



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali
A.a 2021/2022
Sessione di Laurea Dicembre 2022

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

Relatori:

Prof. Alberto Frache
Dott. Daniele Battezzore

Candidato:

Federico Masiero

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
CAPITOLO 1 STAMPAGGIO A INIEZIONE.....	6
1.1 Il processo di stampaggio a iniezione	6
1.1.1 Ciclo del processo	6
1.1.2 Pressa per injection molding	8
1.1.3 Elemento di iniezione	9
1.1.4 Stampo.....	10
1.2 Parametri del processo di iniezione	10
1.2.1 Finestra di processo.....	10
1.2.2 Variazione di pressione, volume specifico e temperatura durante gli step di iniezione	11
1.2.3 Controllo dei parametri di processo	13
1.2.4 Parametri di plasticizzazione	14
1.2.5 Plasticizzazione e dosaggio	16
1.2.6 Parametri di filling	16
1.2.7 Parametri di packing.....	19
1.2.8 Parametri di raffreddamento	20
CAPITOLO 2 SIMULAZIONE DEL PROCESSO DI STAMPAGGIO A INIEZIONE	21
2.1 Applicazione della tecnologia CAE per injection molding	21
2.2 Equazioni base per la simulazione	23
2.2.1 Filling.....	23
2.2.2 Condizioni al contorno applicate al processo di filling	27
2.2.3 Packing.....	29
2.2.4 Raffreddamento	30
2.2.5 Deformazioni	30
2.3 Discretizzazione delle equazioni differenziali	31
2.3.1 Finite Difference Method	31
2.3.2 Finite Volume Method.....	33
2.3.3 Finite Element Method.....	35
CAPITOLO 3 MATERIALE E STRUMENTI	37
3.1 Materiale	37
3.2 Apparato sperimentale	41
3.2.1 Pressa.....	41
3.2.2 Telecamera termica.....	42
3.2.3 Geometria del pezzo stampato e dello stampo	43

CAPITOLO 4 STRATEGIA DI SIMULAZIONE CON MOLDEX3D	46
4.1 Generazione della mesh	46
4.1.1 Generazione della mesh di superficie	46
4.1.2 Generazione della mesh di volume	48
4.2 Definizione dei parametri di processo	49
4.3 Analisi dello stampaggio a iniezione	51
CAPITOLO 5 OTTIMIZZAZIONE DELLE DEFORMAZIONI	55
5.1 Analisi 2	55
5.2 Analisi 3	57
5.3 Analisi 4	58
5.4 Analisi 5	59
5.5 Analisi 6	61
CAPITOLO 6 OTTIMIZZAZIONE DEL TEMPO CICLO	64
6.1 Analisi 2	64
6.2 Analisi 7	65
6.3 Analisi 8	66
6.4 Analisi 9	68
6.5 Analisi 10	69
CAPITOLO 7 OTTIMIZZAZIONE DELL'ESTRAZIONE E DEL TEMPO CICLO.....	71
7.1 Analisi 11	71
7.2 Analisi 12	73
7.3 Analisi 13	75
CAPITOLO 8 ANALISI DELLE PRESSIONI E DELLE TEMPERATURE UTILIZZANDO IL SOFTWARE MOLDEX 3D ..	77
8.1 Profilo di sprue pressure sviluppato durante il filling	77
8.2 Analisi delle temperature	80
CAPITOLO 9 CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE LUMINY PLA L130.....	84
9.1 Curve reologiche prodotte con test dinamici	84
9.1.1 Dynamic Strain Sweep Test (DSST)	84
9.1.2 Dynamic Frequency Sweep Test (DFST)	85
9.1.3 Apparato sperimentale e provino	85
9.1.4 Analisi DSST	86
9.1.5 Analisi DFST	86
9.2 Analisi termomeccanica	90
9.2.1 Apparato sperimentale e preparazione del provino	91
9.2.2 Analisi dei risultati	92
9.3 Caratterizzazione del materiale Luminy PLA L130	93

CAPITOLO 10 PROVE DI STAMPAGGIO	94
10.1 Prova 1	94
10.2 Prova 2	95
10.3 Prova 3	99
10.4 Prova 4	100
10.5 Prove 5, 6, 7 e 8	102
10.6 Prova 9	104
10.7 Prove 10, 11 e 12	107
CAPITOLO 11 CONFRONTO TRA PROVE DI STAMPAGGIO E SIMULAZIONE	110
11.1 Analisi del profilo di riempimento	110
11.2 Pressione di iniezione	112
11.3 Temperatura di estrazione del pezzo e dello stampo	114
11.4 Qualità del pezzo stampato, deformazioni e ritiri	119
11.5 Conclusioni	122

INTRODUZIONE

Gli oggetti in plastica sono molto comuni e utilizzati nella vita di tutti i giorni, il successo di questo materiale si deve alla semplicità di realizzazione. La plastica può essere colata e iniettata sfruttando la sua plasticità; lo sviluppo e il design del sistema produttivo e dell'oggetto finale tuttavia necessitano di diverse analisi e progettazioni sia del pezzo sia del sistema produttivo.

La progettazione di un sistema produttivo di stampaggio a iniezione consiste in due principali tappe. Il primo step racchiude la progettazione di tutti i sistemi e gli impianti necessari per sviluppare e avviare la produzione; il secondo step consiste nell'ottimizzazione dei parametri di processo e avviene in parallelo alla produzione.

Gli elementi che compongono il macchinario per lo stampaggio a iniezione sono lo stampo, la pressa e gli impianti di condizionamento della temperatura. Durante il primo step di progettazione occorre sviluppare tutti questi componenti e definire i parametri di processo, come temperature e pressioni, da applicare per avviare la produzione.

La progettazione di questo sistema è complessa poiché coinvolge lo studio di numerosi fattori e deve garantire che il pezzo posseda tutte le caratteristiche richieste, inoltre occorre assicurarsi che il sistema progettato sia in grado di produrre efficacemente il pezzo prima di avviare la produzione. Occorre eseguire questi controlli per evitare che lo stampo o gli impianti debbano essere modificati dopo la loro realizzazione, infatti queste correzioni sono possibili ma impattano su tempi e costi di messa in opera.

La qualità del prodotto finito dipende fortemente dalle proprietà del materiale, dal design dello stampo e dalle condizioni di processo; per ottenere un prodotto di buona qualità occorre quindi ottimizzare e controllare i parametri del processo.

La maggiore difficoltà nel controllo del processo risiede nel fatto che i parametri in gioco sono numerosi e ognuno di questi ha molteplici effetti sulle proprietà del pezzo finito.

L'analisi dei parametri di processo deve essere eseguita durante lo sviluppo dell'impianto poiché questi hanno un impatto sul design dello stampo e dei canali di condizionamento. Inoltre è utile analizzare e ottimizzare i parametri di processo durante la produzione in modo da migliorare l'efficienza produttiva.

Per i motivi elencati è molto interessante avere uno strumento per assistere le fasi di sviluppo del pezzo, degli stampi e nella scelta dei parametri di processo, per questo motivo sono stati introdotti i software di simulazione CAE. I software CAE permettono di verificare la realizzabilità del prodotto e l'efficacia del processo produttivo mettendo in luce preventivamente le criticità del processo.

Una fase essenziale nella produzione di un oggetto per injection molding è la produzione dello stampo e il controllo delle sue performance. Nel momento in cui lo stampo non rispetta i requisiti necessari è possibile eseguire delle modifiche, tuttavia queste modifiche hanno un forte impatto su costi e tempi di sviluppo del processo. Quindi è molto vantaggioso simulare il comportamento dello stampo prima della produzione di questo in modo da ridurre gli step necessari alla sua produzione. Prima di realizzare gli impianti e durante la produzione è necessario analizzare il processo e ottimizzare i parametri che lo regolano, l'obiettivo è ridurre il tempo ciclo e il consumo energetico della pressa per migliorare il rendimento del processo. I fattori che influenzano il tempo ciclo sono numerosi e risultano dipendenti l'uno dall'altro, per questo motivo è utile simulare il processo

produttivo utilizzando il software CAE per osservare e prevedere l'effetto che ogni parametro ha sul processo.

Lo scopo di questa tesi è analizzare un possibile metodo di sviluppo del processo produttivo utilizzando il software di simulazione Moldex3D. La trattazione può essere divisa in due magro argomenti: inizialmente si utilizza il software per ottimizzare i parametri di processo per la produzione di un determinato oggetto, successivamente vengono confrontati i risultati della simulazione con la misurazioni eseguite su cicli di stampaggio reali. Utilizzando questi dati si analizza l'efficacia della simulazione, per identificare i vantaggi e le criticità da superare durante lo sviluppo del processo.

CAPITOLO 1 STAMPAGGIO A INIEZIONE

Lo stampaggio a iniezione è un processo produttivo che consiste nell'iniettare il polimero fuso all'interno di uno stampo chiuso. Il processo avviene ad elevate temperature e pressioni che permettono di plasticizzare e spingere il polimero nello stampo. Per sviluppare il processo produttivo in modo che sia efficace, sicuro ed efficiente occorre seguire numerosi step di progettazione che riguardano il design dello stampo e del processo.

Possono essere identificati quattro tappe fondamentali nello sviluppo e nella produzione di un oggetto.

Il primo passo è la progettazione dell'oggetto, in questo caso si studiano il design, la funzionalità e l'estetica del componente.

Il secondo passo è la realizzazione dello stampo; lo stampo deve essere progettato in relazione al materiale e alle caratteristiche dell'oggetto finito tenendo in considerazione la produttività e l'efficienza del processo produttivo.

Dopo aver progettato e prodotto lo stampo occorre eseguire test, misurazioni ed eventuali modifiche in accordo con il design e le proprietà che il pezzo dovrà avere.

Il terzo step prevede di eseguire prove di stampaggio, si analizzano e misurano i pezzi prodotti; in questo modo si verifica la capacità produttiva dello stampo e la qualità del prodotto finito. Durante questo step è possibile ancora modificare lo stampo per correggere eventuali errori riscontrati durante i test.

Il quarto step prevede l'inizio della produzione inizialmente con una pre-serie che permette di controllare e certificare la qualità del prodotto finito e a seguire la produzione di massa.

1.1 Il processo di stampaggio a iniezione

1.1.1 Ciclo del processo

Il processo di injection molding è un sistema produttivo che consiste nell'iniettare un materiale plastico allo stato liquido in una cavità utilizzando la pressa per stampaggio a iniezione. Il materiale viene inizialmente caricato in una tramoggia che alimenta la macchina, il sistema di alimentazione consiste in una vite che ruota all'interno di un cilindro riscaldato; questo sistema applica uno sforzo e un riscaldamento al materiale in modo da plasticizzarlo. Il materiale viene accumulato nella testa del cilindro dove viene mantenuto alla temperatura necessaria per l'iniezione. Successivamente la vite scorre all'interno del cilindro in modo da iniettare il materiale nella cavità dello stampo. Questo è il processo di riempimento e i parametri che controllano l'azione sono la velocità di movimento dell'unità di iniezione e la pressione che esercita.

Dopo il riempimento, il sistema mantiene in pressione il materiale in modo che lo stampo venga completamente riempito e che il materiale continui a entrare nello stampo durante la solidificazione in modo da ridurre il ritiro del materiale, questo passaggio si interrompe quando lo sprue, cioè il canale che collega il punto di ingresso del materiale alla cavità dello stampo, è solidificato. Questo processo è chiamato packing.

Infine il pezzo raffredda nello stampo e quando ha acquisito le proprietà meccaniche sufficienti lo stampo si apre e l'estrattore spinge fuori dallo stampo il pezzo e i canali di alimentazione.

Questo processo è chiamato ciclo di iniezione ed è quindi costituito da 5 step principali: filling, packing, cooling e estrazione, durante il raffreddamento e l'estrazione l'unità di iniezione prepara il materiale per il ciclo successivo. In figura 1 è riportato lo schema della sequenza di step produttivi che compongono il ciclo di iniezione.

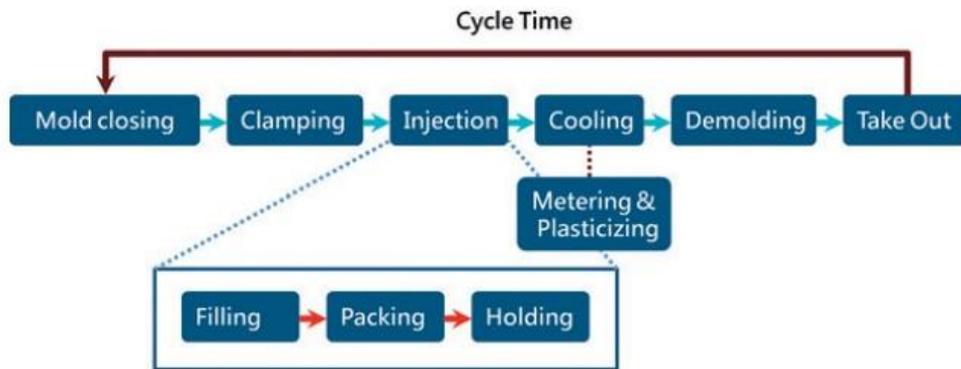


Figura 1 Schema del ciclo di iniezione. [1]

In figura 2 è riportato un diagramma che descrive la durata dei vari stages di produzione. Si osserva che gli step di iniezione e estrazione sono molto rapidi, mentre il mantenimento e il raffreddamento sono processi più lenti; infatti il mantenimento occupa circa il 18% del tempo ciclo e il raffreddamento impiega circa il 60% del tempo ciclo.

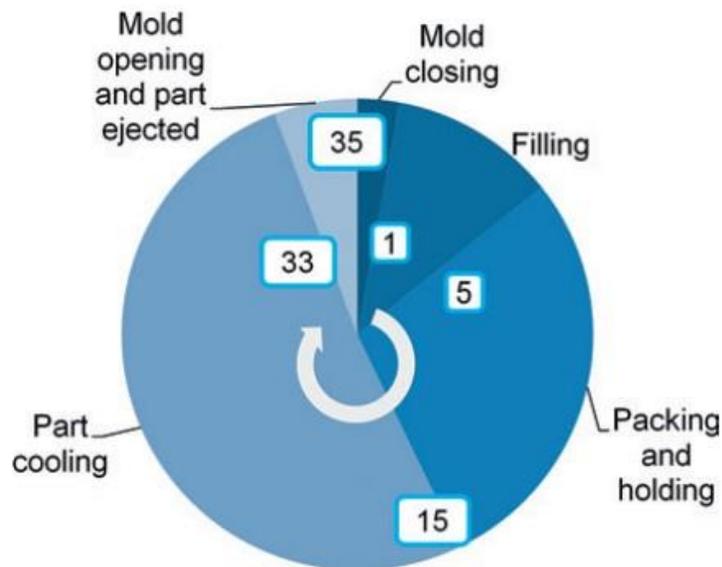


Figura 2 Diagramma della durata delle azioni che compongono il ciclo produttivo. [1]

1.1.2 Pressa per injection molding

In figura 3 è riportata l'immagine di una pressa per lo stampaggio a iniezione.

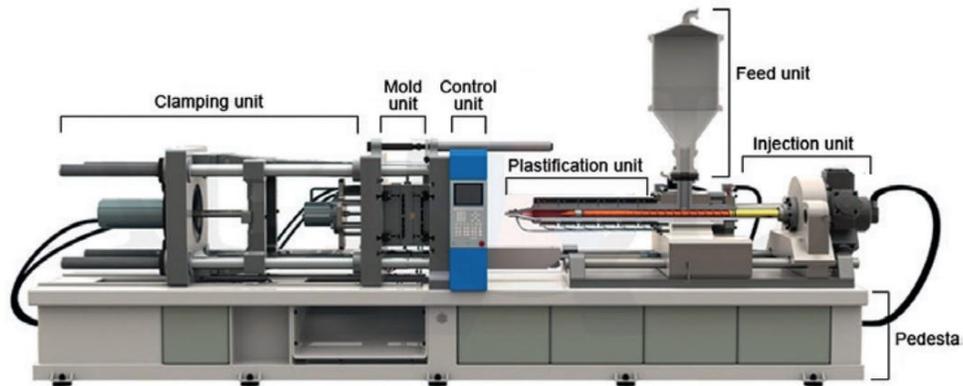


Figura 3 Macchina per lo stampaggio a iniezione. [2]

La pressa è divisa in due unità fondamentali: l'unità di iniezione e la pressa vera e propria, che permetta la chiusura dello stampo.

Lo stampo per injection molding è diviso in due parti, la matrice è la parte fissa, il punzone è la parte mobile sostenuta dalla pressa. La pressa utilizza un sistema meccanico oppure idraulico per muovere il punzone e per azionare i movimenti che compongono lo stampo. Nel momento in cui lo stampo viene chiuso la pressa garantisce la pressione necessaria a mantenere in posizione lo stampo affinché non si apra a causa della pressione esercitata dal polimero.

L'unità di plastificazione e iniezione invece produce il riscaldamento e la plasticizzazione del materiale e applica la pressione necessaria all'iniezione del polimero all'interno dello stampo. Come si osserva in figura 3 il sistema di iniezione è costituito da una vite in grado di ruotare e scorrere sul suo asse, il movimento della vite assieme all'aumento di temperatura portano a fusione il materiale che viene compresso nella zona della punta del cilindro. Dopo questo passaggio la vite scorre lungo il suo asse e spinge il materiale nello stampo applicando la pressione richiesta.

A questo sistema base possono essere aggiunti specifici accessori in funzione della geometria del pezzo prodotto o del materiale utilizzato, per esempio in foto il materiale viene caricato con una tramoggia che può però essere sostituita con un sistema di caricamento automatico e può essere aggiunto un sistema di deumidificazione.

Il macchinario è gestito da un sistema di controllo che permette impostare tutti i parametri di processo: tempi relative a ogni fase di stampaggio, condizionamento dello stampo e preparazione del polimero. I parametri di processo vengono impostati in relazione al materiale utilizzato e alle caratteristiche richieste del prodotto.

1.1.3 Elemento di iniezione

L'estrusore è composto da una vite con profondità del filetto variabile che ruota e scorre all'interno di un cilindro riscaldato. La dimensione del cilindro determina la quantità di materiale massima che può essere gestita e iniettata a ogni ciclo.

Durante il processo di plasticizzazione si sfrutta l'energia termica fornita del cilindro e l'energia meccanica fornita dalla vite per portare il materiale a fusione. La vite ruotando produce uno sforzo di taglio sul materiale; per effetto della frizione, insieme al calore fornito, il materiale viene portato allo stato liquido. Inoltre il moto della vite comprime e trasporta il materiale fuso fino alla punta del cilindro dove viene mantenuto allo stato liquido dal cilindro riscaldato.

La vite è divisa in 3 zone. La zona di alimentazione possiede filetti profondi, il suo ruolo è quello di trasportare il materiale granulare, per effetto del riscaldamento del cilindro il materiale inizia a fondere alla fine della zona di alimentazione.

La zona di transizione è caratterizzata da una graduale diminuzione della profondità del filetto. In questa zona il materiale viene riscaldato, inoltre la vite produce uno sforzo di taglio sul materiale e comprime il polimero. In questa zona il polimero viene portato completamente a fusione e per effetto della pressione prodotta dalla vite si eliminano le bolle di gas. In questa zona il riscaldamento è principalmente "meccanico", cioè prodotto dagli sforzi e attriti interni al materiale. Gli attriti producono il 70% della plasticizzazione, questa condizione è necessaria affinché la temperatura del polimero cresca in modo omogeneo.

La zona di dosaggio è caratterizzata da profondità del filetto della vite costante. In questa zona il polimero viene miscelato e raggiunge la temperatura ottimale per lo stampaggio. Il materiale viene spinto oltre la valvola di non ritorno e caricato della punta dell'elemento di iniezione dove viene mantenuto alla temperatura necessaria per l'iniezione.

Il sistema di iniezione regola il processo di filling e packing. La vite ruotando plasticizza il materiale e lo trasporta fino alla testa del cilindro, successivamente la vite scorre lungo il suo asse e inietta il polimero all'interno dello stampo. Durante l'iniezione l'aria presente nella cavità chiusa dello stampo fuoriesce attraverso le fughe presenti tra le due parti dello stampo, attorno ai pin di estrazione e dai fori di ventilazione. La temperatura del polimero e la pressione applicata dal sistema di iniezione devono essere adeguate affinché il materiale possa fluire e riempire completamente lo stampo, se la temperatura o la pressione sono troppo basse lo stampo non verrà completamente riempito, se invece sono troppo alte il polimero fluirà lungo le fughe tra le parti dello stampo formando delle bave.

In figura 4 è riportato uno schema dell'unità di iniezione e la nomenclatura dei parametri e elementi dell'unità.

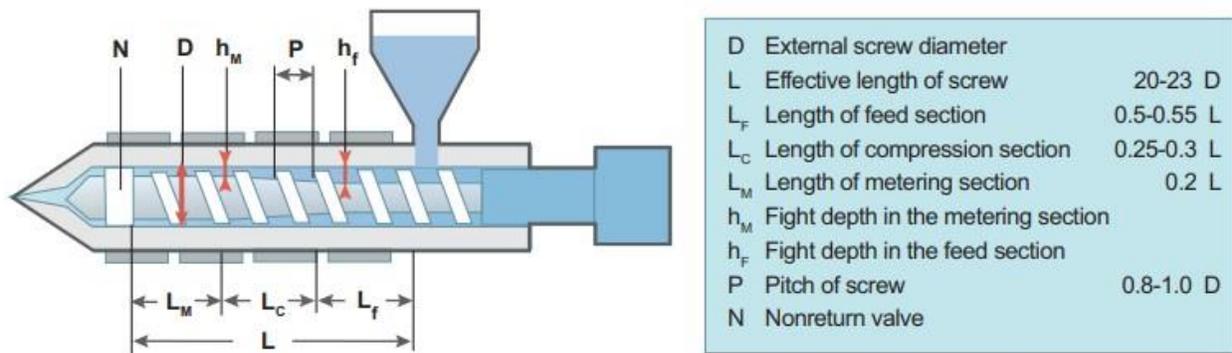


Figura 4 Schema dell'unità di iniezione e nomenclatura dei parametri dimensionali della vite. [1]

1.1.4 Stampo

La stampo ha il compito di formare, raffreddare ed estrarre il pezzo.

Esistono tre principali tipologie di stampo: a due piastre, a tre piastre e a canale caldo. La scelta del tipo di stampo dipende da design del prodotto e dei canali di alimentazione.

Lo stampo è costituito da numerosi elementi. I canali di alimentazione sono le strutture che trasportano il materiale dall'elemento di iniezione al punto di iniezione nella cavità dello stampo (gate), il loro design regola il riempimento dello stampo e i flussi di materiale. Il sistema di condizionamento consiste in canali in cui circola un liquido a temperatura controllata, questi permettono di impostare la temperatura dello stampo durante il riempimento e il raffreddamento. I canali di ventilazione sono fori che permettono l'uscita dell'aria dall'interno dello stampo durante il riempimento.

Lo stampo è diviso in due metà, una fissa e una mobile che viene controllata dal pistone della pressa. Inoltre lo stampo può contenere dei movimenti, cioè delle zone mobili il cui movimento è azionato dal pistone della pressa e gestito da un sistema meccanico di leve, che permettono di produrre pezzi con fori e sottosquadra.

1.2 Parametri del processo di iniezione

1.2.1 Finestra di processo

Per progettare correttamente il processo produttivo di stampaggio è fondamentale innanzitutto conoscere le proprietà del materiale scelto. Le principali proprietà da considerare sono: volume specifico, viscosità, capacità termica e conducibilità termica.

Inoltre è necessario tenere in considerazione il fatto che le proprietà del materiale variano in funzione della temperatura e della pressione e di conseguenza cambiano durante gli step del ciclo di iniezione. Quindi i parametri di processo dovranno essere adeguati a garantire che il materiale posseda le proprietà adatte durante ogni step del ciclo.

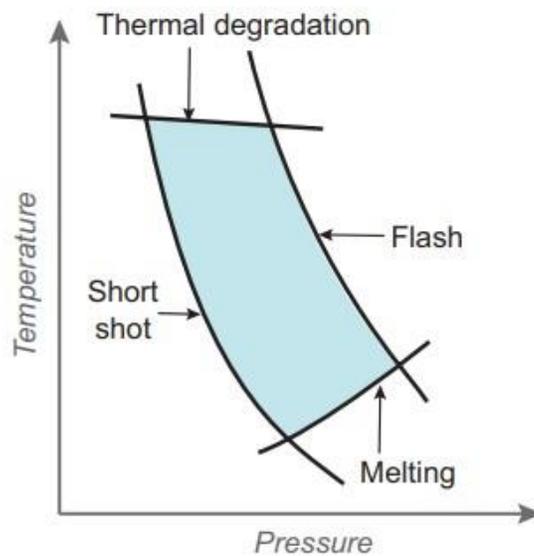


Figura 5 Grafico pressione versus temperatura che identifica un esempio di finestra di processo [1]

In figura 5 è riportato un esempio di finestra di processo, ossia è rappresentato in quale intervallo di valori la temperatura e la pressione devono essere impostati affinché il materiale abbia proprietà adeguate all'iniezione. In questo esempio i fenomeni che limitano i parametri di processo sono: la temperatura di degradazione, la temperatura di fusione e la capacità del polimero di riempire la cavità dello stampo. Si osserva che la temperatura del materiale deve essere sufficiente per portarlo a fusione ma non eccessiva per evitare di causare degradazione. Inoltre se la pressione e la temperatura sono troppo basse il materiale non riuscirà a fluire e lo stampo non verrà riempito completamente (short shot), se invece la pressione e la temperatura sono troppo alte il materiale sarà molto fluido e riuscirà a penetrare negli interstizi tra le due metà dello stampo (flash).

1.2.2 Variazione di pressione, volume specifico e temperatura durante gli step di iniezione

Il ciclo inizia con lo stage di plasticizzazione del materiale; il polimero viene portato a fusione per effetto della temperatura e degli sforzi esercitati dalla vite. La vite agisce ruotando e retrocedendo in modo da comprimere il materiale verso la punta dell'elemento di iniezione. La pressione raggiunta dal materiale dipende dalla rotazione della vite e viene regolata applicando una retro pressione con il cilindro idraulico che aziona la vite. Come mostrato in figura 6 la vite ruota in senso antiorario per trasportare il materiale; l'effetto di compressione dipende dagli sforzi prodotti dalla vite nel materiale che viene forzato verso la punta dell'elemento, il cilindro che controlla la posizione della girante può mantenere la posizione oppure può ridurre la pressione permettendo alla vite di scorrere indietro e producendo quindi una diminuzione della pressione del materiale.

Il polimero fuso viene poi iniettato nello stampo. Uno schema della variazione delle pressioni in gioco è riportato in figura 6.

La vite dell'elemento di iniezione scorre e spinge il materiale all'interno dello stampo seguendo il profilo di pressione indicato con la curva nera. Le curve rossa e blu si riferiscono alle pressioni

raggiunte rispettivamente nei punti G (gate dello stampo) e E (il punto dello stampo più lontano da G).

Durante il filling la pressione esercitata dalla macchina cresce e raggiunge il picco di massima in corrispondenza del punto 3, cioè nel momento in cui il polimero ha raggiunto la posizione E e quindi ha riempito totalmente lo stampo. Dopo che lo stampo è stato riempito completamente la pressione nei punti G e E aumenta.

Dopo aver eseguito il filling, la macchina esegue il packing applicando una pressione costante. Questa pressione viene mantenuta fino a quando la pressione nel punto G non inizia a diminuire; Quando il profilo della pressione in G inizia a scendere significa che il gate è solidificato e quindi non è più possibile spingere altro materiale all'interno dello stampo.

Durante il raffreddamento la pressione diminuisce progressivamente fino all'estrazione.

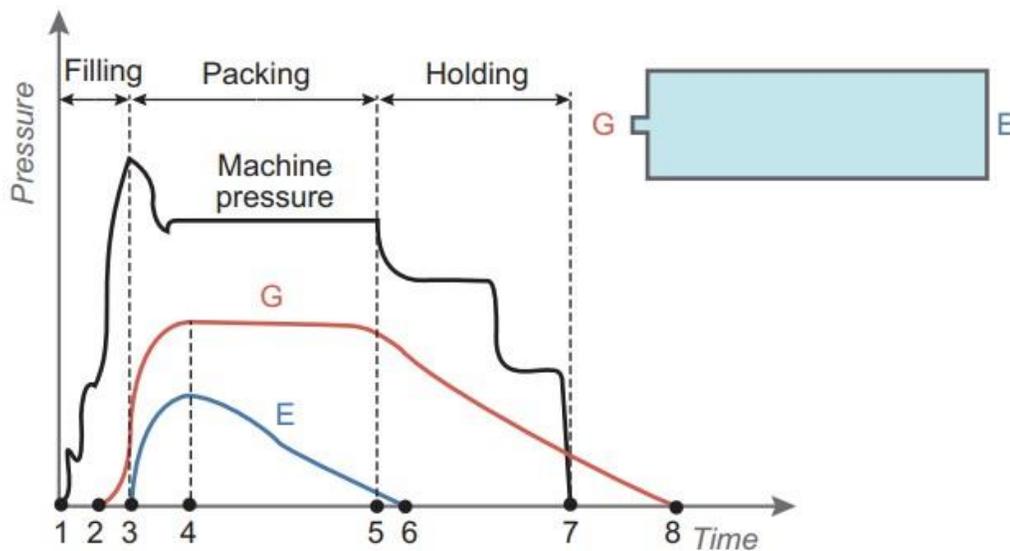


Figura 6 Profilo di pressione prodotto in diverse zone dello stampo [1]

I parametri del processo di stampaggio devono essere valutati in modo da garantire che lo stampo venga completamente riempito in modo omogeneo, poiché questo aspetto ha un importante effetto su ritiri e deformazioni del pezzo.

Per garantire il riempimento dello stampo si esegue il packing, l'obiettivo è forzare la maggior quantità possibile di materiale ad entrare nello stampo. Occorre però tenere in considerazione che il profilo di pressione e temperatura che si sviluppa in ogni zona dello stampo è diverso, come accennato prima nel paragrafo. In particolare al variare della pressione e della temperatura varia anche il volume specifico del materiale e di conseguenza la densità del polimero fuso. Questa dipendenza è rappresentata in figura 7: la curva rossa che si trova più in alto (volume specifico maggiore) si riferisce alla pressione ambientale, le altre curve via via scendendo, si riferiscono a pressioni progressivamente più alte. Dal grafico si osserva come il volume specifico diminuisce all'aumentare della pressione, quindi delle zone dello stampo in cui vengono raggiunte pressioni maggiori è possibile spingere una maggiore quantità di polimero e di conseguenza si riduce il ritiro del pezzo.

Questo fenomeno ha un effetto importante sulla qualità del prodotto finito, poiché il ritiro diversificato di zone diverse causa la distorsione del pezzo.

Considerando per esempio il pezzo riportato in figura 7, il materiale che ha raggiunto il punto E ha un volume specifico maggiore del materiale che ha raggiunto il punto G. Ciò significa che è stato possibile forzare una quantità maggiore di materiale nella zona del punto G rispetto al punto E, di conseguenza il ritiro del pezzo è maggiore nella zona E rispetto a G e ciò produce una distorsione.

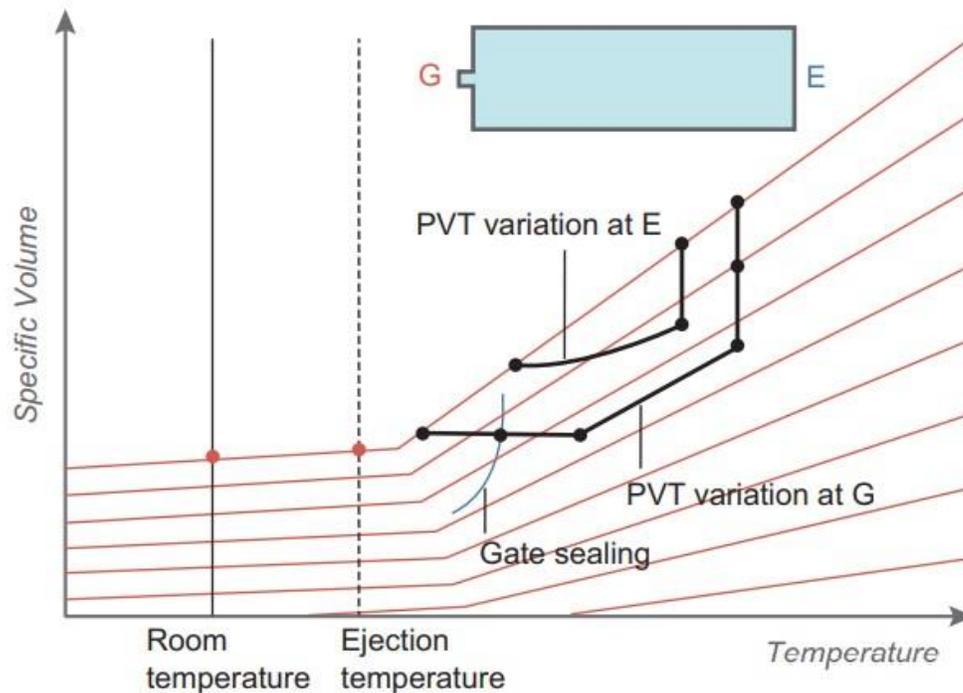


Figura 7 Grafico volume specifico versus temperatura a diverse pressioni. [1]

1.2.3 Controllo dei parametri di processo

Di seguito verranno definiti quali sono i parametri di processo e quale è la loro funzione.

I tre principali fattori che condizionano il processo produttivo sono: il design del componente e dello stampo, le condizioni di processo e le proprietà del materiale. L'ottimizzazione dei parametri di processo è l'aspetto più complesso poiché il ciclo di stampaggio è diviso in numerosi stages ognuno dei quali possiede diversi parametri che lo caratterizzano; inoltre questi parametri sono interconnessi tra loro, è quindi fondamentale conoscere l'effetto che ogni parametro produce e come ognuno influenza gli altri.

In figura 8 è riportato uno schema che definisce quali sono i parametri controllabili che agiscono su ogni step del ciclo di stampaggio.

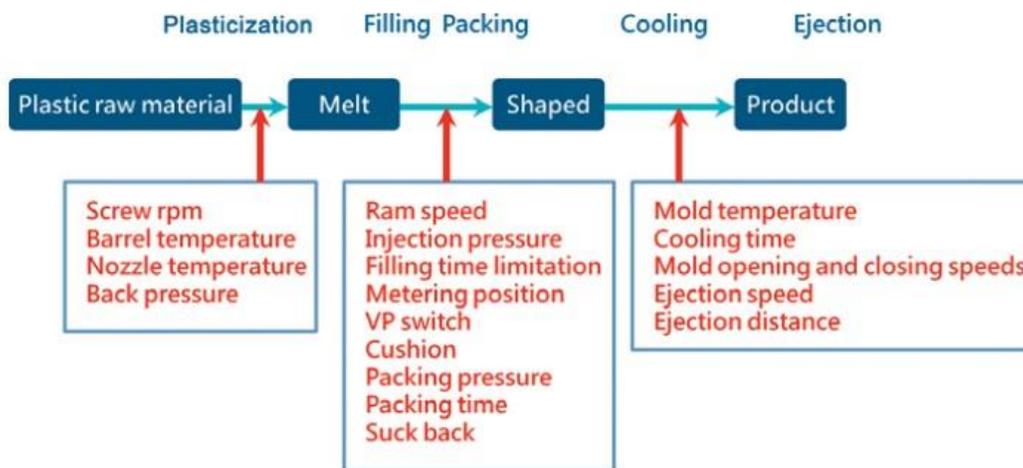


Figura 8 Parametri del processo di iniezione. [1]

1.2.4 Parametri di plasticizzazione

- Temperature del cilindro

All'interno del barrel il polimero viene portato a fusione; la macchina permette di impostare la temperatura che il polimero deve raggiungere nella varie sezioni del barrel. In figura 9 è riportato lo schema di una macchina in cui è possibile impostare la temperatura del barrel in sei zone diverse.

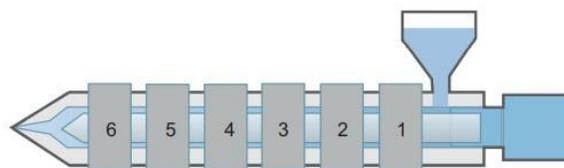


Figura 9 Schema degli elementi riscaldanti che regolano la temperatura dell'elemento di iniezione. [1]

Principalmente le temperature di processo vengono impostate in funzione della temperatura di fusione e della viscosità del polimero.

La macchina è in grado di eseguire il riscaldamento seguendo diverse rampe di temperatura. La scelta del profilo dipende dalle proprietà termiche del polimero, dalla sua capacità di fluire (flowability) e dalla viscosità. Per esempio per un materiale molto viscoso e con una bassa flowability occorrerà scegliere un profilo di riscaldamento che abbia una crescita regolare di temperatura, in modo che il polimero si riscaldi in modo omogeneo. Se invece si utilizza un polimero poco viscoso, si può scegliere un riscaldamento più rapido in quanto la bassa viscosità permette una più facile miscelazione e omogeneizzazione della temperatura.

Oltre alla temperatura anche altri parametri dell'unità di iniezione hanno un effetto sul riscaldamento del polimero e sulla qualità della plasticizzazione. Questi sono: back pressure, screw rpm, suck back e metering stroke.

- Back Pressure

La Back Pressure è la pressione che la vite applica al polimero durante la rotazione. La vite ruotando trasporta il materiale verso la punta del cilindro e applica uno sforzo per comprimere e plasticizzare il polimero; questa pressione tende a spingere il materiale indietro verso la bocca di caricamento. Per questo motivo la Back Pressure ha un effetto sul tempo di residenza del polimero a contatto con la vite. Quindi una Back Pressure elevata costringe il polimero a muoversi più lentamente nel barrel e a rimanere a contatto con la vite per un tempo più lungo.

Una Back Pressure troppo alta produce un aumento del consumo energetico e del tempo necessario al dosaggio, inoltre aumentano gli sforzi agenti sul polimero che può degradare, invece una Back Pressure troppo bassa produce un dosaggio inaccurato ed è possibile che rimangano bolle di aria disperse nel polimero.

- Screw RPM

La Screw RPM indica la velocità di rotazione della vite all'interno del barrel, questo parametro ha effetto su due fenomeni: la velocità di trasporto del polimero e la velocità tangenziale della vite. La velocità di rotazione deve essere scelta anche in funzione del diametro della vite, poiché anche dalla dimensione della vite dipende la quantità di materiale trasportato e la velocità tangenziale.

Una velocità di rotazione bassa permette di avere un miglior effetto di mescolamento e applicare minori sforzi di taglio, tuttavia il tempo necessario al dosaggio aumenta.

- Suck Back

Il Suck Back è prodotto per effetto della vite che retrocede dopo il dosaggio, questo porta a una diminuzione e omogeneizzazione della pressione nel materiale dosato.

Il Suck Back può essere impostato nella modalità forward o backward, in base al momento in cui viene applicato se prima o dopo l'iniezione.

Il Forward Suck Back è utilizzato per gli stampi a canale caldo, mentre il Back Ward Suck Back è utilizzato per gli stampi a canale freddo. Il Suck Back permette una redistribuzione del materiale plasticizzato nella punta del barrel e permette di ottenere una densità più uniforme e migliorare la miscelazione di un polimero caricato.

Il Back Ward Suck Back deve quindi essere impostato in modo da omogeneizzare la densità ma senza intrappolare aria quando la vite retrocede.

In figura 10 è riportato il barrel in sezione e si evidenziano i movimenti che la vite compie durante il Suck Back e l'iniezione.

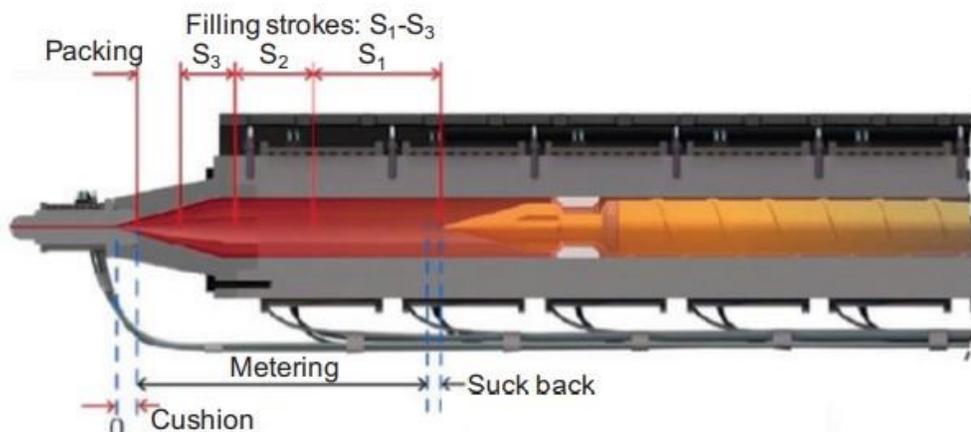


Figura 10 Schema dei movimenti che la vite compie per creare il cuscinetto e per iniettare il materiale. [1]

1.2.5 Plasticizzazione e dosaggio

In figura 11 è riportato uno schema dell'elemento di iniezione su cui vengono indicati i principali parametri che regolano plasticizzazione e dosaggio.

In base al materiale utilizzato, si andranno a impostare nella macchina tutti questi parametri. La temperatura degli elementi riscaldanti del barrel controlla il profilo di riscaldamento del polimero; la velocità di rotazione della vite regola il trasporto di materiale, il dosaggio e per effetto degli sforzi che applica sul polimero produce il riscaldamento nella zona di transizione della vite. Il pistone idraulico che muove la vite regola la Back Pressure e il Suck Back.

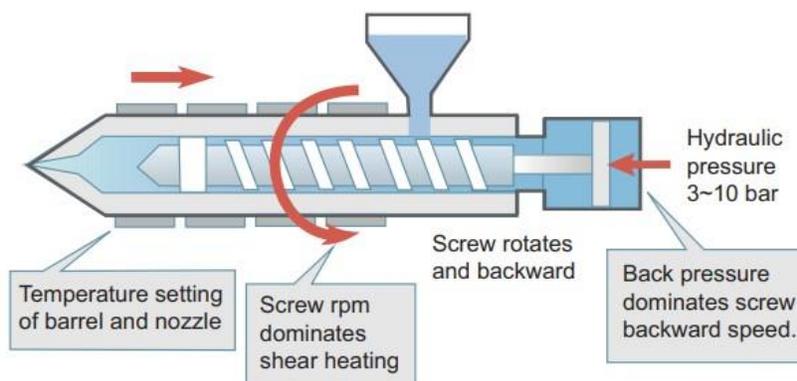


Figura 11 Parametri dell'elemento di iniezione che vengono regolati durante plasticizzazione e dosaggio. [1]

1.2.6 Parametri di filling

- Velocità di iniezione

La velocità di iniezione è regolata dalla velocità di movimento della vite che spinge il polimero nello stampo. La velocità di iniezione deve essere regolata in modo da riempire in modo omogeneo lo stampo, senza produrre difetti e nel più breve tempo possibile. È possibile scegliere un profilo di iniezione con diverse velocità, in questo caso però occorre considerare che il moto della vite ha un'inerzia che ritarderà il cambio nella velocità impostata.

- Pressione di iniezione

La pressione di iniezione è la pressione applicata dall'elemento di iniezione sul polimero, nel caso di presse idrauliche la pressione di iniezione dipende dalla pressione con cui viene azionato il cilindro che mette in moto la vite. La pressione con cui viene iniettato il polimero dipende dalla pressione applicata dal pistone secondo la relazione riportata in figura 12, si osserva quindi che il rapporto tra queste pressioni dipende dalla dimensione del barrel ed è possibile introdurre il fattore rapporto di intensificazione per quantificare l'effetto della dimensione del barrel. Quindi, per esempio, maggiore è il diametro del cilindro minore è la pressione applicata al polimero.

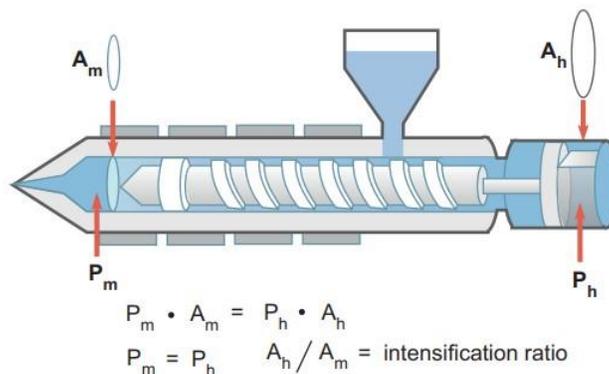


Figura 12 Relazione tra diametro del barrel e pressione di iniezione. [1]

La pressione di iniezione ha numerose conseguenze sulla condizione del fuso, come per esempio la viscosità; inoltre, così come la velocità di iniezione anche la pressione può essere impostata secondo un profilo ma anche in questo caso l'inerzia della vite sviluppa un ritardo nel cambio di pressione.

Un ulteriore aspetto da considerare è la relazione tra pressione di iniezione e tempo di iniezione. Come mostrato in figura 13 esiste una finestra di processo all'interno della quale è possibile scegliere la condizione di lavoro. Utilizzando un'elevata velocità si riduce il tempo di iniezione e ciò permette di ridurre la differenza di temperatura del polimero nelle varie zone durante il filling; tuttavia per fare questo è necessario utilizzare una pressione di iniezione molto maggiore, inoltre il polimero fluisce più velocemente e ciò produce un maggiore attrito che porta ad una variazione di temperatura nelle varie zone dello stampo. Se invece la velocità di riempimento è bassa si riducono gli stress che il materiale subisce, però contemporaneamente il tempo di filling aumenta e se il tempo di iniezione è troppo lungo la pressione di iniezione aumenta nuovamente poiché il polimero subisce un maggiore raffreddamento prima di aver completamente riempito lo stampo e la sua viscosità aumenta.

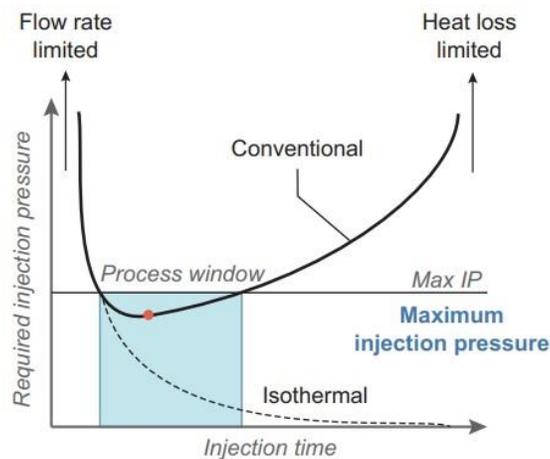


Figura 13 Grafico pressione di iniezione versus tempo di iniezione. [1]

- VP switch

I parametri che controllano il processo di iniezione sono velocità di riempimento e pressione di iniezione. Questi due parametri sono inevitabilmente legati l'uno all'altro infatti durante il filling si imposta la velocità di riempimento e la pressione è una conseguenza di questa.

Durante il filling la velocità di iniezione è il parametro di processo mentre la pressione viene misurata come parametro di protezione in modo che non superi il limite impostato.

In figura 14 è riportato come esempio un grafico di velocità di iniezione e pressione durante le fasi di filling e packing.

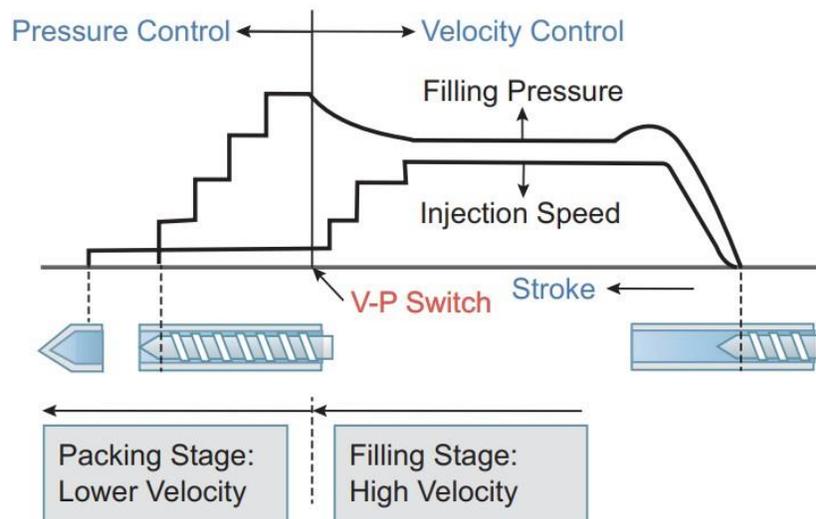


Figura 14 Profilo di pressione applicato durante filling e packing. [3]

La parte destra del grafico si riferisce al filling, durante questa fase si applica il profilo di velocità di riempimento voluto e si misura la pressione che ne deriva. La parte sinistra del grafico si riferisce al processo di packing; in questo caso la pressione è il parametro di controllo, la velocità di riempimento viene misurata.

Si osserva che la velocità di iniezione durante il packing ha un valore molto basso poiché la cavità dello stampo è stata completamente riempita e solo la quantità di polimero necessaria a compensare il ritiro può entrare nello stampo.

Il limite tra queste due zone del grafico è il punto di switch tra controllo attraverso la velocità di iniezione e controllo attraverso la pressione (VP switch). Questo punto può essere identificato in termini di volume di materiale iniettato oppure in base alla percentuale di riempimento. La percentuale di riempimento ottenuta durante il filling è definita:

$$filling\% = \frac{filling\ stroke}{total\ (filling+packing)\ injection\ stroke} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Dove filling stroke è la corsa della vite per eseguire il filling e total injection stroke è la corsa della vite per eseguire l'intera iniezione.

Il punto in cui eseguire il VP switch viene scelto in base al profilo di pressione misurato durante un ciclo di stampaggio. Il profilo di pressione del processo di iniezione correttamente progettato è simile a quello in figura 14: la pressione cresce rapidamente durante il filling fino a raggiungere la pressione massima che viene mantenuta durante il packing, non sono presenti fluttuazioni di pressione o picchi che indicherebbero un difetto nel processo.

1.2.7 Parametri di packing

L'obiettivo del pack è completare il riempimento dello stampo e compensare il ritiro volumetrico del materiale durante il raffreddamento; l'ottimizzazione dello step di packing permette di migliorare la finitura del pezzo e limitare le deformazioni e tolleranze dimensionali. I parametri che possono essere gestiti durante questo step sono il tempo di packing e la pressione di packing.

Il tempo di packing viene impostato in modo tale da spingere la quantità maggiore possibile di materiale nello stampo, maggiore è il tempo di packing maggiore è la quantità di materiale iniettata. Tuttavia, come mostrato in figura 15, la dipendenza tra queste proprietà non è lineare e inoltre esiste un limite massimo di tempo applicabile. Infatti durante il packing il polimero inizia a raffreddare e solidificare, la macchina continua a iniettare materiale per compensare il ritiro ma questo può essere fatto fino a quando il gate non è solidificato, infatti dal momento di freezing del gate il materiale non è più in grado di entrare nello stampo.

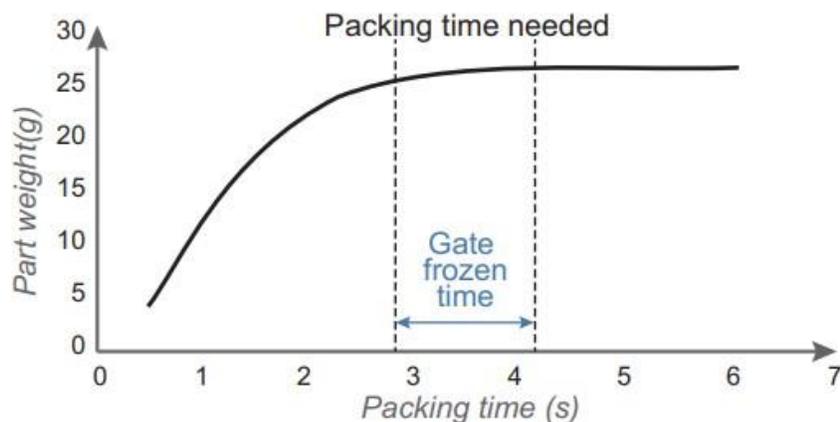


Figura 15 Grafico che definisce il peso del componente stampato in funzione della pressione di packing. [1]

La pressione di packing è la pressione che la vite continua ad applicare al polimero per continuare a spingerlo nello stampo. E' possibile impostare un singolo valore di pressione di mantenimento oppure un profilo di pressioni. Il processo per scegliere la pressione idonea per il packing è piuttosto complesso, infatti questo parametro comporta numerose conseguenze sul prodotto finito. Se da una parte è necessario applicare una pressione sufficiente per ridurre al minimo il ritiro, al tempo stesso la pressione non deve essere eccessiva per evitare la formazione di flash e per ridurre il worpage.

La pressione di mantenimento ha un forte impatto sulla distorsione del pezzo finito poiché la distorsione dipende dalla differenza di pressioni, quindi di densità del materiale, che si crea tra zone diverse dello stampo.

1.2.8 Parametri di raffreddamento

In una pressa per lo stampaggio a iniezione l'unico parametro relativo al raffreddamento che può essere controllato è il tempo. La temperatura dello stampo è invece controllata indirettamente da un dispositivo esterno che regola la temperatura del liquido di condizionamento e gestisce il sistema di condotte che portano il liquido ai canali di raffreddamento. Il terzo fattore che impatta sul raffreddamento dello stampo è la disposizione e distanza dei canali di raffreddamento rispetto alla cavità; in questo caso è necessario progettare canali che siano in grado di mantenere la temperatura dello stampo il più possibile costante in modo da garantire un raffreddamento omogeneo del pezzo, un raffreddamento omogeneo permette di ridurre le distorsioni del pezzo.

Per la scelta del tempo di raffreddamento occorre tenere in considerazione due limiti: il tempo di raffreddamento deve essere abbastanza lungo in modo che il pezzo acquisisca proprietà meccaniche sufficienti affinché durante l'estrazione non venga rotto o deformato, il tempo di raffreddamento deve essere il più corto possibile per ridurre al minimo il tempo ciclo e ottimizzare la produttività. Il tempo di raffreddamento darà quindi il tempo minimo che permetta di estrarre il pezzo in sicurezza; questo risultato dipende necessariamente anche dalla temperatura dello stampo.

L'ultimo parametro da considerare è la temperatura dello stampo, questo parametro è piuttosto complesso da impostare poiché è costante durante tutto il ciclo di stampaggio e quindi ha effetto su tutti gli step (filling, packing e cooling). Gli effetti da tenere in considerazione sono: lo stampo deve riempirsi completamente, durante il packing il pezzo deve subire distorsioni minime e il raffreddamento deve essere il più breve possibile.

CAPITOLO 2 SIMULAZIONE DEL PROCESSO DI STAMPAGGIO A INIEZIONE

Come spiegato nel capitolo precedente la qualità del pezzo prodotto per injection molding dipende da numerosi fattori: le proprietà del materiale, il design dello stampo e le condizioni di processo. Occorre quindi una progettazione e un controllo ottimale del processo per ottenere un prodotto di buona qualità. Il processo reale tuttavia è un aspetto incognito della produzione in quanto può essere valutato solo dopo la produzione dell'oggetto.

La principale criticità è quindi l'ottimizzazione dei parametri di controllo. I parametri sono numerosi e ognuno agisce in modo non lineare su tutti i fenomeni fluidodinamici e termici che avvengono durante la produzione. Per esempio il problema del short shot può essere risolto con tre approcci: aumentando la velocità di iniezione, aumentando la temperatura del fuso oppure aumentando la temperatura dello stampo.

Il secondo problema riguarda la progettazione dello stampo. La capacità dello stampo di produrre l'oggetto può essere verificata solo dopo che è stato realizzato, quindi se il pezzo finito presenta dei difetti è necessario risolvere il problema modificando lo stampo. Queste correzioni sono costose e allungano il tempo di sviluppo; è quindi interessante minimizzare il numero questi passaggi.

Per semplificare la soluzione di questi problemi sono stati sviluppati software CAE che permettono la simulazione e l'analisi del processo produttivo in tutti i suoi step, assistendo la progettazione dello stampo, la scelta dei parametri di processo e la loro ottimizzazione, in modo da verificare la fattibilità del processo e del design del prodotto.

Un determinato oggetto può essere prodotto scegliendo soluzioni diverse, tuttavia solo alcune di queste sono realizzabili e vantaggiose.

Si considerano come dati della simulazione il design dello stampo e le proprietà termiche, reologiche e meccaniche del materiale. L'analisi permette di definire i parametri di processo e sulla base di questi si simulano tutti gli step del processo e le proprietà del prodotto ottenute. Il risultato della simulazione comprende il diagramma dei flussi di materia e i profili di temperatura, inoltre si ottengono indicazioni su proprietà meccaniche, funzionali ed estetiche del pezzo finito.

Quindi la simulazione permette di studiare sia il processo che le proprietà del prodotto e di conseguenza posso essere eseguite più analisi dello stesso componente modificando i parametri di processo per ricercare la condizione ottimale.

2.1 Applicazione della tecnologia CAE per injection molding

Il software CAE, ingegnerizzazione assistita da calcolatore, è una tecnologia in grado di analizzare e simulare il processo produttivo con la finalità di diagnosticare e assistere il suo sviluppo. Il CAE permette di partire dalle proprietà reologiche, termiche e meccaniche del materiale e dal design del pezzo per eseguire una analisi qualitativa e quantitativa dello stampo utilizzato per la produzione del pezzo e ha l'obiettivo di assistere lo sviluppo dello stampo oppure facilitare la riparazione dei suoi difetti.

Dal risultato dell'analisi CAE si possono osservare le cause dei problemi riscontrati e si possono modificare il design dello stampo e i parametri del processo per ottenere la soluzione più appropriata.

In figura è riportato uno schema della strategia di sviluppo di uno stampo e di come il modello CAE viene sfruttato.

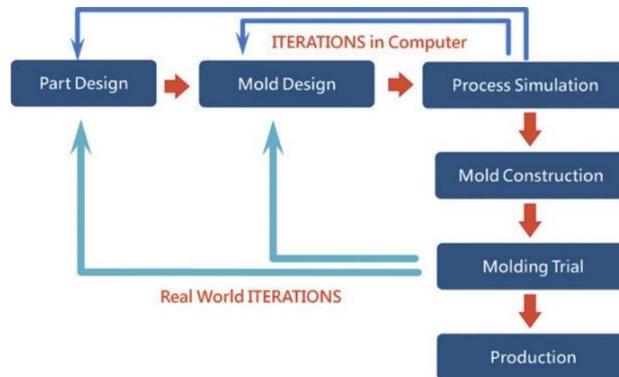


Figura 16 Applicazione del modello CAE al processo di sviluppo. [2]

Si possono mettere in evidenza quattro principali condizioni in cui il modello CAE viene efficacemente sfruttato:

1. Durante la progettazione del design dello stampo il modello CAE viene utilizzato per predire il comportamento dello stampo e mettere in evidenza le sue criticità. Tradizionalmente lo stampo viene sviluppato con un approccio trial-and-error, cioè solo dopo la produzione dello stampo e i primi test di stampaggio si misurano le proprietà del pezzo prodotto e in base alle proprietà e ai difetti riscontrati si propongono delle modifiche. Il CAE permette di evidenziare e risolvere alcuni di queste criticità già in fase di sviluppo dello stampo. In figura 17 è riportato uno schema del processo di analisi CAE che permette di verificare il funzionamento dello stampo in fase di progettazione.

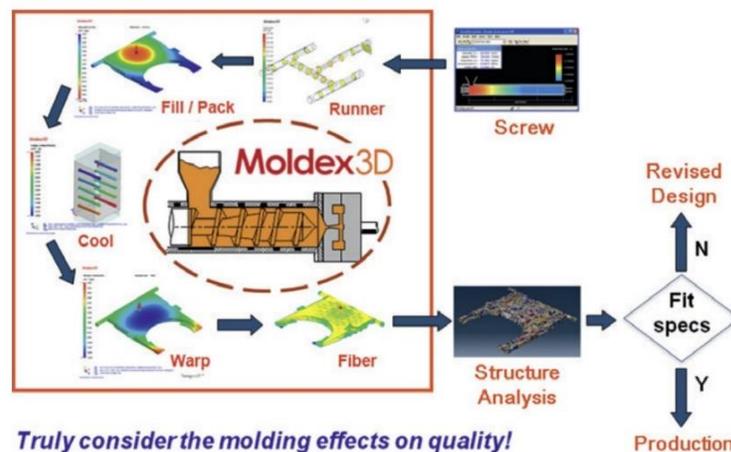


Figura 17 Applicazione della tecnologia CAE alla progettazione del componente stampato per injection molding. [4]

2. Una volta prodotto lo stampo si esegue una prima prova di stampaggio per ricercare e riparare le criticità prima che entri in produzione. Durante questo passaggio si osservano le caratteristiche e i difetti del prodotto stampato, tuttavia è complesso risalire alla causa del difetto in quanto numerosi parametri si sovrappongono. In queste circostanze il CAE può essere utilizzato per facilitare la ricerca delle cause di un difetto. Infatti si utilizza il CAE per generare i difetti riscontrati e di conseguenza risalire a quali proprietà dello stampo o parametri di processo li hanno causati.
3. Dopo l'inizio della produzione è importante ottimizzare il processo riducendo il tempo ciclo e massimizzando la produttività. Utilizzando il CAE si possono eseguire diverse simulazioni modificando i parametri di processo e osservare come variano i tempi necessari a ogni passaggio del processo (filling, packing e cooling) in modo da selezionare le condizioni che minimizzano il tempo ciclo.
4. Abbinando l'approccio di sviluppo tradizionale dello stampo e il sistema CAE si possono studiare operazioni e procedure di sviluppo standard basate sulla conoscenza dei casi precedenti. [2]

2.2 Equazioni base per la simulazione

In questa sezione verranno discusse le equazioni che governano i processi di filling, packing, cooling e warpage. Lo scopo della trattazione è quello di mettere in evidenza i fenomeni fisici che regolano i vari step della produzione, ciò è utile per interpretare correttamente i risultati che la simulazione restituisce. Per la trattazione completa degli aspetti matematici della formulazione si rimanda alle fonti bibliografiche.

