

Università degli studi Modena e Reggio Emilia

Dipartimento di ingegneria “Enzo Ferrari”

Corso di laurea magistrale in Ingegneria del Veicolo

Design for injection molding di una mostrina estetica per veicoli di alta gamma

Relatore:

PROF. FRANCESCO LEALI

Candidato:

Lorenzo Benincasa

Correlatori:

ING. CORRADO CARRERI

PROF. FRANCESCO GHERARDINI

MATTIA GRENZI

Anno Accademico 2024/2025

Indice

Abstract	3
1 Introduzione	5
1.1 Le materie plastiche e la società	5
1.2 Le materie plastiche in ambito automotive	6
1.3 Il tema della sostenibilità	8
1.4 Cenni storici ai polimeri	13
1.5 Molecole degli idrocarburi	14
1.6 Chimica e struttura molecolare delle molecole polimeriche	15
1.6.1 Peso molecolare	16
1.6.2 Forma delle molecole	16
1.6.3 Struttura molecolare	17
1.6.4 Configurazioni molecolari	19
1.7 Fenomeni di cristallizzazione, fusione e transizione vetrosa nei polimeri	23
1.7.1 Cristallinità dei polimeri	23
1.7.2 Processi di fusione e transizione vetrosa	24
1.7.3 Fattori che influenzano T_m e T_g	26
1.8 Caratteristiche termo-meccaniche dei polimeri plastici	28
1.8.1 Panoramica	28
1.8.2 Effetto dei fattori legati alla struttura della catena	31
1.8.3 Tecniche per migliorare le proprietà di un polimero	32
1.8.4 Additivi nei polimeri	33
1.9 Classificazione dei polimeri	34
1.9.1 Polimeri termoplastici	35
1.9.2 Polimeri termoindurenti	36
1.10 Processi industriali di molding	36
1.11 Panoramica sullo stampaggio ad iniezione	37
1.11.1 Fasi principali del processo	39
1.11.2 Sistema di alimentazione e circuito di raffreddamento	41
1.11.3 Linee guida per injection molding	44
1.11.4 Difetti Injection Molding	46
1.12 Presentazione del componente mostrina	52
1.13 Valutazione del processo produttivo	53
1.14 Mostrina seconda serie	55
1.14.1 Caratteristiche dimensionali e geometriche	55

2	Obiettivi, metodo adottato e strumenti utilizzati	59
2.1	Requisiti e target associati alla mostrina	59
2.2	Selezione preliminare dei materiali	60
2.3	Metodo sviluppato per l'analisi	62
2.4	Introduzione al software Moldex 3D	65
3	Risultati casistiche di simulazione	69
3.1	Modellazione mostrina e sistema di alimentazione in CATIA V5 . . .	69
3.2	Simulazione con iniezione diretta centrale	72
3.2.1	Preparazione modello ed impostazione mesh	73
3.2.2	Settaggio parametri di processo	75
3.2.3	Discussione dei risultati	77
3.2.4	Analisi finale delle simulazioni	86
3.3	Inseriti di iniezione a banana	86
3.4	Passaggio ai 3 punti di iniezione	88
3.5	Passaggio ai 5 punti di iniezione	91
3.5.1	Ottimizzazione parametri di processo	93
3.5.2	Scatolamento della mostrina	107
3.5.3	Proposta modifica di stile: raggi di raccordo	110
3.5.4	Adattamento preventivo cavità stampo	113
4	Conclusione e sviluppi futuri	117
	Bibliografia e sitografia	119

Abstract

Sempre più, nel mondo moderno, i materiali polimerici rivestono un ruolo di primissimo piano.

Dati i loro indubbi vantaggi, fra questi la loro versatilità, leggerezza, costo contenuto e la relativa semplicità con la quale i manufatti in plastica possono essere realizzati in grandi volumi, il loro impiego spazia fra i settori più disparati dell'industria, riescono a soddisfare, ad esempio, requisiti di igienicità (basti pensare al settore culinario), fino a requisiti di sicurezza ed elevate prestazioni meccaniche (come nel caso del settore automotive).

Allo stesso tempo, però, vi è la crescente necessità di educare la società ad un concetto di economia circolare della plastica più concreto e semplice da applicare.

Molte realtà del settore automotive si sono già mosse in questo senso, indirizzando sempre più risorse alla ricerca di materiali innovativi con una componente naturale sempre crescente.

Dopo una rassegna abbastanza corposa e dettagliata sui materiali polimerici, la loro origine, la descrizione della struttura a livello molecolare, e di come questa influenzi in maniera decisiva le loro caratteristiche termo-meccaniche, seguirà un'introduzione al processo di stampaggio ad iniezione, ad oggi tra i più impiegati a livello industriale, principalmente per l'elevata qualità dei prodotti.

