



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**CONFRONTO FRA MISURAZIONI REALI TRAMITE SCANNER 3D E SIMULAZIONE DI
PROCESSO DI STAMPAGGIO AD INIEZIONE**

**COMPARISON BETWEEN REAL MEASUREMENTS USING 3D SCANNER AND
INJECTION MOLDING PROCESS SIMULATION**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Marco Rossi

Tesi di Laurea di:

Alessandro Di Nunzio

A.A. 2019 / 2020

Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione di questo elaborato, vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale.

Innanzitutto, ringrazio il mio relatore, il Prof. Marco Rossi, per la disponibilità mostrata nei miei confronti, e soprattutto ringrazio il mio correlatore, l'Ing. Mattia Coccia, che mi ha aiutato a condurre le ricerche e le simulazioni oggetto dell'elaborato, dandomi giusti consigli in ogni fase della realizzazione di quest'ultimo.

Vorrei a questo punto ringraziare le persone che maggiormente hanno contribuito a farmi diventare la persona che sono oggi, vale a dire i miei genitori. Grazie a mia madre per tutto l'amore incondizionato e le attenzioni che mi ha sempre dato in questi anni e per la sicurezza e la forza che è riuscita a trasmettermi nei momenti più difficili della mia vita. Grazie a mio padre per il buon esempio che mi ha dato ogni giorno attraverso la sua onestà e semplicità e per avermi trasmesso la passione per la curiosità di scoprire ed imparare sempre cose nuove. Sono molto grato ed estremamente orgoglioso di avere due genitori come loro e spero un giorno di diventare anche solo la metà delle stupende persone che sono oggi. Un grande ringraziamento va anche a mia sorella Valentina, testarda ed estremamente caparbia, ma, senza ombra di dubbio, una delle ragazze, anzi, forse ormai è più corretto dire, una delle donne più caparbie ed intraprendenti che abbia mai conosciuto e con la quale ho condiviso molti dei ricordi più belli e felici della mia infanzia.

Ringrazio tutta la mia famiglia, la "Big Family": dai miei zii, zia Lina, zio Riccardo, zia Cinzia, zio Meo e zia Anna; alle mie cugine, Federica, Silvia, Sofia e Vanessa; a mio cugino Giuseppe; ai miei nonni, nonna Angela e nonno Amedeo; a coloro che non ci sono più ma che so che continuano a guardarmi e a supportarmi da lassù, nonna Antonietta, nonno Donato e zio Peppe. Li ringrazio per tutto il sostegno e l'affetto che mi hanno sempre dato e per la spensieratezza e la felicità che mi hanno trasmesso negli anni.

Ringrazio tutti coloro che ho conosciuto frequentando le piste di atletica. In particolare, ringrazio Gianluca, allenatore e fratello maggiore acquisito, che ha sempre creduto in me e che ha avuto la pazienza necessaria per affrontare la mia negatività; ringrazio Michele, Emanuele e Giuseppe, compagni di mille abbuffate ed avventure ed amici sinceri sui quali so di poter sempre contare; grazie a Luigino, quasi un nonno acquisito, che mi ha fatto divertire con le sue barzellette e mi ha insegnato molto tramite le sue esperienze di vita. Grazie, inoltre, a: Michelino, Simone, Clarissa e tutti gli altri compagni dell'atletica.

Ringrazio i miei amici più cari: Erika, Rosanna, Margherita, Sara, Vincenzo, Daniele, Lorenzo Celeste, Lorenzo Larnè, Alessandro, Simone. Li ringrazio per le fantastiche esperienze ed avventure vissute assieme e per il conforto e la compagnia che mi hanno dato ogni qual volta ne avessi bisogno.

Ringrazio i compagni dell'università, in particolare Alessandro e Daniel, che hanno condiviso con me questo percorso universitario rendendolo più leggero e divertente.

Infine, ringrazio il mio coinquilino Marco, con cui ho condiviso non solo una casa ma una vera e propria esperienza di vita, e che si è dimostrato un amico sincero con cui confrontarsi e dal quale poter imparare molto.

INDICE

1 – INTRODUZIONE	1
2 - MATERIALI POLIMERICI	3
2.1 - Introduzione alle materie plastiche e loro classificazione	3
2.2 - Cenni sulle reazioni di polimerizzazione	4
2.3 - Struttura dei polimeri	5
2.4 - Solidificazione di materiali termoplastici	7
2.5 - Proprietà meccaniche dei polimeri	8
2.6 - Caratteristiche del polifenilensolfuro (PPS)	10
3 - STAMPAGGIO AD INIEZIONE	12
3.1 - Principali lavorazioni dei materiali polimerici	12
3.2 - Stampaggio ad iniezione	13
3.2.1 - Introduzione allo stampaggio	13
3.2.2 - Macchinario per lo stampaggio	14
3.2.3 - Principali difetti dei prodotti stampati	16
3.2.4 - Proprietà dei polimeri importanti nello stampaggio	17
3.2.5 - Design del pezzo e dello stampo	19
3.3 - Ciclo di stampaggio	22
3.3.1 - Plasticizing stage	23
3.3.2 - Filling stage e Packing stage	24
3.3.3 - Cooling stage	28
3.3.4 - Warpage stage	29

4 - SIMULAZIONE E CONFRONTO	30
4.1 - Vantaggi di una simulazione CAE	30
4.2 - Impostazione e svolgimento della simulazione	31
4.3 - Risultati della simulazione	37
4.4 - Confronto	49
5 – CONCLUSIONI	50
6 – BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	51

1 - INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo elaborato è stato quello di analizzare la simulazione di uno stampaggio ad iniezione, effettuata tramite il software CAE Moldex3D, di un componente in materiale polimerico realmente stampato dall'azienda Sabaplast. Attraverso i risultati della simulazione ed il confronto di questi con il componente reale, si è cercato di trarre alcune considerazioni utili sulla fattibilità del pezzo e su alcune possibili modifiche progettuali da attuare per ottenere un prodotto finale con caratteristiche meccaniche migliori. Il componente considerato in questo studio ha la funzione di raccolta della condensa d'acqua generata dai fumi in uscita da un termoconvettore (figura 1). Il componente si trova all'interno di una caldaia, non è visibile dall'esterno, quindi non ha alcuna valenza estetica, ma svolge una funzione unicamente strutturale.

Run 3
Model

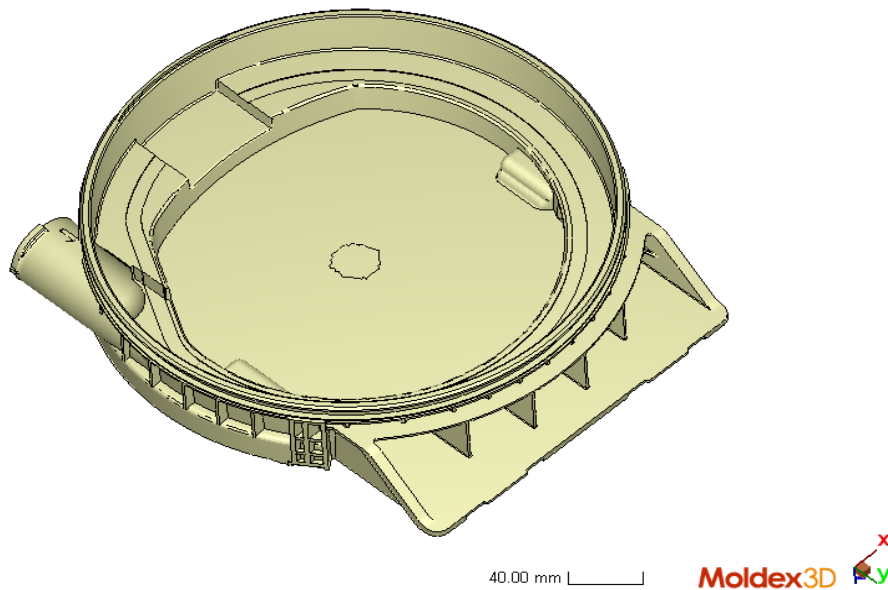


Figura 1 Componente oggetto della simulazione.

Alla luce del ruolo svolto all'interno del termoconvettore, il componente deve possedere un'ottima inerzia chimica, ovvero deve essere in grado di resistere a corrosione, e deve avere una resistenza meccanica tale da sopportare carichi termici ciclici ed un funzionamento a temperature elevate (circa 100°C). La scelta sul materiale da utilizzare per la realizzazione del componente è ricaduta sui materiali polimerici, in quanto sono tra i pochi materiali in grado di garantire una buona resistenza meccanica ad alte temperature, senza ossidarsi e ad un costo contenuto. Il materiale che era stato inizialmente scelto dall'azienda per realizzare il prototipo del componente era il *polipropilene* (PP). Questo prototipo era stato realizzato dall'azienda per eseguire alcuni studi sulla fattibilità del pezzo, dalla sua realizzazione attraverso un processo di stampaggio ad iniezione, fino al comportamento mostrato con carichi reali di lavoro. L'azienda ha notato che con temperature elevate la parte centrale piatta del componente non era in grado di resistere al carico applicato e si deformava eccessivamente, causando la fuoriuscita della condensa, per questo motivo sono passati all'utilizzo di un altro materiale, il *polifenilensolfuro* (PPS), in grado di resistere a temperature più elevate, oltre ad avere proprietà meccaniche superiori. Attualmente l'azienda sta effettuando ulteriori studi per valutare l'utilizzo di materiali in grado di sostituire il PPS per ottenere proprietà finali migliori. Il fulcro di questo studio è, però, incentrato sulla realizzazione del componente tramite stampaggio ad iniezione e sull'influenza che questo processo di lavorazione ha sulle caratteristiche finali del pezzo,

per questo motivo, nella simulazione effettuata sono stati utilizzati i parametri dei primi collaudi eseguiti dall'azienda e come materiale è stato usato il PP.

In generale, la prima parte di questo elaborato è stata dedicata allo studio e all'approfondimento delle materie plastiche, dei materiali che negli ultimi decenni hanno acquisito una sempre maggiore rilevanza ingegneristica grazie alle loro buone proprietà di resistenza meccanica e chimica, al loro peso contenuto e al loro costo ridotto. Inizialmente vengono forniti alcuni concetti fondamentali riguardo alla struttura molecolare ed ai legami chimici che sono alla base dei materiali polimerici, successivamente si passa ad analizzare anche le principali proprietà meccaniche dei polimeri. Un piccolo paragrafo viene, inoltre, riservato anche per esporre le principali caratteristiche del PPS, in modo da evidenziare il motivo per il quale è stato scelto come materiale per la realizzazione del componente.

In seguito, nell'elaborato si passa allo studio approfondito del processo di stampaggio ad iniezione. Inizialmente viene fatta una breve introduzione sul macchinario utilizzato e sul processo in generale, per poi studiare approfonditamente le principali fasi del processo (plasticification, filling, packing, warpage), cercando di evidenziare: quali sono i parametri di processo da controllare attentamente per la corretta esecuzione di ciascuna fase; l'evoluzione che subisce il materiale polimerico in ogni fase e le sue proprietà reologiche che influenzano il processo di stampaggio; i possibili difetti che possono verificarsi nel componente finale in caso di un controllo inappropriato dei parametri.

La terza ed ultima parte della tesi si concentra sulla simulazione svolta. Essendo un processo di stampaggio ad iniezione estremamente complesso, in quanto in esso sono in gioco moltissimi parametri in stretta correlazione tra loro, appare chiaro come l'utilizzo di una simulazione per il controllo puntuale e sistematico dei vari parametri di processo sia di fondamentale importanza. Dopo una breve introduzione sul software utilizzato e sull'importanza dell'uso dei programmi CAE già in fase di progettazione del componente, viene introdotta la simulazione vera e propria, presentando il modo in cui è stata impostata e la scelta dei parametri utilizzati. Nella parte finale vengono presentati i risultati della simulazione, i quali vengono confrontati con i dati riguardanti il componente realmente stampato. In particolare, si pone l'attenzione sui difetti che possono manifestarsi nel componente nelle fasi di filling e packing e sulle deformazioni che si hanno nel componente una volta che questo viene espulso dallo stampo (fase di warpage); infatti, una delle problematiche principali riscontrate dall'azienda è la difficoltà nel riuscire ad ottenere una buona circolarità del pezzo, caratteristica geometrica fondamentale per il corretto funzionamento del componente quando è posto in condizioni di lavoro.

2 - MATERIALI POLIMERICI

2.1 - INTRODUZIONE ALLE MATERIE PLASTICHE E LORO CLASSIFICAZIONE

Le materie plastiche sono materiali ingegneristici molto rilevanti poiché sono caratterizzati da una vasta gamma di proprietà, alcune delle quali irraggiungibili per qualsiasi altro materiale, e nella maggior parte dei casi hanno costi relativamente bassi. L'uso delle materie plastiche per realizzazioni tipiche dell'ingegneria meccanica offre molti vantaggi, tra cui eliminazione di parti, eliminazione di molte operazioni di finitura, assemblaggio semplificato, risparmio di peso, riduzione di rumore, e in qualche caso eliminazione della necessità di lubrificazione. Le materie plastiche sono inoltre particolarmente utili per molte applicazioni dell'energia elettrica, soprattutto per le ottime proprietà isolanti. Il termine polimero significa letteralmente "molte parti", infatti un solido polimerico è una macromolecola, ovvero un materiale formato da molecole di grandi dimensioni derivanti dall'unione, attraverso legami chimici forti (o primari), di un gran numero di piccole parti dette meri o unità ripetitive. Le materie plastiche sono un ampio e variegato gruppo di materiali sintetici che vengono trasformati attraverso formatura o stampaggio in forme e vengono generalmente divise, a seconda di come sono legate chimicamente nella struttura globale, in due classi principali: materiali termoplastici e materiali termoindurenti. I materiali termoplastici richiedono l'intervento del calore per essere plasmati e dopo il raffreddamento mantengono la forma in cui sono stati modellati. Questi materiali possono essere nuovamente riscaldati e rimodellati in nuove forme un certo numero di volte senza cambiamenti significativi delle loro proprietà. Sono costituiti da catene principali molto lunghe, formate da atomi di carbonio legati covalentemente tra loro; alcune volte sono presenti anche atomi di ossigeno, azoto e zolfo legati covalentemente alla catena principale. Le macromolecole, ovvero le lunghe catene molecolari, dei materiali termoplastici sono legate tra loro da legami chimici deboli (o secondari, come ad esempio le forze di van der Waals o il legame idrogeno). I termoplastici sono, dunque, formati da una "popolazione di individui" (catene polimeriche di diverse lunghezze e ciascuna con un proprio peso molecolare ed un proprio grado di polimerizzazione, delle quali è possibile effettuare un'analisi statistica per ottenere il peso molecolare medio del polimero) idealmente "separabili"; infatti, andando a riscaldare questi polimeri, l'aumento di temperatura mette in vibrazione le catene molecolari, spezzando i legami secondari che le legano. Di conseguenza, riscaldando i materiali termoplastici (entro certi valori limite, al di sopra dei quali si avrebbe la degradazione del polimero), si ottiene un fluido polimerico viscoso che può essere colato all'interno di opportuni stampi per ottenere pezzi dalle forme desiderate. I materiali termoplastici possono a loro volta essere divisi in altre due categorie: i polimeri tradizionali ed i tecnopolimeri. I primi sono caratterizzati da catene molecolari principali formate solo da atomi di carbonio legati covalentemente tra loro e vengono sintetizzati, nella maggior parte dei casi, con un processo di polimerizzazione per crescita a catena (paragrafo 2.2); alcuni dei polimeri tradizionali più comuni sono, ad esempio: il *polietilene* (PE), il *polivinilcloruro* (PVC), il *polipropilene* (PP), il *polistirene* (PS), il *polimetil metacrilato* (PMMA). I tecnopolimeri, invece, sono caratterizzati da catene molecolari principali formate da atomi di carbonio e, anche, da altri gruppi funzionali legati covalentemente tra loro; questi sono sintetizzati, nella maggior parte dei casi, con un processo di polimerizzazione a stadi (paragrafo 2.2). La definizione di tecnopolimero (engineering thermoplastics, in inglese), è arbitraria, dato che virtualmente ogni materiale plastico può essere considerato in una certa forma un tecnopolimero; in generale, un termoplastico viene considerato un tecnopolimero se possiede il giusto equilibrio di proprietà che lo rendono particolarmente adatto per applicazioni ingegneristiche. Esempi di tecnopolimeri sono: le poliammidi (Nylon), gli *acetali*, il *polibutilenetereftalato* (PBT), il *polietilentereftalato* (PET), il *polifenilensolfuro* (PPS). Quest'ultimo è il materiale con cui è stato realizzato il componente sul quale sono state effettuate analisi e simulazioni oggetto di questo studio e ad esso verrà dedicato, nel seguito, un paragrafo (paragrafo 2.6).

I materiali termoindurenti (o resine termoindurenti), invece, sono reticolati: alcuni per mezzo del solo calore oppure attraverso combinazioni di calore e di pressione, altri attraverso una opportuna reazione chimica che avviene a temperatura ambiente (termoindurenti a freddo). Benché i manufatti in resina termoindurente possano ammorbidirsi per effetto del calore, i legami covalenti del reticolo impediscono loro di ritornare allo stato fluido che esisteva prima della reticolazione. I materiali termoindurenti, perciò, non possono venire nuovamente riscaldati e fusi come avviene per i termoplastici. Questo per i termoindurenti è uno svantaggio, perché gli scarti prodotti durante la lavorazione non possono essere riciclati e riutilizzati. La maggior parte dei materiali termoindurenti sono, dunque, formati da una rete di atomi di carbonio (e a volte di altri atomi, come azoto, ossigeno e zolfo) legati covalentemente tra loro per formare un solido rigido; ovvero, è come se questi polimeri siano formati da un'unica grande macromolecola, in quanto anche i legami tra le varie catene polimeriche sono in questo caso legami chimici forti (o primari, ovvero legami covalenti) che non si spezzano all'aumentare della temperatura e non permettono di ottenere un fluido polimerico viscoso. I principali esempi di materiali polimerici termoindurenti sono: le *resine fenoliche*, le *resine epossidiche*, le *poliesteri insature*, le *resine amminiche*.

2.2 - CENNI SULLE REAZIONI DI POLIMERIZZAZIONE

Quasi tutti i materiali termoplastici vengono sintetizzati mediante un processo di polimerizzazione a catena, nel quale moltissime molecole vengono unite mediante legami covalenti per formare lunghe catene polimeriche. Le molecole semplici, che vengono legate in modo covalente nelle lunghe catene, sono dette monomeri; la lunga catena molecolare formata dalle unità monomeriche è detta polimero. Ad esempio, la molecola dell'etilene (C₂H₄) ha una struttura chimica costituita da un doppio legame covalente fra gli atomi di carbonio e da quattro legami covalenti fra gli atomi di carbonio e quelli di idrogeno. Quando la molecola di etilene viene attivata in modo tale che il doppio legame fra i due atomi di carbonio viene "aperto", il doppio legame covalente viene sostituito da un singolo legame covalente; in questo modo ogni atomo di carbonio della primitiva molecola di etilene ha un elettrone libero per legarsi covalentemente con un altro elettrone libero proveniente da un'altra molecola. Il polimero che risulta dalla polimerizzazione dell'etilene si chiama polietilene. La reazione generale che si verifica per la polimerizzazione a catena del monomero etilene in polietilene può essere scritta come rappresentato di seguito:

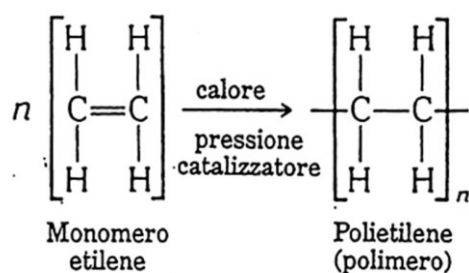


Figura 2.1 Reazione di attivazione di una molecola di etilene.

La singola unità che si ripete nella catena polimerica è detta, come già accennato, unità monomerica o "mero". Il mero del polietilene è -[CH₂-CH₂]- e l'*n* nell'equazione precedente rappresenta il grado di polimerizzazione della catena polimerica ed è uguale al numero delle singole unità monomeriche nella catena molecolare del polimero. Solitamente la polimerizzazione a catena, che permette di passare da un insieme di monomeri ad un polimero lineare (ad esempio l'etilene che polimerizza nel polietilene, come appena visto), è costituita da tre stadi principali: iniziazione, propagazione e terminazione. Per l'iniziazione possono essere utilizzati diversi catalizzatori (ad esempio dei radicali

liberi, come il *perossido di benzoile* nel caso dell'etilene) che permettono di attivare le molecole monomeriche ed innescare un effetto a catena. Il processo secondo il quale la catena polimerica viene estesa dalla successiva addizione di unità monomeriche è detto propagazione. La terminazione può avvenire mediante l'addizione di un radicale libero o con la combinazione di due catene; un'altra eventualità è che tracce di impurità possano terminare la catena polimerica.

Nella polimerizzazione a stadi i monomeri reagiscono chimicamente tra loro in modo da creare polimeri lineari. Nella polimerizzazione a stadi si assume che la reattività dei gruppi terminali di un monomero e di un polimero di qualsivoglia dimensione sia circa la stessa. Perciò le unità monomeriche possono reagire tra di loro oppure con polimeri in formazione di qualsivoglia dimensione. In molte reazioni di polimerizzazione a stadi si ottiene una piccola molecola come prodotto secondario, così che questi tipi di reazione vengono talvolta chiamati reazioni di polimerizzazione per condensazione.

In alcune reazioni di polimerizzazione nelle quali vi è un reagente chimico con più di due funzioni reattive, si può ottenere un materiale plastico tridimensionale reticolato e si parla in questo caso di polimerizzazione per reticolazione. Questo tipo di polimerizzazione è quella che avviene nella produzione di materie plastiche termoindurenti come le resine fenoliche, le epossidiche ed alcune poliesteri.

In ambito industriale i processi chimici di polimerizzazione che vengono adottati per produrre materie plastiche sono vari e complessi, quelli più importanti e diffusi sono: polimerizzazione in massa, polimerizzazione in soluzione, polimerizzazione in sospensione e polimerizzazione in emulsione. Nella polimerizzazione in massa il monomero e l'attivatore della reazione sono introdotti insieme in un reattore che viene riscaldato e raffreddato quando richiesto. Questo processo è ampiamente usato per la polimerizzazione per condensazione, per via del basso calore sviluppato da questo tipo di reazione. Nella polimerizzazione in soluzione il monomero viene sciolto in un solvente non reattivo contenente un catalizzatore. Il calore sviluppato dalla reazione viene assorbito dal solvente così che la reazione si svolga più lentamente. Nella polimerizzazione in sospensione il monomero viene miscelato con un catalizzatore e quindi disperso come sospensione in acqua. In questo processo il calore viene assorbito dall'acqua. Dopo la polimerizzazione il prodotto viene separato ed essiccato. La polimerizzazione in emulsione è un processo simile a quello in sospensione, poiché si svolge anch'esso in acqua. Tuttavia, deve essere aggiunto un emulsionante per disperdere il monomero in particelle di dimensioni molto piccole.

2.3 - STRUTTURA DEI POLIMERI

Le proprietà dei materiali polimerici dipendono non solo dalla natura chimica delle macromolecole, ma anche dalla loro organizzazione intramolecolare e intermolecolare. Gli aspetti da tenere in considerazione sono: di tipo chimico, derivanti dal modo in cui sono concatenate le unità monomeriche e dalla configurazione assunta dalle macromolecole; di tipo intramolecolare, derivanti dalla regolarità della conformazione delle catene; di tipo intermolecolare, derivanti dall'organizzazione tridimensionale delle catene con la conseguente formazione di strutture ordinate (stato cristallino), parzialmente ordinate (stato semicristallino) e totalmente disordinate (stato amorfo). Le forze messe in gioco nella formazione dei legami covalenti sono molto più grandi (~100 kcal/mole) delle forze che si esercitano fra atomi tra loro non direttamente legati da legami chimici (~0,1-10 kcal/mole). In prima approssimazione, la geometria dei legami covalenti può essere ritenuta rigida. Le interazioni, attrattive o repulsive, fra atomi non direttamente legati e posti alla distanza r , sono descrivibili in termini di interazioni elettrostatiche (proporzionali a $1/r$), di legami ad idrogeno e interazioni tra dipoli elettrici (proporzionali a $1/r^2$), di interazioni deboli o forze di van der Waals (proporzionali a $1/r^6$). La struttura finale che le macromolecole raggiungono sono quelle caratterizzate dalla minima quantità di interazioni: la catena si distorce e si rilassa acquistando una sua specifica forma globale di equilibrio in cui tutte le forze interatomiche sono bilanciate.

Nei polimeri amorfi il numero di conformazioni possibili è estremamente elevato: i legami vincolano gli atomi a distanze relative fisse ma non impediscono la rotazione intorno ai legami stessi. È possibile mostrare, sulla base di argomentazioni statistiche, che la forma media delle molecole dei polimeri lineari è quella di un gomitolo, al cui interno la disposizione degli atomi è casuale e variabile nel tempo; per questo motivo il gomitolo è detto statistico. Ogni gomitolo è interpenetrato con tutti i gomitoli adiacenti, per cui le catene risultano fortemente aggrovigliate; la separazione dei gomitoli è resa difficoltosa dalla presenza di intrecci labili (*entanglements*) che legano le molecole temporaneamente tra loro. Questa conformazione viene ottenuta quando le catene polimeriche hanno mobilità elevata, come accade quando sono in soluzione o allo stato fuso. Diminuendo la temperatura, viene ridotta la mobilità: se l'ordine strutturale della catena fosse sufficiente, si potrebbe avere la parziale cristallizzazione del materiale (materiale semicristallino); altrimenti si ha un materiale amorfo "mantenuto nella sua forma" da un progressivo aumento della viscosità.

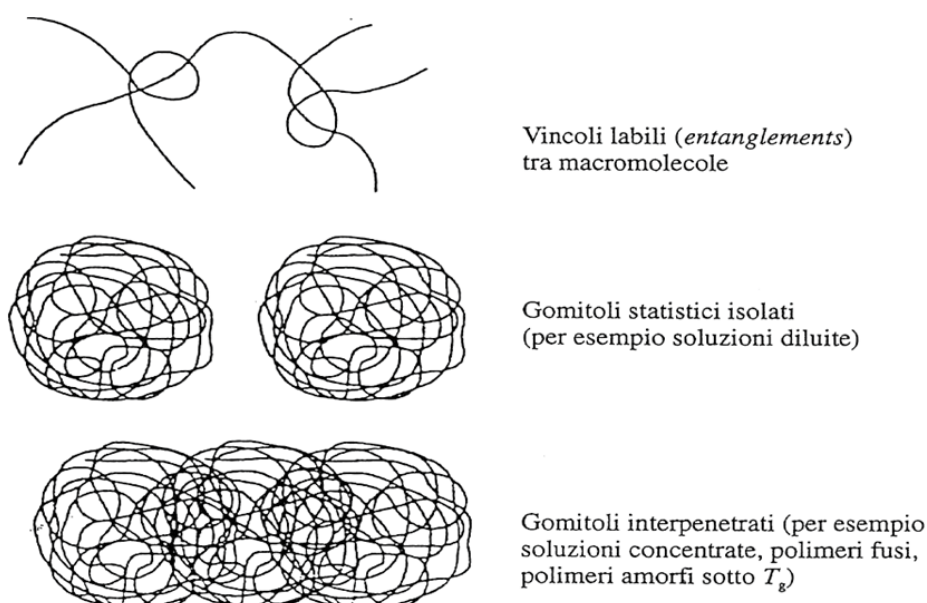


Figura 2.2 Rappresentazione schematica dei legami fisici (*entanglements*) tra le macromolecole e dei gomitoli statistici isolati e interpenetrati.

Quando le catene polimeriche hanno un'elevata regolarità strutturale, possono, almeno in parte, cristallizzare. I polimeri cristallini sono in realtà costituiti solo per una frazione da zone cristalline e, per la rimanente parte, da zone amorphe. Nello stato cristallino si ha il massimo avvicinamento tra una catena e l'altra, questo, da un punto di vista meccanico, corrisponde ad avere elevate proprietà meccaniche. I modelli più diffusi per descrivere le molecole polimeriche allo stato cristallino sono due: il modello a micelle sfrangiate (modello a due dimensioni) e il modello della catena ripiegata (modello a tre dimensioni). Il primo ipotizza che lunghe catene polimeriche siano disposte in successione in regioni ordinate e disordinate per tutta la lunghezza della molecola polimerica; il secondo modello prevede spezzoni delle catene molecolari ripiegati su loro stessi, in modo da formare un raccordo tra regioni cristalline e non cristalline. In termini di macro-proprietà un polimero può essere pensato, dunque, come una sorta di materiale "composito" formato da zone cristalline, dette cristalliti, e da zone amorphe. Durante il raffreddamento di un polimero fuso cristallizzabile si sviluppano numerosi nuclei di cristallizzazione dai quali escono in direzione radiale numerose lamelle. Allontanandosi dal nucleo di cristallizzazione, esse assumono l'aspetto di nastri. Se non intervengono impedimenti, lo sviluppo dei nastri è tale da conferire all'aggregato una forma sferica (sferulita). La crescita si arresta quando due sferuliti si incontrano. La superficie di contatto tra sferuliti adiacenti è attraversata da numerose molecole-laccio che appartengono a lamelle situate in sferuliti diversi, risultando in tal modo cuciti insieme. Le dimensioni degli sferuliti sono molto variabili e dipendono dalla natura chimica del polimero, dal suo peso molecolare, dalla velocità di

raffreddamento e dalla presenza di agenti nucleanti. La struttura sferulitica si sviluppa solamente in condizioni di laboratorio strettamente controllate e in assenza di sollecitazioni. Un materiale polimerico allo stato cristallino, anche il più ordinato e perfetto, è sempre costituito da una fase cristallina e da una fase amorfa, ovvero è sempre un materiale semicristallino. La quantità di materia cristallina all'interno di un polimero termoplastico influenza la sua resistenza a trazione. In generale, con l'aumento del grado di cristallinità aumenta anche la resistenza del materiale.