2.2.1 Filling

Per derivare le equazioni che regolano il comportamento del fluido si considera che questo è un continuo. Quindi si trascura la struttura molecolare del materiale e si considera che le proprietà del fluido, come ad esempio densità e velocità possono essere definite in un punto del fluido. Inoltre si considera che le proprietà siano funzioni continue nello spazio e nel tempo e siano sempre derivabili.

Per analizzare le equazioni costitutive occorre considerare in maniera preliminare i seguenti concetti.

- Derivata sostanziale

Le proprietà del fluido sono funzione della posizione e del tempo, considerando per esempio la densità.

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (2.1)$$

La derivata di ogni funzione scalare di posizione e tempo è:

$$\frac{df}{dt} = v \cdot \nabla f + \frac{\partial f}{\partial t} \quad (2.2)$$

Con v velocità del fluido in un punto.

- Teorema della divergenza di Gauss

$$\int_V \nabla \cdot f \, dV = \int_S f \cdot n \, dS \quad (2.3)$$

- Teorema del trasporto di Reynolds

Per la trattazione delle equazioni costitutive occorre calcolare l'integrale di una funzione di posizione e tempo in un volume di fluido. Il volume considerato consiste sempre nelle stesse particelle di fluido ma è anche esso funzione del tempo $V(t)$.

Il teorema definisce:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} f(x, t) \, dV = \int_{V(t)} \frac{\partial f}{\partial t} \, dV + \int_{S(t)} f v \cdot n \, dS \quad (2.4)$$

Con $S(t)$ la superficie del volume $V(t)$, n la normale alla superficie $S(t)$ e t il tempo.

Per modellizzare il comportamento del polimero durante il filling sono necessarie tre equazioni costitutive: conservazione della massa, conservazione della quantità di moto e conservazione dell'energia.

1) La prima equazione costitutiva è la legge di conservazione della massa. Questa legge definisce che la massa contenuta in $V(t)$ è costante. Partendo dalla massa di $V(t)$.

$$m = \int_{V(t)} \rho(x, t) \, dV \quad (2.5)$$

E considerando che per effetto della conservazione della massa

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(x, t) \, dV \quad (2.6)$$

Riscrivendo il secondo termine dell'equazione utilizzando il teorema del trasporto di Reynolds, considerando inoltre $V(t)$ un volume arbitrario. Si ottiene l'equazione di continuità:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = 0 \quad (2.7)$$

2) La seconda equazione costitutiva è la conservazione della quantità di moto. Questa relazione definisce il fatto che la variazione della quantità di moto dipende dalla somma delle forze esterne agenti su $V(t)$.

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho v \, dV = \sum F_{ext} \quad (2.8)$$

La forza esterna totale che agisce sul sistema dipende da due termini. Un contributo relativo alla forza di gravità F_b e un contributo relativo alle tensioni applicate F_t .

$$F_b = \int_{V(t)} \rho g \, dV \quad (2.9)$$

Con g accelerazione di gravità.

$$F_t = \int_{S(t)} \sigma \cdot n \, dS = \int_{V(t)} \nabla \cdot \sigma \, dV \quad (2.10)$$

Con σ tensore degli sforzi e n vettore normale alla superficie.

$$\sum F_{ext} = F_b + F_t = \int_{V(t)} (\rho g + \nabla \cdot \sigma) \, dV \quad (2.11)$$

Riscrivendo quindi l'equazione iniziale della quantità di moto:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho v \, dV = \int_{V(t)} (\rho g + \nabla \cdot \sigma) \, dV \quad (2.12)$$

Applicando il teorema del trasporto al primo termine e considerando un volume $V(t)$ arbitrario, si ottiene l'equazione relativa alla conservazione della quantità di moto.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) = \rho g + \nabla \cdot \sigma - \nabla \cdot (\rho v v) \quad (2.13)$$

L'equazione ottenuta è piuttosto generica e può essere semplificata applicando delle approssimazioni.

Il polimero fuso ha un comportamento viscoelastico, tuttavia per la simulazione è possibile assumere che il materiale sia un fluido Newtoniano. Considerando il fluido Newtoniano è possibile riscrivere il termine che contiene il tensore degli sforzi (σ) con un nuovo termine che è funzione di viscosità e tensore delle deformazioni.

Utilizzando questa approssimazione l'equazione di conservazione della quantità di moto può essere semplificata alla forma tipicamente utilizzata dai software:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot \eta D - \rho v \cdot \nabla v \quad (1.14)$$

Con η la viscosità e D il tensore delle deformazioni.

3) La terza equazione necessaria a modellizzare il processo di filling è l'equazione di conservazione dell'energia.

L'energia totale del fluido in un materiale di volume $V(t)$ è la somma di due fattori: energia cinetica e energia interna. L'energia totale del fluido:

$$E_{tot} = \int_{V(t)} \frac{1}{2} \rho v^2 \, dV + \int_{V(t)} \rho \hat{U} \, dV \quad (1.15)$$

Con \hat{U} energia interna per unità di volume.

La variazione di energia totale del volume $V(t)$ con superficie $S(t)$ è uguale al lavoro svolto dall'esterno sul volume meno il calore ceduto attraverso $S(t)$. Il lavoro compiuto sul sistema dipende da due contributi: sforzi applicati sul materiale e forza peso. I due contributi sono formulati:

$$W_{traction} = \int_{S(t)} t \cdot v \, dS = \int_{S(t)} (\sigma \cdot n) \cdot v \, dS \quad (1.16)$$

Con t vettore degli sforzi.

Utilizzando il teorema della divergenza:

$$W_{traction} = \int_{V(t)} \nabla \cdot (\sigma \cdot v) dV \quad (1.17)$$

Il lavoro svolto dalla forza peso può essere espresso:

$$W_g = \int_{V(t)} \rho \cdot (g \cdot v) dV \quad (1.18)$$

Il calore scambiato attraverso la superficie $S(t)$ può essere calcolato utilizzando la seguente funzione, in funzione del vettore flusso di calore q .

$$Q = - \int_{S(t)} q \cdot n dS = - \int_{V(t)} \nabla \cdot q dV \quad (1.19)$$

Utilizzando le grandezze descritte è possibile scrivere l'equazione relativa alla conservazione di energia del sistema.

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \frac{1}{2} \rho v^2 dV}_{(1)} + \underbrace{\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \hat{U} dV}_{(2)} = \underbrace{\int_{V(t)} \nabla \cdot (\sigma \cdot v) dV}_{(3)} + \underbrace{\int_{V(t)} \rho \cdot (g \cdot v) dV}_{(4)} - \underbrace{\int_{V(t)} \nabla \cdot q dV}_{(5)} \quad (1.20)$$

Il significato dei termini numerati è il seguente:

1. Variazione di energia cinetica del sistema $V(t)$
2. Variazione di energia interna del sistema $V(t)$
3. Il lavoro applicato al fluido dalle forze viscosi nel sistema $V(t)$
4. Il lavoro applicato al fluido dalla forza di gravità nel sistema $V(t)$
5. Il calore ceduto dal sistema $V(t)$ attraverso $S(t)$

L'equazione ottenuta per la conservazione dell'energia è scritta in una forma complessa, utilizzando il teorema del trasporto di Reynolds e possibile riscrivere l'equazione in una forma più semplice. Inoltre l'equazione ottenuta contiene le grandezze \hat{U} e q ; queste quantità non possono essere misurate direttamente quindi è necessario stabilire una relazione per l'energia interna e per il flusso di calore in funzione di grandezze misurabili come la temperatura.

Note le relazioni, la cui dimostrazione è disponibile in letteratura:

$$\rho \frac{d\hat{U}}{dt} = \rho c_p \frac{dT}{dt} - \beta T \frac{dp}{dt} - p \nabla \cdot v \quad (2.21)$$

Con c_p il calore specifico, β coefficiente di espansione volumica, T la temperatura e p la pressione. Inoltre:

$$q = -k \nabla T \quad (2.22)$$

Con k conducibilità termica.

Sfruttando queste considerazioni si ottiene l'equazione di conservazione dell'energia:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \cdot \nabla p \right) + p \nabla \cdot v + \sigma : \nabla v + \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q} \quad (2.23)$$

Nella formulazione iniziale del fenomeno non sono stati considerati alcuni fenomeni. La generazione di calore legata a reazioni chimiche, per esempio durante l'iniezione di termoindurenti o schiume, e il calore latente associato ai passaggi di stato che possono avvenire, per esempio formazione di strutture cristalline. Il termine \dot{Q} rappresenta queste fonti di calore.

Come già fatto per la conservazione della quantità di moto, anche in questo caso si può approssimare il comportamento del polimero fuso considerando un fluido Newtoniano. In questo modo si ottiene l'equazione applicata dal software di simulazione.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \cdot \nabla p \right) + \eta \dot{\gamma}^2 + k \nabla^2 T \quad (2.24)$$

Durante la trattazione delle equazioni costitutive sono state inserite alcune approssimazioni per permettere di semplificare il modello; queste approssimazioni sono necessarie e hanno l'obiettivo di ridurre il costo computazionale della simulazione. E' quindi importante notare che il programma di calcolo ha dei limiti di accuratezza intrinseci del modello utilizzato per rappresentare i fenomeni. Esiste inoltre una seconda causa di errore, la simulazione infatti richiede l'inserimento di numerosi dati. I dati richiesti sono talvolta difficili da misurare e inoltre le misurazioni non tengono in considerazione il fatto che il processo produttivo stesso può causare una modifica delle proprietà del materiale.

Questi sono alcuni dei limiti che il modello proposto possiede intrinsecamente e occorre tenere in considerazione queste approssimazioni durante l'analisi dei risultati restituiti dal software di simulazione. [5]

2.2.2 Condizioni al contorno applicate al processo di filling

Per analizzare la fluidodinamica del processo di iniezione, oltre alle equazioni costitutive, occorre definire le condizioni al contorno imposte dallo stampo e dalla strategia produttiva.

Le superfici sulle quali è necessario impostare una condizione al contorno sono numerose. In figura 18 è riportato uno schema delle superfici da descrivere.

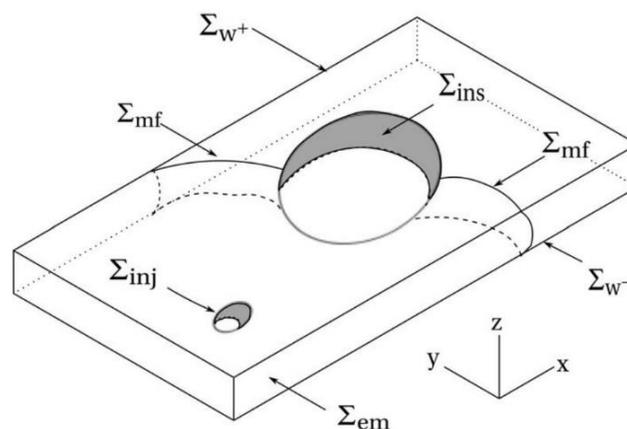


Figura 18 definizione delle superfici su cui si applicano le condizioni al contorno. [5]

- Σ_{inj} è la superficie attraverso la quale il materiale entra nello stampo
- Σ_{em} è la parete laterale della cavità dello stampo
- Σ_{W^+} è la superficie superiore della cavità dello stampo
- Σ_{W^-} è la superficie inferiore della cavità dello stampo
- Σ_{ins} sono le superfici definite dagli inserti dello stampo
- Σ_{mf} è la superficie che definisce il flusso di avanzamento del materiale: la superficie del fronte dipende dalla geometria dello stampo e dalla presenza degli inserti.

In generale per i problemi di fluidodinamica si utilizzano condizioni al contorno espresse in termini di sforzi e velocità, però nel caso dell'injection molding, poiché si parla principalmente di un flusso attraverso una sezione sottile, è conveniente utilizzare pressioni e flow rate. Le condizioni al contorno di pressione e flow rate sono:

- Su tutte le superfici impermeabili il gradiente di pressione nella direzione normale alla superficie è nullo:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ su } \Sigma_{em}, \Sigma_{W^+}, \Sigma_{W^-}, \Sigma_{ins}$$

Questa condizione significa che non è permesso il flusso attraverso la superficie della cavità e degli inserti.

- Il melt flow rate q o la pressione sono impostate sulla superficie di ingresso del materiale

$$q = q_{inj} \text{ oppure } p = p_{inj} \text{ su } \Sigma_{inj}$$

Per simulare il processo di filling solitamente si utilizza come condizione al contorno il flow rate, questo può essere calcolato dividendo il volume della cavità dello stampo per il tempo impostato dall'utente per il processo. A questo calcolo possono essere aggiunti parametri correttivi considerando la macchina, lo shear rate e altri parametri.

Per il processo di packing è invece preferibile impostare la pressione applicata al punto di iniezione.

- Prendendo come riferimento la pressione atmosferica, la pressione è nulla sulla superficie del fronte di avanzamento del fluido.

$$p = 0 \text{ su } \Sigma_{mf}$$

Questa assunzione può essere fatta nel caso in cui siano presenti canali di ventilazione o comunque l'aria nello stampo sia libera di fuoriuscire, diversamente se gli spazi tra gli elementi dello stampo sono tali da limitare significativamente l'uscita dell'aria occorre considerare una contropressione.

Oltre alle condizioni di pressione e flusso occorre impostare le condizioni di temperatura.

- Il profilo di temperatura lungo la sezione sulla superficie di ingresso del materiale è impostato

$$T(z) = T_{inj}(z) \text{ su } \Sigma_{inj}$$

In generale si può considerare il fluido a T costante sulla superficie di ingresso, poiché il materiale viene rapidamente spinto dallo stampo e sottoposto ad un moto convettivo. L'aspetto più critico è valutare i fenomeni termici che avvengono all'interno dei canali di alimentazione. Infatti il materiale è sottoposto a sforzi di taglio intensi e ciò produce una variazione nella viscosità del materiale, questo fenomeno avviene principalmente quando sono presenti più cavità all'interno dello stampo e il polimero segue percorsi diversi per

raggiungerle, in questo caso lo stampo può risultare sbilanciato, cioè il materiale non riempie in modo omogeneo tutte le cavità in contemporanea.

- La temperatura è impostata su tutte le superfici dello stampo:

$$T = T_{em} \text{ su } \Sigma_{em}$$

$$T = T_{W^+} \text{ su } \Sigma_{W^+}$$

$$T = T_{W^-} \text{ su } \Sigma_{W^-}$$

$$T = T_{ins} \text{ su } \Sigma_{ins}$$

In alternativa alle temperature è possibile impostare i flussi di calore su ognuna di queste superfici. In generale è possibile anche considerare in combinazione condizioni di temperatura e flusso, in questo caso partendo dalla condizione sulle temperature si possono calcolare i flussi con una specifica funzione di calcolo del cooling e usare la condizione di flusso per i calcoli successivi. [5]

2.2.3 Packing

Durante la fase di packing la cavità dello stampo è completamente riempita. L'obiettivo di questo step è forzare una maggiore quantità di materiale nello stampo in modo da compensare il ritiro termico dopo l'iniezione e durante il raffreddamento. In questo caso è necessaria la formulazione del fenomeno di compressione. Le equazioni costitutive sono di base le stesse del filling. Inoltre viene utilizzata l'equazione di Tait modificata per modellizzare il comportamento del materiale plastico in termini di P, V, T durante la fine del riempimento e fase di packing.

$$V(P, T) = V(0, T) \left[1 - C \cdot \ln \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] + V_t(P, T) \quad (2.25)$$

Con

$$V_0(T) = \begin{cases} b_{m1} + b_{m2}T, T > T_t, \text{ melt state} \\ b_{1s} + b_{2s}T, T < T_t, \text{ solid state} \end{cases}$$

$$B(T) = \begin{cases} b_{m3} \exp(-b_{4m}T), T > T_t, \text{ melt state} \\ b_{3s} \exp(-b_{4s}T), T < T_t, \text{ solid state} \end{cases}$$

$$V_0(T) = \begin{cases} 0, T > T_t, \text{ melt state} \\ b_7 \exp(b_8T - b_9T), T < T_t, \text{ solid state} \end{cases}$$

$$T \equiv T - b_5$$

$$\text{temperatura di transizione: } T_t \equiv b_5 + b_6P$$

$$\text{per polimero amorfo: } b_{1m} \equiv b_{1s}$$

$$\text{per polimero cristallino: } b_{1m} > b_{1s}$$

Con $b_{m1}, b_{m2}, b_{1s}, b_{2s}, b_{m3}, b_{4m}, b_{3s}, b_{4s}, b_5, b_7, b_8, b_9$ costanti

[6]

2.2.4 Raffreddamento

Durante il processo di raffreddamento occorre analizzare il transitorio di un processo di conduzione termica ciclica che coinvolge uno scambio termico con un flusso convettivo di liquido all'interno dei canali di raffreddamento e con il flusso d'aria all'esterno dello stampo.

Il fenomeno transitorio di scambio termico è governato dall'equazione di Poisson in tre dimensioni.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.26)$$

Dove x, y, z sono le coordinate cartesiane, C_p è il calore specifico e k è la conducibilità termica.

L'equazione (2.26) vale sia per lo stampo sia per il pezzo modificando le proprietà termiche.

Poiché la temperatura dello stampo varia periodicamente, nel calcolo del calore traferito attraverso lo stampo occorre considerare in ogni istante la temperatura raggiunta. La soluzione del transitorio è più precisa ma richiede una risoluzione più lunga è complessa poiché le variabili coinvolgono lo spazio e il tempo. Il programma di simulazione per ridurre il tempo di calcolo del processo di raffreddamento è fornito anche di una seconda funzione di calcolo basata sul principio della temperatura media di ciclo (CAP). In questo caso l'equazione che modella il fenomeno è semplificata ed è solo funzione di x, y, z . La distribuzione di temperatura nello stampo è calcolata con l'equazione stazionaria di Laplace.

$$k_m \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.27)$$

Dove \bar{T} è la temperatura media del ciclo termico.

[6]

2.2.5 Deformazioni

Il pezzo, dopo che viene estratto dallo stampo, subisce un ritiro per effetto del rapido raffreddamento. Per modellizzare questo fenomeno occorre studiare il problema sforzo-deformazione in tre dimensioni. Per analizzare ritiri e deformazioni si utilizzano le seguenti equazioni.

$$\sigma = C(\varepsilon - \varepsilon^0 - \alpha \Delta T) \quad (2.28)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T) \quad (2.29)$$

Con σ tensore degli sforzi, C è la matrice di rigidità, ε il tensore delle deformazioni, u il tensore degli spostamenti e α il coefficiente di dilatazione termica. [6]

Considerando le equazioni riportate, si osserva che le deformazioni che il pezzo subisce dipendono dalle proprietà meccaniche del materiale, dalla storia termica e dal profilo di pressione che il pezzo ha subito durante lo stampaggio. Poiché le condizioni di temperatura e pressione variano all'interno dello stampo, il materiale nelle varie zone subisce un profilo di pressione e di temperatura diverso e di conseguenza è diverso il ritiro che ogni zona subisce. A causa del ritiro differenziato il pezzo

subirà una deformazione. La funzione di worpage del software ha quindi il compito di calcolare il ritiro complessivo del pezzo causato dal raffreddamento e le deformazioni causate dalle diverse condizioni di stampaggio che si sono verificate in tutti i punti dello stampo. [5]

2.3 Discretizzazione delle equazioni differenziali

In questo paragrafo vengono introdotte le principali tecniche di calcolo necessarie a risolvere le equazioni costitutive della fluidodinamica che sono state precedentemente discusse. Questi metodi di calcolo permettono di ottenere una soluzione approssimata delle equazioni costitutive del fenomeno fluidodinamico, tenendo in considerazione le condizioni al contorno relative allo specifico problema.

Il processo per ottenere la soluzione di calcolo del problema è costituito da due passaggi. Il primo consiste nella conversione delle equazioni alle derivate parziali in un sistema di equazioni algebriche discrete. Il secondo consiste nell'implementazione di un sistema di calcolo per risolvere il sistema di equazioni precedentemente ottenute.

Tutti i metodi di calcolo adeguati per risolvere le equazioni fluidodinamiche costitutive si basano sulla discretizzazione dello spazio in cui avviene il fenomeno. L'obiettivo è ottenere un sistema di equazioni che contengano le grandezze di interesse (flussi, velocità, pressioni, ecc.) in funzione di posizioni discrete. Le equazioni differenziali alle derivate parziali vengono sostituite con un sistema di equazioni algebriche che vengono risolte per valori discreti delle variabili di flusso.

Di seguito vengono introdotti tre metodi utilizzati per discretizzare le equazioni costitutive comunemente utilizzati dai software di simulazione: finite difference method, finite volume method e finite element method. [7]

2.3.1 Finite Difference Method

Il Finite Difference Method è il metodo più antico di soluzione numerica delle equazioni differenziali alle derivate parziali.

Viene costruita una griglia (mesh) del dominio in cui avviene il flusso di materia. Utilizzando gli sviluppi in serie di Taylor, per ogni nodo della mesh si calcola un'approssimazione finita delle derivate parziali presenti nelle equazioni costitutive. I termini finiti che approssimano le derivate permettono di costruire un sistema di equazioni algebriche per la soluzione del problema di flusso in ogni nodo della mesh.

In principio questo metodo può essere applicato ad ogni tipo di mesh, tuttavia è richiesto un buon grado di regolarità e uniformità della dimensione degli elementi della mesh; infatti se gli elementi sono fortemente distorti il metodo di calcolo perde di accuratezza. La spaziatura della griglia tra i punti nodali non deve essere necessariamente uniforme ma ci sono dei limiti alla distorsione da rispettare per mantenere una buona precisione. La mesh creata per la soluzione alle differenze finite deve essere conforme alle coordinate generali cartesiane, tuttavia è possibile utilizzare un

sistema di coordinate ibrido body-fitted che permette di ridurre i vincoli geometrici e modellizzare forme complesse. [7]

Per introdurre il metodo alle differenze finite viene analizzato il caso monodimensionale.

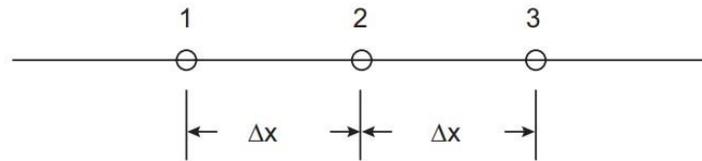


Figura 19 Mesh monodimensionale. [4]

Questo metodo utilizza gli sviluppi in serie di Taylor; a partire da un nodo su cui sono note le grandezze fluidodinamiche vengono determinate le grandezze non note sui nodi adiacenti. In figura 19 si riporta la mesh che definisce i nodi considerati.

Gli sviluppi in serie di Taylor nei nodi 1 e 3 sono:

$$\Phi_1 = \Phi_2 - \Delta x \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_2 + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left(\frac{d^2\Phi}{dx^2} \right)_2 + O((\Delta x)^3) \quad (2.30)$$

$$\Phi_3 = \Phi_2 + \Delta x \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_2 + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left(\frac{d^2\Phi}{dx^2} \right)_2 + O((\Delta x)^3) \quad (2.31)$$

Dove $O((\Delta x)^3)$ è il termine relativo all'errore derivante dall'approssimazione al terzo ordine dell'elemento della mesh Δx .

Sommando e sottraendo tra loro le equazioni si ottiene l'espressione delle equazioni differenziali del primo e del secondo ordine.

$$\left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_2 = \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{2\Delta x} + O((\Delta x)^3) \quad (2.32)$$

$$\left(\frac{d^2\Phi}{dx^2} \right)_2 = \frac{\Phi_1 + \Phi_3 - 2\Phi_2}{(\Delta x)^2} + O((\Delta x)^3) \quad (2.33)$$

I termini differenziali possono quindi essere espressi come differenze finite e i termini di ordine superiore possono essere declassati in equazioni algebriche quando si determinano le soluzioni delle equazioni differenziali.

Come esempio pratico si considera l'equazione differenziale che modella la conduzione termica in condizioni stazionarie, escludendo fenomeni di convezione. Φ in questo esempio risulta essere il flusso di calore.

$$\Gamma \frac{d^2\Phi}{dx^2} + S = 0 \quad (2.34)$$

Con Γ il coefficiente di diffusione e S la fonte di calore. Nel nodo 2 è noto:

$$S \equiv S(\Phi_2) \quad (2.35)$$

Assumendo che $O((\Delta x)^3)$ sia sufficientemente piccolo da essere trascurabile:

$$\Gamma \frac{d^2\Phi}{dx^2} \approx \Gamma \frac{\Phi_1 + \Phi_3 - 2\Phi_2}{(\Delta x)^2} \quad (2.36)$$

Si ottiene così un'equazione algebrica:

$$\frac{2\Gamma}{(\Delta x)^2} \Phi_2 = \frac{\Gamma}{(\Delta x)^2} \Phi_1 + \frac{\Gamma}{(\Delta x)^2} \Phi_3 + S \quad (2.37)$$

L'equazione differenziale di secondo ordine è quindi stata convertita in un'equazione algebrica che può essere risolta con un calcolo in forma matriciale. Per un sistema a più nodi il metodo utilizzato produce più equazioni lineari e queste equazioni possono essere risolte avendo un numero sufficiente di condizioni al contorno.

L'FDM è un metodo semplice da utilizzare ma presenta numerose limitazioni: si considera che tra i nodi le proprietà varino linearmente, i termini dell'equazioni differenziali ad ordine maggiore o uguale a 3 vengono trascurati e ciò porta a non verificare le equazioni di conservazione; inoltre il metodo si presta solo a mesh con elementi ortogonali e non è applicabile a elementi non ortogonali o a non-structural grids. [4]

2.3.2 Finite Volume Method

Il metodo ai volumi finiti permette di discretizzare le equazioni differenziali di continuità direttamente nello spazio fisico. Il dominio su cui viene risolto il calcolo è suddiviso in un numero finito di volumi di controllo contigui, per ogni volume di controllo è definita l'espressione relativa allo stato in accordo con le equazioni di continuità.

Le variabili incognite vengono calcolate nel nodo al centro del volume di controllo. Conoscendo le grandezze calcolate nel nodo per interpolazione si ricavano le variabili incognite sulle superfici del volume di controllo. Inoltre si utilizzano le formule di quadratura numerica (di Gauss) per approssimare gli integrali di superficie e di volume. In questo modo è possibile ottenere delle equazioni algebriche per ogni volume di controllo che dipendono dalle grandezze calcolate nei nodi adiacenti.

Poiché il metodo ai volumi finiti discretizza lo spazio utilizzando i volumi di controllo e non i punti di intersezione di una griglia come il FDM, è in grado di adattarsi a qualunque tipo di mesh. Possono quindi essere applicate mesh di tipo structural o unstructural e ciò permette un grande numero di possibilità di definire forma e posizione degli elementi della mesh.

Un importante vantaggio di questo metodo è che si può utilizzare una mesh simile al tipo usato per l'analisi agli elementi finiti. La mesh può essere formata da una combinazione di elementi triangolari e quadrangolari in 2D oppure da elementi tetraedrici e esaedrici in 3D. Un'altra importante caratteristica è che il metodo non richiede la trasformazione delle equazioni in base ad un sistema di riferimento locale sul pezzo (body-fitted) come invece richiedeva il FDM.

Come primo passo del metodo occorre discretizzare lo spazio fisico su cui si studia il flusso. Nel caso del FVM è possibile scegliere elementi della mesh di tipo structural o unstructural, per illustrare il metodo è stata scelta una mesh 2D riportati in figura 20 con elementi quadrangolari (structural) e triangolari (unstructural); utilizzando questa mesh vengono discretizzate le equazioni differenziali.

La base del metodo ai volumi finiti è l'integrazione sul volume di controllo. La superficie di contorno dell'elemento è direttamente legata alla discretizzazione delle derivate di primo e secondo ordine di Φ , la generica variabile flusso.

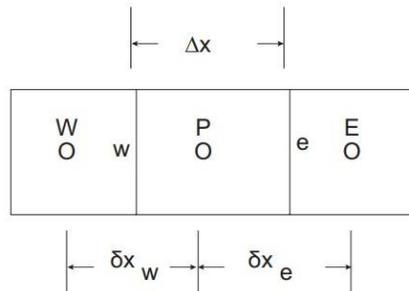


Figura 20 Volume di controllo in un sistema 1D. [4]

Le superfici dell'elemento sono identificate dal vettore normale \vec{n} e vengono riportate nel sistema di riferimento cartesiano ottenendo le aree proiettate A_i^x e A_i^y nelle direzioni x e y rispettivamente. Le aree sono positive se il vettore normale che le identifica è orientato in modo concorde con il verso degli assi cartesiani, altrimenti sono negative. [7]

Per introdurre il metodo ai volumi finiti viene proposto l'analisi del caso monodimensionale. In figura è riportata la mesh considerata nella trattazione successiva; P è l'elemento della mesh considerato, W e E sono gli elementi limitrofi, "w" è l'interfaccia tra P e W, invece "e" è l'interfaccia tra P e E.

Considerando l'equazione relativa alla conduzione termica 1D e che tutte le celle sono un volume di controllo:

$$\frac{d\Phi}{dx} \left(\Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) + S = 0 \quad (2.38)$$

Integrando l'equazione sul volume P:

$$\int_w^e \frac{d\Phi}{dx} \left(\Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) dx + \int_w^e S dx = 0 \quad (2.39)$$

E integrando all'interno dei limiti "w" e "e" si ottiene:

$$\left(\Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right)_e - \left(\Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad (2.40)$$

In questo modo l'equazione differenziale di secondo ordine originaria è stata ridotta al primo ordine. Avendo ridotto di grado l'equazione è possibile manipolarla con il metodo di calcolo mantenendo un migliore controllo dell'errore. L'equazione ottenuta tiene in considerazione la variazione del flusso all'interno dell'elemento e considera la conservazione del flusso tra le celle contigue.

Assumendo che Φ vari linearmente tra i punti al centro dei volumi. L'equazione precedente può essere riscritta:

$$\frac{\Gamma(\Phi_E - \Phi_P)}{\delta x_e} - \frac{\Gamma(\Phi_P - \Phi_W)}{\delta x_w} + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (2.41)$$

Con \bar{S} è la fonte di calore media della cella.

Riscrivendo l'equazione si ottiene in forma algebrica:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + b \quad (2.42)$$

$$\text{Con } a_E = \frac{\Gamma_e}{\delta x_e}, a_W = \frac{\Gamma_w}{\delta x_w}, a_P = a_E + a_W, b = \bar{S} \Delta x$$

Per una mesh con N nodi si ottiene un sistema di N equazioni risolubile inserendo le condizioni al contorno. [4]

2.3.3 Finite Element Method

L'analisi agli elementi finite è un altro metodo numerico di calcolo che permette di risolvere le equazioni differenziali approssimate ad una forma integrale equivalente. Si utilizza il metodo dei residui ponderali per risolvere l'equazione in forma integrale equivalente e il metodo di Galerkin per approssimare l'equazione differenziale.

In generale il problema posto richiede di calcolare una funzione incognita che debba soddisfare un set di equazioni differenziali e condizioni al contorno.

$$A(u) = \begin{Bmatrix} A_1(u) \\ A_2(u) \\ \vdots \end{Bmatrix} = 0 \text{ in } \Omega$$

$$B(u) = \begin{Bmatrix} B_1(u) \\ B_2(u) \\ \vdots \end{Bmatrix} = 0 \text{ in } \Gamma$$

Con u la funzione incognita, A è il set di equazioni da soddisfare nel volume Ω e B sono le condizioni al contorno da soddisfare su Γ , il bordo di Ω .

Considerando un volume Ω che permetta di soddisfare i set di equazioni A e le condizioni al contorno B , si può ottenere la seguente equazione integrale equivalente:

$$\int_{\Omega} V^T A(u) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{V}^T B(u) d\Gamma = 0 \quad (2.43)$$

$$\text{Con } V = \begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \end{Bmatrix}, \bar{V} = \begin{Bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

Si utilizza la funzione di forma per esprimere in maniera approssimata la funzione u :

$$u \approx \tilde{u} = \sum_{j=1}^n N_j a_j = Na \quad (2.44)$$

Inoltre si definisce:

$$V = \sum_{j=1}^n W_j \delta a_j = W \delta a, \bar{V} = \sum_{j=1}^n \bar{W}_j \delta a_j = \bar{W} \delta a \quad (2.45)$$

Introducendo queste grandezze nell'equazione in forma integrale si ottiene:

$$\delta a_j^T \int_{\Omega} W^T A(Na) d\Omega + \delta a_j^T \int_{\Gamma} \bar{W}^T B(Na) d\Gamma = 0 \quad (2.46)$$

Poiché δa_j è un parametro arbitrario, la funzione nella forma integrale può essere ridotta ad un'equazione lineare per determinare a :

$$\int_{\Omega} W^T A(Na) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{W}^T B(Na) d\Gamma = 0 \quad (2.47)$$

Questo processo è chiamato metodo dei residui ponderali. La funzione di ponderazione W è determinata con il metodo di Galerkin.

Confrontando l'analisi FEM e FVM, si osserva che l'accuratezza della soluzione del metodo FEM dipende dalla funzione di forma che definisce la discretizzazione, inoltre ci sono numerosi processi di manipolazione matematica per sviluppare il modello. Il metodo così definito è in generale adatto a risolvere problemi della meccanica strutturale piuttosto che problemi di fluidodinamica; questo perché in fluidodinamica non occorre gestire grandezze fisiche con un significato simile alle grandezze discusse. Infatti il modello è adesso a risolvere un problema di strutture per esempio con il metodo di minima energia potenziale, nei problemi di fluidodinamica invece occorre considerare la conservazione del flusso tra gli elementi della mesh. Per questo motivo il metodo più adatto a risolvere le equazioni differenziali della fluidodinamica precedentemente introdotte è il metodo ai volumi finiti. [4]

CAPITOLO 3 MATERIALE E STRUMENTI

Lo scopo della tesi è stato quello di confrontare il risultato delle simulazioni, eseguite con il programma moldex3D, e i risultati di prove di stampaggio eseguite nelle stesse condizioni e con gli stessi parametri. In questo capitolo vengono presentati il materiale, lo stampo e la pressa utilizzate per eseguire le simulazioni FEM e per le prove di stampaggio.

3.1 Materiale

Il polimero utilizzato per le prove riportate in questa tesi è l'Acido Polilattico (PLA).

Il PLA è un biopolimero derivato da fonti rinnovabili e biodegradabile. Questo materiale è stato sviluppato per ridurre l'impronta di carbonio e il consumo di combustibili fossili che è tipicamente associato alla produzione dei materiali polimerici tradizionali. Inoltre le proprietà fisiche e chimiche del PLA rendono questo materiale un'alternativa al PET e PP, infatti è possibile utilizzare il PLA per alcune tipiche applicazioni dei polimeri derivati dal petrolio.

L'acido polilattico è prodotto tipicamente a partire dall'amido di mais oppure dalla canna da zucchero.

Nel caso più comune, partendo dall'amido di mais, il processo consiste in tre passaggi principali. Durante il primo passaggio l'amido viene convertito in zucchero attraverso una reazione di idrolisi attivata da enzimi. Il secondo passaggio consiste in una reazione di fermentazione della zucchero attivata da attività microbica che permette di produrre l'acido lattico. Per eseguire questa reazione si può utilizzare un comune batterio: il lactobacillus. L'acido lattico all'interno del reattore tende a formare il suo dimero ciclico, cioè il lattato, come mostrato in figura 21; il lattato prodotto viene separato dall'acqua e dagli altri reagenti per distillazione.

L'ultimo passaggio per produrre il PLA è la polimerizzazione del lattato per apertura di anello catalizzata in un ambiente privo di solvente, secondo la reazione in figura 22.

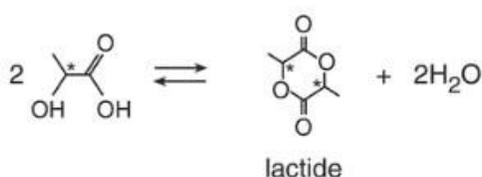


Figura 21 Reazione di disidratazione acido lattico in lattato. [11]

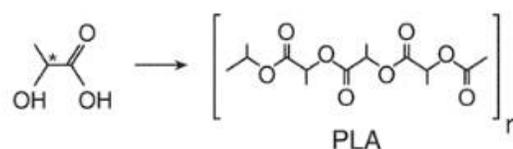


Figura 22 Reazione di polimerizzazione dell'acido lattico. [11]

La struttura del PLA presenta due stereoisomeri, il tipo di stereoisomero ottenuto dipende del tipo di enzima utilizzato per la produzione. Le proprietà del PLA dipendono dal tipo e dal rapporto tra i due stereoisomeri che compongono la catena polimerica.

Con una miscela racemica di isomeri D e L si ottiene un materiale amorfo con scarse proprietà meccaniche, invece L-PLA, che contiene solo una bassa quantità di isomeri D è un materiale

semicristallino con buone proprietà meccaniche e termiche. Infatti il PLLA ha proprietà simili al PS, PET e alle poliolefine e di conseguenza è un loro possibile sostituto; è un materiale semicristallino con buona resistenza meccanica e buona tenacità a temperatura ambiente. Pur essendo un materiale semicristallino, la sua velocità di cristallizzazione è piuttosto bassa, quindi i pezzi prodotti per stampaggio a iniezione sono tipicamente amorfi e questo fenomeno limita le proprietà meccaniche e rende il materiale fragile.

La composizione del materiale ha inoltre un impatto sul processo produttivo, il rapporto tra gli stereoisomeri ha effetto sulla fluidità del materiale allo stato liquido; quindi deve essere considerato nella scelta dei parametri del processo di iniezione.

Il materiale considerato per questa tesi è il Luminy PLA L130 dell'azienda TotalEnergies Corbion, le proprietà meccaniche termiche e fluidodinamiche sono riportate in tabella 1.

Tabella 1 Proprietà del materiale Luminy PLA L130 dell'azienda TotalEnergies Corbion. [13]

Proprietà fisiche	Densità	g/cm ³	1,24
	Proprietà ottiche	Isomeri %	>99% L
Proprietà di processo	MFI (flow, 210°C/2,16 kg)	g/10min	23
	MFI (flow, 190°C/2,16 kg)	g/10min	10
	Temperatura di fusione	°C	175
	Temperatura di transizione vetrosa	°C	60
Proprietà Meccaniche	Modulo elastico	MPa	3500
	Carico di rottura	MPa	50
	Deformazione a rottura	%	<5%
	Resistenza impatto (Charpy)	kJ/m ²	<5
Proprietà termiche	HDT B (amorfo)	°C	60
	HDT B (cristallino)	°C	105

Le proprietà reologiche note del materiale Luminy PLA L130 non sono sufficienti per eseguire il calcolo della simulazione. Infatti non sono disponibili le curve radiologiche, la temperatura di freezing e la temperatura di estrazione del materiale.

Il programma Moldex3D dispone di un database di molti materiali, tra cui per la famiglia dei PLA è presente solo il PLA Ingeo 3251D prodotto dalla azienda NatureWorls LLC. Per sviluppare la simulazione si utilizzano i dati del PLA Ingeo e si modificano alcuni parametri inserendo i valori noti propri del Luminy PLA L130.

Il programma richiede le curve di viscosità e PVT, inoltre occorre definire il calore specifico e la conducibilità termica in funzione della temperatura. Il calore specifico e la conducibilità termica sono definiti in forma tabulata e sono elencati in tabella 2 e 3. Le curve relative alla viscosità e al volume specifico non possono essere definite attraverso dati tabulati, occorre invece costruire il modello che approssima tali funzioni.

La viscosità è definita utilizzando il modello di Cross modificato, che è costituito dalle equazioni 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. In tabella 4 si riportano le costanti applicate al modello di Cross modificato del caso del PLA Ingeo 3251D.

Per definire la curva PVT del polimero PLA Ingeo 3251D si utilizza il modello di Tail modificato che è già stato discusso nel capitolo 2 ed è descritto dalle equazioni da 3.5 a 3.11. In tabella 5 si riportano le costanti applicate a questo modello.

Tabella 2 Calore specifico del PLA Ingeo 3251D.

T [C°]	Cp [erg/g·°C]
17	1.25e+07
40	1.42e+07
48	1.52e+07
52	1.61e+07
53	1.64e+07
56	1.76e+07
58	1.85e+07
62	1.99e+07
72	2.07e+07
100	2.14e+07
149	2.17e+07
217	2.17e+07

Tabella 3 Conducibilità termica del PLA Ingeo 3251D.

T [°C]	K [erg/(s·cm·°C)]
47	17895.5
68	18899.3
89	18207
110	17705.1
129	17999.3
149	17601.2
168	17300.1
188	17101.1
207	16600.9
226	17000.7

Modello di Cross Modificato:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau}\right)^{1-n}} \quad (3.1)$$

$$\eta_0 = D_1 \exp\left(\frac{-A_1(T-T_C)}{A_2+(T-T_C)}\right) \quad (3.2)$$

$$T_C = D_2 + D_3 P \quad (3.3)$$

$$T_C = \tilde{A}_2 + D_3 P \quad (3.4)$$

Tabella 4 Costanti relative al modello di Cross Modificato per il materiale PLA Ingeo 3251D.

n	0,3846	
τ	1,29e+06	dyne/cm ²
D_1	2,045e+08	g/(cm·sec)
D_2	373.15	K
D_3	0	cm ² ·K/dyne
A_1	16,71	
A_2	51,6	K

Modello di Tail Modificato:

$$\hat{V} = \hat{V}_0 \left[1 - C \cdot \ln \left(1 + \frac{P}{B} \right) \right] + \hat{V}_t \quad (3.5)$$

$$\hat{V}_0 = \begin{cases} b_{1s} + b_{2s}\bar{T}, T \leq T_t \\ b_{1L} + b_{2L}\bar{T}, T > T_t \end{cases} \quad (3.6)$$

$$B(T) = \begin{cases} b_{3s} \exp(-b_{4s}\bar{T}), T \leq T_t \\ b_{3L} \exp(-b_{4L}\bar{T}), T > T_t \end{cases} \quad (3.7)$$

$$V_0(T) = \begin{cases} 0, T > T_t \\ b_7 \exp(b_8\bar{T} - b_9P), T > T_t \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\bar{T} = T - b_5 \quad (3.9)$$

$$t = b_5 + b_6P \quad (3.10)$$

$$C = 0,0894 \quad (3.11)$$

Tabella 5 Costanti relative al modello di Tail Modificato per il materiale PLA Ingeo 3251D.

b1L	0,888	cc/g
b2L	0,000814	cc/(g·K)
b3L	1,36e+09	dyne/cm ²
b4L	0,00599	1/K
b1s	0,861	cc/g
b2s	0,000306	cc/(g·K)
b3s	1,96e+09	dyne/cm ²
b4s	0,00586	1/K
b5	383,15	K
b6	7,5e-09	cm ² ·K/dyne
b7	0,0158	cc/g
b8	0,05	1/K
b9	3,75e-10	cm ² /dyne

3.2 Apparato sperimentale

3.2.1 Pressa

Per eseguire le prove di stampaggio si utilizza la pressa Wittmann Battenfeld SmartPower 50/60 130. In figura 23 è presente un'immagine della pressa, in tabella 6 e tabella 7 sono riportate le caratteristiche tecniche della pressa e del gruppo di iniezione. Occorre considerare questi parametri per impostare il processo di stampaggio, inoltre il programma Moldex3D considera le caratteristiche della macchina nella simulazione del processo.



Figura 23 Pressa per stampaggio a iniezione. [14]

Tabella 6 Caratteristiche del gruppo di chiusura della pressa Wittman Battenfeld SmartPower 50/60. [15]

Gruppo di chiusura		SmartPower 50
Forza di chiusura	kN	500
Distanza tra le colonne	mm x mm	370 x 320
Altezza minima dello stampo	mm	200
Corsa / Forza di apertura	mm/kN	400/34
Distanza massima tra i piani	mm	600
Corsa / Forza estrattore	mm/kN	150/26,4
Tempo ciclo a secco	s – mm	1,75 – 224
Peso massimo stampo	Kg	700
Dimensioni minime stampo	mm x mm	226 x 226

Tabella 7 Caratteristiche del gruppo di iniezione 130 della pressa Wittman Battenfeld SmartPower 50. [15]

Gruppo di iniezione 130				
Diametro vite	mm	18	22	25 30
Corsa vite	mm	110	110	125 125
Rapporto l/d della vite		20	20	22 22
Volume teorico di iniezione	cm ²	28	41,8	61,4 88,4
Pressione specifica di iniezione	bar	3000	2864	2218 1540
Massimo numero di giri della vite	min ⁻¹	398		
Massima capacità di plastificazione (PS)	g/s	4	5,8	10,5 15,4
Coppia massima rotazione vite	Nm	120	238	340 357
Corsa ugello / forza contatto	mm/kN	250/47		
Portata di iniezione libera	cm ³ /s	40,9	61,1	78,9 114
Portata d'iniezione con pompa addizionale	cm ³ /s	65	98	126 182
Portata d'iniezione con accumulatore idraulico	cm ³ /s	78	116	150 216
Riscaldamento cilindro	kW	5,5	6,3	9 10,4
Numero zone di riscaldamento		4		

3.2.2 Telecamera termica

Uno degli obiettivi di questa tesi è analizzare il processo di estrazione del pezzo. Per questa analisi è utile eseguire una termografia per misurare la temperatura del pezzo nel momento in cui lo stampo si apre e la temperatura della superficie dello stampo al momento dell'estrazione. Si è utilizzata la telecamera a infrarossi Optris PI 640i, le specifiche tecniche di questo strumento sono riportate in tabella 8.

Per eseguire l'analisi descritta occorre che la telecamera inquadrì la superficie della parte mobile dello stampo, in particolare una delle superfici laterali e la superficie superiore del punzone. In figura 24 si può osservare la configurazione in cui è montato lo strumento.

Tabella 8 Specifiche tecniche Optris PI 640i. [21]

Risoluzione ottica	640 x 480 pixels
Detector	FPA, uncooled (17 x 17 µm)
Range spettrale	8-14 µm
Range di temperatura	0-250 °C
Frame rate	32 Hz / 125Hz a 640 x 120 pixel
Thermal sensitivity (NETD)	40 mk
Accuratezza	±2 °C o ±2 % (quello più elevato)



Figura 24 Configurazione in cui è montata la telecamera termica sulla pressa.

3.2.3 Geometria del pezzo stampato e dello stampo

In figura 25 è riportato il disegno quotato del pezzo stampato.

In figura 26 è riportato il disegno dello stampo, sono state quotate le dimensioni necessarie a creare il modello CAD dei canali di alimentazione e raffreddamento.

Lo stampo è prodotto con l'acciaio 1.2083. Si tratta di un acciaio inossidabile martensitico caratterizzato da buona temprabilità, buona lucidabilità e buona resistenza alla corrosione e all'ossidazione a caldo. E' un materiale comunemente utilizzato nella produzione di stampi per Injection Molding. La composizione è la seguente: 0,4% C, 0,8% Si, 0,5% Mn, 14,5%Cr, 0,3% V.

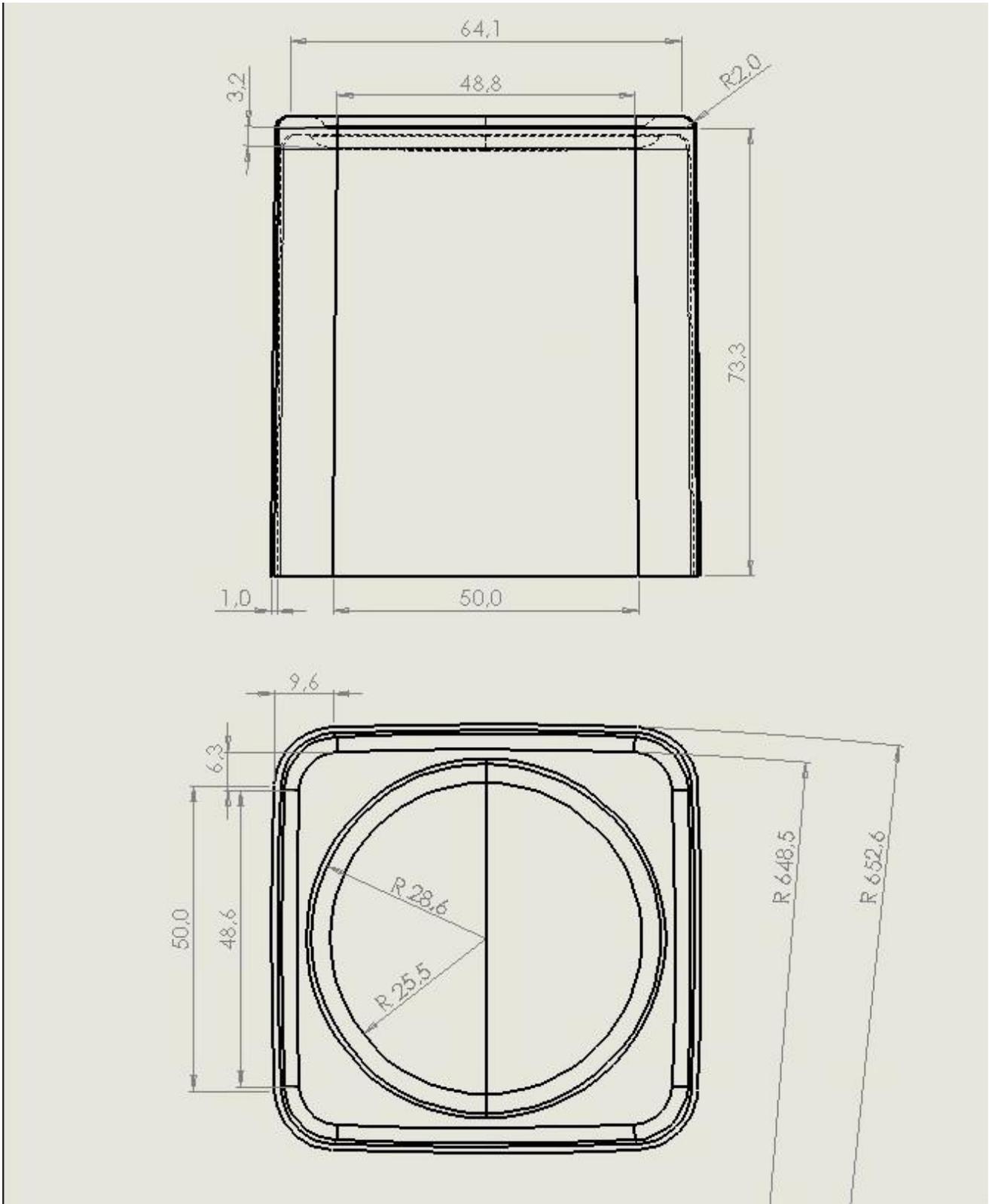


Figura 25 Proiezione ortogonale dell'oggetto prodotto. Misure in [mm]. Immagine dimostrativa non in scala.

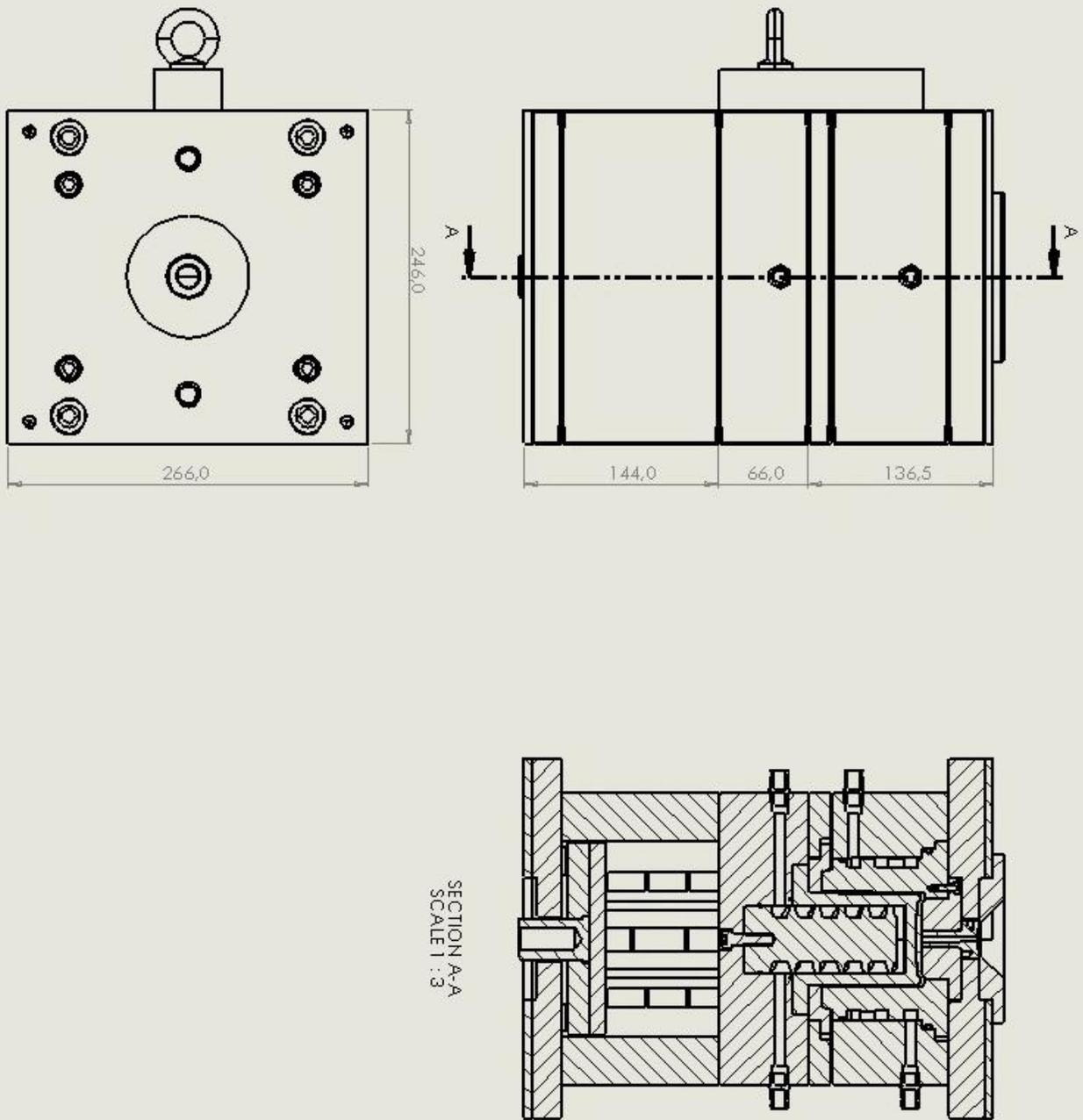


Figura 26 Proiezione ortogonale dello stampo. Misure in [mm]. Immagine dimostrativa non in scala.

CAPITOLO 4 STRATEGIA DI SIMULAZIONE CON MOLDEX3D

Per sviluppare le simulazioni necessarie ad analizzare gli argomenti di questa tesi si è utilizzato il programma Moldex3D.

L'obiettivo della tesi è quello di confrontare i risultati della simulazione relativa al processo di produzione dell'oggetto con i dati sperimentali raccolti dalla macchina.

Inizialmente si sono eseguite delle prove di stampaggio che vengono prese come riferimento; partendo da questi parametri di processo si utilizza il software Moldex3D per ottimizzare il processo produttivo con l'obiettivo di migliorare la facilità di estrazione del pezzo, il tempo ciclo e il ritiro percentuale. Dopo aver ottimizzato i parametri di processo con l'ausilio del software si eseguono prove di stampaggio applicando questi parametri. Infine si confrontano i risultati previsti dal modello con le misure eseguite durante lo stampaggio e sul pezzo finito. I risultati analizzati sono: facilità di estrazione, tempo ciclo, ritiro percentuale e profilo del flusso di riempimento.

In questo capitolo vengono descritte le caratteristiche tecniche del programma, le valutazioni e le scelte fatte per costruire le simulazioni. Per la descrizione delle funzioni del programma e del metodo con cui sono state impostate le simulazioni si rimanda alla trattazione in Appendice.

4.1 Generazione della mesh

Il pezzo, in figura 25 presenta alcune caratteristiche particolari: innanzitutto le pareti del pezzo sono piuttosto sottili in rapporto al suo volume e allo spessore della base, inoltre come si può osservare dalla vista dall'alto le pareti esterne del pezzo non sono piane ma presentano un raggio di curvatura. Queste caratteristiche impongono alcune scelte nella costruzione della mesh.

Per creare la mesh è necessario partire da due considerazioni. Innanzitutto è richiesta una mesh superficiale in grado di ottenere un'adeguata risoluzione per quanto riguarda l'osservazione dei flussi e inoltre deve poter seguire la superficie mantenendo una regolarità degli elementi. In secondo luogo è necessario costruire una mesh di volume che sia in grado di analizzare con un adeguato dettaglio i fenomeni fluidodinamici e termici in funzione dello spessore. Infatti la mesh dovrà possedere degli elementi regolari nelle zone limitrofe alle superfici in modo da avere un'adeguata risoluzione.

Oltre alle necessità imposte dalla geometria occorre considerare il costo computazionale che la mesh determina. Per eseguire la simulazione si utilizza un'analisi completa di tutti i fenomeni termici e fluidodinamici; questa analisi è già di per sé molto onerosa in termini di costo computazionale, occorre quindi scegliere una mesh con una risoluzione sufficiente ma che richieda un costo computazionale accettabile.

4.1.1 Generazione della mesh di superficie

Per generare la mesh di superficie si utilizza la funzione di seeding che permette di impostare la dimensione della mesh. Per il pezzo in analisi risulta appropriato impostare un mesh size di 0.9; utilizzando questo valore si ottiene la mesh riportata in figura 27. Come si può osservare la mesh è più fitta nelle zone in cui sono presenti dettagli e curvature. Questa mesh possiede 2.495.139 elementi, per seguire l'analisi completa occorrono circa 2,5 ore.

Il tempo necessario all'analisi utilizzando la mesh descritta è già piuttosto oneroso, quindi non è possibile utilizzare una mesh più fitta. Questo grado di dettaglio è adeguato per valutare il tempo ciclo, il ritiro volumetrico e la storia termica dello stampo, tuttavia non è sufficiente per osservare il flusso di materiale durante il riempimento. Infatti, prima di procedere, è stata eseguita un'analisi di prova il cui risultato del filling è riportato in figura 29.

Analizzando il profilo di riempimento dello stampo si osserva che il fronte del materiale non viene rappresentato con una linea continua ma si osserva una discontinuità. Questo profilo presenta un errore poiché non si osservano fenomeni fluidodinamici che possano spiegare il risultato, quindi si ricerca la causa nella mesh che è stata costruita.

La mesh presenta una linea di giunzione in corrispondenza della quale gli elementi cambiano orientazione, nei punti appartenenti a questa linea il profilo di avanzamento del materiale presenta la discontinuità.

La mesh di superficie viene generata con la funzione seeding; questa funzione permette di definire i nodi sugli spigoli del pezzo, partendo da questi punti e in funzione del mesh size il programma costruisce la mesh. Quindi a partire da ogni spigolo del pezzo si viene a definire una zona della mesh con elementi orientati in funzione dell'orientazione e della geometria dello spigolo. Nel caso specifico del pezzo analizzato questo meccanismo impedisce di creare una mesh con elementi orientati tutti nella stessa direzione, questo accade poiché tutte le superfici esterne sono concave. Poiché l'errore nel calcolo del profilo di riempimento deriva da questo difetto della mesh occorre ridurre la dimensione degli elementi nella zona interessata da questo difetto, l'obiettivo è ottenere una mesh molto fine in modo che la posizione dei nodi risenta meno della diversa orientazione degli elementi.

Per modificare la mesh è possibile impostare un mesh size di 0.6 sulle superfici interne ed esterne delle pareti laterali del pezzo. In questo caso si ottiene una mesh con 3.675.803 elementi.

Utilizzando questa mesh il tempo richiesto per il calcolo dell'analisi completa sale a 4,3 ore, quindi non è possibile eseguire tutte le analisi necessarie con questa mesh. Per valutare il tempo ciclo, il ritiro volumetrico e la storia termica dello stampo si utilizza la mesh 1, riportata in figura 27; per valutare il profilo di avanzamento del materiale durante il riempimento si utilizza mesh 2, riportata in figura 28.



