

---

## **Valutazione dei parametri di processo per lo stampaggio a iniezione di un biopolimero: confronto tra dati sperimentali e simulazione**

Candidato: Federico Masiero

Relatore: prof. Alberto Frache, dott. Daniele Battezzore

La tesi sperimentale tratta l'analisi del processo di stampaggio a iniezione di un biopolimero, in particolare si concentra sul processo di raffreddamento ed di estrazione del pezzo. La trattazione si pone diversi obiettivi: determinare il tempo ciclo, definire la condizione di temperatura a cui si trova il pezzo al termine del raffreddamento, calcolare la deformazione e il ritiro subito dal pezzo e infine valutare l'effetto dei precedenti fattori sul processo di estrazione.

In figura 1 è possibile osservare la geometria del pezzo prodotto, mentre in figura 2 è riportato lo schema dello stampo.

Il pezzo possiede una geometria semplice; tuttavia si rilevano due criticità. La base del pezzo ha uno spessore triplo rispetto alle pareti laterali; quindi in corrispondenza dello spigolo di base si verifica una significativa variazione di sezione. Questa caratteristica geometrica ha un effetto sul processo di riempimento della cavità e sul processo di raffreddamento del pezzo. Inoltre il pezzo prodotto possiede un basso angolo di sforno, questo aspetto è critico durante l'estrazione.

Durante le prove di stampaggio sono stati rilevati alcuni difetti in corrispondenza del punto di contatto tra gli estrattori e il pezzo. In figura 3 si può osservare il difetto descritto.

Si possono proporre due possibili cause di rottura. La prima dipende dalla forza necessaria per l'estrazione, se è troppo elevata è possibile raggiungere il limite di rottura del pezzo. La seconda dipende dalla condizione di temperatura a cui si trova il materiale al momento dell'estrazione; se in corrispondenza del punto di contatto la temperatura del polimero è superiore alla temperatura di transizione vetrosa il pezzo viene deformato plasticamente.

Per definire la temperatura di estrazione adeguata per il biopolimero utilizzato, è stato necessario eseguire una caratterizzazione termomeccanica (DMTA); il risultato di questa analisi è grafico 1. La DMTA dimostra che ad una temperatura superiore a 60 °C ( $T_g$ , temperatura di transizione vetrosa) il comportamento del materiale è prevalentemente plastico e di conseguenza non possiede le proprietà meccaniche adeguate per l'estrazione.

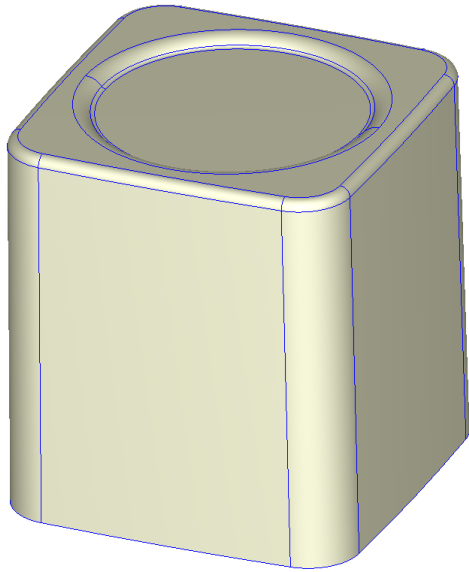


Figura 1 Geometria del pezzo.

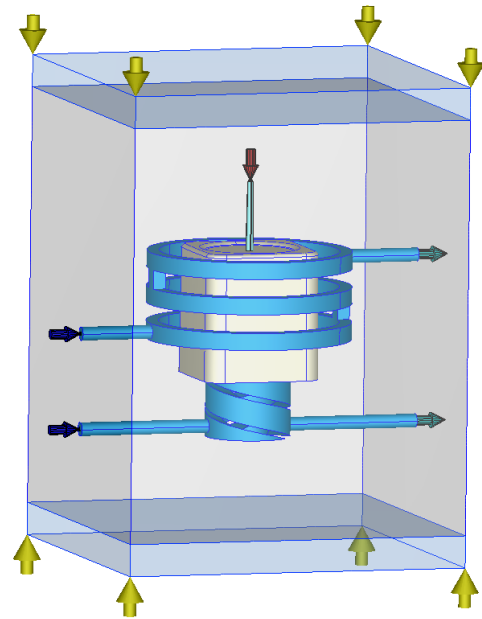


Figura 2 Schema dello stampo.