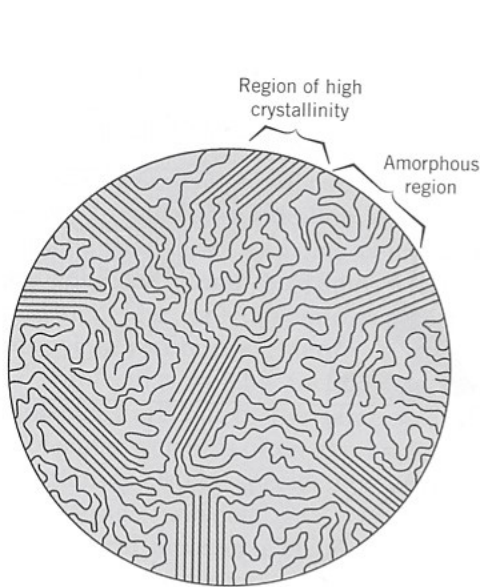


Figura 2.3 Modello a micelle sfrangiate.

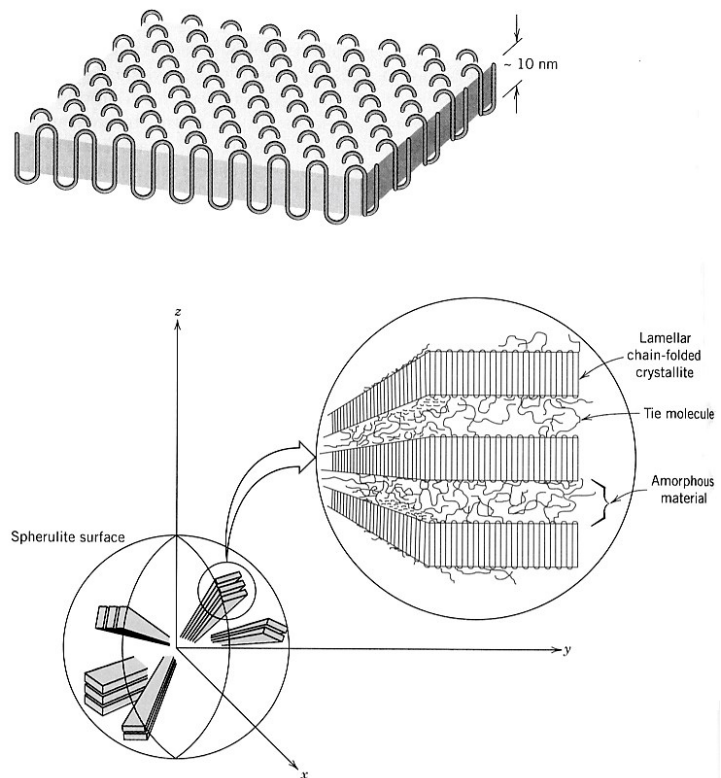


Figura 2.4 Modello della catena ripiegata.

2.4 - SOLIDIFICAZIONE DI MATERIALI TERMOPLASTICI

Durante il raffreddamento e la solidificazione, un termoplastico passa dallo stato liquido (fluido polimerico viscoso) a quello solido, che può essere semicristallino o amorfo (figura 2.5). Consideriamo innanzitutto la solidificazione e un raffreddamento lento fino a basse temperature di un termoplastico amorfo. Al diminuire della temperatura non si assiste ad una diminuzione improvvisa del volume specifico; il liquido, sottoposto a solidificazione, passa allo stato di liquido sovra-raffreddato che si trova allo stato solido e mostra una graduale diminuzione del volume specifico col diminuire della temperatura. Man mano che le temperature si abbassano ulteriormente si assiste in un punto ad un cambiamento della pendenza della curva del volume specifico; la temperatura in corrispondenza del punto in cui avviene il cambio di pendenza della curva è detta temperatura di transizione vetrosa (o glass transition temperature, T_g). Al di sopra della T_g , i materiali termoplastici amorfi sono in uno stato cosiddetto gommoso ed hanno un comportamento elastico e duttile; al di sotto della T_g , i termoplastici amorfi sono in uno stato detto vetroso ed hanno un comportamento fragile, in quanto la mobilità delle catene molecolari è molto ridotta. Dunque, per i materiali termoplastici amorfi, la discriminante meccanica è la temperatura di transizione vetrosa, che può essere considerata una temperatura di transizione duttile-fragile. Prendiamo ora in considerazione un termoplastico semicristallino. In questo caso, durante la solidificazione ed il

raffreddamento, si assiste ad una brusca diminuzione del volume specifico in corrispondenza della temperatura di fusione (o melting temperature, T_m); questa diminuzione repentina è associata ad un impacchettamento più efficiente delle catene polimeriche nelle regioni cristalline. Anche in questo caso, continuando con il raffreddamento si giunge alla temperatura di transizione vetrosa, che coincide con un cambiamento di pendenza della curva del volume specifico. Al di sotto della T_g , la matrice liquida sovra-raffreddata passa ad uno stato vetroso e la struttura del termoplastico sarà costituita da regioni cristalline in una matrice vetrosa amorfa.

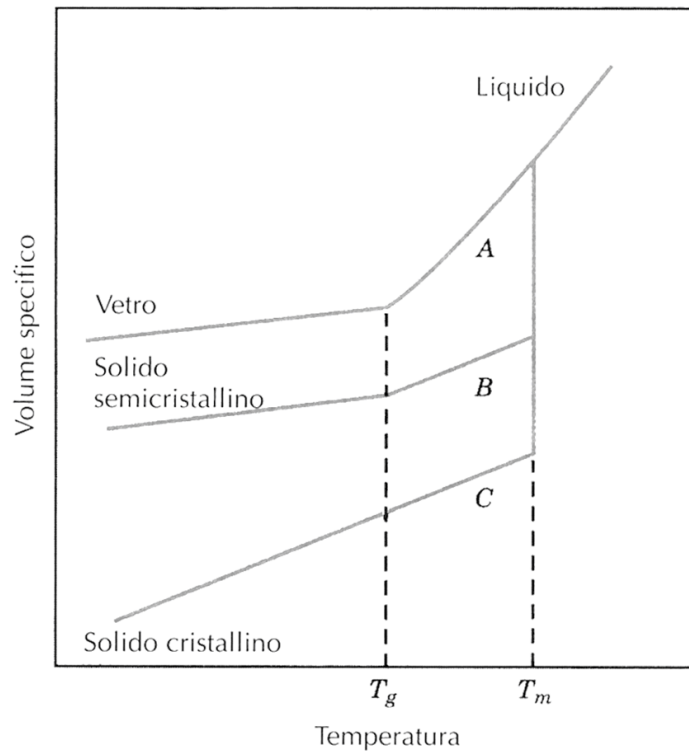


Figura 2.5 Curva di solidificazione e raffreddamento (schematica) di materiali amorfosi, semicristallini e cristallini.

2.5 - PROPRIETÀ MECCANICHE DEI POLIMERI

Nella figura 2.6 (ISO 527-1) sono raffigurate delle curve sforzo-deformazione di diverse tipologie di materiali polimerici. La curva (a) rappresenta il tipico andamento della curva $\sigma - \epsilon$ di un materiale termoplastico amorpho al di sotto della temperatura di transizione vetrosa e/o di un materiale termoincidente: il polimero è in uno stato vetroso, dunque, la sua curva $\sigma - \epsilon$ è simile a quella di un materiale fragile, ovvero è presente solo il tratto iniziale elastico e, subito dopo di questo, si ha la rottura del provino senza alcuna strizione. La curva (b) è tipica di un materiale termoplastico amorpho al di sopra della temperatura di transizione vetrosa, mentre la curva (c) è caratteristica di un materiale termoplastico semicristallino: in entrambi i casi il materiale è in uno stato gommoso, dunque, la curva $\sigma - \epsilon$ è simile a quella di un materiale duttile, ovvero, dopo il tratto elastico iniziale è visibile anche una strizione, la quale può essere più o meno diffusa a seconda del polimero considerato, inoltre potrebbe essere visibile anche il fenomeno dell'incrudimento. Infine, la curva (d) rappresenta il comportamento di una classe particolare di polimeri, gli elastomeri, che manifestano una notevole duttilità e la totale assenza del fenomeno della strizione.

Nel tratto elastico iniziale, un generico provino di materiale polimerico torna alla sua lunghezza originale una volta che viene rimosso lo sforzo a cui esso era stato sottoposto. In questa regione, lo

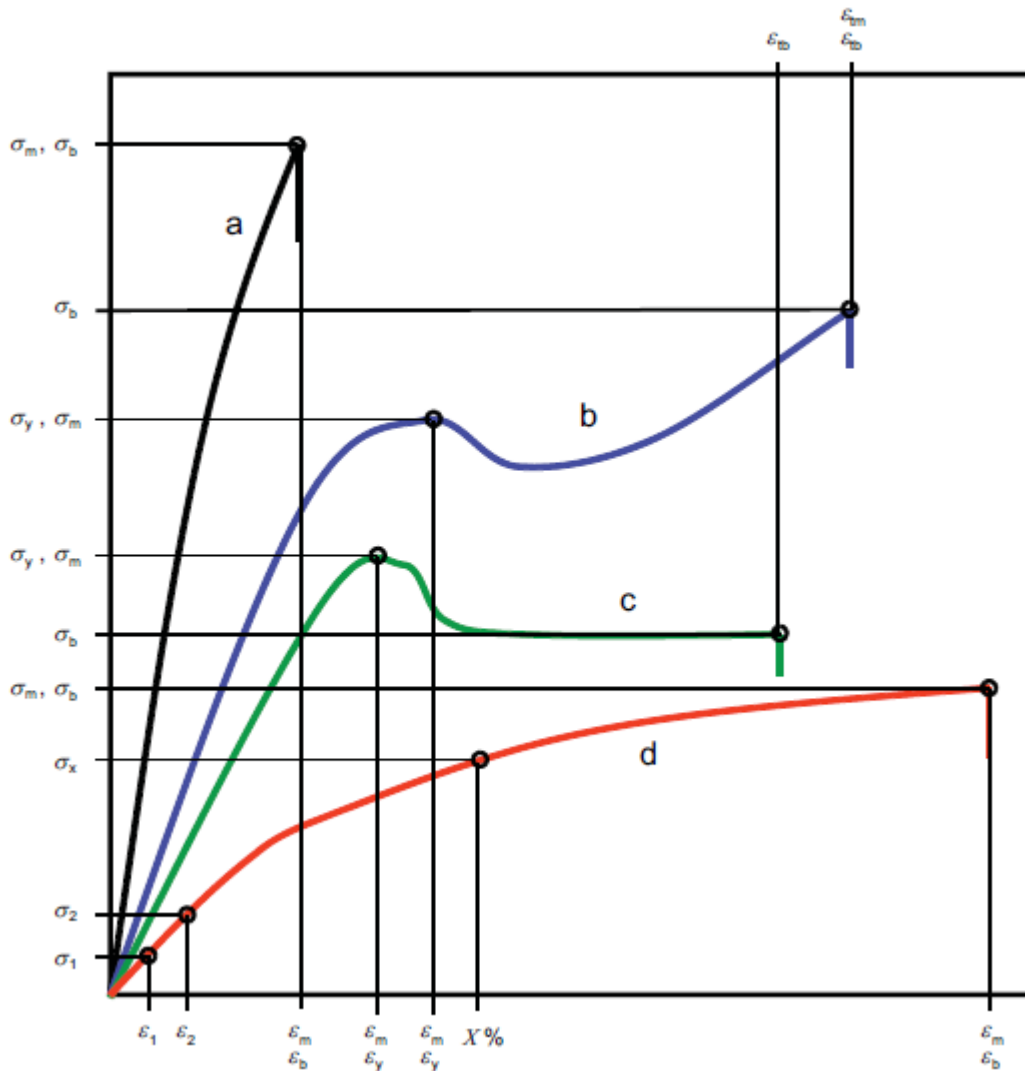
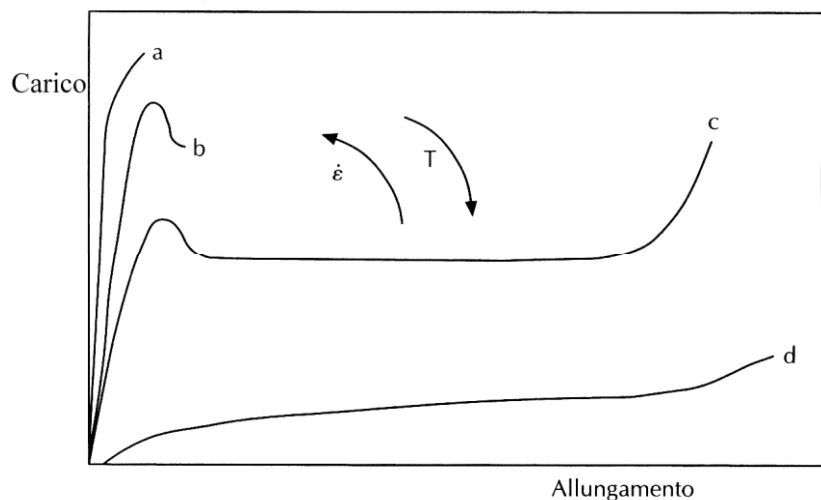


Figura 2.6 Tipiche curve sforzo-deformazione di diversi materiali polimerici.

sforzo risulta proporzionale alla deformazione attraverso la classica relazione $\sigma = E \epsilon$, ovvero la legge di Hooke, dove E è il modulo elastico o modulo di Young che rappresenta geometricamente il coefficiente angolare della retta presente per il tratto iniziale della curva $\sigma - \epsilon$. Il valore che si ottiene sperimentalmente caratterizza in modo particolare ogni materiale polimerico e, più esso risulta elevato, più il polimero risulta rigido. Per i polimeri a comportamento plastico, dopo il tratto elastico si ha un massimo nella curva $\sigma - \epsilon$ in corrispondenza del quale si individua il carico di snervamento σ_y . In corrispondenza della rottura del provino si individua invece il carico di rottura σ_b . Si può concludere affermando che tra questi due valori, quello più alto definisce la resistenza a trazione (tensile strength) del materiale polimerico.

Come è possibile osservare in figura 2.7, all'aumentare della velocità di deformazione e/o al diminuire della temperatura, i materiali polimerici si comportano sempre di più come materiali fragili; viceversa, al diminuire della velocità di deformazione e/o all'aumentare della temperatura hanno un comportamento meccanico sempre più duttile.

Figura 2.7 Comportamento visco-elastico dei materiali polimerici.



La resistenza meccanica dei materiali termoplastici è principalmente influenzata dai seguenti fattori:

- _ massa molecolare media: la resistenza meccanica aumenta all'aumentare della massa molecolare media del polimero, almeno fino ad un certo valore limite, al di sopra del quale la resistenza non aumenta più in modo significativo. Le caratteristiche dei polimeri sono influenzate anche dalla distribuzione dei pesi molecolari (detto grado di polidispersione): le frazioni ad alto peso molecolare influenzano la rigidità e la fragilità del materiale, mentre quelle a basso peso molecolare influenzano la viscosità e l'adesività;
- _ grado di cristallinità: la resistenza a trazione, il modulo di elasticità e la densità del materiale aumentano all'aumentare del grado di cristallinità dello stesso materiale;
- _ presenza di atomi nella catena molecolare principale: la presenza di atomi di ossigeno, azoto e zolfo nella catena principale di atomi di carbonio determina un irrigidimento del materiale grazie alla formazione di legami secondari tra le catene polimeriche;
- _ presenza di gruppi laterali voluminosi sulla catena principale: questi gruppi laterali voluminosi rendono difficile lo scorrimento delle catene nella fase di trazione e, di conseguenza, determinano anch'esse un irrigidimento del materiale termoplastico;
- _ presenza di atomi fortemente polari sulla catena principale: la presenza di dipoli sulla catena principale determina un aumento delle forze di legame intermolecolari ed un aumento della resistenza a trazione;
- _ aggiunta di rinforzo di fibra di vetro: con l'aggiunta di opportune percentuali in peso di fibra di vetro nel polimero, si può ottenere un aumento di resistenza del materiale;
- _ effetto della temperatura: all'aumentare della temperatura i legami secondari presenti tra le catene molecolari si indeboliscono e determinano una diminuzione della resistenza del materiale.

2.6 - CARATTERISTICHE DEL POLIFENILENSOLFURO (PPS)

In questo paragrafo vengono evidenziate alcune delle principali caratteristiche chimiche e meccaniche del PPS, che, come già accennato nel capitolo introduttivo, è il materiale utilizzato per realizzare il componente realmente stampato oggetto di questo studio. Il *polifenilensolfuro* (PPS) è un tecnopolimero caratterizzato da una eccezionale resistenza chimica unita a buone proprietà meccaniche e a rigidità alle alte temperature; è un materiale particolarmente adatto per lo stampaggio ad iniezione. Il PPS fu prodotto per la prima volta nel 1973 dalla Philips Chemical Co. con il nome commerciale di Ryton. Il PPS ha una unità ripetitiva lungo la catena principale formata da anelli benzenici para-sostituiti e da atomi di zolfo bivalenti.

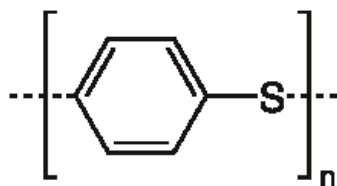


Figura 2.8 Unità strutturale ripetitiva del polifenilensolfuro.

La struttura simmetrica e compatta degli anelli fenilici separati dagli atomi di zolfo dà origine ad un materiale polimerico rigido e meccanicamente resistente. La struttura molecolare compatta origina anche un alto grado di cristallinità. Grazie alla presenza degli atomi di zolfo, il PPS è molto resistente agli attacchi degli agenti chimici. Infatti, non sono state trovate sostanze chimiche capaci di solubilizzare facilmente il PPS al di sotto dei 200 °C; anche ad alte temperature pochi materiali reagiscono chimicamente con il PPS. Il PPS non caricato ha una resistenza meccanica di 65 MPa a temperatura ambiente, mentre quando viene caricato con il 40% di fibre di vetro la sua resistenza meccanica raggiunge i 120 MPa. Grazie alla sua struttura cristallina, la perdita di resistenza con l'aumento della temperatura è graduale, e anche a 200 °C mantiene una considerevole resistenza. Le proprietà principali del PPS sono dunque: densità di 1,34 g/cm³; temperatura di utilizzo in continuo fino a 240 °C; resistenza a picchi di temperatura fino a 270 °C; intrinsecamente autoestinguente;

elevata resistenza chimica (insolubile in tutti i solventi noti al di sotto dei 200 °C); bassissimo assorbimento di acqua; elevatissima resistenza alla deformazione, anche ad alte temperature.

Le applicazioni nel campo dell'industria meccanica includono strumentazione per processi chimici, come ad esempio attrezzature per immersioni, componenti di centrifughe, palette, meccanismi per pompe. I composti in miscela sono specifici per molte applicazioni sotto cofano delle automobili, come ad esempio i sistemi di controllo delle emissioni. Le applicazioni elettriche ed elettroniche includono componenti di computer come connettori, rocchetti, bobine. Rivestimenti in PPS resistenti alla corrosione e termicamente stabili vengono usati per tubazioni petrolifere, valvole, raccordi, giunti e altre attrezzature dell'industria petrolifera e chimica.

Nella tabella successiva sono inserite alcuni parametri utili riguardanti l'utilizzo del PPS in una operazione di stampaggio ad iniezione (i parametri indicati nella tabella verranno presentati nel dettaglio nel capitolo successivo).

CARATTERISTICA	GRANDEZZA
Melting temperature (T_m) Temperatura di fusione	290 °C
Flow length to wall thickness ratio Rapporto tra la lunghezza del flusso e lo spessore della parete	120 - 185
Maximum shear stress Massimo sforzo di taglio	0.50 MPa
Venting gap Spazio di ventilazione	0.01 – 0.03 mm
Clamping force Forza (pressione) di serraggio	30.9 – 46.3 MN/m ² o 2.0 – 3.0 ton/in ²

3 - STAMPAGGIO AD INIEZIONE

3.1 - PRINCIPALI LAVORAZIONI DEI MATERIALI POLIMERICI

Nei principali processi tecnologici di trasformazione adottati per le materie plastiche, le materie prime utilizzate sono i polimeri allo stato solido, sottoforma di granuli o in polvere, ai quali vengono aggiunti additivi di diversa natura (ad esempio riempitivi, plastificanti, stabilizzanti, coloranti, ritardanti di fiamma, etc.) con lo scopo di migliorare il loro comportamento durante le lavorazioni e le loro proprietà specifiche, una volta trasformati in prodotti finiti. I processi in uso per trasformare granuli e pastiglie in prodotti finiti come fogli, barre, oggetti estrusi, tubi o parti stampate sono molti e differenti. Il processo che viene usato dipende in una certa misura dal fatto che si tratti di un materiale termoplastico o di uno termoindurente. In genere i termoplastici vengono riscaldati fino al rammollimento e quindi rimodellati prima del raffreddamento. Per i materiali termoindurenti, invece, che non sono stati completamente polimerizzati prima di venire lavorati nella forma definitiva, si adotta un processo mediante il quale avviene una reazione chimica per cui le catene polimeriche vengono legate tra loro in modo da formare una rete polimerica tridimensionale. La polimerizzazione finale si può ottenere mediante calore e pressione oppure per azione catalitica a temperatura ambiente o a più alte temperature.

I principali processi utilizzati per i materiali termoplastici sono: lo stampaggio ad iniezione; l'estrusione; lo stampaggio per soffiatura; la termoformatura. Lo stampaggio ad iniezione è la lavorazione più utilizzata e verrà approfondita nel dettaglio nei seguenti paragrafi. Nel processo di estrusione la resina termoplastica viene introdotta in un cilindro riscaldato, quindi la materia plastica fusa viene sospinta da una vite rotante attraverso una o più aperture in una matrice di forma precisa per produrre forme in continuo. All'uscita dalla matrice, il pezzo estruso deve essere raffreddato al di sotto della sua temperatura di transizione vetrosa in modo da assicurarne la stabilità dimensionale. Il raffreddamento si ottiene solitamente con un sistema di insufflazione d'aria o di raffreddamento ad acqua. In sostanza, l'estrusore è una pompa adatta a fondere e trasportare fluidi polimerici ad elevata viscosità. Nello stampaggio per soffiatura, una lavorazione che avviene subito dopo l'estrusione, un cilindro o tubo di plastica riscaldato detto *parison* viene posto tra le facce di uno stampo. Lo stampo viene chiuso per serrare le parti terminali del cilindro, e viene insufflata dell'aria compressa, in modo da comprimere la materia plastica contro le pareti dello stampo. Nella termoformatura, un foglio di materia plastica viene forzato a pressione contro le pareti di uno stampo. I processi utilizzati anche per materiali termoindurenti sono: stampaggio per compressione; stampaggio per trasferimento; stampaggio ad iniezione. Nello stampaggio per compressione la resina, che può essere eventualmente preriscaldata, viene introdotta in uno stampo preriscaldato, contenete una o più cavità. La parte superiore dello stampo viene forzata contro la resina e la pressione ed il calore applicati provocano la liquefazione della resina, spingendola dentro le cavità. Continuando il riscaldamento si ottiene la completa reticolazione della resina termoindurente. Il pezzo viene quindi espulso dallo stampo ed in un tempo successivo vengono eliminate le sbavature. Lo stampaggio per trasferimento differisce dallo stampaggio per compressione per il modo in cui viene introdotto il materiale nelle cavità dello stampo. Nello stampaggio per trasferimento la resina non è caricata direttamente all'interno della cavità dello stampo, ma in una camera al di fuori di questa. Nello stampaggio per trasferimento, quando lo stampo è chiuso, un pistone spinge la resina (che solitamente è preriscaldata) dalla camera esterna attraverso un sistema di canali e aperture nelle cavità dello stampo. Dopo che il materiale stampato ha avuto il tempo di indurire in modo da formare un rigido reticolo tridimensionale di materiale polimerico, il pezzo stampato viene espulso dallo stampo.

3.2 - STAMPAGGIO AD INIEZIONE

Nei prossimi paragrafi verrà analizzato nel dettaglio il processo di stampaggio ad iniezione, dando particolare enfasi ai principali parametri del processo, alle proprietà del materiale da stampare ed alle caratteristiche del componente da realizzare. Dunque, saranno analizzati tutti quei fattori del processo che devono essere correttamente programmati e controllati al fine di ottenere dei componenti con proprietà meccaniche, geometriche e di finitura superficiale ingegneristicamente rilevanti.

3.2.1 - INTRODUZIONE ALLO STAMPAGGIO

Lo stampaggio ad iniezione è uno dei metodi di lavorazione più usati per la formatura dei materiali termoplastici. I maggiori vantaggi dello stampaggio ad iniezione sono:

- _ possibilità di produrre pezzi di alta qualità con una elevata velocità di produzione;
- _ costi di manodopera relativamente bassi;
- _ possibilità di ottenere buone finiture superficiali sui pezzi stampati;
- _ il processo può essere altamente automatizzato;
- _ possibilità di realizzare forme complicate.

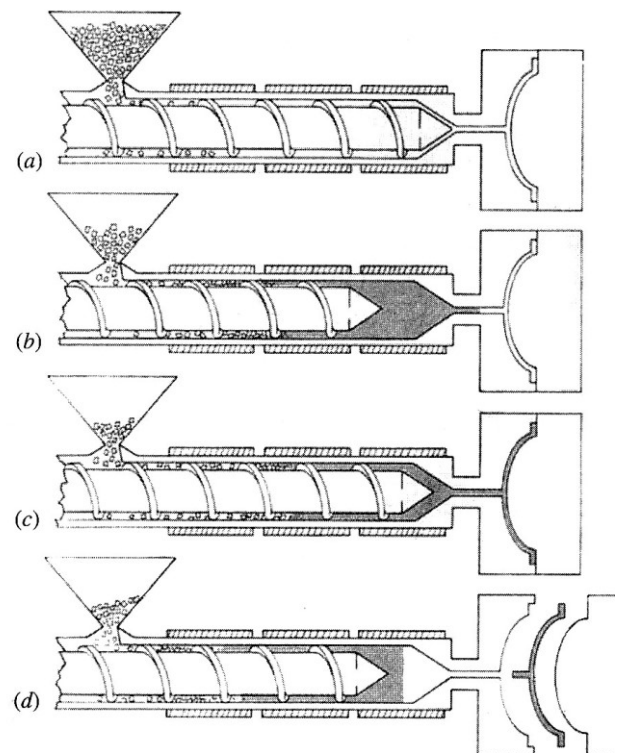
I principali svantaggi dello stampaggio ad iniezione sono:

- _ alti costi delle macchine, che comportano la produzione di un elevato numero di pezzi per ammortizzare i costi della macchina;
- _ necessità di conoscere le modalità di variazione dei parametri di processo e di essere in grado di influire su questi per controllare il processo.

Le moderne macchine per lo stampaggio ad iniezione utilizzano un meccanismo a vite reciproca che consente di fondere la materia plastica e di iniettarla in uno stampo. Nel processo di stampaggio ad iniezione i granuli di materia plastica vengono caricati da una tramoggia, attraverso un'apertura nel cilindro di iniezione, sulla superficie di una vite rotante che li spinge avanti verso lo stampo (figura (a)). La rotazione della vite forza i granuli contro le pareti riscaldate del cilindro, provocandone la fusione (la materia plastica viene fluidificata e passa allo stato di fluido polimerico viscoso) a causa del calore di compressione, dell'attrito e del riscaldamento delle pareti del cilindro (figura (b)). Quando una quantità sufficiente di materia plastica fusa arriva allo stampo che si trova alla fine della vite, questa si arresta e con un movimento a stantuffo inietta un getto della materia plastica fusa in un canale di alimentazione e successivamente nella cavità dello stampo (figura (c)). Quando il polimero allo stato fuso entra nella cavità, l'aria viene espulsa dal perno di espulsione, dalla linea di separazione e dai fori di ventilazione. Per evitare la riduzione di volume del prodotto finito in seguito al fenomeno del ritiro, l'albero della vite mantiene in pressione, per breve tempo, il materiale plastico alimentato nello stampo, in modo da permettergli di diventare solido; quindi si ritrae. Lo stampo viene raffreddato, solitamente con acqua, per far raffreddare rapidamente il pezzo in materia plastica. Infine, lo stampo viene aperto ed il pezzo stampato viene espulso dallo stampo per mezzo di aria o di perni d'espulsione a molla (figura (d)). Lo stampo viene quindi chiuso ed è pronto per un altro ciclo.

Lo stampo riveste un ruolo fondamentale nel processo dello stampaggio ad iniezione.

Figura 3.1 Fasi principali di un ciclo di stampaggio ad iniezione.