Figura 28 Mesh 1.



Figura 27 Mesh 2.

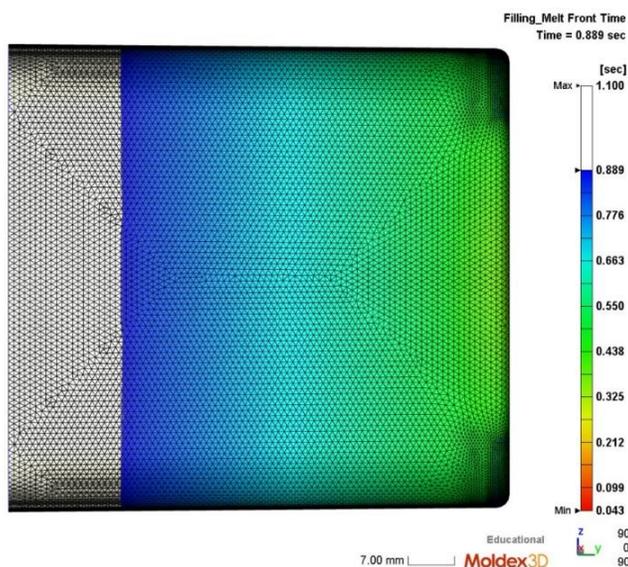


Figura 29 Profilo di flusso calcolato per testare la mesh 1.

4.1.2 Generazione della mesh di volume

Partendo dalla mesh di superficie si costruisce la mesh di volume utilizzando la funzione BLM (boundary layer meshing). Questa funzione permette di creare una mesh densa e di dimensione controllata lungo la sezione del pezzo e in particolare nello strato più vicino alla superficie. Utilizzando questa funzione il programma genera elementi tetraedrici oppure esaedrici i cui nodi siano sempre disposti lungo piani paralleli alle superfici. Controllando il numero di piani creati e la distanza tra essi si costruiscono gli elementi adeguati alla risoluzione richiesta dalla simulazione.

Poiché la sezione del pezzo analizzato è variabile non è conveniente impostare manualmente lo spessore del boundary layer, quindi si utilizza il comando che permette di rilevare automaticamente lo spessore del boundary layer adeguato. La rimanente parte del volume viene riempita con elementi tetraedrici la cui dimensione dipende dal mesh size inizialmente impostato.

Si ottiene la mesh in figura 30; i nodi di questa mesh sono distribuiti omogeneamente e la loro disposizione è adeguata per analizzare ed osservare il gradiente di temperatura e flusso che si sviluppa nella zona vicina alla superficie. Lo spessore del BLM varia in funzione dello spessore del pezzo, in questo modo è possibile analizzare lo sviluppo del gradiente con una buona risoluzione e ottimizzando il costo computazionale.

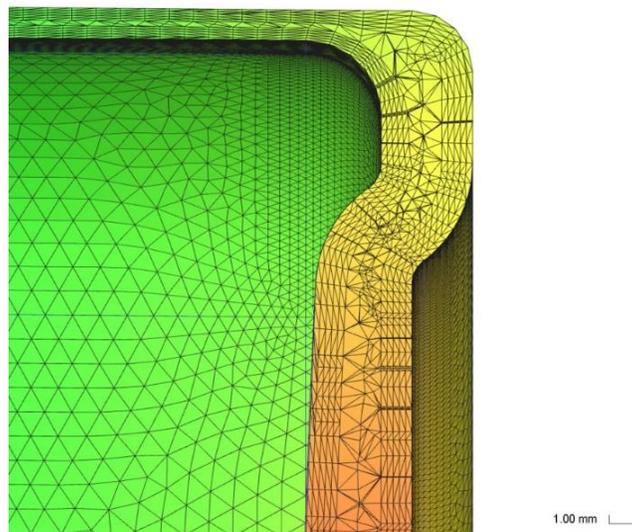


Figura 30 BLM di mesh 1.

4.2 Definizione dei parametri di processo

Le analisi sviluppate con il programma Moldex 3D hanno l'obiettivo di studiare il tempo ciclo, il ritiro volumetrico e l'estrazione del pezzo. Partendo da una prima analisi presa come riferimento si procede modificando le condizioni di lavoro in modo da ottimizzare i parametri di processo e le proprietà del pezzo.

Per studiare il ritiro volumetrico e l'estrazione del pezzo dallo stampo si utilizzano i risultati dell'analisi riportati nella sezione warpage. Poiché l'oggetto studiato non si sviluppa in una direzione preferenziale, i risultati più interessanti sono il "total displacement" e il "volumetric shrinkage". Questi due risultati permettono di osservare come il pezzo tenda a deformare durante il raffreddamento e di conseguenza si possono identificare i problemi che il ritiro può causare durante l'estrazione.

Per modificare la deformazione e il ritiro del pezzo, con l'obiettivo di facilitare l'estrazione, ci si concentra principalmente sul parametro Pressione di Packing. Infatti il valore di questo parametro e la sua variazione nel tempo sono le principali cause della deformazione del pezzo. L'analisi del tempo ciclo è un aspetto fondamentale della simulazione poiché permette di ottimizzare i tempi necessari alla produzione del pezzo, tuttavia le valutazioni relative all'analisi del tempo ciclo sono le più complesse da eseguire. Occorre considerare che il tempo ciclo e i tempi

necessari al filling, packing e cooling sono condizioni al contorno che è necessario applicare per eseguire la simulazione. Per avviare la simulazione occorre impostare i seguenti parametri: stroke time, packing time, cooling time, percentuale di VP switch e mold-open time. La percentuale di VP switch è la percentuale di riempimento in volume dello stampo, dall'inizio dell'iniezione fino a questo valore di riempimento il processo viene regolato attraverso la velocità di iniezione impostata, successivamente il flusso di materiale viene regolato dalla pressione. Lo stroke time è il tempo che trascorre tra inizio del processo e punto di VP switch, questo parametro viene automaticamente impostato poiché dipende dalla velocità di iniezione, dal volume del pezzo e dal punto di VP switch. Il tempo di packing definisce la durata del processo di packing che comincia nell'istante di VP switch. Il tempo di packing, di raffreddamento e di apertura dello stampo devono essere impostati manualmente.

Il tempo ciclo quindi non è direttamente il risultato dell'analisi, per ottimizzare i tempi necessari ad ogni step dello stampaggio occorre quindi valutare l'istante di tempo in cui avvengono alcuni fenomeni caratteristici del processo.

Per ottimizzare il tempo ciclo occorre calcolare il tempo di freezing del gate, durante il packing, e il tempo in cui 80% del materiale ha raggiunto la temperatura di estrazione, durante il cooling. Il tempo di freezing del gate identifica l'istante in cui nelle condizioni di pressione e temperatura applicate il polimero nella zona del gate è solidificato, in questa condizione il polimero non è più in grado di entrare all'interno della cavità dello stampo quindi si può interrompere il processo di packing. L'istante di tempo in cui 80% del materiale ha raggiunto la temperatura di estrazione identifica la condizione in cui il pezzo ha acquisito le proprietà meccaniche sufficienti all'estrazione, in questo istante è possibile interrompere il cooling del pezzo.

Il programma riporta i risultati relativi ai profili di pressione e temperatura calcolati alla fine del filling, packing e cooling nei punti identificati dalle condizioni al contorno. Quindi dopo aver ricavato i parametri ottimizzati per il processo occorre eseguire nuovamente un'analisi applicando questi parametri per osservare con maggiore precisione gli effetti che determinano su proprietà del prodotto e del processo.

Le analisi utilizzate per sviluppare questa tesi sono state prodotte utilizzando la procedura di Moldex3D per impostare il processo: Machine mode 1 (by profile).

Questa procedura permette di scegliere la macchina che viene effettivamente utilizzata per lo stampaggio. Il programma tiene in considerazione le capacità della pressa e dell'elemento di plasticizzazione che compongono la macchina.

Il modello considera la forza che la pressa è in grado di applicare poiché questa deve essere sufficiente per mantenere lo stampo chiuso resistendo alle forze generate dalla pressione interna. Inoltre si utilizzano i parametri della vite di plasticizzazione poiché il processo di iniezione del polimero dipende dalla dimensione e geometria della vite, dalla pressione di iniezione e dalla massima quantità di materiale che l'elemento è in grado di iniettare.

La procedura "Machine mode 1" inoltre permette di definire le condizioni al contorno della simulazione.

Per quanto riguarda il setting del processo di filling e packing il metodo non permette di impostare il tempo di iniezione, poiché questo è definito dal profilo di flow rate di filling e dal tempo di packing. Il processo di filling è definito dal profilo di flow rate che imposta la velocità con cui il polimero viene

iniettato nella cavità dello stampo e dal profilo di pressione di iniezione, il profilo di pressione non agisce direttamente sul riempimento poiché il principale parametro di controllo del filling è il flow rate; il profilo di pressione definisce quindi la pressione massima che l'elemento di iniezione può applicare durante il riempimento, la pressione effettiva raggiunta dipende dal flow rate applicato. Il processo di packing è definito attraverso il profilo di pressione e il tempo.

I profili di flusso e di pressione possono essere espressi in percentuale rispetto al massimo che la macchina può applicare oppure definendo direttamente il valore di velocità o pressione. Poiché lo scopo della tesi è confrontare i risultati delle simulazioni con le prove sperimentali, le condizioni al contorno sono state inserite con grandezze dimensionate: velocità di iniezione in mm/sec, pressioni in MPa e posizione della vite in mm.

Le altre condizioni al contorno applicate sono le temperature del fuso, del liquido di condizionamento e di estrazione. Per ultimo occorre impostare i tempi necessari a tutti gli step del processo: filling, packing, cooling e apertura dello stampo.

4.3 Analisi dello stampaggio a iniezione

In questo paragrafo viene discussa la prima simulazione che è stata svolta. Questa simulazione definisce il caso di riferimento; partendo dai parametri di processo impostati e dai risultati ottenuti si sviluppano, nei capitoli successivi, i metodi necessari per ottimizzare il processo e le proprietà del prodotto, infine i risultati della simulazione vengono confrontati con le misurazioni eseguite sulla macchina.

In figura 31 sono riportate le condizioni al contorno applicate ad analisi 1.

[Filling]	
Stroke time (sec)	0.931002
Melt Temperature (oC)	210
Mold Temperature (oC)	30
Maximum injection pressure (MPa)	221.8
Injection volume (cm^3)	34.2753
[Packing]	
Packing time (sec)	8
Maximum packing pressure (MPa)	221.8
[Cooling]	
Cooling Time (sec)	11.9
Mold-Open Time (sec)	5
Eject Temperature (oC)	80
Air Temperature (oC)	25
[Miscellaneous]	
Cycle time (sec)	25.831
Mesh file	pezzo_iafer_studio.mfe
Material file	PLA_Ingeo3251D.mtr
Machine	Wittmann Battenfeld - SmartPower 60 1...

Figura 31 Condizioni al contorno analisi 1 di riferimento.

In figura 32 è riportato il profilo della velocità di riempimento di analisi 1, in figura 33 è riportato il profilo di pressione di packing di analisi 1.

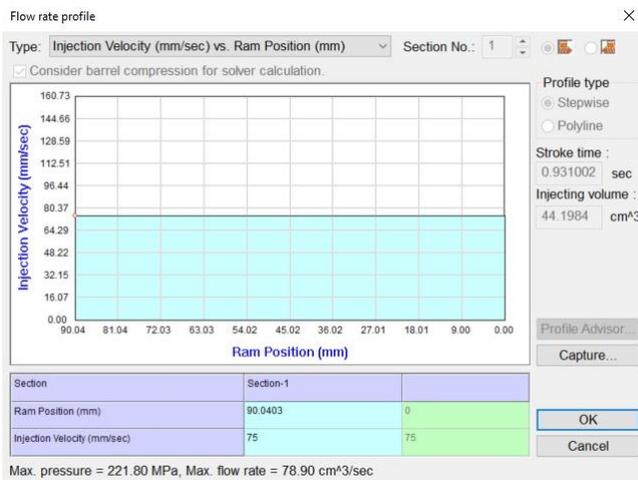


Figura 32 Profilo di velocità di riempimento di analisi 1.



Figura 33 Profilo di pressione di packing di analisi 1.

Nei successivi due capitoli si discuterà come ottimizzare i parametri di processo con l'obiettivo di migliorare la produttività e la qualità del prodotto. I principali parametri coinvolti in queste analisi sono il tempo ciclo e il total displacement.

Come già discusso in precedenza in tempo ciclo è una condizione al contorno, l'obiettivo dell'analisi è quindi valutare i tempi adeguati per ogni step produttivo osservando le proprietà che il materiale acquisisce nelle condizioni di processo. Per fare questo occorre ricavare il tempo di filling, il tempo di freezing del gate e il tempo necessario a raggiungere le condizioni di estrazione.

Il tempo di filling è un risultato della simulazione, per Analisi 1 il tempo di filling è 1,1 s. Il tempo di filling è il tempo in cui il riempimento dello stampo raggiunge il 100%, questo risultato è quindi "end-of-filling" cioè l'ultimo valore riportato nel file Log del filling.

Il tempo di packing adeguato per le condizioni di processo impostate coincide con il tempo di freezing del gate. Questo risultato viene riportato nel file log del packing ed è l'istante in cui la pressione di packing scende a 0, cioè l'istante oltre il quale il polimero non può più entrare nella cavità dello stampo. In figura 34 si riporta il file Log da cui leggere il tempo di packing.

Occorre tuttavia considerare che il file Log del packing riporta i risultati a partire dall'istante in cui termina il riempimento, nel caso di Analisi 1 il primo risultato riportato si riferisce all'istante 1,106 s. Per calcolare il tempo di packing occorre quindi sottrarre al tempo di freezing del gate il tempo di filling.

Per le condizioni di processo applicate per Analisi 1 il tempo di packing adeguato è:

$$P_{packing} = 9,84 - 1,1 = 8,74 \text{ s}$$

55	9.103	70.00	0.06	100.000	13.611	1354
56	9.142	60.00	-0.05	100.000	13.704	1376
57	9.161	50.00	-0.12	100.000	13.803	1389
58	9.183	40.42	-0.24	100.000	13.908	1401
59	9.208	31.51	-0.39	100.000	14.019	1413
60	9.238	23.52	-0.53	100.000	14.134	1423

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)

61	9.271	16.67	-0.64	100.000	14.250	1434
62	9.310	11.08	-0.71	100.000	14.365	1444
63	9.354	6.81	-0.72	100.000	14.475	1453
64	9.405	3.79	-0.70	100.000	14.577	1461
65	9.461	1.86	-0.63	100.000	14.666	1473
66	9.523	0.82	-0.53	100.000	14.740	1490
67	9.591	0.31	-0.43	100.000	14.801	1506
68	9.665	0.10	-0.34	100.000	14.850	1542
69	9.747	0.03	-0.26	100.000	14.889	1576
70	9.838	0.00	-0.19	100.000	14.922	1610

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)

71	9.937	0.00	-0.15	100.000	14.949	1645
72	10.046	0.00	-0.11	100.000	14.970	1679
73	10.167	0.00	-0.08	100.000	14.988	1698

Figura 34 File Log del packing di Analisi 1

Al termine del raffreddamento il pezzo viene estratto dallo stampo per effetto dello sforzo applicato dagli estrattori. Durante il tempo di cooling il materiale deve raggiungere le proprietà meccaniche sufficienti affinché possa essere estratto senza che gli estrattori lo danneggino. Per calcolare il tempo di cooling adeguato alle condizioni di processo si utilizza il diagramma in figura 35: cooling time to reach ejection temperature; questo grafico riporta la quantità di materiale in funzione del tempo che raggiunge la temperatura impostata per l'estrazione. In generale quando 80-90% del materiale ha raggiunto una temperatura inferiore a quella di estrazione è possibile estrarre il pezzo, per uniformare i risultati delle analisi i calcoli vengono eseguiti considerando 85%. Il grafico è discretizzato in 10 intervalli, occorre quindi applicare un'approssimazione per ricavare il tempo di estrazione; per ricavare i tempi di cooling nei casi in cui il punto di interesse si trovasse all'interno di un'intervallo è stata eseguita un'interpolazione lineare tra gli estremi dell'intervallo. Per Analisi 1 il tempo di cooling calcolato è 14,05 s, i risultati relativi al tempo ciclo sono espressi in tabella 9.

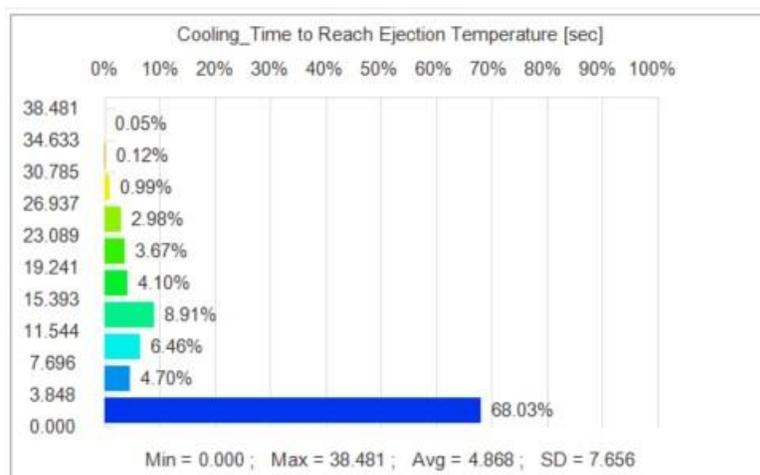


Figura 35 Tempo necessario a raggiungere la temperatura di estrazione per Analisi 1.

Tabella 9 Risultati del calcolo del tempo ciclo di Analisi 1.

t_{filling}	1,1 s
t_{packing}	8,74 s
t_{cooling}	14,05 s
$t_{\text{apertura stampo}}$	5 s
t_{ciclo}	28,89 s

Il secondo parametro valutato è il total displacement; questo parametro definisce lo scostamento totale del pezzo dalle dimensioni definite. Lo scostamento viene indicato in modulo utilizzando una scala cromatica, come si può osservare in figura 36. Poiché è difficile interpretare l'effetto dello scostamento osservando solo il modulo, è utile abbinare la lettura del total displacement con il risultato del comando "DEFORMATION"; questo strumento permette di visualizzare la tendenza del pezzo a deformare e permette di chiarire come cambia la geometria del pezzo a causa del ritiro, questa funzione viene visualizzata come in figura 37.

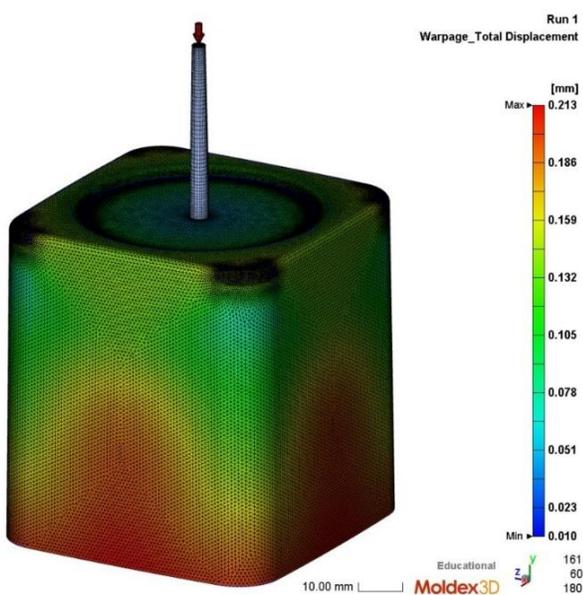


Figura 36 Total displacement di Analisi 1.

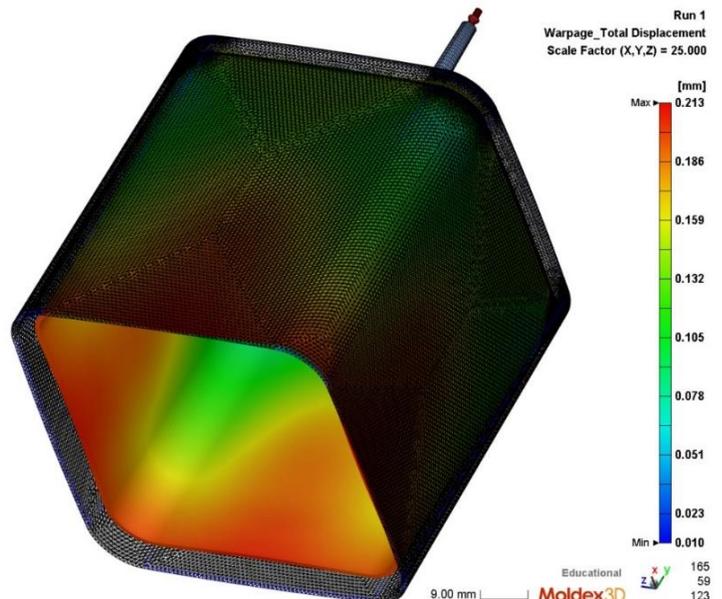


Figura 37 Deformazione causata dal ritiro in Analisi 1.

CAPITOLO 5 OTTIMIZZAZIONE DELLE DEFORMAZIONI

In questo capitolo vengono analizzate le prove che sono state sviluppate con l'obiettivo di ottimizzare le deformazioni e l'estrazione del pezzo.

Durante il processo di stampaggio il materiale passa dalla temperatura di iniezione alla temperatura ambiente e di conseguenza subisce un ritiro volumetrico per effetto del cambiamento di fase e della variazione di temperatura. Inoltre nelle diverse zone dello stampo le pressioni e le temperature raggiunte dal polimero sono diverse, cioè la storia termica che percorre il materiale varia in ogni zona dello stampo. Per questo motivo il pezzo non subisce un ritiro omogeneo ma subisce delle distorsioni.

I risultati utilizzati per valutare il ritiro del pezzo sono il warpage e la funzione deformation. Questi strumenti permettono di osservare quale ritiro subisce ogni zona del pezzo e qual è la tendenza del pezzo a deformare.

Per ottimizzare le deformazioni occorre ricercare quelle condizioni che permettono di ottenere un ritiro omogeneo del pezzo, per fare questo è possibile osservare il total displacement. Questo parametro indica il valore di spostamento che ogni punto subisce rispetto alla superficie di progetto del pezzo, in questo modo è possibile definire la deformazione del pezzo e valutare come sono distribuite le deformazioni.

Per ottimizzare l'estrazione del pezzo occorre invece valutare la tendenza del pezzo a deformare, per fare questo si utilizza la funzione deformation. Questa funzione permette di mostrare la tendenza del pezzo a deformare e quindi di identificare quelle aree in cui si determina un'interferenza con lo stampo. Infatti a cause delle deformazioni alcune porzioni del pezzo tendono ad aderire alla superficie dello stampo e per effetto del maggiore attrito ostacolano l'estrazione. Quindi, sfruttando la funzione deformation, si eseguono delle valutazioni qualitative per valutare l'effetto del ritiro sull'estrazione del pezzo.

Per migliorare la condizione di deformazione del pezzo si sfruttano i parametri di iniezione: velocità di iniezione e pressione di packing.

5.1 Analisi 2

La prima prova eseguita, chiamata Analisi 2, viene condotta utilizzando gli stessi parametri di pressione e velocità di iniezione di Analisi 1 (riferimento), l'unico parametro modificato è il VP switch, cioè la posizione in termini di percentuale di riempimento in cui si passa dal filling al packing.

Il VP switch viene impostato a 95% del volume del pezzo; l'obiettivo di questo cambiamento non è ridurre le deformazioni, infatti non si riscontra pressoché nessuna differenza da Analisi 1, ma si vuole creare una situazione in cui sia più semplice gestire i parametri di processo e osservare gli effetti che questi determinano. Poiché il processo di filling è regolato solamente dalla velocità di iniezione e il processo di packing è regolato solamente dalla pressione, è conveniente passare da filling a packing il più vicino possibile al completo riempimento dello stampo in modo da evitare che la pressione di packing produca conseguenze durante il filling difficili da interpretare.

In tabella 10 sono riportate le condizioni al contorno applicate a Analisi 2.

Tabella 10 Condizioni al contorno di Analisi 2.

V_{inj}	mm/s	75
P_{inj}	MPa	70
P_{pac}	MPa	70
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

I risultati della simulazione sono riportati nelle seguenti figure: in figura 38 il total displacement del pezzo, in figura 39 la deformazione del pezzo.

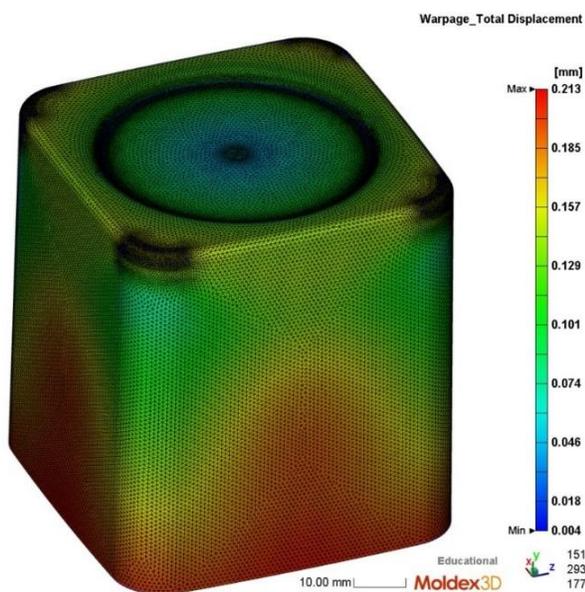


Figura 38 Total displacement di Analisi 2.

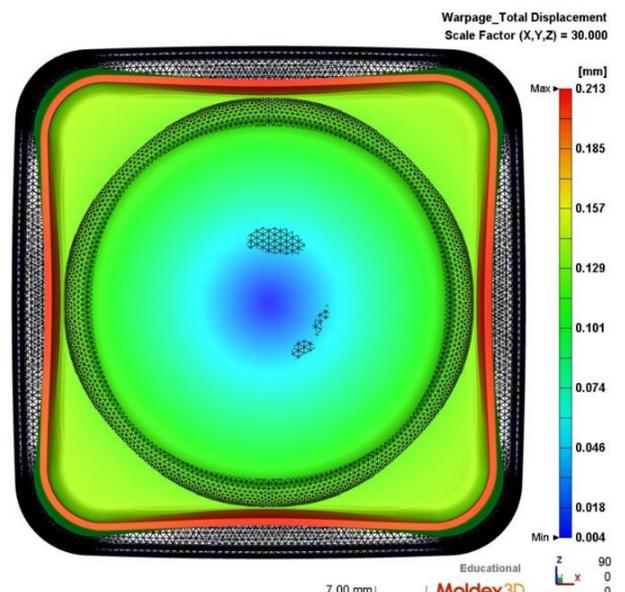


Figura 39 Tendenza alla deformazione del pezzo in Analisi 2.

Il pezzo prodotto nelle condizioni definite da Analisi 2 presenta una significativa deformazione che si verifica soprattutto lungo il bordo del pezzo. Il massimo spostamento è di 0,213 mm e si osserva circa al centro delle facce laterali. Questo valore di spostamento è ingente e produce una significativa deformazione del pezzo.

Come di può osservare in figura 39 il pezzo deformando tende ad assumere una forma a lobi in cui la parte centrale delle facce laterali si contrae e tende a ridurre il volume della cavità del pezzo. Questa contrazione porta il pezzo ad aderire alla parte mobile dello stampo e incrementa la forza di attrito che è necessario vincere per estrarre il pezzo. Il fenomeno rende più difficile l'estrazione del pezzo.

Con questa simulazione sono quindi state riscontrate due criticità: un elevato total displacement e una deformazione del pezzo che rende difficile l'estrazione.

5.2 Analisi 3

Il primo parametro che vien modificato è la velocità di iniezione. Per eseguire Analisi 3 si applicano le condizioni al contorno in tabella 11.

Tabella 11 Condizioni al contorno di Analisi 3

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	70
P_{pac}	MPa	70
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

Variando la velocità di iniezione ovviamente il tempo di filling si riduce a 0,7922; tuttavia, come si può osservare in figura 40, il total displacement non varia significativamente rispetto ad Analisi 2. Quindi modificare la velocità di iniezione non ha effetto sulla deformazione del pezzo.

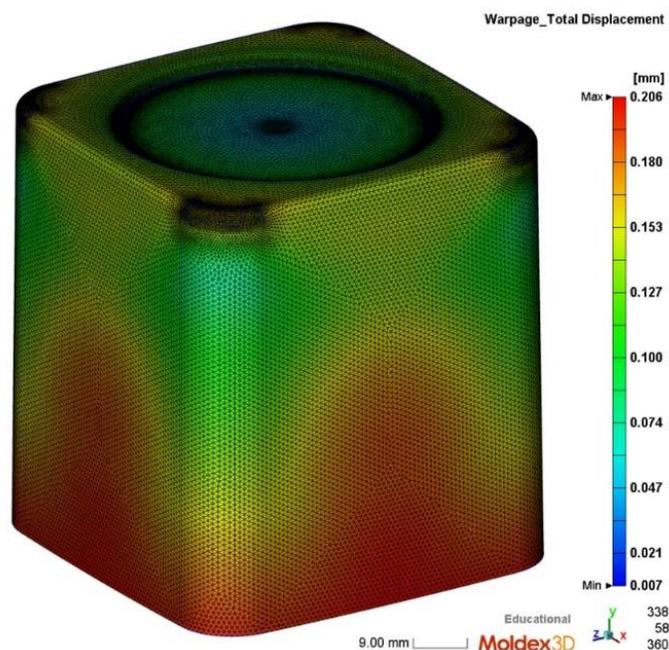


Figura 40 Total displacement del pezzo in Analisi 3.

5.3 Analisi 4

Il secondo parametro utilizzato per modificare deformazioni e ritiri del pezzo è la pressione di packing.

Per sviluppare Analisi 4 si utilizzano le condizioni al contorno riportate in tabella 12.

Tabella 12 Condizioni al contorno di Analisi 4.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	100
P_{pac}	MPa	100
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

I risultati della simulazione sono riportati nelle seguenti figure: in figura 41 il total displacement del pezzo, in figura 42 la deformazione del pezzo e in figura 43 il diagramma del total displacement.

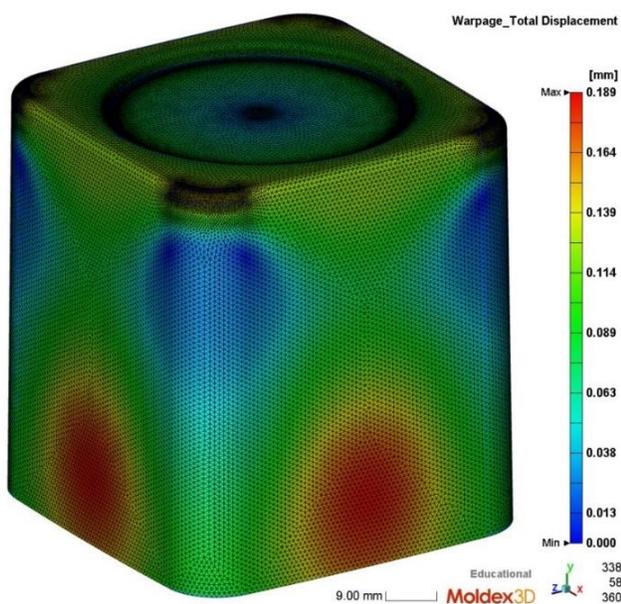


Figura 41 Total displacement del pezzo in analisi 4.

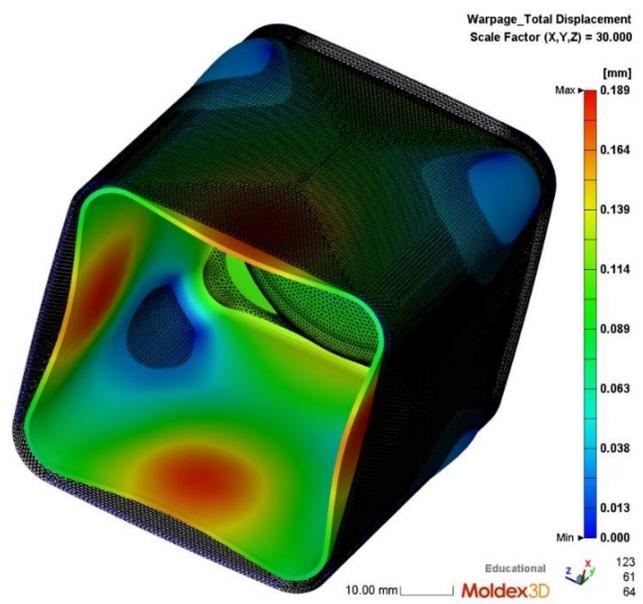


Figura 42 Tendenza del pezzo a deformare in Analisi 4.

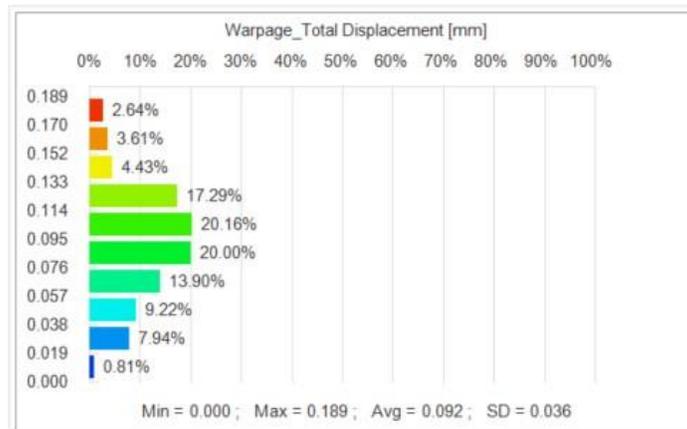


Figura 43 Diagramma del total displacement del pezzo in Analisi 4.

La pressione di packing ha un effetto molto significativo sulla deformazione e sul ritiro del pezzo. Rispetto al risultato di Analisi 2, impostando una pressione di packing di 100 Mpa si ottiene un risultato molto diverso.

Come si può osservare in figura 41 in questo caso la deformazione è significativamente migliorata. Il massimo valore di spostamento è di 0,189 mm, questo valore è molto minore rispetto al total displacement di Analisi 2.

Il massimo valore di scostamento si verifica sempre al cento delle superfici laterali ma la quantità di materiale che subisce questo ritiro è solo il 10%, come si osserva dal grafico in figura 43. Inoltre in questo caso le aree degli spigoli raggiati subiscono una deformazione nulla.

In figura 42 si può osservare la deformazione che il pezzo subisce, rispetto al caso precedente il pezzo tende comunque a subire una contrazione del bordo tuttavia il volume della concavità si riduce meno poiché la zona degli spigoli laterali subisce una deformazione pressoché nulla. Questo fenomeno facilita l'estrazione del pezzo poiché il materiale aderisce con una forza minore al punzone dello stampo.

5.4 Analisi 5

Per sviluppare Analisi 5 si utilizzano le condizioni al contorno in tabella 13. Poiché la pressione di packing risulta essere il parametro che determina significativamente la deformazione e il ritiro del pezzo, in questa prova si verifica l'effetto di una pressione molto elevata rispetto al caso di partenza Analisi 1.

Tabella 13 Condizioni al contorno di Analisi 5.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	100
P_{pac}	MPa	130
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

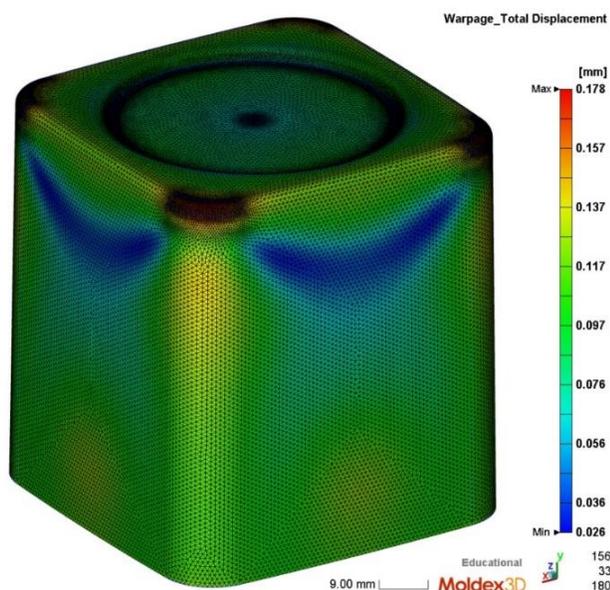


Figura 44 Total displacement del pezzo in Analisi 5.

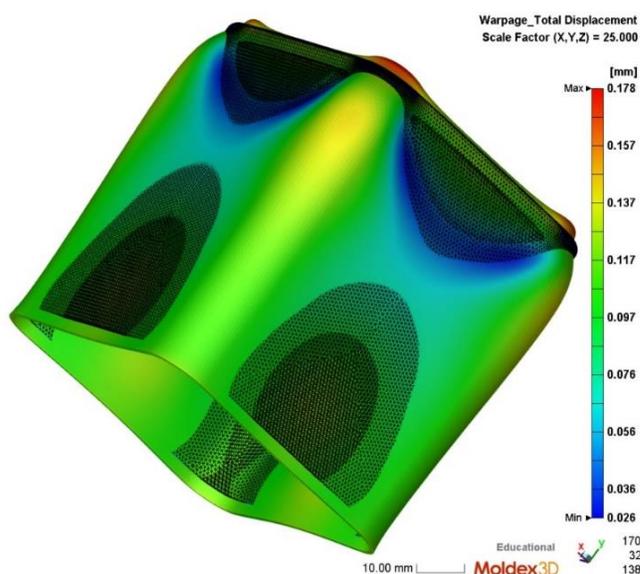


Figura 45 Tendenza del pezzo a deformare in Analisi 5.

I risultati della simulazione sono riportati nelle seguenti figure: in figura 44 il total displacement del pezzo, in figura 45 la deformazione del pezzo e in figura 46 il diagramma del total displacement.

Considerando i risultati in figura 44 e 45 si osserva come in queste condizioni di pressione si ottenga un buon risultato in termini di ritiro del pezzo. Dal grafico in figura 46 si stima che circa 80% del materiale, rappresentato in verde sul grafico e sul pezzo, subisce un ritiro costante e limitato di circa 0,1 mm. Questo risultato è molto buono poiché il ritiro omogeneo in tutte le zone del pezzo permette di limitare le distorsioni.

Il risultato ottenuto sembrerebbe essere soddisfacente tuttavia in figura 45 viene messa in luce una criticità. Il pezzo a causa dell'elevata pressione di packing subisce un sovraimpaccamento, cioè viene forzata all'interno dello stampo una quantità troppo elevata di materiale che porta ad avere come risultato un pezzo più grande di quanto progettato. Questo risultato non è accettabile poiché il pezzo tende a rimanere bloccato nella parte concava dello stampo.

Il problema costringe a scartare questa soluzione poiché se il pezzo rimanesse bloccato nella parte concava dello stampo si interromperebbe il ciclo produttivo e si rischierebbe di danneggiare lo stampo dovendo rimuovere manualmente il pezzo rimasto bloccato.

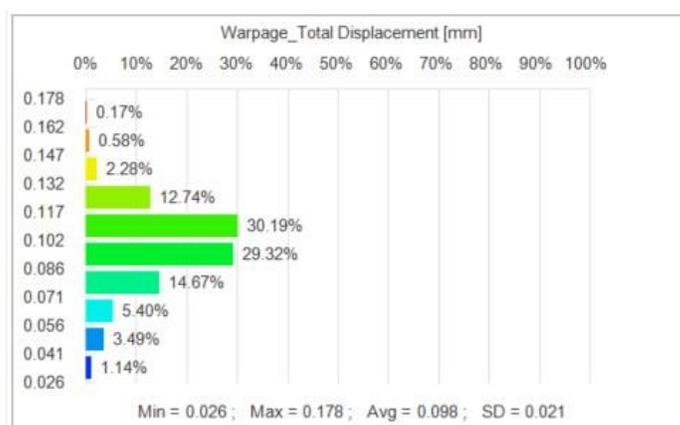


Figura 46 Grafico del total displacement di Analisi 5.

Dalla discussione di queste prime cinque analisi si può osservare come la pressione di packing sia il parametro che ha l'impatto maggiore sulla deformazione e sul ritiro del pezzo. Si osserva che in generale aumentando la pressione di packing si ottiene un migliore risultato in termini di deformazioni del pezzo, tuttavia esiste una pressione limite che non può essere superata per evitare di incorrere nel problema del sovraimpaccamento.

Nell'analisi successiva partendo da queste considerazioni si propone una soluzione in cui viene utilizzato un profilo di pressione variabile nel tempo con l'obiettivo di ottimizzare l'effetto della pressione di packing senza incorrere nel problema del sovraimpaccamento.

5.5 Analisi 6

Discutendo Analisi 5 è stato messo in luce il problema del sovraimpaccamento. Il risultato in figura 45 dimostra come il problema del sovraimpaccamento si verifica principalmente in corrispondenza delle aree del pezzo a sezione minore mentre non ha effetto sulla base del pezzo dove la sezione è maggiore. Partendo da questa considerazione si ipotizza che possano essere definiti due valori di pressione diversi, uno che ottimizza il riempimento della zona a sezione sottile evitando allo stesso tempo il sovraimpaccamento e un secondo che ottimizza il riempimento della base con sezione maggiore.

Si imposta un'analisi in cui il profilo di pressione di packing è diviso in due step.

Per impostare questa condizione è necessario definire il punto in cui variare la pressione. Questo istante di tempo è quello in cui il materiale nella zona a sezione sottile è stato raffreddato fino alla temperatura di freezing, mentre il materiale all'interno della base, che raffredda più lentamente, è ancora liquido. In queste circostanze la pressione di packing non ha più effetto sulla densità del materiale nelle zone a sezione sottile poiché in queste zone il materiale è solido quindi la pressione non può spingerne altro ad entrare.

Questo punto è difficile da identificare poiché le analisi non permettono di calcolare il profilo di raffreddamento del materiale durante i packing, quindi è stato necessario eseguire più tentativi per ricercare la condizione migliore. In questa sezione, Analisi 6, viene discusso il caso della soluzione con il risultato migliore.

Per sviluppare Analisi 5 si utilizzano le condizioni al contorno in tabella 14. In figura 47 si riporta il profilo di pressione di packing applicato.

Tabella 14 Condizioni al contorno Analisi 6.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	100
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

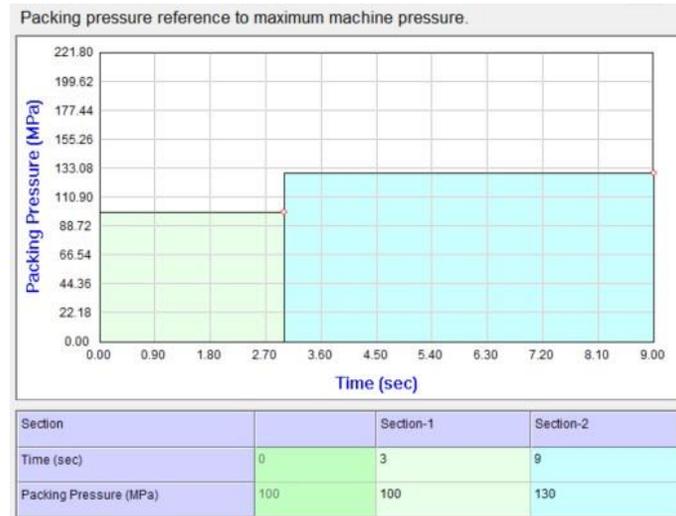


Figura 47 Profilo di pressione di packing applicato in Analisi 6.

I risultati della simulazione sono riportati nelle seguenti figure: in figura 48 il total displacement del pezzo, in figura 49 la deformazione del pezzo e in figura 50 il diagramma del total displacement.

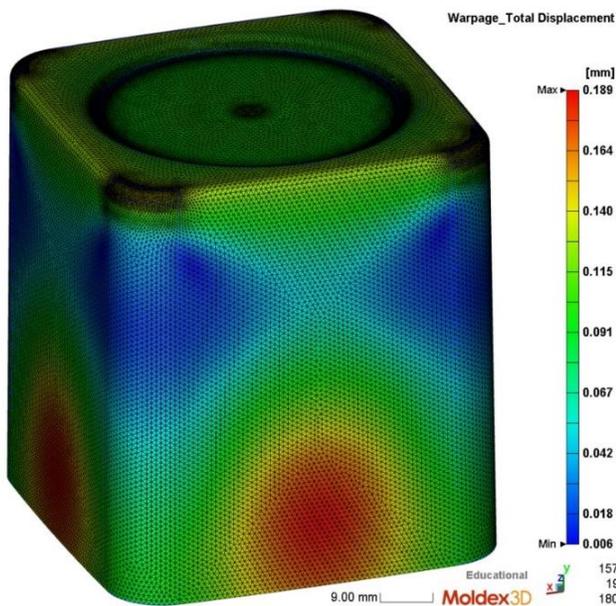


Figura 48 Total displacement del pezzo in Analisi 6.

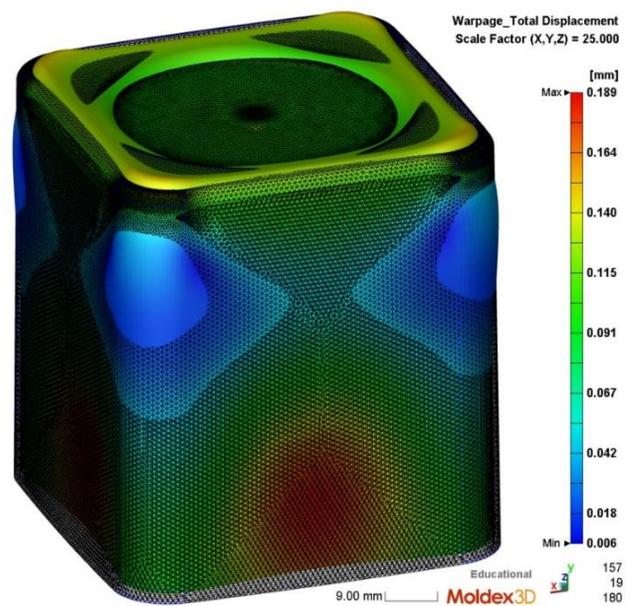


Figura 49 Tendenza del pezzo a deformare in Analisi 6.

Analizzando i risultati si osserva che in queste condizioni di processo il prodotto presenta grandi zone lungo gli spigoli arrotondati in cui il ritiro è nullo, questa caratteristica permette di ridurre l'adesione che si crea tra pezzo e stampo facilitando l'estrazione.

Al centro delle facce laterali è presente una zona in cui lo scostamento è significativo e raggiunge 0,189 mm; a causa di questo fenomeno, come si può osservare in figura 48, il bordo superiore del pezzo viene deformato e acquisisce una forma a lobi.

Rispetto al caso precedente, Analisi 5, in Analisi 6 il problema del sovraimpaccamento è significativamente migliorato. Rimane presente, come si può notare in figura 49, nella zona della base del pezzo; tuttavia non si verifica lungo le pareti laterali del pezzo. Questo risultato è accettabile poiché questa deformazione non incrementa l'adesione tra pezzo e superficie concava dello stampo.

Confrontando i risultati delle analisi 4 e 6 si osserva che la distribuzione degli spostamenti (figure 41 e 49) è simile. In entrambe le analisi si ottengono lungo gli spigoli arrotondati del pezzo zone in cui il ritiro è nullo, mentre al centro delle facce si crea una zona in cui si sviluppa la massima deformazione. Confrontando i grafici del total displacement, figure 43 e 50, si può ricavare che nel caso dell'Analisi 4 la quantità di materiale che subisce il massimo ritiro, tra 0,14 e 0,19 mm, è circa il 10,7%; invece la quantità di materiale che subisce il minimo ritiro, tra 0 e 0,06 è il 18%. Nel caso dell'analisi 6 la quantità di materiale che subisce il massimo ritiro, tra 0,14 e 0,19 mm, è circa il 9,6%; invece la quantità di materiale che subisce il minimo ritiro, tra 0 e 0,06 è il 20,8%.

Poiché la quantità di materiale che subisce il massimo ritiro è minore e la quantità di materiale che subisce il minimo ritiro è maggiore i parametri di processo di Analisi 6 producono il migliore risultato.

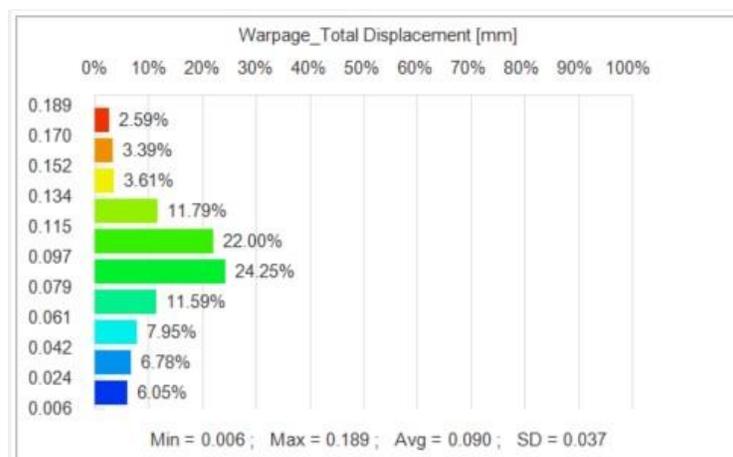


Figura 50 Grafico del total displacement di Analisi 6.

CAPITOLO 6 OTTIMIZZAZIONE DEL TEMPO CICLO

Nel corso di questo capitolo vengono sviluppate le analisi necessarie ad ottimizzare il tempo ciclo; per raggiungere questo obiettivo occorre agire sulla temperatura di iniezione, temperatura dello stampo e pressione di packing e osservare l'effetto che questi parametri hanno sul tempo di packing e di cooling.

La prima analisi discussa è Analisi 2 che viene presa come riferimento definendo le condizioni di partenza.

6.1 Analisi 2

In tabella 15 sono riportate le condizioni al contorno applicate ad Analisi 2.

Tabella 15 Condizioni al contorno di Analisi 2.

V_{inj}	mm/s	75
P_{inj}	MPa	70
P_{pac}	MPa	70
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

In figura 51 e 52 sono riportati i risultati della simulazione che permettono di derivare il tempo di packing e di cooling come descritto precedentemente nel capitolo 4. I risultati necessari per valutare il tempo di estrazione nelle condizioni imposte in Analisi 2 sono riportati in tabella 16.

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)
61	9.220	16.67	-0.64	100.000	12.769	1313
62	9.258	11.08	-0.71	100.000	12.878	1323
63	9.302	6.81	-0.72	100.000	12.982	1331
64	9.353	3.79	-0.70	100.000	13.081	1339
65	9.410	1.86	-0.63	100.000	13.168	1350
66	9.471	0.82	-0.53	100.000	13.240	1367
67	9.539	0.31	-0.43	100.000	13.300	1386
68	9.614	0.10	-0.34	100.000	13.349	1424
69	9.696	0.03	-0.26	100.000	13.388	1460
70	9.786	0.00	-0.19	100.000	13.421	1495

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)
71	9.885	0.00	-0.15	100.000	13.447	1528
72	9.995	0.00	-0.11	100.000	13.469	1571

Figura 51 File Log del packing di Analisi 2.

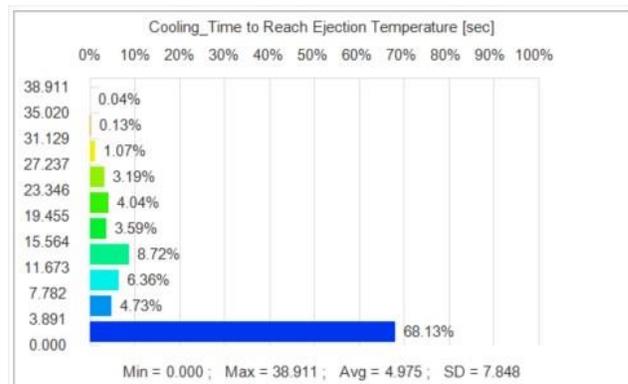


Figura 52 Grafico del tempo per raggiungere le condizioni di estrazione in Analisi 2.

Tabella 16 Tempo ciclo, risultati di Analisi 2.

$t_{filling}$	1,05 s
$t_{packing}$	8,74 s
$t_{cooling}$	14,25 s
$t_{apertura\ stampo}$	5 s
t_{ciclo}	29.03 s

Osservando i risultati in tabella 16 si nota che il raffreddamento necessita di un tempo maggiore degli altri step di processo, in accordo con quanto discusso nel primo capitolo della tesi; il primo obiettivo è quindi abbassare il tempo di raffreddamento poiché questo ha l'impatto maggiore sul tempo ciclo.

Tuttavia anche il packing necessita di un tempo significativo, quindi è conveniente ridurre anche il tempo di packing per ottimizzare il tempo ciclo.

Per raggiungere il primo obiettivo, cioè ridurre il tempo di raffreddamento, è utile abbassare la temperatura di iniezione del materiale e ridurre la temperatura dello stampo.

Il processo di packing dipende fortemente dalla pressione applicata, occorre quindi modificare la pressione per osservare l'effetto che questa determina sul tempo di packing e di conseguenza sul tempo ciclo.

6.2 Analisi 7

Per sviluppare Analisi 7 si utilizzano le condizioni al contorno definite in tabella 17. In questo caso si inietta il polimero a 190°C, cioè ad una temperatura inferiore rispetto ad Analisi 2. A 190°C il polimero possiede un Melt Flow Index di 10 g/s mentre a 210°C il MFI è di 23 g/s; nelle condizioni applicate ad Analisi 7 quindi il polimero possiede una fluidità minore rispetto al caso di Analisi 2.

Tabella 17 Condizioni al contorno applicate ad Analisi 7.

V_{inj}	mm/s	75
P_{inj}	MPa	70
P_{pac}	MPa	70
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	190
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

In figura 53 e 54 sono riportati i risultati di Analisi 7 necessari per ottenere il tempo ciclo. In tabella 18 sono riportati i tempi necessari a tutti gli step di stampaggio, questi sono stati calcolati come già descritto nel capitolo 4.

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)
61	9.532	3.79	-0.21	100.000	15.015	1437
62	9.588	1.86	-0.21	100.000	15.059	1447
63	9.650	0.82	-0.19	100.000	15.092	1465
64	9.718	0.31	-0.17	100.000	15.119	1483
65	9.792	0.10	-0.15	100.000	15.142	1501
66	9.875	0.03	-0.13	100.000	15.162	1535
67	9.965	0.00	-0.11	100.000	15.179	1568
68	10.064	0.00	-0.09	100.000	15.195	1602
69	10.173	0.00	-0.07	100.000	15.210	1636
70	10.294	0.00	-0.06	100.000	15.223	1669

Figura 53 File Log del packing di Analisi 7.

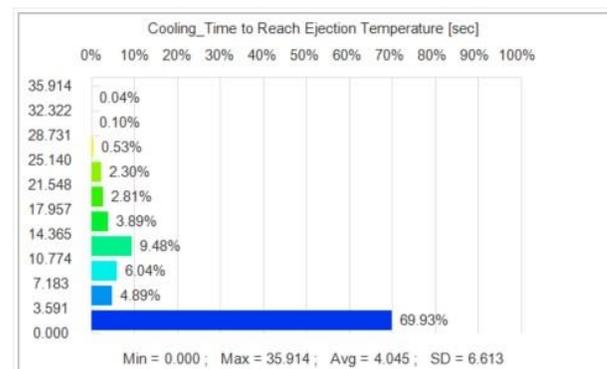


Figura 54 Grafico del tempo per raggiungere le condizioni di estrazione in Analisi 7.

Tabella 18 Tempo ciclo, risultati di Analisi 7.

t_{filling}	1,19 s
t_{packing}	8,78 s
t_{cooling}	12,34s
$t_{\text{apertura stampo}}$	5 s
t_{ciclo}	27,31 s

Confrontato i risultati di Analisi 7 con i risultati di Analisi 2 si osserva che il tempo di raffreddamento si riduce di 1,91 s. Questa variazione è considerevole e permette di ridurre in modo efficace il tempo ciclo.

Allo stesso tempo, tuttavia, il tempo di filling e di packing, abbassando la temperatura di iniezione, tendono lievemente ad aumentare. Questo risultato può dipendere dal fatto che il PLA a 190°C ha un MFI di 10 g/s contro i 23 g/s a 210°C; avendo un MFI molto minore il polimero oppone una maggiore resistenza allo scorrimento. Quindi abbassando la temperatura di iniezione si riduce da un lato il tempo di raffreddamento ma il tempo di filling e di packing tendono ad aumentare a causa della maggiore viscosità del polimero.

Questo fenomeno è stato introdotto perché è particolarmente evidente nel caso del PLA, infatti nell'intervallo di temperature tra 190°C e 210°C il MFI varia significativamente. Quindi volendo ottimizzare il tempo ciclo occorre ridurre le temperature caratteristiche del processo; tuttavia, poiché questo comporta un aumento del tempo di filling e packing, occorre anche agire sulle pressioni con l'obiettivo di ridurre i tempi necessari a questi step. Infatti, come già detto in precedenza, anche il tempo di packing occupa una porzione considerevole del tempo ciclo, quindi è necessario agire per ridurre il tempo di questa operazione.

Il tempo di packing e filling sono piuttosto lunghi in relazione al tempo di cooling. Questo avviene perché il pezzo ha una forma particolare. Il polimero per riempire lo stampo deve seguire un percorso lungo in proporzione allo spessore della sezione, inoltre il pezzo in proporzione al suo volume espone un'elevata superficie alle pareti dello stampo. Per questi motivi il raffreddamento è piuttosto efficiente mentre il riempimento è un'operazione complessa.

6.3 Analisi 8

Per sviluppare Analisi 8 si utilizzano le condizioni al contorno definite in tabella 19. In questo caso, rispetto all'analisi di riferimento, si riduce la temperatura dello stampo in modo da osservare le conseguenze che determina sul tempo ciclo.

Tabella 19 Condizioni al contorno applicate a Analisi 8.

V_{inj}	mm/s	75
P_{inj}	MPa	70
P_{pac}	MPa	70
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	20
T_{eject}	°C	80

In figura 55 e 56 sono riportati i risultati di Analisi 7 necessari per ottenere il tempo ciclo. In tabella 20 sono riportati i tempi necessari a tutti gli step di stampaggio, questi sono stati calcolati come già descritto nel capitolo 4.

67	10.398	6.81	-0.57	100.000	12.835	1426
68	10.449	3.79	-0.55	100.000	12.919	1436
69	10.505	1.86	-0.51	100.000	12.993	1444
70	10.566	0.82	-0.45	100.000	13.055	1459

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)
71	10.634	0.31	-0.37	100.000	13.107	1475
72	10.709	0.10	-0.30	100.000	13.150	1493
73	10.791	0.03	-0.23	100.000	13.186	1527
74	10.881	0.00	-0.18	100.000	13.217	1561
75	10.981	0.00	-0.14	100.000	13.242	1595
76	11.090	0.00	-0.11	100.000	13.263	1629

Figura 55 File Log del packing di Analisi 8.

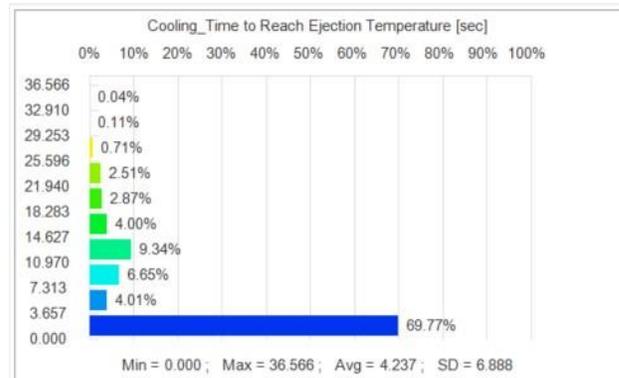


Figura 56 Grafico del tempo per raggiungere le condizioni di estrazione in Analisi 8.

Tabella 20 Tempo ciclo, risultati di Analisi 8.

t _{filling}	1,05 s
t _{packing}	9,83 s
t _{cooling}	12,76 s
t _{apertura stampo}	5 s
t _{ciclo}	28.64 s

Confrontando Analisi 8 con il caso di riferimento, Analisi 2, si può osservare che il tempo di cooling è diminuito di 1,49 s tuttavia il tempo ciclo si è ridotto di solo 0,39 s. Questo avviene perché il tempo di packing è notevolmente aumentato, di 1,09 s.

Confrontando Analisi 8 con Analisi 7 si mette in luce come la variazione temperatura di iniezione e di temperatura dello stampo producano effetti molto diversi.

In entrambi i casi il tempo ciclo viene ridotto. Tuttavia diminuendo la temperatura del polimero si ottiene un tempo ciclo inferiore rispetto al caso in cui si riduce la temperatura dello stampo; questo avviene poiché riducendo la temperatura dello stampo il tempo di packing aumenta significativamente.

Da questi confronti si ricava che il tentativo di abbassare la temperatura dello stampo non è vantaggioso. Considerando quindi i risultati ottenuti fino a questo momento, la strategia scelta per ridurre il tempo ciclo è quella di ridurre la temperatura di iniezione del polimero. Partendo da questa soluzione con le analisi successive si valuta l'effetto che la pressione di packing produce sul tempo ciclo e di conseguenza se è possibile lavorare sulle pressioni per ottimizzare la produttività.

