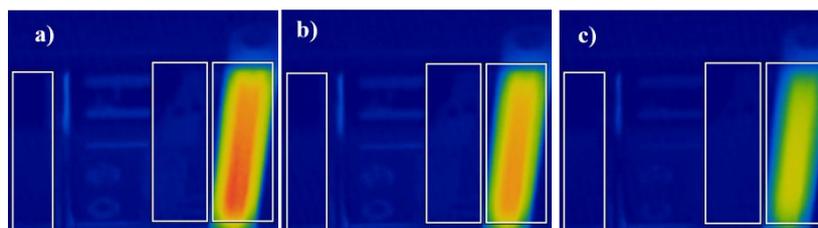
Nella Tabella 114 sono riportate le temperature dell'inserito "Zipper" in R-CPA rilevate al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 s dall'apertura dello stampo per i cicli di stampaggio ad iniezione di PP.

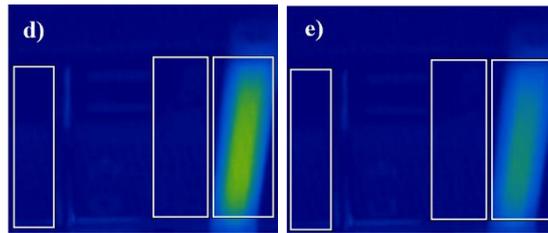
L'asterisco presente accanto alle temperature misurate segnala l'ottenimento della temperatura riportata solo dopo l'estrazione manuale della parte.

**Tabella 114:** Temperatura dell'inserito "Zipper" in R-CPA per i cicli di stampaggio ad iniezione di PP.

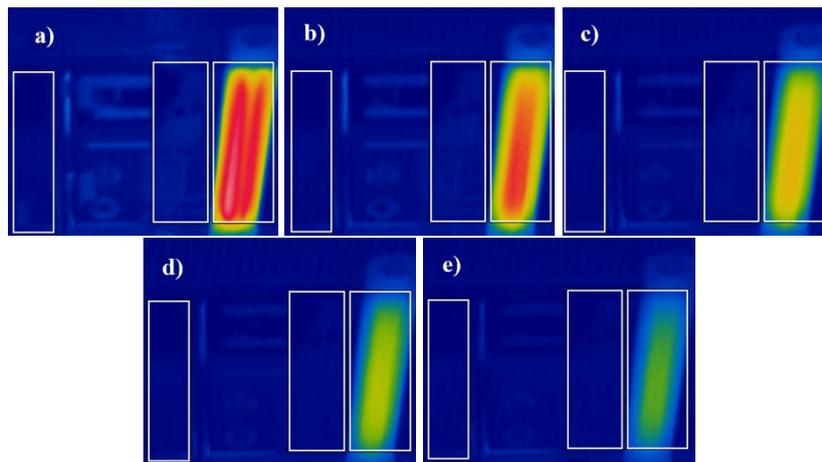
Numero di Stampate	Tempo [s]	Temperatura [°C]
1	0	63,8 *
1	15	55,7
1	30	47,9
1	45	42,4
1	60	38,2
5	0	70,6
5	15	60,9
5	30	52,4
5	45	45,9
5	60	41,2
10	0	72,5
10	15	61,1
10	30	52,6
10	45	45,9
10	60	41,2

Nelle Figure 232 – 234 sono presentate le acquisizioni alla termocamera ottenute, rispettivamente, con la realizzazione del primo e del decimo ciclo di stampaggio ad iniezione, al momento dell'estrazione del pezzo (0s) e dopo 15, 30, 45 e 60 secondi dall'apertura dello stampo, per i cicli di stampaggio di PP realizzati con inserto in "Zipper" in R-CPA per *Fused Filament Fabrication*.

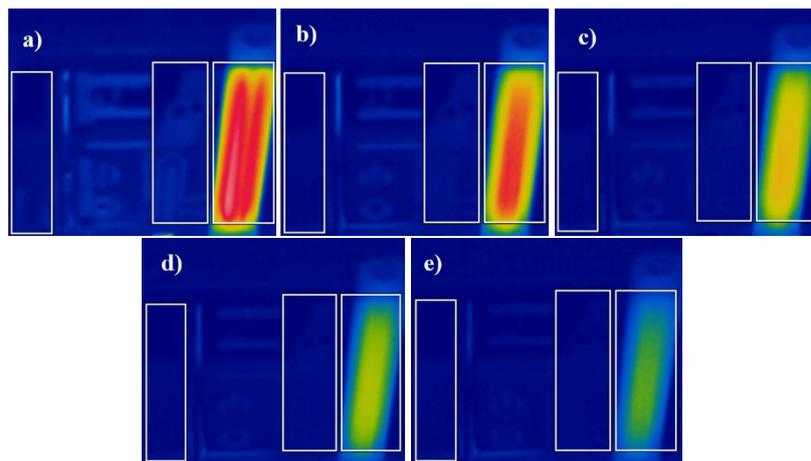




**Figura 232:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il primo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto “Zipper” in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall’apertura dello stampo.



**Figura 233:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il quinto ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto “Zipper” in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) 60s (e) dall’apertura dello stampo.



**Figura 234:** Monitoraggio della temperatura dello stampo per il decimo ciclo di stampaggio ad iniezione di PP con inserto “Zipper” in R-CPA dopo 0s (a), 15s (b), 30s (c), 45s (d) e 60s (e) dall’apertura dello stampo.

Per quanto riguarda l'inserto "Zipper" per i cicli di processo analizzati e per gli intervalli di tempo monitorati, si osserva un fenomeno di accumulo del calore con i successivi cicli di stampaggio.

Confrontando i due inserti realizzati in R-CPA nel quinto e decimo ciclo di processo, è possibile notare che le temperature rilevate per l'inserto base in R-CPA siano discretamente superiori rispetto a quelle rilevate per l'inserto "Zipper": probabilmente la presenza della cerniera centrale nella geometria dell'inserto permette di produrre una superficie di scambio termico maggiorata, influenzando la distribuzione e il trasferimento del calore, che consente l'ottenimento di temperature inferiori al momento dell'apertura dello stampo.

### 3.6. *Caratterizzazione meccanica degli inserti: prove a compressione*

In questo paragrafo verranno presentati i test di compressione eseguiti su campioni tipo Hot Disk, presentati nel paragrafo 2.4.3, al fine di valutare la resistenza alla compressione per campioni di materiale commerciale impiegati per la realizzazione degli inserti.

L'obiettivo dell'esecuzione di tale prova di caratterizzazione, infatti, consiste nel comprendere quale tra i materiali commerciali studiati risulta disporre di una migliore fattura che permette di rallentare la deformazione generatasi con le sollecitazioni meccaniche a cui l'inserto viene sottoposto durante i cicli di stampaggio ad iniezione.

Tale test di caratterizzazione è stato eseguito con il dinamometro dettagliato nel paragrafo 2.4.4, alle temperature di 25°C e 75°C.

L'esecuzione del test di caratterizzazione alla temperatura di 75°C è stata proposta in seguito al monitoraggio della temperatura dello stampo mediante termocamera, riportato nel paragrafo 3.5, che ha rivelato il frequente raggiungimento di temperature prossime o superiori ai 75°C al momento dell'apertura dello stampo per l'estrazione delle parti prodotte.