Uno stampo per le materie plastiche è solitamente costituito da sette sistemi principali: sistema di guida, sistema di supporto, sistema per lo stampaggio, sistema di colata, sistema di raffreddamento, sistema di estrazione e sistema di ventilazione. Un ciclo completo per un processo di stampaggio a iniezione di materie plastiche è costituito dalle seguenti fasi: riempimento (fase di filling), nella quale la cavità viene riempita con il fluido polimerico viscoso; impacchettamento (fase di packing), nella quale il fluido viene mantenuto in pressione all'interno dello stampo per compensare il ritiro dovuto all'inizio della solidificazione del materiale; raffreddamento (fase di cooling), nella quale il pezzo viene fatto raffreddare per un certo intervallo di tempo a stampo chiuso; fase di apertura dello stampo. Tra queste fasi il tempo di raffreddamento è il più alto e, in proporzione, si aggira intorno al 70-80% del ciclo. Pertanto, la progettazione del sistema di raffreddamento è fondamentale, dato che influisce direttamente sulla durata del ciclo, sull'efficienza di produzione e sui costi. Le fasi appena introdotte di filling, di packing e di cooling sono di fondamentale importanza per la corretta riuscita del processo di stampaggio. Nei prossimi paragrafi ciascuna delle tre fasi verrà studiata nel dettaglio, introducendo i parametri fondamentali che le caratterizzano.

3.2.2 - MACCHINARIO PER LO STAMPAGGIO

I componenti principali di una macchina per lo stampaggio ad iniezione sono: l'unità di alimentazione o tramoggia (feed unit); l'unità di iniezione (injection unit); lo stampo (mold), l'unità di serraggio dello stampo (clamping unit); che solitamente è un dispositivo a ginocchiera comandato da opportuni pistoni idraulici; l'unità di controllo del processo (control unit).

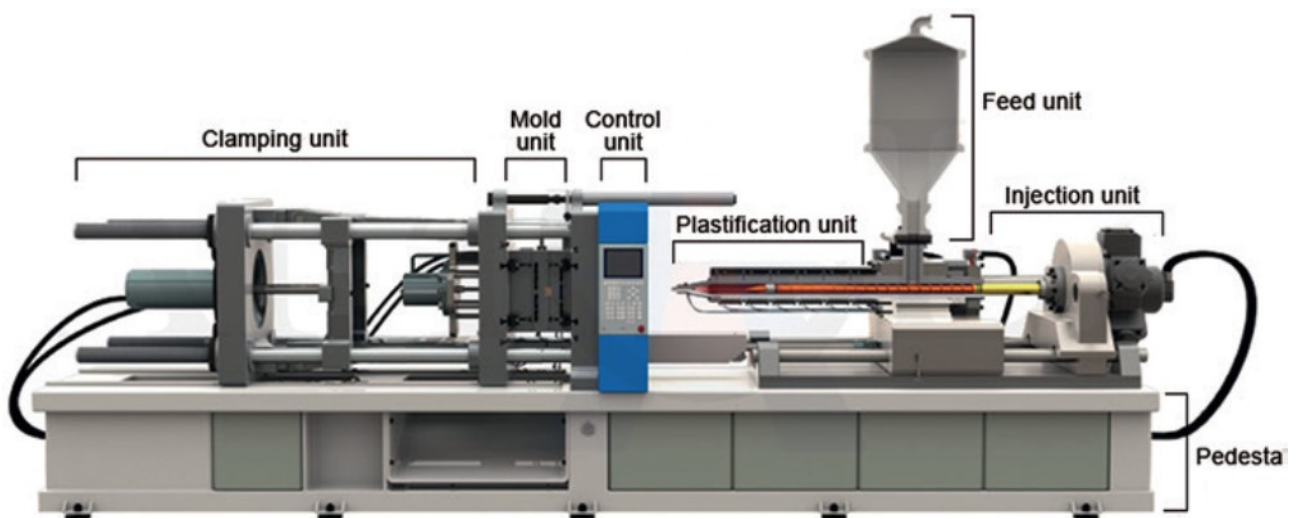


Figura 3.2 Macchinario per lo stampaggio ad iniezione.

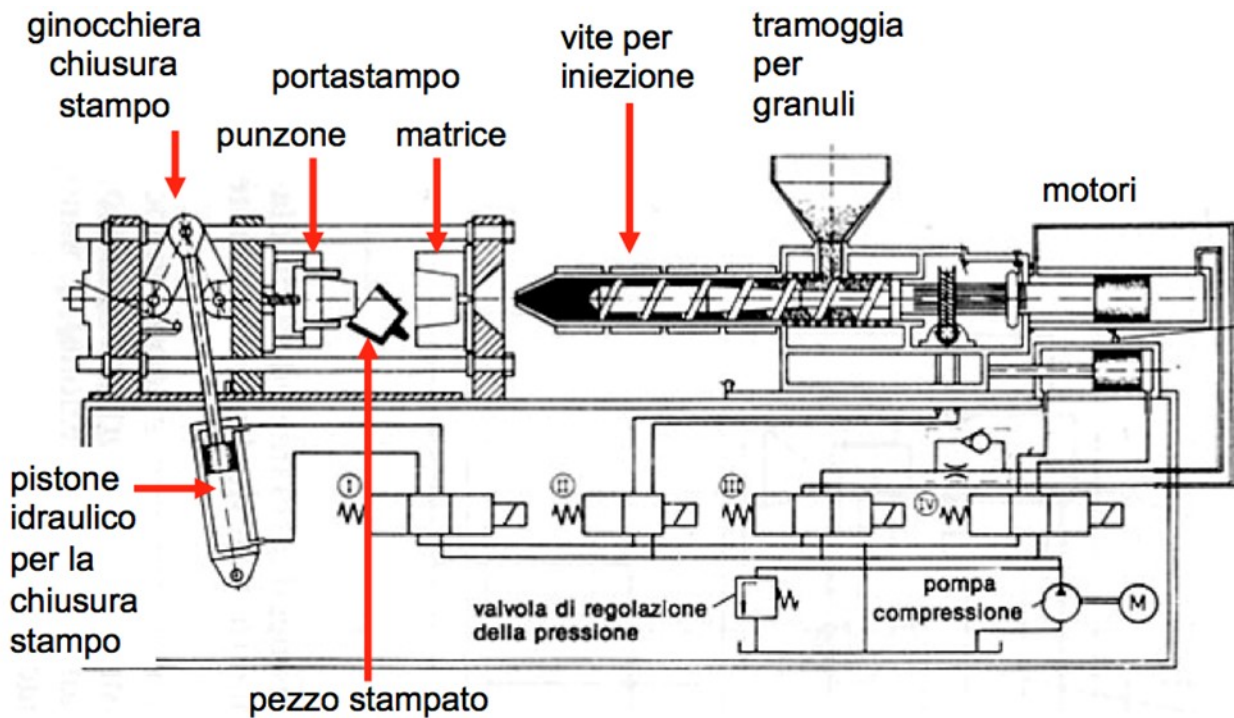


Figura 3.3 Particolari di una macchina per lo stampaggio.

L'unità di alimentazione deve consentire alla plastica di entrare nella vite senza problemi. Di solito, le materie plastiche vengono pre-lavorate essiccandole a una certa temperatura e per un certo tempo prima di essere inserite nella tramoggia.

L'unità di iniezione è sostanzialmente la vite, che può essere suddivisa in diverse zone: la metà più vicina alla tramoggia è detta sezione di alimentazione (feed), dove il materiale polimerico entra nello stato di granuli; la sezione successiva è quella di transizione (transition), nella quale i granuli iniziano, attraverso la somministrazione di calore, a passare allo stato di fluido polimerico; l'ultima sezione, quella più vicina all'ugello che comunica con lo stampo, è detta zona di dosaggio (metering), nella quale il fuso polimerico viene spinto nello stampo. Solitamente le dimensioni caratteristiche della vite sono standardizzate. Indicando con D il diametro esterno della vite, la lunghezza effettiva della vite, che indicheremo con L , sarà pari a $20-23 D$; la zona di alimentazione è pari a $0.5-0.55 L$, la zona di transizione è $0.25-0.3 L$ e la zona di dosaggio è $0.2 L$; il passo della vite è pari a $0.8-1 D$. È importante notare che il canale elicoidale che si forma tra la vite e le pareti del macchinario ha una sezione decrescente andando dalla tramoggia verso l'ugello, questo permette di aumentare l'attrito e scaldare maggiormente il materiale per portarlo ad uno stato di fluido polimerico completamente fuso nel momento di accesso allo stampo. La vite sposta la

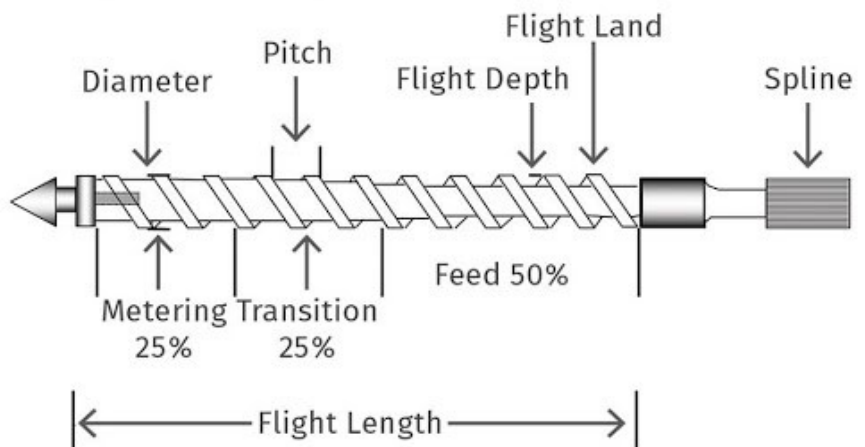


Figura 3.4 Schema di una vite di iniezione (injection screw).

plastica solida verso l'ugello attraverso una rotazione costante, durante la quale la plastica passa dallo stato solido a quello di fuso polimerico e si accumula davanti la vite pronta per essere iniettata. Il processo di iniezione include le fasi di filling e packing e i tipi di sistemi di guida utilizzati sono principalmente idraulici, servomotori elettrici e ibridi idraulico-elettrici.

Il fuso entra nella cavità dello stampo dagli ugelli e passa attraverso la materozza ed opportuni canali. Nello stampo sono presenti anche dei fori per lo sfogo dell'aria e per favorire il raffreddamento del componente prima di effettuare la successiva estrazione dallo stampo.

L'apertura e la chiusura dello stampo nel ciclo di stampaggio sono controllate da un dispositivo di chiusura dello stampo, che rappresenta anche una specifica dei macchinari per lo stampaggio ad iniezione; infatti, queste macchine possono essere caratterizzate in base alla forza di serraggio massima (nell'ordine delle tonnellate) che possono esercitare.

I parametri fondamentali del ciclo di stampaggio vengono inseriti nel macchinario tramite un'unità di controllo che definisce tutte le azioni che la macchina dovrà svolgere, ad esempio, il tempo per di apertura e chiusura dello stampo, la forza di serraggio dello stampo, la velocità di iniezione della vite, la pressione nella fase di packing, ecc.

3.2.3 - PRINCIPALI DIFETTI DEI PRODOTTI STAMPATI

Analizziamo brevemente alcuni dei principali difetti che potrebbero verificarsi in materiali ottenuti per stampaggio ad iniezione, in modo da comprendere quali sono le criticità del processo che portano alla formazione dei suddetti.

Il fenomeno chiamato "short shot" genera un aspetto ed una forma indesiderati del prodotto plastico finale ed è causato dal riempimento insufficiente della cavità dello stampo. È più evidente nelle zone più sottili ed è principalmente causato da un materiale plastico eccessivamente viscoso nello stato di fuso polimerico, cosa che porta lo stato liquido ad arrestarsi prematuramente durante il processo di riempimento, oppure da una quantità insufficiente di plastica iniettata.

Dopo lo stampaggio ad iniezione è estremamente comune il fenomeno che porta alla deformazione (warp) del pezzo. Questa deformazione è essenzialmente dovuta ai fenomeni di dilatazione e contrazione termica presenti, ovviamente, anche per i materiali plastici. La plastica fusa inizia a raffreddarsi e solidificarsi quando entra nella cavità dello stampo e si contrae durante il processo di raffreddamento e solidificazione. Se il tasso di contrazione è distribuito uniformemente in tutto il prodotto, la deformazione, in teoria, non è visibile e si ha solo un restringimento (fenomeno del ritiro). Tuttavia, con l'interazione tra i fattori esterni (ad esempio condizioni di stampaggio, progettazione del raffreddamento dello stampo, progettazione dell'aspetto del prodotto) e le caratteristiche della plastica (ad esempio catena molecolare e orientamento delle fibre), è molto difficile per le materie plastiche ottenere prodotti finiti con bassi tassi di contrazione o con contrazioni uniformi.

La bava (flash) viene generata in quanto esiste uno spazio sul piano di divisione dello stampo attraverso il quale può fuoriuscire la plastica fusa. Le cause principali di tale formazione sono:

1. la forza di serraggio dello stampo è troppo piccola: una forza di spinta viene applicata allo stampo dalla plastica fusa durante il processo di stampaggio a iniezione, se questa pressione è eccessiva può verificarsi l'apertura dello stampo;
2. fessura dello stampo: il fatto che il lato mobile e quello fisso dello stampo non siano in contatto può dipendere da: a) un piano di separazione difettoso e non parallelo tra ciascun lato, b) presenza di impurità sul piano di separazione che crea spazi vuoti;
3. Condizioni di stampaggio inadeguate: selezione errata della macchina di stampaggio, temperatura eccessiva della plastica fusa, pressione di iniezione eccessiva;
4. Sistema di ventilazione inadeguato: sfiato insufficiente e solco di ventilazione troppo profondo.

La formazione di segni di affondamento (sink mark) e vuoti (voids) è un fenomeno osservato nelle aree spesse dove non viene fornita abbastanza plastica durante il processo di raffreddamento. I segni di affondamento vengono generati quando la plastica, a contatto con le pareti dello stampo, si raffredda e solidifica prima che la plastica interna inizi a raffreddarsi e quindi la superficie viene tirata

verso l'interno per contrazione. Se la resistenza della superficie è sufficiente, vengono generati dei vuoti invece dei segni di affondamento.

Gli intrappolamenti d'aria (air trap) sono dovuti ad una condizione in cui il fronte di solidificazione della plastica fusa intrappola aria all'interno della cavità dello stampo, impedendo a questa di fuoriuscire dai fori di sfiato o dallo spazio della linea di chiusura dello stampo. In generale, l'intrappolamento d'aria si verifica principalmente nell'area riempita alla fine, dove non c'è nessun foro di ventilazione o i fori di ventilazione sono troppo piccoli, e in questo modo si generano vuoti, bolle, short shot, o difetti superficiali all'interno della parte in plastica.

Le bruciature (burn mark) sono causate principalmente dall'aria intrappolata all'interno della cavità dello stampo che viene surriscaldata dalla compressione e crea segni scuri sulla superficie in plastica. Quando l'aria dentro la cavità dello stampo viene compressa, la pressione e la temperatura aumentano così rapidamente che la superficie della parte in plastica viene decomposta e vengono generati i segni di bruciatura.

I segni di flusso (flow mark) vengono generati principalmente se la temperatura della plastica fusa non è distribuita uniformemente o la plastica fusa ha una viscosità eccessiva. Una temperatura troppo bassa provoca attrito tra la plastica e la cavità dello stampo e causa un indurimento precoce della plastica, lasciando i segni del flusso.

Se lo spessore di una parte in plastica varia molto, la velocità di raffreddamento in un'area più sottile differisce notevolmente da quello di altre aree. Quindi, la plastica fusa non raffreddata applicherà uno sforzo sulla plastica già raffreddata, generando un segno di sforzo (stress mark) a causa dello sforzo interno.

Se ci sono due o più fronti di flusso plastico che si uniscono durante il processo di iniezione può verificarsi una fusione incompleta poiché il fronte di fusione è ad una temperatura inferiore e solidifica prima. Quindi, vengono generate delle linee di giunzione (weld line), che possono unirsi tra loro con specifici angoli di giunzione. Per evitare la generazione di queste linee bisogna avere particolare cura del flusso della plastica fusa quando si hanno condizioni quali cambiamenti significativi di spessore o canali di colata multipli nello stampo.

3.2.4 - PROPRIETA' DEI POLIMERI IMPORTANTI NELLO STAMPAGGIO

Come già anticipato, la materia prima utilizzata per lo stampaggio a iniezione non è altro che un materiale polimerico in polvere o in granuli, che viene riscaldato e fuso durante il processo di stampaggio, e riceve una determinata forma prima di raffreddarsi per diventare di nuovo solido. Pertanto, è di fondamentale importanza conoscere le proprietà reologiche, termiche, termodinamiche, cinetiche, chimiche e meccaniche di questi materiali, al fine di ottenere le caratteristiche applicative desiderate, i parametri di stampaggio e la qualità richiesta del prodotto. Di seguito verranno analizzate alcune le principali proprietà reologiche e termiche dei materiali polimerici che possono influenzare il processo di stampaggio.

Iniziamo prendendo in considerazione un aspetto chiave per il processo di stampaggio, vale a dire il comportamento di scorrimento e la viscosità dei polimeri, che rientrano nel cosiddetto campo della reologia. Il motivo per cui il comportamento reologico di un fluido polimerico è diverso da quello di altre molecole semplici è da individuare nel fatto che i polimeri sono essenzialmente delle macromolecole, ovvero molecole a catena lunga, a volte con struttura ramificata, il cui peso molecolare è spesso compreso tra 10⁵ e 10⁸ g/mol. Il comportamento reologico dei polimeri gioca un ruolo importante nello stampaggio a iniezione. Quando il materiale polimerico è sciolto, viene iniettato nella cavità dello stampo; le modalità e la velocità con cui lo stampo viene riempito dipendono proprio dalle caratteristiche reologiche del fuso polimerico, ed in base a queste possono essere ricavate: la resistenza allo scorrimento, la pressione di iniezione necessaria per iniettare la plastica fusa attraverso canali di colata e guide, la temperatura ottimale dello stampo, la posizione del canale di colata per evitare la formazione di linee di giunzione, ecc.

Consideriamo un fluido incomprimibile che si trova nello spazio tra due piastre parallele e supponiamo che le aree della piastra superiore e di quella inferiore siano entrambe A e che le due

piastre mantengono una piccola distanza Y tra loro. Applicando una forza esterna F sulla piastra in alto, la piastra superiore può muoversi a velocità costante V , mentre la piastra inferiore rimane ferma. Tale flusso è detto flusso di taglio semplice. Attraverso diverse prove è stato osservato che quando si raggiunge uno stato stazionario, il rapporto (F / A) è proporzionale al rapporto (V / Y) , dove il la costante proporzionale η denota la viscosità del fluido. Il rapporto (F / A) è chiamato sforzo di taglio (shear stress) ed è indicato con τ_{xy} ; il rapporto (V / Y) è chiamato velocità di taglio (shear rate) ed è indicato con $\dot{\gamma}$. Valgono, dunque, le seguenti relazioni: $(F / A) = \eta (V / Y)$, ovvero $\tau_{xy} = \eta \dot{\gamma}$. La velocità di taglio indica la differenza di velocità di ogni punto nel campo di flusso e, di conseguenza, esprime il gradiente di velocità in un flusso.

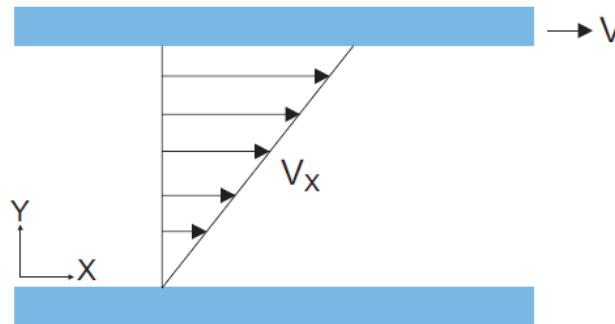


Figura 3.5 Flusso generico attraverso due piastre parallele.

Per un fluido newtoniano la viscosità dipende dalla composizione chimica del fluido, dalla temperatura e dalla pressione. Pertanto, il comportamento di questi fluidi è il risultato della collisione e dell'attrito tra più particelle sferiche durante il flusso, che conferiscono a tali fluidi una certa viscosità a temperatura costante. La resistenza allo scorrimento (viscosità) di un polimero dipende dall'orientamento e dalla conformazione delle catene molecolari. Per un polimero a basso peso molecolare, la viscosità è inferiore in quanto le sue molecole sono più corte, mentre un polimero con molecole più lunghe ha una maggiore resistenza al flusso a causa del groviglio tra le catene molecolari. Pertanto, la viscosità aumenta linearmente all'aumentare del peso molecolare e, se il peso molecolare è maggiore di un valore critico, a causa dell'effetto degli entanglements (intrecci molecolari), la viscosità aumenta più velocemente all'aumentare del peso molecolare. Per i fluidi polimerici, la viscosità mostra solitamente proprietà dipendenti dalla velocità di taglio (shear rate); per la precisione, la viscosità diminuisce con l'aumento della velocità di taglio. Fluidi di questo tipo sono detti fluidificanti (fluido pseudoplastico).

La viscosità dei fluidi polimerici non è solo sensibile alla variazione della velocità di taglio, ma è anche inversamente proporzionale alla temperatura. La diminuzione della viscosità del fluido è spesso ottenuta aumentando le temperature caratteristiche del processo, ad esempio utilizzando una più alta temperatura per la plastica fusa e per gli stampi. Tuttavia, è opportuno evitare di superare il range di temperatura di lavorazione di un determinato polimero.

Sebbene la pressione possa influenzare la viscosità dei fluidi polimerici, non è sufficientemente elevata in un comune processo di riempimento di stampaggio a iniezione per modificare la viscosità del fluido. Tuttavia, per lo stampaggio a iniezione ad alta velocità di parti a parete sottile che utilizza pressioni superiori a 100 MPa, l'influenza della pressione sulla viscosità del fluido comincia ad essere evidente.

Analizziamo ora le proprietà termiche. Durante il processo di stampaggio, il materiale viene riscaldato fino ad essere fuso e poi raffreddato, solidificandosi nuovamente. La distribuzione della temperatura dipende dai fenomeni di conduzione e convezione termica durante il processo di stampaggio. Nel processo di stampaggio a iniezione, la temperatura alla quale il fluido polimerico viene iniettato nello stampo dovrebbe essere superiore alla temperatura di fusione (T_m) del polimero stesso, in modo che il materiale può essere opportunamente iniettato nella cavità dello stampo ed evitare di solidificare prematuramente; mentre prima dell'espulsione, il materiale deve essere

raffreddato fino a quando la sua temperatura non diventa inferiore a quella di transizione vetrosa (T_g), in modo da garantire la solidificazione del materiale. È evidente che la conducibilità termica (k) e la capacità termica specifica (CP) svolgono un ruolo importante nello stampaggio a iniezione. Infatti, quando il materiale entra nello stampo, comincia a scambiare calore con questo e a raffreddarsi, e conducibilità termica e capacità termica specifica sono appunto le caratteristiche del materiale che determinano la facilità con cui questo può essere raffreddato.

3.2.5 - DESIGN DEL PEZZO E DELLO STAMPO

Eventuali difetti nel prodotto stampato possono essere causati non solo dalle caratteristiche elencate finora, ma anche dalla geometria del componente da realizzare e, quindi, dalla forma dello stampo. In questo paragrafo vengono, dunque, analizzate, in linea generale, alcune geometrie e forme particolari che, se non adeguatamente controllate, possono portare alla formazione di difetti sul prodotto finito. Iniziamo prendendo in considerazione il design del pezzo da stampare. I polimeri sono, in generale, cattivi conduttori di calore. Prendendo come esempio una piastra, il tempo di raffreddamento è proporzionale al quadrato dello spessore del pezzo. Lo spessore della parete non solo determina l'efficienza di raffreddamento, ma influisce anche sul comportamento del fuso durante le fasi di filling e packing. Un esempio tipico è quello di una brusca variazione di spessore della parete di un componente: questa configurazione non possiede una regione di transizione per il ritiro durante lo stampaggio del polimero.

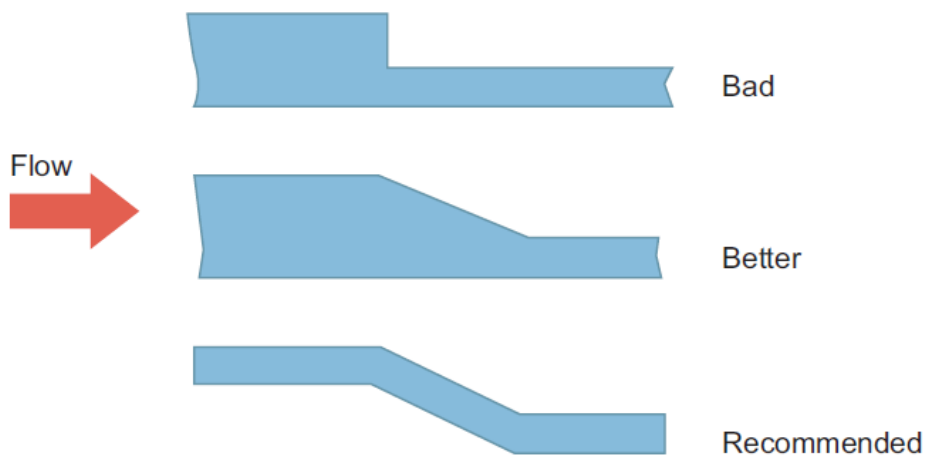


Figura 3.6 Miglior design da utilizzare con una variazione di spessore.

Se in un componente è inevitabile l'utilizzo di una brusca variazione di spessore, è consigliabile, da un punto di vista progettuale, trovare delle soluzioni per avere una variazione meno brusca, fino anche a cercare di mantenere lo spessore uniforme. Per un progetto ottimale, i punti iniziali e finali della variazione di spessore devono essere arrotondati, perché per le materie plastiche durante lo stampaggio potrebbe accumularsi una maggiore sollecitazione negli angoli acuti. Sebbene la miglior regola da utilizzare nella progettazione delle parti richieda uno spessore della parete uniforme, nella pratica questa condizione è difficile da soddisfare, poiché bisogna tener conto anche di requisiti come l'estetica, la resistenza, l'assemblaggio, il costo, ecc.

Nello stampaggio a iniezione, la lunghezza di flusso della plastica è correlata alla sua fluidità e al design dello spessore della parete. Un buon design consente alla plastica fusa di fluire senza problemi dal punto di accesso fino alla fine della parte. La facilità di scorrimento del flusso del fuso è correlata alla resistenza incontrata lungo il percorso. Poiché lo spessore della parte e la lunghezza di flusso influiscono sulla fluidità, solitamente si considera il rapporto tra la lunghezza di flusso L e lo spessore della parete t (flow length/wall thickness ratio), ovvero L/t , per verificare l'adeguatezza del design utilizzato.

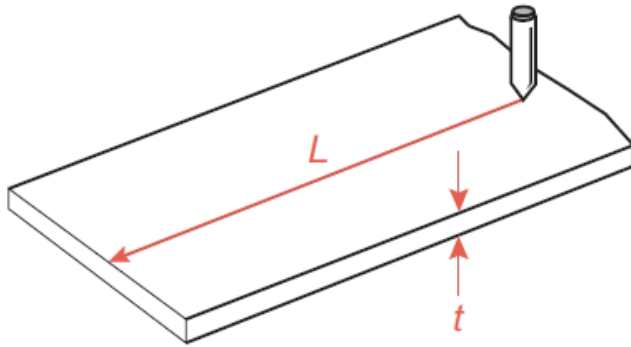


Figura 3.7 Rapporto tra la lunghezza di flusso (L) e lo spessore della parete (t).

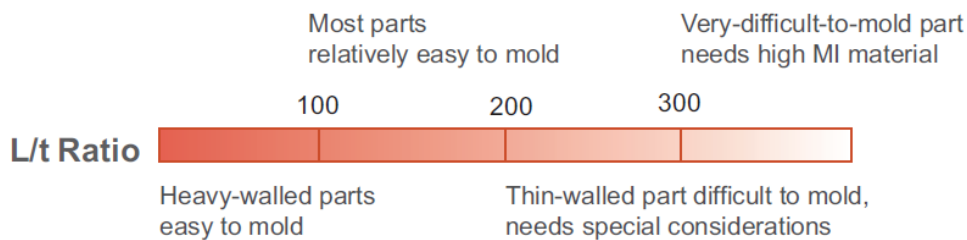


Figura 3.8 Difficoltà di stampaggio in relazione al rapporto L/t.

Il rapporto tra lunghezza di flusso e lo spessore della parete può aiutare a prevedere la difficoltà di stampaggio. Se il rapporto è inferiore a 100, riempire tali disegni è molto facile per il fuso. Nella maggior parte dei casi, il rapporto assume un valore compreso tra 100 e 200, con la possibilità di superare 200 nel caso di pareti molto sottili; in quest'ultimo caso, il progetto dovrebbe essere riconsiderato e modificato per evitare il verificarsi di short shots o di altri difetti. Se il rapporto supera il valore 300, il design è molto difficile da riempire e richiede una plastica con un'ottima scorrevolezza, oppure macchine per lo stampaggio a iniezione ad alta velocità. Pertanto, una buona progettazione iniziale del prodotto, non solo può ridurre le difficoltà di stampaggio, ma anche i costi di produzione.

Nella progettazione del prodotto sono importanti anche i raggi, i raccordi e gli angoli di smusso. Da un punto di vista meccanico, è noto che minore è il raggio di raccordo e maggiore sarà la concentrazione degli sforzi in quella zona. Attraverso opportune analisi CAE, è possibile rappresentare la situazione del ritiro volumetrico e concentrazione degli sforzi durante il processo di stampaggio (gli aspetti legati alle simulazioni CAE verranno sviluppati nel capitolo successivo).

Per le nervature, il difetto di stampaggio più comune è il segno di affondamento sul retro di una nervatura. Ciò accade perché la dissipazione del calore nella costola, che è relativamente più spessa, è più lenta e quindi il ritiro è ancora in corso quando il ritiro nelle aree con pareti sottili è già avvenuto. È necessaria un'attenzione particolare riguardo alle dimensioni di una nervatura per evitare il verificarsi dei segni di affondamento. In generale, si raccomanda: che lo spessore di una nervatura sia inferiore a metà di quella della parete, che la nervatura abbia un angolo di sforno di almeno $0,5^\circ$ e che nella parte inferiore di una nervatura si abbia un raggio di raccordo pari almeno a 0,125 volte lo spessore della parete.