Successivamente, seguirà la presentazione dell'oggetto di analisi del seguente elaborato: una mostrina estetica relativa ad un veicolo di alta gamma.

L'esperienza del cliente con la prima serie di questa vettura, ha reso necessario un ristudio della mostrina.

Tra le ragioni che hanno portato a tale scelta, quella principale è stata la difficoltà nell'ottenere un prodotto con una buona finitura superficiale appena estratto dallo stampo, nello specifico che fosse immediatamente verniciabile, senza la necessità di eseguire lavorazioni secondarie.

Ciò ha comportato la scelta di un nuovo processo tecnologico e di un nuovo materiale da impiegare.

A partire dalla descrizione delle caratteristiche geometriche e dimensionali del pezzo, si proseguirà illustrando gli obiettivi ed i requisiti qualitativi associati e la loro interpretazione come target tecnici.

In seguito, dopo una breve introduzione allo strumento CAE utilizzato per eseguire le simulazioni necessarie allo studio svolto, Moldex 3D, verranno illustrate tre principali famiglie di simulazione: una prima semplificata al fine di valutare principalmente la bontà dei materiali selezionati per realizzare il componente, una seconda intermedia con un layout più specifico di sistema di iniezione, ed una terza con due varianti di layout definitivi di iniezione, i quali sono stati approfonditi seguendo

diverse strade, lavorando sul processo, oltre che sul potenziamento della geometria della mostrina.

Alla fine della spiegazione del setup di ogni caso simulativo, verranno discussi i risultati, confrontate le diverse soluzioni, valutando infine se i target previsti siano stati raggiunti.

Infine, verranno stilate le conclusioni, proponendo spunti ed idee per un possibile futuro miglioramento del lavoro svolto.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Le materie plastiche e la società

La plastica è largamente diffusa in tutto il mondo ed in qualunque ambito.

A livello pratico presenta indubbi vantaggi, quali la relativa semplicità con la quale la si riesce a produrre, i costi relativamente contenuti sia a livello di produzione che al momento dell'acquisto, l'immediatezza e la sua utilità nella vita di tutti i giorni. I prodotti plastici trovano spazio in tutti i settori dell'industria, in maniera diretta o indiretta.

In uno studio curato da **ECCO**, la prima organizzazione Italiana non-profit dedicata alla discussione sul cambiamento climatico e alla proposta di soluzioni per contrastarlo, in collaborazione con **Greenpeace Italia**, **SPRING - il cluster italiano della Bioeconomia Circolare** e le **Università di Padova e Palermo**, durante un workshop a tema “**Decarbonizzazione della filiera della plastica**”, sono emersi i dati ufficiali riguardanti la situazione dell'industria delle materie plastiche in Italia ed in Europa.

Nel rapporto del 2022, basandosi sui dati degli anni precedenti, è emerso come **l'Italia sia il secondo Paese consumatore di plastica in Europa: nel 2020 sono state consumate 5.9 milioni di tonnellate di polimeri di origine fossile, corrispondenti a quasi 100 kg a persona.** [3]

Sempre nel rapporto, viene evidenziato che **in Europa il 99% della plastica vergine viene prodotta utilizzando come materie prime petrolio e gas naturale** e i combustibili fossili vengono impiegati anche per la generazione del calore necessario durante il processo produttivo. Ciò comporta l'immissione in atmosfera di circa **1,7 kg di CO₂ per ogni kg di plastica**, considerando l'estrazione e la raffinazione dei combustibili fossili.

Il 42% della plastica consumata nel nostro Paese viene utilizzata nel settore degli imballaggi e dell'usa e getta, il 12% nell'edilizia, il 7% nel settore automotive ed il restante distribuito in molti altri settori. [3]

Essendo la plastica più pratica, meno costosa e pregiata rispetto ad altri materiali che venivano utilizzati fino a qualche decennio fa, ci ritroviamo ormai da anni a far fronte al problema dello smaltimento e in generale del trattamento dei rifiuti plastici. L'Italia, da questo punto di vista, rappresenta un caso quasi unico nel suo genere ed un esempio particolarmente virtuoso.

Basti pensare che il nostro Paese, alla fine del 2021, ha riciclato più di 10,5 tonnellate

te di rifiuti plastici (proveniente quasi esclusivamente dal settore degli imballaggi), circa il 72% del totale prodotto.

Per fare un confronto, le più recenti normative Europee hanno fissato come obiettivo per fine 2025 una quota del 65% di riciclato e per il 2030, il target è stato fissato al 70%.

Inoltre, il tasso di riciclo medio fra i paesi dell'Unione Europea si attesta attorno al 30% circa.

Durante la conferenza, inoltre, è emersa la necessità di adottare campagne di sensibilizzazione più efficaci riguardo la tematica ambientale e soprattutto, a livello pratico, aumentare la consapevolezza delle persone sin dal momento dell'acquisto di articoli che coinvolgono le materie plastiche.