Figura 3 Difetto osservato in corrispondenza del punto di contatto con gli estrattori.

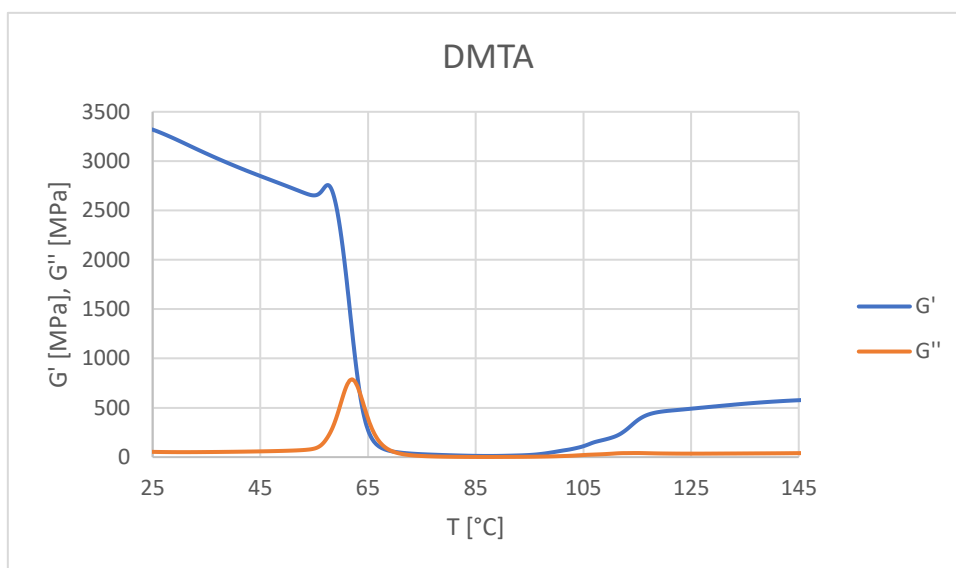


Grafico 1 Analisi DMTA eseguita sul biopolimero PLA.  $G'$  è lo storage modulus,  $G''$  è il loss modulus.

Il primo obiettivo è calcolare il tempo necessario al raffreddamento del pezzo. Per fare questo si considera il parametro “Time to Reach Ejection Temperature”; questo parametro definisce la percentuale di materiale che in funzione del tempo raffredda fino alla temperatura di estrazione, in generale è possibile estrarre il pezzo in sicurezza quando una percentuale tra 80% e 90% del volume del pezzo si trova ad una temperatura inferiore a quella di estrazione. Utilizzando Grafico 2 si calcola il tempo di raffreddamento del pezzo che risulta essere circa 19 s.

Questo risultato tuttavia non è esaustivo, infatti occorre valutare anche la distribuzione del materiale che dopo 19 s di raffreddamento si trova ad una temperatura superiore a quella di estrazione. Utilizzando la funzione del software “Isosurface” si mette in evidenza, in figura 4, la porzione di materiale con questa caratteristica. Gli estrattori agiscono in corrispondenza dei quattro angoli della base del pezzo, è quindi necessario che in corrispondenza di questi punti l’intera sezione del pezzo si trovi ad una temperatura inferiore a  $T_g$ . L’analisi delle prove di stampaggio ha permesso di identificare il tempo di raffreddamento necessario all’estrusione, che risulta essere 50 s.

Il secondo obiettivo riguarda l’analisi del profilo di temperatura che si sviluppa al termine del processo di raffreddamento. Per fare ciò si utilizzano due diverse strategie: durante il processo produttivo si esegue la termografia del pezzo che permette di identificare la temperatura dell’oggetto in corrispondenza dei punti di contatto con gli estrattori, inoltre si utilizza la simulazione per calcolare il gradiente di temperatura che si sviluppa all’interno del pezzo e infine si confrontano i risultati di simulazione e termografia.

L’immagine termica ottenuta all’istante di apertura dello stampo è riportata in figura 5, in tabella 1 sono indicate le temperature relative ai punti in cui si esegue la misura. Il profilo di temperatura che si sviluppa al termine del raffreddamento e che è stato calcolato con il software è riportato in figura 6.