Una volta progettato il design di un componente o di uno stampo, è fondamentale andarne a studiare anche la producibilità. In particolare, bisogna analizzare dettagliatamente le seguenti caratteristiche:

_ spessore della parete: lo spessore delle pareti con l'utilizzo di resine non rinforzate è compreso tra 0,5 e 5,0 mm, mentre quello con l'utilizzo delle resine rinforzate è di circa 0,7-3,0 mm. Lo spessore delle pareti, in generale, dovrebbe essere mantenuto uniforme il più possibile;

_ posizione della linea di divisione: la linea di divisione è dove la metà superiore e quella inferiore di uno stampo si chiudono tra loro. Di solito, dopo l'iniezione, in questa zona si verifica una bava sulla parte stampata. Le bave normalmente causano solo problemi estetici, ma alcune possono compromettere anche la funzionalità di un componente. Pertanto, l'ideale sarebbe avere la formazione delle bave all'interno della parte, dove non si hanno problemi estetici o funzionali;

_ evitare i sottosquadri: se gli stampi avessero sottosquadri, le parti in plastica resterebbero intrappolate all'interno degli stampi;

_ angolo di pescaggio: una volta che le parti in plastica sono state stampate, è necessario un certo angolo di sforno per permettere la sfornatura della parte senza problemi;

_ proprietà meccaniche.

L'utilizzo dell'analisi CAE in fase di progettazione è molto efficiente, poiché permette ai designer di identificare le zone in cui il ritiro è più severo e di concentrarsi su queste per migliorare il design del prodotto.

Passiamo ora a considerare il design dello stampo. Dopo aver ricevuto il disegno del progetto della parte, il progettista dello stampo deve innanzitutto verificare che le nervature e le borchie sono in linea con la direzione di apertura dello stampo e che i loro angoli di sforno siano sufficienti. La definizione della posizione della linea di divisione dipende molto dall'esperienza, ma la regola approssimativa è utilizzare il contorno della massima area di proiezione del prodotto, che risulta la scelta più adatta anche per il meccanismo di espulsione; un'altra considerazione è definirne la posizione senza influire sull'aspetto della parte e sulla comodità per la costruzione di stampi.

In uno stampo è fondamentale anche il design del gate di accesso che permette al fuso di accedere alla cavità. Poiché una piccola sezione trasversale del gate porta ad un'elevata pressione di iniezione, i gate dovrebbero essere situati in aree con pareti spesse per evitare enormi cadute di pressione. Altre considerazioni da fare sono le seguenti:

_ direzione del flusso: evitare che il fuso generi un orientamento molecolare che causa gravi deformazioni (warpage) al pezzo;

_ linea di saldatura: mantenere le lunghezze di flusso all'interno delle cavità dello stampo alla stessa distanza per ridurre intrappolamento d'aria e linee di saldatura del fuso;

_ riempimento: con posizioni adeguate, è possibile indurre più disturbi per diminuire la presenza di segni di getto e di flusso.

La posizione del gate determina le condizioni di packing di ciascuna area. L'area vicina al cancello ha un migliore riempimento e un minor ritiro, e viceversa. La progettazione della posizione del punto di iniezione dovrebbe anche evitare il verificarsi di linee di saldatura in punti strutturali più deboli.

In generale, le parti più grandi richiedono più gate. La qualità dell'aspetto è la priorità nella progettazione della posizione del gate, seguita dalla scorrevolezza del flusso.

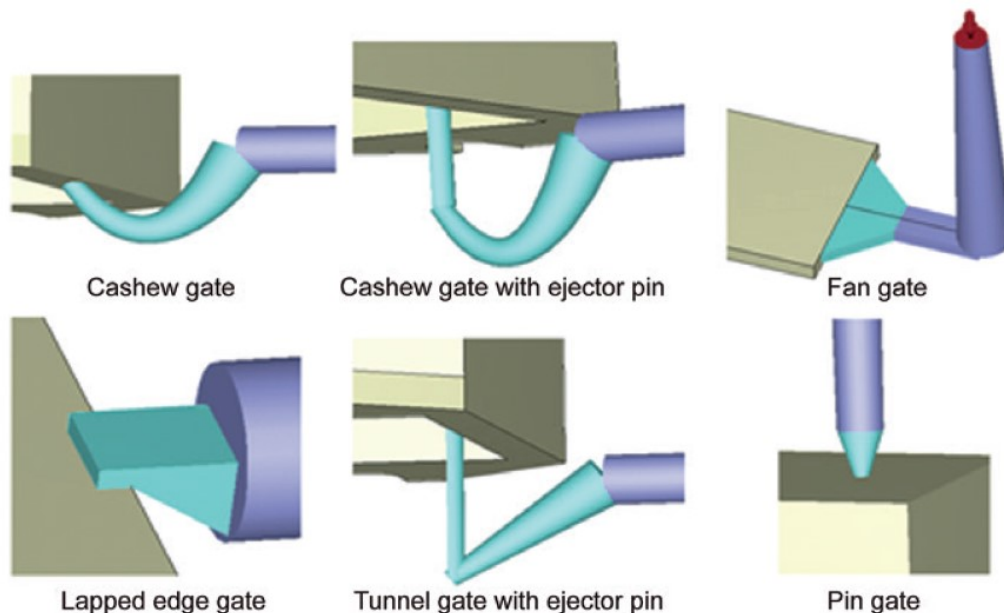


Figura 3.9 Varie tipologie di gate di accesso del fuso nella cavità dello stampo.

Esistono molti tipi di gate e il tipo da utilizzare è determinato dai requisiti dell'aspetto della parte, dal metodo di rimozione del gate, dalla geometria della parte, dalla producibilità degli stampi, dalle caratteristiche plastiche, ecc. Oltre alle posizioni e ai tipi, anche le dimensioni di un gate sono fondamentali nella progettazione, e queste sono determinate principalmente dalla velocità del riempimento e dell'impacchettamento, dalla velocità di taglio sopportabile dalla plastica stessa e dal metodo di rimozione del cancello.

Un sistema di iniezione include un canale di alimentazione, un canale di colata e un ugello. La funzione principale del canale di alimentazione è di distribuire la massa fusa in modo uniforme dall'ugello alla cavità, ed influisce direttamente sul percorso di riempimento, sul tempo di ciclo e, in definitiva, sulla qualità del prodotto. Quattro aspetti principali devono essere considerati nella progettazione del canale di alimentazione:

_ forma del canale: una certa sezione trasversale (circolare, parabolica o trapezoidale) può influire sulla perdita di pressione, sul costo di produzione dello stampo e sull'estrazione del pezzo dallo stampo;

_ dimensione del canale: determina la velocità del flusso del fuso e influisce sulla perdita di pressione e sul meccanismo di sformatura;

- numero della cavità dello stampo: si dovrebbe considerare l'equilibrio dell'allocazione geometrica in un sistema multi-cavità, oltre al volume contenibile da ogni stampo, alla produttività e al costo;

_ layout generale del canale: influisce sul bilanciamento del flusso, sulla sformatura e sul costo di produzione.

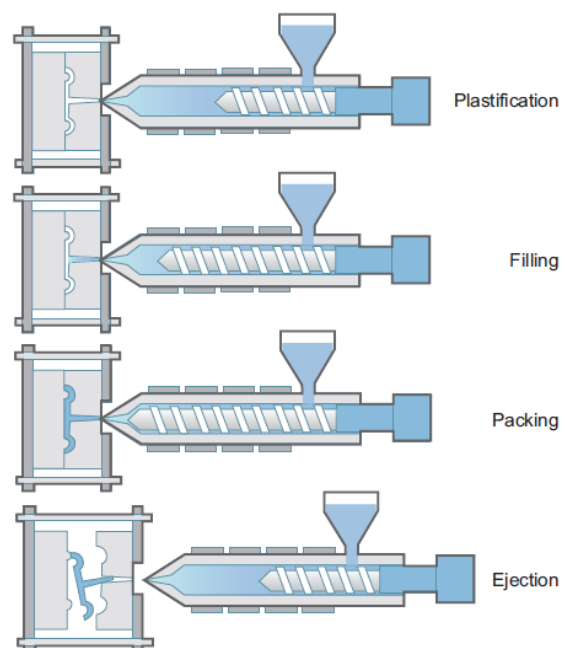
I canali di alimentazione, come detto, sono responsabili del trasporto del fuso dagli ugelli alle materozze. Poiché i materiali hanno caratteristiche viscosive diverse, le plastiche con una buona scorrevolezza possono essere utilizzate in stretti percorsi di flusso. Pertanto, le proprietà di scorrimento del materiale dovrebbero essere tenute in considerazione anche nella progettazione della dimensione del canale di alimentazione. Per un sistema a canale caldo (hot runner), il diametro comune del canale è compreso tra 8 e 20 mm a seconda del fornitore.

Altro aspetto da considerare è il design del canale di raffreddamento (cooling channel), il quale influisce sulla dissipazione del calore. Le configurazioni più utilizzate sono quelle di canali di raffreddamento in serie o in parallelo; il canale di raffreddamento dovrebbe essere diviso in più segmenti per poter raggiungere adeguatamente tutte le aree del pezzo. Oltre a una buona disposizione del canale di raffreddamento, è importante avere a disposizione una portata sufficiente del liquido di raffreddamento, in quanto la turbolenza può portare via il calore da tre a cinque volte più velocemente rispetto ad un flusso laminare costante. Di solito consiglia un numero di Reynolds maggiore di 6000 per mantenere la turbolenza del liquido di raffreddamento.

3.3 - CICLO DI STAMPAGGIO

In questo paragrafo verranno analizzate le fasi principali di un ciclo di stampaggio ad iniezione, ovvero le fasi di plastification, filling, packing e cooling. Per ciascuna di queste verranno evidenziati i parametri fondamentali per il controllo e la corretta riuscita dell'intero ciclo. Oltre a queste tre fasi, verrà presa in considerazione anche la fase di warpage, che permette di evidenziare la deformazione del componente stampato una volta iniziato il raffreddamento.

Figura 3.10 Fasi fondamentali di un ciclo di stampaggio ad iniezione.



3.3.1 - PLASTICIZING STAGE

La fase di plastificazione (plasticizing stage) del polimero viene eseguita all'interno del cilindro (o canna) del macchinario per lo stampaggio. Per mantenere la plastica in una certa condizione di densità all'interno della canna, si deve applicare una contropressione all'estremità posteriore della vite per trattenere il fuso fino a quando la sua pressione non raggiunge un valore superiore a quello della contropressione; così facendo il fuso raggiunge una pressione sufficiente a spingere indietro la vite e si ottiene una corsa di dosaggio accurata. Durante il ciclo di stampaggio ad iniezione, all'interno della canna, la plastica non ha un livello di fusione uniforme in tutti i punti, in quanto temperatura, pressione e densità del fuso polimerico non sono costanti, ma variano entro certi intervalli. I parametri fondamentali da controllare nella fase di plasticizing sono: la temperatura dell'ugello del cilindro, la contropressione, la velocità (rpm) della vite e la corsa di dosaggio.

Per trasformare un materiale plastico in granuli in un fluido polimerico viscoso è richiesta una temperatura minima opportuna; per questo motivo la temperatura dell'ugello e del cilindro sono parametri chiave di questa fase dello stampaggio. Grazie a delle resistenze impostate a temperature opportune e posizionate lungo il cilindro, la temperatura del fuso aumenta man mano che ci si avvicina all'ugello. In generale, la scelta delle temperature di lavorazione ottimale viene fatta in base alla viscosità del fuso. Dato che i materiali con una viscosità maggiore hanno una scorrevolezza ridotta, per i polimeri più viscosi andrebbero evitati dei gradienti termici troppo elevati lungo il cilindro, per evitare una grande disuniformità del materiale plastico causato da grandi differenze di stato tra i passi della vite. Invece, una variazione di temperatura maggiore è accettabile per i polimeri a bassa viscosità (figura 3.11).

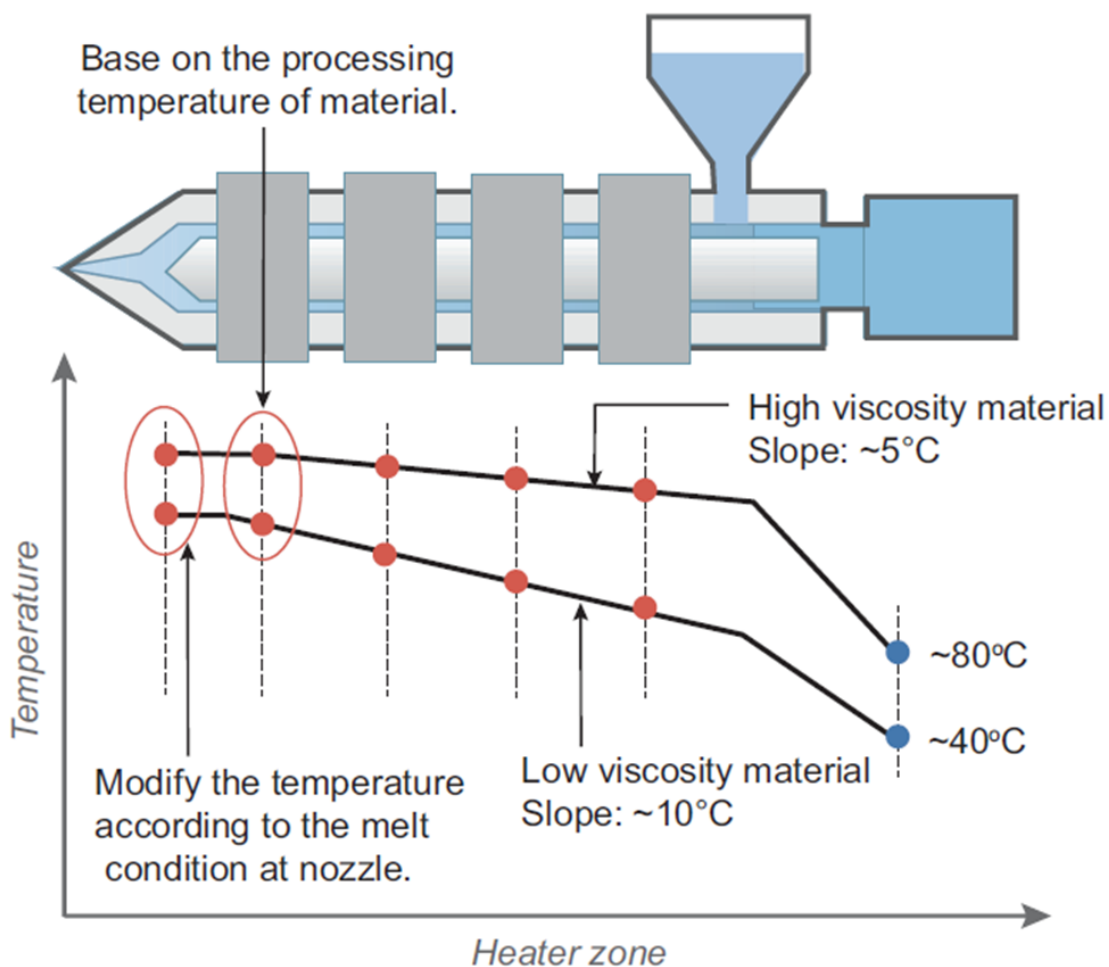


Figura 3.11 Impostazioni raccomandate di temperatura nel sistema di plastificazione.

Oltre alla temperatura del cilindro, la qualità della plastificazione dipende, come detto, anche da: contropressione, velocità della vite e corsa di dosaggio. Se la contropressione è troppo bassa, l'alimentazione sarebbe imprecisa e molta aria verrebbe catturata; viceversa, se la contropressione è troppo alta, la velocità di taglio sarebbe elevata, generando maggiore resistenza alla rotazione della vite. All'aumentare della contropressione, aumenta anche il tempo di contatto tra il materiale plastico e la vite, cosa che comporta un incremento del tempo di alimentazione.

Il numero di giri della vite può essere impostato nell'ordine di velocità alta, media e bassa al variare della corsa di avanzamento della vite, come mostrato nella figura 3.12.

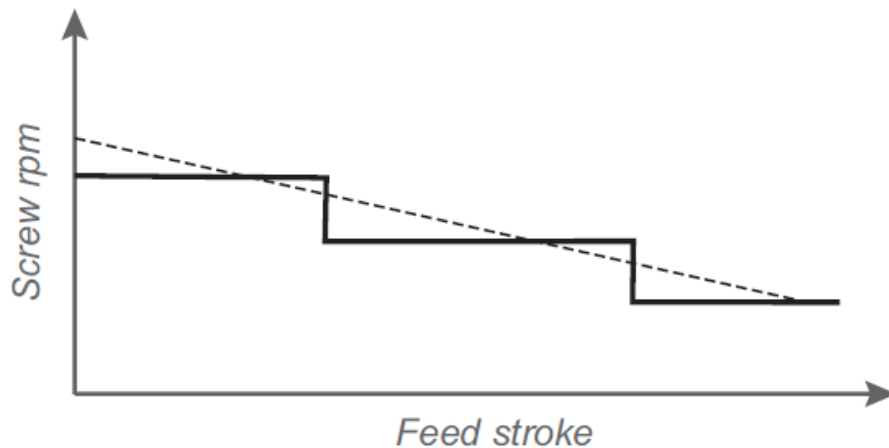


Figura 3.12 Diverse regolazioni della velocità della vite (screw rpm) al variare della corsa di alimentazione (feed stroke).

Una bassa velocità porta ad un migliore effetto di mescolamento e ad una minore velocità di taglio e può abbreviare il tempo di permanenza del materiale plastico nel cilindro. Tuttavia, il tempo di dosaggio aumenta man mano che la velocità si riduce, il che ha un effetto negativo sulla produttività del ciclo. Normalmente la corsa di alimentazione è impostata da 2 a 3 volte il diametro della vite; se la corsa è troppo breve (o il diametro della vite è troppo grande), la precisione dello stampaggio è più difficile da controllare; se la corsa è troppo lunga, lo sfiato diventa difficile poiché più aria è intrappolata all'interno del cilindro.

3.3.2 - FILLING STAGE E PACKING STAGE

Nella fase di riempimento (filling stage) la massa fusa viene notevolmente compressa grazie all'effetto congiunto di un ugello con una sezione che si restringe gradualmente e della velocità di iniezione stabilita. Teoricamente, la fase di filling deve consentire di riempire circa il 95-98% (nella simulazione viene di solito impostato il 98%) della cavità dello stampo. Le caratteristiche fondamentali che vanno analizzate in questa fase sono: la pressione di iniezione, il "V/P switch", la temperatura di iniezione del fuso e la temperatura dello stampo.

La pressione di iniezione denota la pressione applicata alla massa fusa dalla vite di iniezione. Per una macchina a iniezione normalmente viene registrata la lettura della pressione applicata dalla pressa e non quella effettivamente esercitata sul fuso iniettato. La pressione di iniezione della massa fusa è proporzionale al quadrato del rapporto del diametro del cilindro idraulico rispetto al diametro della vite, e tale rapporto è definito come il rapporto di intensificazione, che è utilizzato per calcolare la pressione di iniezione del fuso. Il rapporto tipico di macchine di piccole e medie dimensioni è di circa 10, mentre la pressione massima in uscita di un cilindro idraulico di specifiche generali è di 140 kg / cm² (2000 psi). Con diversi diametri delle viti sono disponibili diversi rapporti di intensificazione,

ovvero maggiore è il diametro della vite, minore è la pressione. Il tempo di riempimento ha un'influenza fondamentale sulla qualità dello stampaggio.

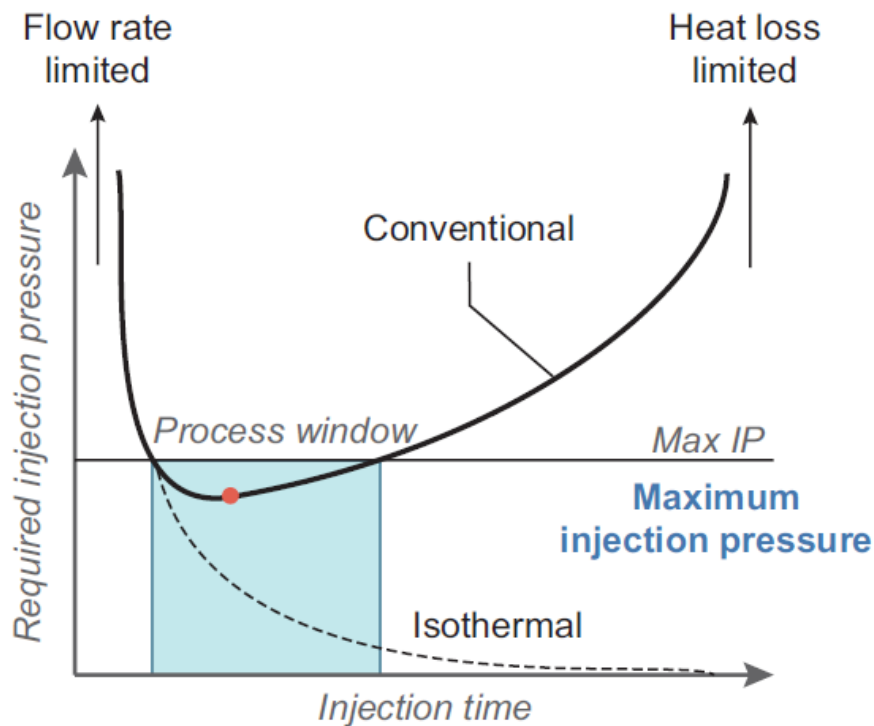


Figura 3.13 Curva teorica della pressione di iniezione richiesta al variare del tempo di iniezione.

I vantaggi di un breve tempo di riempimento sono un breve tempo di ciclo e piccole differenze di temperatura tra le parti del prodotto finito. Lo svantaggio è che la pressione di iniezione aumenta rapidamente a causa dell'elevata velocità di iniezione, e inoltre, una temperatura elevata sarebbe generata dall'attrito causando maggiori differenze di temperatura tra ciascuna zona. Un tempo di riempimento più lungo ha il vantaggio che le catene e le fibre molecolari hanno una velocità di taglio inferiore e lo sforzo interno indotto è minore. Lo svantaggio è che una velocità di iniezione troppo bassa porta a una pressione più alta e si ha anche una minore fluidità a causa del materiale che comincia a raffreddarsi.

La fase di riempimento in un processo di stampaggio a iniezione, come detto, rappresenta il processo di spinta del fuso nella cavità dello stampo con una pressione esterna. La pressione indotta nel processo spinge il fronte di fusione in avanti fino a riempire la cavità dello stampo. La fonte di pressione all'interno della cavità proviene dal gate di accesso allo stampo, che è il punto con la pressione più alta dell'intero sistema. All'aumentare della distanza dal gate, la pressione diminuisce gradualmente a causa dell'attrito del fluido. Il fronte di fusione ha la pressione più bassa. La differenza di pressione all'interno della massa fusa è la forza principale che spinge il fuso ad avanzare. La pressione di iniezione viene esercitata dall'azionamento della vite che si sposta in avanti secondo un profilo di velocità di iniezione della macchina configurato (solitamente si adotta un profilo di velocità a "gradino"). Nella fase di riempimento viene controllata la velocità di iniezione, mentre la regolazione della pressione funge da meccanismo di protezione per il macchinario e lo stampo. Come mostrato nella figura 3.14, la velocità di iniezione (lato destro del grafico) è configurata più volte per il processo di iniezione e come valore di risposta viene generata la pressione di riempimento in base alla velocità di iniezione. Una volta che si arriva al VP switch, si entra nella fase di impacchettamento (lato sinistro del grafico), dove la velocità diminuisce e la pressione aumenta (si passa da un controllo della velocità ad un controllo della pressione). Poiché la cavità dello stampo è stata riempita, la velocità della vite si riduce ad un valore molto basso che continua a comprimere ed a spingere il fuso nella cavità dello stampo con un'alta pressione, in modo

da compensare il ritiro volumetrico derivante dal raffreddamento durante il processo di stampaggio aumentando la densità del materiale.

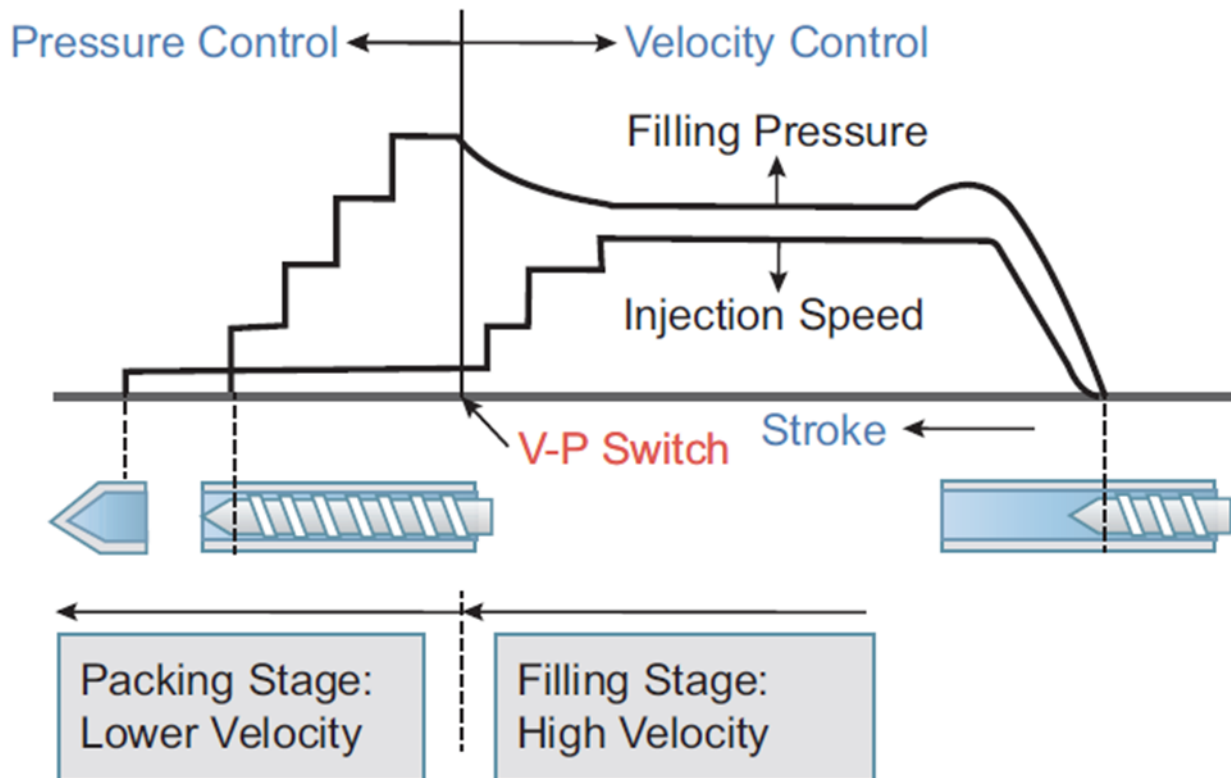


Figura 3.14 Controllo della velocità e della pressione durante il processo di stampaggio ad iniezione.

Teoricamente, nel processo di riempimento, la condizione ideale sarebbe quella di avere una velocità di avanzamento del fronte di fusione uniforme prima nel gate di accesso e nei canali di alimentazione e poi in ciascuna regione del pezzo per ottenere flusso omogeneo ed equilibrato. Tuttavia, poiché il flusso del fuso è determinato dalla differenza di pressione, dovrebbe esserci una pressione più alta in prossimità del gate ed una più bassa allo fine dello scorrimento. Questa condizione fa sì che ci sia più materiale plastico schiacciato nel volume vicino alle pareti interne prossime al gate di entrata, di conseguenza, la densità del materiale in quelle zone è maggiore, subendo successivamente un ritiro inferiore; invece, la densità della plastica fusa è minore nelle regioni lontane dal gate e, quindi, subirà un ritiro maggiore. Il processo di packing è, dunque, fondamentale perché fornisce una post-pressione al fuso che, oltre a compensare il fenomeno di ritiro del materiale indotto dal raffreddamento, permette di ridurre la differenza di pressione tra le varie aree all'interno della cavità dello stampo. Poiché anche la differenza di densità del fuso nelle varie aree sarà minore, il ritiro sarà in generale più uniforme.

In linea generale, la velocità e la pressione di iniezione dovrebbero essere le più alte possibili, per ottenere una fase di riempimento che sia più breve possibile ed evitare un rapido raffreddamento del fuso, cosa che porterebbe ad un aumento della resistenza del flusso. Sotto questo punto di vista risultano di fondamentale importanza anche la temperatura a cui portare il fuso durante l'iniezione e la temperatura dello stampo. Aumentando la temperatura di fusione del materiale e la temperatura dello stampo, si può ridurre la viscosità del fuso e, di conseguenza, anche la sua resistenza allo scorrimento, ottenendo un minore aumento della pressione interna.

Come già accennato, il V/P switch è il passaggio da un controllo della velocità nella fase di filling ad un controllo della pressione nella fase di packing. Dunque, il V/P rappresenta a tutti gli effetti il passaggio dalla fase di riempimento a quella di impacchettamento e viene eseguita definendo una

opportuna quota di commutazione, ovvero viene scelto un valore opportuno della corsa della vite a partire dal quale far avvenire lo switch. La corretta temporizzazione del V/P switch ha una relazione diretta con la qualità del pezzo (figura 3.15). Quando il VP switch avviene troppo presto, la pressione di iniezione scende improvvisamente e poi aumenta all'aumentare della percentuale di riempimento. In caso di un VP switch che avviene in un tempo adeguato, la curva della pressione di iniezione ha un andamento più progressivo. Se il VP switch avviene troppo tardi e la vite si muove ancora in avanti ad alta velocità mentre la cavità è completamente riempita, un'improvvisa compressione causa un brusco aumento della pressione interna nella cavità dello stampo. La programmazione del corretto tempo in cui far avvenire il VP switch può essere effettuata solo controllando opportunamente la velocità di iniezione e deve essere regolata anche in base alla percentuale di riempimento della cavità.