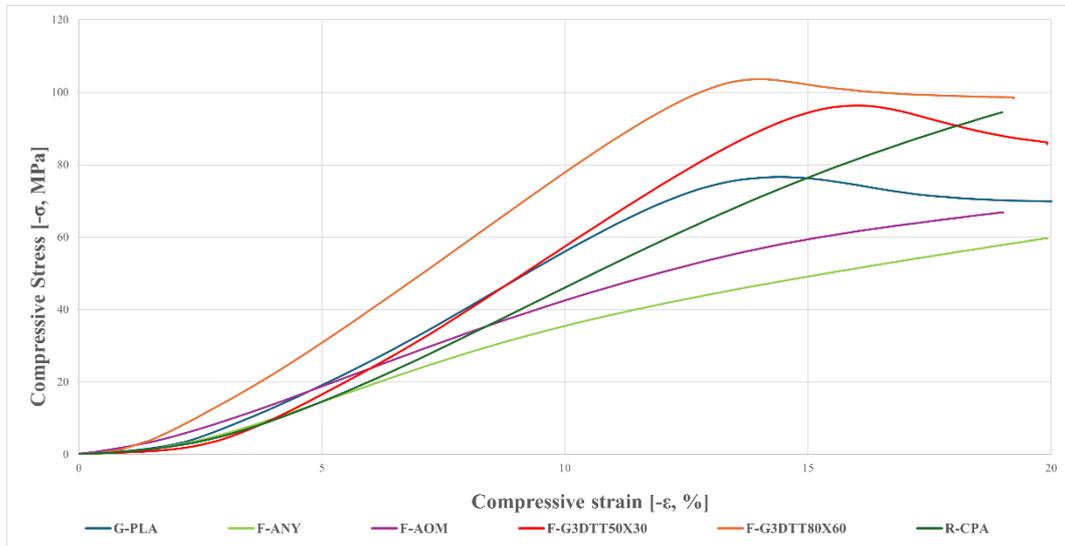
Le prove di compressione sono state eseguite con un precarico di 0,1 MPa, impiegando una velocità di 1 mm/min, impostando l'interruzione della prova al raggiungimento di una deformazione prestabilita di 2 mm, pari al 20% dell'altezza nominale dei provini, con l'obiettivo di studiare la resistenza a compressione dei materiali degli inserti in base alla funzione finale che gli stessi devono assolvere.

Infatti, una volta deformatosi in altezza del 10% (1 mm), l'inserto perde la capacità di riprodurre fedelmente la geometria progettata, portando alla replica di pezzi non utilizzabili, scarti del processo produttivo. Per questo motivo è stato deciso di limitare il range di deformazioni analizzato, impostando il termine della prova di caratterizzazione al raggiungimento del doppio del valore soglia di deformazione identificato.

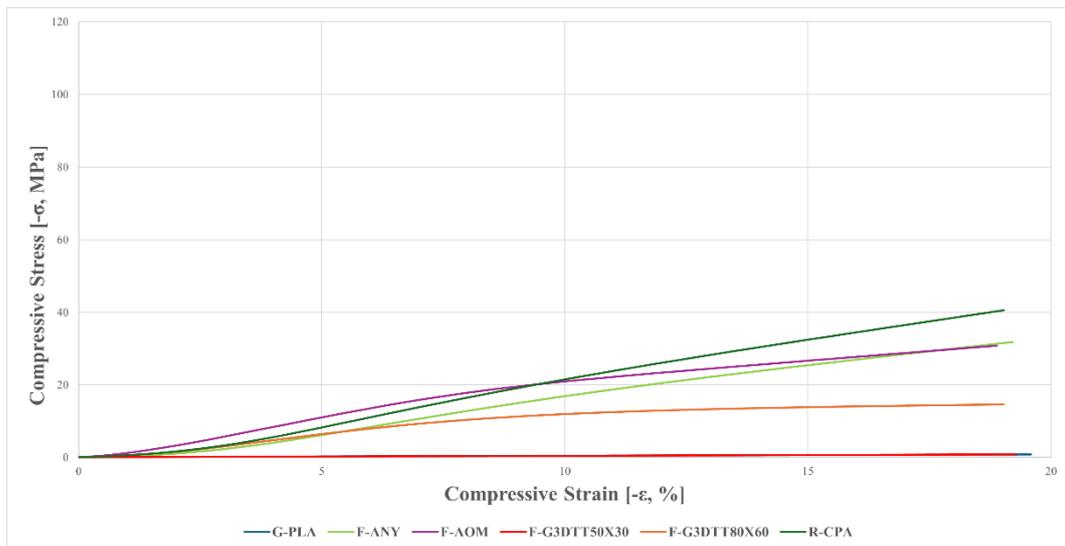
Nelle Figure 235 – 236 sono riportati i grafici ricavati dall'esecuzione delle prove di compressione compiute, rispettivamente, a 25°C e 75°C su provini di materiale commerciale.

Nelle Tabella 115 sono riportati i valori del modulo di compressione ( $E_c$ ), del massimo sforzo a compressione ( $\sigma_M$ ) e della massima deformazione ( $\epsilon_M$ ) misurati con l'esecuzione

delle prove a compressione a 25°C e 75°C e le misure dell'altezza iniziale (h) e della superficie di base (A<sub>0</sub>) dei provini analizzati inserite in input per l'esecuzione della prova.



**Figura 235:** Compressive behavior dei provini di materiale commerciale valutato a 25°C.



**Figura 236:** Compressive behavior dei provini di materiale commerciale valutato a 75°C.

**Tabella 115:** Valori del modulo di compressione ( $E_c$ ), massimo sforzo a compressione ( $\sigma_M$ ) massima deformazione ( $\epsilon_M$ ) valutati con l'esecuzione delle prove a compressione a 25°C e a 75°C e misure dell'altezza iniziale ( $h$ ) e della superficie di base ( $A_0$ ) dei provini analizzati.

<b>Provino (Temperatura Prova)</b>	<b><math>E_c</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_M</math> [MPa]</b>	<b><math>\epsilon_M</math> [%]</b>	<b><math>h</math> [mm]</b>	<b><math>A_0</math> [mm<sup>2</sup>]</b>
F-ANY (25°C)	26,4	59,7	20	10,04	452,62
F-ANY (75°C)	21,4	31,8	19	10,41	466,12
F-AOM (25°C)	147	66,8	19	10,52	439,32
F-AOM (75°C)	76,1	30,8	19	10,59	450,71
F-G3D TT50X30 (25°C)	46,6	96,3	16	10,04	405,21
F-G3D TT50X30 (75°C)	3,54	0,865	19	10,38	395,41
F-G3D TT80X60 (25°C)	46,7	104	14	10,40	391,23
F-G3D TT80X60 (75°C)	37,6	14,6	19	10,51	387,10
G-PLA (25°C)	44,3	76,6	14	9,95	411,47
G-PLA (75°C)	4,11	0,836	20	10,21	404,01
R-CPA (25°C)	35,9	94,4	19	10,53	459,03
R-CPA (75°C)	40,5	40,6	19	10,51	460,74

Analizzando l'andamento delle curve riportate nelle Figura 235 e Figura 236 e i dati presentati in Tabella 115, è possibile evidenziare la forte influenza della temperatura sulle proprietà di modulo a compressione e resistenza a compressione dei campioni analizzati.