6.4 Analisi 9

Le condizioni al contorno applicate ad Analisi 9 sono riportate in tabella 21.

Tabella 21 Condizioni al contorno applicate ad Analisi 9.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	100
P_{pac}	MPa	100
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	190
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

In figura 57 e 58 vengono riportati i risultati ottenuti dal calcolo di Analisi 9, questi risultati vengono utilizzati per calcolare il tempo ciclo con il metodo discusso nel capitolo 4, i risultati del calcolo si trovano in tabella 22.

66	9.153	11.39	-1.19	100.000	12.369	1269
67	9.197	7.06	-1.16	100.000	12.506	1279
68	9.247	3.98	-1.08	100.000	12.637	1287
69	9.302	1.98	-0.94	100.000	12.754	1297
70	9.363	0.88	-0.76	100.000	12.851	1313

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)
71	9.430	0.35	-0.59	100.000	12.929	1330
72	9.504	0.11	-0.45	100.000	12.992	1349
73	9.585	0.03	-0.33	100.000	13.042	1383
74	9.674	0.01	-0.24	100.000	13.082	1416
75	9.772	0.00	-0.18	100.000	13.114	1449
76	9.879	0.00	-0.13	100.000	13.140	1482
77	9.998	0.00	-0.10	100.000	13.161	1501

Figura 57 File Log del packing di Analisi 9.

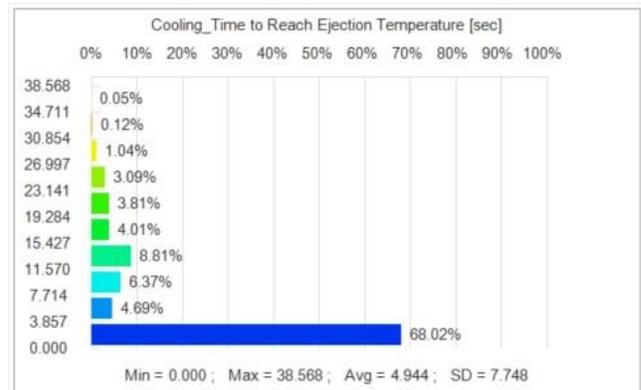


Figura 58 Grafico del tempo per raggiungere le condizioni di estrazione in Analisi 9.

Tabella 22 Tempo ciclo, risultati di Analisi 9.

$t_{filling}$	0,78 s
$t_{packing}$	8,99 s
$t_{cooling}$	14,16 s
$t_{apertura\ stampo}$	5 s
t_{ciclo}	28,93 s

Le condizioni di temperatura impostate in questa analisi sono uguali alle condizioni di Analisi 7. In questo caso sono state aumentate la velocità di iniezione e la pressione di packing, l'obiettivo è osservare l'effetto di questi parametri sul tempo di packing e di cooling.

I risultati ottenuti mostrano un peggioramento della produttività del processo, infatti il tempo ciclo è aumentato e sia il tempo di packing che il tempo di cooling sono aumentati.

6.5 Analisi 10

Le condizioni al contorno applicate ad Analisi 10 sono riportate in tabella 23.

Tabella 23 Condizioni al contorno applicate ad Analisi 10.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	100
P_{pac}	MPa	130
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	190
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

I risultati ottenuti dal calcolo di Analisi 10 sono riportati in figura 59 e 60, partendo da questi risultati si ottengono i tempi caratteristici degli step produttivi riportati in tabella 24.

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)
71	9.274	3.98	-0.60	100.000	13.093	1235
72	9.330	1.98	-0.57	100.000	13.171	1247
73	9.390	0.88	-0.53	100.000	13.240	1262
74	9.457	0.35	-0.47	100.000	13.304	1278
75	9.531	0.11	-0.41	100.000	13.361	1296
76	9.612	0.03	-0.35	100.000	13.414	1314
77	9.701	0.01	-0.30	100.000	13.462	1331
78	9.799	0.00	-0.24	100.000	13.506	1349
79	9.907	0.00	-0.20	100.000	13.544	1377
80	10.025	0.00	-0.16	100.000	13.578	1395

Figura 59 File Log del packing di Analisi 10.

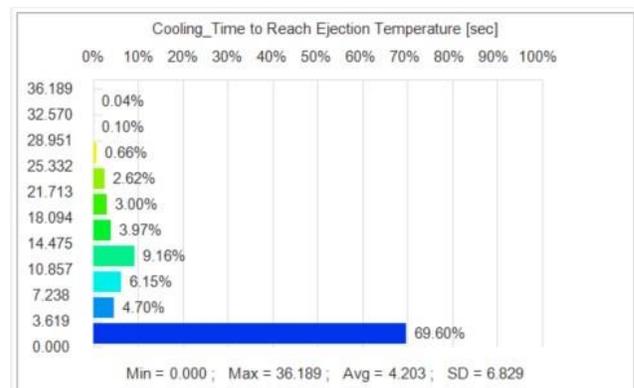


Figura 60 Grafico del tempo per raggiungere le condizioni di estrazione in Analisi 10.

Tabella 24 Tempo ciclo, risultati di Analisi 10.

$t_{filling}$	0,79 s
$t_{packing}$	9,01 s
$t_{cooling}$	12,65 s
$t_{apertura\ stampo}$	5 s
t_{ciclo}	27,45 s

Confrontando i risultati ottenuti in Analisi 10 con i risultati ricavati dalle analisi precedenti si osserva che aumentando la pressione di packing si ottiene un maggiore tempo di packing e un maggiore tempo di cooling.

La dipendenza osservata tuttavia è complessa e da queste simulazioni non è possibile ricavare una chiara tendenza.

Le Analisi 7, 9 e 10 sono state tutte eseguite impostando le stesse condizioni di temperatura, le velocità di iniezione e le pressioni sono invece diverse. Analisi 7 è stata eseguita applicando $V_{inj} = 75$ mm/s e $P_{pack} = 70$ MPa mentre per Analisi 9 sono state applicate $V_{inj} = 100$ mm/s e $P_{pack} = 100$ MPa, come già detto in precedenza il tempo ciclo nel secondo caso è maggiore. Analisi 10 è stata eseguita

applicando $V_{inj} = 100 \text{ mm/s}$ e $P_{pack} = 130 \text{ MPa}$ in questo caso il tempo ciclo è minore rispetto a quanto calcolato in Analisi 9 ma è comunque di poco maggiore rispetto a quello calcolato in Analisi 7. Quindi, in base ai risultati ottenuti, le condizioni che permettono di ottimizzare il tempo ciclo sono i parametri impostati in Analisi 7.

Da questi confronti non è possibile definire una strategia che garantisca di ridurre il tempo ciclo; applicando diverse pressioni di packing si ottengono conseguenze che i confronti fatti tra le analisi svolte non sono in grado di giustificare.

La motivazione di quanto osservato si può ricercare nel fatto che le proprietà fluidodinamiche del materiale non dipendono solo dalla temperatura ma anche dagli sforzi a cui il polimero è sottoposto e di conseguenza dalla pressione di packing che viene applicata.

Volendo quindi ricercare delle condizioni di pressione che permettano di ridurre il tempo ciclo occorre eseguire ulteriori analisi; tuttavia nel capitolo 5 è stato descritto come la pressione di packing abbia un forte impatto sul ritiro volumetrico e la deformazione del pezzo, quindi è conveniente valutare contemporaneamente sia l'effetto sul tempo ciclo, sia l'effetto sul warpage. Nel capitolo successivo vengono quindi sviluppate le analisi necessarie ad ottimizzare contemporaneamente il tempo ciclo, le deformazioni del pezzo e l'estrazione.

CAPITOLO 7 OTTIMIZZAZIONE DELL'ESTRAZIONE E DEL TEMPO CICLO

L'obiettivo del capitolo 7 è ricercare condizioni di processo che possano ottimizzare contemporaneamente il tempo ciclo e le deformazioni del pezzo.

Per analizzare le simulazioni eseguite si utilizzano gli stessi strumenti che sono già stati applicati per le precedenti simulazioni. Per calcolare il tempo ciclo si utilizzano i dati forniti dal file Log del packing e dal grafico "time to reach ejection temperature" e seguendo il metodo descritto nel capitolo 4. Per analizzare le deformazioni del pezzo e per valutare l'estrazione si utilizza il risultato "total displacement" e la funzione "deformation".

Analizzando le precedenti simulazioni è stato possibile identificare alcune relazioni tra i parametri applicati e i risultati ottenuti. Partendo da queste considerazioni si sviluppa la strategia utilizzata per raggiungere gli obiettivi di questo capitolo.

La pressione di packing risulta avere un forte impatto sul ritiro volumetrico e sulle deformazioni che il pezzo subisce al raffreddamento. Aumentando la pressione il risultato in generale migliora, cioè la massima deformazione, valutata come il massimo scostamento, si riduce.

Esiste un valore di pressione massima applicabile oltre la quale si incorre nel problema del sovraimpaccamento. Per risolvere questo problema si utilizza un profilo di pressione variabile che permette di applicare la pressione adeguata in funzione della fluidità del materiale durante la solidificazione.

Per ridurre il tempo ciclo è stato osservato che la strategia più efficace è ridurre la temperatura di iniezione. Inoltre anche la pressione di packing ha un forte effetto sul tempo ciclo, in particolare aumentando la pressione di packing sono stati ottenuti dei risultati peggiori in termini di produttività.

Considerando queste analisi si propone una strategia di simulazione. Si utilizza un profilo di pressione in due step partendo da una pressione maggiore e passando poi ad una minore. L'obiettivo è sfruttare l'elevata pressione iniziale per ottimizzare il riempimento dello stampo e il ritiro; successivamente la pressione diminuisce in modo da ottenere un tempo di raffreddamento inferiore.

7.1 Analisi 11

Per eseguire la simulazione si applicano le condizioni al contorno in tabella 25 e in figura 61. Il profilo di pressione applicato presenta due step di pressione, come descritto nell'introduzione del capitolo, l'idea consiste nello sfruttare inizialmente una pressione maggiore per ottimizzare il processo di packing e le deformazioni del pezzo, infine abbassare la pressione per ridurre il tempo di raffreddamento e di conseguenza il tempo ciclo.

Tabella 25 Condizioni al contorno applicate ad analisi 11.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	100
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	190
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

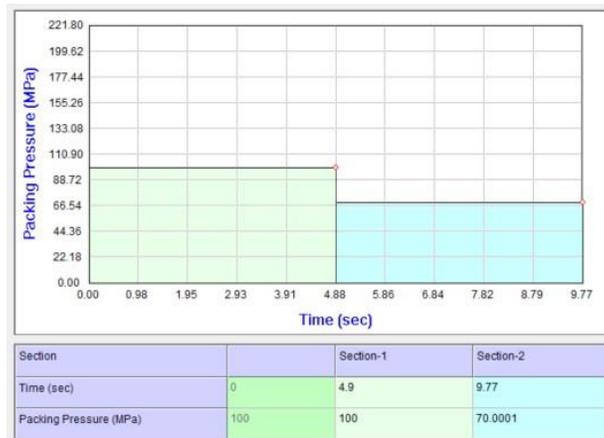


Figura 61 Profilo di pressione applicato ad Analisi 11.

I risultati dell'analisi di warpage sono riportati in figura 62 e 63. I risultati relativi al tempo ciclo sono inseriti in tabella 26.

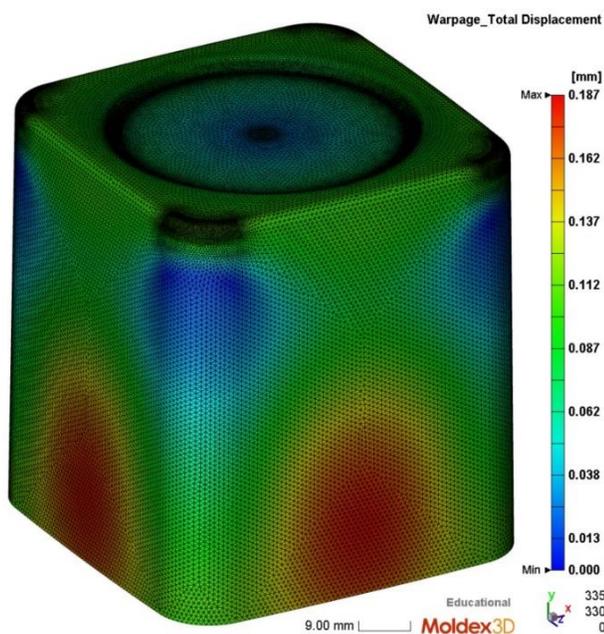


Figura 62 Total displacement ottenuto in Analisi 11.

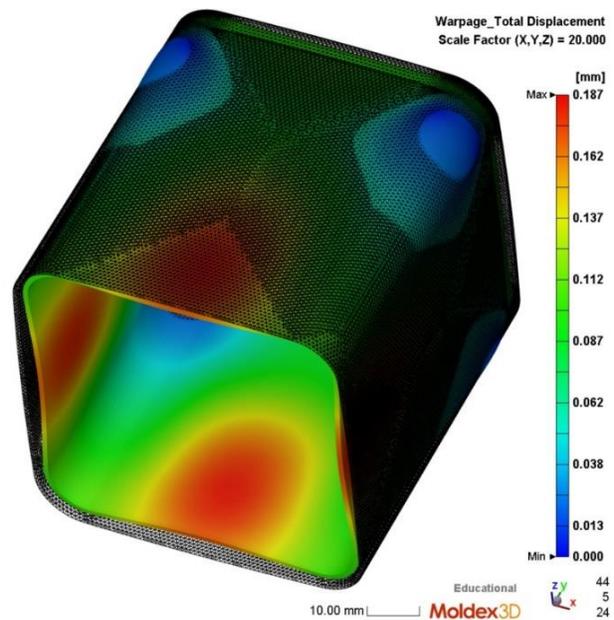


Figura 63 Tendenza del pezzo a deformare in Analisi 11.

Tabella 26 Tempo ciclo, risultati di Analisi 11.

t_{filling}	0,79 s
t_{packing}	10,53 s
t_{cooling}	10,61 s
$t_{\text{apertura stampo}}$	5 s
t_{ciclo}	26,93 s

Applicando le condizioni di processo di Analisi 11 si ottiene un buon risultato in termini di tempo ciclo. Rispetto alle analisi precedenti sia il tempo di cooling, sia il tempo ciclo sono stati ridotti.

Con l'analisi di warpage è stato calcolato uno spostamento massimo di 0,187mm, come si può osservare in figura 62; il total displacement inoltre dimostra che la zona al centro delle facce laterali subisce la deformazione maggiore mentre le aree degli spigoli arrotondati non subiscono lo scostamento.

Questo risultato di total displacement giustifica la deformazione del pezzo rappresentata in figura 63. Infatti il punto di maggiore ritiro al centro della faccia produce una distorsione.

Nella zona degli spigoli arrotondati il total displacement calcolato è nullo, questo aspetto è positivo poiché, come già descritto in precedenza, permette di ridurre l'effetto di costrizione del punzone dello stampo e facilitare l'estrazione.

In base a questi risultati le condizioni di processo di Analisi 11 sono adeguate, infatti, rispetto ai casi ottimizzati descritti in precedenza, questi parametri permettono di ottimizzare in contemporanea tutti gli obiettivi prefissati.

7.2 Analisi 12

Per eseguire la simulazione di Analisi 12 si applicano le condizioni al contorno in tabella 27 e si applica il profilo di pressione in figura 64.

Il profilo di pressione di packing applicato presenta tre step. Inizialmente si applica una pressione elevata di 120 MPa che ha l'obiettivo di facilitare il processo di packing e ottimizzare ritiri e distorsioni. In precedenza è stato osservato il problema del sovraimpaccamento causato dalle elevate pressioni, per evitare questo problema la pressione di 120 MPa viene applicata per un tempo breve, 2,44 s, cioè un tempo minore rispetto al primo step del profilo di pressione di Analisi 11.

Tabella 27 Condizioni al contorno applicate ad Analisi 12.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	100
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	190
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

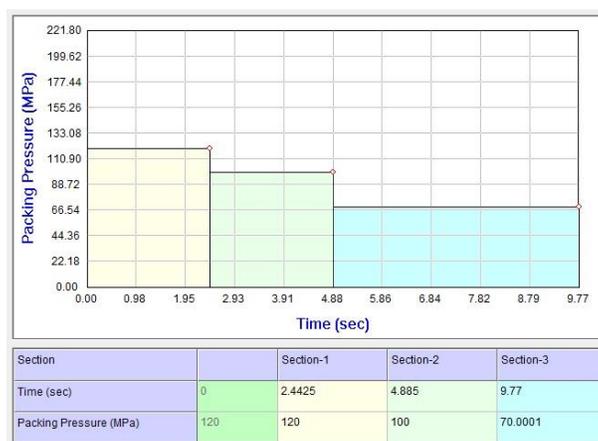


Figura 64 Profilo di pressione applicato in Analisi 12.

I risultati dell'analisi di warpage sono riportati in figura 65 e 66. I risultati relativi al tempo ciclo sono inseriti in tabella 28.

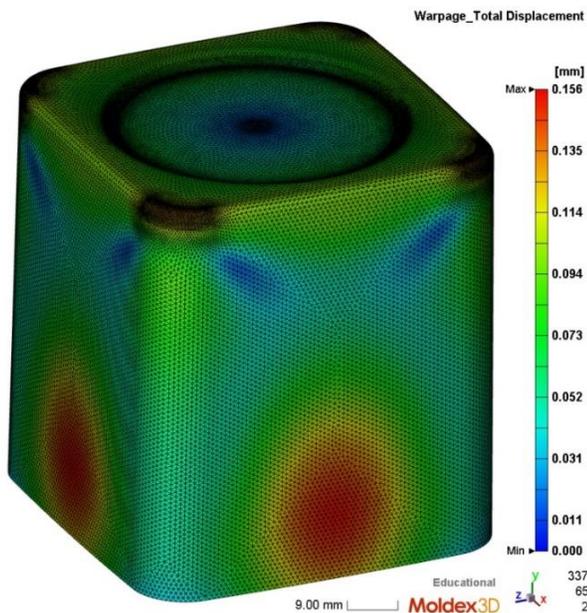


Figura 65 Total displacement ottenuto in Analisi 12.

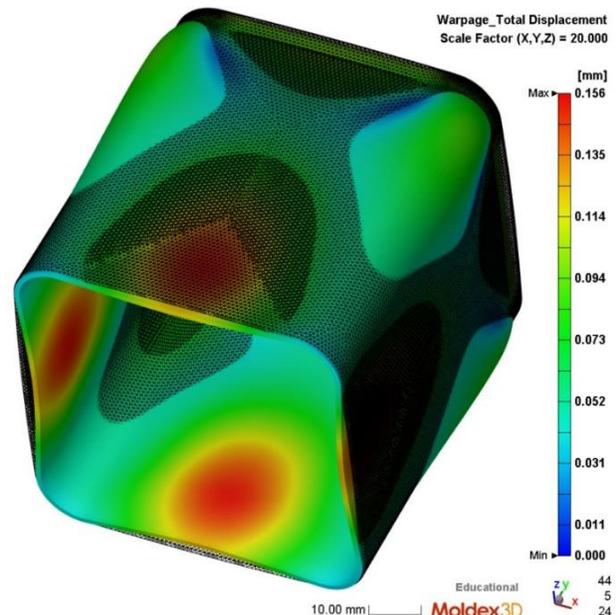


Figura 66 Tendenza del pezzo a deformare in Analisi 12.

Tabella 28 Tempo ciclo, risultati di Analisi 12.

t_{filling}	0,79 s
t_{packing}	10,58 s
t_{cooling}	10,64 s
$t_{\text{apertura stampo}}$	5 s
t_{ciclo}	27,01 s

Il total displacement, figura 65, presenta una distribuzione degli spostamenti omogenea, la zona al centro delle facce laterali subisce il ritiro maggiore che tuttavia è molto limitato, 0,156, rispetto ai risultati precedentemente ottenuti. Quindi il risultato in termini di deformazione del pezzo è buono poiché il displacement medio e massimo sono ridotti rispetto alle precedenti analisi.

A causa di questo displacement il pezzo subisce una distorsione simile all'immagine 66. Come si può osservare gli spigoli arrotondati si trovano al di fuori della geometria iniziale del pezzo, quindi tendono ad aderire alla parete concava dello stampo. Questa situazione non è necessariamente inaccettabile, infatti non si osserva il sovraimpaccamento che si riscontrava per esempio in Analisi 5 e inoltre lo scostamento di queste porzioni di superficie è minimo, circa 0,08 mm.

I tempi di filling e packing e di conseguenza il tempo ciclo sono molto simili ai risultati del caso ottimizzato Analisi 11, anche in questo caso quindi il tempo ciclo ottenuto è un risultato adeguato.

7.3 Analisi 13

Le condizioni al contorno applicate ad Analisi 13 sono definite in tabella 29, in figura 67 è riportato il profilo di pressione applicato.

Poiché la strategia utilizzata nelle simulazioni Analisi 11 e Analisi 12 ha portato a risultati soddisfacenti, si propone un'analisi che punti a implementare ulteriormente l'idea proposta. Il profilo di pressione applicato prevede un breve step iniziale ad elevata pressione, 120 MPa per 3,78 s, l'obiettivo è ottenere un buon risultato di packing in breve tempo; il secondo step invece è più lungo e a bassa pressione, 70 MPa per 7,22 s, l'obiettivo è evitare il sovraimpaccamento e ridurre il tempo di cooling.

Tabella 29 Condizioni al contorno applicate ad Analisi 13.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	100
VP_{switch}		95%
T_{inj}	°C	190
T_{mold}	°C	30
T_{eject}	°C	80

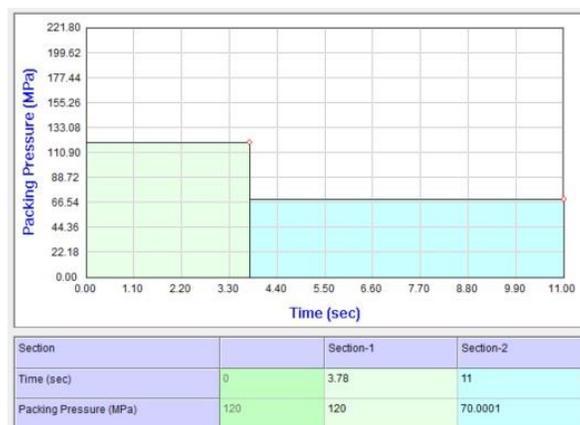


Figura 67 Profilo di pressione applicato in Analisi 13.

In figura 68 e 69 sono riportati i risultati dell'analisi di warpage: total displacementes e deformazioni. In tabella 30 si riportano i risultati relativi al tempo ciclo.

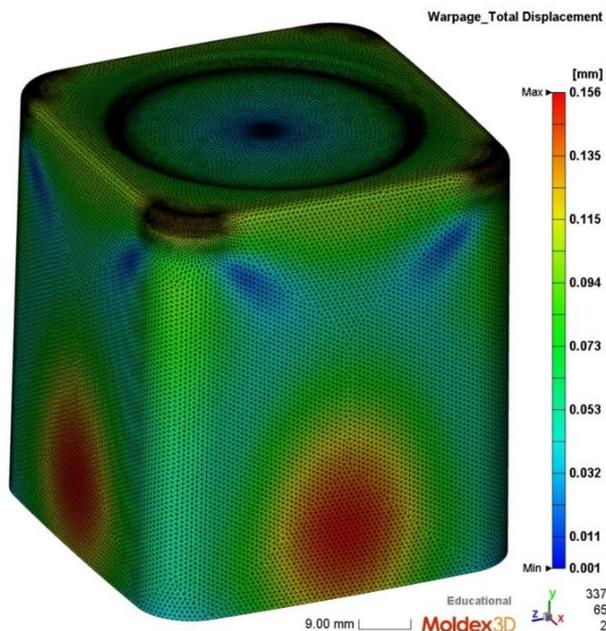


Figura 68 Total displacement ottenuto in Analisi 13.

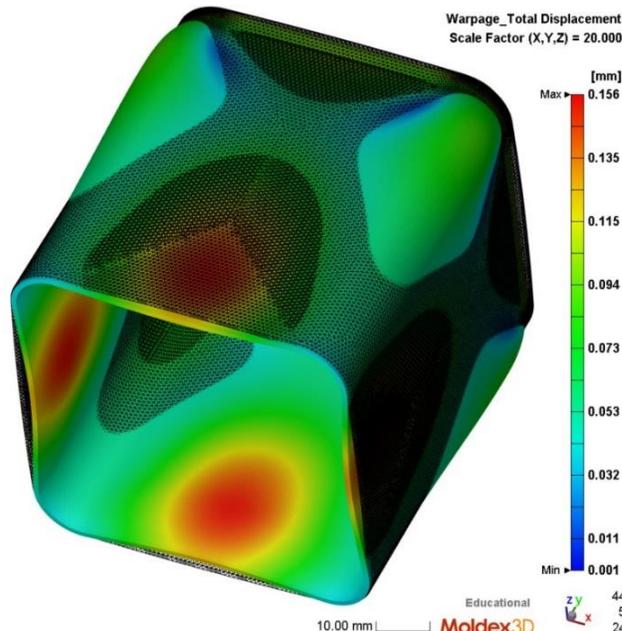


Figura 69 Tendenza del pezzo a deformare in Analisi 13.

Tabella 30 Tempo ciclo, risultati di Analisi 13.

t_{filling}	0,79 s
t_{packing}	11,8 s
t_{cooling}	8,82 s
$t_{\text{apertura stampo}}$	5 s
t_{ciclo}	26,41 s

Il total displacement, in figura 68, presenta una distribuzione omogenea degli spostamenti, lo scostamento massimo è di 0,156 mm mentre il valore medio è 0,075. Questi risultati sono molto simili a quelli ottenuti con la precedente simulazione, Analisi 12.

Analogamente alla precedente simulazione la distorsione del pezzo, in figura 69, presenta una criticità. La deformazione degli spigoli determina una maggiore adesione con la superficie concava dello stampo, questo può provocare problemi nell'estrazione. Tuttavia in questa zona lo scostamento è molto contenuto, circa 0,075 mm, quindi si considera il risultato accettabile.

I parametri di processo applicati ad Analisi 13 permettono di ottenere un tempo ciclo di 26,41 s, questo è il migliore risultato in termini di tempo ciclo ottenuto tra tutte le analisi svolte. Tuttavia, confrontando singolarmente i tempi di packing e di cooling, si osserva che in Analisi 13 il tempo di cooling è ridotto di 1,79 s rispetto ad Analisi 11 mentre il tempo di packing è aumentato di 1,27 s.

I parametri di processo applicati in Analisi 13 hanno permesso di ottenere il migliore risultato in termini di tempo ciclo e una distorsione limitata del pezzo finito. Quindi in base alle analisi eseguite questi parametri permettono di ottimizzare produttività e deformazione del pezzo.

CAPITOLO 8 ANALISI DELLE PRESSIONI E DELLE TEMPERATURE UTILIZZANDO IL SOFTWARE MOLDEX 3D

Nei precedenti capitoli i risultati delle simulazioni eseguite con il software Moldex 3D sono stati usati per analizzare le proprietà del prodotto stampato e ottimizzare il processo produttivo.

Sono stati utilizzati solo quei parametri che permettono di calcolare i tempi caratteristici degli step produttivi e di definire le proprietà meccaniche del prodotto finito. Il programma tuttavia fornisce numerosi altri risultati ed è di interesse studiare i profili di pressione e di temperatura che si sviluppano all'interno dello stampo e del materiale durante gli step di processo.

Per eseguire queste valutazioni si considera la simulazione relativa ad Analisi 2.

8.1 Profilo di sprue pressure sviluppato durante il filling

La sprue pressure è quella pressione che si sviluppa all'interno dello sprue, cioè nella prima cavità dello stampo da cui partono i canali di alimentazione oppure, come in questo caso, che alimenta direttamente la cavità del pezzo.

Come già descritto in precedenza la pressione di filling è una condizione al contorno impostata; tuttavia questo valore si riferisce al limite massimo di pressione che può essere raggiunto. Infatti il parametro che regola il riempimento dello stampo è la velocità di iniezione, la pressione varia di conseguenza per garantire la velocità del flusso impostata.

Quindi la sprue pressure è anche un risultato dell'analisi. E' possibile monitorare la variazione di questa pressione per analizzare i fenomeni fluidodinamici che avvengono all'interno della cavità dello stampo.

In questa sezione viene analizzato il profilo di sprue pressure per individuare i punti caratteristici in cui la pressione subisce una variazione; rilevata la posizione temporale di questi punti si confrontano le condizioni di pressione con il profilo di flusso del materiale all'interno dello stampo in quel momento.

In figura 70 è riportato il grafico sprue pressure in funzione del tempo. Sul grafico possono essere identificati tre punti in cui si osserva una variazione della pendenza della curva. All'inizio la pressione cresce velocemente fino a 0,08 s, tra 0,08 e 0,493 s si presenta un plateau a circa 20 MPa, oltre i 0,493 s la pressione cresce progressivamente fino a 70 MPa.

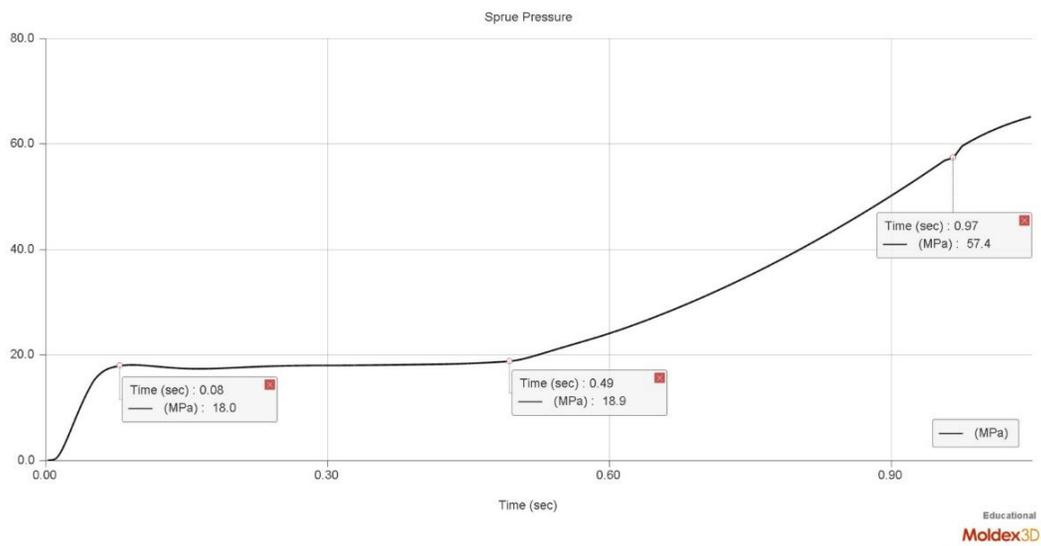


Figura 70 Sprue pressure vs time, risultato di Analisi 2.

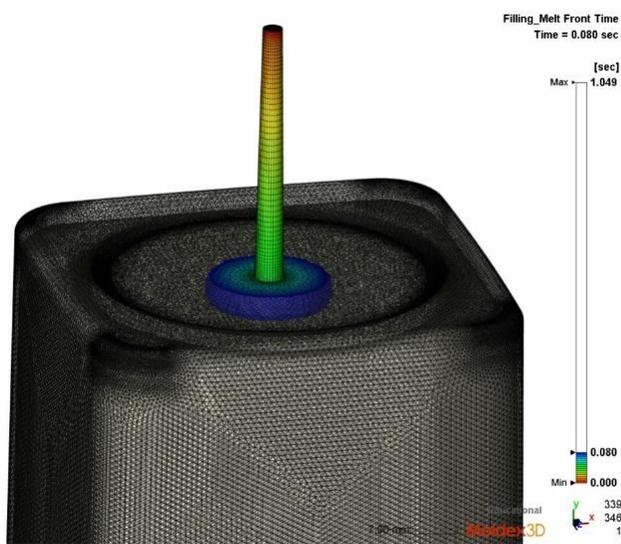


Figura 71 Riempimento dello stampo dopo 0,08 s, risultato di Analisi 2.

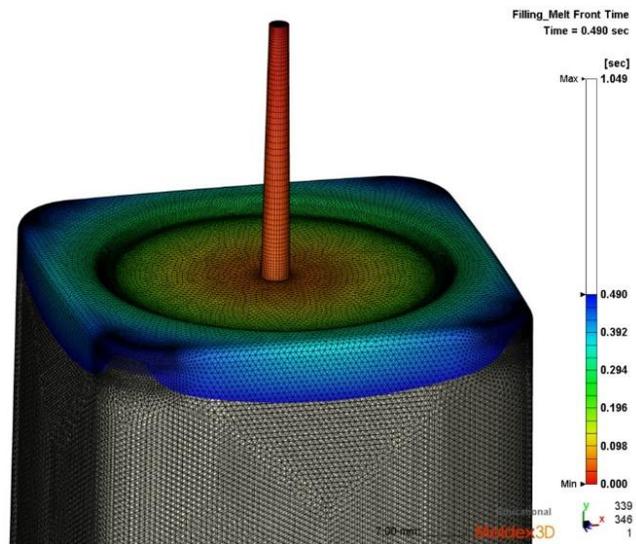


Figura 72 Riempimento dello stampo dopo 0,49 s, risultato di Analisi 2.

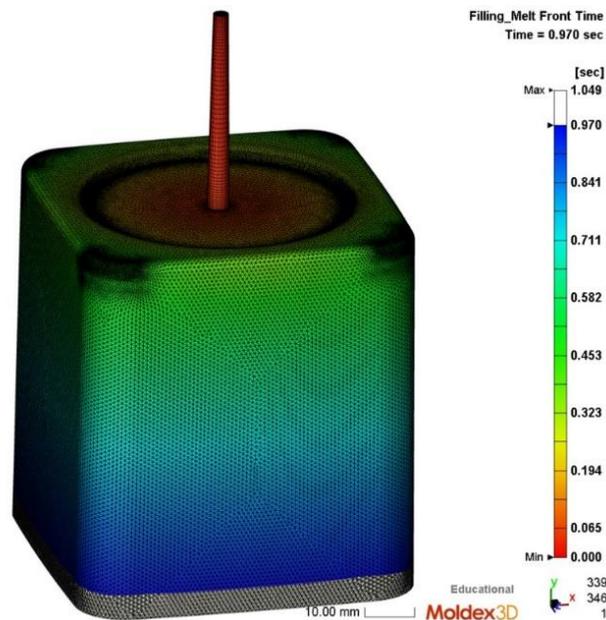


Figura 73 Riempimento dello stampo dopo 0,97 s, risultato di Analisi 2.

Dall'analisi della sprue pressure sono stati identificati tre punti caratteristici in cui varia l'andamento della pressione: a 0,085, a 0,49 s e a 0,97 s.

Per analizzare i fenomeni fluido dinamici che avvengono in questi tre istanti si utilizza il risultato "melt front time". Questo risultato è un video del flusso di materiale che si genera all'interno dello stampo, è possibile selezionare i tre istanti in cui fermare la simulazione per estrapolare le immagini del riempimento. In questo modo si ottengono le tre immagini in figura 71, 72 e 73.

In figura 71 si può osservare il riempimento dello stampo dopo 0,08 s. Il materiale ha completamente riempito lo sprue e ha iniziato ad entrare nella cavità principale. Durante questo processo la pressione è rapidamente cresciuta fino a 18 MPa. Questa pressione dipende dall'attrito che si sviluppa durante l'attraversamento del canale di alimentazione.

In figura 72 si può osservare il riempimento dello stampo a 0,49 s. In questo caso il materiale ha riempito la parte dello stampo con la sezione maggiore.

Nel periodo di tempo tra i due istanti in figura 70 e 71 il profilo di pressione è costante. Ciò avviene poiché si sta riempiendo una zona dello stampo con la sezione maggiore, quindi la caduta di pressione principale è causata dal canale di alimentazione che possiede una sezione minore.

In corrispondenza dell'istante 0,49 s il profilo di pressione subisce una variazione: si passa da una zona a pressione costante ad un tratto in cui la pressione cresce fino al valore massimo di 65 MPa. Questa variazione avviene quando il materiale inizia a riempire le pareti laterali del pezzo che possiedono una sezione molto minore rispetto alla base. La pressione aumenta progressivamente poiché è necessario spingere il materiale ad una distanza significativa rispetto al punto di iniezione attraverso una cavità a sezione sottile. In queste condizioni l'elevata superficie di contatto tra materiale e stampo e la ridotta sezione della cavità determinano elevati attriti sulle superfici.

All'istante 0,97 s il riempimento dello stampo ha raggiunto la condizione in figura 73. In questo caso il polimero ha riempito il 95% della cavità dello stampo, quindi ha raggiunto il punto di VP switch. La fluttuazione della pressione è causata dal fatto che in questo punto l'elemento di iniezioni passa

a regolare il riempimento applicando una pressione costante di 70 MPa. Quindi oltre questo istante la pressione cresce fino al termine del riempimento.

8.2 Analisi delle temperature

In questo paragrafo vengono analizzati i diagrammi in cui sono riportati i profili di temperatura che si sviluppano all'interno del materiale. I risultati analizzati sono: il profilo di temperatura al termine del filling, la temperatura del melt front e il profilo di temperatura al termine del cooling. I diagrammi riportati in figura 74, 75 e 76 si riferiscono alla simulazione di Analisi 2

Questi risultati permettono di osservare le temperature che si sviluppano all'interno del materiale durante gli step produttivi, analizzandoli è possibile valutare la qualità del materiale al termine dello stampaggio.

Utilizzando il Melt Front Temperature e la Filling Temperature si stabilisce la massima temperatura che viene raggiunta all'interno del materiale durante il riempimento dello stampo. È necessario verificare che la massima temperatura raggiunta non superi il valore di temperatura oltre il quale il polimero inizia a degradare.

Le analisi sviluppate nei capitoli precedenti avevano lo scopo di ricercare i parametri di processo più adeguati per migliorare la produttività e la qualità del prodotto finito, per fare questo sono stati utilizzati i risultati della simulazione che permettono di identificare le proprietà del pezzo stampato e di calcolare i tempi necessari agli step produttivi. Tuttavia i parametri di processo applicati potrebbero provocare delle conseguenze nel materiale. In particolare aumentando le pressioni applicate e la velocità di iniezione aumentano gli sforzi generati all'interno del materiale; questi sforzi determinano una dissipazione di energia e sviluppano calore. Poiché si utilizza un polimero fluido ad elevata temperatura, il riscaldamento prodotto dagli sforzi interni può portare il polimero ad una temperatura superiore di quella di degradazione.

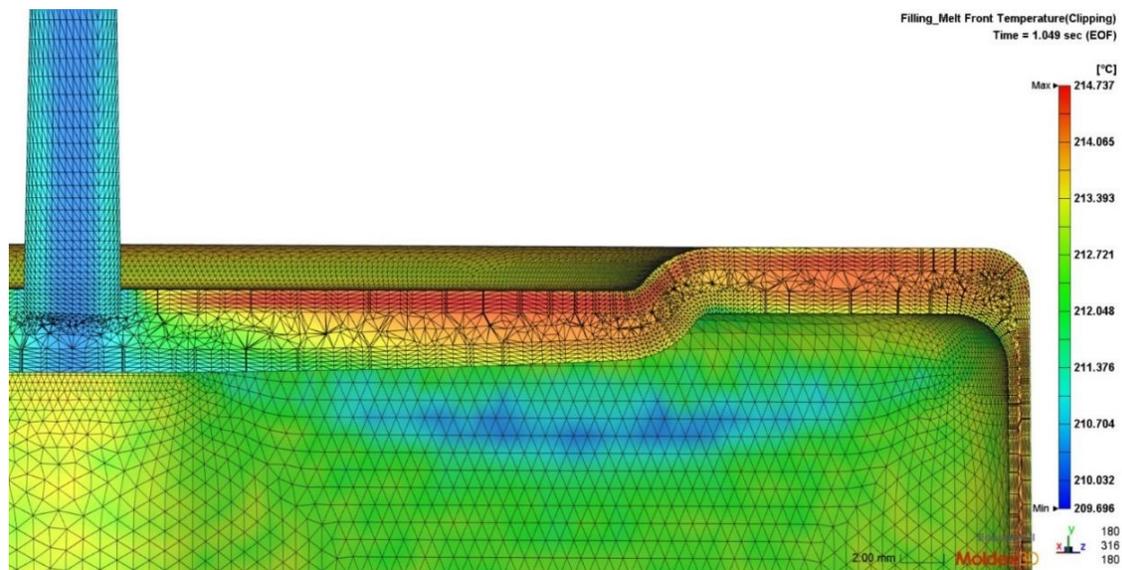


Figura 74 Melt front temperature di Analisi 2

In base ai dati ricavati dal database di Moldex 3D la massima temperatura a cui è possibile iniettare il PLA è 230 °C. Oltre questa temperatura si considera che il materiale subisca degradazione.

Osservando il profilo di temperatura del fronte di materiale, in figura 74, si può notare che alcune porzioni di materiale sono rappresentate nel grafico in arancione e in rosso. Secondo la leggenda nelle zone rappresentate in arancione il polimero ha raggiunto una temperatura tra i 213 e i 214 °C. Questo risultato indica che per effetto degli sforzi prodotti all'interno del materiale durante il riempimento la temperatura è aumentata, tuttavia questa temperatura è molto inferiore al limite massimo considerato di 230 °C.

Si osserva inoltre una zona rappresentata in rosso, che si trova in corrispondenza della superficie di base, qui il polimero raggiunge i 214,7 °C. Anche in questo caso la temperatura raggiunta non è tale da causare la degradazione del polimero.

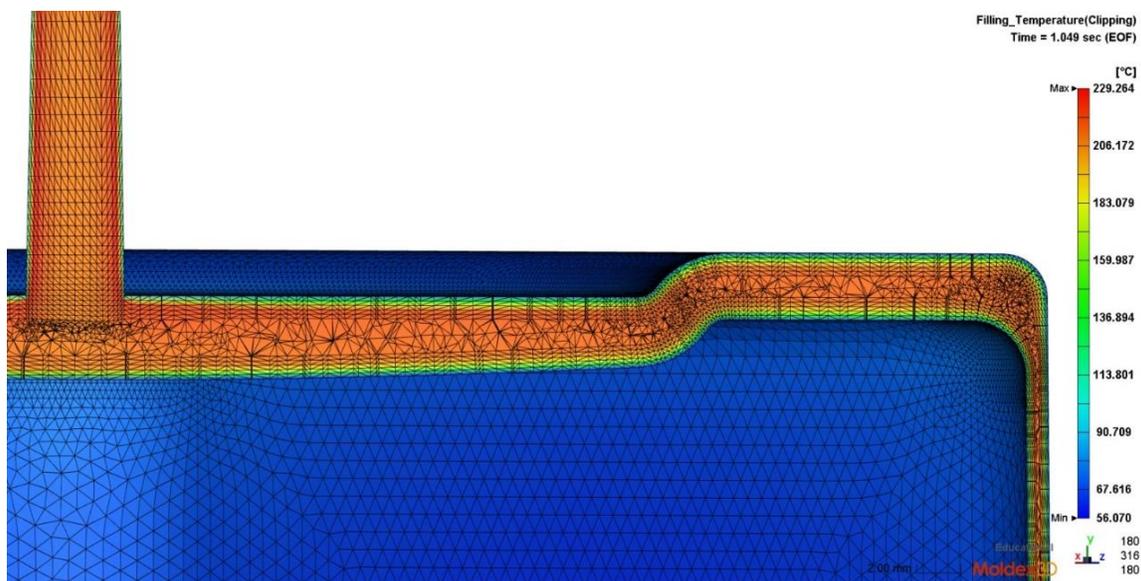


Figura 75 Profilo di temperatura al termine del filling, Analisi 2.

Al termine del processo di filling si raggiunge la condizione di temperatura rappresentata in figura 75.

In corrispondenza delle superfici si crea un gradiente di temperatura poiché il materiale entra in contatto con la superficie dello stampo che si trova alla temperatura di 30 °C. Utilizzando la scala cromatica e prendendo come riferimento lo spessore dei layer della mesh è possibile calcolare lo spessore della pelle fredda e lo spessore dello strato in cui si sviluppa il gradiente di temperatura. Come già descritto in precedenza la mesh del pezzo è stata costruita con la funzione BLM a 5 layer, quindi nelle zone vicine alle superfici il programma ha generato gli elementi della mesh disponendo i nodi lungo cinque piani paralleli ed equidistanti. Lo spessore delle pareti del pezzo non è uniforme, la base ha uno spessore maggiore della pareti, quindi si utilizza il comando che permette di rilevare in modo automatico lo spessore del BLM. Questo comando produce un layer di spessore variabile in funzione dello spessore del pezzo in ogni punto. Lo spessore di questa struttura, composta da cinque livelli, è di 0,412 mm per le pareti laterali del pezzo e di 1 mm per la base. Poiché gli estrattori agiscono in corrispondenza dei quattro angoli della base occorre osservare il profilo di temperatura in questa zona dove lo spessore del BLM è di 1 mm, questa struttura della mesh è illustrata in figura 75.

Osservando la scala di colori si valuta che il gradiente di temperatura si sviluppi nei primi quattro livelli della mesh, quindi il gradiente si sviluppa in uno spessore di 0,8 mm.

Quando il polimero entra in contatto con lo stampo, poiché questo si trova ad una temperatura molto minore, raffredda molto velocemente e raggiunge una temperatura inferiore al freezing, il materiale in queste condizioni si trova allo stato solido quindi non è più in grado di fluire durante i successivi step di processo. Osservando la figura 75 si osserva che il materiale compreso all'interno del primo strato del BLM, cioè in uno spessore di 0,2 mm, costituisce la pelle fredda.

All'interno dello sprue e nella zona vicino al punto di iniezione si può osservare sotto la superficie uno strato rappresentato in rosso, questa zona raggiunge la temperatura di 229 °C. Questa temperatura è molto vicina al limite massimo oltre cui si ha degradazione del polimero.

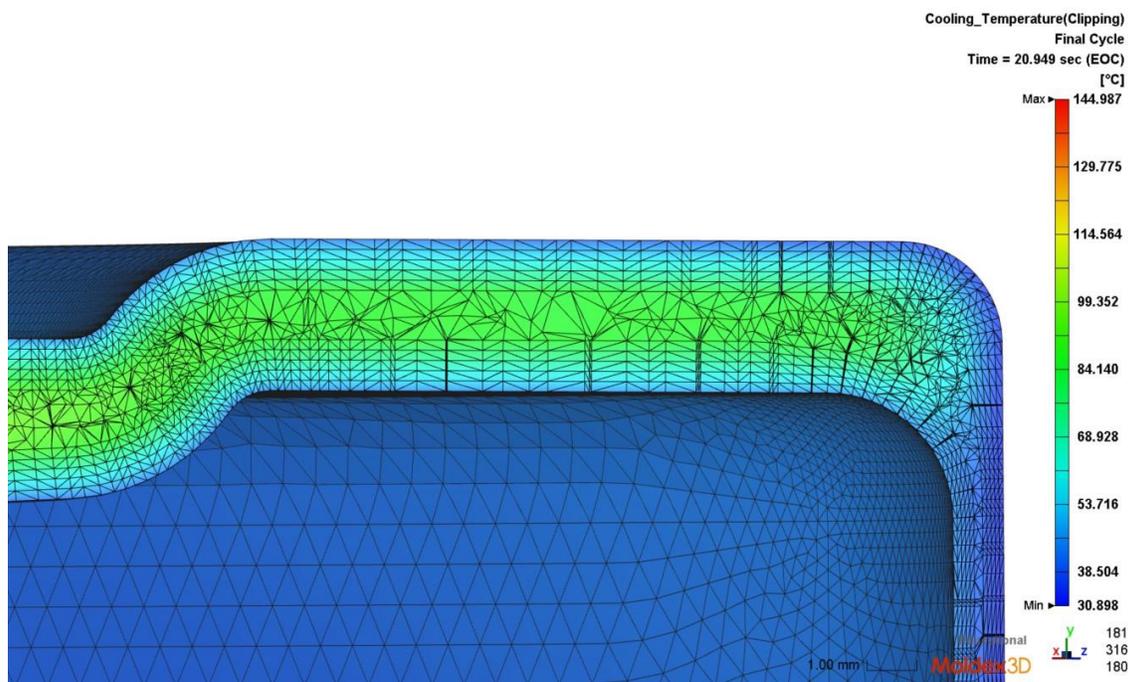


Figura 76 Profilo di temperatura al termine del cooling, Analisi 2.

In figura 76 è presente il diagramma della condizione di temperatura al termine del raffreddamento all'interno dello stampo. Questo risultato della simulazione può essere utilizzato per eseguire alcune valutazioni riguardo l'estrazione del pezzo.

Nei capitoli precedenti per calcolare il momento adeguato per l'estrazione è stato utilizzato il diagramma "time to reach ejection". Questo risultato valuta una condizione generale dell'intero pezzo, cioè definisce la quantità di materiale solidificato sufficiente affinché si possa estrarre il pezzo; invece non si tengono in considerazione le caratteristiche specifiche della geometria del pezzo stampato.

Il pezzo studiato possiede due caratteristiche particolari da tenere in considerazione. La prima caratteristica è che possiede un basso angolo di spoglia; ciò significa che durante l'estrazione le pareti laterali del pezzo devono scivolare sulle pareti dello stampo, questo genera un attrito e di conseguenza gli estrattori devono applicare una maggiore forza per permettere l'estrazione. La seconda caratteristica riguarda gli estrattori; la superficie di contatto fra estrattori e pezzo è piccola, quindi durante l'estrazione viene applicata un'intensa pressione nel punto di contatto.

A causa delle due caratteristiche appena descritte la zona del pezzo su cui gli estrattori agiscono è sottoposta ad un elevato sforzo, quindi al momento dell'estrazione è necessario che il materiale

possessa sufficienti proprietà meccaniche per evitare che gli estrattori possano rompere il pezzo. Perché il materiale posseda sufficienti proprietà meccaniche in questa zona è necessario che un adeguato volume di materiale si trovi ad una temperatura inferiore al freezing al momento dell'estrazione.

La figura 76 permette di osservare la condizione di temperatura al termine del raffreddamento a cui si trova il materiale nella zona in cui agiscono gli estrattori. Tutta la sezione del pezzo si trova ad una temperatura inferiore o uguale alla temperatura di estrazione, la massima temperatura a cui si trova circa un terzo del materiale al centro della sezione è 80 °C. Quindi facendo riferimento alle proprietà del materiale disponibili in letteratura e al risultato della simulazione, la porzione di materiale su cui agiscono gli estrattori ha una temperatura e delle proprietà meccaniche adeguate per sopportare l'estrazione.

CAPITOLO 9 CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE LUMINY PLA L130

Le simulazioni del processo produttivo descritte nei precedenti capitoli sono state eseguite partendo dai dati presenti in letteratura del materiale Luminy PLA L130 e utilizzando le proprietà di un materiale simile, il PLA Ingeo 3251D, in quei casi in cui i dati del Luminy non erano disponibili. Per valutare la qualità delle simulazioni così prodotte occorre analizzare le proprietà reologiche e termomeccaniche del Luminy in modo da verificare l'attendibilità delle simulazioni e definire le cause di malfunzionamento.

Per analizzare le proprietà reologiche del Luminy PLA L130 si utilizzano le analisi DSST e DFST, per analizzare il comportamento termomeccanico si utilizza l'analisi DMTA.

9.1 Curve reologiche prodotte con test dinamici

Per misurare la viscosità del Luminy PLA L130 si utilizzano due test dinamici al reometro rotazionale. Entrambi i test consistono nell'applicare una deformazione sinusoidale al provino e misurare la risposta del materiale in termini di sforzo.

Considerando di applicare una deformazione sinusoidale ad un materiale perfettamente elastico si può osservare che lo sforzo prodotto è direttamente proporzionale alla deformazione, inoltre lo sforzo sinusoidale sviluppato si trova in fase con la funzione della deformazione.

Considerando invece di applicare una deformazione sinusoidale ad un fluido viscoso, si osserva che lo sforzo prodotto è direttamente proporzionale allo shear rate e la risposta è sfasata di 90° rispetto alla deformazione applicata.

In generale i materiali polimerici possiedono un comportamento intermedio tra le due condizioni appena citate, applicando quindi una deformazione sinusoidale in funzione dello sforzo prodotto sarà sfasata di un angolo intermedio tra 0° e 90° rispetto alla deformazione.

Alla luce di queste considerazioni è possibile caratterizzare il comportamento visco-elastico del materiale utilizzando due termini; G' è lo Storage Modulus, che caratterizza il contributo elastico, e G'' è il Loss Modulus, che caratterizza il contributo viscoso.

9.1.1 Dynamic Strain Sweep Test (DSST)

La prima prova che deve essere eseguita è il Dynamic strain sweep test. La prova viene condotta a temperatura costante e a frequenza di deformazione costante; la frequenza di vibrazione impostata è la massima consentita, 100 rad/s , in modo da porsi nelle condizioni più critiche. Il reometro applica una deformazione sinusoidale di ampiezza variabile, in funzione dell'ampiezza di vibrazione si misurano il modulo G' e G'' .

L'obiettivo di questo test è determinare la regione di viscoelasticità lineare (LVR), cioè quella zona in cui i moduli G' e G'' sono indipendenti dall'ampiezza di deformazione applicata. Quindi, costruendo i grafici di G' e G'' in funzione dell'ampiezza di deformazione, la LVR è la zona in cui le funzioni sono costanti.

Il primo step dell'analisi della reologia è identificare la LVR poiché la successiva prova DFST viene eseguita in queste condizioni. In questo modo si ottiene una migliore riproducibilità dell'analisi e si determinano le proprietà caratteristiche del materiale.

9.1.2 Dynamic Frequency Sweep Test (DFST)

Questa prova viene condotta a temperatura costante e a deformazione costante, utilizzando il valore di ampiezza che rientra nel LVR. Il reometro applica al provino una deformazione sinusoidale con frequenza variabile e misura i parametri G' , G'' e la viscosità h .

In questo caso la variabile è la frequenza, cioè significa misurare il comportamento viscoelastico in funzione della velocità di deformazione. Applicando basse frequenze di vibrazione, cioè una deformazione lenta, prevale il comportamento viscoso del materiale, quindi il modulo G'' è maggiore di G' . Applicando invece un'elevata frequenza, cioè una deformazione veloce, il modulo G' si avvicina a G'' e oltre alla frequenza di cross over diventa maggiore; in questo caso il materiale ha prevalentemente il comportamento di un solido elastico.

9.1.3 Apparato sperimentale e provino

Per eseguire la DSST e la DFST si utilizza il reometro rotazionale TA Ares che può essere osservato in figura 77. Il reometro è costituito da due piatti tra i quali è montato il provino; il piatto inferiore è mobile e permette di applicare il profilo di deformazione, il piatto superiore è collegato ad un trasduttore che permette di misurare lo sforzo prodotto. Il reometro possiede un elemento di riscaldamento che permette di controllare la temperatura del provino durante la prova; la zona in cui è montato il provino è contenuta all'interno di una camera in materiale refrattario, per eseguire il riscaldamento del campione e mantenere la temperatura si insuffla nella camera un getto di aria a temperatura controllata.

La prova viene eseguita utilizzando la configurazione a piatti piani paralleli e si utilizza un provino di diametro 25 mm e spessore 1 mm. In figura 78 si può osservare la configurazione dei piatti e del sistema di riscaldamento.



Figura 77 Reometro rotazionale TA Ares.



Figura 78 Dettaglio del reometro. Camera riscaldata in materiale refrattario e configurazione a piatti piani paralleli.

9.1.4 Analisi DSST

Per eseguire l'analisi DSST si applicano le condizioni riportate in tabella 31.

Tabella 31 Parametri di analisi applicati alla DSST di Luminy PLA L130.

Temperatura	180	°C
Frequenza	100	rad/s
Range di deformazione	0-100	rad

Il risultato della prova DSST è il grafico 1.

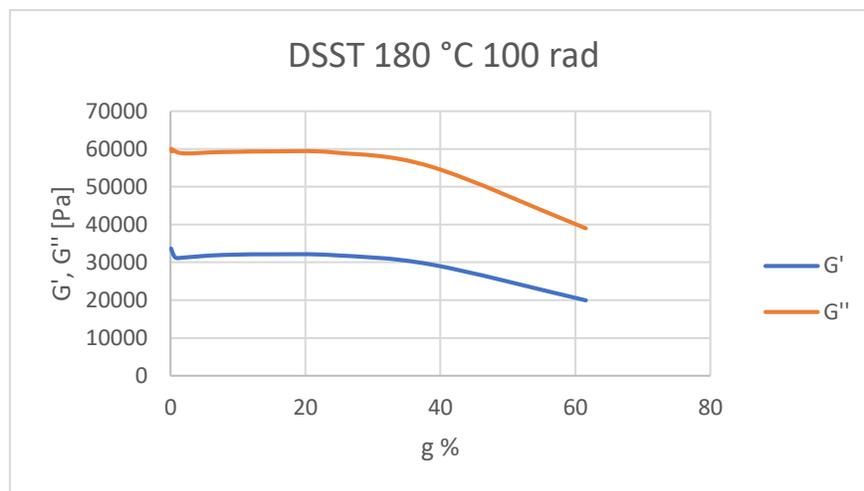


Grafico 1 Risultato dell'analisi DSST del Luminy PLA L130.

Analizzando il risultato della DSST eseguito sul Luminy PLA L130 si osserva che il campo viscoelastico lineare si sviluppa fino al 24% della deformazione. Per eseguire l'analisi successiva si sceglie il valore di deformazione del 10%; questo valore si trova all'interno del LVR e allo stesso tempo permette di sviluppare uno sforzo sufficiente per avere un segnale della DFST adeguato.

9.1.5 Analisi DFST

L'analisi reologica eseguita è composta da tre diverse analisi DFST eseguite a 3 diverse temperature. Le temperature utilizzate per l'analisi sono state scelte in relazione al range di temperatura in cui è possibile iniettare il PLA e l'obiettivo è ottenere dei dati che possano essere utilizzati per valutare il modello fluidodinamico che il programma Moldex3D propone e apportare le correzioni necessarie. Tutte le prove sono state eseguite sullo stesso provino quindi per evitare che le analisi si influenzino tra loro sono state eseguite in ordine con temperature crescenti.

Per eseguire le analisi DFST si utilizzano i parametri esposti in tabella 32.

Tabella 32 Parametri di analisi applicati alla DFST di Luminy PLA L130.

Prova 1	Temperatura	180	°C
	Deformazione	10	%
	Range di frequenza	100-0,1	rad/s
Prova 2	Temperatura	200	°C
	Deformazione	10	%
	Range di frequenza	100-0,1	rad/s
Prova 3	Temperatura	220	°C
	Deformazione	10	%
	Range di frequenza	100-0,1	rad/s

I risultati delle 3 prove DFST eseguite sono riassunti all'interno di grafico 2.

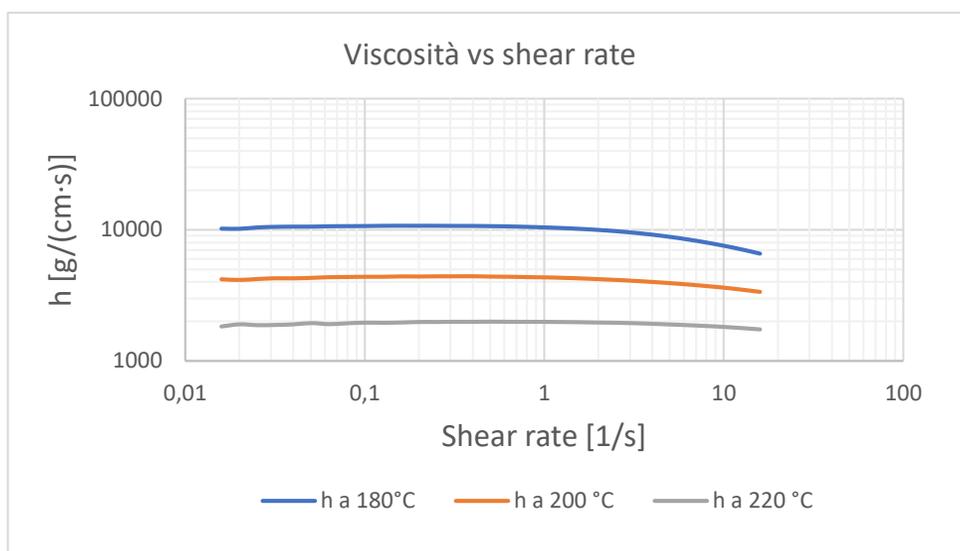


Grafico 2 Risultato delle analisi DFST condotte sul Luminy PLA L130, viscosità in funzione dello shear rate al variare della temperatura.