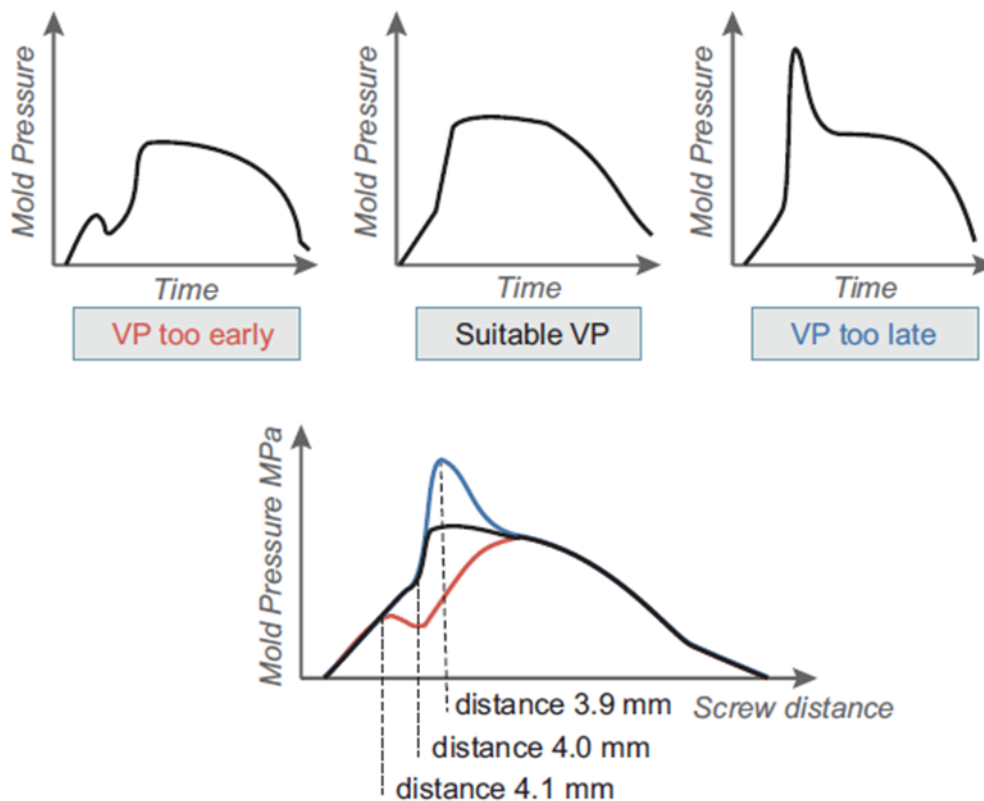


Figura 3.15 Corretta temporizzazione del V/P switch.

Nella fase di impacchettamento (packing stage) la cavità dello stampo è quasi totalmente riempita con il fuso. Viene applicata una post-pressione di riempimento per permettere alla massa fusa di continuare ad entrare nella cavità e compensare il restringimento termico dovuto al fuso già all'interno dello stampo e che scambia calore con questo. Un parametro di controllo molto importante in questa fase è il tempo di applicazione della post-pressione: l'impostazione del tempo di impacchettamento è correlata al tempo di solidificazione del gate di accesso alla cavità dello stampo. Lo scopo dell'impacchettamento è quello di compensare il fuso che non ha potuto riempire completamente la cavità dello stampo nella fase di riempimento. La prima fase del packing è impostata per soddisfare le specifiche per quanto riguarda la qualità della superficie del pezzo: una regola generale è quella di ottenere un componente senza alcun tipo di difetto superficiale o segno di affondamento. La seconda fase dell'impacchettamento, impostata ad una pressione inferiore, ha lo scopo di evitare che la massa fusa all'interno della cavità fuoriesca e anche di rilasciare gli sforzi generatisi nel materiale. Solitamente, il profilo della pressione di impacchettamento è impostato come nella figura 3.16.

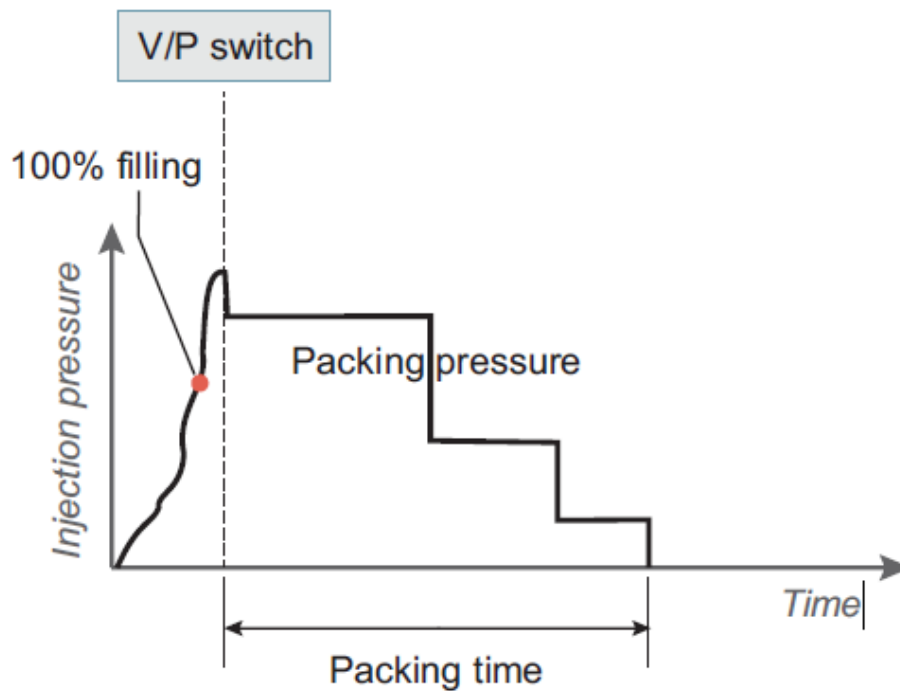


Figura 3.16 Pressione di iniezione nelle fasi di filling e packing.

3.3.3 - COOLING STAGE

Durante la fase di raffreddamento (cooling stage), la vite torna indietro per prepararsi per la plastificazione del ciclo successivo, mentre il fuso all'interno dello stampo continua a raffreddarsi finché la temperatura non è sufficientemente bassa per l'espulsione. Il componente in materiale plastico stampato si solidifica gradualmente durante il raffreddamento e diventa solido quando torna alla pressione atmosferica. La fase di raffreddamento termina quando la temperatura è sufficientemente bassa per l'espulsione.

In una macchina per stampaggio a iniezione, per la fase di cooling è possibile configurare solo il tempo di raffreddamento. Il controllo della temperatura dello stampo viene eseguito indirettamente da un regolatore esterno della temperatura dello stampo, impostando una certa temperatura del liquido di raffreddamento. Per asportare il calore, generato dal fuso, entro il tempo di raffreddamento di ciascun ciclo di stampaggio, è importante valutare se la portata del refrigerante è sufficiente a garantire una certa quantità di scambio termico entro un tempo prefissato. Anche il tipo di refrigerante influisce sull'effetto di raffreddamento. Teoricamente, un refrigerante con un calore specifico maggiore (ad es. acqua) porta via più calore; l'effetto di raffreddamento può anche essere rafforzato da una maggiore portata del refrigerante. Se la differenza di temperatura tra l'ingresso e l'uscita del liquido di raffreddamento è maggiore di 3 ° C, la distribuzione della temperatura all'interno dello stampo non è uniforme, con conseguente deformazione. Un'altra importante condizione di controllo della fase di raffreddamento è la temperatura dello stampo; questa non viene controllata direttamente, quanto piuttosto indirettamente da un regolatore di temperatura dello stampo, con un refrigerante che scorre attraverso lo stampo. Il concetto di base del controllo della temperatura dello stampo è quello di ottenere un riscaldamento ed un raffreddamento uniformi del sistema.

3.3.4 - WARPAGE STAGE

Una volta che la parte si è raffreddata abbastanza da formare uno spesso strato solido, in teoria non possono verificarsi danni durante l'operazione di espulsione. Tuttavia, poiché la temperatura del pezzo nello stampo è superiore alla temperatura ambiente, il materiale continua a raffreddarsi e a restringersi fino ad annullare la differenza di temperatura. Se il materiale viene espulso dallo stampo, non ci sono vincoli che si oppongono al suo ritiro e il componente potrebbe subire anche delle deformazioni tali da alterare la sua forma e la sua geometria. La deformazione è un problema critico per la qualità delle parti stampate a iniezione e si verifica quando c'è una distribuzione non uniforme del ritiro in tutto il pezzo. Vari fattori possono influenzare la deformazione di un pezzo stampato: geometria e design della parte, presenza di inserti, condizioni di processo (pressione e temperatura), proprietà del materiale e comportamento pressione-volume-temperatura (le curve PVT del polimero utilizzato per lo stampaggio sono ampiamente utilizzate per lo studio di questa fase).

Anche le caratteristiche di progettazione dello stampo sono molto importanti, in quanto la posizione del punto di iniezione influisce sull'effetto di compattazione della parte, e una distribuzione irregolare della pressione porterebbe a un ritiro non uniforme e alla comparsa delle deformazioni. Un buon design dei canali di raffreddamento permette di rimuovere efficacemente il calore dalla parte e di rendere omogenea anche la temperatura, andando a ridurre i fenomeni di deformazione.

Tra tutti i parametri del processo di stampaggio, la temperatura e la pressione sono quelle più importanti per influenzare la deformazione perché condizionano direttamente il ritiro del materiale (comportamento PVT). Durante le fasi di filling, packing e cooling, la temperatura e la pressione cambiano in continuazione nel tempo e sono diverse anche da punto a punto nella cavità dello stampo, di conseguenza anche la densità varia nel tempo e tra le diverse aree della parte, portando alla fine ad un ritiro non uniforme. Normalmente è possibile ottenere una riduzione del ritiro abbassando la temperatura del fuso, aumentando la pressione ed il tempo di packing, mentre la temperatura dello stampo e la velocità di iniezione hanno un effetto limitato sul ritiro. La velocità di iniezione influisce indirettamente sulla temperatura e sulla pressione. Normalmente la gamma dinamica della velocità di iniezione di una macchina per lo stampaggio non è ampia, così come la gamma di velocità di iniezione consentita per il pezzo. Pertanto, è possibile gestire la velocità di iniezione, la temperatura del fuso e la pressione entro un certo intervallo regolabile. Se la pressione di iniezione non può essere distribuita uniformemente nella parte, si verificherà una differenza significativa nel restringimento volumetrico nonostante l'applicazione una pressione elevata. Un'alta pressione di iniezione localizzata si trasforma facilmente in tensioni residue che deformano il pezzo. Per quanto riguarda la temperatura, il ritiro cresce all'aumentare della temperatura del fuso. Se la temperatura di fusione è troppo bassa, il gate solidificherà troppo presto rendendo inutile la fase di packing successiva al riempimento.

Come è stato fatto anche in questo studio, solitamente per lo studio della fase di warpage si utilizza un programma CAE che permette di valutare: il raffreddamento e la distribuzione della temperatura dello stampo, l'efficacia della fase di impacchettamento prima della solidificazione del gate, il ritiro dovuto alla geometria e alle differenze di spessore della parte, l'effetto dell'orientamento delle fibre (che possono indurre un comportamento anisotropo nel materiale) sulla deformazione e la previsione delle dimensioni e della forma finali del pezzo.

4 - SIMULAZIONE E CONFRONTO

In questo capitolo viene presentata la simulazione dello stampaggio ad iniezione di un componente reale realizzato dall'azienda Sabaplast. Inizialmente viene fatta una breve introduzione per evidenziare l'importanza dell'utilizzo di programmi di simulazione CAE, in seguito vengono analizzati i risultati della simulazione ed utilizzati per effettuare alcune considerazioni sulla fattibilità del pezzo.

4.1 - VANTAGGI DI UNA SIMULAZIONE CAE

La qualità di un prodotto stampato dipende fortemente, come visto nei capitoli precedenti, dalle proprietà del materiale plastico, dal design dello stampo e dalle condizioni di processo. Nello stampaggio a iniezione, dunque, un buon controllo del processo di stampaggio si traduce in una buona qualità del prodotto. Tuttavia, il processo stesso è una scatola nera: la regolazione di un singolo parametro di stampaggio può influenzare il pezzo finito in modi diversi a causa dell'accoppiamento non lineare con gli altri parametri del processo. Per i prodotti stampati, l'utilizzo delle simulazioni mira proprio a migliorare la riproducibilità e la qualità dei prodotti progettati. La simulazione dello stampaggio può essere eseguita utilizzando degli strumenti CAE ("computer-aided engineering", in italiano "ingegneria assistita da computer"), ovvero dei software a calcolo numerico che assistono nella diagnosi e nello sviluppo dei complicati processi di stampaggio a iniezione; questi strumenti permettono una rapida integrazione delle proprietà reologiche, termiche e meccaniche dei materiali, consentendo ai progettisti ed agli sviluppatori di eseguire analisi e diagnosi qualitative e quantitative per la progettazione di parti e stampi.

Nella pratica industriale dello stampaggio ad iniezione, le principali sfide da superare sono l'ottenimento di una buona qualità dei pezzi prodotti ed il controllo della stabilità del processo di stampaggio. Con un processo di stampaggio tradizionale, senza l'utilizzo di strumenti CAE, molti problemi, come ad esempio bruciature, linee di saldatura e deformazioni, non possono essere visti prima della prova di stampaggio o addirittura della produzione di massa. Utilizzando strumenti CAE in fase di progettazione, molti di questi problemi possono essere risolti in modo efficace, in quanto l'analisi dei risultati delle simulazioni possono essere utilizzati come linea guida per modificare il progetto del componente da stampare. Inoltre, effettuando una prova di stampaggio virtuale, è possibile verificare anche l'adeguatezza dei parametri di processo utilizzati ed eventualmente ottimizzarli per migliorare la qualità finale. Infine, l'analisi con software di tipo CAE permette di ottenere informazioni anche sulle tensioni residue dovute a stampaggio o sull'orientamento delle fibre del pezzo, consentendo una simulazione più precisa e realistica di queste proprietà del prodotto finito. Da un punto di vista tecnico, un software CAE è un'applicazione numerica per la ricerca della soluzione di un modello teorico che approssima un sistema fisico. Di conseguenza, la precisione e l'affidabilità delle analisi sono strettamente correlate al livello di emulazione del modello teorico, alla convergenza del metodo numerico utilizzato e al numero e tipologia di mesh utilizzate per l'analisi. In generale, in una simulazione di stampaggio per prima cosa si ha bisogno di conoscere i tre elementi principali del sistema di stampaggio, ovvero la geometria complessiva del sistema, il materiale utilizzato e le condizioni di lavorazione; queste informazioni vengono trasmesse tramite l'interfaccia utente al software numerico, il quale provvede all'utilizzo di un modello regolato da opportune equazioni che descrivono il comportamento del sistema. L'analisi della simulazione permette di ottenere informazioni riguardo: al riempimento della cavità, alle linee di saldatura, alla qualità del pezzo, ad eventuali intrappolamenti d'aria, alla forza di serraggio da applicare, al tempo di raffreddamento, all'efficienza del canale di raffreddamento, etc. Il software acquisisce i risultati dell'analisi del flusso e dell'analisi del raffreddamento; se i risultati ottenuti non soddisfano i criteri richiesti, il progetto deve essere modificato e l'analisi deve essere effettuata nuovamente fino alla risoluzione dei vari problemi. Oltre alla simulazione del processo di stampaggio, l'analisi con strumenti CAE permette di ottenere informazioni anche riguardo alla deformazione subita da un componente stampato dopo l'estrazione dallo stampo. L'analisi della deformazione rivela il livello e

l'andamento della deformazione, la causa della deformazione ed il valore della tensione residua sul pezzo.

4.2 - IMPOSTAZIONE E SVOLGIMENTO DELLA SIMULAZIONE

Per effettuare la simulazione dello stampaggio si è utilizzato il software CAE Moldex3D, uno strumento molto utilizzato anche in ambito industriale. Per prima cosa si è realizzato un modello CAD del componente e dello stampo partendo dalle specifiche tecniche del componente reale fornite dall'azienda Sabaplast. Particolare attenzione è stata posta nella realizzazione della geometria CAD del pezzo, per evitare di creare linee o superfici che avrebbero potuto dare problemi in una fase successiva di ricostruzione del componente attraverso le mesh. Una volta realizzata la geometria CAD del componente partendo da un modello dello stampo, questa è stata importata su Moldex3D, verificando attraverso il comando "geometry check" che il software avesse riconosciuto completamente la geometria. Sfruttando la sezione CAD del programma Moldex3D e partendo dalla geometria dello stampo, si è passati alla realizzazione dell'hot runner (il cilindro arancione in figura 4.2), vale a dire l'elemento che mette in comunicazione la camera calda, con il fuso da iniettare, e la cavità dello stampo da riempire. Nell'impostare forma e dimensioni dell'hot runner sono stati tenuti in considerazione i vari aspetti analizzati nei capitoli precedenti, in modo da ottenere pressioni e velocità del fuso tali da consentire la realizzazione di un componente con meno difetti possibili.

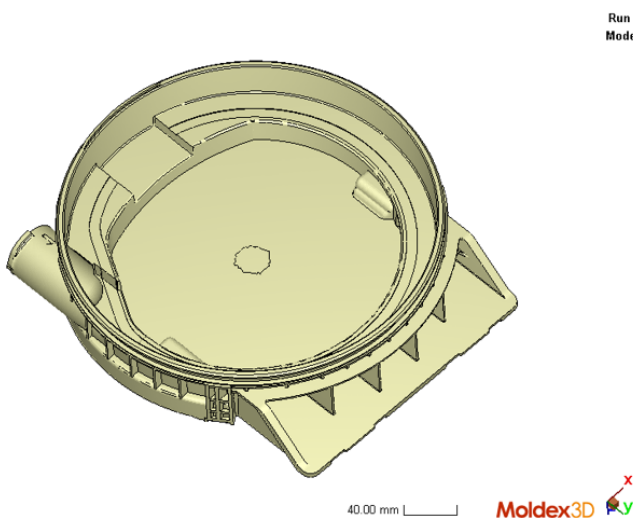


Figura 4.1 Geometria CAD del componente importata su Moldex3D.

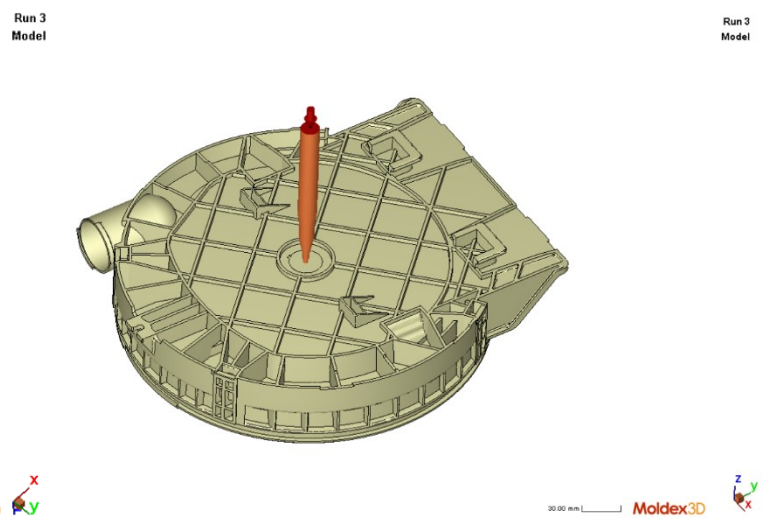
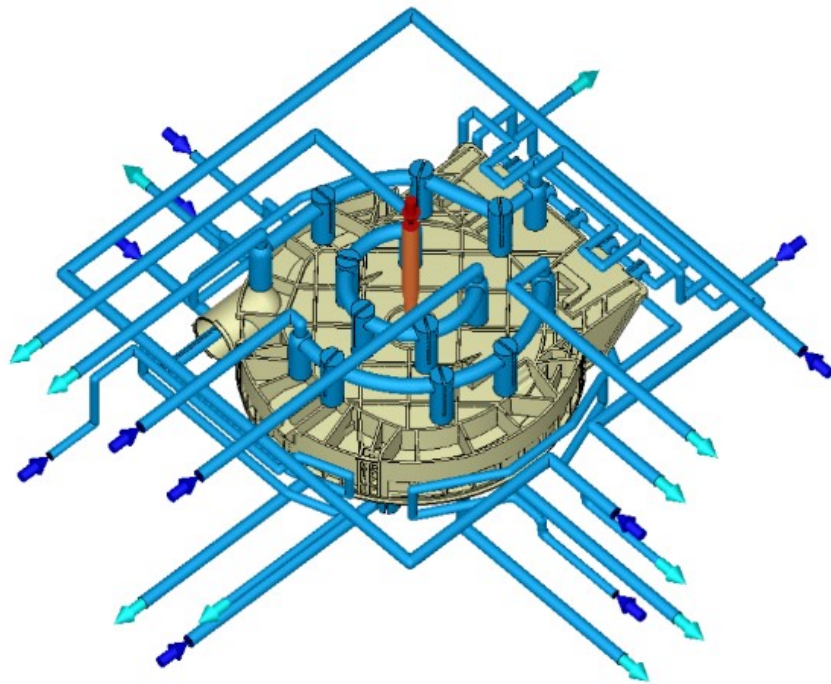
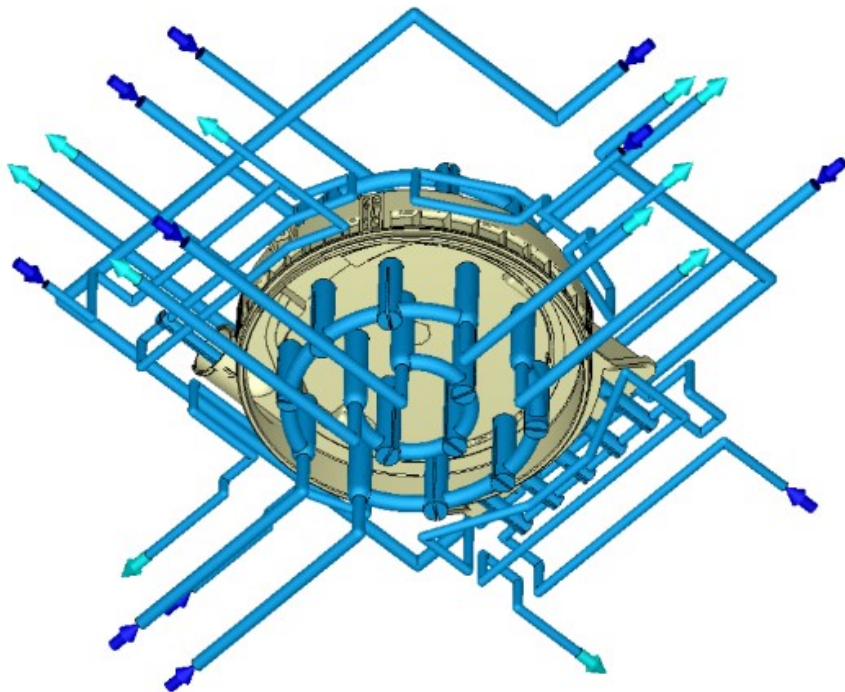


Figura 4.2 Particolare dell'hot runner realizzato su Moldex3D.

In seguito, partendo sempre dalla geometria dello stampo, si è passati alla realizzazione del cooling system. Come si vede nelle immagini successive, il cooling system di questo componente è formato da diversi cooling channel, ognuno dei quali è caratterizzato da: una sezione di ingresso (indicata dalle frecce in blu scuro), che rappresenta il punto in cui il liquido refrigerante entra all'interno dello stampo; un preciso percorso attorno al componente, in particolare nelle zone in cui era richiesto un maggiore asporto di calore sono stati realizzati dei pozzetti per aumentare lo scambio termico; una sezione di uscita (indicata dalle frecce in celeste), che rappresenta il punto in cui il liquido refrigerante riscaldato fuoriesce dallo stampo. Anche il cooling system è stato dimensionato tenendo conto delle considerazioni fatte nei capitoli precedenti.



50.00 mm | Moldex3D



50.00 mm | Moldex3D



Figure 4.2 – 4.3 Visione dall'alto e dal basso del componente con il cooling system.

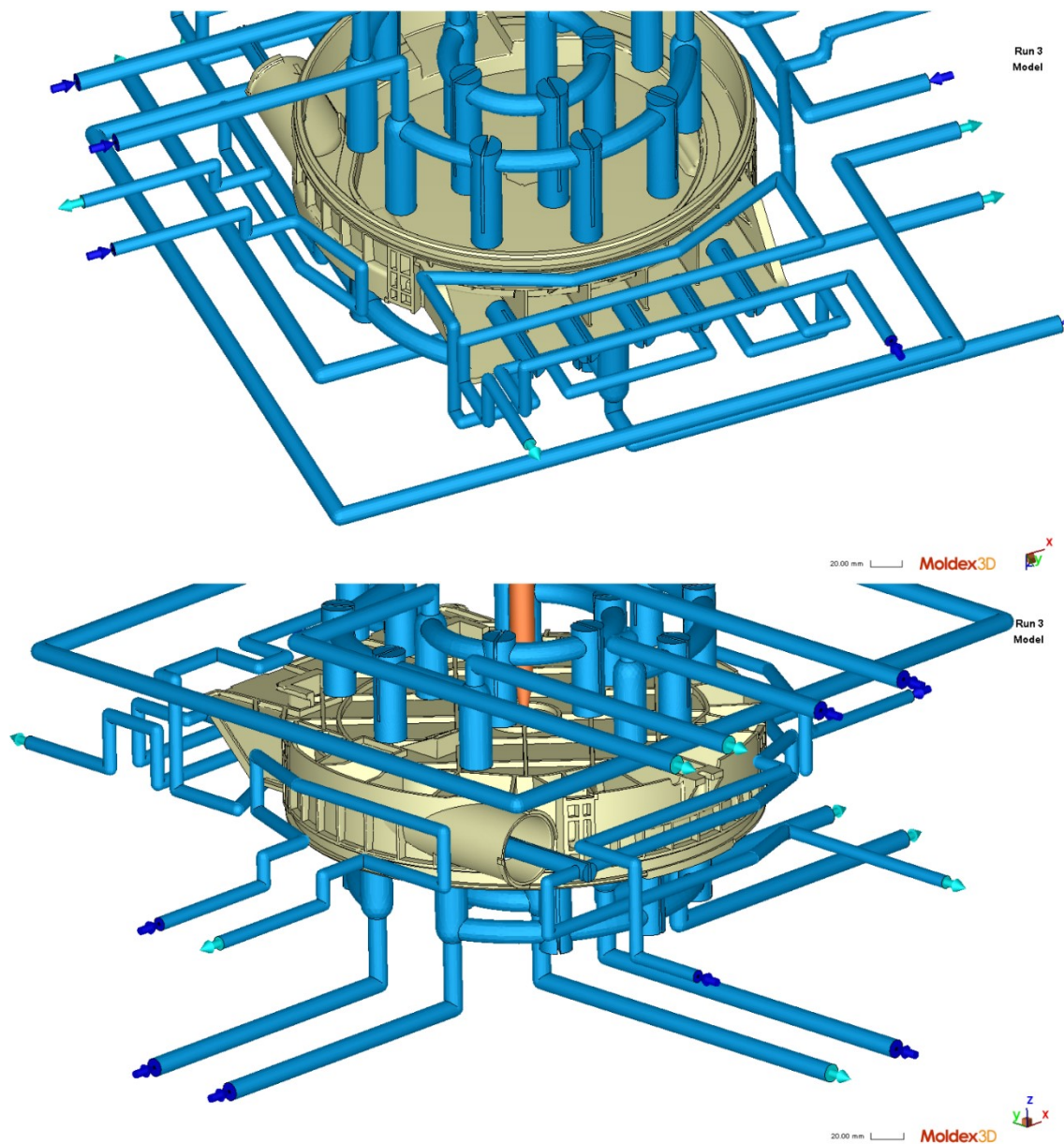


Figure 4.4 – 4.5 Visione laterale del cooling system e particolare dei pozzetti di raffreddamento.

Figura 4.6 Numero di mesh utilizzate e dimensioni dello stampo e della

In seguito, utilizzando il comando “create mesh”, si è passati alla creazione delle mesh per lo stampo, per il cooling system e per l’hot runner. Nello scegliere il numero di mesh da utilizzare si è optato per il giusto compromesso tra accuratezza della simulazione e tempo necessario ad eseguirla. Nella tabella nella figura 4.6 sono riportati il numero di mesh utilizzate e le dimensioni della parte e dello stampo. Create le mesh e verificata la loro adeguatezza, il programma

Item Name	Item Data	Unit
Mesh Type		Solid
Solid Mesh Element Count	5,210,884	
Part Elements	851,750	
Cold runner Element	0	
Part Dimension	291.45x328.72x70.24	mm x mm x mm
Mold Dimension	580.00x580.00x525.94	mm x mm x mm
Part Volume	505.56	cc
Cold runner Volume	N/A	cc

permette di accedere alle funzioni specifiche per la simulazione. Tramite l'interfaccia utente si ha la possibilità di inserire tutti i parametri fondamentali del processo di stampaggio ad iniezione, analizzati nei capitoli precedenti, che verranno utilizzati dal programma per eseguire la simulazione. L'azienda Sabaplast ha fornito una scheda parametri (figura 4.7) utilizzati per lo stampaggio del componente reale, tuttavia, essendo una scheda riferita ad un primo collaudo, è stato necessario utilizzare parametri diversi per far sì che la simulazione mostrasse dei risultati più verosimili e paragonabili a quelli del componente reale. Come già accennato in precedenza, il materiale utilizzato nella simulazione è il PP Niplene F30 AGR, che ha delle caratteristiche reologiche e meccaniche simili al PPS. Nella tabella successiva (figura 4.8) sono indicate le proprietà termiche principali del PP Niplene F30 AGR, mentre alla pagina successiva è riportato il grafico PVT di questo materiale. Il grafico PVT è di fondamentale importanza per determinare il comportamento reologico del materiale ed è utilizzato dal programma per determinare lo stato del materiale nelle diverse fasi della simulazione.