Infatti, generalmente è possibile osservare una tendenza di diminuzione del modulo a compressione e della resistenza a compressione con l'aumento della temperatura a cui è stata eseguita la prova di caratterizzazione.

Tuttavia, per il solo materiale commerciale R-CPA, è stata rilevata una tendenza crescente per il modulo a compressione passando dal test di caratterizzazione eseguito a 25°C a quello performato a 75°C.

L'incremento del modulo a compressione registrato potrebbe essere dovuto ad un fenomeno di rilassamento termico degli stress accumulati durante il processo produttivo e ad una parziale riduzione dei vuoti prodotti con il processo di FFF, ottenuta per esposizione dei campioni ad una temperatura superiore alla temperatura di transizione vetrosa posseduta, pari a 51°C per il R-CPA, valutata nel paragrafo 3.1.3.1.

Confrontando le proprietà dei materiali commerciali a parità di deformazione realizzata, considerando il 10% come valore soglia di deformazione longitudinale oltre cui l'inserito perde la capacità di replicare la geometria iniziale desiderata, i materiali commerciali R-CPA e F-AOM hanno mostrato una maggiore resistenza alla compressione con l'esposizione a 75°C.

Tali risultati confermano quanto concluso nel paragrafo 3.4.9, in cui gli inserti prodotti in F-AOM e in R-CPA hanno dimostrato una maggiore ritenzione delle dimensioni iniziali con l'esposizione alle sollecitazioni termiche e meccaniche a cui sono stati sottoposti durante l'impiego nei primi 20 cicli di stampaggio ad iniezione.

Infine, il test a compressione ha dimostrato l'influenza del trattamento termico sulle proprietà meccaniche dei provini analizzati, confermando quanto concluso con le prove dinamico – meccaniche riportate al paragrafo 3.1.2.3.

Infatti, a parità di materiale commerciale considerato (F-G3D), il provino F-G3D TT80X60, sottoposto ad un trattamento termico ad una temperatura più elevata e dalla durata maggiore rispetto al provino F-G3D TT50X30, ha mostrato una maggiore resistenza a compressione per i test eseguiti a 25°C e 75°C, probabilmente a causa di una maggiore riduzione dei vuoti inter-beads e intra-beads, introdotti con il processo FFF. [83,84,85,101]



## 4. Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di applicare le procedure di *Rapid Tooling* per realizzare inserti di stampi per lo Stampaggio ad Iniezione mediante il processo di *Fused Filament Fabrication (FFF)* per la produzione di parti a tiratura limitata.

Gli inserti sono stati realizzati a partire da cinque differenti filamenti commerciali, e i cicli di Stampaggio ad Iniezione sono stati realizzati utilizzando diversi materiali polimerici commerciali e blend polimerici appositamente prodotti, al fine di sottoporre gli inserti a cicli produttivi a temperatura crescente.

### *Caratterizzazione dei filamenti e trattamenti termici*

L'esecuzione dello studio preliminare di caratterizzazione dinamico – meccanica e di conducibilità termica sui filamenti R-CPA e F-G3D ha permesso di selezionare l'architettura di deposizione 0/45/90/-45 *Flat* perché ha fornito una migliore combinazione delle proprietà di conducibilità termica e dello *Storage Modulus* in temperatura.

Lo svolgimento delle prove di DMA e della caratterizzazione all'Hot Disk su specifici provini ha dimostrato che l'esecuzione di un trattamento termico, per i filamenti commerciali R-CPA ed F-G3D, ha comportato un incremento dello *Storage Modulus* in temperatura e dei valori di conducibilità termica rispetto ai valori registrati per il materiale nelle condizioni “*as printed*”, ottenuti mediante un effetto sinergico di incremento della cristallinità della matrice polimerica e di parziale riduzione delle porosità introdotte con il processo di *Fused Filament Fabrication*.

In particolare, i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione termica, dinamico meccanica e di conducibilità termica dei materiali commerciali a base PLA hanno evidenziato i vantaggi dell'impiego di una quantità seppur ridotta di rinforzante conduttivo e l'utilità di esecuzione di trattamenti termici per conseguire migliorate proprietà dinamico-meccaniche e di dissipazione del calore.

Per i filamenti F-AOM e F-ANY, invece, le medesime prove di caratterizzazione, condotte su appositi provini, hanno dimostrato incrementi poco significativi nello *Storage Modulus* in temperatura e nella conducibilità termica ottenuti con l'esecuzione dei medesimi trattamenti termici.

Per tale ragione, la realizzazione di uno step di post-processing aggiuntivo non è risultata conveniente seguendo le metodologie di *Rapid Tooling*.

Il monitoraggio delle dimensioni degli inserti ha dimostrato che l'esecuzione del trattamento termico ottimale per ogni tipologia di filamento commerciale abbia interessato

le dimensioni degli inserti stessi, comportandone un'espansione nell'altezza (asse Z) e un restringimento della lunghezza (asse X) e larghezza (asse Y), dovuto al rilascio delle sollecitazioni residue accumulate durante il processo di *Fused Filament Fabrication* e mantenute nei layer prodotti a causa del rapido raffreddamento.

Inoltre, a parità di matrice polimerica impiegata, l'esecuzione di un trattamento termico a temperatura più elevata e per una durata più estesa permette di assicurare un effetto di rilassamento maggiore, rilevato con un maggior restringimento delle dimensioni lungo gli assi X ed Y ed una più accentuata espansione delle dimensioni lungo l'asse Z.

#### *Cicli di stampaggio a iniezione: rugosità superficiale e usura degli inserti*

Considerando i cicli di Stampaggio ad Iniezione comuni a tutti gli inserti, realizzati a parità di condizioni operative ed eseguiti iniettando LDPE e PBS, è stato possibile formulare diverse valutazioni.

L'inserto in R-CPA ha mantenuto una maggiore integrità strutturale per i 20 cicli di stampaggio ad iniezione, portando alla produzione di parti non deformate e che hanno richiesto il minor numero di interruzioni del ciclo continuo di produzione per realizzare l'estrazione manuale delle parti.

Inoltre, considerando globalmente i risultati registrati per i venti cicli di Stampaggio ad Iniezione, l'inserto in R-CPA ha permesso di riprodurre l'altezza del gradino dimensionalmente più vicina a quella riprodotta con l'inserto in Acciaio 1.2083.

Con l'esecuzione dei successivi cicli di stampaggio ad iniezione, la rugosità superficiale riprodotta mediante inserti realizzati per FFF ha seguito un andamento variabile, dovuto all'alternanza di fenomeni di danneggiamento superficiale e di smussamento delle asperità del profilo superficiale con i successivi cicli di stampaggio ad iniezione.