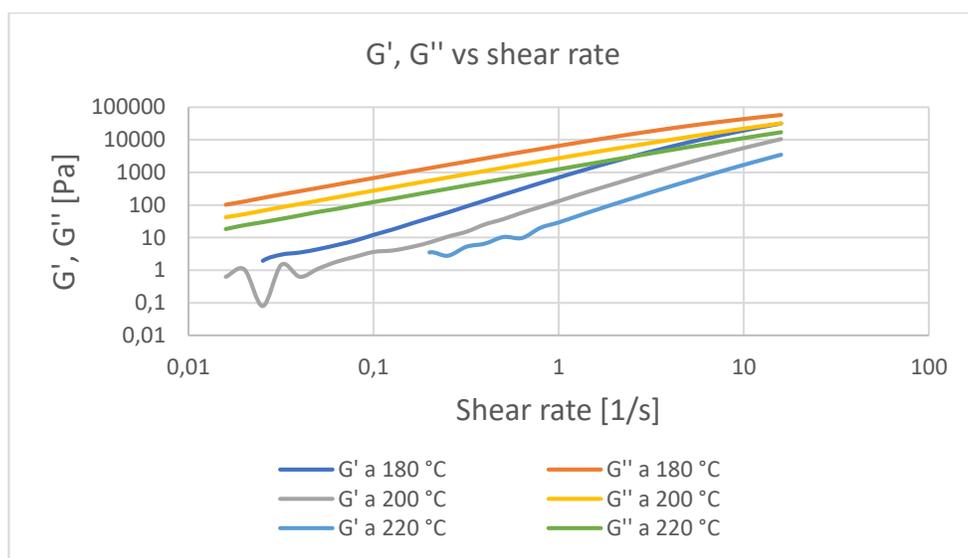


Grafico 3 Risultato delle analisi DFST condotte sul Luminy PLA L130, moduli G' e G'' in funzione dello shear rate al variare della temperatura.

Confrontando tra loro i risultati ottenuti con l'analisi DFST è possibile ottenere alcune considerazioni.

All'aumentare della temperatura la viscosità diminuisce significativamente, a bassi valori di shear il PLA a 180 °C possiede una viscosità di circa 10^4 g/(cm·s) mentre a 220 °C la viscosità è di $2 \cdot 10^3$ g/(cm·s), cioè si riduce di circa un ordine di grandezza.

Si può osservare che le curve a maggiore temperatura hanno un andamento più regolare e inoltre a 220 °C la curva della viscosità tende ad essere piana, questo andamento indica che la viscosità non varia significativamente in funzione dello shear rate applicato. Per questo motivo a 200 °C e a bassi valori di shear il comportamento del materiale fuso si avvicina a quello di un fluido Newtoniano.

Analizzando l'andamento delle curve di G' si osservano delle fluttuazioni nel valore misurato per bassi valori di rate. Questo disturbo aumenta all'aumentare della temperatura ed è causato dal fatto che si lavora a bassi valori di frequenza vicino al limite strumentale. Di fatto in queste condizioni il polimero è allo stato liquido e quindi non è possibile definire il modulo elastico.

I risultati ottenuti dall'analisi DFST possono essere confrontati con i dati applicati per sviluppare le simulazioni. Poiché non sono disponibili i dati completi per caratterizzare il Luminy PLA L130 le proprietà non note sono state sostituite con quelle del polimero PLA Ingeo 3251D, così come descritto nel capitolo 3. Per verificare l'attendibilità e l'accuratezza delle simulazioni, si confrontano i risultati delle prove di reologia con i parametri utilizzati per la simulazione. Il grafico 5 definisce il comportamento reologico del PLA Ingeo 3251D.

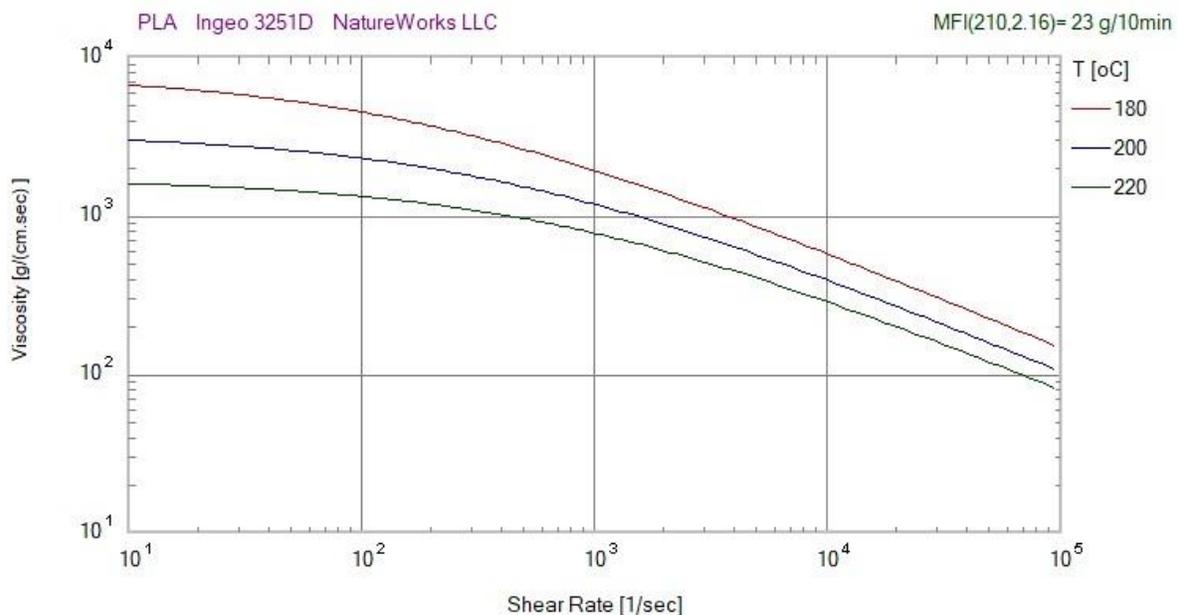


Grafico 4 Grafico viscosità versus shear rate relativo al materiale PLA Ingeo 3251D.

Si osserva che nel range di frequenza comune ad entrambi i grafici, tra 10 e 20 Herz, i grafici hanno un andamento simile e come osservato precedentemente all'aumentare della temperatura si avvicina ad un comportamento Newtoniano. I valori di viscosità sono invece diversi; confrontando le curve di shear rate a uguale temperatura il Luminy PLA L130 ha una viscosità di circa 500 g/(cm·s) maggiore dell'Ingeo 3251D. Questo significa che le proprietà inizialmente utilizzate per eseguire le simulazioni sottostimano la viscosità, cioè il polimero iniettato ha una fluidità minore rispetto al polimero utilizzato per le simulazioni.

Il programma Moldex 3D non permette di definire le proprietà reologiche importando direttamente i valori di viscosità misurati, occorre invece definire un modello di viscosità che approssimi il comportamento reologico del materiale.

La viscosità del PLA Ingeo 3251D è definita con il modello di Cross modificato. Questo modello permette di calcolare la viscosità in funzione dello shear rate, della temperatura e della pressione utilizzando 4 equazioni. Poiché la DFST non permette di valutare la dipendenza dalla pressione e poiché il database di Moldex 3D non possiede i dati necessari, si trascura il contributo della pressione sulla viscosità. Il modello si esprime quindi utilizzando le equazioni 9.1 e 9.2.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (9.1)$$

$$\eta_0 = D_1 \exp\left(\frac{-A_1(T-T_c)}{A_2+(T-T_c)}\right) \quad (9.2)$$

η_0 è la viscosità di zero shear rate, τ^* è una costante correlata con lo shear stress nel punto di transizione tra comportamento Newtoniano e legge di potenza, infine n è l'indice della legge di potenza e considera il comportamento di shear thinning. [23]

Utilizzando i risultati dell'analisi reologica è possibile modificare il modello che definisce la viscosità del materiale, l'obiettivo è migliorare l'approssimazione.

Il programma di calcolo richiede di selezionare il modello di viscosità adeguato e di definire le costanti caratteristiche del modello che permettono di interpolare i valori di viscosità misurati durante le prove di reologia. Quindi partendo dai risultati della DFST occorre calcolare le costanti caratteristiche del modello di Cross modificato adeguate per approssimare il comportamento reologico del PLA Luminy L130.

Per calcolare le costanti caratteristiche del modello sarebbe necessario costruire e risolvere un sistema di 4 equazioni in 4 incognite. Nel caso analizzato non è possibile risolvere questo sistema poiché si hanno a disposizione 3 prove DFST. Tuttavia possono essere applicate alcune approssimazioni che permettono di ridurre il problema al solo calcolo di D_1 .

Secondo il modello WLF, da cui deriva l'equazione 9.2, è possibile in prima approssimazione considerare A_1 e A_2 delle costanti universali. Scegliendo come riferimento la temperatura $T_0 = T_g$, le costanti universali sono $A_1 = 17,44$ e $A_2 = 51,6 K$. [23]

Si utilizza il programma TA Orchestrator per analizzare le curve di viscosità riportate in grafico 2. Il programma permette di interpolare i dati e calcolare le costanti dell'equazione di Cross (9.1) che meglio approssima l'andamento delle curve di viscosità; in questo modo si estrapolano le costanti η_0 di ogni curva di viscosità.

Il programma calcola inoltre τ^* e n per ogni curva di viscosità; tuttavia nel caso analizzato non vengono prese in considerazione queste costanti e si applicano al modello le costanti riportate nel database di Moldex 3D relative al PLA Ingeo 3251D. I valori di queste costanti, estrapolati con il programma TA Orchestrator, sono molto variabili e non è possibile valutare quale di questi sia adeguato ad approssimare le curve. Infatti le curve di viscosità ottenute con la DFST si riferiscono ad un range di shear rate limitato e a basse frequenze, tra 10 Hz e 20 Hz, non è quindi possibile visualizzare il punto del grafico in cui si dimostrano gli effetti di τ^* e n cioè la zona ad alte frequenze in cui il comportamento del materiale tende all'andamento della legge esponenziale.

Partendo dai valori di D_1 calcolati e osservando l'effetto della variazione di questo parametro sull'andamento della funzione di Cross, si ricerca per tentativi il valore di D_1 che meglio approssima le curve di viscosità misurate. Il valore che permette di ottenere il migliore risultato è $D_1 = 1,4 \cdot 10^9$. Applicando questo parametro si ottiene il grafico 5, questo grafico rappresenta le proprietà fluidodinamiche del PLA Luminy L130 definite partendo dal modello relativo al PLA Ingeo 3251D e apportando le correzioni discusse in precedenza.

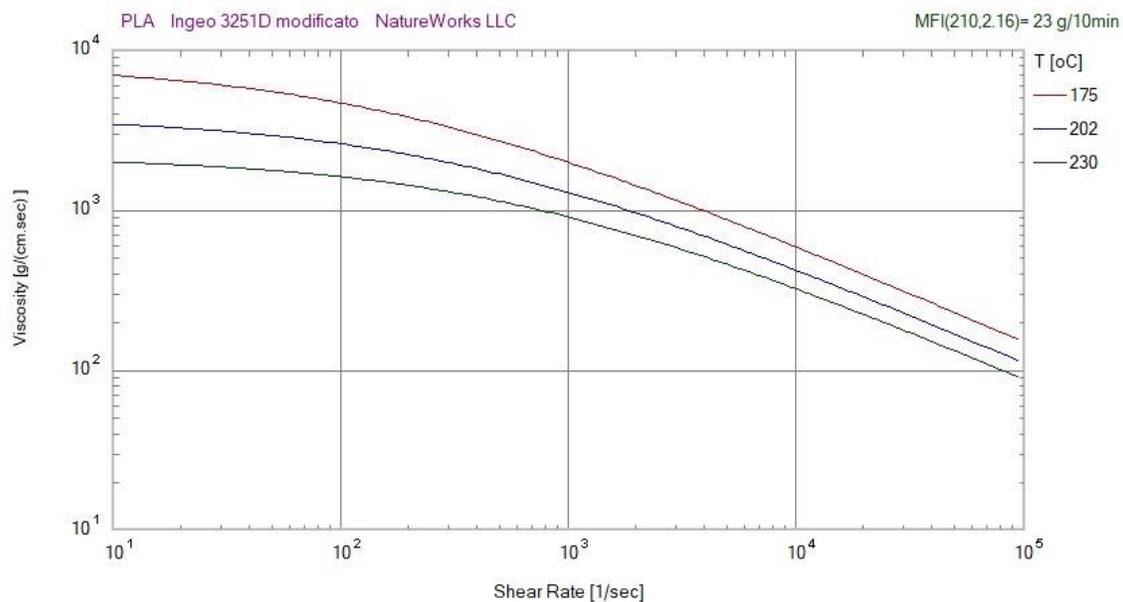


Grafico 5 Grafico viscosità versus shear rate relativo al materiale PLA Ingeo 3251D corretto secondo il risultato della DFST.

9.2 Analisi termomeccanica

La DMTA permette di analizzare il comportamento meccanico del materiale al variare della temperatura. Diversamente dalle analisi precedenti, DSST e DFST, il materiale si trova sempre allo stato solido durante la prova. Il dispositivo di analisi applica al provino una deformazione sinusoidale a frequenza e ampiezza costante e misura con un trasduttore lo sforzo prodotto al variare della temperatura impostata. Da questa misurazione si ricava l'andamento dei parametri G' e G'' al variare della temperatura. Il parametro G' è lo storage modulus, permette di definire la quantità di energia che viene immagazzinata nel pezzo sotto forma di deformazione elastica; il parametro G'' è il loss modulus, definisce la quantità di energia che viene dissipata a causa della deformazione plastica e dello scorrimento viscoso. Confrontando le curve di G' e G'' si identifica il comportamento del materiale al variare della temperatura, si osservano le condizioni in cui il materiale ha un comportamento prevalentemente elastico o prevalentemente plastico.

9.2.1 Apparato sperimentale e preparazione del provino

In figura 77 si può osservare lo strumento utilizzato per l'analisi DMTA. Il campione viene montato come mostrato in figura 78. Per eseguire l'analisi si utilizza un supporto dual cantilever; il provino viene fissato ai suoi due estremi e la deformazione viene applicata grazie al movimento del meccanismo centrale che agisce al centro del provino.

Il provino è una barretta di lunghezza 35 mm, larghezza 14,3 mm e spessore 1,5 mm. Le superfici laterali del campione devono essere levigate in modo da ottenere una barra di larghezza costante, è necessario eseguire questa operazione perché le dimensioni del provino sono un parametro di riferimento. Infatti la deformazione applicata durante la prova è impostata in riferimento alla dimensione del pezzo, in questo caso si applica una deformazione di 0,05%, che appartiene al campo lineare elastico.

Il provino è stato prodotto tagliando una porzione di materiale dal pezzo stampato, in particolare la porzione che si trova al centro di una delle facce laterali del bicchiere. Poiché il PLA utilizzato è un materiale semicristallino le sue proprietà termomeccaniche dipendono dalla fase in cui si trova. Il processo di raffreddamento determina il rapporto tra le fasi cristallina e amorfa e di conseguenza definisce le proprietà termomeccaniche del materiale stampato. Il risultato della DMTA è necessario per valutare il processo di estrazione del pezzo, per questo motivo occorre utilizzare un provino prodotto nelle stesse condizioni.

Il supporto del campione è contenuto all'interno di una camera chiusa e riscaldata, questo permette di impostare la rampa di temperatura al provino.

Per eseguire la DMTA si impostano i parametri riportati in tabella 33.

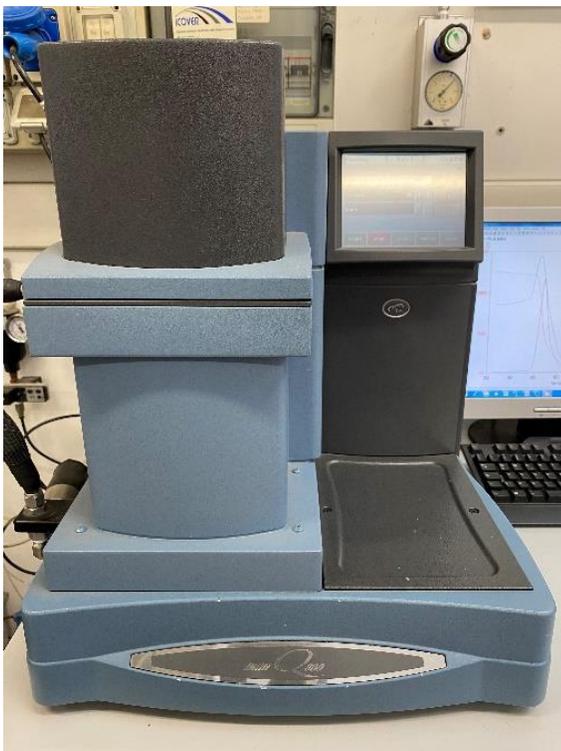


Figura 80 Strumento per DMA TA Q800.



Figura 79 Sistema di fissaggio del campione dual cantilever. [20]

Tabella 33 Parametri applicati all'analisi DMTA del Luminy PLA L130.

Modalità	Multi-Frequency-Strain	
Carico	Deformazione	
Deformazione	0,05	%
Frequenza	1	Hz
Rampa termica	3	°C/min
Range di temperature	25 - 150	°C

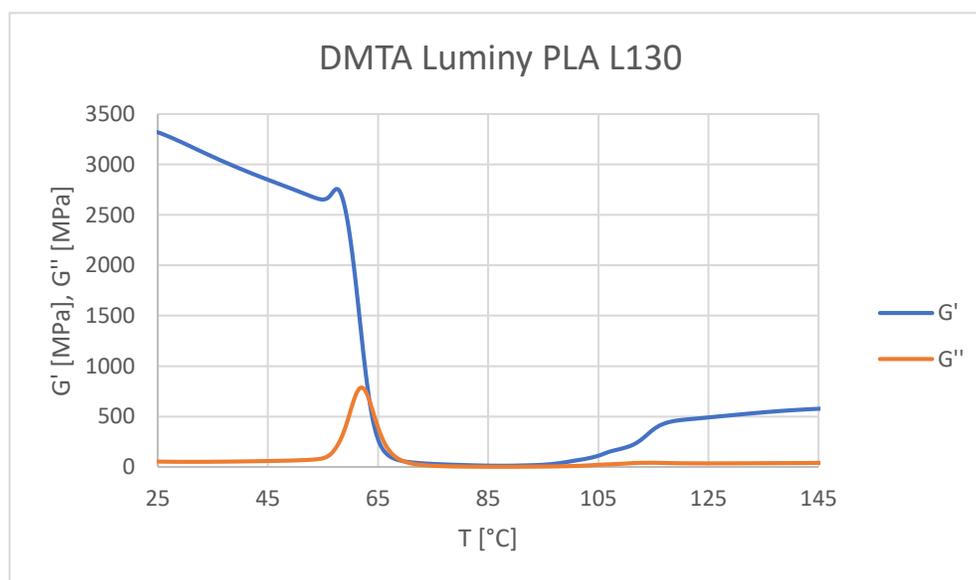


Grafico 6 Grafico G' , G'' vs T . Risultato dell'analisi DMTA del Luminy PLA L130.

9.2.2 Analisi dei risultati

Il risultato della prova DMTA del Luminy PLA L130 è il grafico 6.

Tra i 25°C e i 60°C il modulo di storage G' è molto maggiore del modulo di perdita G'' ; questo significa che il materiale ha un comportamento elastico.

Tra i 60 °C e i 65°C il modulo G' diminuisce molto rapidamente all'aumentare della temperatura e tende a 0. In corrispondenza dello stesso intervallo di temperature si osserva un picco nell'andamento del modulo G'' . Quindi oltre i 65°C il materiale ha un comportamento plastico.

Oltre i 100°C il modulo G' presenta una crescita. Questo andamento indica il processo di ricristallizzazione che il PLA subisce.

I grafici G' e G'' permettono di definire la temperatura di transizione vetrosa del materiale. È possibile definire la T_g come il valore di temperatura a cui il grafico G' presenta la rapida diminuzione (ginocchio) oppure con la temperatura relativa al massimo del picco di G'' . Si considera la T_g definita dall'andamento di G' poiché questo valore è più conservativo. Si rileva: $T_g = 60^\circ\text{C}$.

Il modulo G' a temperature superiori a T_g scende a valori prossimi a 0, in queste condizioni il materiale ha un comportamento prevalentemente plastico. Se si estraesse il pezzo stampato in queste condizioni di temperatura lo sforzo applicato dagli estrattori tenderebbe a deformare plasticamente il materiale e a forare il pezzo nei punti di contatto. Per estrarre il pezzo senza danneggiarlo occorre che il materiale abbia un comportamento elastico; in queste condizioni il pezzo mantiene la sua forma durante l'estrazione.

Oltre la temperatura di transizione vetrosa la resistenza meccanica del polimero diminuisce mentre si verifica il rammollimento. Confrontata con lo spessore del pezzo la superficie su cui agiscono gli estrattori è piccola, quindi viene applicata una forte pressione per estrarre il pezzo. Inoltre occorre considerare che il ritiro produce una adesione tra punzone e pezzo e di conseguenza è richiesta una maggiore forza per l'estrazione. Quindi lo stato di tensione che si determina durante l'estrazione è una condizione critica che richiede che il materiale posseda la migliore resistenza meccanica possibile.

Per questi due motivi è conveniente estrarre il pezzo prodotto con il Luminy PLA L130 ad una temperatura inferiore alla T_g , cioè quando il pezzo si trova ad una temperatura inferiore a 60°C.

9.3 Caratterizzazione del materiale Luminy PLA L130

Nei capitoli 4, 5, 6, 7 e 8 è stato discusso il problema dell'ottimizzazione dei parametri di processo, le simulazioni proposte in questi capitoli hanno l'obiettivo di studiare i fenomeni fluidodinamici e termodinamici che avvengono durante lo stampaggio dell'oggetto in analisi e proporre una strategia di sviluppo che permetta di ottimizzare i parametri di processo durante le prove di stampaggio. Per eseguire queste simulazioni è stato utilizzato il file mtr disponibile all'interno del database del programma relativo al polimero PLA Ingeo 3251D, le proprietà reologiche di questo polimero differiscono significativamente da quelle del Luminy PLA L130 utilizzato per le prove di stampaggio, come dimostrato dalle analisi riportate in questo capitolo. Al fine dell'ottimizzazione dei parametri di processo questa approssimazione è sufficiente poiché non è necessario confrontare i risultati delle simulazioni con i risultati delle prove di stampaggio. Invece le simulazioni che saranno svolte successivamente nel corso di questa tesi richiedono che le proprietà del materiale siano quelle specifiche del polimero utilizzato per le prove di stampaggio, poiché i risultati di queste simulazioni saranno confrontati con i parametri applicati alle prove. Per costruire il file mtr che contenga tutte le proprietà disponibili per il Luminy PLA L130 si utilizza il file a disposizione del Ingeo 3251D e si modificano le proprietà reologiche ottenute con le prove di laboratorio discusse in precedenza. Le proprietà del materiale Luminy PLA L130, caratterizzato come descritto in precedenza, utilizzate per sviluppare le simulazioni di Analisi 14, Analisi 15, Analisi 16 e Analisi 17 sono descritte da tabella 1, tabella 2, tabella 3 e da grafico 5.

CAPITOLO 10 PROVE DI STAMPAGGIO

In questo capitolo sono descritte le prove di stampaggio eseguite per verificare e analizzare i risultati teorici ottenuti con le simulazioni di Moldex3D.

I parametri da applicare sono scelti in base ai risultati delle simulazioni. L'obiettivo delle prove è uguale all'obiettivo delle simulazioni: ottimizzare tempo ciclo, deformazione del pezzo e estrazione.

L'analisi delle simulazioni ha permesso di identificare i parametri che hanno un impatto sul processo produttivo e definire alcune strategie con cui ottimizzare il processo e le proprietà del pezzo stampato.

Non è possibile applicare direttamente i parametri ottimizzati attraverso le simulazioni, poiché la simulazione potrebbe non considerare alcuni fattori che rendono irrealizzabile il prodotto. Quindi, seguendo le strategie identificate in precedenza, si modificano progressivamente i parametri di processo.

Nei capitoli 5, 6 e 7 sono stati proposti tre metodi per ottimizzare processo produttivo e proprietà del pezzo.

Per ridurre il tempo ciclo è possibile abbassare la temperatura con cui il polimero viene iniettato nello stampo. Questa soluzione permette di ottenere il migliore effetto in termini di riduzione del tempo ciclo.

La pressione di packing ha un forte impatto su ritiro e deformazione del pezzo e inoltre ha effetto sul tempo di cooling. Le simulazioni mostrano che i migliori risultati si ottengono applicando una pressione variabile. Utilizzando un profilo di pressione a due step definito da un primo step a bassa pressione e un secondo a pressione maggiore si riducono deformazioni e ritiri del pezzo; utilizzando invece un profilo a due step, applicando durante il secondo intervallo una pressione minore rispetto al primo, si ottiene un buon risultato in termini di deformazioni e ritiri e contemporaneamente si riduce il tempo ciclo.

10.1 Prova 1

La prova 1 è definita per studiare il processo di riempimento dello stampo. Per analizzare il flusso di materiale che si sviluppa durante l'iniezione si eseguono 7 stampate applicando gli stessi parametri di processo ma modificando la quantità di materiale che viene iniettata. Impostando la quantità di materiale iniettato tra 50% e 80% della massa del pezzo la pressa non è in grado di riempire totalmente lo stampo; quindi, raffreddando il materiale, rimane fissato il profilo di avanzamento del materiale in una specifica posizione dello stampo.

Per eseguire questa prova si applicano i parametri indicati in tabella 34.

Tabella 34 Parametri di processo applicati a Prova 1.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	70
Riempimento	%	50-55-60-65-70-75-80
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
$t_{packing}$	s	8
$t_{cooling}$	s	50
N_{prove}		1

Applicando i parametri di Prova 1 si ottengono i campioni in figura 81. Il materiale viene iniettato all'interno della cavità dello stampo partendo dal centro della base del pezzo, quindi il bordo superiore di ogni campione possiede la forma determinata dal flusso di avanzamento del materiale.

Tutti i campioni hanno una forma caratteristica; il materiale in corrispondenza degli spigoli si trova in una posizione avanzata. Confrontando tra loro i campioni si osserva che il bordo superiore ha sempre la stessa forma, questo significa che il flusso tra il 50% e 80% del riempimento si trova in regime stazionario.



Figura 81 Profilo di avanzamento del materiale, campioni di Prova 1.

10.2 Prova 2

L'obiettivo di questa prova è analizzare la temperatura del pezzo e dello stampo al termine del processo di stampaggio, per eseguire questa misura si utilizza la telecamera a infrarossi Optris PI 640i nella configurazione descritta nel capitolo 3.

Questa prova permette di sviluppare 2 valutazioni. Si analizza la temperatura a cui si trova il polimero nel momento in cui viene aperto lo stampo e gli estrattori entrano in funzione; confrontando questi dati con le proprietà termomeccaniche descritte in precedenza e le simulazioni di Moldex 3D è possibile valutare le condizioni di temperatura necessarie affinché il pezzo possa essere estratto in sicurezza, senza che venga danneggiato dagli estrattori.

Inoltre la telecamera a infrarossi permette di monitorare la temperatura dello stampo. Durante il processo di stampaggio la temperatura dello stampo varia a causa dell'iniezione del polimero allo stato liquido; le simulazioni analizzate in precedenza hanno mostrato come il processo dipenda in modo significativo dalla temperatura dello stampo.

Lo stampaggio a iniezione è un processo ripetitivo, dopo l'estrazione lo stampo viene chiuso per iniziare un nuovo ciclo. Quindi è di interesse analizzare come varia la temperatura tra l'istante in cui viene aperto lo stampo e l'istante in cui viene chiuso; infatti il ciclo produttivo è progettato considerando che lo stampo si trovi ad una specifica temperatura, le condizioni operative potrebbero portare ad una fluttuazione di questa temperatura che modificherebbe le condizioni di stampaggio del ciclo successivo.

Il primo ciclo di stampaggio viene eseguito applicando i parametri impostati, nel corso dei cicli successivi la temperatura dello stampo varia e tende a raggiungere una condizione di regime che viene mantenuta durante la produzione.

Per eseguire la termometria è necessario calibrare il sistema di misura. La telecamera termica analizza l'intensità della radiazione infrarossa emessa dall'oggetto; l'intensità della radiazione dipende dalla temperatura del pezzo e dalla proprietà ottiche del materiale analizzato. Occorre quindi definire l'emissività ϵ , cioè la costante del materiale che quantifica la capacità di emettere la radiazione.

Sulla superficie dello stampo è depositato un coating diamond-like carbon di colore nero, per le sue caratteristiche ottiche si può assumere $\epsilon = 1$, cioè può essere considerato come corpo nero.

E' invece più complesso definire l'emissività del PLA; per il Lunimy L130 questo parametro non è noto e viene quindi approssimato con il valore di ϵ relativo ad un altro PLA, l' Ingeo 2003D.

Per analizzare la termografia si imposta $\epsilon = 1$ per lo stampo e $\epsilon = 0,92$ [24] per il pezzo stampato.

Per eseguire Prova 2, sono stati prodotti in modo continuo 5 pezzi. La temperatura è stata misurata al momento dell'apertura dello stampo del quinto ciclo e all'istante in cui lo stampo è pronto per chiudersi e iniziare il sesto ciclo.

In tabella 35 sono riportati i parametri di processo applicati a Prova 2.

Tabella 35 Parametri di processo applicati a Prova 2.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	70
$P_{packing}$	MPa	70
VP_{switch}	%	95
T_{inj}	°C	190
T_{mold}	°C	30
$t_{packing}$	s	8
$t_{cooling}$	s	50
N_{prove}		5

In figura 82 si riporta l'immagine termica del pezzo nel momento in cui si apre lo stampo, in tabella 36 si riportano i valori di temperatura raggiunti in ogni area identificata in figura 82.

L'immagine termica in figura 83 si riferisce all'istante in cui può iniziare il nuovo ciclo, in tabella 37 si riportano i valori di temperatura raggiunti in ogni area identificata in figura 83.

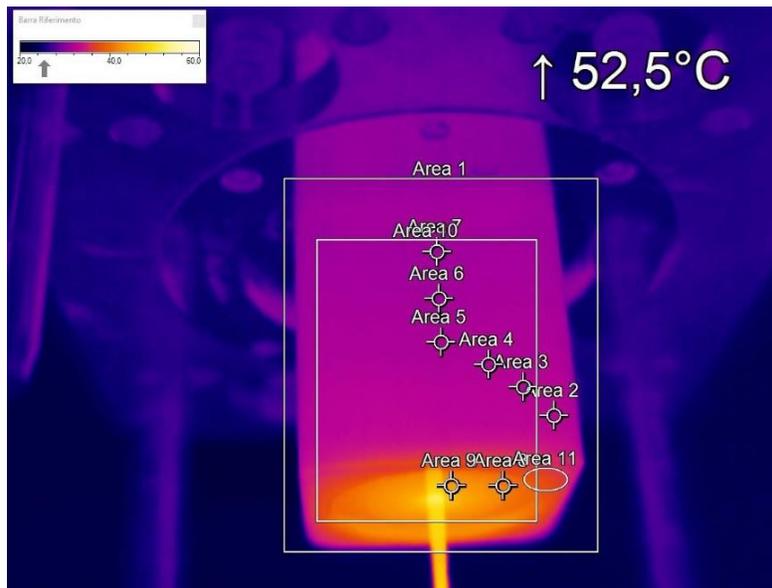


Figura 82 Immagine termica del pezzo al momento dell'apertura dello stampo.

Tabella 36 Valori di temperature raggiunti nelle area indicate in figura 80.

Area	Metodo di misura	temperatura
1	Valore massimo	52,5 °C
2	Valore medio	32,2 °C
3	Valore medio	32 °C
4	Valore medio	31,6 °C
5	Valore medio	31,3 °C
6	Valore medio	30,8 °C
7	Valore medio	30,8 °C
8	Valore medio	41,1 °C
9	Valore medio	43,3 °C
10	Valore medio	33,6 °C
11	Valore massimo	39,0 °C

L'immagine in figura 82 permette di osservare la distribuzione delle temperature sulla superficie del pezzo al momento in cui viene aperto lo stampo. Si osserva che la temperatura in corrispondenza delle pareti e della base del pezzo è molto diversa. Le pareti del pezzo si trovano ad una temperatura poco superiore a 30 °C, la zona nell'angolo inferiore della superficie, Area 2, si trova ad una temperatura maggiore; muovendosi verso il centro della faccia e poi verso lo spigolo superiore, in ordine Aree 3, 4, 5, 6 e 7, la temperatura diminuisce progressivamente.

La temperatura della base del pezzo, cioè la parete al centro della quale si inietta il materiale, si trova ad una temperatura maggiore rispetto alle pareti laterali. In corrispondenza del punto di iniezione si misura la temperatura maggiore (52,5 °C); allontanandosi dal centro la temperatura progressivamente diminuisce. Area 11 identifica il punto in cui, sulla superficie opposta, agiscono gli estrattori; in questa zona la temperatura massima è di 39 °C. Occorre inoltre considerare che il valore misurato indica la temperatura della superficie mentre all'interno del pezzo si sviluppa un gradiente simile a quello proposto dalla simulazione discussa nel capitolo 8. Tutti i pezzi prodotti

nelle condizioni operative di Prova 2 sono stati estratti dalla pressa senza causare rotture in corrispondenza degli estrattori. Quindi nelle condizioni di temperatura misurate il materiale possiede una resistenza meccanica e una rigidità sufficienti per l'estrazione.

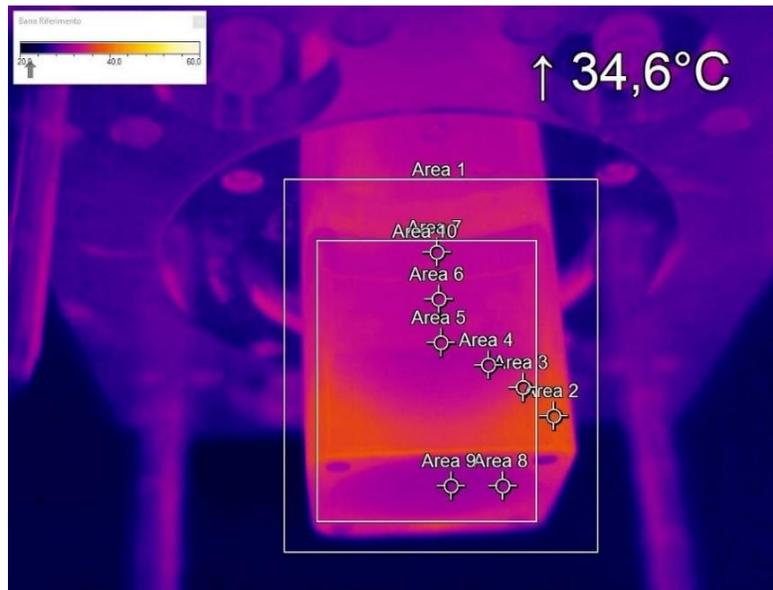


Figura 83 Immagine termica del punzone dello stampo al momento della chiusura.

Tabella 37 Valori di temperature raggiunti nelle area indicate in figura 81.

Area	Metodo di misura	temperatura
1	Valore massimo	34,6 °C
2	Valore medio	33,6 °C
3	Valore medio	31,8 °C
4	Valore medio	29,4 °C
5	Valore medio	29,5 °C
6	Valore medio	29,2 °C
7	Valore medio	29,3 °C
8	Valore medio	28,4 °C
9	Valore medio	28 °C
10	Valore medio	30,2 °C

Figura 83 permette di visualizzare la distribuzione delle temperature sulla superficie dello stampo nell'istante in cui lo stampo si richiude per iniziare un nuovo ciclo. La temperatura sulla superficie dello stampo non è omogenea, infatti si osservano zone in cui la temperatura è maggiore. Le zone più calde si trovano in corrispondenza dei quattro vertici del punzone, qui, in Area 2, la temperatura media è di 33,6 °C. Spostando il punto di osservazione verso il centro della faccia laterale e verso la base del punzone, in ordine Aree 3, 4, 5, 6 e 7, la temperatura diminuisce progressivamente fino a circa 29 °C. Il centro della faccia superiore, Aree 8 e 9, si trova a circa 28 °C. La temperatura impostata è di 30 °C, la temperatura media misurata è 30,2 °C, quindi la temperatura misurata è circa uguale alla temperatura teorica. Benché la temperatura media sia quella impostata si verificano significativi gradienti, infatti la temperatura può variare di 5 °C tra zone diverse dello stampo.

Le zone in corrispondenza dei quattro vertici, Area 2, si trovano alla temperatura maggiore. Questo avviene a causa della geometria dello stampo che in queste zone espone una maggiore superficie al polimero caldo, inoltre i canali di raffreddamento, a causa della loro forma cilindrica, si trovano più distanti dagli spigoli rispetto al centro delle facce.

10.3 Prova 3

L'obiettivo delle prove di stampaggio è ottimizzare i parametri di processo e le proprietà del prodotto. Analogamente a quando fatto per le simulazioni con Moldex 3D il risultato della prima prova viene utilizzato come riferimento, le successive prove vengono ideate a partire dal risultato delle precedenti.

Prova 3 viene eseguita applicando i parametri di processo indicati in tabella 38. Il pezzo prodotto viene mostrato in figura 84.

Tabella 38 Parametri di processo applicati a Prova 3.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	70
$P_{packing}$	MPa	70
VP_{switch}	%	85
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
$t_{packing}$	s	9
$t_{cooling}$	s	50
N_{prove}		6

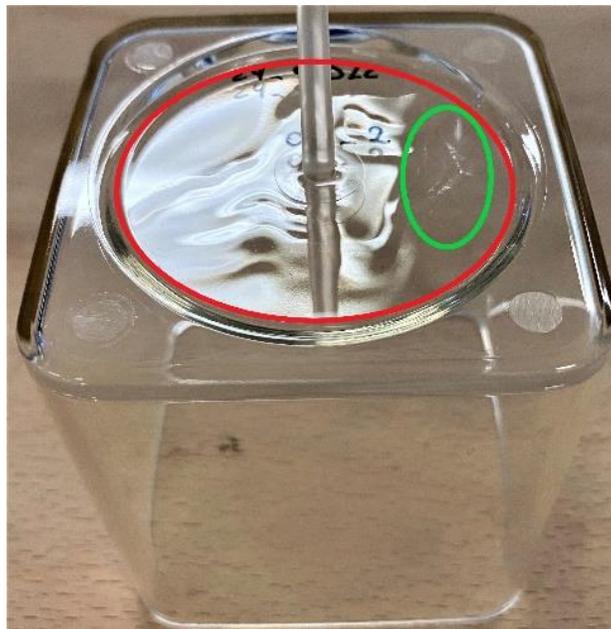


Figura 84 Pezzo prodotto applicando le condizioni di Prova 3.

Il pezzo stampato nelle condizioni di Prova 3 possiede numerosi difetti. Il bordo superiore del pezzo presenta segni di ritiro, tuttavia i maggiori difetti si concentrano nella zona della base.

Si osserva un ritiro che coinvolge un'ampia zona della superficie di base, all'incirca la porzione contenuta nel fondo del bicchiere. L'area interessata dal ritiro è evidenziata con il cerchio rosso.

Inoltre si possono notare alcuni punti in cui il materiale risulta opaco, evidenziati con un cerchio verde in figura 84; in questo caso è entrato all'interno dello stampo del materiale freddo e quindi con una maggiore viscosità. Prima di iniettare il polimero l'elemento di iniezione è staccato dallo stampo, il materiale in punta all'iniettore entra in contatto con l'ambiente esterno a bassa temperatura, se il materiale rimane a contatto con l'aria per un tempo prolungato la superficie solidifica. Nel momento dell'iniezione la parte solida viene spinta all'interno dello stampo e poiché non è in grado di fluire produce un difetto.

10.4 Prova 4

Le simulazioni eseguite con Moldex 3D hanno rivelato l'effetto della pressione di packing su deformazioni e ritiro del pezzo.

Prova 4 viene eseguita applicando i parametri in tabella 39, la pressione di packing applicata segue il profilo indicato dal grafico 7. Rispetto al caso precedente (Prova 3) la pressione aumenta durante i primi 3 secondi e diminuisce nei successivi 6 secondi fino a ritornare alla pressione di partenza; l'obiettivo è ridurre il ritiro e i risucchi modificando gradualmente la pressione.

Tabella 39 Parametri di processo applicati a Prova 4.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	70
VP_{switch}	%	95
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
$t_{cooling}$	s	50
N_{prove}		3

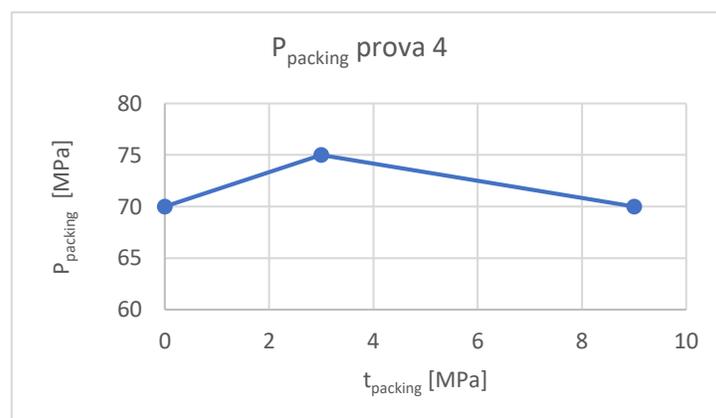


Grafico 7 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 4.

Il risultato ottenuto applicando questi parametri può essere osservato in figura 85. Rispetto al caso precedente, Prova 3, il pezzo prodotto è di migliore qualità; il risucchio che si forma sulla superficie di base è ridotto ma coinvolge comunque l'intera superficie del fondo, zona evidenziata con il cerchio rosso, inoltre sono ancora visibili i difetti causati dall'iniezione di materiale freddo, questi sono evidenziati in figura 85 con un cerchio verde. Le pareti del pezzo invece non presentano difetti causati dal ritiro.

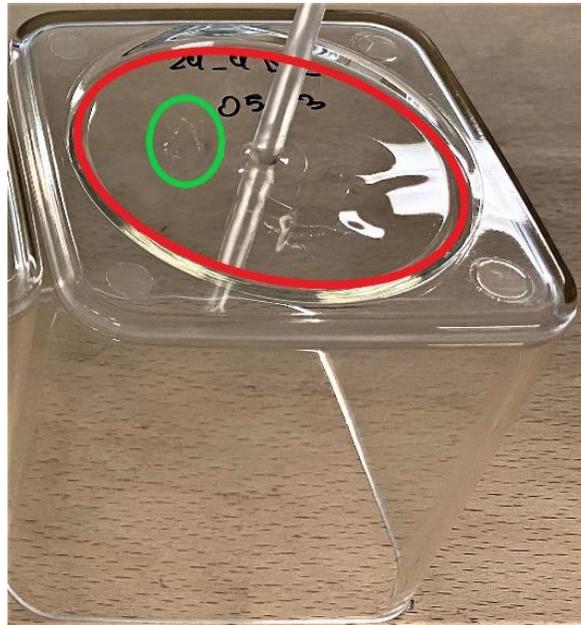


Figura 85 Pezzo prodotto applicando le condizioni di Prova 4.

Nel corso di Prova 4 sono state eseguite 7 stampate. Le prime 6 stampate sono andate a buon fine, la settima stampata ha causato il blocco del processo. Durante l'estrazione infatti gli estrattori hanno forato il pezzo che di conseguenza è rimasto bloccato sul punzone dello stampo.

La rottura è avvenuta dopo numerosi cicli di stampaggio, quindi le condizioni operative sono accettabili.

Si ipotizzano due possibili cause della rottura; la deformazione del pezzo ha causato una maggiore adesione alla superficie dello stampo oppure la temperatura del pezzo non era adeguata e il polimero non possedeva una rigidità e una resistenza sufficienti per l'estrazione.

In questa prova (4) è stata applicata una pressione di packing maggiore rispetto ai casi precedenti, è quindi possibile che si sia verificato un maggiore ritiro che ha prodotto una maggiore adesione del pezzo alla superficie dello stampo, a causa di questo gli estrattori devono applicare una pressione maggiore per estrarre il pezzo e di conseguenza il pezzo è sottoposto ad uno sforzo maggiore che può portare alla rottura.

Le diverse condizioni di lavoro possono portare ad una variazione della temperatura del pezzo al momento dell'estrazione, tuttavia l'analisi delle temperature in Prova 2, condotta in condizioni simili a Prova 4, ha dimostrato che il pezzo al momento dell'estrazione si trova ad una temperatura di circa 20°C inferiore rispetto alla T_g , quindi si trova in una condizione in cui il suo comportamento è elastico. Per questo motivo si ritiene che la causa della rottura non dipenda dalla temperatura.

Il fatto che il pezzo si sia rotto durante una delle prove indica che l'estrazione produce uno sforzo intenso nel materiale ed è possibile arrivare al limite di rottura, a causa di questo è necessario garantire che il materiale abbia una buona resistenza meccanica al momento dell'estrazione e che quindi la porzione di materiale su cui è applicata la pressione degli estrattori si trovi ad una temperatura inferiore alla T_g . Per questo motivo è necessario mantenere un tempo di raffreddamento sufficientemente lungo, cioè non è possibile ridurre il $t_{cooling}$ a meno di 50 s.

10.5 Prove 5, 6, 7 e 8

Le simulazioni hanno mostrato una possibile soluzione per ridurre le deformazioni e il ritiro del pezzo, in questa sezione vengono presentate le prove utilizzate per verificare questa strategia. Si utilizza un profilo di pressione di packing in due step, durante il primo step la pressione è maggiore e diminuisce linearmente fino alla fine dell'intervallo, durante il secondo step la pressione è costante. I parametri riportati in tabella 40 sono comuni a tutte le prove (5, 6, 7 e 8). Invece il profilo di pressione cambia per ogni prova; si aumenta in modo progressivo la pressione applicata ma vengono mantenuti costanti i tempi caratteristici. Quindi il tempo totale dedicato al packing è di 9 secondi e la durata del primo step di pressione è di 3 secondi. I grafici 8, 9, 10 e 11 definiscono il profilo di pressione applicato rispettivamente alle prove 5, 6, 7 e 8.

Tabella 40 Parametri di processo applicati alle prove 5, 6, 7 e 8.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	70
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
$t_{cooling}$	s	50
N_{prove}		2
$F_{apertura}$	KN	17

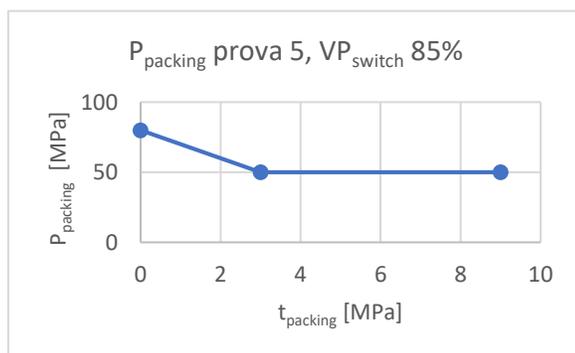


Grafico 8 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 5.

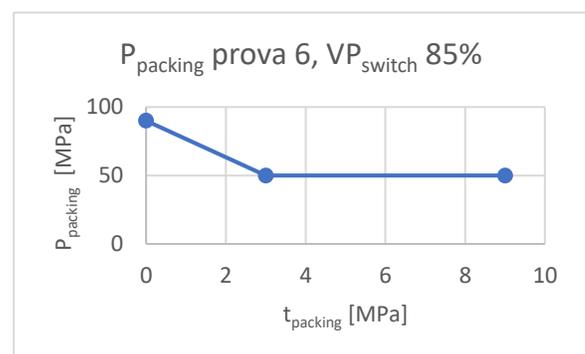


Grafico 9 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 6.

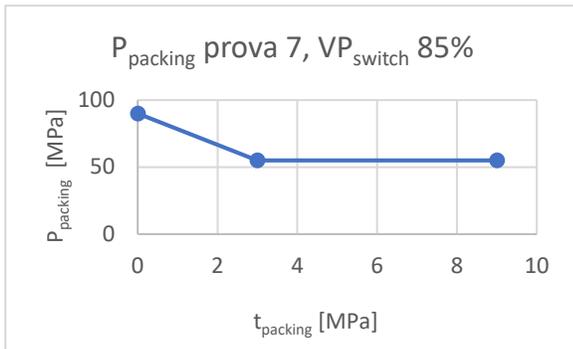


Grafico 10 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 7.

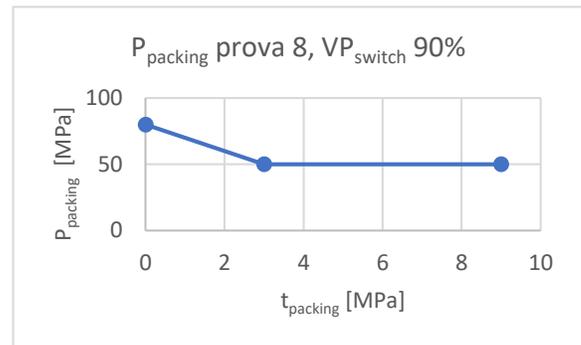


Grafico 11 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 8.

I pezzi prodotti durante queste prove sono simili tra loro e non è possibile indentificare differenze analizzando visivamente i campioni. Il campione di Prova 5 è mostrato in figura 86, le valutazioni che possono essere fatte con questo campione possono essere considerate anche per le prove 6, 7 e 8.

Rispetto ai campioni ottenuti durante le prove 2 e 3 il pezzo in figura 86 risulta di migliore qualità. Sulla superficie del fondo si osserva un'area di ritiro, la zona interessata tuttavia è limitata all'area evidenziata con il cerchio rosso diversamente dai campioni di prova 2 e 3 in cui il ritiro si sviluppava sull'intera superficie della base.

L'analisi dei campioni prodotti durante le prove 5, 6, 7 e 8 permette di osservare l'effetto della pressione di packing su ritiri e deformazioni del pezzo. Applicando una pressione maggiore durante i primi 3 secondi di packing il ritiro della superficie di base viene ridotto, tuttavia non viene mai eliminato.

Per aprire lo stampo la pressa deve applicare una forza sufficiente per superare l'attrito che si genera tra le superfici del pezzo e dello stampo. Per eseguire le prove 5, 6, 7 e 8 si applica una forza di apertura di 17 KN, cioè metà della forza che la pressa può applicare; durante Prova 7 la pressa si è bloccata ed è stato necessario aumentare la forza di apertura per separare le facce dello stampo. Questo fatto indica che la pressione di packing applicata ha prodotto un aumento della densità e del volume del pezzo; in queste condizioni il pezzo aderisce contemporaneamente ad entrambe le superfici dello stampo, quindi si genera una maggiore forza di attrito tra la faccia esterna del pezzo e la superficie concava dello stampo. Per questo motivo è necessario applicare una maggiore forza di apertura.

Il profilo di pressione applicato a Prova 7 è il limite superiore oltre il quale la pressa non è in grado di aprire lo stampo. Per questo motivo non è possibile applicare una pressione all'inizio del packing superiore a 90 Mpa. Il pezzo prodotto tuttavia presenta ancora dei difetti di ritiro; poiché non è possibile aumentare la pressione si agisce sulla variabile tempo.



Figura 86 Pezzo prodotto applicando le condizioni di Prova 5.

10.6 Prova 9

Si esegue Prova 9 applicando i parametri di processo in tabella 41.

Il profilo di pressione applicato in Prova 7 non è sufficiente per eliminare il ritiro; allo stesso tempo, per i motivi descritti nel precedente paragrafo, non è possibile applicare una pressione maggiore di 90 MPa all'inizio del packing. Per risolvere il problema si propone di ridurre la pressione iniziale ma aumentare la durata del primo dei due step che compongono il packing. Si applica il profilo di pressione definito dal grafico 11.

Tabella 41 Parametri di processo applicati a Prova 9.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	70
VP_{switch}	%	92,5
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
$t_{cooling}$	s	50
N_{prove}		3
$F_{apertura}$	KN	17

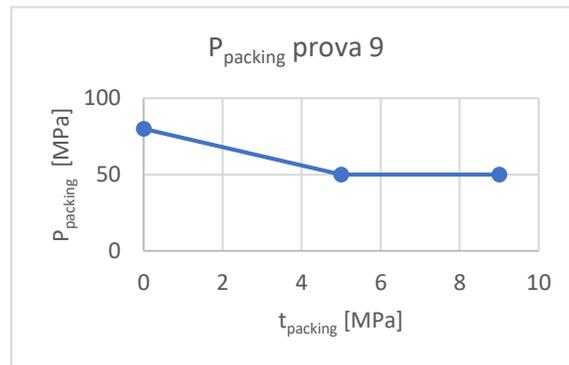


Grafico 12 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 9.

Il risultato di prova 9 è il pezzo in figura 87. Il pezzo prodotto non presenta difetti di ritiro né deformazioni, quindi questo risultato è il migliore ottenuto.

Per eseguire l'apertura dello stampo è stata impostata una forza di 17 KN. Durante lo stampaggio del terzo campione la pressa si è bloccata con lo stampo chiuso. Anche in questo caso è avvenuto lo stesso fenomeno già descritto per Prova 7. La pressione produce un sovraimpaccamento, cioè viene forzata nello stampo una quantità di materiale maggiore rispetto a quella necessaria per occupare il volume nominale del pezzo quando il polimero è solido, questo fenomeno rende più difficile l'estrazione poiché aumenta l'attrito tra le pareti esterne nel pezzo e la superficie concava dello stampo.

Per permettere l'apertura dello stampo si è applicata una forza di apertura di 34 KN, cioè la massima forza che la pressa può applicare.

Il pezzo in figura 87 è il migliore ottenuto e a causa del problema del sovraimpaccamento le condizioni di processo sono il limite massimo applicabile per lo stampo e la pressa utilizzati. Quindi i parametri applicati a Prova 9 ottimizzano le proprietà del pezzo prodotto.

Confrontando questi parametri con quelli del caso ottimizzato ottenuto con la simulazione si osserva che il profilo di pressione applicato è simile, cioè in entrambi i casi è composto da un primo step ad alta pressione e un secondo step a bassa pressione, le pressioni coinvolte tuttavia sono diverse. Le pressioni che possono essere raggiunte durante il processo, circa 80 MPa, sono inferiori rispetto ai parametri ottimizzati con le simulazioni, circa 130 MPa.

Durante il ciclo di stampaggio la pressa monitora la pressione applicata durante il filling e la velocità di ingresso del materiale durante il packing. Questi risultati sono espressi con il grafico 13.

Il punto 0 sull'asse delle ascisse indica l'istante di switch tra filling e packing; il processo di filling è monitorato in funzione della posizione dell'elemento di iniezione, il processo di packing è monitorato in funzione del tempo. Durante il processo di packing la pressa impone il profilo di pressione (curva blu) e misura la quantità di materiale che entra all'interno dello stampo (curva rossa). Dal grafico si osserva che occorre un tempo molto inferiore rispetto al tempo di packing per riempire completamente lo stampo; infatti dopo 1,8 secondi dall'inizio del packing la curva che indica la velocità di iniezione raggiunge lo zero. Quindi durante i restanti 7,2 secondi, benché venga mantenuta una pressione, non si inietta nuovo materiale.

Poiché l'obiettivo delle prove è valutare il tempo ciclo occorre verificare che sia effettivamente necessario applicare un tempo di packing di 9 secondi se il tempo necessario all'ingresso del

materiale è inferiore. Per studiare questo fenomeno si esegue Prova 11 e si analizza nuovamente la velocità di iniezione.



Figura 87 Pezzo prodotto applicando le condizioni di Prova 9.

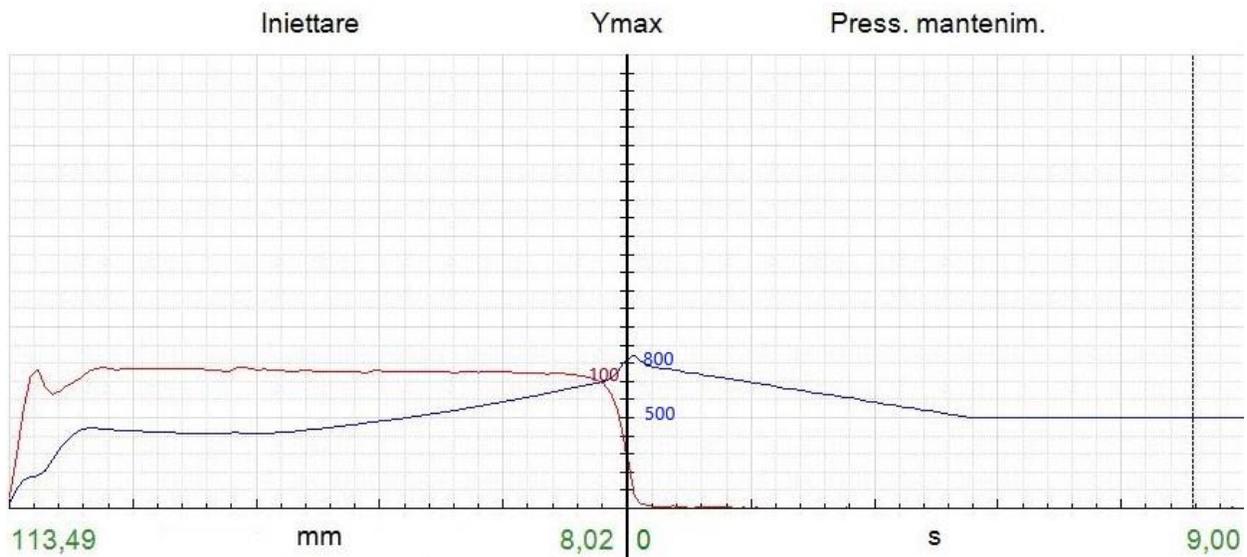


Grafico 13 Processo di iniezione applicato a Prova 9. Il grafico blu indica il profilo di pressione durante l'iniezione (Bar), il grafico rosso indica la velocità di iniezione (mm/s).

10.7 Prove 10, 11 e 12

Per ridurre il ritiro, l'analisi delle simulazioni ha permesso anche di ipotizzare un processo di packing durante il quale la pressione progressivamente cresce; il processo è diviso in due step, il primo a pressione inferiore e il secondo a pressione maggiore. Partendo da questa ipotesi si propongono Prova 10, Prova 11 e Prova 12, si applicano i parametri di processo definiti in tabella 42 e i profili di pressione di packing definiti rispettivamente dai grafici 14, 15 e 16.

Tabella 42 Parametri di processo applicati alle prove 10, 11 e 12.

V_{inj}	mm/s	100
P_{inj}	MPa	70
VP_{switch}	%	92,5
T_{inj}	°C	210
T_{mold}	°C	30
$t_{cooling}$	s	50
N_{prove}		2

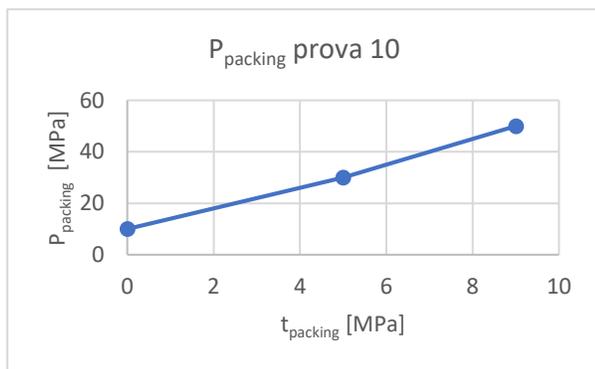


Grafico 14 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 10.

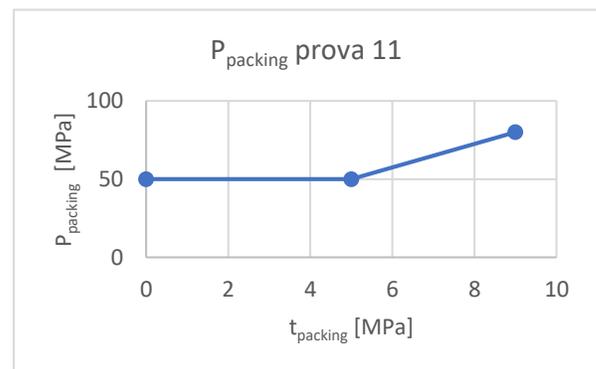


Grafico 15 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 11.

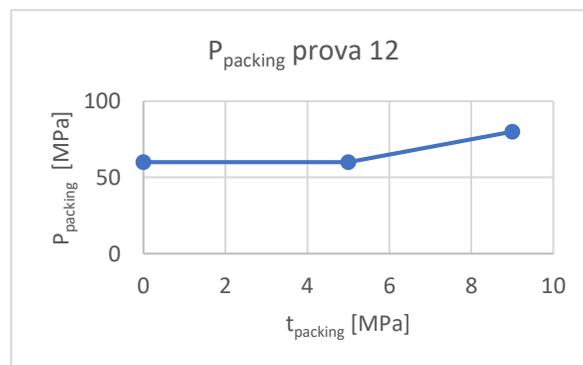


Grafico 16 Profilo di pressione di packing applicato a Prova 12.

Tutte e tre le prove proposte presentano difetti simili. Il ritiro interessa sia le pareti laterali, sia la base del bicchiere.

In figura 88 sono visibili i difetti che il ritiro causa sulle pareti laterali, si riporta l'immagine del pezzo prodotto durante Prova 10 poiché in questo pezzo è ben visibile il difetto di cui si parla. Tuttavia aumentando la pressione iniziale, cioè applicando i parametri di Prova 11 e Prova 12, l'estensione della zona interessata dal ritiro diminuisce ma il problema non viene completamente risolto.