Figura 4.7 Scheda parametri di stampaggio fornita dall'azienda Sabaplast.

SABAPLAST		SCHEDA PARAMETRI STAMPAGGIO ENGEL		mod. SB052 rev.5	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	COLLAUDO		<input type="checkbox"/> PRODUZIONE	
CODICE PRESSA	L	DESCRIZIONE	ENGEL 400	DATA	6.8.20
CODICE STAMPO	VX 55	DESCRIZIONE	FONDO CIRCOND		
VELOCITA' D'INIEZIONE TOLL. +/- 5%			CORSA DOSAGGIO <u>117</u>		
<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>
<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="30"/>
VELOCITA' DOSAGGIO TOLL. +/- 5%			CONTRO PRESSIONE BAR		
<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>
LIMITE PRESSIONE INIEZIONE: bar <u>150</u>			<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="5"/>
POST PRESSIONE TOLL. +/- 5%			RISUCCHIO DOPO DOSAGGIO mm <u>10</u>		
<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>
<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="50"/>
TEMPO POST PRESSIONE TOLL. +/- 5%			VELOCITA' RISUCCHIO <u>40</u> %		
TEMPO DI RAFFREDDAMENTO TOLL. +/- 5%			TEMPERATURE PRESSA TOLL. +/- 5%		
TEMPO DI CICLO TOTALE <input checked="" type="checkbox"/> con robot <u>40-50</u> sec			UGELLO <input type="text" value="330"/>		
<input type="checkbox"/> automatico <input type="text" value=""/> sec			ZONA C <input type="text" value="305"/>		
<input type="checkbox"/> manuale <input type="text" value=""/> sec			ZONA A <input type="text" value="312"/>		
SORV. CUSCINO min. <input type="text" value="15"/> max. <input type="text" value="19"/> toll. <input type="text" value=""/>			ZONA D <input type="text" value="300"/>		
COMMUTAZIONE A QUOTA MM <u>21</u>			ZONA B <input type="text" value="307"/>		
TEMPERATURA CAMERA CALDA °C			ESTRAZIONE		
Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
<input type="text" value="310"/>	<input type="text" value="310"/>				
Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16
Z17	Z18	Z19			
TIPO UGELLO <u>NORMALE</u>			VELOCITA' <input checked="" type="checkbox"/> veloce <input type="checkbox"/> medio <input type="checkbox"/> lenta		
			<input checked="" type="checkbox"/> CON VITE DI RITORNO		
			<input type="checkbox"/> SENZA VITE DI RITORNO		
			QUOTA <input type="text" value=""/> VELOCITA' <input type="text" value=""/> PRESSIONE <input type="text" value=""/>		
			QUOTA <input type="text" value=""/> TEMPO <input type="text" value=""/> RITARDO <input type="text" value=""/>		
			ROBOT SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>		

Figura 4.8 Proprietà termiche per lo stampaggio del PP Niplene F30 AGR.

Item Name	Item Data	Unit
Polymer	PP	
Grade Name	Niplene F30 AGR	
Producer	Soredi	
Ejection Temperature	90 °C	
Freeze Temperature	110 °C	
Glass Transition Temperature	120 °C	

Item Name	Item Data	Unit
Melt Temperature (minimum)	230	°C
Melt Temperature (normal)	250	°C
Melt Temperature (maximum)	270	°C
Melt Temperature Range	230~270	°C
Mold Temperature (minimum)	40	°C
Mold Temperature (normal)	55	°C
Mold Temperature (maximum)	70	°C
Mold Temperature Range	40~70	°C

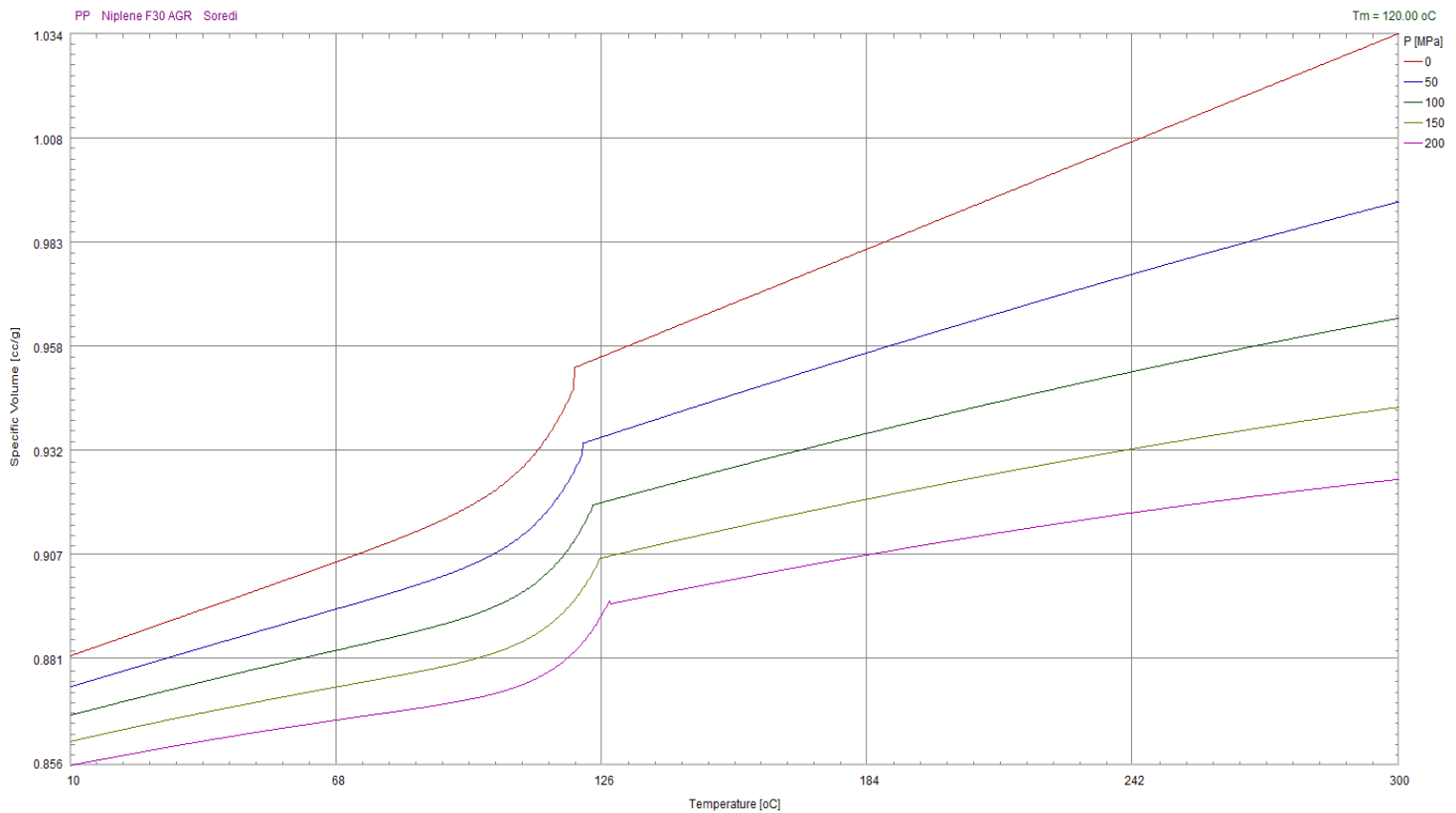


Figura 4.9 Diagramma PVT del PP Niplene F30 AGR.

Nelle figure successive (dalla 4.10 alla 4.15) sono indicati i principali parametri di processo utilizzati nella simulazione. Riassumendoli, i più importanti sono i seguenti: il macchinario utilizzato è una pressa ENGEL - VC 3550/400 Tech-80, con diametro della vite di 80 mm; la temperatura del fuso è di 250 °C; il V/P switch viene effettuato quando la vite ha una Ram position di 44 mm; il profilo della velocità di iniezione ha un classico andamento a gradino; la pressione di iniezione è impostata costante al 90% di quella massima; la pressione di packing è impostata costante a 60 MPa.

Filling	Item Data	Unit
Filling Time	1.95	sec
Melt Temperature	250	°C
Mold Temperature	55	°C
Max Injection Pressure	203	MPa
Injection Volume	505.56	cc
Packing		
Packing Time	23.85	sec
Max Packing Pressure	203	MPa

Figura 4.10
Impostazioni per la fase di filling.

Figura 4.11
Impostazioni per la fase di packing.

Cooling	Item Data	Unit
Cooling Time	17.90	sec
Mold Open Time	5	sec
Ejection Temperature	90	°C
Air Temperature	25	°C
Cycle Time	48.71	sec

Figura 4.12 Impostazioni per la fase di cooling.

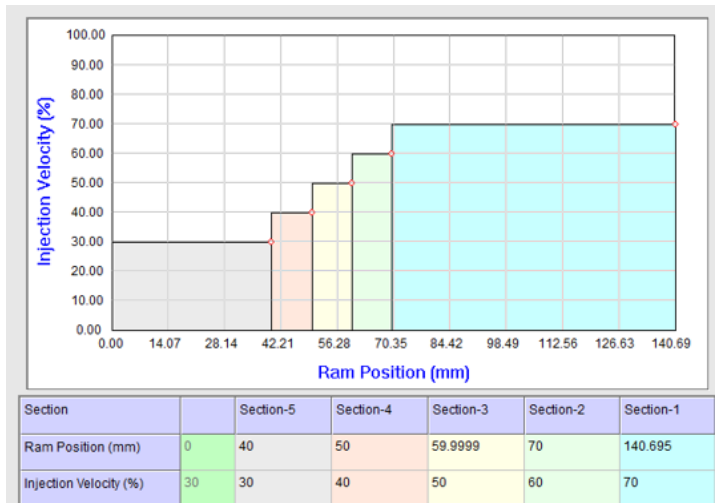


Figura 4.13 Profilo della velocità di iniezione.

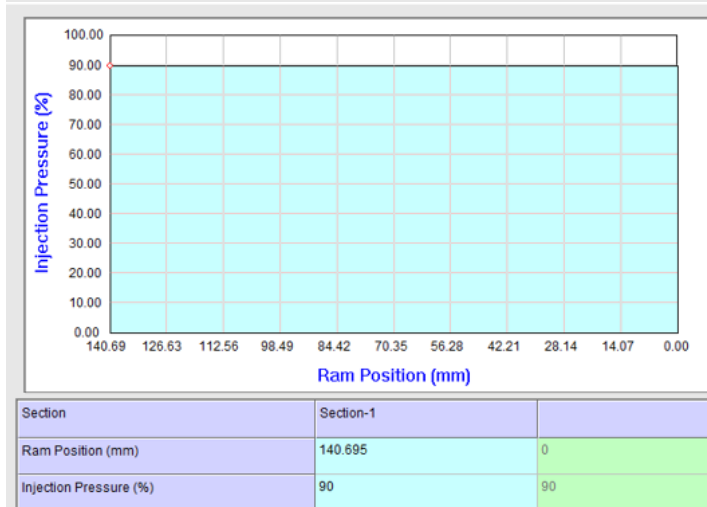


Figura 4.14 Profilo della pressione di iniezione.

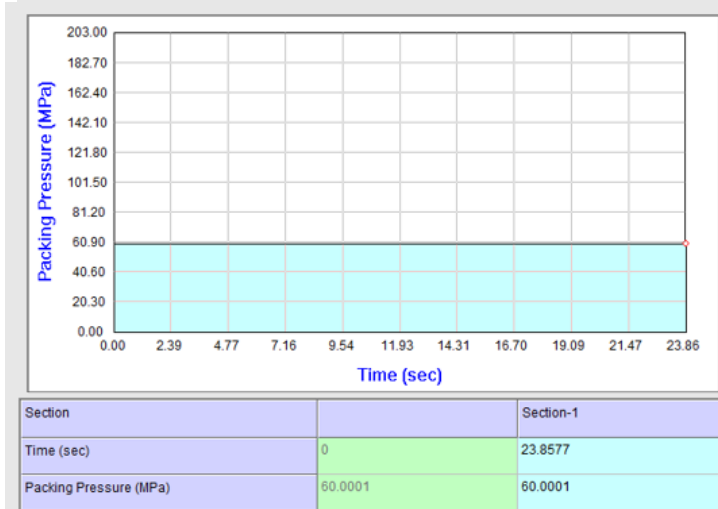


Figura 4.15 Profilo della pressione di packing.

Una volta inseriti tutti i parametri è stato possibile avviare la simulazione, nella quale il programma, dalla fase di plastification fino a quella di warpage, ha raccolto tutta una serie di parametri riguardanti il polimero e la modalità con cui questo ha riempito la cavità dello stampo. I risultati ottenuti nella simulazione vengono esposti nel paragrafo successivo, è però importante sottolineare il fatto che la simulazione che ha permesso di ottenere questi risultati è stata successiva ad una serie di altre simulazioni preliminari effettuate precedentemente e necessarie per settare correttamente i parametri di processo. Quest'ultima considerazione evidenzia maggiormente l'importanza dell'utilizzo delle simulazioni CAE già nella fase di progettazione di un componente, in quanto permette di definire un range da attribuire ai parametri di processo senza eseguire prove di stampaggio di collaudo superflue.

4.3 - RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

In questo paragrafo vengono analizzati nel dettaglio i risultati ottenuti dalla simulazione effettuata.

Innanzitutto, viene presa in considerazione la fase di filling. La tabella di fianco (figura 4.16) riporta una sintesi dei principali valori ottenuti dalla simulazione in questa fase. Nella figura 4.17

Figura 4.16 Parametri principali della fase di filling ottenuti dalla simulazione.

Item Name	Item Data	Unit
Actual Filling Time	3.308	sec
Average Melt Front Temperature	256.766	°C
Max. Melt Front Temperature	263.698	°C
Max. Sprue Pressure	94.460	MPa
Max. Clamp Force	190.904	Ton(m)

è riportato l'avanzamento del fronte di fusione nella cavità nella fase di filling. L'avanzamento del fronte di fusione è un indicatore che permette di evidenziare la posizione del confine anteriore di fusione e come la sua velocità di avanzamento cambi nel tempo. Questo parametro permette di: esaminare, dunque, la modalità di riempimento della cavità; controllare il verificarsi di un potenziale problema di riempimento incompleto (short shot); identificare le posizioni delle linee di saldatura (weld line); identificare la posizione degli intrappolamenti d'aria (air trap); controllare il contributo del gate per il corretto funzionamento dell'hot runner; controllare la posizione corretta del gate per bilanciare il flusso ed eliminare le linee di saldatura. Come evidenziato nelle figure 4.18 e 4.19, i principali problemi per gli intrappolamenti d'aria si hanno nelle zone del componente più distanti dal gate di accesso del fuso, mentre alcune linee di saldatura sono visibili nel bordo circolare interno e nell'elemento cilindrico presente su un lato del componente.

Figura 4.17 Avanzamento del fronte di fusione.

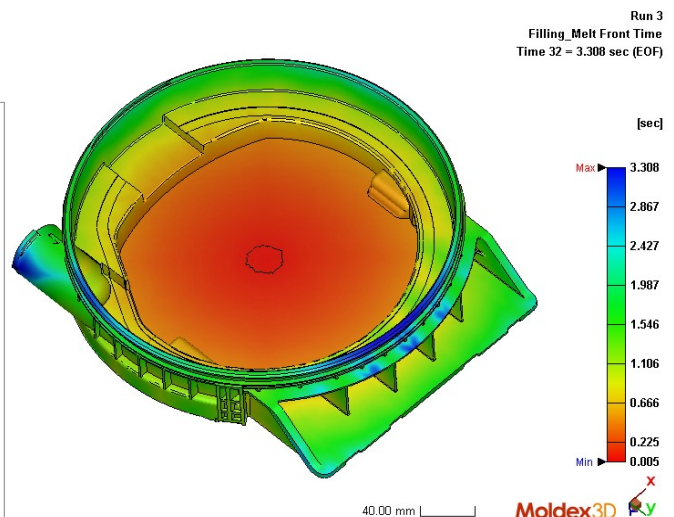
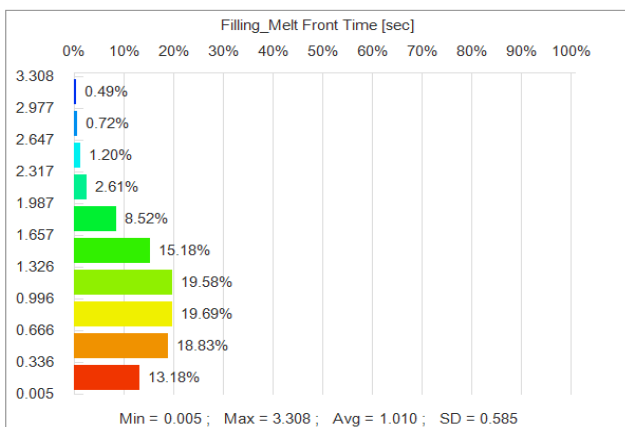


Figura 4.18 Intrappolamenti d'aria

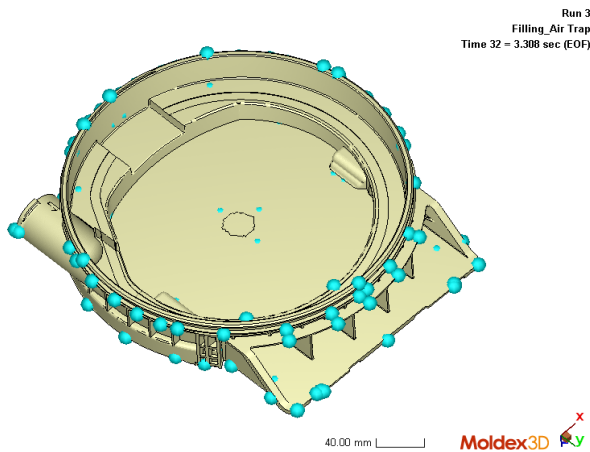
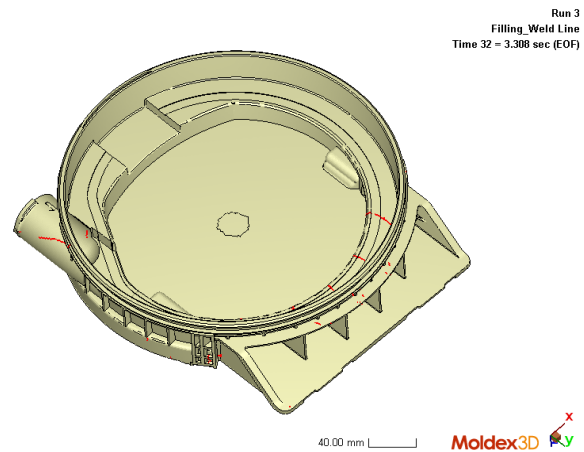


Figura 4.19 Linee di saldatura



Dalla simulazione è stato possibile ricavare anche la distribuzione degli angoli e delle temperature alle quali due fronti di fusione si incontrano, come mostrato dagli istogrammi presenti di seguito. L'angolo massimo misurato è 144.972 [deg], l'angolo minimo è 5.458, l'angolo medio vale 104.007. La temperatura massima misurata è 262.264 [°C], la temperatura minima è 234.028, la temperatura media vale 256.643.

Figura 4.20 Istogramma con la distribuzione degli angoli di incontro dei fronti di fusione.

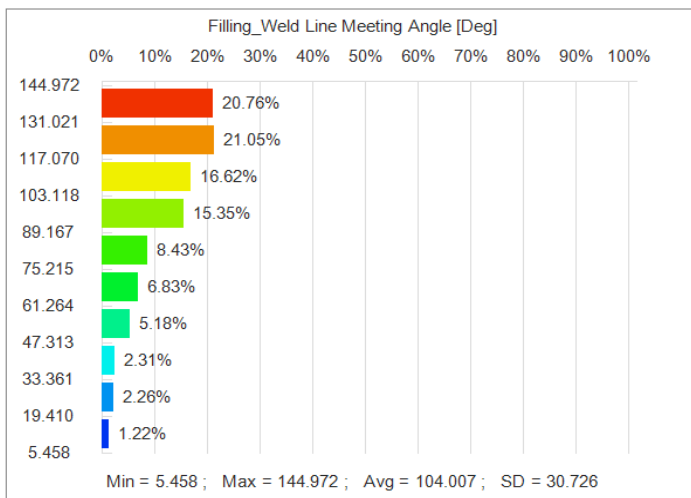
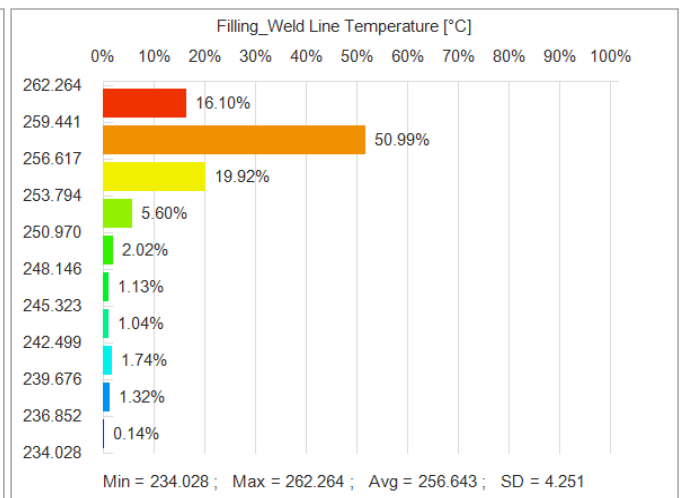


Figura 4.21 Istogramma con la distribuzione delle temperature alle quali due fronti di fusione si incontrano.



Nella figura 4.22 è rappresentata la distribuzione della pressione del fuso all'interno della cavità. Questo parametro è di fondamentale importanza in quanto permette di: controllare l'avanzamento del fronte di pressione; verificare la caduta di pressione nel sistema di scorrimento; evitare l'overpacking e il difetto di flashing del fuso; esaminare la durata della fase di packing. Come si vede dalla figura, la pressione ha un valore massimo di 56.398 [MPa] nella zona del gate di accesso e va progressivamente diminuendo man mano che ci si allontana da questa. In figura 4.23 è, invece, rappresentata la distribuzione del ritiro volumetrico del componente. La contrazione volumetrica è un indice che rappresenta la variazione percentuale del volume della parte ed è data da uno spostamento nel piano PVT del materiale utilizzato, dovuto al passaggio da alte temperature e pressioni, nella fase iniziale di filling, a temperatura e pressione ambiente. Un valore positivo di questo indice rappresenta una diminuzione del volume mentre un valore negativo rappresenta una espansione del volume a causa dell'over-pack. Un ritiro volumetrico non uniforme porta a

deformazione e distorsione della parte. Come si vede dalla figura, in questa fase il ritiro della parte è abbastanza omogeneo e non eccessivo, per cui non dovrebbero esserci problemi di deformazione del pezzo. In figura 4.24 viene mostrata la contrazione di volume massima attraverso lo spessore della parte. Un valore positivo elevato rappresenta un grande restringimento del volume, che può portare a segni di affondamento o vuoti. In questo caso, le zone più critiche sono l'elemento semicircolare che sporgente ed il cilindro cavo presente su un lato del componente, in queste, infatti, il ritiro è elevato e potrebbero verificarsi dei difetti nel prodotto finale.

Figura 4.22 Distribuzione della pressione nella fase di filling.

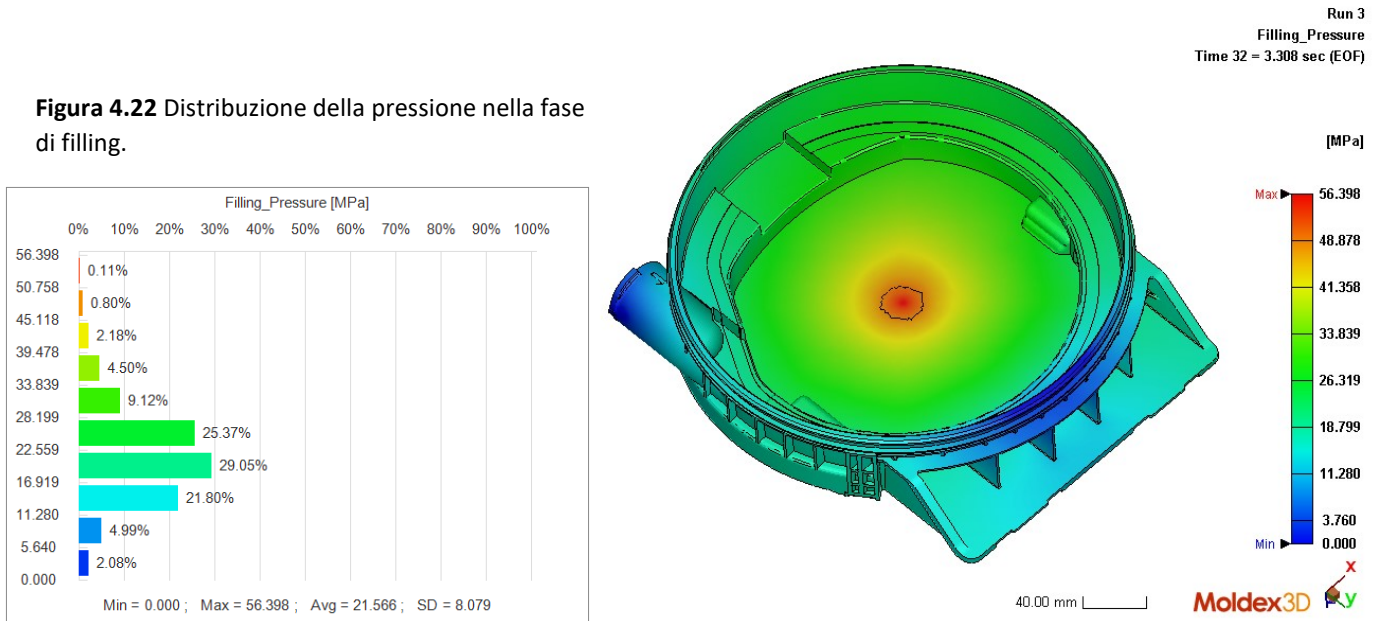


Figura 4.23 Distribuzione del ritiro volumetrico del componente.

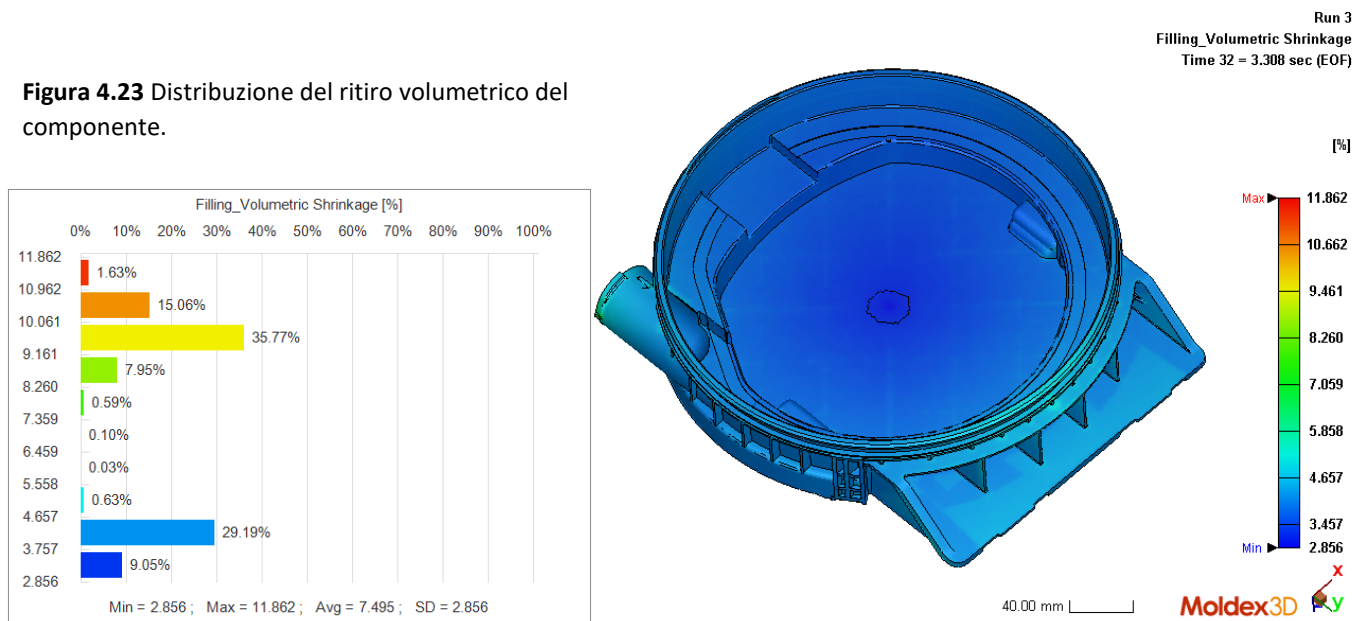
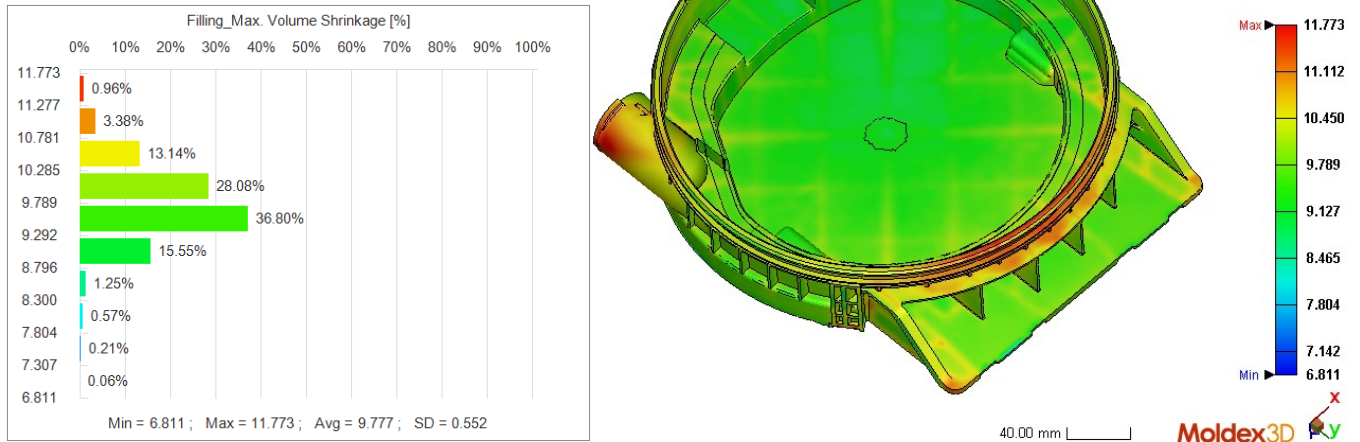


Figura 4.24 Contrazione massima del volume lungo lo spessore della parte.