Tuttavia, considerando le misure di rugosità superficiale rilevate tra gli inserti prodotti mediante FFF, l'inserto prodotto in F-G3D TT50X30 ha permesso di ottenere valori di finitura superficiale più prossimi a quelli ottenuti con l'inserto in Acciaio 1.2083, registrando un massimo scostamento tra i valori di Ra di  $1,75 \pm 0,01 \mu\text{m}$  e di  $1,11 \pm 0,05 \mu\text{m}$ , rispettivamente per i cicli di stampaggio di LDPE e PBS.

L'ispezione visiva al microscopio ottico ha dimostrato il verificarsi di fenomeni di usura superficiale delle porzioni di inserto che vengono mantenute nella geometria della superficie riprodotta con il raffreddamento del fuso polimerico.

Gli stampati prodotti con inserto in R-CPA mostrano una minore tendenza all'usura dell'inserto, che, comunque, si concentra nelle stesse zone interessate per gli altri inserti, ovvero lo spigolo vivo nella geometria da riprodurre, sito nelle vicinanze dell'area di alloggiamento delle viti, e le asperità del profilo superficiale dell'area centrale.

Le prove di stampaggio ad iniezione dei blend polimerici prodotti e del PP, eseguite con lo stesso inserto in R-CPA sottoposto ai precedenti cicli di stampaggio ad iniezione, hanno messo in evidenza ulteriormente i limiti della tecnica di *Rapid Tooling* approfondita con il lavoro di tesi.

La finitura superficiale è un punto debole per la tecnica presentata, poiché l'iniezione del fuso polimerico riproduce i picchi e le valli prodotti con il processo di FFF ed eventuali differenti geometrie derivanti da fenomeni di usura superficiale dell'inserto, che viene sottoposto a continue sollecitazioni termiche e meccaniche con i successivi cicli di Stampaggio ad Iniezione.

#### *Dissipazione del calore da parte dell'inserto*

Il monitoraggio della temperatura dello stampo mediante camera IR ha provato che l'inserto realizzato per FFF in R-CPA abbia registrato le temperature più basse al momento dell'apertura dello stampo per l'espulsione delle parti prodotte, a causa della seconda maggiore conducibilità termica valutata in fase di caratterizzazione dei materiali commerciali, migliorata con l'esecuzione del trattamento termico a 140°C per 30 minuti.

Tuttavia, sebbene il materiale commerciale F-ANY abbia registrato in fase di caratterizzazione il più alto valore di conducibilità termica, non ha mostrato con le prove di Stampaggio ad Iniezione la più efficiente dissipazione del calore.

Il mancato riscontro delle proprietà tra la fase di caratterizzazione e l'utilizzo in opera ha dimostrato l'importante effetto delle porosità e dei difetti casuali introdotti con il processo di FFF e la rilevanza dell'esecuzione di un trattamento termico di post-processing, che può condurre alla formazione di network di dissipazione del calore più efficienti.

Inoltre, il monitoraggio della superficie dello stampo con la termocamera IR ha rivelato il progressivo e continuo incremento della temperatura dell'inserto al raggiungimento dei 20 cicli di produzione. Da un punto di vista applicativo, tale aspetto si configura nel mancato ottenimento di parti stampate dalle proprietà ripetibili, dimostrando che l'applicabilità di tale tecnologia sia limitata alla produzione di piccoli lotti.

#### *Prove di compressione degli inserti in temperatura*

Le prove di compressione in temperatura hanno confermato le medesime tendenze rilevate durante la fase di caratterizzazione mediante DMA. In particolare:

- i materiali commerciali R-CPA e F-AOM, che hanno dimostrato possedere valori più elevati di modulo a compressione e di *Storage Modulus* in temperatura, sono stati i materiali che hanno mostrato la migliore ritenzione delle dimensioni iniziali degli inserti dopo l'esecuzione dei cicli di Stampaggio ad Iniezione;
- a parità di matrice polimerica utilizzata (PLA), l'esecuzione di un trattamento termico a più alta temperatura e l'utilizzo di un rinforzante, seppur in quantità ridotta, ha permesso il mantenimento di migliori proprietà meccaniche in temperatura;
- per i campioni in R-CPA, è stata dimostrata una tendenza crescente per il modulo a compressione passando dal test di compressione eseguito a 25°C alla prova realizzata a 75°C, registrando, rispettivamente i valori di 35,9 MPa e di 40,5 MPa. Tale tendenza potrebbe essere dovuta ad un fenomeno di rilassamento degli stress accumulati durante il processo di FFF e ad una parziale ulteriore riduzione dei vuoti realizzata mediante esposizione degli inserti ad una temperatura maggiore della temperatura di transizione vetrosa posseduta.

### *Inseriti dalla geometria modificata*

L'applicazione di inserti dalla geometria modificata ha permesso di dimostrare come sia le proprietà di dissipazione del calore che l'ottenimento di cicli di produzione continui con estrazione delle parti automatizzata, siano fortemente influenzate dalla superficie dell'inserto esposta.

In particolare, considerando la dissipazione del calore, a parità di materiale commerciale impiegato (R-CPA) e step di post-processing adottati a valle del processo di FFF (TT140X30), l'inserto "Zipper", dotato di un avvallamento superficiale esteso per tutta la lunghezza della zona centrale dell'inserto, ha registrato una più veloce dissipazione del calore a causa di una maggiore superficie di scambio termico esposta, rispetto a quella esibita dalla geometria piana dell'inserto.

Per l'ottenimento di cicli produttivi continui, a parità di materiale e trattamento termico considerato (R-CPA, TT140X30), la produzione di spessori molto sottili e l'esposizione di un'area di contatto significativamente incrementata rispetto a quella esposta dalla geometria piana dell'inserto, come nel caso della geometria "Pool" hanno ostacolato l'estrazione automatizzata delle parti, a causa del verificarsi di frequenti fenomeni di adesione della parte stampata alla superficie più ampia e articolata dell'inserto.

### *Conclusione*

In generale, sebbene lo studio abbia evidenziato i punti di debolezza della tecnica attraverso un confronto con inserti in materiale metallico, è stato dimostrato che il *Rapid Tooling* di inserti e stampi ad iniezione, sfruttando la tecnica di *Additive Manufacturing* di *Fused Filament Fabrication*, consista in una metodologia efficace e promettente per la produzione di inserti da impiegare nella realizzazione di piccoli lotti di stampati ad un costo ridotto e in un tempo contenuto.