I pezzi prodotti durante le prove 10, 11 e 12 presentano difetti causati dal ritiro anche sulla superficie di base. Il pezzo prodotto durante Prova 12, in figura 89, possiede un risucchio che coinvolge una vasta zona della superficie di base. La zona interessata dal ritiro è cerchiata in rosso.

La qualità dei pezzi prodotti dimostra che questa strategia di iniezione, che consiste nell'applicare un profilo di pressione crescente, non porta a risultati soddisfacenti. Applicando inizialmente una bassa pressione non è possibile ottenere un packing adeguato del materiale all'interno delle pareti sottili.

Anche lo step di alta pressione al termine del packing non porta ai risultati ipotizzati. Infatti si osserva che il ritiro interessa una zona maggiore rispetto ai risultati delle prove 5 e 9, benché in queste prove la pressione al termine del packing fosse inferiore. Questo confronto indica che per ottimizzare ritiro e deformazioni è più efficiente lavorare con un'elevata pressione all'inizio del packing mentre al termine del packing è sufficiente una pressione minore.



Figura 88 Pezzo prodotto applicando le condizioni di Prova 10.



Figura 89 Pezzo prodotto applicando le condizioni di Prova 12.

Durante il processo di packing l'elemento di iniezione applica una pressione controllata e misura la velocità di iniezione in funzione del tempo. Questa misura viene eseguita durante Prova 11, il risultato di questa misura è la curva rossa del grafico 17.

Durante il filling l'elemento di iniezione applica una velocità di iniezione costante e misura la pressione necessaria a garantire quella velocità, quando l'elemento di iniezione si trova a 8 mm dal fine corsa avviene il VP switch. Da questo istante in poi il processo viene regolato in funzione del tempo, inoltre si applica la curva di pressione definita e si misura la velocità del fluido iniettato.

All'inizio del packing la velocità di riempimento diminuisce rapidamente tuttavia non si annulla. Infatti per tutta la durata del packing l'elemento di iniezione misura un avanzamento della vite. Il fatto che durante il packing il materiale polimerico continui, in queste condizioni di processo, ad entrare nella cavità dello stampo significa che il punto di gate durante i 9 secondi di questo step non è solidificato, cioè non ha raggiunto la temperatura di freezing.

Occorre tenere in considerazione questo fatto anche per valutare il risultato del processo di Prova 9. Se infatti durante i 9 secondi di packing il punto di gate non è solidificato occorre mantenere il polimero in pressione per evitare che questo retroceda e fuoriesca dalla cavità delle pezzo. Nel caso di Prova 9 la velocità di iniezione è nulla dopo 1,8 secondi dall'inizio del packing. Anche se il materiale non può più entrare nello stampo è necessario mantenere la pressione indicata dal profilo del grafico 12 per i restanti 7,2 secondi in modo che il materiale fintanto che è liquido non possa retrocedere nel canale di alimentazione. Se questo non viene fatto si annullerebbe l'effetto del processo di packing.

Questa considerazione giustifica inoltre il fatto che riducendo la pressione di packing ma aumentando il tempo di applicazione, cioè passando dai parametri applicati in Prova 7 ai parametri applicati in Prova 9, il ritiro del pezzo diminuisca. 80 MPa è una pressione sufficiente per eliminare il ritiro ma è necessario un tempo di applicazione abbastanza lungo (5 secondi) affinché una porzione sufficiente delle base solidifichi e mantenga le dimensioni del pezzo ottenute.

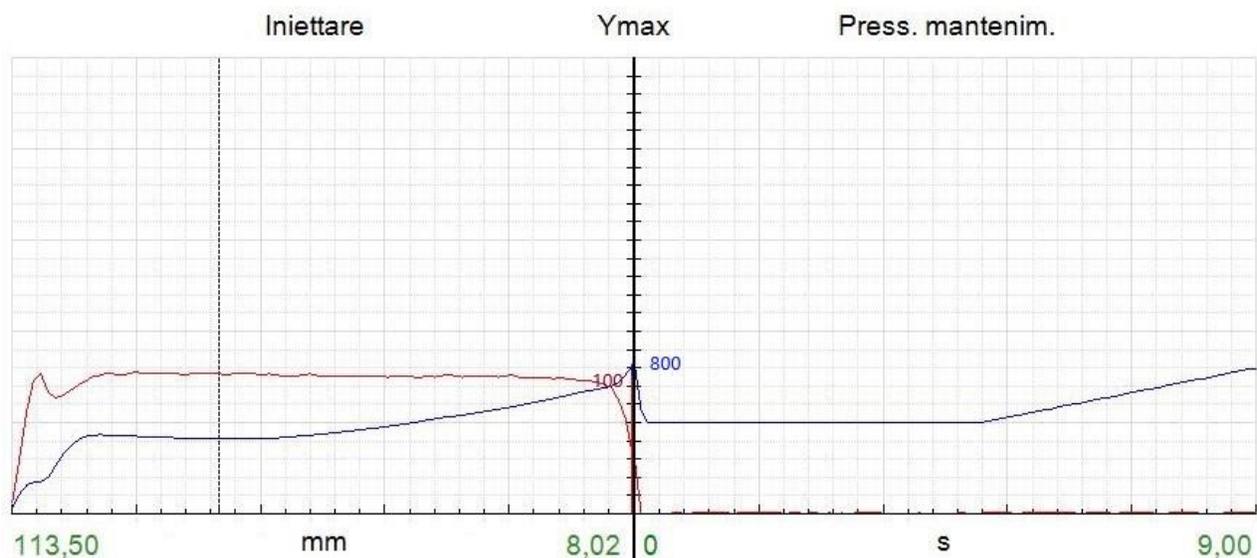


Grafico 17 Processo di iniezione applicato a Prova 11. Il grafico blu indica il profilo di pressione durante l'iniezione (Bar), il grafico rosso indica la velocità di iniezione (mm/s).

CAPITOLO 11 CONFRONTO TRA PROVE DI STAMPAGGIO E SIMULAZIONE

Nel seguente capitolo si confrontano i risultati delle prove di stampaggio con i risultati delle simulazioni eseguite applicando gli stessi parametri di processo. L'obiettivo è verificare la qualità della simulazione evidenziando i punti di forza e le situazioni in cui il calcolo non porta ad un risultato attendibile. Inoltre si utilizza la simulazione per osservare e interpretare i fenomeni fluidodinamici e termodinamici che sono stati osservati durante le prove di stampaggio.

Vengono eseguite 5 nuove simulazioni applicando i parametri di processo di Prova 1, Prova 2 e Prova 9. In tabella 43 si riportano i parametri applicati ad Analisi 14, Analisi 15, Analisi 16 e Analisi 17. Per eseguire queste analisi si applicano le proprietà del polimero Luminy PLA L130 caratterizzato come descritto nella sezione 9.3. Si esegue inoltre Analisi 18; questa viene condotta nelle condizioni di Analisi 16 ma applicando le proprietà del polimero PLA Ingeo 3251D.

Tabella 43 Parametri di processo applicati ad Analisi 14, Analisi 15 e Analisi 16.

Parametro impostato	Analisi 14	Analisi 15	Analisi 16	Analisi 17	Unità di misura
Mesh	2	1	1	1	
V_{inj}	100	100	100	100	mm/s
P_{inj}	70	70	70	100	MPa
P_{pac}	70	70	70	Profilo Grafico 12	MPa
$t_{packing}$	8	8	8	Profilo Grafico 12	s
VP_{switch}	85	95	95	92,5	%
T_{inj}	210	190	210	210	°C
T_{mold}	30	30	30	30	°C
T_{eject}	60	60	60	60	°C
$t_{cooling}$	50	50	50	50	s

11.1 Analisi del profilo di riempimento

L'analisi del profilo di riempimento consiste nel valutare i fenomeni fluidodinamici che avvengono all'interno dello stampo durante l'ingresso del materiale. Per osservare il profilo di avanzamento del materiale si eseguono prove di stampaggio con riempimento parziale dello stampo come precedentemente descritto per Prova 1 (capitolo 10). Interrompendo l'avanzamento del materiale prima del completo riempimento dello stampo, il bordo superiore del pezzo assume la forma del profilo di avanzamento del materiale. In questo modo si ottiene il risultato in figura 81 (paragrafo 10.1).

La simulazione eseguita con Moldex3D permette di calcolare il melt front by ram position, cioè il profilo di avanzamento del materiale in funzione della posizione della vite dell'elemento di iniezione. In questo modo si seleziona l'immagine del profilo di avanzamento impostando la percentuale di riempimento desiderata. Si ottiene il profilo di avanzamento del materiale in figura 90, questo si riferisce a percentuali di riempimento della cavità del pezzo del 49, 52, 70 e 79%.

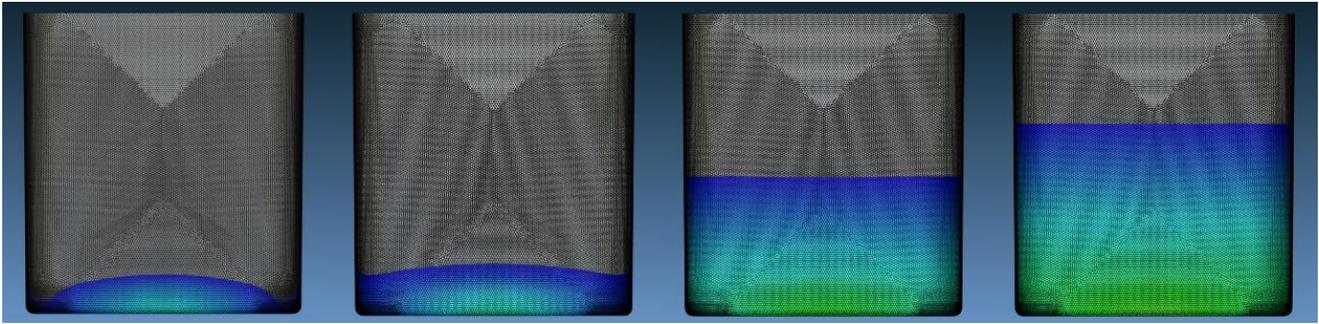


Figura 90 Profilo di avanzamento del materiale calcolato con la simulazione "Analisi 14" relativo al riempimento del 49, 52, 70 e 79% del volume del pezzo.

Il profilo di riempimento dello stampo ottenuto con il metodo del riempimento parziale, figura 81, e il profilo simulato, figura 90, sono simili. In entrambi i casi infatti il polimero tende ad avanzare maggiormente in corrispondenza degli spigoli raggiati, mentre al centro delle superfici laterale il polimero si trova in posizione arretrata.

Confrontando il profilo di riempimento ottenuto sperimentalmente e il profilo di riempimento simulato si osserva che il programma calcola un profilo con una variazione molto minore tra il centro della faccia e gli spigoli. Infatti nel caso del pezzo stampato il profilo del flusso può essere facilmente apprezzato, invece nel caso della simulazione per valutare il profilo occorre prendere come riferimento la disposizione della mesh: al centro della superficie laterale i nodi sono disposti su linee parallele e il profilo di avanzamento del materiale al centro della faccia si trova arretrato di un elemento della mesh rispetto agli spigoli.

Quindi l'effetto in generale è visibile, inoltre il video del riempimento simulato permette di osservare la causa che determina la formazione del profilo di riempimento, infatti si osserva che in corrispondenza degli spigoli della base la velocità del flusso aumenta poiché si uniscono due flussi provenienti da direzioni diverse.

Sia la simulazione, sia le prove di riempimento parziale definiscono un flusso stazionario durante il riempimento delle pareti laterali, il motivo per cui si crea quel profilo dipende dalla posizione del punto di iniezione e dalla forma dell'oggetto. Il polimero si allarga in modo concentrico rispetto al punto di iniezione e il materiale che per primo raggiunge le pareti laterali si trova al centro dello spigolo di base, quindi inizialmente il polimero si trova in posizione avanzata al centro della faccia e si allarga a partire da quel punto; si arriva quindi ad una condizione in cui due flussi provenienti dal centro dello spigolo di base si incontrano in corrispondenza dello spigolo laterale, in quell'istante la velocità di riempimento in corrispondenza dello spigolo aumenta fino a determinare quel profilo che si può osservare nelle prove sperimentali. Raggiunta questa condizione il profilo rimane costante fino al completo riempimento quindi di fatto l'unico istante in cui il materiale in corrispondenza degli spigoli procede più velocemente è nel primo tratto in cui si sommano i due flussi provenienti dalle pareti.

Nel confronto tra prove sperimentali e simulazione bisogna inoltre tenere presente che sono svolte in condizioni diverse. Il campione è prodotto interrompendo il processo ad una certa percentuale di riempimento, dopodiché si raffredda il pezzo e lo si estrae; quindi, benché lo stampo non sia stato completamente riempito, il pezzo ha subito un intero ciclo di stampaggio. Il pezzo ha subito il raffreddamento all'interno dello stampo e l'estrazione e quindi si è verificato un ritiro volumetrico; il ritiro può portare alla deformazione del pezzo e alla modifica del profilo di riempimento indicato dal bordo superiore dell'oggetto. La simulazione invece analizza un'istante del riempimento tenendo in considerazione solo il modello fluidodinamico che approssima il comportamento del polimero.

Tenendo quindi in considerazione questo fattore la simulazione fornisce un buon risultato che permette di simulare in modo adeguato il processo di riempimento, infatti tutti i fenomeni caratteristici del riempimento come la geometria del profilo di riempimento e la velocità del flusso vengono correttamente identificati.

11.2 Pressione di iniezione

Nel capitolo 9 sono state descritte le prove di laboratorio che sono state eseguite per caratterizzare il comportamento reologico del polimero Luminy PLA L130. Il modello che descrive il comportamento reologico del materiale è stato derivato applicando alcune approssimazioni che riguardano i parametri D_1 , τ^* e n . La trattazione del modello è descritta nel paragrafo 9.1.

E' di interesse verificare la qualità dell'approssimazione applicata. Per fare questo si confronta il grafico di sprue pressure calcolato con le simulazioni e il grafico di pressione di iniezione fornito dalla pressa durante le prove di stampaggio. Grafico 18 è il risultato di Analisi 17, in questo caso si applicano i parametri di processo definiti in tabella 43 e il modello di viscosità ricavato per il Luminy PLA L130. Grafico 19 è il risultato di Analisi 18, questa simulazione è condotta applicando gli stessi parametri di processo di Analisi 17 ma utilizzando il modello di viscosità del Ingeo 3251D così come era stato applicato alle simulazioni dedicate all'ottimizzazione dei parametri di processo, capitoli 4, 5, 6, 7 e 8. Il grafico 20 riporta il profilo di pressione di filling applicato dall'elemento di iniezione in Prova 9, prova che è stata condotta applicando gli stessi parametri di processo di Analisi 17.

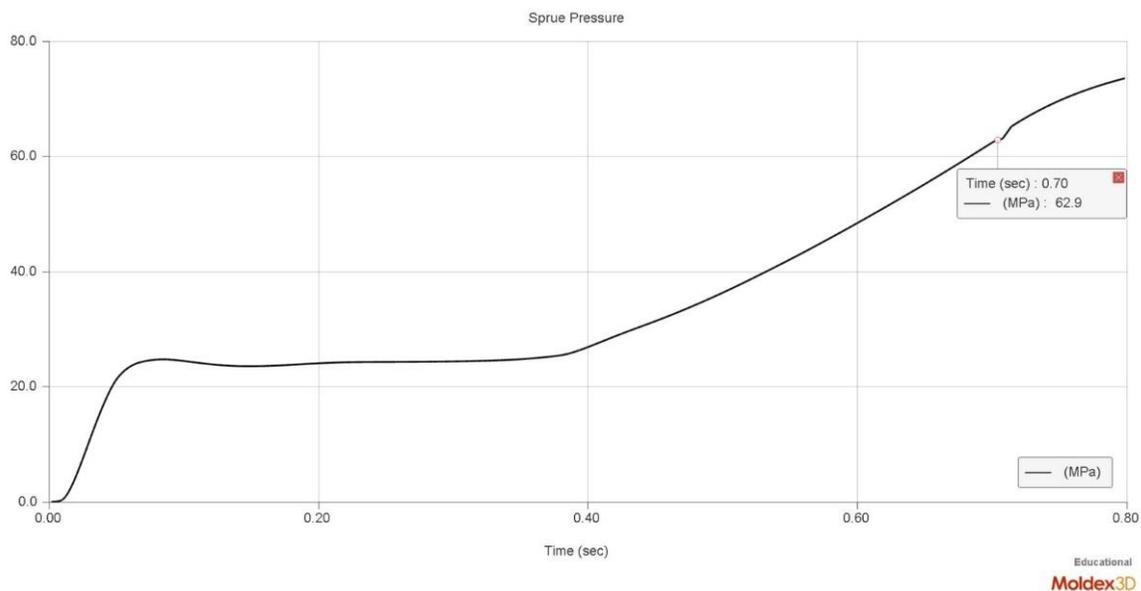


Grafico 18 Sprue pressure vs tempo di iniezione, risultato di Analisi 17.

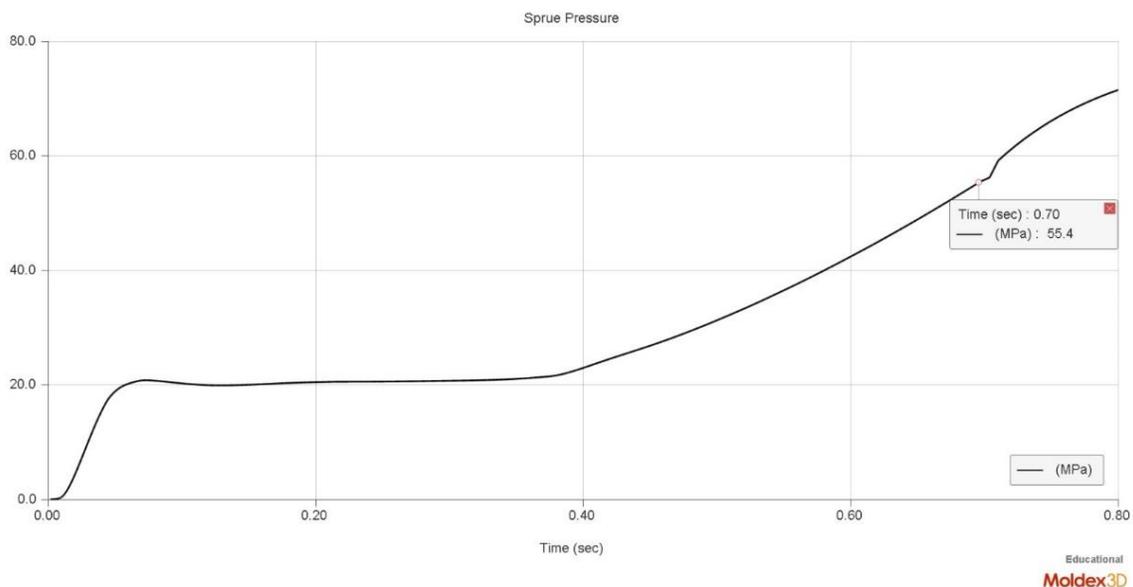


Grafico 19 Sprue pressure vs tempo di iniezione, risultato della simulazione Analisi 18, condotta nelle condizioni di Analisi 17 applicando le proprietà del materiale Ingeo 3251D.



Grafico 20 Profilo di pressione di filling applicato in Prova 9.

Il confronto tra grafico 18, grafico 19 e grafico 20 permette di valutare l'effetto del modello di viscosità del Luminy PLA L130 ricavato nel capitolo 9. Come osservato in precedenza la principale differenza tra Luminy PLA L130 e Ingeo 3251D è la fluidità del materiale, infatti la viscosità a bassi valori di shear del Luminy risulta circa un ordine di grandezza maggiore della viscosità del Ingeo. La fluidità del polimero determina la pressione necessaria per l'iniezione poiché più il fluido è viscoso maggiori sono gli attriti interni al materiale e di conseguenza è maggiore la pressione richiesta per iniettare il materiale con la stessa velocità. In base a questa osservazione ci si aspetta che la curva di sprue pressure ottenuta nel caso del polimero più viscoso si trovi a valori di pressione maggiore rispetto alla curva relativa al polimero più fluido.

Tutti e tre i grafici confrontati presentano un andamento simile. Nei primi istanti la pressione aumenta rapidamente durante il riempimento dello sprue, successivamente la pressione raggiunge un plateau che corrisponde al periodo di riempimento della base del pezzo, infine nell'ultimo tratto la pendenza della curva è costante e la pressione aumenta fino a raggiungere il valore massimo nel punto di VPswitch. Tuttavia si osserva che i valori di pressione sono significativamente diversi nei tre grafici; infatti confrontando le pressioni relative al plateau e la pressione raggiunta nel punto di VPswitch risulta che l'elemento di iniezione durante la prova ha applicato una pressione maggiore rispetto ai risultati di Analisi 17 e Analisi 18; i valori di pressione sono rispettivamente 50 MPa, 25 MPa e 20 MPa. Si osserva inoltre che la curva ottenuta applicando il modello ricavato per il Luminy PLA L130 coinvolge pressioni maggiori rispetto alla curva ottenuta applicando il modello relativo al Ingeo 3251D, la pressione calcolata del punto di VPswitch per il Luminy PLA L130 è maggiore di quella calcolata per Ingeo 3251D e si avvicina alla pressione rilevata dalla pressa durante l'iniezione, rispettivamente 62,9 MPa, 55,4 MPa e 70 MPa.

Il grafico di sprue pressure ottenuto in Analisi 17 è quindi più simile alla pressione di iniezione di Prova 9 rispetto al grafico di sprue pressure di Analisi 18. Per le ragioni precedentemente esposte questo indica che il modello ricavato per simulare il comportamento del PLA Luminy permette di ottenere una simulazione più accurata rispetto al modello relativo all'Ingeo inizialmente considerato.

Confrontando il risultato di Analisi 17 con Prova 9, durante i primi istanti dell'iniezione la pressione applicata dalla macchina è significativamente maggiore della pressione calcolata con la simulazione; per eseguire il riempimento della base del pezzo è necessaria una pressione doppia rispetto alla pressione calcolata nella simulazione. Le pressioni applicate al termine del riempimento in prossimità del VPswitch sono invece più simili. Trascurando la fluttuazione della pressione rilevata dalla macchina, in corrispondenza del VPswitch la pressione applicata è di 70 MPa, in corrispondenza dello stesso punto la simulazione indica 62,9 MPa. Prendendo quindi questo punto come riferimento l'errore del modello applicato ad Analisi 17 è di circa il 10%.

Quindi il modello calcolato nel capitolo 9 per approssimare il comportamento reologico del materiale permette di ottenere un risultato migliore rispetto al modello applicato per le simulazioni finalizzate all'ottimizzazione dei parametri di processo; tuttavia dal confronto con la misura del processo risulta un errore significativo e per le ragioni precedentemente descritte il modello sottostima la viscosità del polimero.

11.3 Temperatura di estrazione del pezzo e dello stampo

In questo paragrafo vengono analizzate le condizioni di temperatura del pezzo e dello stampo raggiunte nel corso del processo produttivo. Gli istanti di interesse sono il momento dell'apertura e il momento della chiusura dello stampo.

Subito dopo l'apertura dello stampo gli estrattori applicano sul pezzo la forza necessaria all'estrazione. È quindi necessario misurare la temperatura del pezzo nei punti in cui gli estrattori agiscono; questo serve per garantire che il pezzo possieda le proprietà meccaniche necessarie per sopportare l'estrazione.

Al termine dell'estrazione prima che lo stampo si chiuda per iniziare un nuovo ciclo occorre valutare la temperatura dello stampo. Questo parametro pesa sui fenomeni che avvengono durante

l'iniezione del polimero e durante il suo raffreddamento; occorre quindi valutare la temperatura dello stampo prima dell'inizio del nuovo ciclo per osservare le eventuali variazioni rispetto al parametro di progetto.

Il programma di simulazione Moldex3D permette di calcolare i parametri elencati, in questo paragrafo i risultati misurati durante Prova 2 vengono confrontati con i risultati della simulazione eseguita nelle stesse condizioni di processo (Analisi 15), in questo modo è possibile osservare l'efficacia del programma nel modellizzare i fenomeni termici e definire come i dati della simulazione possono essere utilizzati per analizzare il processo.

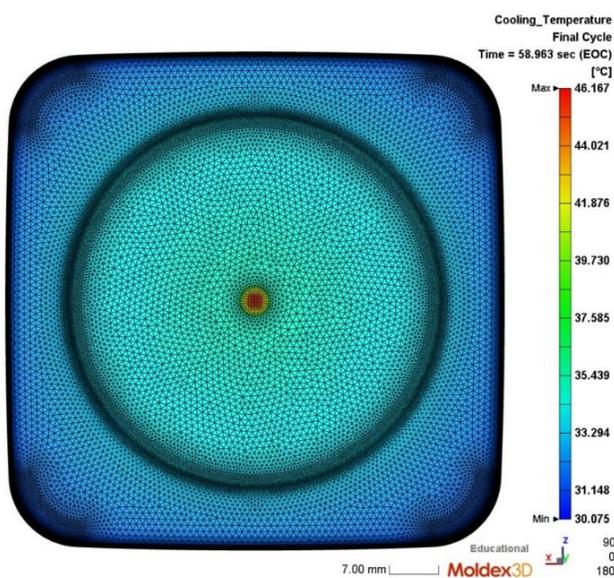


Figura 92 Temperatura della superficie esterna al termine del raffreddamento, risultato di Analisi 15.

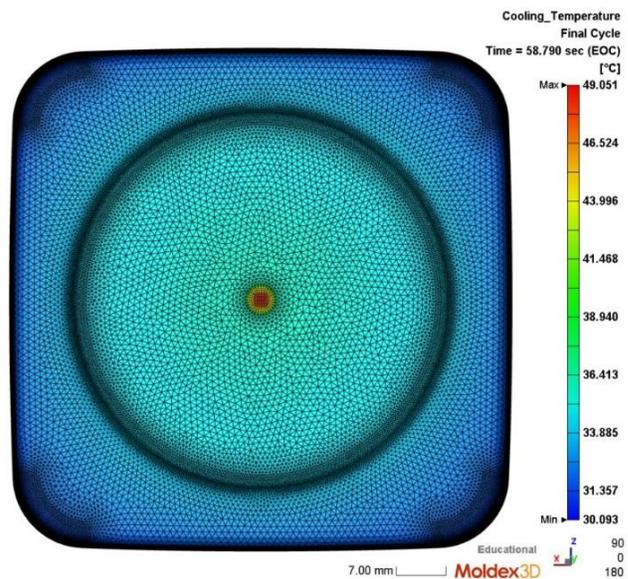


Figura 91 Temperatura della superficie esterna al termine del raffreddamento, risultato di Analisi 16.

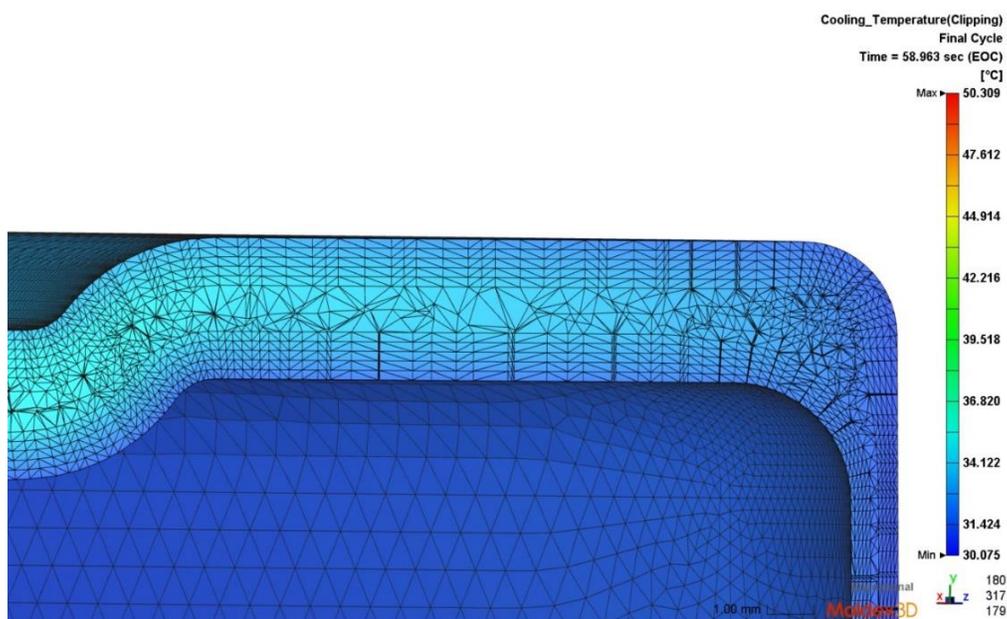


Figura 93 Gradiente di temperatura sviluppato lungo la sezione del pezzo in corrispondenza del punto di contatto tra estrattori e pezzo, risultato di Analisi 15.

Per fare in modo che il pezzo sia estratto senza rotture occorre che la resistenza meccanica del materiale sia sufficiente e che il pezzo subisca una deformazione puramente elastica. La caratterizzazione del materiale riportata nel capitolo 9 ha dimostrato come oltre la temperatura di transizione vetrosa le proprietà meccaniche del materiale si riducano significativamente, in particolare il modulo elastico diminuisce e il polimero subisce una deformazione prevalentemente plastica. Questo risultato indica che è necessario estrarre il pezzo a una temperatura inferiore alla temperatura di transizione vetrosa per garantire che a causa dello sforzo applicato il pezzo non deformi plasticamente.

In realtà la forza di estrazione viene applicata solo in corrispondenza degli estrattori; nel caso del pezzo studiato gli estrattori agiscono in corrispondenza dei quattro angoli della base del pezzo. Occorre quindi che queste zone in particolare si trovino ad una temperatura inferiore alla transizione vetrosa, in questo modo la pressione applicata dagli istruttori spinge via il pezzo senza il rischio di forarlo.

Il risultato di Prova 2 che deve essere considerato è quindi la temperatura media dell'area 11 (tabella 36); questo risultato può essere confrontato con il diagramma del profilo termico calcolato con la simulazione e riportato in figura 91. La simulazione permette inoltre di calcolare il gradiente di temperatura che si sviluppa lungo lo spessore in corrispondenza del punto di contatto con gli estrattori, questo risultato è riportato in figura 93.

L'analisi termica condotta in Prova 2 indica che la superficie opposta al punto di contatto con gli estrattori si trova a 39 °C (area 11 in figura 82). Considerando invece i risultati della Analisi 15, in figura 91 e figura 93 si osserva una temperatura di circa 34 °C nella stessa zona della superficie considerata prima e una temperatura di circa 35 °C nella zona più calda della sezione in corrispondenza dello stesso punto.

Il risultato della misurazione e della simulazione sono confrontabili, tuttavia la simulazione tende a sottostimare il valore di temperatura rispetto all'analisi termografica.

Entrambi i risultati però indicano una temperatura inferiore a 40 °C nella zona di contatto tra gli estrattori e il pezzo, cioè una temperatura molto inferiore alla temperatura di transizione vetrosa (60 °C). Quindi sia la simulazione sia la termografia indicano che il pezzo in queste condizioni di processo può essere estratto senza essere danneggiato.

Nel caso di Analisi 16 il polimero è stato iniettato alla temperatura di 210 °C; il profilo di temperatura che si sviluppa al termine del raffreddamento è inevitabilmente diverso dal caso di Analisi 15. Tuttavia la temperatura nel punto della superficie in cui agiscono gli estrattori non differisce significativamente; infatti considerando figura 92 si osserva una temperatura di 36 °C contro i 35 °C ottenuti nelle condizioni di Analisi 15.

Quindi anche in questo caso la simulazione indica che il pezzo può essere estratto dallo stampo senza essere danneggiato.

Secondo le osservazioni fatte in precedenza tutte le prove di stampaggio riportate in questa tesi dovrebbero essere sicure e il pezzo non dovrebbe rompersi durante l'estrazione; in alcuni casi tuttavia, come indicato durante la discussione delle prove di stampaggio, alcuni dei pezzi prodotti sono stati rotti e gli estrattori hanno forato i pezzi in corrispondenza degli angoli della base. In figura 94 è possibile osservare un caso in cui l'estrattore ha danneggiato il prodotto; in questo caso il componente non è stato forato da parte a parte ma gli estrattori hanno creato una rientranza su una superficie e una sporgenza sulla superficie opposta.

Questo problema non si è verificato durante tutte le prove di stampaggio ma solo in alcune. Inoltre si osserva che la rottura non avviene necessariamente durante quelle prove in cui i parametri di

processo sono più critici; infatti ci si aspetterebbe che il pezzo venga danneggiato con maggiore frequenza durante quelle prove in cui la pressione di parking è molto alta, in queste condizioni infatti si può avere sovrapping e quindi è necessario applicare una forza maggiore estrarre il pezzo; questa connessione invece non si verifica e si sono osservati difetti e rotture anche applicando condizioni di pressione meno critiche come ad esempio durante Prova 4.

Questo fatto indica che per valutare il processo di estrazione non è sufficiente analizzare la temperatura del pezzo. Infatti anche se le prove sperimentali e le simulazioni dimostrano che il pezzo ha proprietà meccaniche adeguate è comunque possibile che durante l'estrazione si causi la rottura. Questo significa che in alcune prove il carico applicato durante l'estrazione è stato superiore al limite di rottura del polimero. Per questo motivo non è stato possibile ridurre il tempo di raffreddamento e ottimizzare il tempo ciclo, infatti è necessario che il materiale abbia acquisito le proprietà meccaniche migliori possibili e cioè che si trovi ad una temperatura inferiore alla T_g .



Figura 94 Deformazione causata dall'azione degli estrattori.

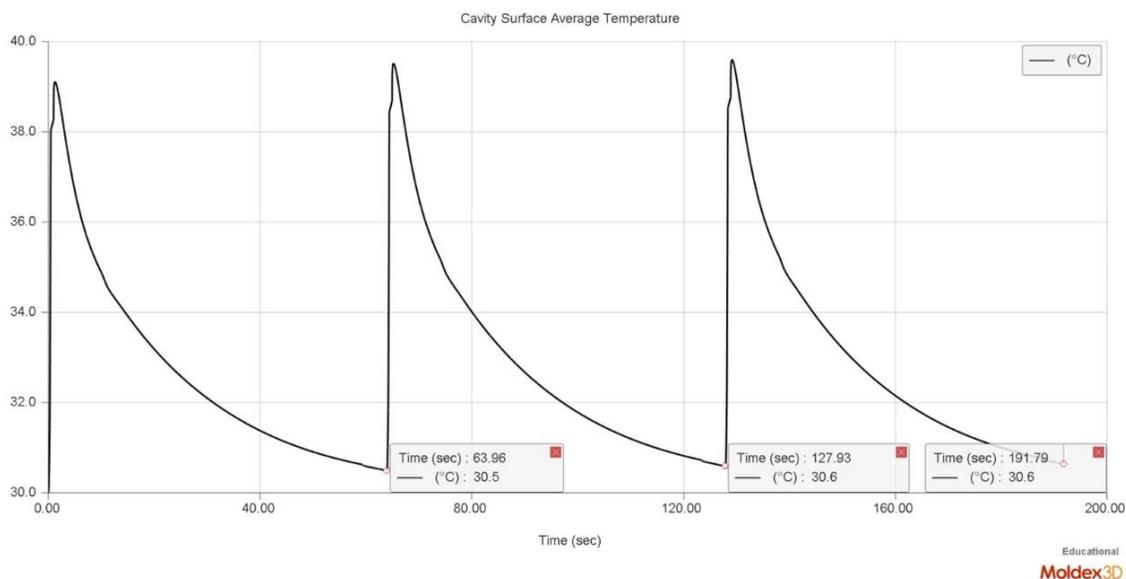


Grafico 21 Temperatura media della superficie interna dello stampo in funzione del tempo, risultato di Analisi 15.

La seconda valutazione che si può ottenere analizzando le misure della termografia e le simulazioni riguarda la temperatura dello stampo.

Figura 83 nel capitolo 10 è il risultato della termografia eseguita sul punzone dello stampo. Come già descritto in precedenza la termografia evidenzia la formazione di un gradiente di temperatura all'interno dello stampo; in particolare gli spigoli del punzone si trovano alla temperatura maggiore (33,6 °C), le pareti laterali invece si trovano ad una temperatura inferiore circa 29 °C ed infine la parete di base si trova ad una temperatura ancora più bassa circa 28 °C. Il gradiente che si è venuto a formare dipende dalla geometria dei canali di raffreddamento: i canali hanno una forma cilindrica quindi le superfici dello stampo non sono equidistanti da essi, in particolare gli spigoli sono il punto più distante dai canali e per questo motivo in questa zona l'efficienza di smaltimento del calore è inferiore, al contrario il centro della superficie di base è il punto più vicino ai canali di raffreddamento per questo motivo quest'area è la più fredda.

Inoltre definendo un'area opportuna (area 10) è possibile calcolare la temperatura media della superficie esposta alla telecamera; in questo caso la temperatura è di 30,2 °C.

Questi risultati indicano che la temperatura media dello stampo all'inizio di un nuovo ciclo è uguale alla temperatura impostata, tuttavia la temperatura varia significativamente lungo la superficie del pezzo. In particolare il punto più caldo dello stampo si trova in corrispondenza della zona in cui agiscono gli estrattori, occorre notare questo fatto in quanto può avere un effetto sul processo di estrazione e sulla deformazione del pezzo.

La simulazione del processo permette di calcolare la temperatura media della superficie dello stampo; il grafico 18 è il risultato della simulazione Analisi 15. Il grafico è caratterizzato da tre picchi e tre minimi, quando il polimero viene iniettato la temperatura dello stampo a contatto con il materiale caldo aumenta velocemente fino a raggiungere il valore di picco, poi durante il raffreddamento lo stampo raffredda progressivamente fino ad un valore di minimo, questo valore tuttavia non coincide con la temperatura fissata dello stampo. Questo accade perché il pezzo viene estratto prima che lo stampo raggiunga nuovamente la temperatura di inizio del ciclo; a causa di questo fenomeno, durante il processo di stampaggio, la temperatura dello stampo tende a fissarsi su un valore di regime diverso dal valore prefissato. In grafico 18 è messo in evidenza il punto di minimo in condizioni di regime che corrispondono all'istante di apertura dello stampo ed è quindi il punto corrispettivo a quello della termografia. A 191,79 secondi la temperatura media dello stampo calcolata con la simulazione è 30,6 °C.

La simulazione mette in evidenza uno scostamento della temperatura media dello stampo rispetto al valore di partenza, questa variazione tuttavia è di soli 0,6 °C ed è quindi da considerarsi trascurabile per il processo. Il risultato è quindi in accordo con la misura descritta in precedenza. Il grafico temperatura media della superficie versus tempo calcolato con la simulazione non permette tuttavia di osservare e identificare il gradiente di temperatura che è stato misurato con la termometria.

L'analisi e il confronto della prova sperimentale e della simulazione hanno messo in evidenza come in termini di temperatura dello stampo il parametro più importante non sia la temperatura media ma il gradiente di temperatura che si sviluppa sulla superficie. Questo parametro tuttavia non viene calcolato dalla simulazione.

Il fatto che la temperatura dello stampo che è stata misurata non sia omogenea indica inoltre che lo smaltimento del calore necessario per raffreddare il pezzo non è bilanciato in tutte le direzioni; è infatti più efficace al centro delle superfici del punzone, mentre l'efficienza di smaltimento è inferiore in corrispondenza degli spigoli. Questo fenomeno ha un effetto sul processo di

raffreddamento e solidificazione del pezzo e come osservato in precedenza questo aspetto non viene considerato dalla simulazione.

11.4 Qualità del pezzo stampato, deformazioni e ritiri

Analisi 17 e Prova 9 sono state eseguite applicando gli stessi parametri di processo, inoltre per eseguire la simulazione è stato usato il modello reologico che meglio approssima il comportamento del Luminy PLA L130 ottenuto nel capitolo 9. E' quindi possibile confrontare i risultati della simulazione che descrivono deformazioni e ritiri con il pezzo stampato durante Prova 9.

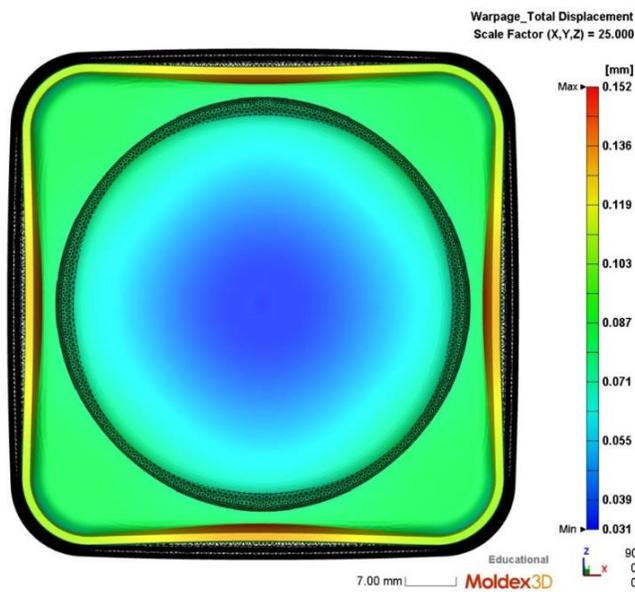


Figura 96 Deformazione del pezzo, risultato di Analisi 17.

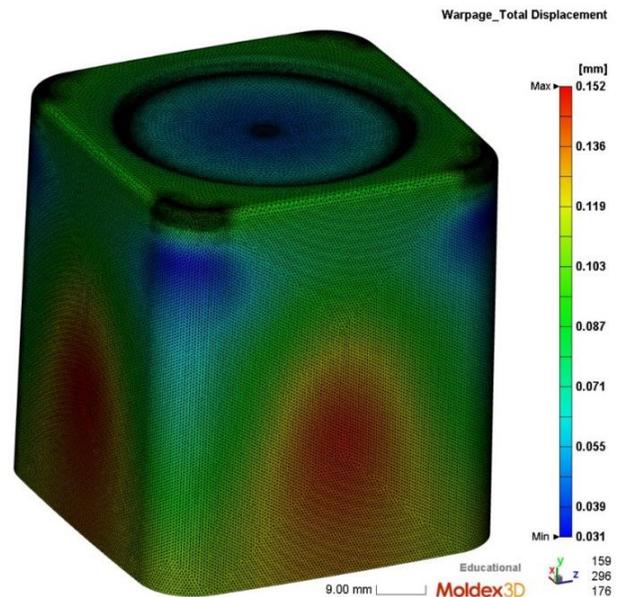


Figura 95 Total displacement, risultato di Analisi 17.

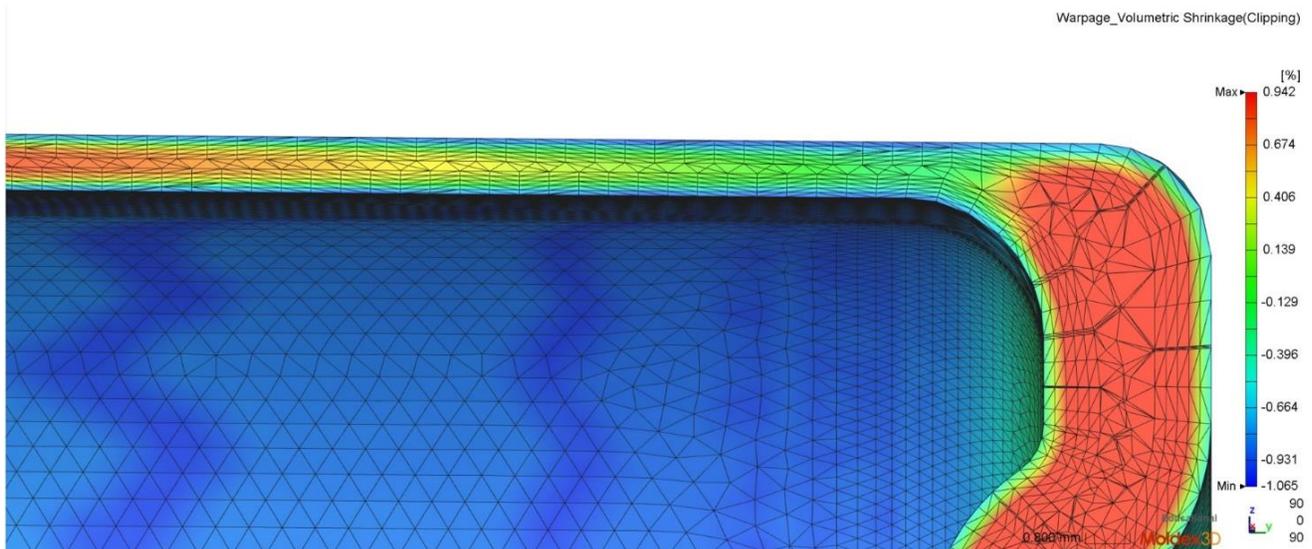


Figura 97 Ritiro volumetrico, risultato di Analisi 17.

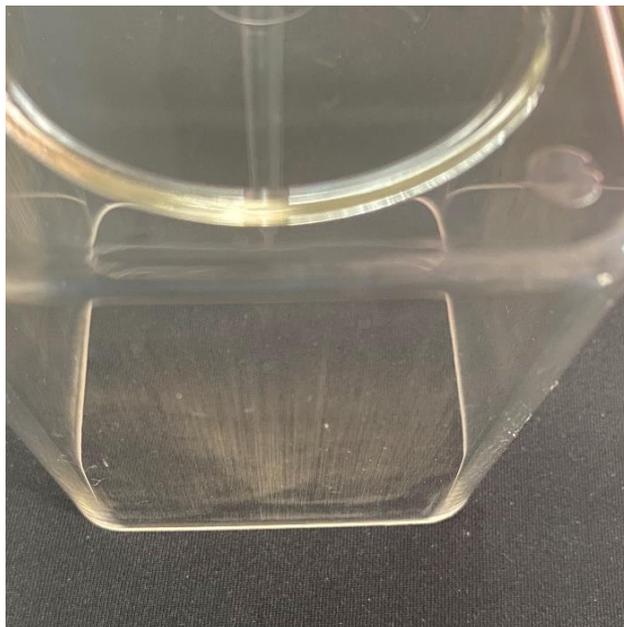


Figura 98 Difetti presenti sulle superfici laterali del pezzo ottenuto in Prova 9.

Il pezzo prodotto nelle condizioni di Prova 9 possiede la migliore qualità in termini di ritiro e deformazione tra i pezzi analizzati in questa tesi. Come detto in precedenza il pezzo di Prova 9 non presenta deformazioni visibili né ritiri nella zona vicina al punto di iniezione.

Osservando le pareti laterali del pezzo è tuttavia possibile osservare dei difetti superficiali. Sulla superficie interna del pezzo è evidente una strisciatura e anche sulla superficie esterna è presente un difetto, sebbene meno evidente. Questi solchi sono causati dallo scorrimento del pezzo sulla superficie dello stampo durante l'apertura e l'estrazione. Si possono osservare i difetti in figura 98.

In figura 95, 96 e 97 sono riportati i risultati di warpage: deformazione, total displacement e ritiro volumetrico ottenuti con la simulazione Analisi 17.

Si calcola un total displacement massimo di 0,152 mm; inoltre la zona che subisce il massimo ritiro è limitata al centro delle facce laterali, mentre la restante parte di superficie subisce uno scostamento inferiore a 0,110 mm. Questo risultato è buono ed è simile ai risultati delle simulazioni finalizzate a ottimizzare il ritiro (capitolo 7).

Il ritiro differenziato delle varie zone produce una distorsione del pezzo simile all'immagine in figura 95. Tra le aree indicate in verde e le aree in rosso lo scostamento varia di solo 0,05 mm, il pezzo quindi, benché tenda ad acquisire una forma a lobi, subisce una distorsione molto limitata.

Poiché il ritiro tende a ridurre la dimensione della cavità del pezzo, questo tende ad aderire sul punzone dello stampo. Durante l'estrazione la superficie interna delle pareti scorre sulla superficie del pezzo; questo processo è confermato dai difetti visibili sul pezzo stampato, sulla superficie interna delle pareti infatti si osserva una strisciatura.

In base a queste osservazioni la simulazione approssima in modo adeguato il ritiro e la distorsione del pezzo.

Figura 97 descrive il ritiro volumetrico del pezzo calcolato con la simulazione. L'immagine rappresenta la vista in sezione del pezzo nella zona di una delle pareti laterali, la scala cromatica definisce il valore di ritiro calcolato in ogni nodo della sezione.

La zona al centro della sezione, colorata in rosso, subisce un ritiro di circa +1%, il segno di questa grandezza indica che il materiale subisce un contrazione. Invece, la zona superficiale colorata in blu subisce un ritiro di circa -1%, il segno di questa grandezza indica che il materiale subisce un'espansione e tende ad occupare un volume maggiore di quello occupato dal fuso. Inoltre in figura 97 si può osservare una zona in cui il gradiente di colore va dal blu al verde; secondo la legenda a questi colori è associato un valore di ritiro volumetrico negativo, cioè l'intera sezione durante il raffreddamento tende ad espandere.

Il polimero durante il processo di solidificazione e raffreddamento subisce un ritiro che tende a ridurre le dimensioni del pezzo lavorato; tuttavia, nel caso dello stampaggio a iniezione, il polimero fuso viene compresso durante l'iniezione e mantenuto in pressione durante il raffreddamento e la solidificazione, a causa della pressione si ottiene un materiale più denso che dilata quando si apre lo stampo e la pressione diminuisce.

A causa di questo fenomeno il polimero durante l'apertura dello stampo determina una pressione sulle pareti e di conseguenza aumenta la forza di attrito tra le superfici del pezzo e dello stampo. Il pezzo studiato in questa tesi, come si può osservare dai dati di progetto, possiede un basso angolo di spoglia; questo significa che durante l'estrazione le pareti del pezzo e dello stampo scorrono una sull'altra.

Questa osservazione giustifica la presenza di difetti anche sulla superficie esterna del pezzo, infatti sebbene il pezzo subisca la distorsione indicata dal warpage, per effetto della dilatazione la superficie esterna rimane a contatto con la parete concava dello stampo e lo strisciamento, che avviene durante l'apertura, produce i difetti visibili. Inoltre si osserva che la zona in cui la simulazione identifica l'espansione del polimero (gradiente di colore da blu a verde) coincide con la porzione della superficie esterna del pezzo in cui sono più evidenti i difetti, cioè il punto in cui varia lo spessore del pezzo tra la base e le pareti.

Questo fenomeno produce inoltre un secondo effetto. Per aprire lo stampo la pressa deve applicare una forza superiore alla forza di attrito generata tra pezzo e stampo, all'aumentare della pressione di packing aumenta la dilatazione del pezzo e quindi la forza di attrito. Per questo motivo le condizioni di pressione applicate in Prova 9 sono il limite massimo, infatti, durante questa prova, la forza di apertura di 17 KN inizialmente applicata per aprire lo stampo non è stata sufficiente ed è stata usata la massima forza di apertura della pressa. Se si provasse ad aumentare ulteriormente la pressione di packing la forza di attrito tra pezzo e stampo sarebbe superiore alla forza di apertura della pressa e lo stampo si bloccherebbe. Il pezzo studiato presenta questa criticità perché le superfici laterali si sviluppano parallelamente alla direzione di apertura dello stampo, quindi le pareti del pezzo e dello stampo devono scorrere le une sulle altre.

La discussione dei risultati ha dimostrato che in questo caso la simulazione approssima correttamente le proprietà del pezzo stampato, inoltre ha permesso di risalire alle cause dei problemi riscontrati durante la produzione. Infatti utilizzando il risultato relativo al ritiro volumetrico e alla deformazione è stato possibile ipotizzare i motivi per cui è necessario limitare la pressione di packing e le circostanze che impediscono la corretta estrazione del pezzo.

Il programma CAE si dimostra quindi utile per studiare il processo produttivo e analizzare i dati misurati durante la produzione. Viceversa è più complesso prevedere il processo produttivo prima di metterlo effettivamente in atto. Per esempio si può considerare il caso appena discusso. Durante la fase di ottimizzazione dei parametri di processo non sono state proposte le stesse valutazioni fatte in questo paragrafo in quanto non è sempre possibile quantificare l'entità di alcuni dei fenomeni messi in luce dalla simulazione. Nel caso specifico, che è stato studiato per analizzare l'estrazione del pezzo, occorre abbinare il risultato del total displacement e del ritiro volumetrico;

l'effetto combinato di questi risultati tuttavia non è di facile interpretazione perché occorre confrontare e abbinare il contributo di uno spostamento e di una variazione percentuale di volume.

11.5 Conclusioni

In questo capitolo sono stati confrontati i risultati delle simulazioni con le prove di stampaggio eseguite nelle stesse condizioni. Questo lavoro ha permesso di identificare i punti di forza e i limiti della simulazione.

Nel corso di questa tesi sono stati proposti alcuni possibili metodi e strategie per progettare il processo produttivo e successivamente per analizzare il prodotto; in questo modo è stato possibile identificare i difetti riscontrati durante le prove di stampaggio e sfruttando la simulazione risalire alle loro cause.

La simulazione del processo di feeling è risultata essere accurata nell'approssimazione e ha permesso di identificare tutti i fenomeni fluidodinamici che sono avvenuti durante il riempimento. L'analisi del profilo di pressione di feeling ha inoltre permesso di valutare il comportamento fluidodinamico del polimero e di verificare l'accuratezza del modello scelto per descrivere il materiale.

Per quanto riguarda l'analisi del raffreddamento del pezzo questa è risultata essere l'analisi più critica da effettuare. Il raffreddamento infatti ha effetto su molteplici aspetti del processo e sulle proprietà del prodotto finito come ad esempio facilità di estrazione, deformazioni del pezzo e fenomeni termodinamici e fluidodinamici del ciclo produttivo.

La simulazione del processo di cooling è risultata essere nel complesso adeguata e ha permesso di valutare l'ottimizzazione del ciclo produttivo. Tuttavia sono stati osservati alcuni limiti; per esempio la simulazione non permette di calcolare il profilo di temperatura che si sviluppa all'interno dello stampo mentre in base alle considerazioni effettuate questo fenomeno ha un effetto sul processo di raffreddamento.

L'ultima parte approfondita nel corso della tesi riguarda lo studio del warpage. L'analisi del total displacement, delle deformazioni e del ritiro volumetrico ha permesso di ottimizzare i parametri di processo da applicare alle prove di stampaggio e successivamente ha permesso di analizzare il prodotto stampato. Infatti utilizzando questi parametri è stato possibile analizzare e risalire alle cause che hanno determinato i difetti del prodotto.

La simulazione è stata efficace nell'analizzare il prodotto; in alcuni casi tuttavia la sola simulazione non ha permesso di valutare tutti gli aspetti necessari alla progettazione del processo produttivo, per esempio nell'analisi dei difetti superficiali e nel calcolo della forza di apertura dello stampo. In questi casi è stato possibile produrre delle considerazioni solo dopo aver stampato l'oggetto e aver osservato nella pratica il risultato del processo. Riguardo questo tema occorre inoltre notare che i risultati del warpage ottenuti durante le simulazioni relative all'ottimizzazione dei parametri di processo si sono dimostrati significativamente diversi rispetto alla proprietà del pezzo prodotto; nello specifico la simulazione non ha mostrato il fenomeno di sovraimpaccamento che hanno invece dimostrato in modo evidente le prove di stampaggio, per questo motivo il risultato della simulazione suggeriva di utilizzare pressioni di packing significativamente maggiori rispetto alle pressioni realmente applicabili. Allo stesso tempo tuttavia, sebbene l'errore appena descritto, la simulazione ha permesso di identificare l'andamento del profilo di pressione di packing che effettivamente è risultato essere il migliore anche nella pratica. Quindi nel complesso la simulazione ha facilitato

l'ottimizzazione dei parametri di processo riducendo il numero di stampe necessarie per identificare il migliore risultato.

Il software di simulazione Moldex3D è risultato essere efficace nell'assistere la progettazione del processo produttivo e lo studio delle proprietà del pezzo stampato; tuttavia è necessario conoscere il funzionamento e le caratteristiche specifiche del programma per sfruttare appieno le potenzialità e valutare l'attendibilità dei risultati e la loro possibile applicazione.

Bibliografia

- [1] Maw-Ling Wang, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu (David). *Molding Simulation - Theory and Practice - 4 Process Conditions*. Hanser Publishers, 2018.
- [2] Maw-Ling Wang, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu (David). *Molding Simulation - Theory and Practice - 1 Overview of Plastic Molding*. Hanser Publishers, 2018.
- [3] Maw-Ling Wang, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu (David). *Molding Simulation - Theory and Practice – 6 Flow Consideration versus Part Features*. Hanser Publishers, 2018.
- [4] Maw-Ling Wang, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu (David). *Molding Simulation - Theory and Practice - 5 Molding Simulation Methodology*. Hanser Publishers, 2018.
- [5] Peter Kennedy, Rong Zheng. *Flow Analysis of Injection Molds (2nd Edition) - 4 Governing Equation*. Hanser Publishers, 2013.
- [6] Wen-Hsien Yang* Allen Peng, Louis Liu and David C.Hsu *Integrated numerical simulation of injection molding using true 3D approach*. Core Tech System Co., Ltd., HsinChu, Taiwan, ROC; Rong-Yeu Chang National Tsing-Hua University, HsinChu, Taiwan 30043, ROC. <https://www.moldex3d.com/assets/2011/09/Integrated-Numerical-Simulation-of-Injection-Molding-Using-True-3D-Approach.pdf>
- [7] Jiyuan Tu, Guan-Heng Yeoh, Chaoqun Liu. *Computational Fluid Dynamics - A Practical Approach (3rd Edition) – 5 CFD Technique: The Basics*. Elsevier, 2018.
- [8] Yasuki Nakayama. *Introduction to Fluid Mechanics (2nd Edition) – 15 Computational Fluid Dynamics*. Hanser Publishers, 2018.
- [9] Peter Kennedy, Rong Zheng. *Flow Analysis of Injection Molds (2nd Edition) – 5 Approximation for Injection Molding*. Hanser Publishers, 2013.
- [10] Peter Kennedy, Rong Zheng. *Flow Analysis of Injection Molds (2nd Edition) - 6 Numerical Methods for Simulation*. Hanser Publishers, 2013.
- [11] Lanny D. Schmidt. *Engineering of Chemical Reactions (2nd Edition) - 13.3.3 Polylactic Acid*. Oxford University Press, 2005.

[12] Michael Tolinski, Conor P. Carlin. *Plastics and Sustainability, Grey is the New Green - Exploring the Nuances and Complexities of Modern Plastics (2nd Edition) - 3.5.1 Polylactic Acid (PLA)*. John Wiley & Sons, 2021.

[13] Luminy PLA Portfolio Factsheet. TotalEnergies Corbion, 2022.
https://www.totalenergies-corbion.com/media/hv5fpt4m/factsheet_luminy-pla-neat-resins_20220324.pdf

[14] <https://www.wittmann-group.com/it/smartpower-25-400-t>, 2022.

[15] *Istruzioni per l'uso, SERIE SmartPower B, The servo hydraulic benchmark*. Wittmann Battenfeld, 2022.

[16] Mark A. Spalding, Ananda M. Chatterjee. *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology - Definitive Guide to Manufacturing, Properties, Processing, Applications and Markets - 7.1 Rheology Fundamentals*. John Wiley & Sons, 2018.

[17] Amr M. Baz. *Active and Passive Vibration Damping - 3.3.1 Dynamic, Mechanical, and Thermal Analyzer*. John Wiley & Sons, 2019.

[18] Adriana Mento. *Preparazione e caratterizzazione di vetrimeri e nanocompositi vetroceramici mediante trasformazione reattiva – 2.2.4 Caratterizzazione reologica*. Rel. Alberto Fina, Daniele Battezzatore. Politecnico di Torino, tesi di laurea magistrale in Ingegneria dei Materiali, 2022.

[19] <https://www.tainstruments.com/products/thermal-analysis/>, 2022.

[20] <https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/dma.pdf>, 2022.

[21] *Optis PI 640i technical data*. Optris infrared measurements. 2022.
https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-640?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/Datasheet%20optris%20PI%20640i.pdf

[22] *Basic principles of non-contact temperature measurement*. Optris infrared measurements. 2022.
https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-640?file=tl_files/pdf/Downloads/Zubehoer/IR%20Basics.pdf

[23] Peter Kennedy, Rong Zheng. *Flow Analysis of Injection Molds (2nd Edition) – 3.6.5 Incorporation of temperature effects*. Hanser Publishers, 2013.

[24] Chanil Park, Choyeon Park, Xiao Nie, Jaeho Lee, Yong Seok Kim, and Youngjae Yoo; *Fully Organic and Flexible Biodegradable Emitter for Global Energy-Free Cooling Applications*; *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* Vol.10 (21), p.7091-7099; 2022.