Per completezza, nelle figure successive vengono riportati gli andamenti di: la portata del gate, che raggiunge un massimo di 290.699 [cc/sec]; la pressione nel canale di colata (sprue), che raggiunge un massimo di 94.460 [MPa]; la forza di serraggio, che raggiunge un massimo di 190.904 [Ton(m)]; la portata nella cavità, che raggiunge un massimo di 292.600 [cc/sec]; il peso della parte, che arriva alla fine della fase di filling a 513,920 [g].

Figura 4.25 Andamento temporale della portata del gate nella fase di riempimento.

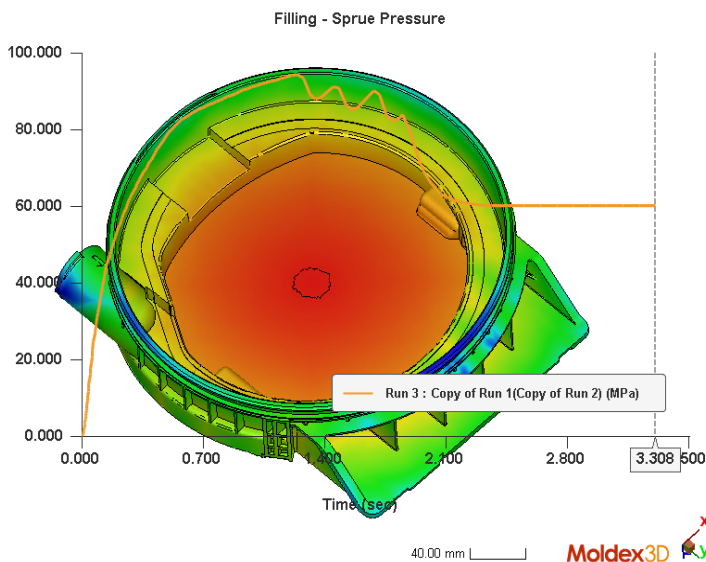
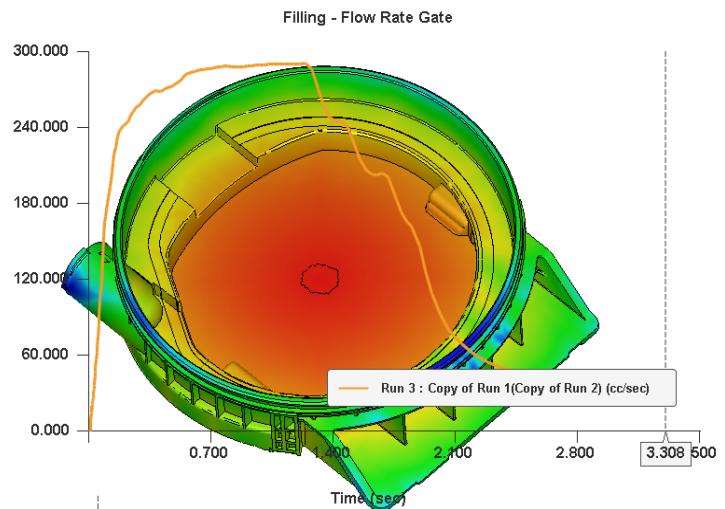


Figura 4.26 Andamento temporale della pressione del canale di colata.

Figura 4.27 Andamento temporale della forza di serraggio.

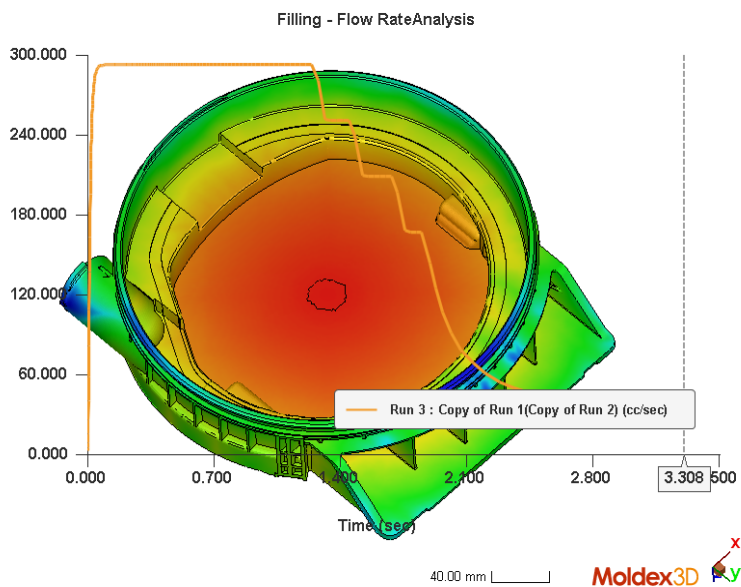
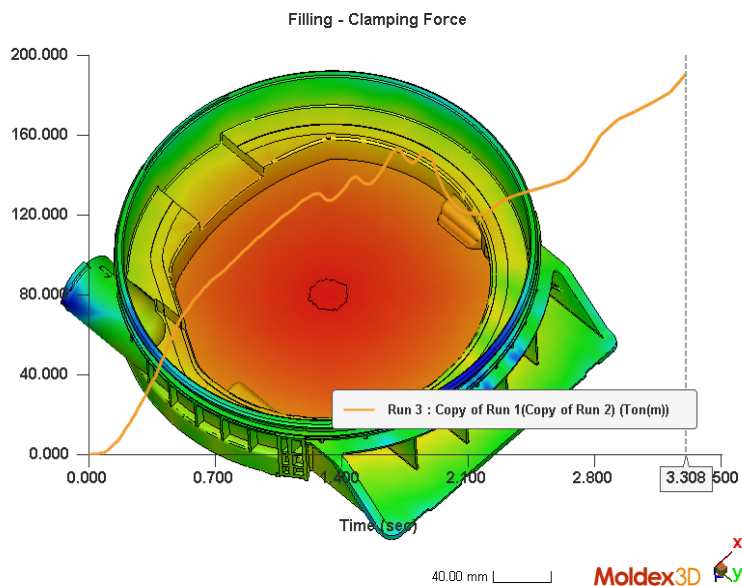
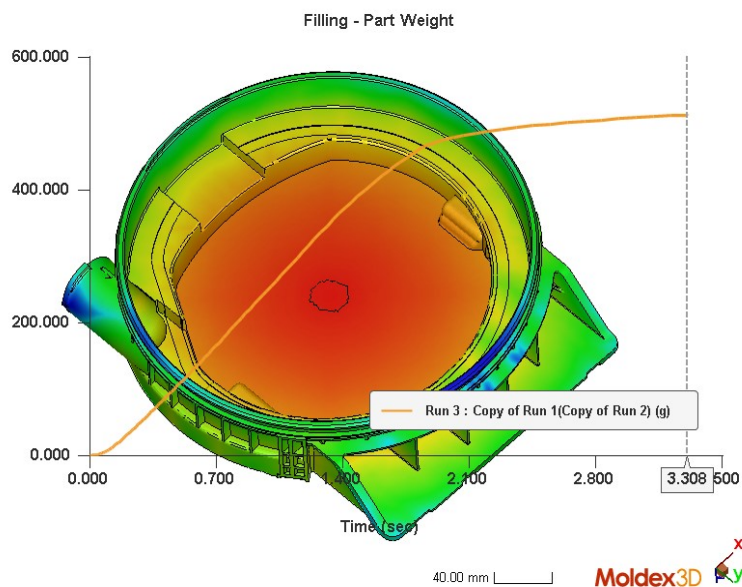


Figura 4.28 Andamento temporale della portata.

Figura 4.29 Andamento temporale del peso della parte.



Adesso si passa all'analisi della fase di packing. Nella tabella di fianco (figura 4.30) sono riportati alcuni valori fondamentali ricavati dalla simulazione in questa fase. Le figure 4.31 e 4.32 mostrano rispettivamente la distribuzione della pressione e della temperatura nel componente nella fase di packing.

Figura 4.30 Parametri principali della fase di packing ottenuti dalla simulazione.

Item Name	Item Data	Unit
Max. Sprue Pressure	94.460	MPa
Max. Clamp Force	322.367	Ton(m)
Gate Freeze Time	13.837	sec

Figura 4.31 Distribuzione di pressione nella fase di packing.

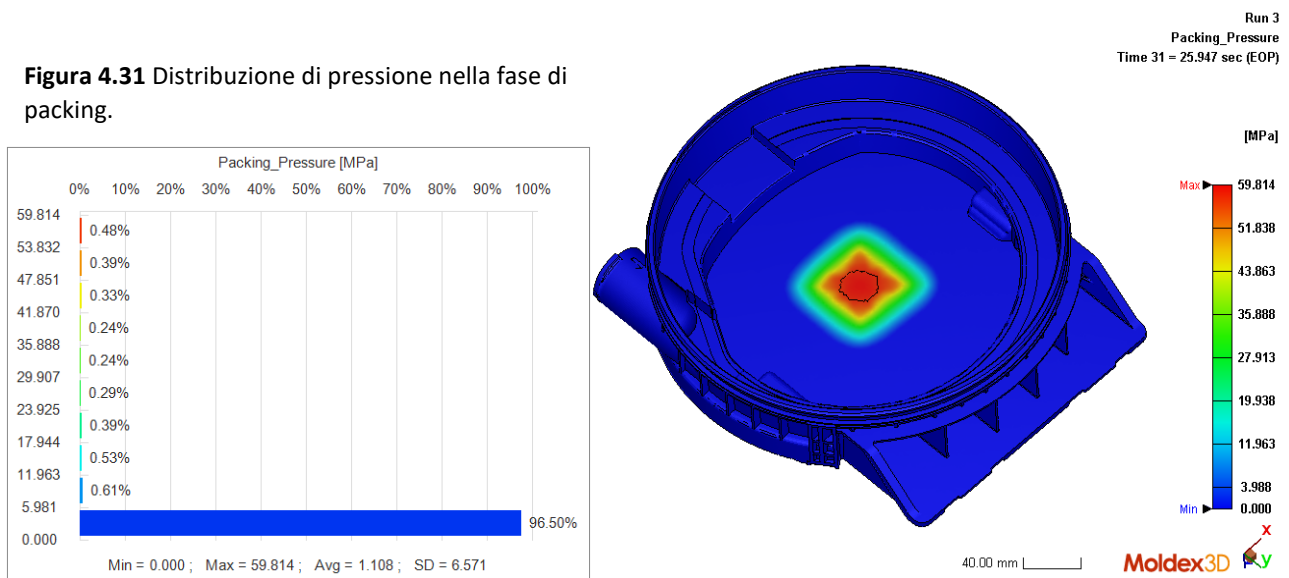
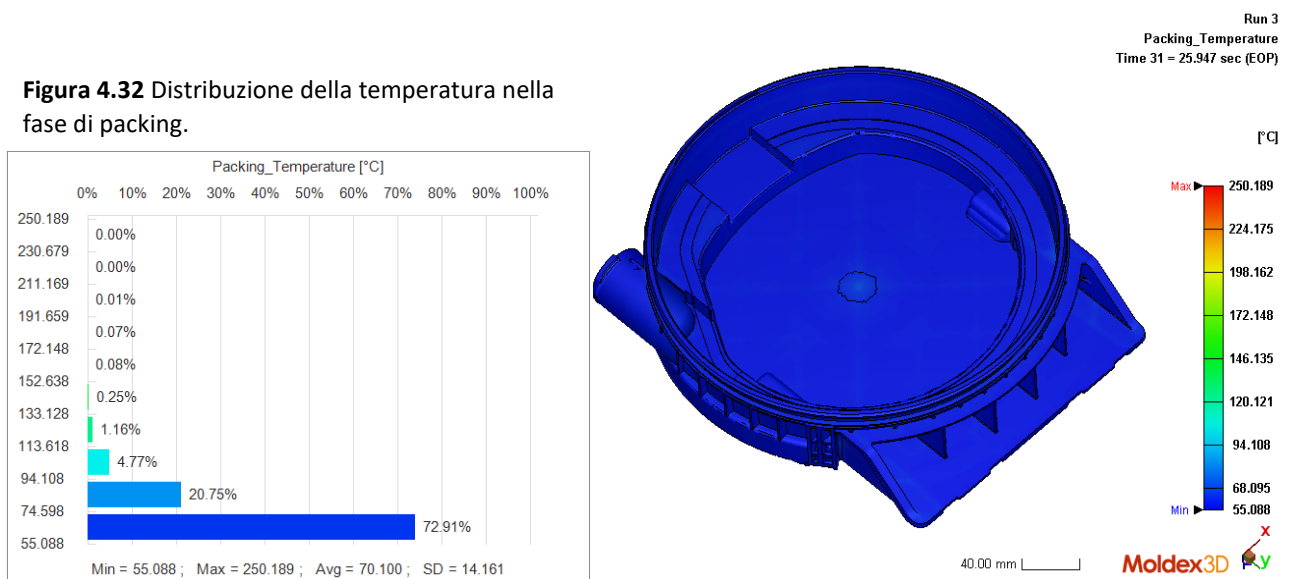


Figura 4.32 Distribuzione della temperatura nella fase di packing.



Nella figura 4.33 è rappresentato l'andamento dello sforzo di taglio nel componente. Lo sforzo di taglio viene mostrato in colori diversi a seconda del diverso livello di sollecitazione. La sollecitazione di taglio è una delle fonti di tensioni residue che possono rimanere nelle parti stampate. Se lo sforzo di taglio non è distribuito in modo uniforme, si verificano alcuni problemi dimensionali, mentre, un livello di sollecitazione di taglio troppo alto provoca problemi indotti da sollecitazioni nella parte stampata. Come si vede nella figura, le zone più sollecitate sono quelle vicine al gate, ed in generale la parte circolare piatta inferiore del componente. L'azienda Sabaplast aveva osservato che, in condizioni di lavoro, il componente stampato in PP aveva problemi proprio in questa zona, in quanto ad elevate temperature subiva deformazioni eccessive; una possibile concausa di questo problema è dato appunto dalle tensioni residue di taglio. In figura 4.34 si ha la distribuzione del ritiro volumetrico massimo lungo lo spessore del componente nella fase di packing; anche in questo caso il ritiro è abbastanza uniforme, ma nelle zone in cui il ritiro ha un valore più elevato possono manifestarsi segni di affondamento e vuoti.

Figura 4.33 Andamento dello sforzo di taglio nella fase di packing.

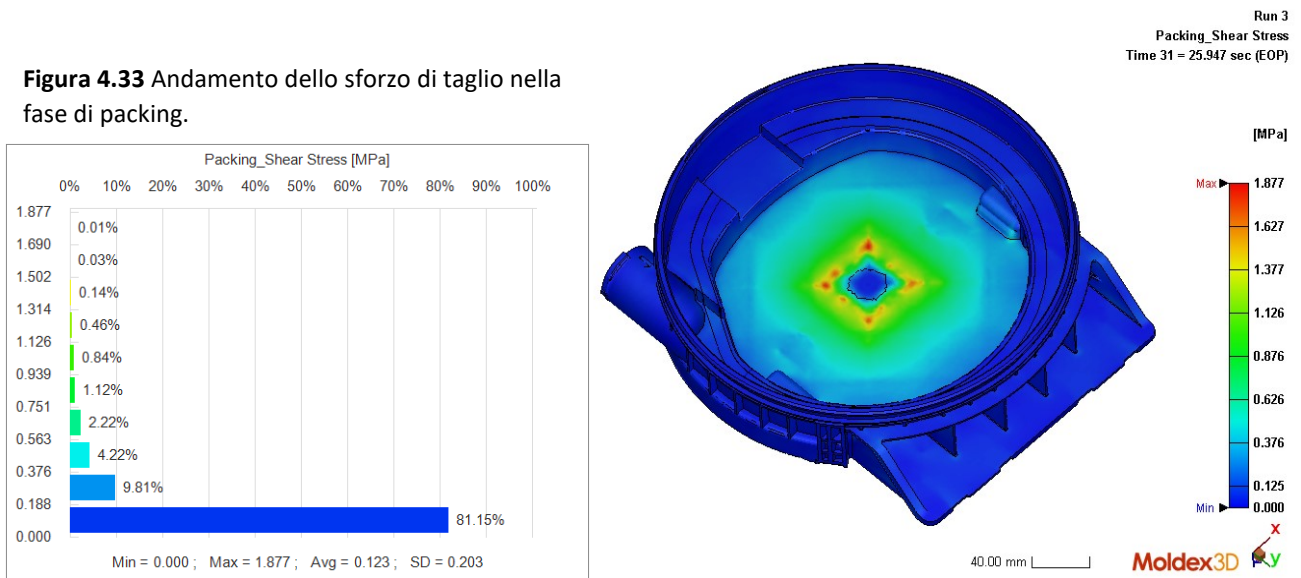
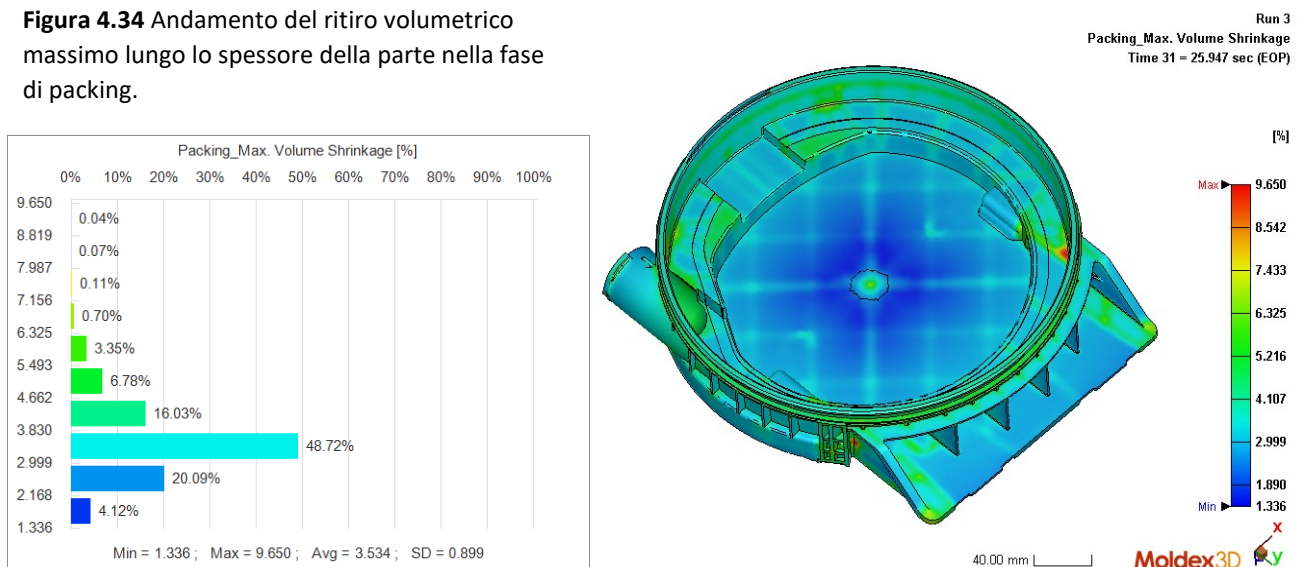


Figura 4.34 Andamento del ritiro volumetrico massimo lungo lo spessore della parte nella fase di packing.



L'eventuale presenza dei segni di affondamento (sink mark) può essere dedotta dalle figure 4.35 e 4.36. Nella prima è riportato l'andamento del sink mark indicator, ovvero un indice che permette anche di valutare l'effetto della fase di packing. Se l'indicatore è positivo significa che

l'impacchettamento non è sufficiente, il che può anche portare alla presenza di segni di affondamento nella parte. Se l'indicatore è negativo, significa che è stato fatto un impacchettamento eccessivo. Una buona fase packing mantiene l'indicatore vicino allo zero. Nell'altra figura (4.36) è, inoltre, riportata la disposizione dei sink mark nel componente.

Figura 4.35 Sink mark indicator.

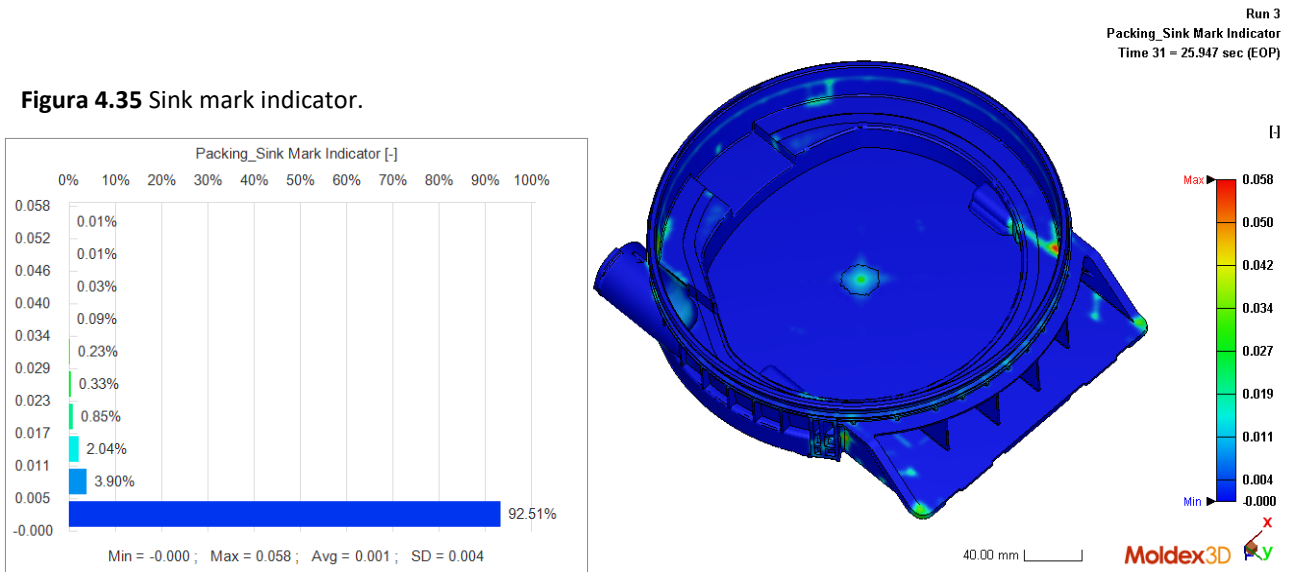
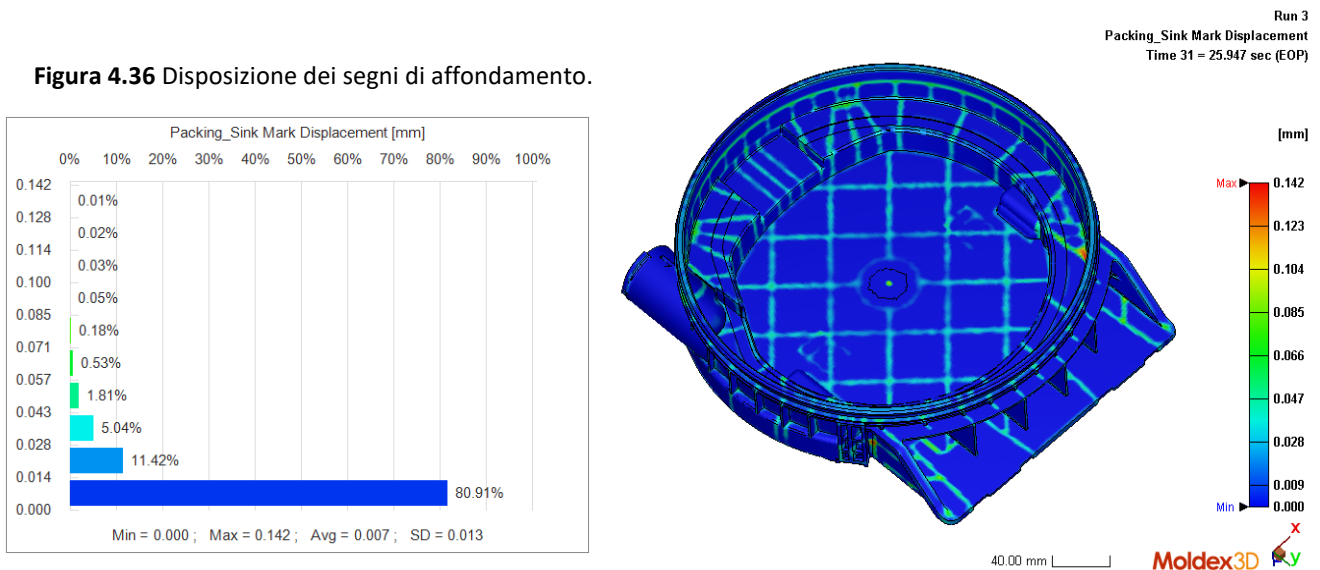


Figura 4.36 Disposizione dei segni di affondamento.



Anche per la fase di packing, per completezza, vengono riportati di seguito gli andamenti temporali di: pressione del canale di colata (sprue pressure, figura 4.37), che ha un massimo di 94.460 [MPa]; forza di serraggio (clamping force, figura 4.38), che ha un massimo di 322.367 [Ton(m)]; portata (flow rate; figura 4.39), che ha un massimo di 292.600 [cc/sec]; peso della parte (part weight, figura 4.40), che arriva alla fine della fase di packing a 540.394 [g].

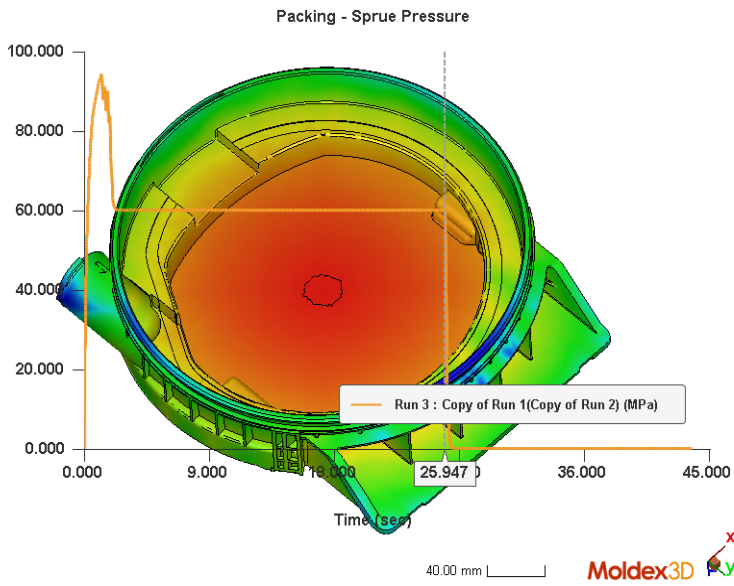


Figura 4.37 Andamento temporale della pressione del canale di colata.

Figura 4.38 Andamento temporale della forza di serraggio.