I risultati della termografia e della simulazione indicano che il pezzo al termine del raffreddamento si trova ad una temperatura inferiore a 40 °C, cioè adeguata per l’estrusione.

L’ultimo aspetto valutato in questa tesi riguarda la deformazione del pezzo e l’effetto di questo fattore sul processo di estrusione. In figura 7 si riporta il grafico “total displacement” abbinato alla funzione “deformation”; questo risultato indica lo scostamento che ogni punto della mesh subisce rispetto alla posizione nominale a causa del ritiro e permette di osservare la tendenza del pezzo a deformare.

La simulazione indica che, per effetto del ritiro, il pezzo tende ad aderire alla superficie del punzone dello stampo, questo fenomeno causa un aumento della forza necessaria all'estrazione del pezzo. Nel caso in cui la forza di estrazione superi la resistenza meccanica del pezzo si arriva a rottura e si determina il difetto in figura 3.

I pezzi prodotti mostrano inoltre alcuni difetti sulle pareti laterali come si può osservare in figura 8; In questo caso la simulazione è stata utilizzata per valutarne le cause.

Il processo di packing ha il compito di forzare all'interno dello stampo la quantità di materiale necessaria a compensare il ritiro volumetrico che avviene durante il raffreddamento. Tuttavia, all'interno dello stampo, la pressione raggiunta dal polimero non è uniforme, è quindi possibile che in alcune zone il materiale subisca il fenomeno di sovraimpaccamento; cioè, a causa di una pressione eccessiva, la densità del polimero aumenta e al momento dell'apertura dello stampo questo tende a dilatare e ad applicare una pressione sulle pareti. Il pezzo tende ad occupare un volume maggiore della cavità dello stampo e al momento dell'estrazione, per effetto dell'interferenza tra pezzo e stampo, si producono i difetti osservati. Il risultato della simulazione, riportato in figura 9, descrive questo fenomeno e permette di indentificare le aree in cui si producono i difetti.

Integrando i dati ottenuti dalla caratterizzazione del materiale e dall'osservazione del prodotto stampato è stato possibile utilizzare la simulazione per analizzare le criticità del prodotto e descrivere le cause dei difetti. La simulazione ha inoltre permesso di valutare gli effetti che i fenomeni termici e meccanici determinano sul processo produttivo e sulla qualità del prodotto.

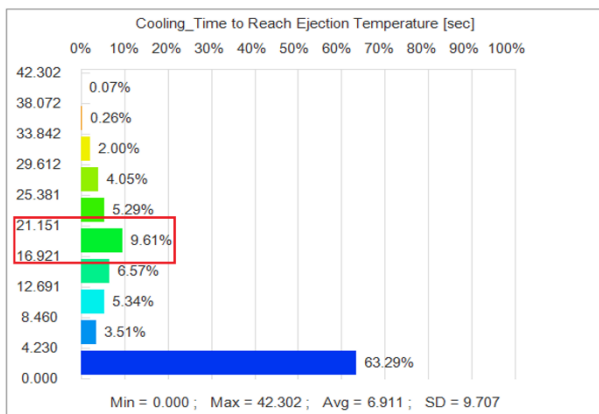


Grafico 2 Grafico del tempo necessario a raggiungere la temperatura di estrazione.

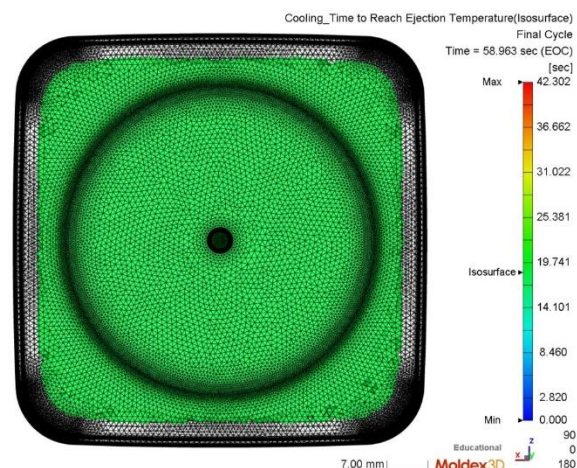


Figura 4 Porzione di materiale che dopo 19 s di raffreddamento si trova ad una temperatura superiore a  $T_g$ .

Tabella 1 Temperature misurate con l'analisi termografica, il numero di ogni area è riferito a figura 5.