APPENDICE: GUIDA ALLA SIMULAZIONE CON MOLDEX3D

INDICE

1 Creare un nuovo progetto	2
2 Architettura del programma	2
3 Importare una nuova geometria	3
4 Canali di alimentazione	5
5 Creare una nuova geometria e traslare gli elementi dello stampo nello spazio	7
6 Stampo e canali di raffreddamento	9
7 Condizioni al contorno	13
8 Generazione della mesh	13
8.1 Funzione edesign	13
8.2 Funzione solid.....	14
8.3 Salvare e importare la mesh.....	18
9 Preparazione dell'analisi	18
9.2 Definizione del processo.....	20
9.3 Scelta dell'analisi	22
9.4 Avviare il calcolo	23
10 Analisi dei risultati	24
10.1 Filling.....	25
10.1.1 Short shot	26
10.1.2 Weld line.....	26
10.1.3 Air trap.....	26
10.1.4 Esitazioni.....	26
10.1.5 Temperature.....	27
10.1.6 Sprue pressure.....	27
10.2 Packing.....	28
10.2.1 Effetto del Packing.....	28
10.2.2 Tempo di congelamento del gate.....	29
10.2.3 Forza di chiusura.....	30
10.3 Cooling.....	31
10.3.1 Tempo di raffreddamento	31
10.4 Warpage	33

1 Creare un nuovo progetto

Per iniziare la simulazione, come mostrato in figura 1, selezionare il testo New Run in alto a sinistre della finestra. Definire il nome della simulazione e identificare la locazione della cartella che il programma creerà.

Premendo 'ok' il programma crea una cartella con il nome impostato, all'interno di questa cartella vengono generate diverse sottocartelle che contengono i dati e i risultati della simulazione. All'interno di questa cartella è presente inoltre un file MRM con icona bianca che permette di aprire il programma e caricare la simulazione.

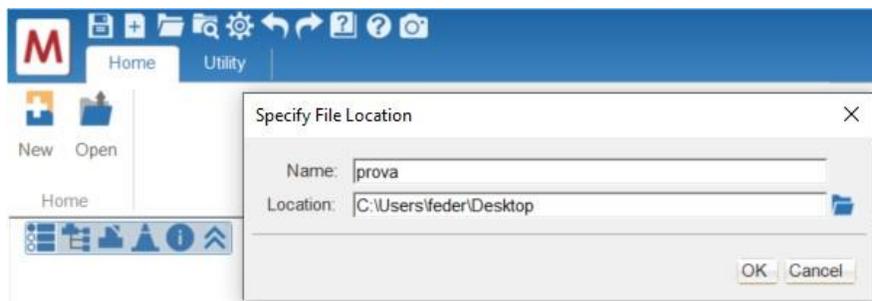


Figura 1 Creare una nuova simulazione.

2 Architettura del programma

Una volta creata la cartella del progetto si apre la schermata riportata in figura 2.

Tutti gli aspetti del progetto vengono gestiti in un unico ambiente tuttavia è necessario definire nell'ordine il modello dello stampo, la mesh e infine le proprietà del materiale utilizzato e i parametri di processo.

La prima azione da compiere è importare la geometria del pezzo utilizzando il comando presente nella sezione "HOME", dopo di che è necessario compilare le sezioni "MODEL" e "MESH", infine si ritorna nella sezione "HOME" per impostare il materiale, i parametri di processo e avviare la simulazione.

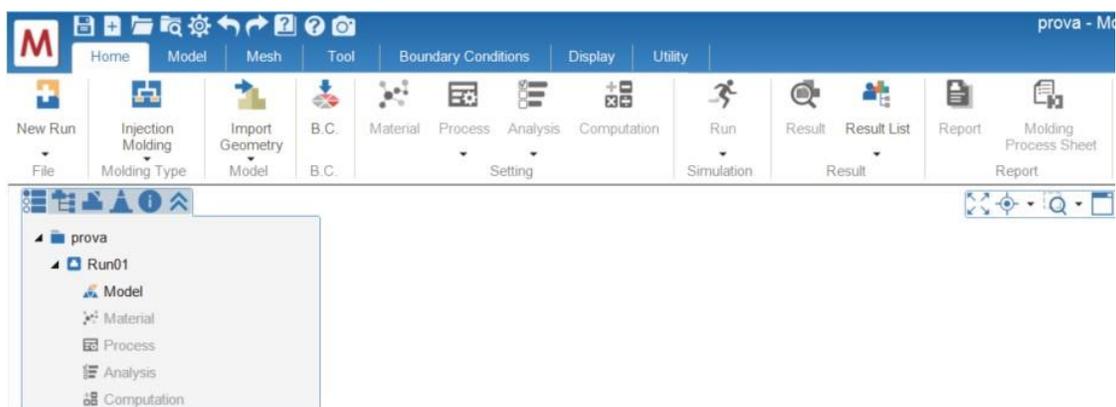


Figura 2 Toolbar della schermata home.

3 Importare una nuova geometria

Per importare una nuova geometria cliccare sull'icone "IMPORT GEOMETRY" nella sezione "HOME" e selezionare i file della geometria voluta. E' possibile importare file in formato STL o STEP.

Come mostrato in figura 3 è possibile, aprendo la tendina sotto l'icona, importare direttamente una mesh, in questo caso non sarà necessario seguire i passaggi proposti da questa appendice e si potrà passare direttamente alla definizione del materiale e dei parametri di processo.

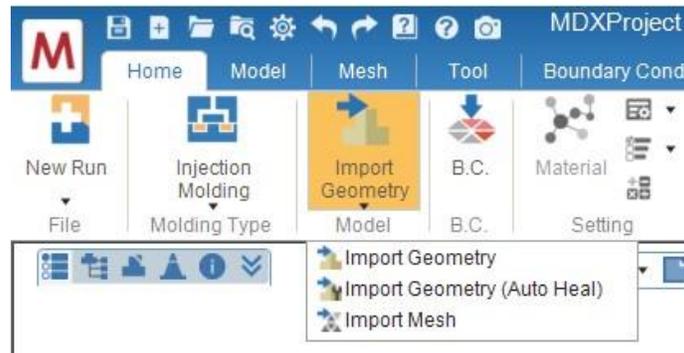


Figura 3 Menu per importare nuove geometrie.

Dopo aver importato la geometria del pezzo si passa alla sezione "MODEL" per definire le caratteristiche dello stampo.

In figura 4 è riportata la schermata da compilare per definire lo stampo. Come mostrato in figura la geometria importata è rappresentata di colore grigio poiché non è ancora stata attribuita la funzione dell'oggetto.

Cliccando sulla figura questa viene selezionata (contorni gialli), dopo di che si esegue la funzione "CHECK GEOMETRY" che permette di verificare che la geometria importata non presenti dei difetti.

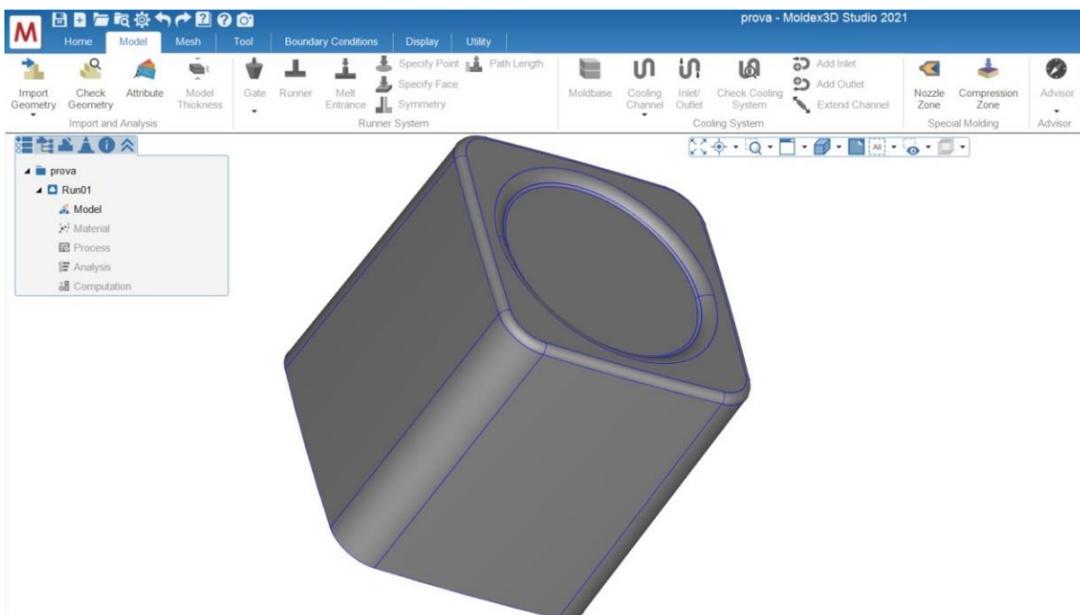


Figura 4 Toolbar per la creazione del modello.

Il risultato di questo controllo viene mostrato nella tabella riportata in figura 5. Se la geometria non presenta difetti si può continuare la compilazione della sezione “MODEL”, se invece presenta dei difetti si aprirà automaticamente la sezione “FIX GEOMETRY” che contiene i comandi per correggere il modello CAD.

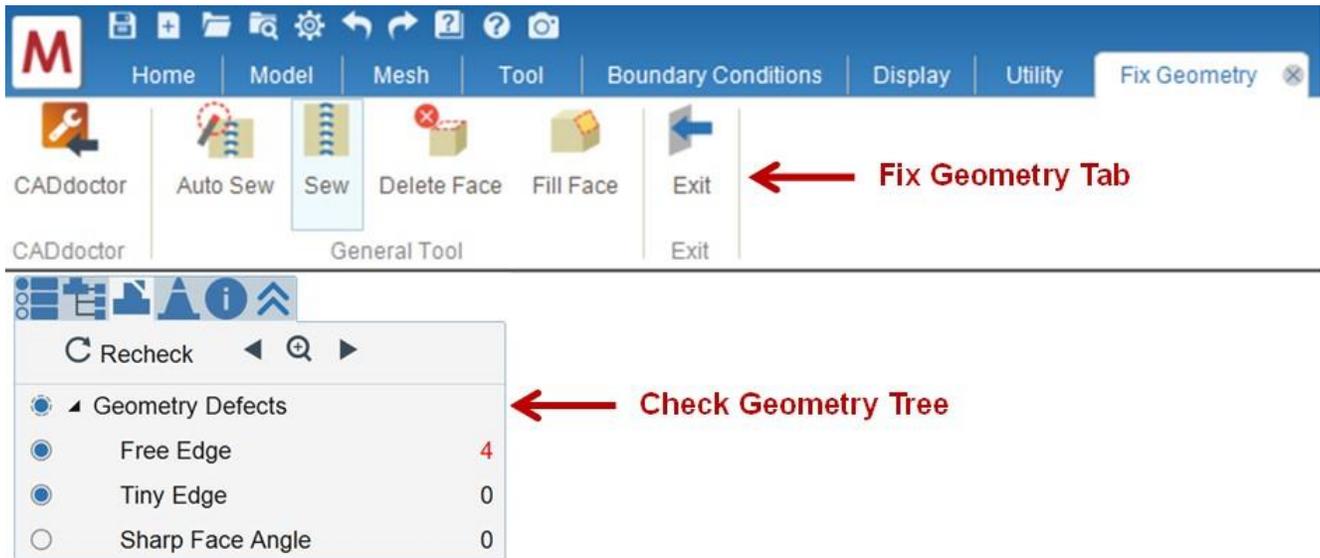


Figura 5 Programma di correzione dei difetti della geometria. [1]

Per definire la funzione della geometria importata cliccare sull'icona “ATTRIBUTE” come in figura 5, aprire l'elenco a tendina e selezionare la funzione, infine premere il tasto con la spunta verde per confermare.

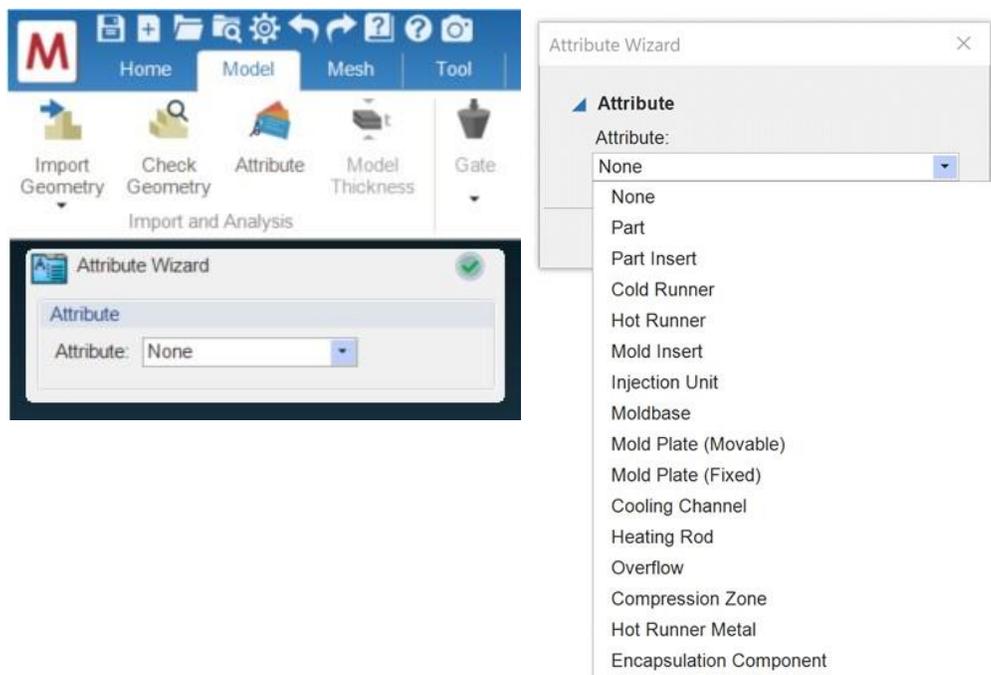


Figura 6 Definire la funzione della geometria importata. [1]

Come ultimo passaggio cliccare sull'icona "MODEL THICKNESS", il programma calcola lo spessore del pezzo e mostra il risultato in figura 7. Lo spessore rilevato viene identificato con una scala di colori che può essere interpretata con la legenda presente a destra della schermata.

Occorre eseguire questa operazione per verificare che il pezzo sia stato importato con le dimensioni e unità di misura adeguate, inoltre occorre verificare che il programma rilevi correttamente gli spessori di ogni sezione poiché questo parametro è necessario per l'esecuzione di alcuni modelli di calcolo.

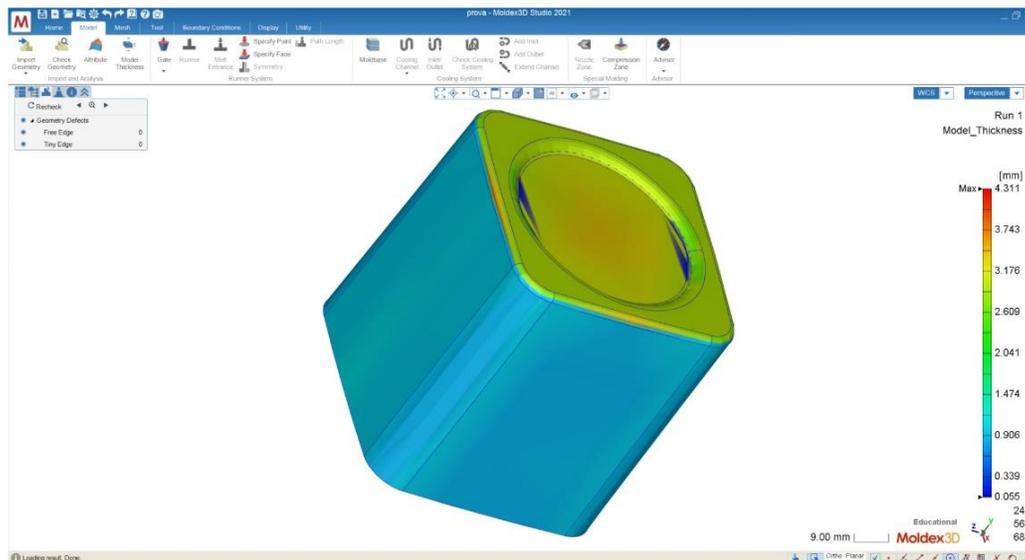


Figura 7 Spessore del componente, risultato della funzione "model thickness".

4 Canali di alimentazione

Dopo aver compilato la cartella "IMPORT E ANALYSIS" si passa a definire i canali di alimentazione.

Il primo passo è scegliere il tipo di gate voluto e posizionarlo sulla superficie del pezzo. Cliccando sull'icona "GATE" si apre nuovamente la tendina "ATTRIBUTE WIZZARD" come mostrato in figura 8, si seleziona quindi il tipo di gate di interesse e si impostano le dimensioni caratteristiche, quindi si identifica la posizione in cui applicare il gate cliccando nel punto voluto.

Nell'esempio proposto è stato applicato un solo gate, è possibile inserire più gate ripetendo la stessa operazione.

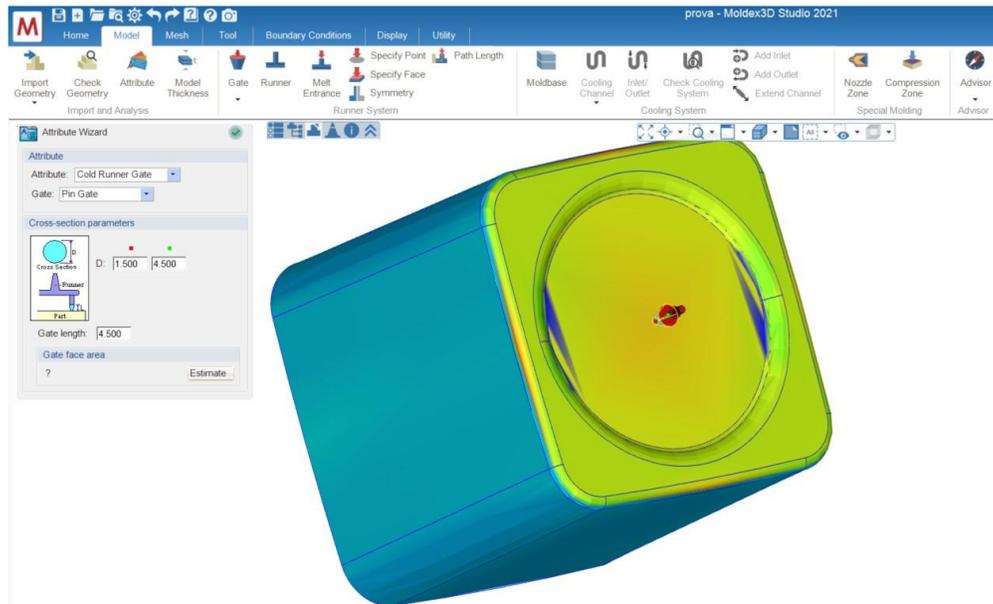


Figura 8 Creazione del gate.

Cliccando sulla freccia sotto l'icona "GATE" viene aperto un ulteriore menù, riportato in figura 9, in cui possono essere impostate caratteristiche aggiuntive del gate: canale freddo o caldo e morfologie particolari del gate.

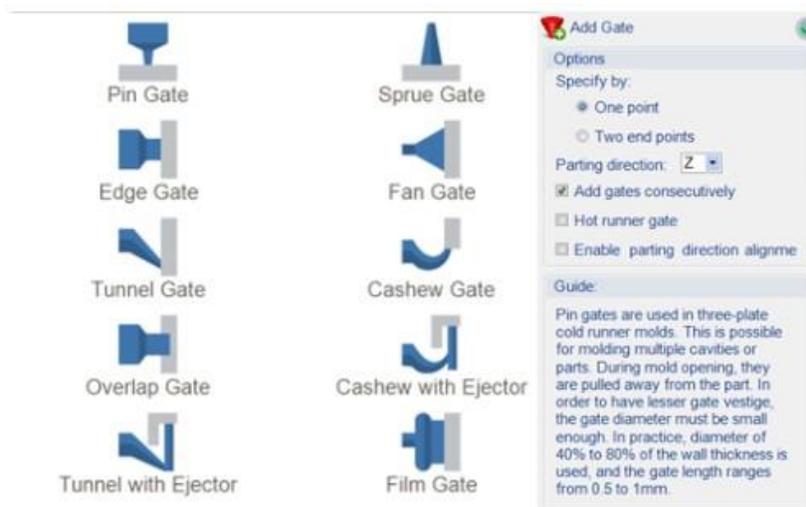


Figura 9 Scelta del gate.

Dopo aver costruito i gate occorre definire i canali di alimentazione. Cliccando sull'icona "RUNNERS" viene automaticamente generata una possibile configurazione dei canali in base ai gate inseriti, viene inoltre automaticamente rilevato e applicato il punto di ingresso del materiale nello stampo (melt entrance); si ottiene quindi il risultato in figura 10.

Cliccando sull'icona "RUNNERS" viene inoltre aperto il wizard che permette di impostare la dimensione dei canali di alimentazione e definire la loro orientazione nello spazio cartesiano. Infine cliccando sull'icona con la spunta verde si conferma la creazione dei canali di alimentazione.

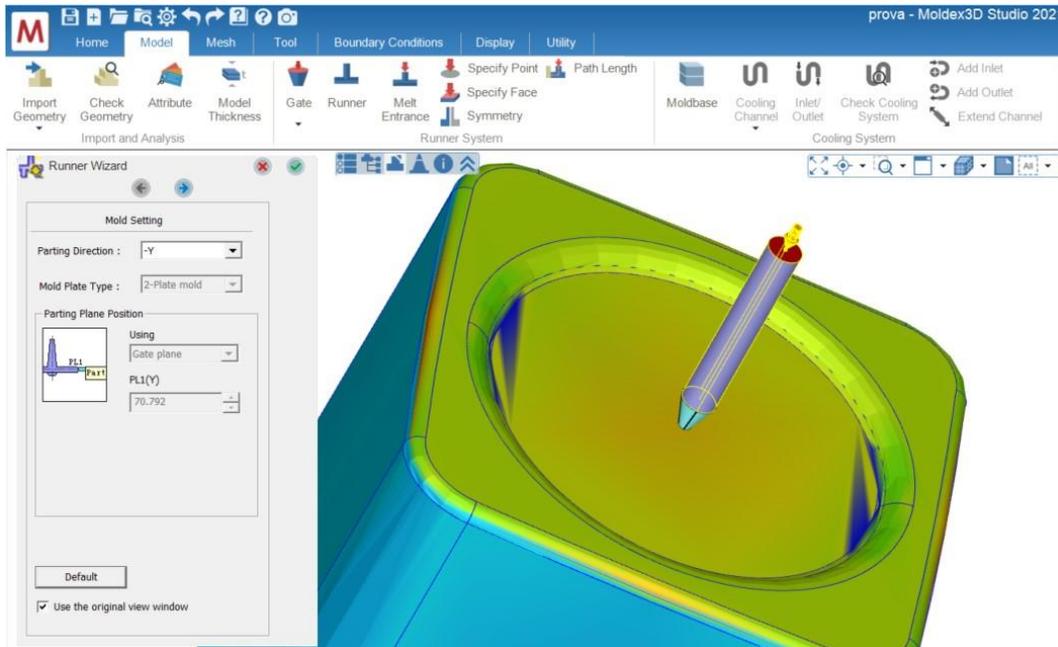


Figura 10 Costruzione dei canali di alimentazione.

Per creare i canali di alimentazione sono disponibili altre due modalità. E' possibile importare direttamente il modello CAD dei canali di alimentazione seguendo le istruzioni della sezione 2 "Importare una nuova geometria", in questo caso occorrerà attribuire a questa geometria la funzione di canali di alimentazione utilizzando l'icona "ATTRIBUTE". Inoltre è possibile creare i canali di alimentazione disegnandoli direttamente con il programma utilizzando la sezione "TOOL", questo metodo è discusso nella sezione 5 "Creare una nuova geometria e traslare gli elementi dello stampo".

5 Creare una nuova geometria e traslare gli elementi dello stampo nello spazio

All'interno dell'ambiente di moldex3D è possibile creare nuove geometrie utilizzando la sezione "TOOLS".

I comandi in figura 11 possono essere usati per creare, modificare o spostare nello spazio la geometria di tutti gli elementi dello stampo.

Per creare una nuova struttura tridimensionale è possibile disegnare inizialmente una geometria bidimensionale utilizzando le funzioni riquadrate in rosso, dopo aver creato la base si utilizzano le funzioni di estrusione per creare la geometria 3D, queste funzioni sono presenti nel menù riquadrato in viola. Infine utilizzando le funzioni presenti nell'icona riquadrata in blu è possibile applicare operatori Booleani: unire, sottrarre e intersecare le figure.

Nel caso della costruzione di canali di alimentazione o di raffreddamento può essere sufficiente creare delle geometrie semplici come ad esempio dei cilindri, si utilizzano quindi le funzioni presenti nell'icona riquadrata in verde che permette di creare figure tridimensionali semplici.



Figura 11 Strumenti della schermata "tool".

Le figure costruite in questa sezione non possiedono ancora la definizione della loro funzione. Quando la figura è pronta è necessario tornare alla sezione "HOME", selezionare la figura (i contorni diventano gialli) e utilizzare il tasto "ATTRIBUTE" per definire la funzione del nuovo elemento. L'immagine della schermata relativa a questo passaggio è riportata in figura 12.

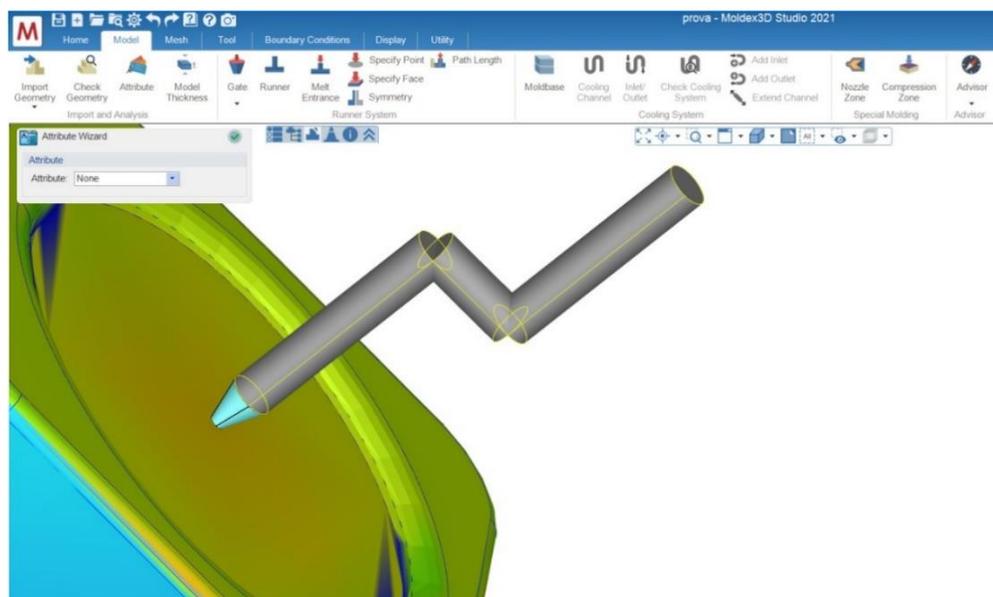


Figura 12 Costruzione dei canali di alimentazione personalizzati.

Dopo aver creato una nuova geometria oppure dopo aver importato un nuovo pezzo può essere necessario traslare, orientare o ruotare la geometria, per fare questo si utilizzano i comandi presenti nell'icona riquadrata in giallo (figura 11). Con questo comando è possibile anche copiare la figura e creare una figura speculare.

Diversamente dai comuni software CAD la sezione "TOOL" di Moldex3D non possiede una funzione che permette di creare il piano su cui disegnare in 2 dimensioni, quindi le geometrie devono essere create direttamente nello spazio 3D.

Per selezionare i punti di riferimento per la costruzione e definire l'orientazione nello spazio è utile scegliere la vista prospettica più adeguata utilizzando il comando a tendina in alto a destra. Inoltre nella parte della schermata in basso a destra, riportata in figura 13, sono presenti i comandi che permettono di identificare i punti con specifiche proprietà (punto medio, centro di una circonferenza, punti di intersezione o tangenza, ecc.), le funzioni Ortho e Planal permettono invece di identificare le direzioni parallele e perpendicolari agli assi cartesiani.



Figura 13 Toolbar, identificare le proprietà geometriche dei punti selezionati.

6 Stampo e canali di raffreddamento

Dopo aver costruito i canali di alimentazione occorre definire lo stampo e i canali di raffreddamento. All'interno della sezione "MODEL" cliccare l'icona "MOLDBASE" per creare lo stampo. Il programma genera automaticamente un possibile stampo, le dimensioni di questo e la sua orientazione nello spazio possono essere modificate utilizzando la finestra "MOLDBASE WIZADR" che viene aperta quando si clicca sull'icona "moldbase". In figura 14 è riportato un esempio di utilizzo di queste funzioni.

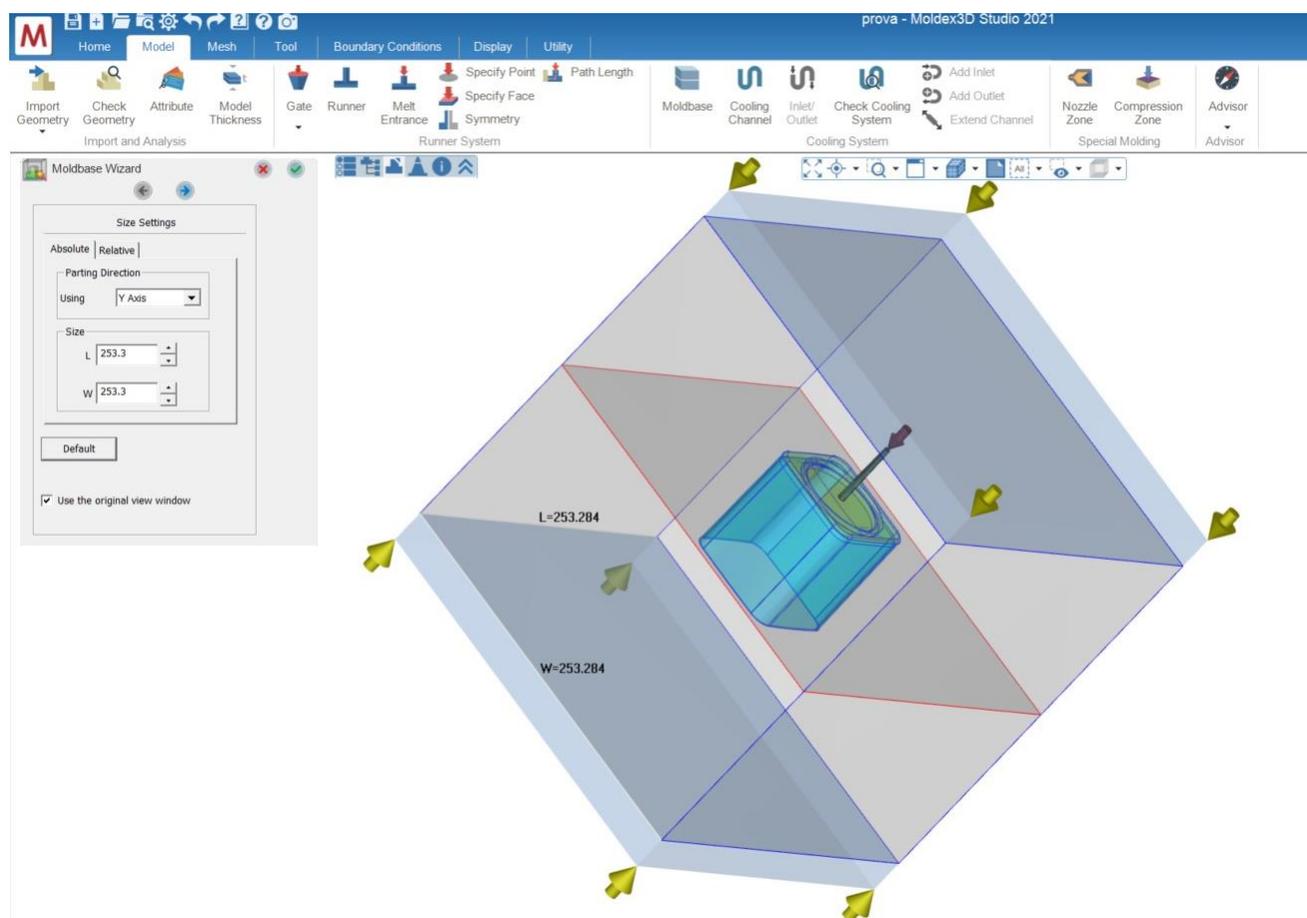


Figura 14 Costruzione dello stampo.

Per costruire i canali di raffreddamento cliccare sull'icona "COOLING CHANNEL", il programma genera una possibile configurazione dei canali e viene aperta la finestra "COOLING CHANNEL LAYOUT WIZARD" che permette di modificare i canali generati. L'esempio di utilizzo di queste funzioni è riportato in figura 15.

In modo automatico il programma utilizza canali lineari; cliccando sull'icona "TEMPLATE" viene aperta la finestra in figura 16 che permette di selezionare una diversa configurazione dei canali.

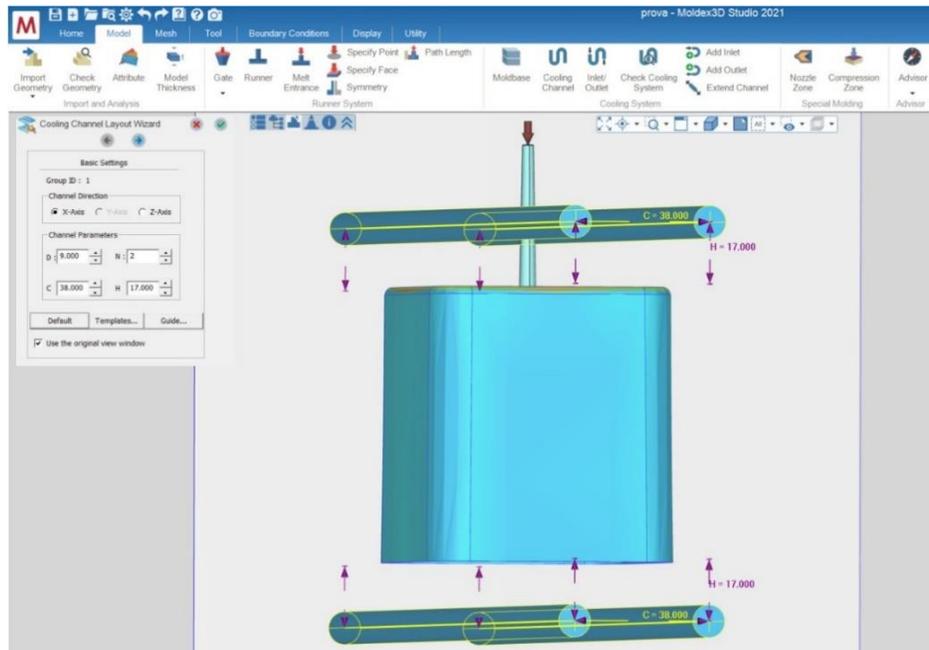


Figura 15 Costruzione dei canali di raffreddamento.

Dopo aver costruito i canali di raffreddamento è necessario applicare la condizione al contorno relativa all'ingresso e uscita del liquido di condizionamento. Cliccare sull'icona "INLET/OUTLET" per definire in modo automatico le superfici di ingresso e uscita del liquido oppure utilizzare le funzioni "ADD INLET" e "ADD UOTLET" per definire manualmente i punti di ingresso e uscita del liquido. Il risultato di questi passaggi è riportato in figura 17.

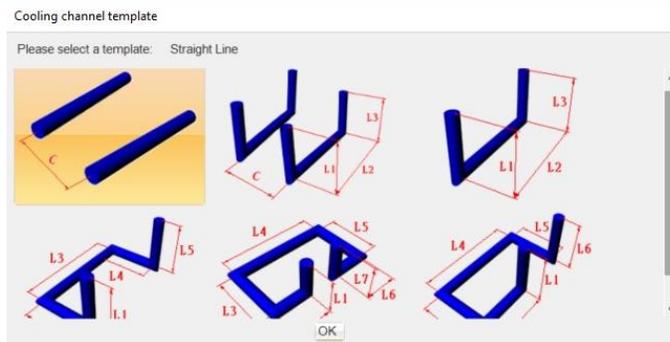


Figura 16 Template canali di raffreddamento.

In alternativa i canali di raffreddamento possono essere creati in modo completamente manuale costruendo una nuova geometria con le funzioni del "TOOLS", in modo analogo ai canali di alimentazione, come descritto nella sezione 5 "Creare una nuova geometria e traslare gli elementi dello stampo".

La geometria dei canali di raffreddamento può anche essere direttamente importata come file CAD, in questo caso occorre importare la nuova geometria seguendo i passaggi descritti nella sezione 3 "Importare una nuova geometria" e attribuire al modello la funzione "COOLING CHANNELS". Per orientare la geometria nello spazio è possibile utilizzare la funzione "MOOVE" nella sezione "TOOLS" come descritto in precedenza. Anche in questo caso come ultimo passaggio occorre definire le

condizioni al contorno di ingresso e uscita del liquido di raffreddamento. Il risultato di questi passaggi è riportato in figura 18.

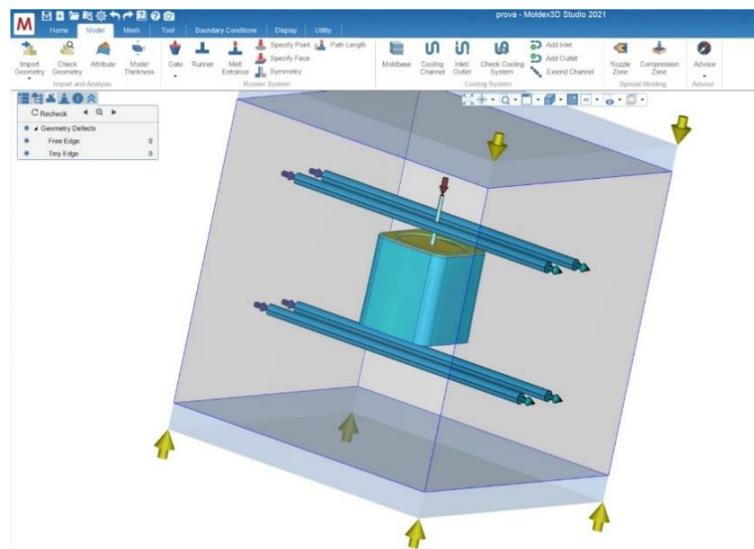


Figura 17 Canali di raffreddamento costruiti.

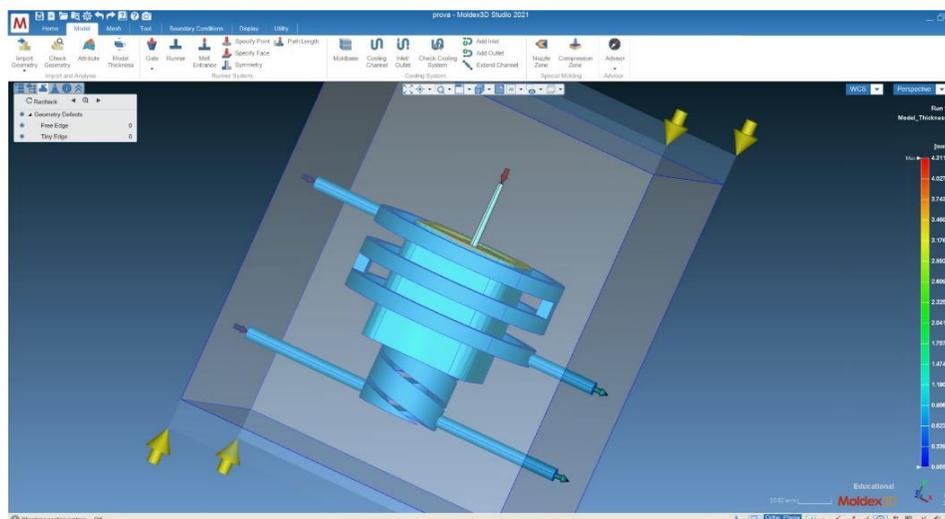


Figura 18 Canali di raffreddamento importati come file CAD.

Dopo aver terminato la costruzione dei canali di raffreddamento cliccare sull'icona "CHECK COOLING SYSTEM" per verificare la correttezza della geometria. Se il check dà esito positivo la costruzione dello stampo è corretta e il modello è pronto per passare alla fase successiva di generazione della mesh. Se invece il sistema di raffreddamento presenta dei difetti il programma restituisce un errore e viene aperta la finestra "COOLING SYSTEM DOCTOR", come si può osservare in figura 19. All'interno di questa cartella vengono visualizzati tutti gli errori che il modello presenta, premendo l'icona "AUTO FIX" è possibile correggere gli errori in modo automatico. In alcuni casi come ad esempio quando viene importata una geometria dei canali come file CAD il programma potrebbe non essere in grado di correggere gli errori in modo automatico, in questo caso occorre ritornare all'ambiente di disegno e correggere manualmente l'errore.

Con il check dei canali di raffreddamento termina il processo di costruzione dello stampo, la geometria definitiva dello stampo descritto in questa appendice è osservabile in figura 20.

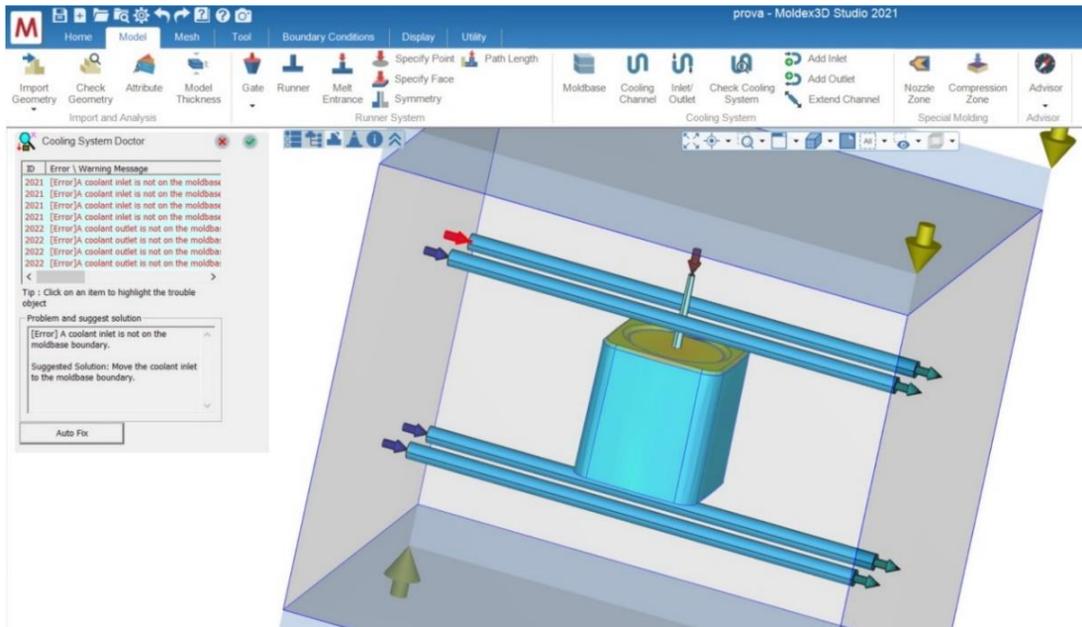


Figura 19 Programma di correzione dei difetti dello stampo.

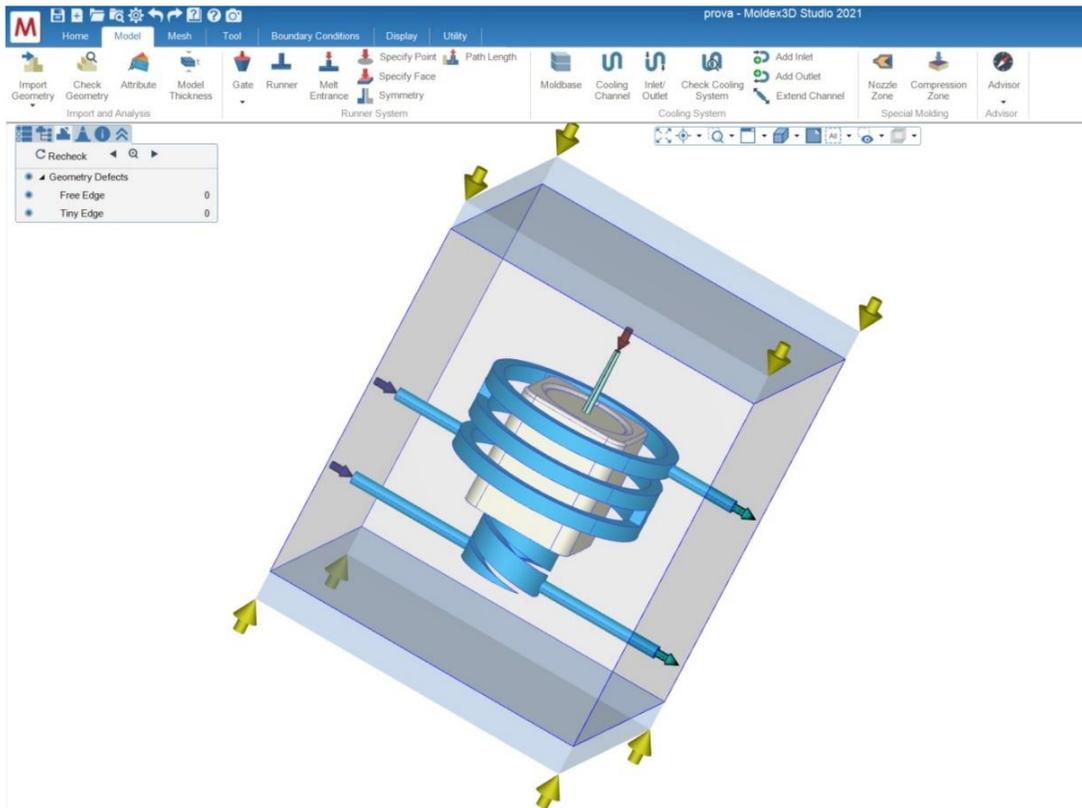


Figura 20 Stampo pronto per la creazione della mesh.

7 Condizioni al contorno

Cliccando sull'icona "B.C" presente nella schermata "HOME" viene aperta la sezione "BOUNDARY CONDITIONS". In figura 21 è riportata la schermata con le funzioni necessarie per definire le condizioni al contorno.

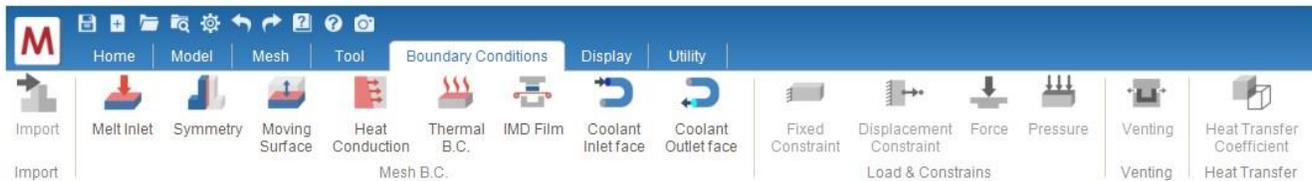


Figura 21 Impostare le condizioni al contorno.

La schermata permette l'inserimento di tutte le condizioni al contorno possibili coinvolte nello stampaggio a iniezione.

Questa tesi si limita ad analizzare il processo di stampaggio a iniezione a canale freddo, in questo caso le uniche condizioni al contorno che è necessario impostare sono il punto di ingresso del materiale fuso all'interno dello stampo, la posizione dei gate e i punti di ingresso e uscita del liquido di raffreddamento. Le condizioni al contorno necessarie per questo processo sono quindi già state impostate durante la costruzione dei canali di raffreddamento e condizionamento, quindi, per lo scopo di questa trattazione, non è necessario utilizzare questa sezione del programma.

8 Generazione della mesh

Il programma Moldex3D possiede due diverse funzioni per la generazione della mesh solida: "eDesign" e "Solid".

8.1 Funzione edesign

La funzione eDesign permette di creare la mesh in modo assistito e semplificato. Per utilizzare la funzione aprire la sezione "MESH", figura 22, selezionare la funzione eDesign cliccando sul menu a tendina in alto a sinistra e infine cliccare sull'icona "GENERATE". Viene aperta una finestra in cui è possibile scegliere il grado di accuratezza della mesh secondo una scala da 1 a 5. Dopo aver scelto il livello di accuratezza confermare cliccando sulla spunta verde per generare la mesh.

Di seguito viene riportata una guida alla scelta del livello di accuratezza della mesh.

Livello 1: E' il livello raccomandato per un'analisi del filling veloce, il programma genera una mesh con pochi elementi ed utilizza il modello CAE più prestazionale in termini di costo computazionale.

Livello 2: E' il livello raccomandato per analisi generali di filling, packing e cooling di normali componenti meccaniche. Questo livello produce un numero di elementi della mesh inferiore rispetto al livello 3 ma utilizza un modello di calcolo CAE migliorato rispetto al livello 1

Livello 3: E' il livello consigliato di default. Questo livello è adatto al analisi di filling, packing e cooling con buona risoluzione.

Livello 4: Questo livello è adatto ad analisi complete (filling/packing/cooling/warpage) per parti complesse e a parete sottile. Impostando questo livello il programma genera una mesh fine e utilizza un modello di analisi CAE accurato. Questo livello richiede un elevato costo computazionale.

Livello5 : Questo livello è consigliato per analisi complete e approfondite di qualunque tipo di oggetto. Impostando questo livello il programma genera una mesh fine e utilizza un modello di analisi CAE accurato. Questo livello permette di impostare manualmente il numero di elementi della mesh utilizzando il comando "Meshing control option). Questo livello richiede un elevato costo computazionale. [1]

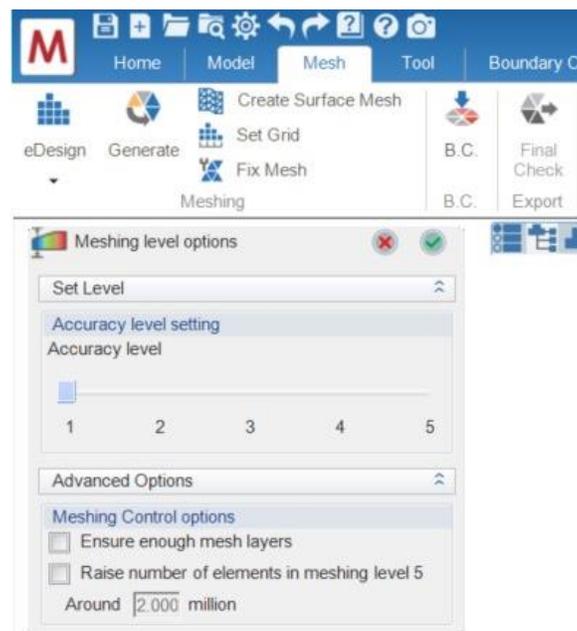


Figura 22 Costruzione della mesh con eDesign.

8.2 Funzione solid

La funzione Solid permette di creare la mesh manualmente. Per eseguire questa funzione scegliere l'opzione Solid dal menu a tendina in alto a sinistra, figura 23. Cliccando sull'icona "SEEDING" vengono aperte le finestre in figura 23 e 24. Queste finestre permettono di impostare la dimensione della mesh e personalizzare la distribuzione e numero di nodi creati su ogni spigolo.

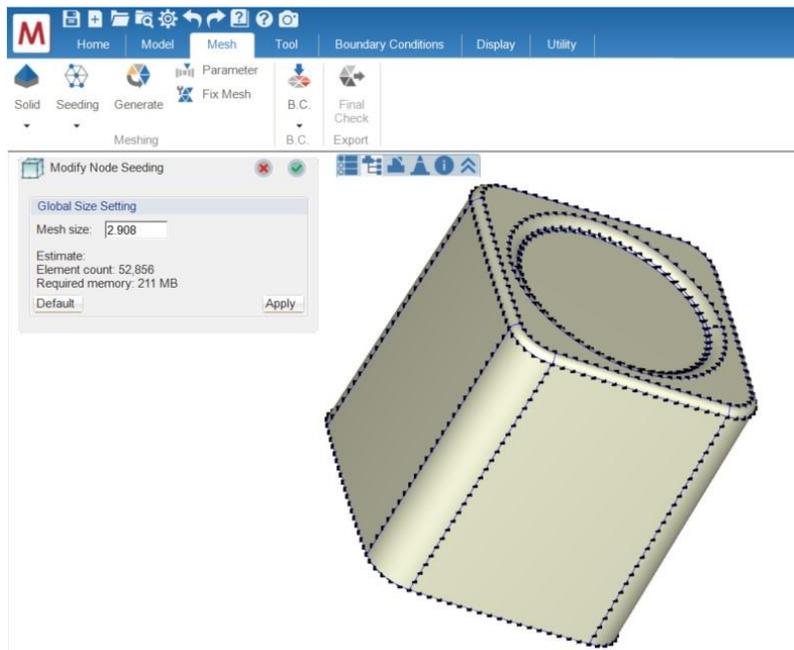


Figura 23 Seeding del pezzo.

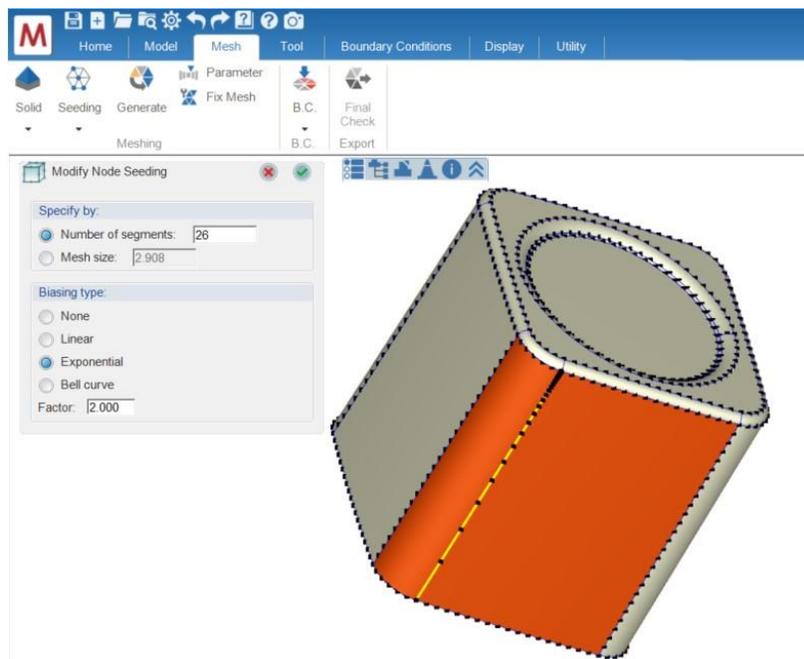


Figura 24 Personalizzare il seeding della geometria.

Dopo aver completato il Seeding è possibile personalizzare la mesh tridimensionale modificando le impostazioni relative al BLM (boundary layer meshing), per fare questo cliccare sull'icona "PARAMETER" e impostare i parametri desiderati utilizzando la finestra in figura 25.

Con questo menù è possibile impostare la mesh di tutti gli elementi separatamente e scegliere il tipo di BLM desiderato. Il mesh tipe permette di definire il tipo di elementi della mesh e definire il numero di layer che compongono il BLM; lo spessore del boundary layer può essere rilevato automaticamente in funzione dello spessore dell'elemento oppure può essere impostato manualmente in termini di rapporto con la dimensione della mesh.

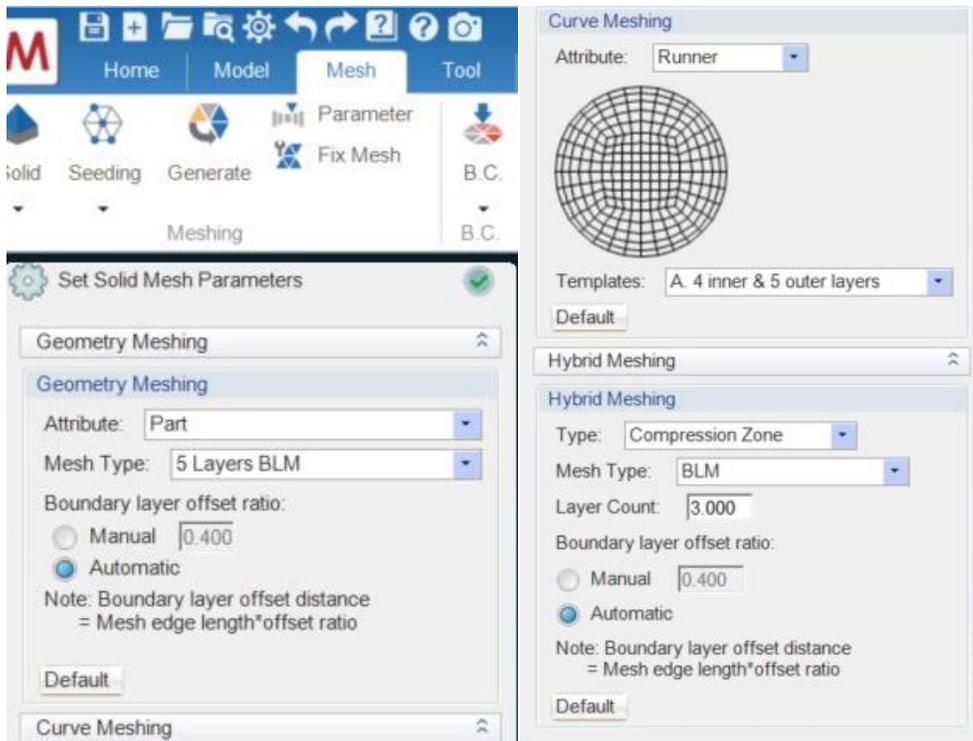


Figura 25 Menu per personalizzare la mesh.

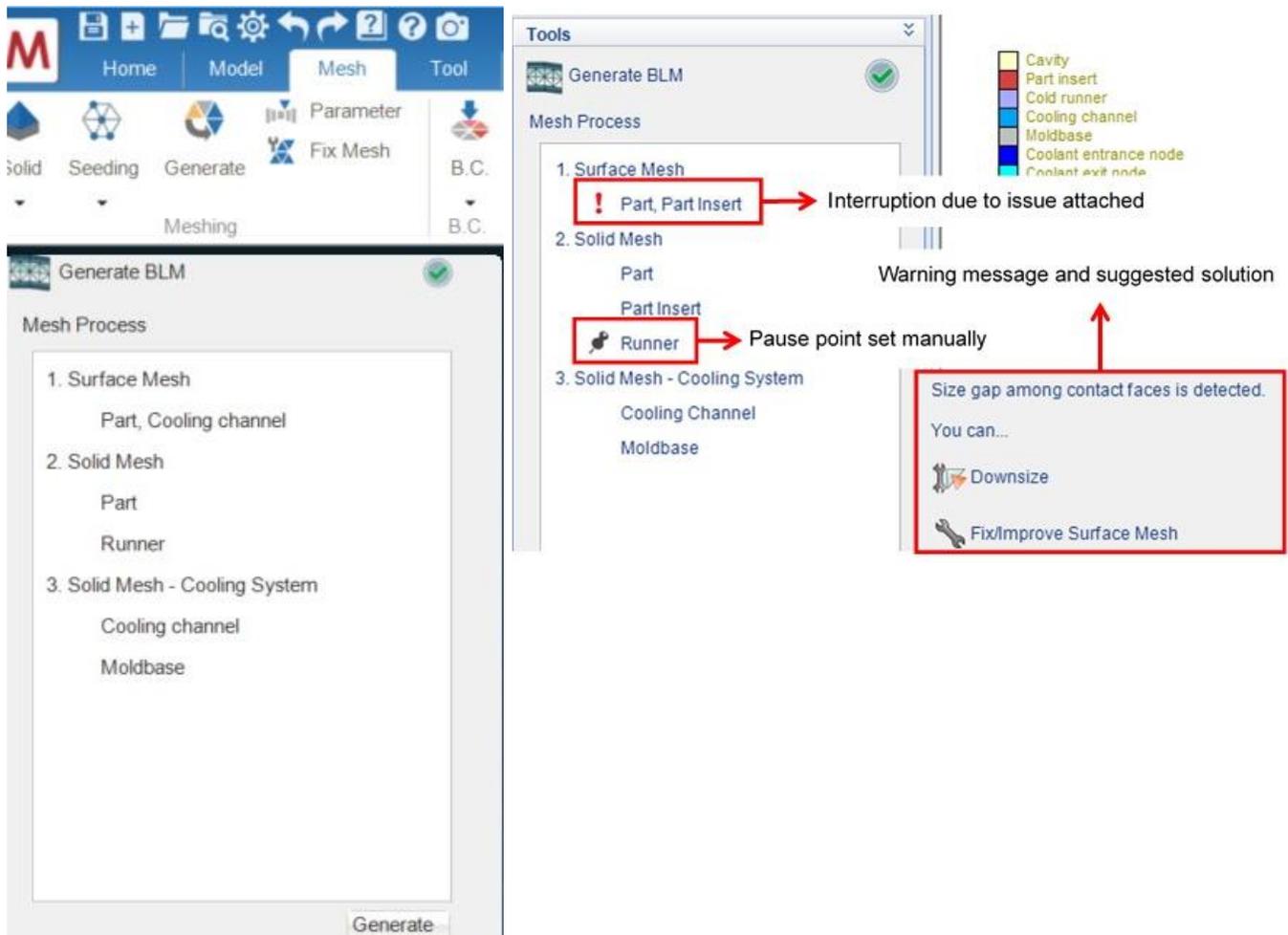


Figura 26 Creare una nuova mesh. [1]

Dopo aver impostato i parametri della mesh aprire la finestra riportata in figura 26 cliccando sull'icona generate.