## Bibliografia

- [1] Godec, D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E. e Ureña Alcázar, J., a cura di, (2022). *A Guide to Additive Manufacturing* [online]. Cham: Springer International Publishing. [Ottobre 2023]. Disponibile da: doi: 10.1007/978-3-031-05863-9
- [2] Gibson, I., Rosen, D. e Stucker, B., (2015). *Additive Manufacturing Technologies* [online]. New York, NY: Springer New York. Disponibile da: doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3
- [3] ISO/ASTM “Additive Manufacturing – General Principles – Fundamentals and Vocabulary”; ISO/ASTM 52900:2021 [online]. Disponibile da: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
- [4] Sachs, E., Cima, M., Williams, P., Brancazio, D. e Cornie, J., (1992). Three Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model. *Journal of Engineering for Industry* [online]. **114**(4), 481–488. Disponibile da: doi: 10.1115/1.2900701
- [5] Mohan Pandey, P., Venkata Reddy, N. e Dhande, S. G., (2003). Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal* [online]. **9**(5), 274–288. [Ottobre 2023]. Disponibile da: doi: 10.1108/13552540310502185
- [6] Subtractive Manufacturing vs. Additive Manufacturing [online]. *Xometry Europe*. [Ottobre 2023]. Disponibile da: <https://xometry.eu/en/subtractive-manufacturing-vs-additive-manufacturing/>
- [7] Vantaggi dell’additive manufacturing | Prima Additive [online], (Ottobre 2023). *Prima Additive | Cutting-edge metal additive manufacturing solutions*. Disponibile da: <https://www.primaadditive.com/it/additive-manufacturing/vantaggi>
- [8] Manifattura Additiva Vs Manifattura tradizionale: costi e vantaggi della tecnologia di stampa 3D [online], [Ottobre 2023]. *Roboze: professional and industrial 3D printers design and production*. Disponibile da: <https://www.roboze.com/it/risorse/manifattura-additiva-vs-manifattura-tradizionale-costi-e-vantaggi-della-tecnologia-di-stampa-3d.html>
- [9] Rajaguru, K., Karthikeyan, T. e Vijayan, V., (2020). Additive manufacturing – State of art. *Materials Today: Proceedings* [online]. **21**, 628–633. Disponibile da: doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.728
- [10] N. Turner, B., Strong, R. e A. Gold, S., (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal* [online]. **20**(3), 192–204. Disponibile da: doi: 10.1108/rpj-01-2013-0012
- [11] Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J. e Holzer, C., (2018). Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material

Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. *Materials* [online]. **11**(5), 840. Disponibile da: doi: 10.3390/ma11050840

[12] Valkenaers, H., Vogeler, F., Ferraris, E., Voet, A., Kruth, J.-P., Azcárate, S., & Dimov, S. (2013). A novel approach to additive manufacturing: Screw extrusion 3D-printing. In *Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture* (pp. 235–238). Research Publishing; Singapore. [https://doi.org/10.3850/978-981-07-7247-5\\_359](https://doi.org/10.3850/978-981-07-7247-5_359). Disponibile da: [https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/fulldisplay?docid=lirias1672623&context=SearchWebhook&vid=32KUL\\_KUL:Lirias&lang=en&search\\_scope=lirias\\_profile&adaptor=SearchWebhook&tab=LIRIAS&query=any,contains,LIRIAS1672623&offset=0](https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/fulldisplay?docid=lirias1672623&context=SearchWebhook&vid=32KUL_KUL:Lirias&lang=en&search_scope=lirias_profile&adaptor=SearchWebhook&tab=LIRIAS&query=any,contains,LIRIAS1672623&offset=0)

[13] Agarwala, M. K., Jamalabad, V. R., Langrana, N. A., Safari, A., Whalen, P. J. e Danforth, S. C., (1996). Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyping Journal* [online]. **2**(4), 4–19. Disponibile da: doi: 10.1108/13552549610732034

[14] Rahim, T. N. A. T., Abdullah, A. M. e Md Akil, H., (2019). Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites. *Polymer Reviews* [online]. **59**(4), 589–624. Disponibile da: doi: 10.1080/15583724.2019.1597883

[15] Bertolino, M., Battezzato, D., Arrigo, R. e Frache, A., (2021). Designing 3D printable polypropylene: Material and process optimisation through rheology. *Additive Manufacturing* [online]. **40**, 101944. Disponibile da: doi: 10.1016/j.addma.2021.101944

[16] Bellini, A., Gucceri, S. e Bertoldi, M., (2004). Liquefier Dynamics in Fused Deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. **126**(2), 237–246. Disponibile da: doi: 10.1115/1.1688377

[17] Bellini, A., (2002). *Fused deposition of ceramics: a comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design*. Ph.D. Thesis, Drexel University. Disponibile da: [https://www.researchgate.net/publication/28673773\\_Fused\\_deposition\\_of\\_ceramics\\_A\\_comprehensive\\_experimental\\_analytical\\_and\\_computational\\_study\\_of\\_material\\_behavior\\_fabrication\\_process\\_and\\_equipment\\_design](https://www.researchgate.net/publication/28673773_Fused_deposition_of_ceramics_A_comprehensive_experimental_analytical_and_computational_study_of_material_behavior_fabrication_process_and_equipment_design)

[18] Shofner, M. L., Lozano, K., Rodríguez-Macías, F. J. e Barrera, E. V., (2003). Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. **89**(11), 3081–3090. Disponibile da: doi: 10.1002/app.12496

[19] Nee, A. Y. C., (2014). *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. Springer London, Limited.

[20] Xometry, T. (2023, 1 luglio). *Soft Tooling vs. Hard Tooling: Definitions & Comparisons*. Where Big Ideas Are Built | Production Parts and Prototypes | Xometry. <https://www.xometry.com/resources/machining/soft-tooling-vs-hard-tooling/>

- [21] *Two Types of Rapid Tooling for Prototyping - Pacific Research Laboratories*. (2020, 5 maggio). Pacific Research Laboratories. <https://www.pacific-research.com/two-types-of-rapid-tooling-for-prototyping-prl/>
- [22] *Differences between Soft and Hard Tooling*. (s.d.). Rapid Manufacturing | Affordable Fast Manufacturing Services. <https://www.teamrapidtooling.com/differences-between-soft-and-hard-tooling-a-344.html>
- [23] Peil, C. (2021, 30 dicembre). *Plastic injection moulding: hard tooling vs soft tooling*. ESCATEC - Worldclass Electronics Manufacturing. <https://www.escatec.com/blog/plastic-injection-moulding-hard-tooling-vs-soft-tooling>
- [24] Catoen, B. e Rees, H., (2021b). *Injection Mold Design Handbook* [online]. München, Germany: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. Disponibile da: doi: 10.1007/978-1-56990-816-7
- [25] Rosato, D. V., Rosato, D. V. e Rosato, M. G., a cura di, (2000). *Injection Molding Handbook* [online]. Boston, MA: Springer US. Disponibile da: doi: 10.1007/978-1-4615-4597-2
- [26] Gohn, A. M., Brown, D., Mendis, G., Forster, S., Rudd, N., & Giles, M. (2022). Mold inserts for injection molding prototype applications fabricated via material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 51, 102595. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102595>
- [27] Hanemann, T., Klein, A., Baumgärtner, S., Jung, J., Wilhelm, D., & Antusch, S. (2023). Material Extrusion 3D Printing of PEEK-Based Composites. *Polymers*, 15(16), 3412. <https://doi.org/10.3390/polym15163412>
- [28] Simpson, P., Zakula, A. D., Nelson, J., Dworshak, J. K., Johnson, E. M., & Ulven, C. A. (2019). Injection molding with an additive manufactured tool. *Polymer Engineering & Science*, 59(9), 1911–1918. <https://doi.org/10.1002/pen.25192>
- [29] Rodriguez, J. (s.d.). Use of Additive Manufacturing (AM) for Mold Inserts in Injection Molding. In *2016 ASEE Annual Conference & Exposition*. ASEE Conferences. <https://doi.org/10.18260/p.27113>
- [30] Siemiński, P., & Szulc, B. (2018). Analysis of FDM/FFF additive manufacturing production mold inserts of injection molds. *Mechanik*, 91(1), 53–55. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.1.11>
- [31] Dizon, J. R. C., Valino, A. D., Souza, L. R., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincola, R. C. (2020). 3D Printed Injection Molds Using Various 3D Printing Technologies. *Materials Science Forum*, 1005, 150–156. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1005.150>
- [32] Chung, P., Heller, J. A., Etemadi, M., Ottoson, P. E., Liu, J. A., Rand, L., & Roy, S. (2014). Rapid and Low-cost Prototyping of Medical Devices Using 3D Printed Molds for Liquid Injection Molding. *Journal of Visualized Experiments*, (88). <https://doi.org/10.3791/51745>