Area	Temperatura
1	30,9 °C
2	32,4 °C
3	39 °C
4	42,7 °C

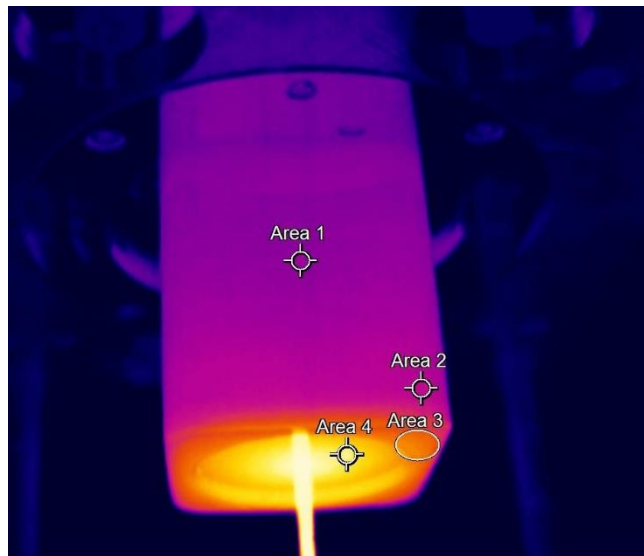


Figura 5 Termografia eseguita al momento dell'apertura dello stampo.

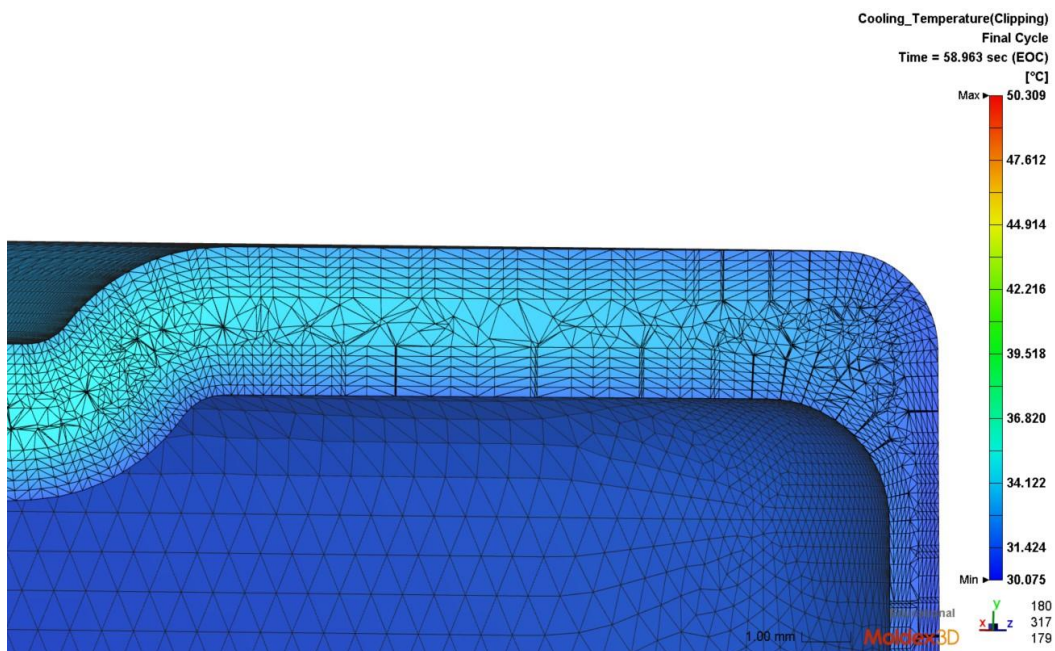


Figura 6 Gradiente di temperatura che si sviluppa all'interno del pezzo in corrispondenza del punto di contatto con gli estrattori, risultato della simulazione.