Per generare la mesh premere su "GENERATE" all'interno della finestra "GENERATE BLM".

Cliccando a fianco di ogni voce dell'elenco è possibile inserire dei "pause point" per mettere in pausa la creazione e verificare la costruzione dell'elemento della mesh.

Se la creazione della mesh generata possiede degli errori appare il simbolo con il punto esclamativa vicino al nome dell'elemento, inoltre viene visualizzato un messaggio di warning che suggerisce la correzione da compiere.

Per correggere gli errori della mesh generata utilizzare il comando "FIX MESH", figura 27, che permette di identificare il tipo di difetto e correggere manualmente i difetti della mesh modificando i singoli elementi.

Quando la mesh è stata correttamente generata appare la schermata riportata in figura 28.

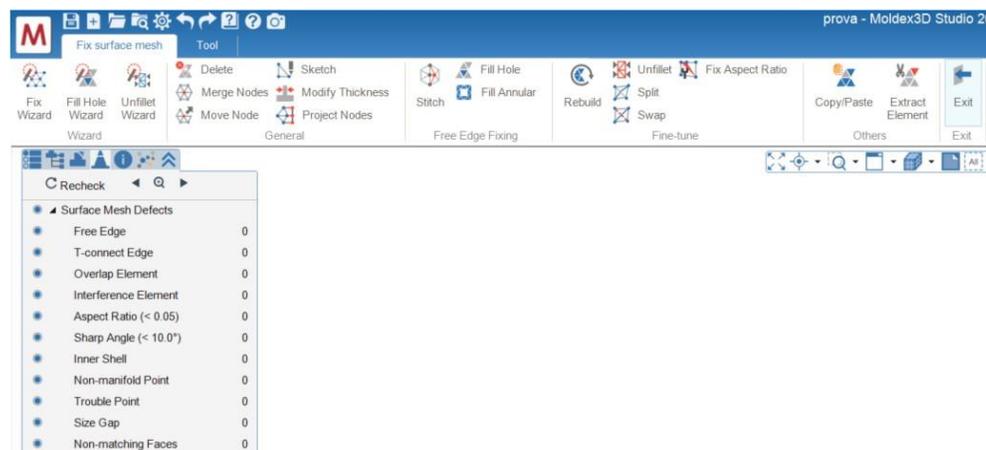


Figura 27 Programma di correzione della mesh.

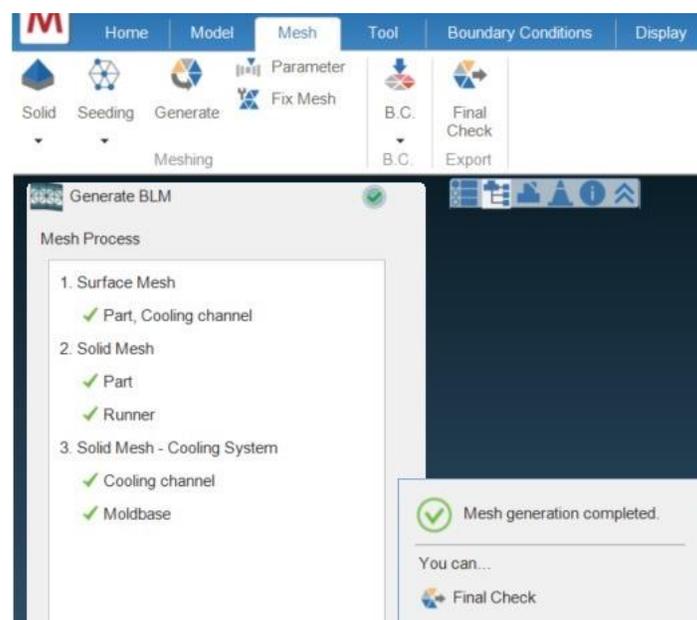


Figura 28 Creare e salvare la mesh.

8.3 Salvare e importare la mesh

Dopo che è stata generata occorre salvare correttamente la mesh nella cartella adeguata affinché possa essere utilizzata per la successiva analisi. Per eseguire questa operazione cliccare l'icona "FINAL CHECK", il programma salva il file MFE della mesh nella omonima cartella del progetto. La mesh prodotta può essere modificata in ogni momento ritornando nella sezione "MESH"; tuttavia è fondamentale eseguire il final check ogni volta che si eseguono delle modifiche, infatti se questo non viene fatto le modifiche eseguite sulla mesh non vengono salvate e l'analisi viene eseguita considerando l'ultimo salvataggio corretto.

9 Preparazione dell'analisi

Dopo aver creato la mesh o averne importata una, occorre tornare alla sezione "HOME" per avviare l'analisi.

Le mesh di tutti gli elementi vengono visualizzate nell'elenco riportato in figura 29, questo elenco permette di gestire gli elementi che si vuole visualizzare.

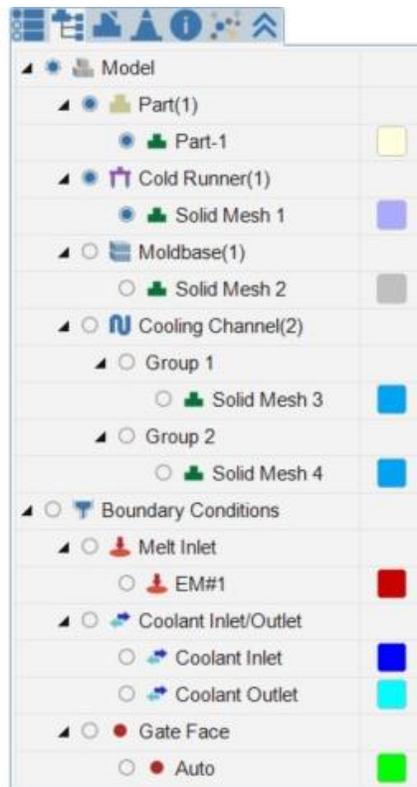


Figura 29 Gestire gli elementi dello stampo visualizzati.

9.1 Definizione del materiale

Per definire il polimero utilizzato nello stampaggio cliccare sull'icona "MATERIAL", viene aperta la finestra in figura 30. Aprendo il menù a tendina è possibile selezionare un polimero o importare un nuovo file .mtr contenente le proprietà del materiale studiato.

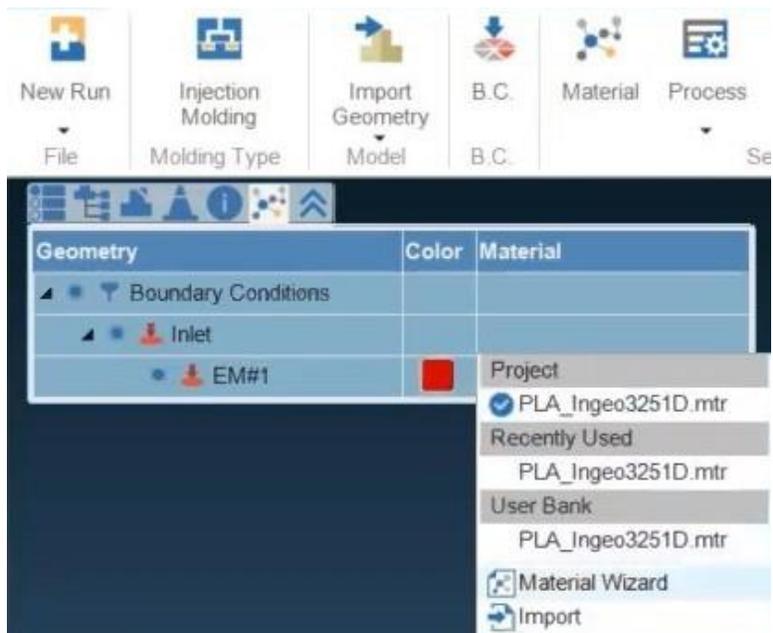


Figura 30 Definire il materiale polimerico per l'analisi.

Cliccando sull'icona "MATERIAL WIZARD", in figura 30, viene aperta la finestra che permette di scegliere il materiale all'interno di una banca dati importata dall'utente e nel database del programma, figura 31.

All'interno della cartella "Moldex3D Bank" è possibile scegliere un materiale tra quelli contenuti all'interno del database del programma, sul lato destro della schermata è possibile leggere le proprietà del materiale selezionato.

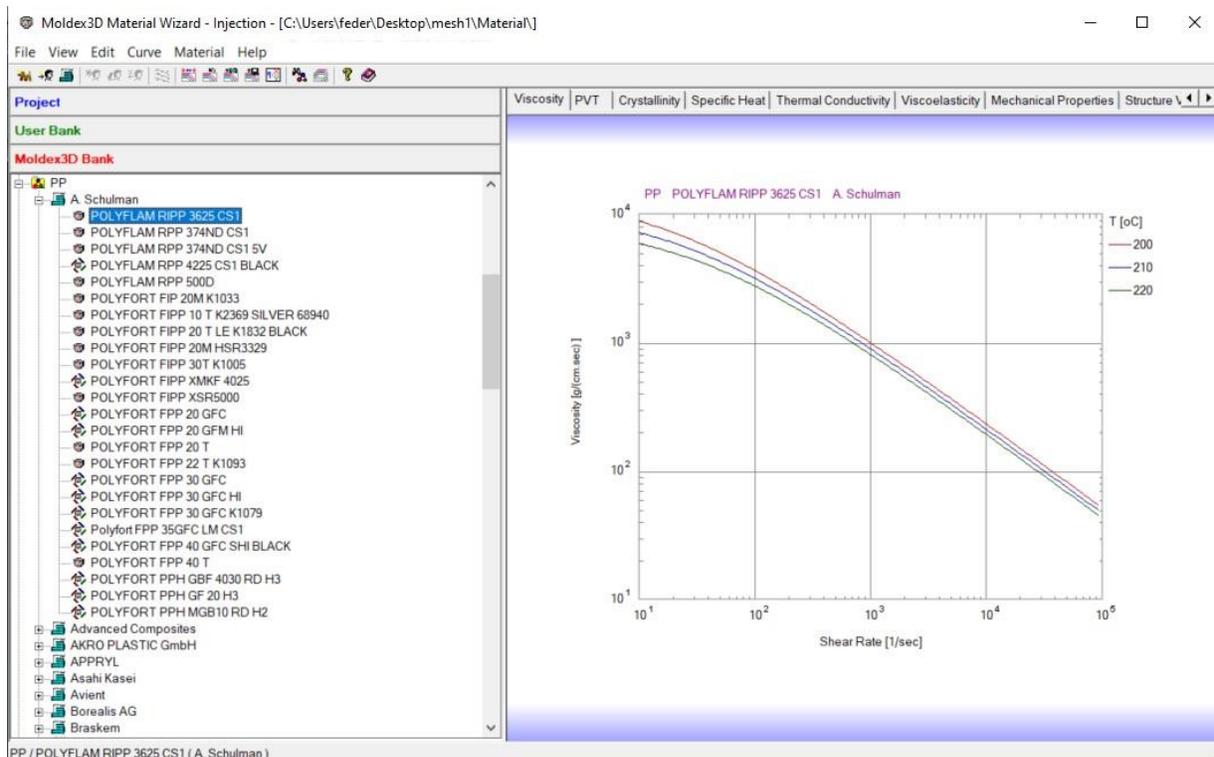


Figura 31 Banca dati dei materiali di Moldex3D.

Aperto invece la sezione “User Bank”, figura 32, è possibile scegliere uno dei materiali importati dall’utente. Le proprietà dei materiali importati possono essere modificate all’interno dell’ambiente di Moldex3D; cliccando due volte sul nome del materiale viene aperta la finestra in figura 32 e seguendo la procedura possono essere modificati i singoli parametri.

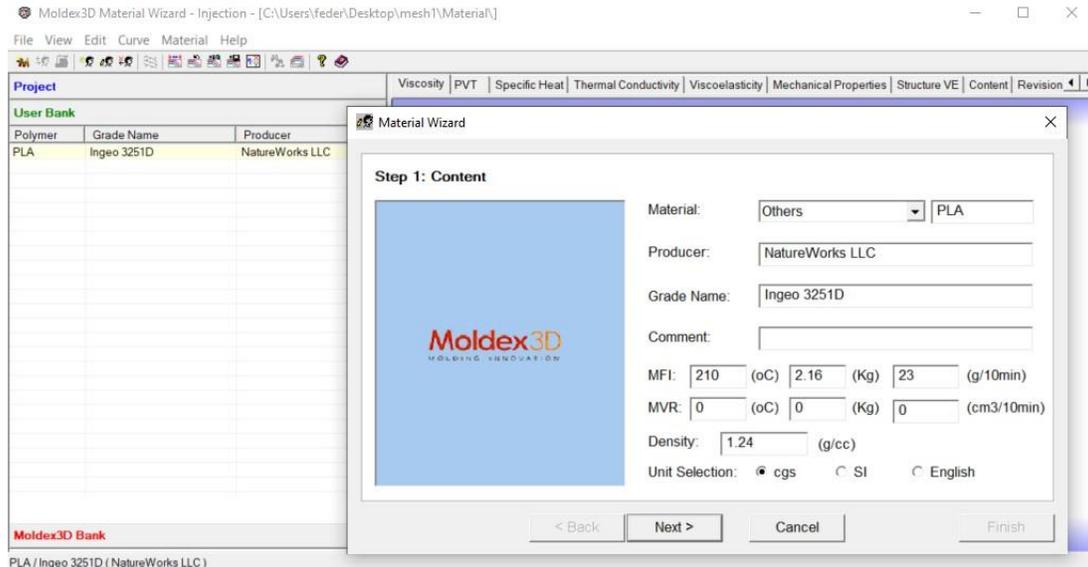


Figura 32 Banca dati dei materiali dell’utente.

9.2 Definizione del processo

Per definire il processo aprire il menù a tendina “PROCESS”, in figura 33, è possibile importare un processo già creato o crearne uno nuovo cliccando su “NEW” e aprendo il “PROCESS WIZARD”.

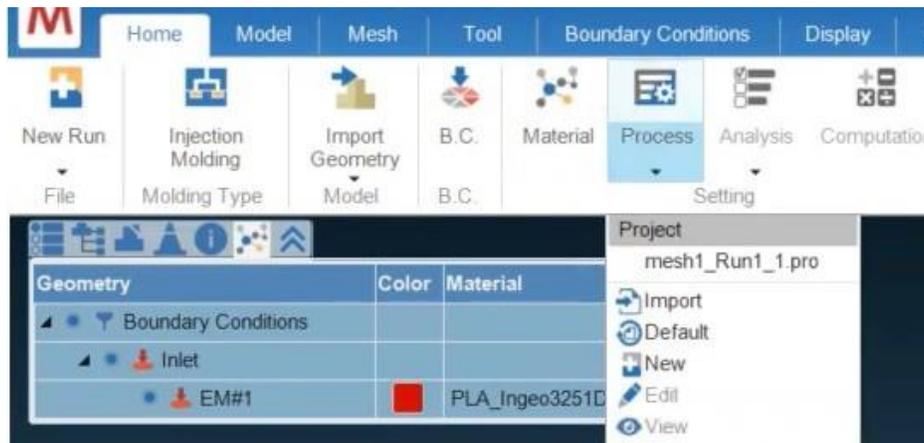


Figura 33 Definire un nuovo processo produttivo.

Il “PROCESS WIZARD”, figura 34, contiene tre diverse modalità guidate per definire il processo: CAE mode, machine mode 1 (by profile) e machine mode 2 (by injection time).

Il metodo CAE è il più semplice da utilizzare tuttavia non tiene in considerazione le caratteristiche specifiche della macchina utilizzata per lo stampaggio. I machine mode sono i metodi di simulazione più realistici poiché permettono di settare le reali proprietà della macchina utilizzata, questi metodi sono quindi da preferire per eseguire confronti tra simulazione e dati sperimentali. In machine mode 1 il tempo di iniezione è determinato dal profilo di flow rate e dal tempo di packing impostato;

all'utente non è permesso impostare direttamente il tempo di iniezione. In machine mode 2 l'utente imposta il tempo di iniezione, i tempi di filling e packing dipendono dal profilo di flow rate e dal VP switch-over impostati. [1]

Se è stato scelto un "machine mode" occorre selezionare il nome della macchina considerata all'interno del database del programma, figura 35.

Dopo aver scelto il metodo con cui definire il processo occorre seguire la procedura guidata per inserire le condizioni al contorno necessarie.

Al termine delle procedura cliccare sul tasto finish per salvare il processo, figura 36.

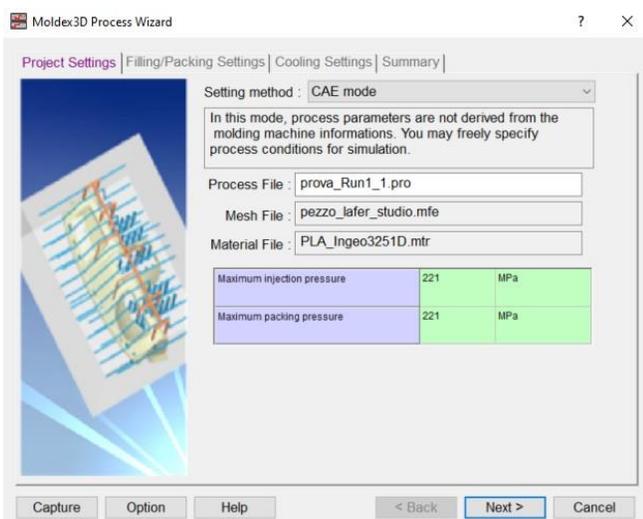


Figura 34 Definire i parametri di processo (CAE mode).

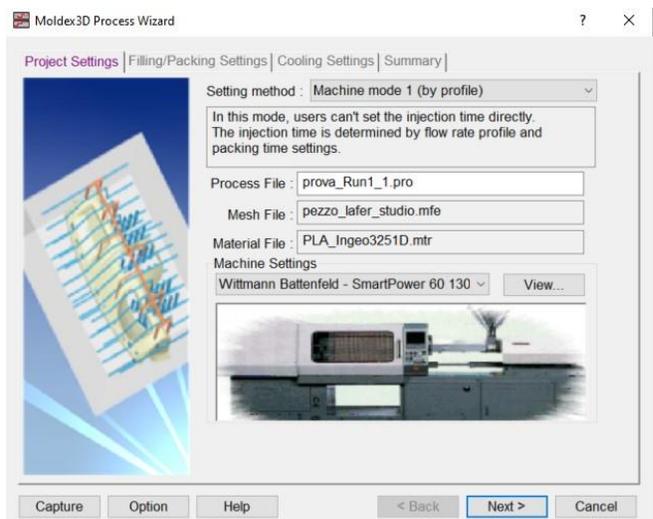


Figura 35 Definire I parametri di processo (Machine mode 1).

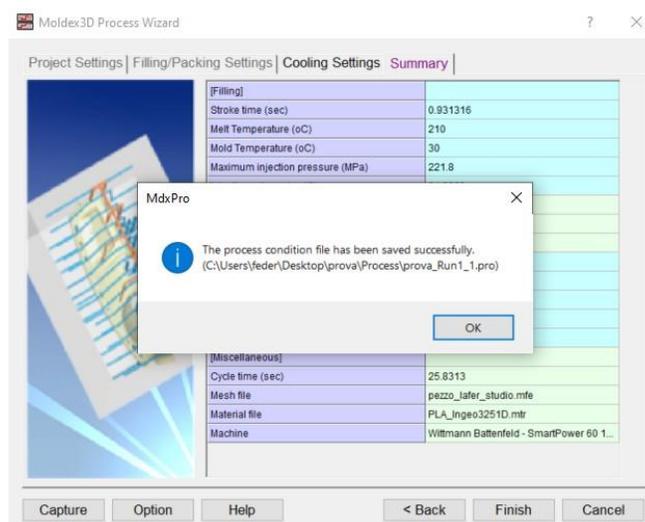


Figura 36 Salvare il processo creato.

9.3 Scelta dell'analisi

Prima di avviare il calcolo occorre selezionare la sequenza di analisi che il programma deve eseguire. Per fare questo aprire il menù a tendina "ANALYSIS", figura 37, e selezionare il tipo di analisi da eseguire; cliccando su "CUSTOMIZE" viene aperta la schermata in figura 38 che permette di personalizzare la sequenza di analisi, in questa finestra selezionare l'analisi e premere il tasto freccia per aggiungere all'elenco, infine salvare la sequenza.

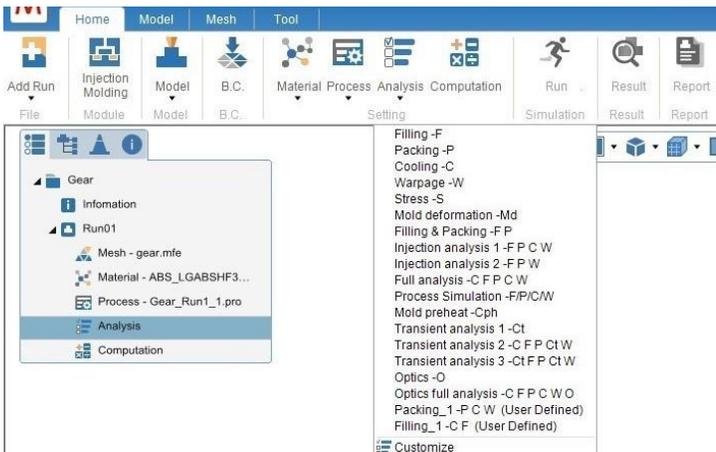


Figura 37 Scegliere la sequenza di analisi.

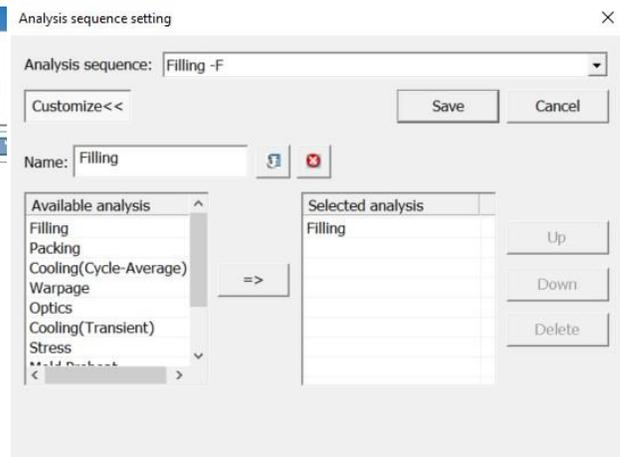


Figura 38 Creare una nuova sequenza di analisi.

Dopo aver selezionato gli step di analisi cliccare sull'icona "COMPUTATION". Viene aperta la finestra "COMPUTATION MENAGER" in figura 39.

Il Computation Menager permette di selezionare 3 diversi sistemi di soluzione che permettono di ottimizzare l'accuratezza del calcolo oppure la velocità, compilando il menu in figura 39 è possibile selezionare le proprietà del modello scelto, i parametri considerati e i risultati richiesti.

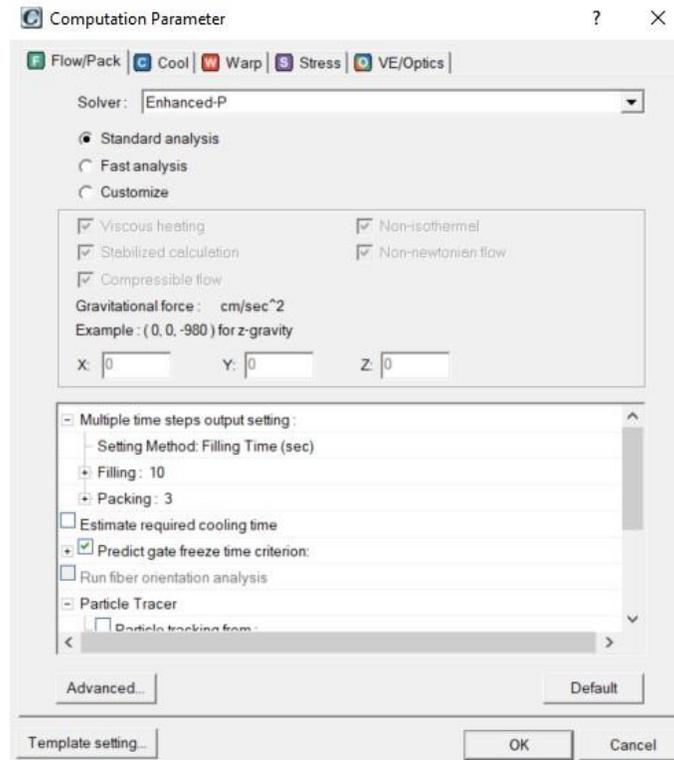


Figura 39 Scegliere il metodo di calcolo.

9.4 Avviare il calcolo

Per avviare il calcolo cliccare l'icona "RUN" sulla schermata riportata in figura 40. In automatico viene aperta la finestra "COMPUTING MENAGER", in figura 41, che permette di osservare l'avanzamento del calcolo.

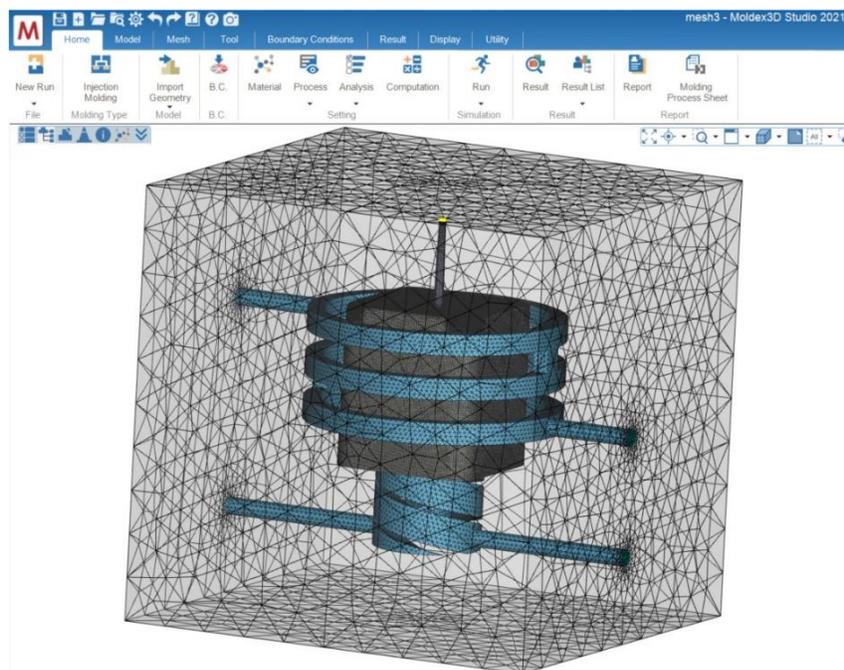


Figura 40 Avviare l'analisi.

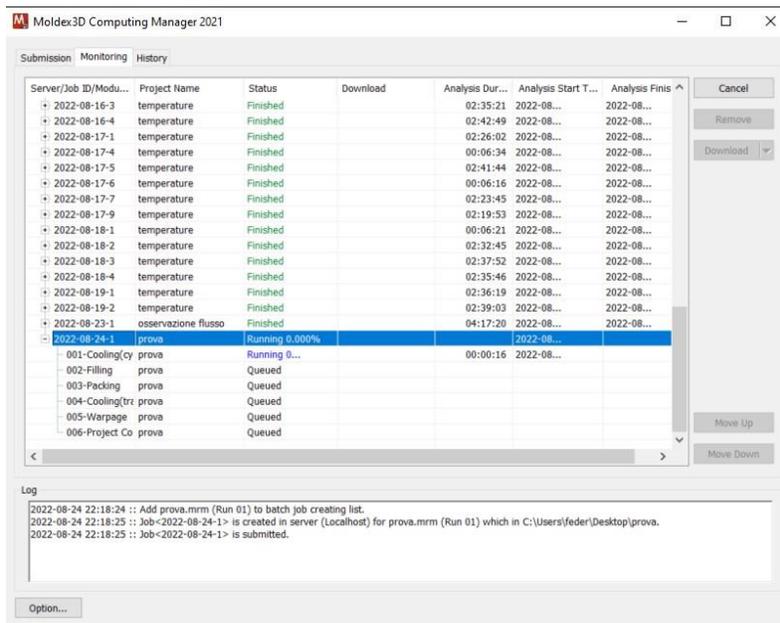


Figura 41 Computing Manager dell'analisi.

10 Analisi dei risultati

Al termine della simulazione, per analizzare i risultati ottenuti, cliccare sull'icona "RESULT" della schermata "HOME" per aprire l'interfaccia in figura 42.



Figura 42 Toolbar per l'analisi dei risultati.

Sotto la barra delle funzione è presente la finestra in figura 43 che permette di selezionare i dati e i risultati che si vuole visualizzare.

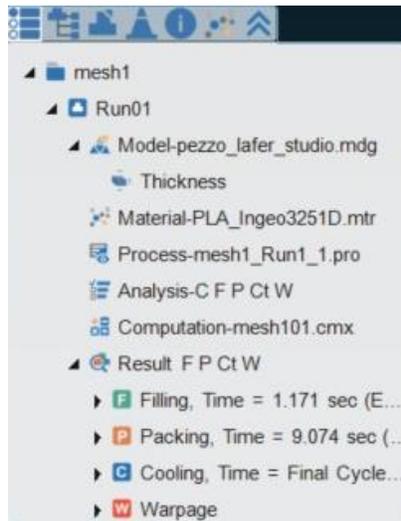


Figura 43 Mappa dei parametri di processo e dei risultati.

La barra delle funzioni in figura 42 permette di visualizzare ed analizzare i risultati.

La sezione “ANIMATION” permette di gestire i risultati che vengono visualizzati con un video, per esempio il profilo di riempimento dello stampo. Cliccando sull’icona “telecamera” è possibile esportare il video che in quel momento viene visualizzato.

La sezione “ISPECTION” permette di modificare il metodo con cui vengono visualizzati i risultati. In modo predefinito i risultati vengono espressi sull’immagine 3D utilizzando un gradiente di colori da interpretare utilizzando la legenda a destra della schermata, cliccando sull’icona “ISO-CONTOUR” è possibile visualizzare i risultati secondo linee tracciate a valore costante.

Utilizzando il tasto “CLIPPING” si costruisce una sezione del pezzo, mentre il tasto “SLICING” permette di osservare i risultati lungo un singolo piano.

La funzione “DEFORMATION” permette di amplificare l’effetto delle deformazioni calcolate nel Warpage, per permettere di visualizzare più facilmente l’effetto che queste producono.

La funzione “COMPARE” permette di suddividere la schermata di diverse finestre e caricare in ognuna i risultati delle diverse Run.

Il comando “LOG” permette di aprire i file Log delle analisi. All’interno dei file Log è riportato lo storico dei calcoli che il programma ha eseguito, sono quindi riportati tutti i parametri e i risultati ottenuti in funzione del tempo. I file Log contengono molte informazioni utili per esempio permettono di verificare il completo riempimento dello stampo e ricavare il tempo di packing.

10.1 Filling

I principali aspetti che vengono valutati con l’analisi di filling sono: short shot (stampata corta), weld line e hair trap, esitazioni, temperature del polimero e pressioni.

10.1.1 Short shot

Le cause della stampata corta possono essere numerose e il problema può derivare sia dal dimensionamento dei canali di alimentazione sia dai parametri di processo. Per verificare il corretto riempimento dello stampo si utilizza il "MELT FRONT TIME" oppure si osserva il file Log del filling. Selezionando l'icona "MELT FRONT TIME" all'interno dell'elenco dei risultati (figura 43) e posizionando l'animazione al 100% si osserva se lo stampo è completamente riempito. Inoltre se lo stampo è stato completamente riempito la percentuale di riempimento nell'ultimo step del file Log è 100%. In figura 44 si riporta un esempio di queste valutazioni.

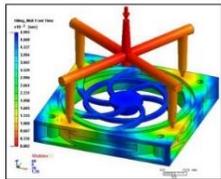
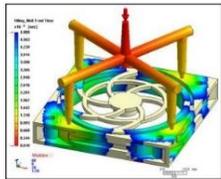
	Melt Front Time	Filling Log
<p>100% Completo</p>  <p>Il fuso riempie la parte completamente.</p>	<pre> UV V. LSPU E.P. *E D.P. *LAW JE ----- No Time(sec) Pres(MPa) Fill(%) CPU(sec) ----- 81 0.198 24.04 98.841 32 >>> Switching over from filling to packing phase writing data, please wait... 82 0.204 24.04 99.054 36 83 0.205 24.04 100.000 37 ----- <Summary> CPU Time for Filling Analysis = 37.0 sec </pre> <p>La percentuale di filling è 100% nell'ultimo step del file di log.</p>	
<p>Short Shot</p>  <p>Il fuso non riempie la parte.</p>	<pre> UV V. LSPU E.P. *E D.P. *LAW JE ----- No Time(sec) Pres(MPa) Fill(%) CPU(sec) ----- 61 0.875 50.00 71.206 19 62 0.950 50.00 71.824 19 63 1.040 50.00 72.442 20 64 1.148 50.00 72.342 20 ----- !!! WARNING w1501 : (Moldex3D/Solid-Enhanced Flow: R11.0 Build 11033) Computation terminated due to the too low flow rate to completely fill the cavity within the present filling time. </pre> <p>Il calcolo del filling si blocca prima del 100% nel log di filling.</p>	

Figura 44 Confronto tra corretto riempimento dello stampo e short shot. [2]

10.1.2 Weld line

Le linee di giunzione si verificano dove due o più fronti di avanzamento del materiale si incontrano durante il riempimento dello stampo. In questi punti è necessario che il materiale proveniente dalle varie dimensioni possa rifondersi e formare un legame forte. Per osservare le linee di giunzione selezionare l'icona "WELD LINE" nell'elenco dei risultati. Per valutare la qualità della linee di giunzione occorre osservare: temperature del fuso, angolo di incidenza dei flussi e posizione della linea.

10.1.3 Air trap

Le air trap si formano quando due fronti di flusso convergenti, entrando in contatto, comprimono e intrappolano una bolla di aria. L'aria così intrappolata si riscalda e può provocare delle bruciature. Il software è in grado di rilevare in modo automatico la posizione delle air trap; per visualizzare le bolle d'aria selezionare "AIR TRAP" nell'elenco dei risultati.

10.1.4 Esitazioni

Il flusso di materiale rallenta e esita nelle zone del pezzo a sezione sottile, questo effetto si osserva soprattutto in geometrie che presentano diaframmi o nervature. Per valutare le esitazioni è

possibile osservare la posizione del fronte di flusso in diversi istanti di tempo. Per fare questo si utilizza la funzione "ISO-CNTOUR".

Selezionare il risultato "MELT FRON TIME" poi cliccare sull'icona "ISO-CONTOUR" del toolbar dei risultati. Il risultato viene visualizzato come nell'esempio di figura 45.

10.1.5 Temperature

La temperatura del polimero fuso è un importante parametro da valutare durante l'analisi del filling. La temperatura del polimero non è omogena lungo la sezione del pezzo.

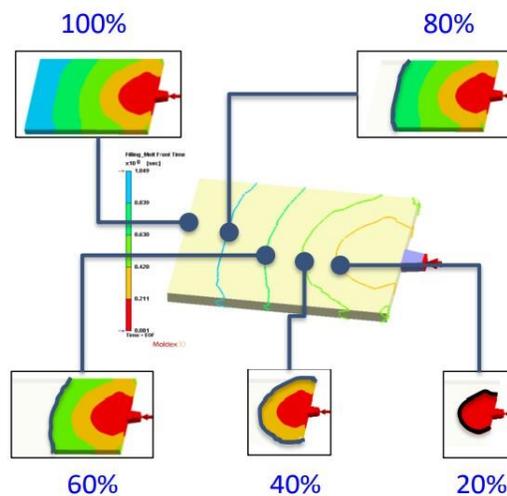


Figura 45 Profilo di riempimento dello stampo visualizzato con curve iso-contour. [2]

Se la temperatura massima del polimero è maggiore della temperatura di iniezione del fuso una significativa quantità di calore è stata sviluppata per effetto del flusso viscoso; questo fenomeno può causare degradazione termica.

Se la temperatura al centro della sezione del pezzo è simile alla temperatura della parete dello stampo, il materiale potrebbe essere troppo freddo per fluire correttamente e quindi si possono verificare delle esitazioni.

Cliccando su "TEMPERATURE" nell'elenco dei risultati viene visualizzato il profilo di temperatura all'EOF cioè nell'ultimo step temporale del filling. Poiché occorre osservare il profilo di temperatura lungo la sezione, utilizzare le funzioni "CLIPPING" e "SLICING", descritte in precedenza, per creare le sezioni.

10.1.6 Sprue pressure

Aperto la sezione dei risultati "XY-CURVE" e cliccando su "SPRUE PRESSURE" viene mostrato il grafico dell'andamento (storico) della pressione nel punto di gate. Questo risultato, confrontato con il melt front time, permette di valutare il riempimento dello stampo.

In figura 46 viene mostrato come proiettare questo risultato.

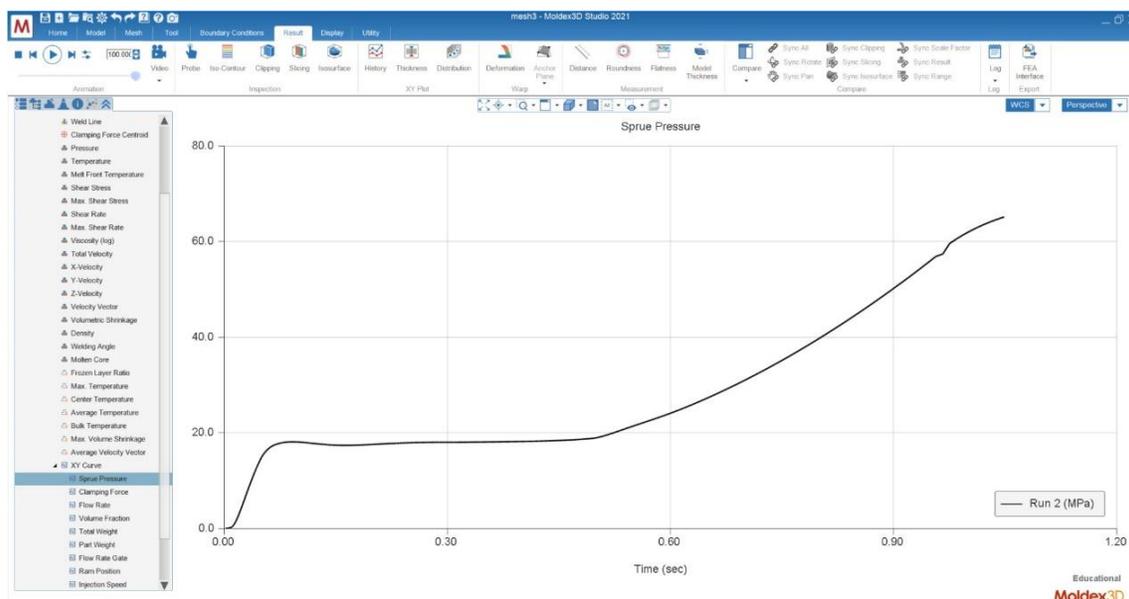


Figura 46 Andamento della sprue pressione in funzione del tempo durante il filling.

10.2 Packing

Gli aspetti fondamentali dell'analisi di packing sono: l'effetto del packing, il tempo di congelamento del gate e la forza di chiusura richiesta.

10.2.1 Effetto del Packing

I parametri di processo del packing hanno un forte effetto sul ritiro volumetrico del pezzo, questa analisi è quindi importante per valutare e ottimizzare i ritiri e le deformazioni.

Il ritiro volumetrico dipende dalle curve PVT caratteristiche del materiale e dalla storia termica del materiale durante il raffreddamento dallo stato liquido alla temperatura ambiente.

Per visualizzare il ritiro volumetrico selezionare l'icona "VOLUMETRIC SHRINKAGE" nell'elenco dei risultati del packing, figura 47. Per costruire la sezione del pezzo utilizzare i comandi "CLIPPING" e "SLICING". Cliccando 2 volte sull'icona "VOLUMETRIC SHRINKAGE" per aprire la finestra "RESULT ADVISOR", questa funzione permette di osservare la percentuale di materiale interessata dal ritiro, figura 48.

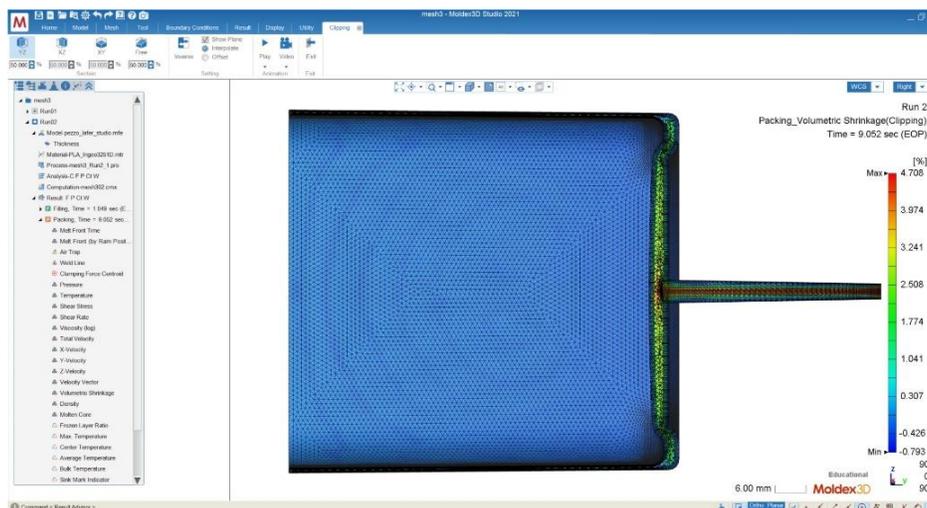


Figura 47 Ritiro volumetrico.

Partendo dai risultati ottenuti occorre osservare l'uniformità e la grandezza del ritiro volumetrico. La distribuzione non omogenea delle pressioni e delle temperature all'interno della cavità dello stampo produce un ritiro non omogeneo. Le principali conseguenze sul prodotto finito sono una deformazione del pezzo dopo l'estrazione e la presenza di stress residui. Il ritiro volumetrico può avere un valore positivo o negativo: il segno positivo indica il ritiro, il segno negativo indica un'espansione e quindi un overpacking.

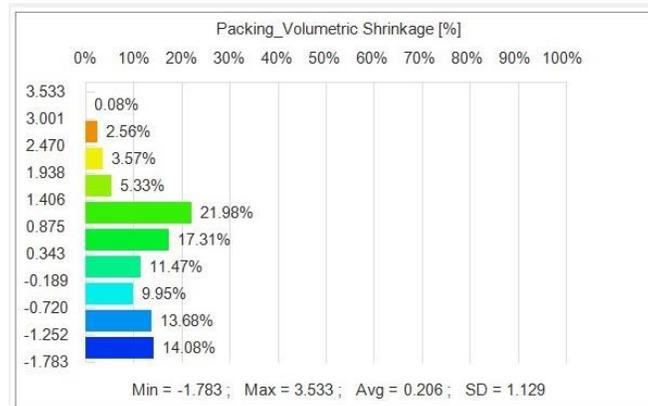


Figura 48 Result advisor del ritiro volumetrico.

10.2.2 Tempo di congelamento del gate

Il tempo di congelamento del gate definisce l'istante in cui il materiale in corrispondenza del gate è solidificato e quindi il polimero smette di entrare all'interno dello stampo. Il tempo di congelamento del gate coincide con il tempo necessario al packing in quelle condizioni operative; infatti non si ha nessun vantaggio ad applicare una pressione oltre questo istante poiché il materiale non può più entrare nella cavità.

Il tempo di congelamento del gate è derivato dal file Log, per sua definizione è il primo istante del file Log in cui la pressione è nulla.

Aprire il menù a tendina "LOG" in alto a destra e selezionare "PACKING", viene visualizzato il file in figura 49.

No	Time(sec)	Pres(MPa)	Q(cc/sec)	Fill(%)	RamPosition(mm)	CPU(sec)
80	11.333	70.00	0.01	100.000	13.001	1742
81	11.592	70.00	0.00	100.000	12.999	1760
82	11.853	70.00	0.00	100.000	12.997	1779
83	11.891	60.00	-0.00	100.000	13.077	1802
84	11.910	50.00	-0.01	100.000	13.161	1818
85	11.932	40.42	-0.01	100.000	13.245	1834
86	11.957	31.51	-0.01	100.000	13.327	1846
87	11.986	23.52	-0.01	100.000	13.405	1859
88	12.020	16.67	-0.01	100.000	13.474	1871
89	12.059	11.00	-0.01	100.000	13.531	1884
90	12.103	6.81	-0.01	100.000	13.577	1896
91	12.154	3.79	-0.01	100.000	13.609	1909
92	12.210	1.86	-0.00	100.000	13.630	1922
93	12.272	0.82	-0.00	100.000	13.641	1931
94	12.339	0.31	-0.00	100.000	13.647	1964
95	12.414	0.10	-0.00	100.000	13.649	1996
96	12.496	0.03	-0.00	100.000	13.650	2028
97	12.587	0.00	-0.00	100.000	13.650	2061
98	12.686	0.00	0.00	100.000	13.650	2093
99	12.795	0.00	0.00	100.000	13.650	2126
100	12.915	0.00	0.00	100.000	13.650	2159
101	13.048	0.00	0.00	100.000	13.650	2193

Figura 49 File Log del packing.

10.2.3 Forza di chiusura

La forza di chiusura è la massima forza che la pressa può esercitare per mantenere chiuso lo stampo. La forza di chiusura deve essere maggiore della forza esercitata dal materiale che dipende dalla pressione di iniezione e dall'area proiettata nella direzione di apertura, in figura 50 è riportato uno schema di questo fenomeno.

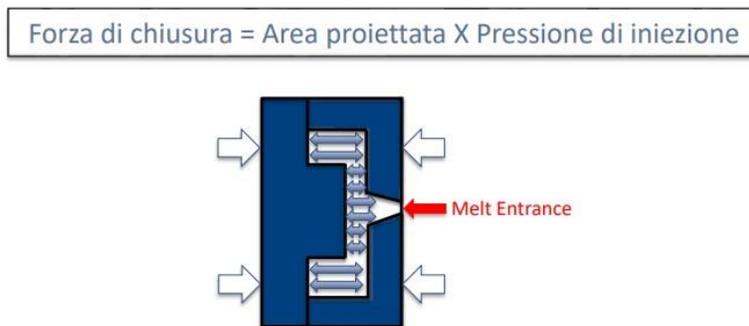


Figura 50 Schema della condizione di equilibrio tra pressione interna allo stampo e forza di chiusura. [2]

Il picco della forza di chiusura si verifica in genere nei primi istanti del packing cioè quando lo stampo raggiunge le pressioni maggiori, successivamente la forza di chiusura richiesta tende a diminuire poiché il materiale solidifica e la pressione diminuisce.

Il risultato della simulazione è da confrontare con le caratteristiche della pressa. Se la forza di chiusura richiesta si avvicina al limite massimo che la pressa può esercitare le metà dello stampo tendono a separarsi, la chiusura non è più garantita e si creano delle bave. Da esperienze sul campo se la forza di chiusura eccede il 70% della forza di chiusura della pressa è probabile si verifichino problemi di bave.

Per visualizzare questo risultato premere sull'icona "CLAMPING FORCE" nell'elenco di "XY CURVE" del packing, figura 51.

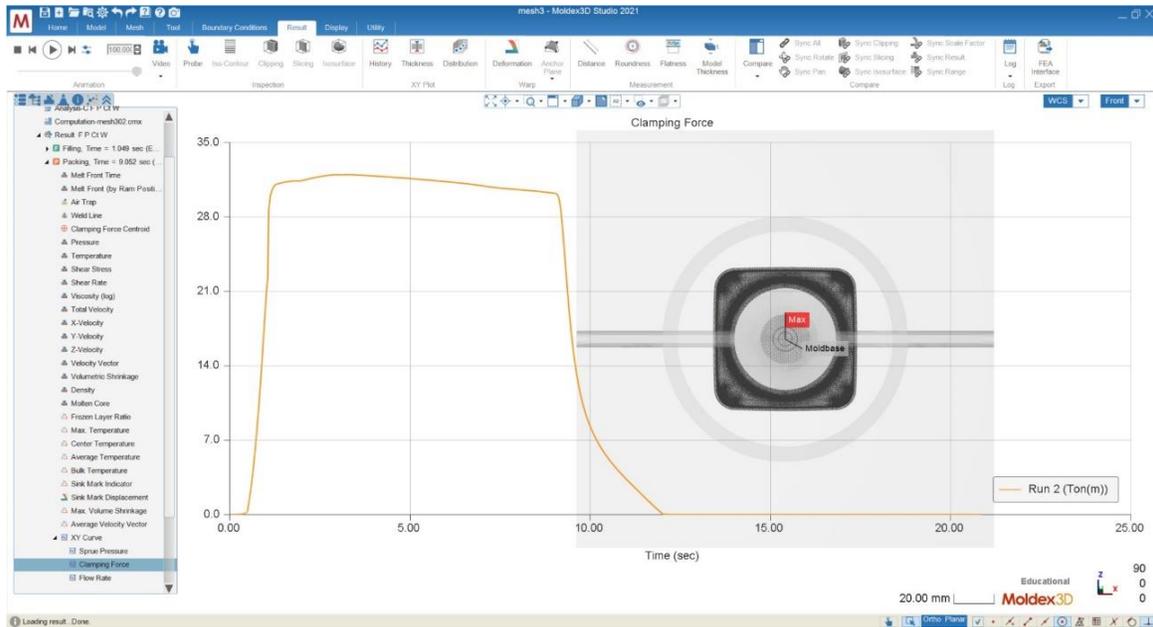


Figura 51 Forza di chiusura dello stampo in funzione del tempo.

10.3 Cooling

Gli obiettivi dell'analisi di cooling sono: tempo di raffreddamento, visualizzare gli accumuli di calore e osservare l'efficienza di raffreddamento dello stampo.

10.3.1 Tempo di raffreddamento

Il tempo di raffreddamento occupa tra il 50 e il 70% dell'intero ciclo di stampaggio, quindi è importante valutare e ottimizzare i parametri che lo definiscono in modo da ottimizzare la produttività del processo.

Per ricavare il tempo di raffreddamento cliccare due volte sull'icona "TIME TO REACH EJECTION" nell'elenco dei risultati del cooling, viene aperta la finestra "RESULT ADVISOR" in figura 52.

Il tempo di raffreddamento consigliato è quello in cui l'80-90% del materiale ha raggiunto la temperatura di estrazione, occorre quindi definire la regione di materiale sufficiente all'estrazione, porzione riquadrata in rosso in figura 52, e di conseguenza leggere sull'asse delle ordinate il tempo necessario a raffreddare quella porzione fino alla temperatura di estrazione, riquadro verde in figura 52.

Dopo aver valutato il tempo di raffreddamento, per poter valutare se il pezzo è pronto per essere estratto, occorre osservare la porzione di materiale che si trova ancora ad una temperatura maggiore di quella di estrazione.

Per fare questa valutazione cliccare sull'icona "TIME TO REACH EJECTION", dopo di che attivare la funzione "ISOSURFACE" nella toolbar dei risultati, viene visualizzata la schermata in figura 53. Utilizzare la casella evidenziata in figura 53 con un riquadro rosso per inserire il tempo di raffreddamento calcolato in precedenza. La superficie così ottenuta indica la porzione di materiale

che secondo la simulazione al momento dell'estrazione si trova ad una temperatura maggiore di quella di estrazione.

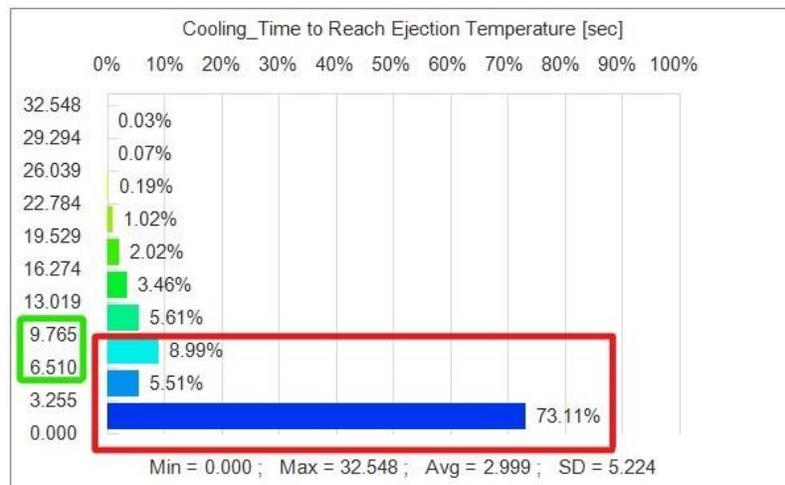


Figura 52 Result advisor di "time to reach ejection".

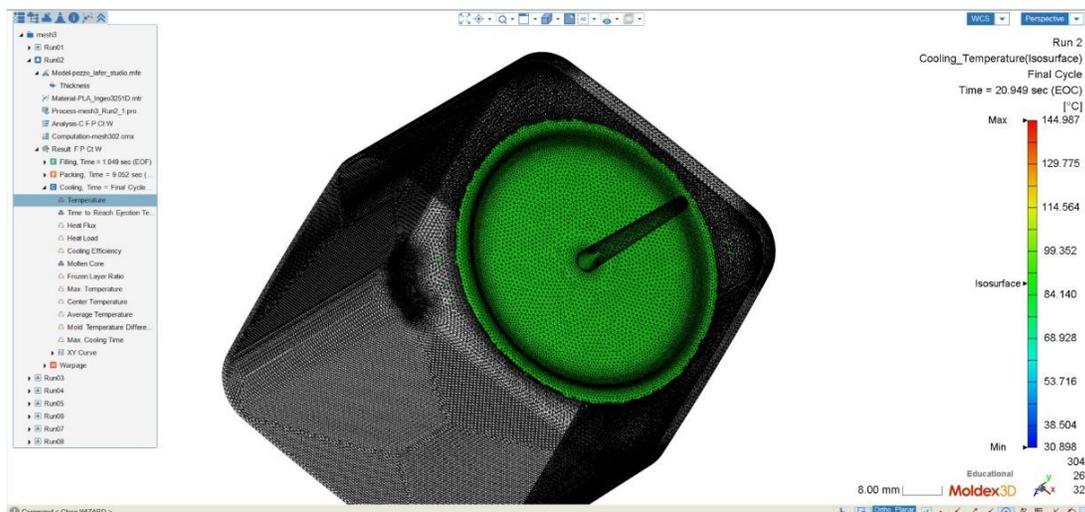


Figura 53 Porzione di materiale che al momento dell'apertura dello stampo si trova ad una temperatura maggiore di quella di estrazione.

10.3.2 Efficienza dei canali di raffreddamento

Per valutare l'efficienza dei canali di raffreddamento cliccare sull'icona "COOLING EFFICIENCY", viene visualizzata la schermata in figura 54.

Occorre utilizzare questo risultato per valutare il bilanciamento dei canali, la condizione ottimale è quella in cui tutti i canali hanno la stessa efficienza, cioè il calore viene asportato in modo omogeneo. Se l'efficienza di un canale è molto bassa significa che la configurazione dei canali deve essere migliorata poiché per esempio il canale è troppo lontano dal pezzo, se invece l'efficienza è molto alta significa che il canale deve dissipare una quantità di calore troppo grande ed è quindi necessario progettare un sistema che sia in grado di smaltire maggiore calore.

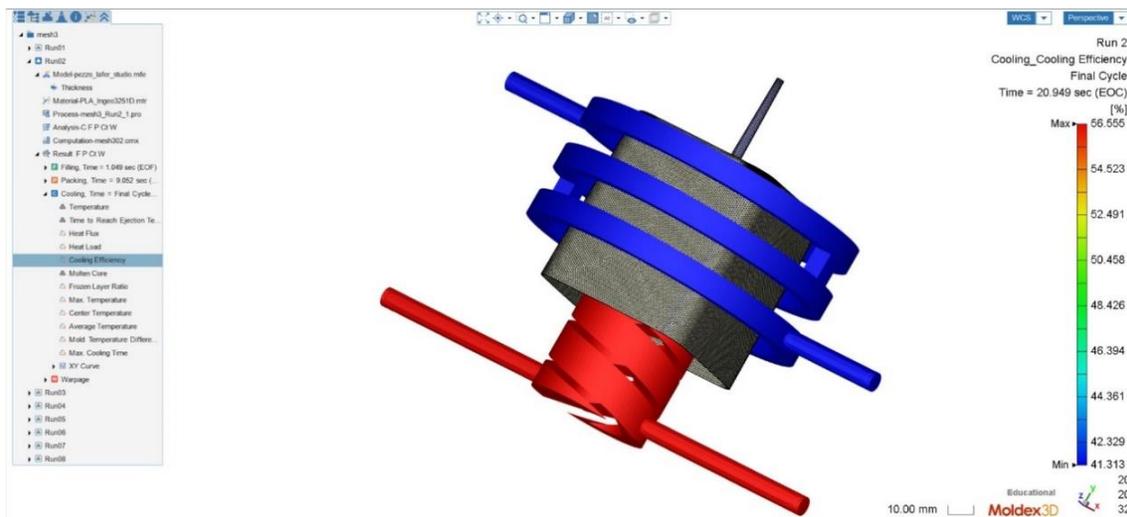


Figura 54 Efficienza dei canali di raffreddamento.

10.4 Warpage

I pezzi prodotti per stampaggio a iniezione sono soggetti a deformazioni causate dal ritiro volumetrico non omogeneo nelle varie zone del pezzo. Le diverse condizioni di temperatura e pressione producono una variazione del volume specifico e quindi della densità del polimero. Queste variazioni producono le deformazioni del pezzo.

Per osservare il risultato del warpage cliccare sull'icona "TOTAL DISPLACEMENT" oppure su x, y o z displacement. Se il componente non presenta particolari caratteristiche geometriche si utilizza il total displacement, se invece il pezzo è piano è consigliabile utilizzare il warpage nella direzione perpendicolare alla superficie.

Dopo aver caricato i risultati del warpage desiderati, utilizzare il comando "DEFORMATION" del tool dei risultati e regolare il fattore di scala, evidenziato in figura 55 con un riquadro rosso, per mostrare la tendenza alla deformazione.

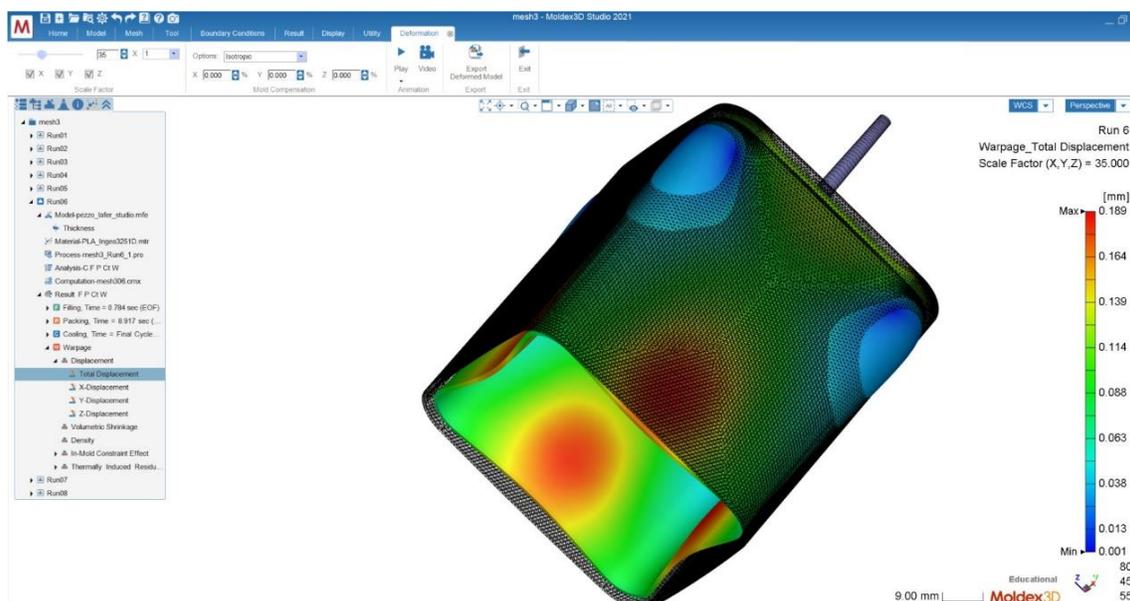


Figura 55 Total displacement del pezzo stampato.

Bibliografia

[1] <https://www.moldex3d.com/moldex3d-help/>; 2022

[2] <https://www.moldex3d.com/moldex3d-help/>; 2017

Vorrei ringraziare:

Alberto Frache e Daniele Battezzatore per avermi permesso di svolgere questa tesi, per il loro aiuto e la loro disponibilità.

La mia famiglia per avermi sempre sostenuto e aver sempre creduto in me.

Tutti i miei amici per essermi stati accanto e per le belle emozioni condivise in questi anni.