- [33] Dizon, J. R. C., Valino, A. D., Souza, L. R., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2019). Three-dimensional-printed molds and materials for injection molding and rapid tooling applications. *MRS Communications*, 9(4), 1267–1283. <https://doi.org/10.1557/mrc.2019.147>
- [34] Farioli, D., Strano, M., Vangosa, F. B., Zaragoza, V. G., & Aicardi, A. (2021). Rapid tooling for injection molding inserts. *ESAFORM 2021*. <https://doi.org/10.25518/esaform21.4186>
- [35] GRAFYLON®3D [online], (Ottobre 2023). *FILLOALFA® | Produzione e distribuzione filamenti per stampante 3D*. Disponibile da: <https://www.filloalfa3d.com/it/content/21-grafylon3d>
- [36] ALFAOMNIA [online], (Ottobre 2023). *FILLOALFA® | Produzione e distribuzione filamenti per stampante 3D*. Disponibile da: <https://www.filloalfa3d.com/it/content/7-ALFAOMNIA>
- [37] ALFANYLON CF [online], (Ottobre 2023). *FILLOALFA® | Produzione e distribuzione filamenti per stampante 3D*. Disponibile da: <https://www.filloalfa3d.com/it/content/37-alfanylon>
- [38] Carbon PA and FUNCTIONAL Nylon tooling | Roboze. *Roboze: professional and industrial 3D printers design and production*. Disponibile da: <https://www.roboze.com/en/resources/carbon-pa-and-functional-nylon-tooling.html>
- [39] Thomas, S., Kuruvilla, J., Malhotra, S. K., Goda, K. e Sreekala, M. S., a cura di, (2012). *Polymer Composites* [online]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Disponibile da: doi: 10.1002/9783527645213
- [40] Karsli, N. G. e Aytac, A., (2013). Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. **51**, 270–275. Disponibile da: doi: 10.1016/j.compositesb.2013.03.023
- [41] Rahim, T. N. A. T., Abdullah, A. M., Md Akil, H., Mohamad, D. e Rajion, Z. A., (2017). The improvement of mechanical and thermal properties of polyamide 12 3D printed parts by fused deposition modelling. *Express Polymer Letters* [online]. **11**(12), 963–982. Disponibile da: doi: 10.3144/expresspolymlett.2017.92
- [42] Kada, D., Koubaa, A., Tabak, G., Migneault, S., Garnier, B. e Boudenne, A., (2016). Tensile properties, thermal conductivity, and thermal stability of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Polymer Composites* [online]. **39**(S2), E664—E670. Disponibile da: doi: 10.1002/pc.24093
- [43] Geeetech Water Blue PLA 1.75mm 1kg/roll Geeetech Water Blue PLA 1.75mm 1kg/roll [700-001-1231] - \$12.50 : geeetech 3d printers onlinestore, one-stop shop for 3d printers,3d printer accessories,3d printer parts [online], (Ottobre 2023). *geeetech.com*. Disponibile da: <https://www.geeetech.com/geeetech-water-blue-pla-175mm-1kgroll-p-1243.html>

- [44] 7075 (AlZn5.5MgCu, 3.4365, 2L95, A97075) Aluminum :: MakeItFrom.com [online], (Ottobre 2023). *MakeItFrom.com: Material Properties Database*. Disponibile da: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/7075-AlZn5.5MgCu-3.4365-2L95-A97075-Aluminum>
- [45] FAMIGLIE ACCIAI - INOSSIDABILI - LUCEFIN [online], (Ottobre 2023). *LUCEFIN*. Disponibile da: <https://lucefin.com/famiglie-acciai-inossidabili/>
- [46] Riblene (R) MR 10 R [online]. Disponibile da: <https://versalis.eni.com/en-IT/portfolio/polymers-and-intermediates/polyethylene/ldpe/riblene-mr-10-r.html>
- [47] Product detail [online], (Ottobre 2023). *LyondellBasell*. Disponibile da: <https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/p/Moplen-HP500N/e8c2d3bb-d271-459f-a439-629a5d85a7da>
- [48] NatureWorks | 3 Series for Injection Molding [online], (Ottobre 2023). *NatureWorks | Home*. Disponibile da: <https://www.natureworksllc.com/technology-and-products/products/3-series-for-injection-molding>
- [49] NatureWorks | 3 Series for Injection Molding. *NatureWorks | Home*. Disponibile da: <https://www.natureworksllc.com/technology-and-products/products/3-series-for-injection-molding>
- [50] Maip IamNature [online], (Ottobre 2023). *Gruppo MAIP Srl – Polimeri dal 1962*. Disponibile da: <https://www.maipsrl.com/maipiamnature/products/>
- [51] Paralleler Doppelschnecken-Extruder Process 11 [online], (Ottobre 2023). *Thermo Fisher Scientific - DE*. Disponibile da: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/567-7600#/567-7600>
- [52] Roboze: progettazione e produzione di stampanti 3D professionali e industriali [online]. *roboze.com*. Disponibile da: <https://www.roboze.com/it/>
- [53] SmartPower 25 – 400 t | WITTMANN Group. *WITTMANN Group | WITTMANN Group*. Disponibile da: <https://www.wittmann-group.com/it/smartpower-25-400-t>
- [54] ISO 22007-2 Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method, Last Updated 2022, <https://www.iso.org/standard/81836.html>].
- [55] *A Quarter Century of Testing Thermal Conductivity - Hot Disk*. (s.d.). Hot Disk. <https://www.hotdiskinstruments.com/>
- [56] Zwick-Roell Z100. AllroundLine floor-standing testing machine. *AllroundLine floor-standing testing machine*. Disponibile da: <https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/universal-testing-machines-for-static-applications/allroundline/>
- [57] ISO 604:2002 Plastics – Determination of compressive properties. *ISO*. Disponibile da: <https://www.iso.org/standard/31261.html>
- [58] Bayart, M., Foruzanmehr, M. R., Vuillaume, P. Y., Ovlaque, P., Robert, M. e Elkoun, S., (2021). Poly(lactic acid)/flax composites: effect of surface modification and

thermal treatment on interfacial adhesion, crystallization, microstructure, and mechanical properties. *Composite Interfaces* [online]. 1–20. Disponibile da: doi: 10.1080/09276440.2021.1884470

[59] Illers, K.-H., (1978). Polymorphie, kristallinität und schmelzwärme von poly( $\epsilon$ -caprolactam), 2. Kalorimetrische untersuchungen. *Die Makromolekulare Chemie* [online]. **179**(2), 497–507. [Maggio 2023]. Disponibile da: doi: 10.1002/macp.1978.021790224;