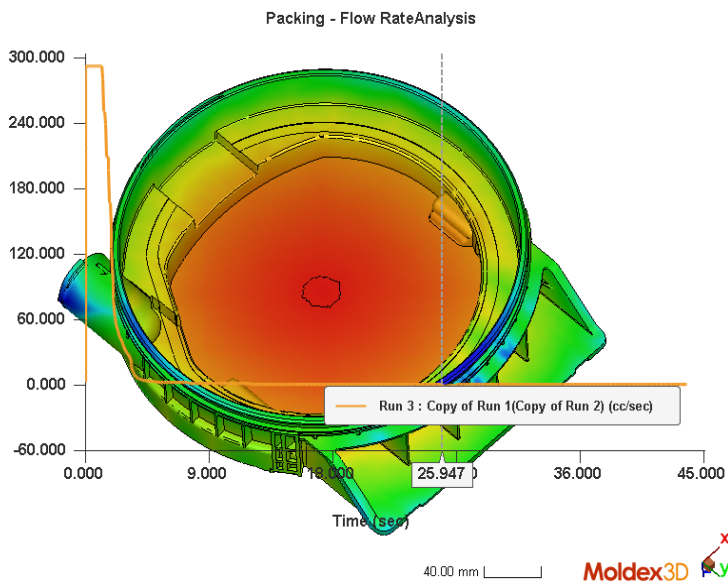
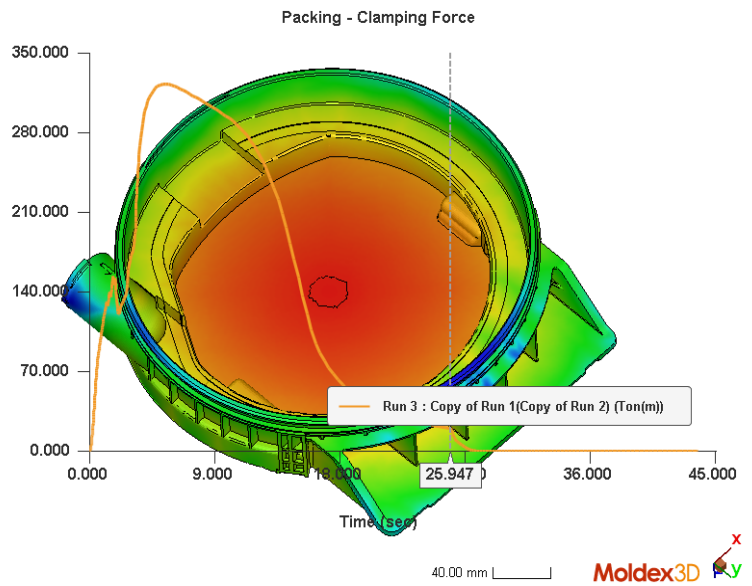


Figura 4.39 Andamento temporale della portata.

Figura 4.40 Andamento temporale del peso della parte.

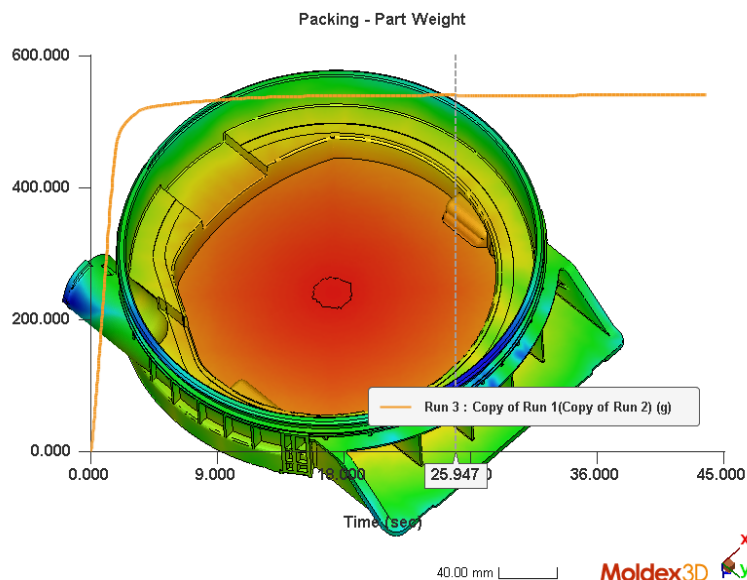


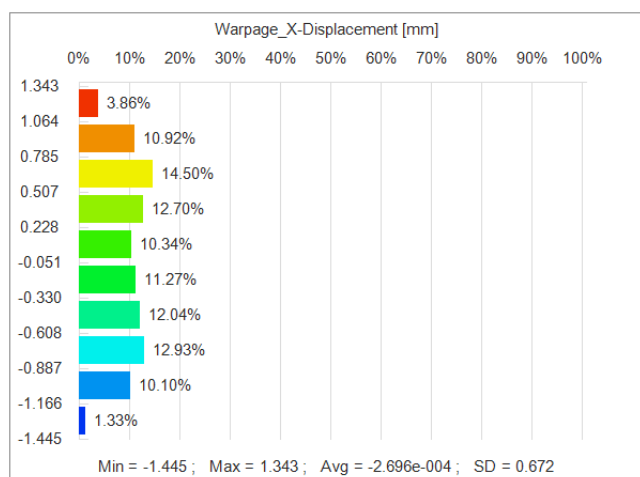
Figura 4.41 Range di variabilità delle deformazioni del componente nella fase di warpage.

Item Name	Item Data	Unit
X-Displacement	-1.445 ~ 1.343	mm
Y-Displacement	-1.242 ~ 2.001	mm
Z-Displacement	-1.945 ~ 1.836	mm
Total Displacement	0.407 ~ 2.297	mm

Infine, vengono analizzati i risultati della fase di warpage, ovvero la deformazione del componente una volta espulso dallo stampo e raffreddato a temperatura ambiente. La tabella in figura 4.41 e le immagini successive (figure da 4.42 a 4.45) mostrano l'andamento e il range in cui variano le deformazioni lungo gli assi X, Y, Z e la deformazione totale del componente.

Quest'ultima evidenzia il fatto che la deformazione totale del componente in questa fase non è uniforme e, soprattutto, non è assialsimmetrica rispetto ad un ipotetico asse passante per il centro della parte (zona dove era collocato l'hot runner). Dunque, una volta che il componente viene espulso dallo stampo, possono verificarsi delle deformazioni tali da compromettere la sua circolarità e, quest'ultima, è una tolleranza dimensionale richiesta per la messa in opera del componente, al fine di garantire un funzionamento ottimale in condizioni di lavoro. La figura 4.46 mostra, invece, il ritiro volumetrico del componente, che, anche se in maniera minore, è presente anche nella fase di warpage. Per concludere, vengono riportate anche la distribuzione del valore medio del modulo di rigidità nel materiale plastico dopo l'espulsione dallo stampo (figura 4.47), e la sollecitazione termica residua di Von-Mises della parte espulsa (figura 4.48).

Figura 4.42 Deformazioni lungo l'asse X del componente.



Run 3
Warpage_X-Displacement

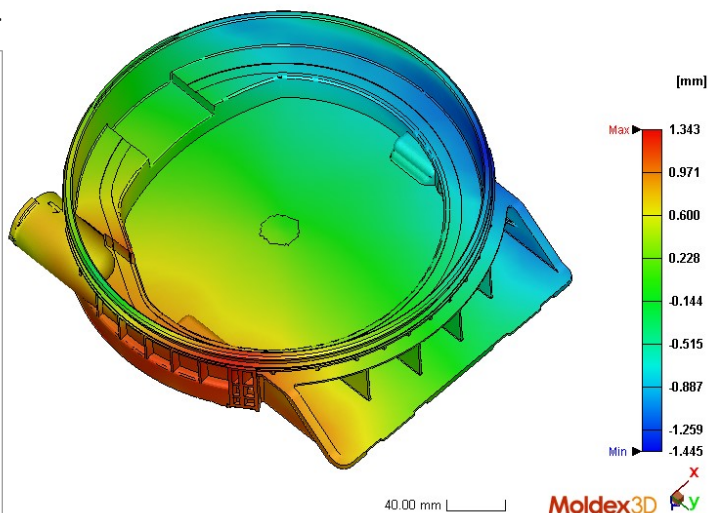


Figura 4.43 Deformazioni lungo l'asse Y del componente.

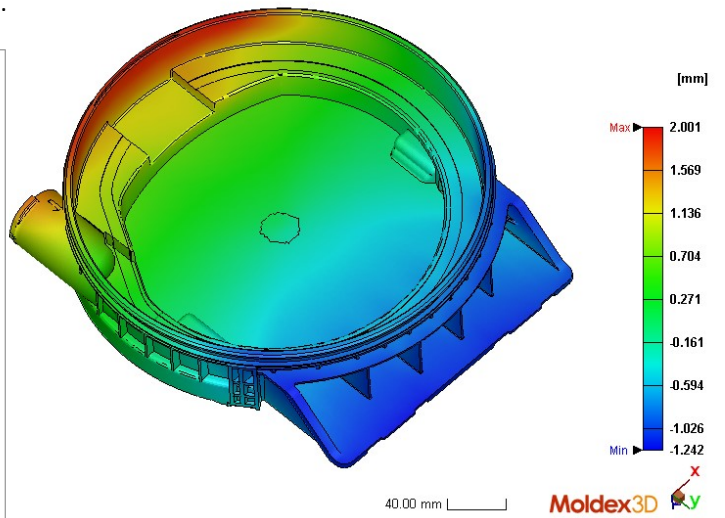
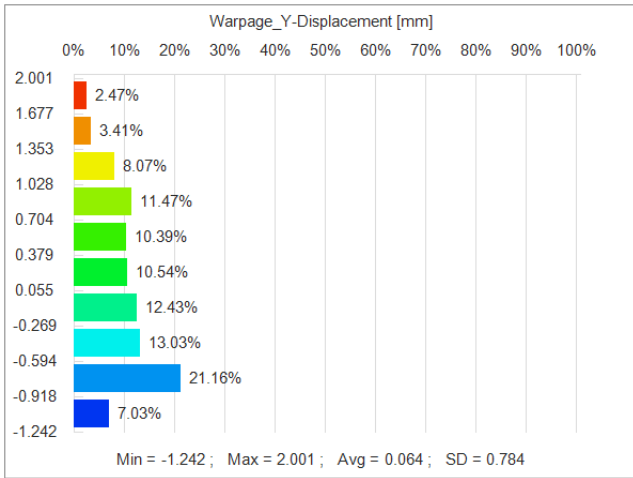


Figura 4.44 Deformazioni lungo l'asse Z del componente.

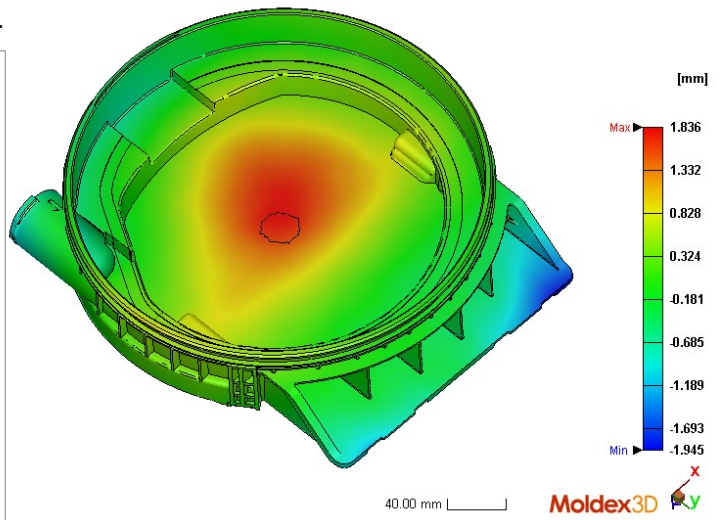
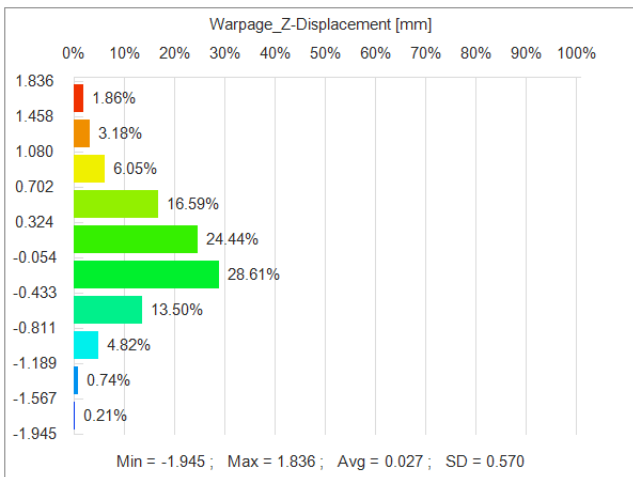


Figura 4.45 Deformazione totale del componente.

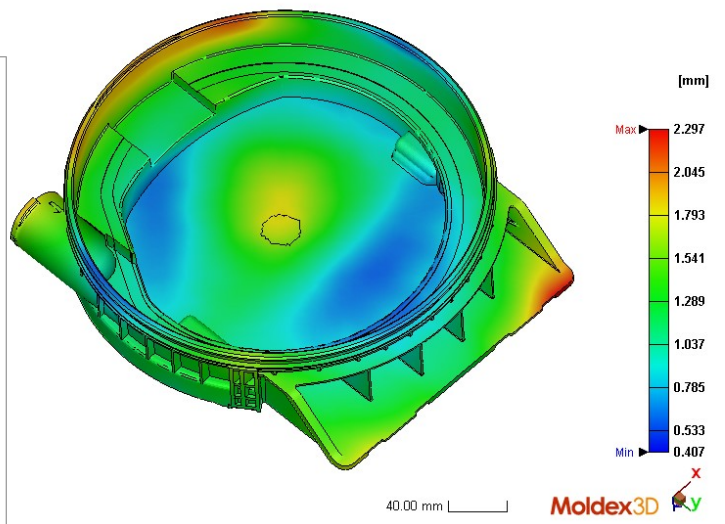
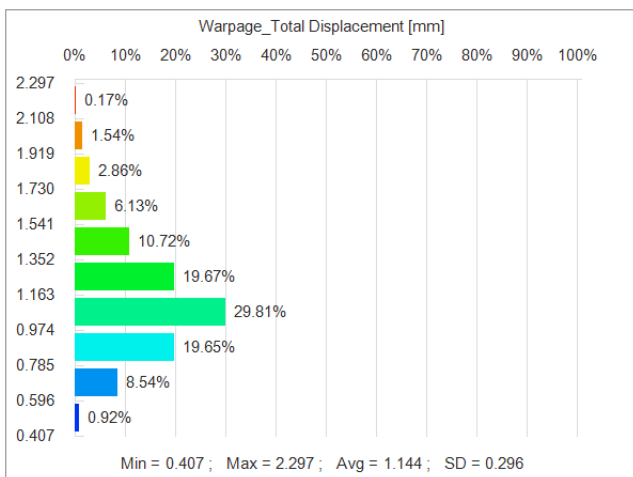


Figura 4.46 Ritiro volumetrico nella fase di warpage.

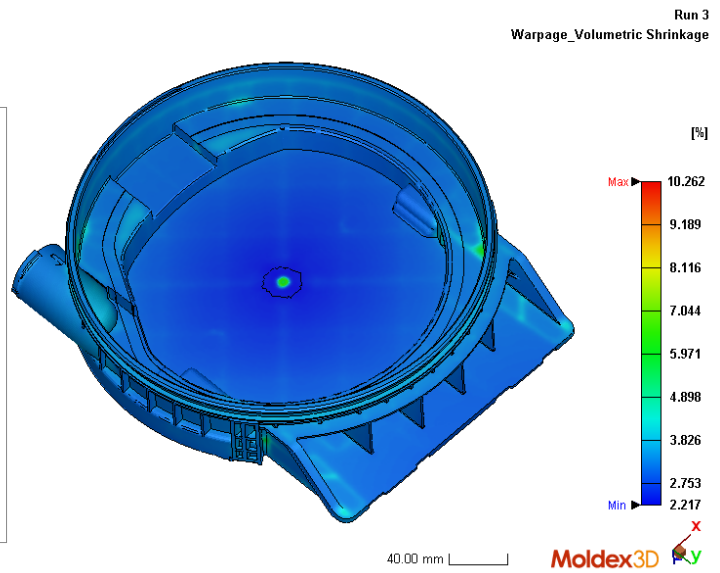
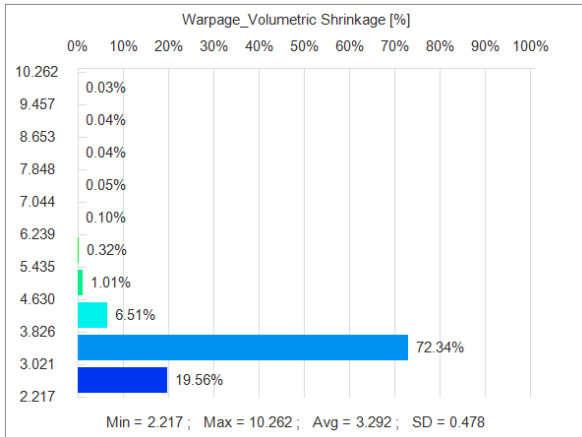


Figura 4.47 Distribuzione del valor medio del modulo di rigidità del materiale.

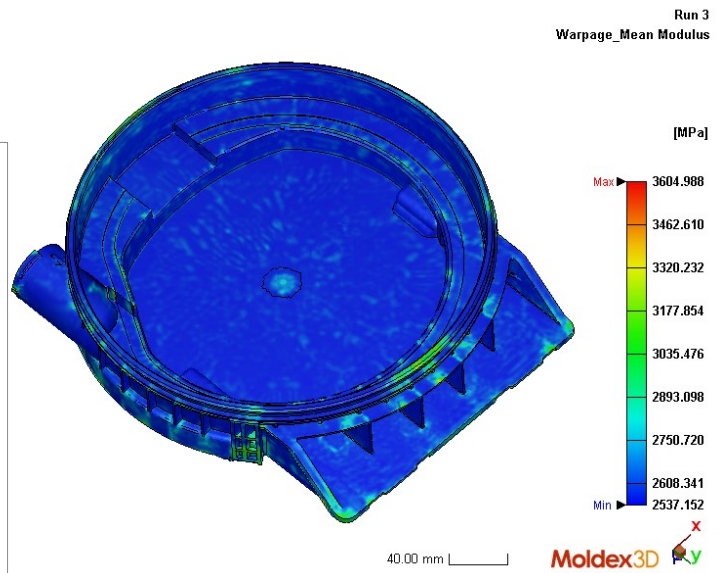
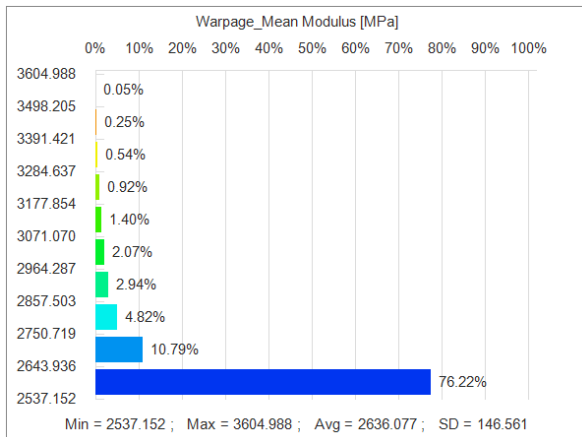
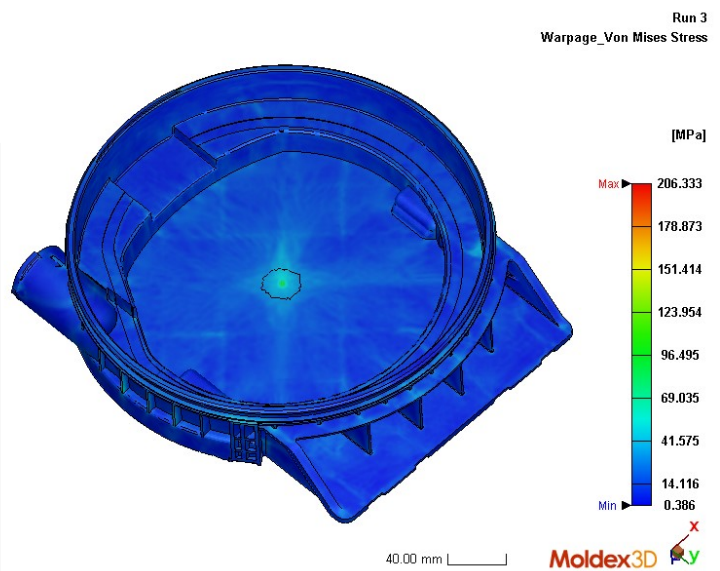
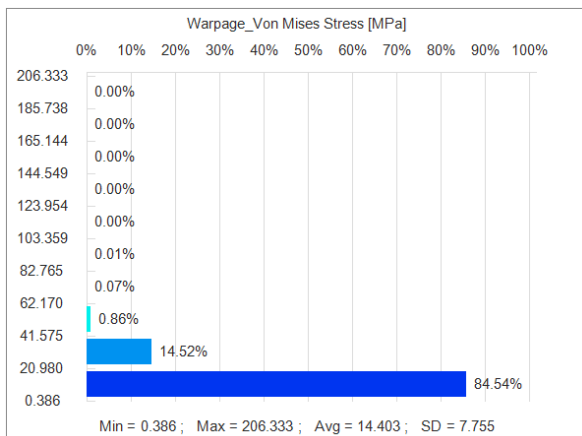


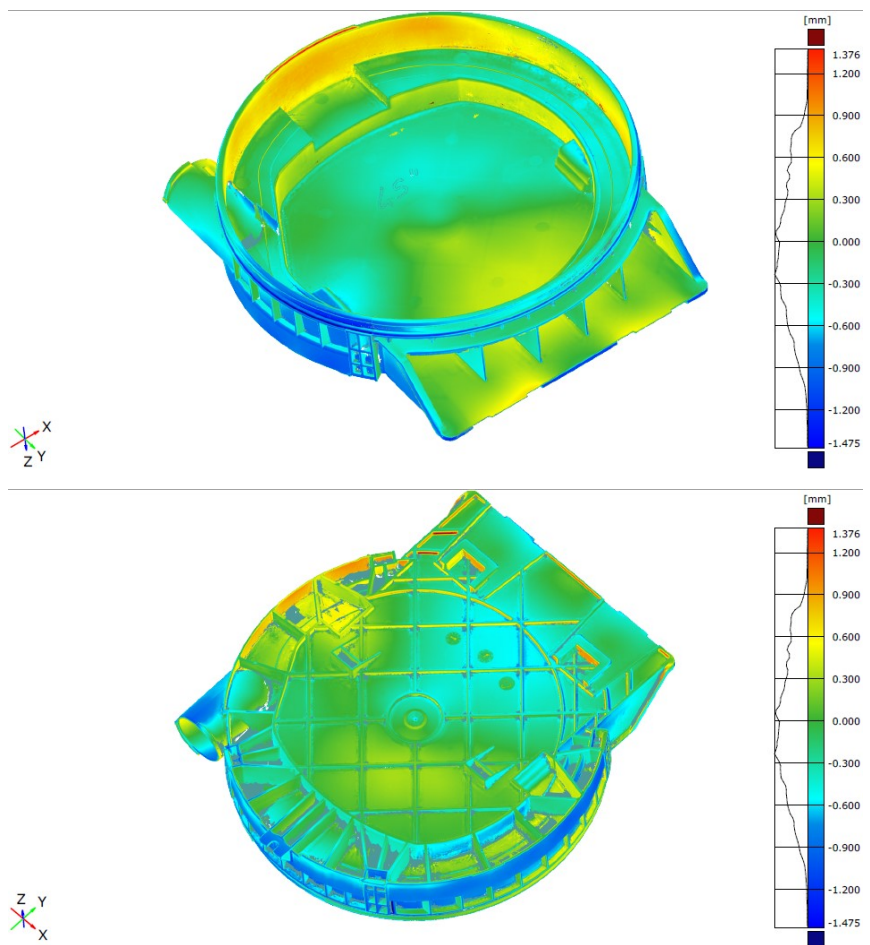
Figura 4.48 Andamento della tensione di Von Mises nel componente.



4.4 - CONFRONTO

Nelle figure 4.49 e 4.50 sono rappresentate le deformazioni reali, ovvero i risultati della fase di warpage del componente realmente stampato in PP dall'azienda. Quindi, è possibile effettuare, a livello qualitativo, un confronto tra le deformazioni ottenute dalla simulazione e quelle reali del componente. L'entità delle deformazioni ottenute dalla simulazione è in linea con quelle reali riscontrate sul componente: le deformazioni nella simulazione variano in un range compreso tra 0 e 2.297 mm, mentre il range ottenuto dalla scansione del componente reale va da -1.475 a 1.376 mm, il che fornisce un intervallo di circa 2.8 mm, molto vicino a quello della simulazione. Dunque, la simulazione risulta leggermente migliorativa rispetto al caso reale, tuttavia le problematiche post stampaggio (fase di warpage) vengono comunque evidenziate dal software nelle aree corrette del componente. Anche nel warpage reale, infatti, è ben visibile la problematica principale riscontrata nella simulazione, ovvero una deformazione non uniforme rispetto al centro del componente che porta inevitabilmente ad una non perfetta tolleranza geometrica di circolarità del pezzo stesso. Dalla somiglianza dei risultati riscontrati dal confronto tra le deformazioni reali e quelle ottenute dalla simulazione, possono essere fatte due importanti considerazioni: i parametri di processo scelti per la simulazione sono verosimili; la simulazione fornisce dei risultati di fondamentale importanza per la corretta progettazione del componente.

Figure 4.49 e 4.50 Deformazioni reali del componente stampato.



5 - CONCLUSIONI

Nel lavoro presentato sono state studiate le principali proprietà chimiche e fisiche dei polimeri, evidenziandone le qualità ingegneristiche che li contraddistinguono dagli altri materiali. In particolare, l'elaborato si è concentrato con attenzione sul processo di stampaggio ad iniezione delle materie plastiche, analizzandone le varie fasi che lo compongono; a tale scopo, sono stati evidenziati i principali parametri di processo e le caratteristiche reologiche del materiale utilizzato, determinanti, queste ultime, per la qualità del prodotto finito. Nell'ultima parte, è riportata la simulazione svolta, esponendo il processo logico con la quale è stata impostata e riportando i risultati ottenuti. Attraverso questi, è stato possibile effettuare un confronto con il componente realmente stampato ed evidenziare quali sono le zone più critiche del pezzo durante il processo di stampaggio ad iniezione. In particolare, sono state individuate le zone che possono essere più soggette alla comparsa di difetti come i vuoti, che rappresentano un problema molto importante per i componenti soggetti a carichi, in quanto sono un fattore di concentrazione degli sforzi. I grafici delle tensioni residue, soprattutto quello delle tensioni di taglio, hanno consentito di riscontrare delle problematiche nella parte piana inferiore del componente. Le tensioni residue sono molto problematiche, in quanto vanno a sommarsi algebricamente alle tensioni che risultano dai carichi di lavoro e dai cicli termici a cui il componente viene sottoposto quando è in condizioni di lavoro. Le parti caratterizzate da tensioni residue possono, dunque, essere soggette a deformazioni eccessive o a rotture indesiderate.

I risultati di maggior interesse si sono rivelati essere quelli della fase di warpage, in quanto hanno evidenziato delle deformazioni, nelle fasi successive all'espulsione del componente dallo stampo, tali da comprometterne la circolarità, una tolleranza geometrica fondamentale per il corretto funzionamento della parte.

Un'ultima considerazione da fare, come è stato già accennato nel capitolo precedente, è il fatto che la simulazione effettuata per questo studio non è stata unica, ma è stata preceduta da una serie di simulazioni di prova che sono state fondamentali per settare correttamente i parametri di progetto per lo stampaggio. Questo fatto mette in luce il ruolo centrale dell'utilizzo dei programmi CAE, già nella fase di progettazione di un componente. Ricorrendo alle simulazioni, le quali permettono di effettuare una previsione preventiva del verificarsi di deformazioni o difetti, i produttori possono migliorare la resa del prodotto, senza dover effettuare prove di stampaggio aggiuntive. In generale, quando si devono affrontare le problematiche riguardanti i difetti di un componente, la soluzione tradizionale è l'utilizzo del metodo "trial and error", ovvero ripetere il test dello stampo e la sua modifica fino all'ottenimento delle specifiche di progetto richieste; questo metodo richiede una elevata quantità di tempo, manodopera e costi elevati per essere attuato. Sfruttando l'assistenza degli strumenti CAE (Computer Aided Engineering), il processo di produzione diventa più efficiente e la qualità del prodotto migliora, mentre gli scarti vengono ridotti, con benefici aggiuntivi anche a livello ambientale. Dai risultati delle analisi CAE, è possibile esplorare le cause dei problemi riscontrati in un componente ed eseguire e testare diverse modifiche di progettazione per trovare la soluzione più appropriata, la quale non è ottenibile, con altrettanta semplicità, ricorrendo al metodo tradizionale per tentativi ed errori.

Gli interessanti spunti forniti da questo elaborato rappresentano un punto di partenza per l'attuazione di efficaci soluzioni alle problematiche riscontrate. Ad esempio, una possibile soluzione per ridurre i difetti evidenziati potrebbe essere quella di ricorrere ad un diverso materiale (dopo una opportuna analisi costi-benefici) per la realizzazione del componente stesso; questa è anche la strada che sta intraprendendo l'azienda Sabaplast per migliorare la qualità e le proprietà del prodotto finale.

6 - BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

_ Wang Maw-Ling, Chang Rong-Yeu, Hsu Chia-Hsiang (David), *Molding Simulation: Theory and Practice*, Hanser Publishers, (2018)

_ Smith William F., Hashemi Javad, *Scienza e tecnologia dei materiali*, McGraw Hill Education, (2016)

_ Doi M., Edwards S. F., *The Theory of Polymer Dynamics*, Clarendon Press, (1988)

_ Bayer MaterialScience LLC, *Part and Mold Design*, Bayer MaterialScience LLC, Pittsburgh, PA, (2000)

_ P. K. Kennedy, *Flow Analysis of Injection Molds*, New York, USA: Hanser, (1995)

_ Brückner S., Allegra G., Pegoraro M., La Mantia F.P., Di Landro L., Malinconico M., Scaffaro R., Paoletti S., Donati I., *Scienza e tecnologia dei materiali polimerici*, Edises, (2016)

_ Moldex3D, [Online]. Sito: <https://www.moldex3d.com/en/>