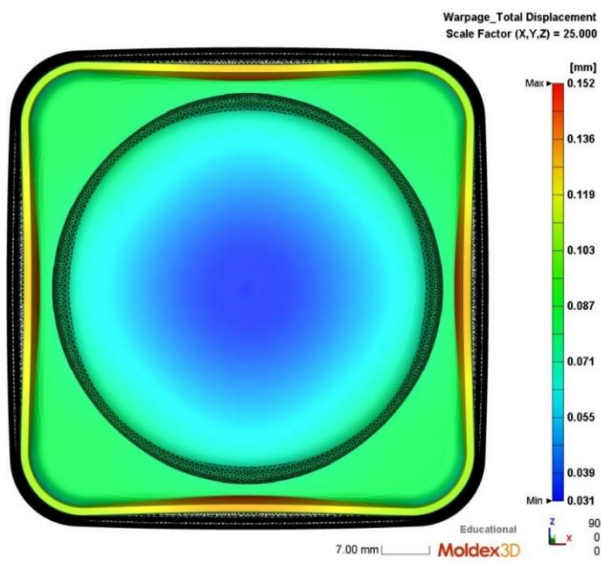


Figura 7 Deformazione del pezzo calcolata con il software.

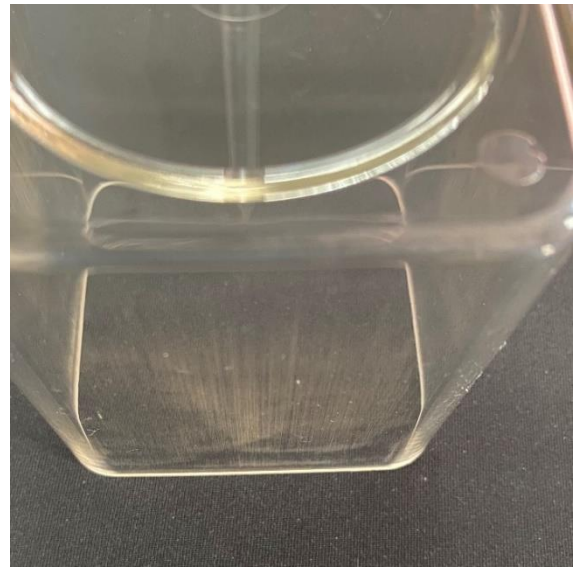


Figura 8 Difetti osservati sulle pareti laterali del pezzo.

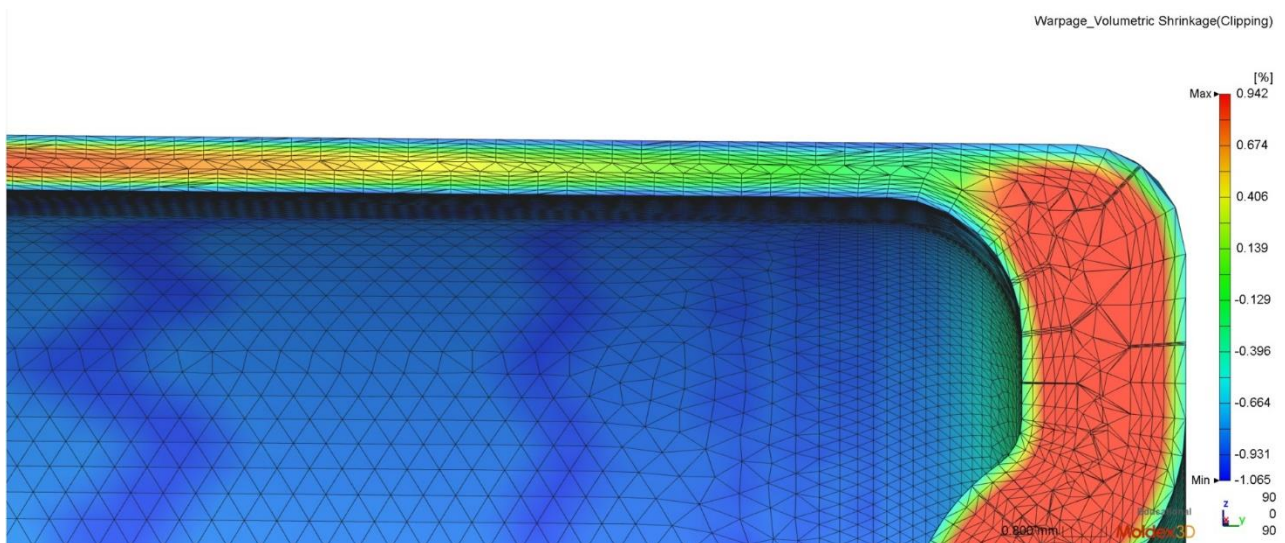


Figura 9 Ritiro volumetrico del pezzo calcolato con il software di simulazione.