[60] Fischer, E. W., Sterzel, H. J. e Wegner, G., (1973). Investigation of the structure of solution grown crystals of lactide copolymers by means of chemical reactions. *Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere* [online]. **251**(11), 980–990. Disponibile da: doi: 10.1007/bf01498927;

[61] Kattan, M., Dargent, E., Ledru, J. e Grenet, J., (2001). Strain-induced crystallization in uniaxially drawn PETG plates. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. **81**(14), 3405–3412. Disponibile da: doi: 10.1002/app.1797

[62] Gogolewski, S., Czerntawska, K. e Gastorek, M., (1980). Effect of annealing on thermal properties and crystalline structure of polyamides. Nylon 12 (polylaurolactam). *Colloid and Polymer Science* [online]. **258**(10), 1130–1136. Disponibile da: doi: 10.1007/bf01382456

[63] PI 640i: world's smallest VGA infrared camera - Optris [online]. *Optris*. Disponibile da: [https://www.optris.com/en/product/infrared-cameras/pi-series/pi-640i/?file=tl\\_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/Datasheet%20optris%20PI%20640i.pdf](https://www.optris.com/en/product/infrared-cameras/pi-series/pi-640i/?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/Datasheet%20optris%20PI%20640i.pdf)

[64] Doohar, T., Archer, E., Walls, T., McIlhagger, A. e Dixon, D., (2021). Ageing of laser sintered glass-filled Polyamide 12 (PA12) parts at elevated temperature and humidity. *Polymers and Polymer Composites* [online]. **29**(9\_suppl), S1294—S1304. Disponibile da: doi: 10.1177/09673911211027127

[65] Bahrami, M., Abenojar, J. e Martínez, M. A., (2021). Comparative Characterization of Hot-Pressed Polyamide 11 and 12: Mechanical, Thermal and Durability Properties. *Polymers* [online]. **13**(20), 3553. Disponibile da: doi: 10.3390/polym13203553

[66] Tábi, T., Hajba, S., & Kovács, J. G. (2016). Effect of crystalline forms ( $\alpha'$  and  $\alpha$ ) of poly(lactic acid) on its mechanical, thermo-mechanical, heat deflection temperature and creep properties. *European Polymer Journal*, **82**, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.07.024>

[67] Benwood, C., Anstey, A., Andrzejewski, J., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2018). Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid). *ACS Omega*, **3**(4), 4400–4411. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00129>

[68] Zhang, X., Chen, L., Mulholland, T. e Osswald, T. A., (2019). Effects of raster angle on the mechanical properties of PLA and Al/PLA composite part produced by fused

deposition modeling. *Polymers for Advanced Technologies* [online]. **30**(8), 2122–2135. Disponibile da: doi: 10.1002/pat.4645

[69] Rodzeń, K., Harkin-Jones, E., Wegrzyn, M., Sharma, P. K. e Zhigunov, A., (2021b). Improvement of the layer-layer adhesion in FFF 3D printed PEEK/carbon fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. **149**, 106532. Disponibile da: doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106532]

[70] Rothon, R., a cura di, (2017). *Fillers for Polymer Applications* [online]. Cham: Springer International Publishing. Disponibile da: doi: 10.1007/978-3-319-28117-9

[71] Liu Ch, Chen M, Zhou D, Wu D, Yu W. Effect of filler shape on the thermal conductivity of thermal functional composites. *J Nanomater* 2017; 2017:1–15. <https://doi.org/10.1155/2017/6375135>

[72] Hwang, S., Reyes, E. I., Moon, K.-s., Rumpf, R. C. e Kim, N. S., (2014). Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process. *Journal of Electronic Materials* [online]. **44**(3), 771–777. Disponibile da: doi: 10.1007/s11664-014-3425-6].

[73] Noh, Y. J. e Kim, S. Y., (2015). Synergistic improvement of thermal conductivity in polymer composites filled with pitch based carbon fiber and graphene nanoplatelets. *Polymer Testing* [online]. **45**, 132–138. Disponibile da: doi: 10.1016/j.polymertesting.2015.06.003

[74] Yu, W., Xie, H., Yin, L., Zhao, J., Xia, L. e Chen, L., (2015). Exceptionally high thermal conductivity of thermal grease: Synergistic effects of graphene and alumina. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. **91**, 76–82. Disponibile da: doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.01.006

[75] Liu Ch, Chen M, Zhou D, Wu D, Yu W. Effect of filler shape on the thermal conductivity of thermal functional composites. *J Nanomater* 2017;2017:1–15. <https://doi.org/10.1155/2017/6375135>

[76] Roudný, P. e Syrový, T., (2022). Thermal conductive composites for FDM 3D printing: A review, opportunities and obstacles, future directions. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. **83**, 667–677. Disponibile da: doi: 10.1016/j.jmapro.2022.09.026

[77] Lupone, F., Padovano, E., Veca, A., Franceschetti, L. e Badini, C., (2020). Innovative processing route combining fused deposition modelling and laser writing for the manufacturing of multifunctional polyamide/carbon fiber composites. *Materials & Design* [online]. **193**, 108869. Disponibile da: doi: 10.1016/j.matdes.2020.108869

[78] Prajapati, H., Ravoori, D., Woods, R. L. e Jain, A., (2018). Measurement of anisotropic thermal conductivity and inter-layer thermal contact resistance in polymer fused deposition modeling (FDM). *Additive Manufacturing* [online]. **21**, 84–90. Disponibile da: doi: 10.1016/j.addma.2018.02.019

[79] Elkholy, A., Rouby, M. e Kempers, R., (2019). Characterization of the anisotropic thermal conductivity of additively manufactured components by fused filament

fabrication. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. **4**(4), 497–515. Disponibile da: doi: 10.1007/s40964-019-00098-2

[80] Zohdi, N. e Yang, R. (., (2021). Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review. *Polymers* [online]. **13**(19), 3368. Disponibile da: doi: 10.3390/polym13193368

[81] Tábi, T., Hajba, S., & Kovács, J. G. (2016). Effect of crystalline forms ( $\alpha'$  and  $\alpha$ ) of poly(lactic acid) on its mechanical, thermo-mechanical, heat deflection temperature and creep properties. *European Polymer Journal*, **52**, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.07.024>

[82] Rahim, T. N. A. T., Abdullah, A. M., Md Akil, H., Mohamad, D., & Rajion, Z. A. (2017). The improvement of mechanical and thermal properties of polyamide 12 3D printed parts by fused deposition modelling. *Express Polymer Letters*, **11**(12), 963–982. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.92>

[83] YU, W., WANG, X., YIN, X., FERRARIS, E. e ZHANG, J., (2023). The effects of thermal annealing on the performance of material extrusion 3D printed polymer parts. *Materials & Design* [online]. 111687. Disponibile da: doi: 10.1016/j.matdes.2023.111687

[84] Nassar, A., Younis, M., Elzareef, M. e Nassar, E., (2021b). Effects of Heat-Treatment on Tensile Behavior and Dimension Stability of 3D Printed Carbon Fiber Reinforced Composites. *Polymers* [online]. **13**(24), 4305. Disponibile da: doi: 10.3390/polym13244305

[85] Butt, J., & Bhaskar, R. (2020). Investigating the Effects of Annealing on the Mechanical Properties of FFF-Printed Thermoplastics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, **4**(2), 38. <https://doi.org/10.3390/jmmp4020038>.

[86] Collinson, D. W., von Windheim, N., Gall, K. e Brinson, L. C., (2022). Direct evidence of interfacial crystallization preventing weld formation during fused filament fabrication of poly(ether ether ketone). *Additive Manufacturing* [online]. **51**, 102604. Disponibile da: doi: 10.1016/j.addma.2022.102604

[87] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. e DeWitt, D. P., (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley & Sons, Incorporated, John.

[88] Bai, L., Zhao, X., Bao, R.-Y., Liu, Z.-Y., Yang, M.-B. e Yang, W., (2018). Effect of temperature, crystallinity and molecular chain orientation on the thermal conductivity of polymers: a case study of PLLA. *Journal of Materials Science* [online]. **53**(14), 10543–10553. Disponibile da: doi: 10.1007/s10853-018-2306-4.

[89] Anderson, D. R., (1966). Thermal Conductivity of Polymers. *Chemical Reviews* [online]. **66**, 677–690. Disponibile da: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:94992031>

[90] Prajapati, H., Chalise, D., Ravoori, D., Taylor, R. M. e Jain, A., (2019). Improvement in build-direction thermal conductivity in extrusion-based polymer additive manufacturing

through thermal annealing. *Additive Manufacturing* [online]. **26**, 242–249. Disponibile da: doi: 10.1016/j.addma.2019.01.004]

[91] Cai, Z., Thirunavukkarasu, N., Diao, X., Wang, H., Wu, L., Zhang, C. e Wang, J., (2022). Progress of Polymer-Based Thermally Conductive Materials by Fused Filament Fabrication: A Comprehensive Review. *Polymers* [online]. **14**(20), 4297. Disponibile da: doi: 10.3390/polym14204297

[92] Zhan, J., Chen, Y., Tang, G., Pan, H., Zhang, Q., Song, L., & Hu, Y. (2014). Crystallization and melting properties of poly(butylene succinate) composites with titanium dioxide nanotubes or hydroxyapatite nanorods. *Journal of Applied Polymer Science*, *131*(11), n/a. <https://doi.org/10.1002/app.40335>

[93] Roy, P. K., Surekha, P., Rajagopal, C., Chatterjee, S. N. e Choudhary, V., (2007). Studies on the photo-oxidative degradation of LDPE films in the presence of oxidised polyethylene. *Polymer Degradation and Stability* [online]. **92**(6), 1151–1160. Disponibile da: doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.01.010

[94] Amash, A. e Zugenmaier, P., (1997). Thermal and dynamic mechanical investigations on fiber-reinforced polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. **63**(9), 1143–1154. Disponibile da: doi: 10.1002/(sici)1097-4628(19970228)63:9%3C1143::aid-app6%3E3.0.co;2-h

[95] Zhang, K., Mohanty, A. K. e Misra, M., (2012). Fully Biodegradable and Biorenewable Ternary Blends from Polylactide, Poly(3-hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) and Poly(butylene succinate) with Balanced Properties. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. **4**(6), 3091–3101. Disponibile da: doi: 10.1021/am3004522

[96] Qiu, Z., Ikehara, T. e Nishi, T., (2003). Miscibility and crystallization behaviour of biodegradable blends of two aliphatic polyesters. Poly(3-hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) and poly(butylene succinate) blends. *Polymer* [online]. **44**(24), 7519–7527. Disponibile da: doi: 10.1016/j.polymer.2003.09.029

[97] Cross, M. M., (1979). Relation between viscoelasticity and shear-thinning behaviour in liquids. *Rheologica Acta* [online]. **18**(5), 609–614. Disponibile da: doi: 10.1007/bf01520357

[98] Hassan, H., (2012). An experimental work on the effect of injection molding parameters on the cavity pressure and product weight. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. **67**(1-4), 675–686. Disponibile da: doi: 10.1007/s00170-012-4514-4

[99] Boparai, K. S., Singh, R. e Singh, H., (2016). Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal* [online]. **22**(2), 281–299. Disponibile da: doi: 10.1108/rpj-04-2014-0048

[100] Zhang, Y. e Moon, S. K., (2021). The Effect of Annealing on Additive Manufactured ULTEM™ 9085 Mechanical Properties. *Materials* [online]. **14**(11), 2907. Disponibile da: doi: 10.3390/ma14112907

[101] Hong, J.-H., Yu, T., Chen, Z., Park, S.-J. e Kim, Y.-H., (2019b). Improvement of flexural strength and compressive strength by heat treatment of PLA filament for 3D-printing. *Modern Physics Letters B* [online]. **33**(14n15), 1940025. Disponibile da: doi: 10.1142/s0217984919400256

## Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il Professore Alberto Frache per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro di tesi sperimentale, facendomi appassionare ancora di più al mondo della ricerca, e per essere stato un punto di riferimento sempre presente in tutti questi mesi.

Vorrei ringraziare i miei due correlatori, Giulia Bernagozzi e Daniele Battezzore, per essere stati una guida paziente e disponibile: mi avete insegnato tanto in questo lungo lavoro di ricerca.

Vorrei ringraziare tutto il personale del Laboratorio di Alessandria: grazie per essere stati di grande supporto nel fronteggiare tutte le “sfide” che questo progetto di tesi mi ha riservato.

A mio padre,  
grazie per avermi dato tanto, tutto. Grazie per essere riuscito a tenere tutti i pezzi insieme mentre tutto andava in frantumi. La tua presenza ha lenito l’abisso dell’anima.

A mia madre,  
ti sento sempre, nelle prove di ogni giorno. Trattienimi nelle albe in cui mi sento perso, nelle notti vuote e buie, e raccontami ancora la storia delle onde, che profuma di risacca.

Al mio calciatore preferito, il nonno Alvaro  
grazie per aver dipinto tutti gli anni della nostra infanzia, grazie per profumato i deserti muri delle nostre case con pennellate decise e per aver costellato i nostri ricordi di sorrisi e racconti, di aneddoti e poesia.

A mia sorella,  
grazie per esserci sempre.

Ad Anna,  
sei stata la prima persona ad accogliermi in una grigia e fredda Torino e a dipingerla con i toni intensi e brillanti dei tuoi sorrisi e le sfumature tenui della tua risata. Grazie per avermi insegnato l’immenso valore della condivisione, senza cui ogni percorso sarebbe stato spento ed arido, e qualunque traguardo non avrebbe avuto alcun significato.

Alle nonne e alla mia grande famiglia,  
Grazie per il sostegno, per aver remato con me in questi anni difficili. La più preziosa ricetta per attraversare ogni tempesta è quella di mantenere vive le nostre tradizioni, essenza viva dei ricordi più cari.

*“...come sigillo mettimi sul tuo cuore, come sigillo sul tuo braccio,  
perché forte come la morte è l’amore, tenace come gli inferi la passione...”*