La stessa raccolta differenziata risulta ancora insoddisfacente dal punto di vista della qualità di selezione e conferimento dei materiali.

Alcuni paesi hanno adottato una soluzione interessante per cercare di migliorare il "rapporto" fra la popolazione e la plastica, il cosiddetto **deposito con cauzione**.

In parole semplici, ai prodotti designati, viene applicata una sovratassa di alcune decine di centesimi che i consumatori dovranno pagare in aggiunta al prezzo solito al momento dell'acquisto di quello specifico articolo.

Una volta che il contenuto sarà esaurito, quella quota potrà essere recuperata a patto che l'involucro in plastica venga restituito alle autorità o società di competenza. Nei paesi in cui tale regola è stata introdotta, ha portato a benefici tangibili: i tassi di raccolta, in alcuni casi, hanno raggiunto il 94%.

Anche in Italia si sta discutendo la possibilità di introdurre un provvedimento simile, nonostante la raccolta differenziata funzioni già piuttosto bene.

Il tema delle bioplastiche è inoltre sempre più in voga: materiali simili alla plastica in termini percettivi e a livello di requisiti e prestazioni, ma con almeno una minima componente di origine vegetale, di cui l'Italia ne è una delle maggior produttrici a livello globale, basti pensare che esse valgono circa il 6% del mercato nazionale (in termini di produzione).

1.2 Le materie plastiche in ambito automotive

Fino a diversi decenni addietro l'industria automotive prendeva in considerazione solamente i materiali metallici per la realizzazione di un qualunque mezzo a motore (specialmente acciai e alluminio), al giorno d'oggi, con lo sviluppo accelerato delle tecnologie produttive che ha coinvolto l'intero panorama industriale, i polimeri sono ormai capaci di soddisfare ampiamente i rigorosi requisiti dell'industria automobilistica in termini di performances e sicurezza.

Essi risultano mediamente piuttosto leggeri, garantiscono delle elevate prestazioni specialmente in rapporto alla loro densità, inoltre risultano decisamente meno costosi e molto più facilmente lavorabili rispetto ai materiali metallici impiegati, ad esempio, per le parti di scocca vettura.

Per quanto riguarda gli interni ormai il loro utilizzo è decisamente consolidato, ad oggi iniziano ad essere impiegati sempre più anche per l'esterno vettura.

Uno dei principali driver che ha spinto la ricerca e l'impiego di materiali plastici in ambito automotive è stato proprio la loro **leggerezza** e la loro **malleabilità** in termini di requisiti estetici, con relativa semplicità.

Queste peculiari caratteristiche, hanno aperto prospettive estremamente interessanti per il futuro.

Vi sono diversi esempi significativi di impiego di materie plastiche in ambito automotive:

- **il polycarbonato (PC) ed il polipropilene (PP)** sono largamente impiegati, ad oggi, per la produzione di paraurti (anteriori e posteriori), opportunamente rinforzati con strutture metalliche, con le quali riescono ad integrarsi piuttosto bene.
- **L'ASA (acrilonitrile stirene acrilato, il cui nome commerciale è Gelov o Luran)**, alternativa del più comune ABS, possiede delle notevoli proprietà di resistenza agli agenti chimici, agli agenti atmosferici e una buona resistenza agli urti.
Per questo motivo, può essere impiegato per la realizzazione di calotte per specchietti retrovisori e di griglie per radiatori.
- **PPA (poliftalamide, il cui nome commerciale è Amodel o Zytel)**: materiale polimerico plastico con eccellenti proprietà termiche, quali un elevato punto di fusione ($T_m=595\text{ K}$) ed una temperatura di transizione vetrosa anch'essa piuttosto elevata ($T_g=410\text{ K}$).
Le applicazioni più comuni includono parti del motore, connettori della linea del carburante, pompe di raffreddamento, boccole, cuscinetti nei motori aeronautici, scambiatori di calore ad aria, componenti e scudi termici del carter del motore, valvole di intercettazione del carburante e del collettore del riscaldatore dell'acqua, alloggiamenti motore e componenti dei fari.

Molte soluzioni ibride vengono già largamente impiegate per l'automotive premium, quali paraurti in polycarbonato, ad esempio, rinforzati con fibra di vetro (o di carbonio).

Hanno la capacità di riuscire ad assorbire efficacemente l'energia liberata dagli urti, garantendo il rispetto delle normative riguardo la sicurezza degli occupanti e dei pedoni in caso di incidente (proteggono inoltre il motore, radiatore e gli altri componenti posti nella zona anteriore della vettura).

- Materiali come **ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene)**, vengono impiegati per realizzare la copertura esterna degli specchietti retrovisori, la quale deve rispondere a requisiti come resistenza alle sollecitazioni causate dal passaggio della vettura su dossi o manto stradale sconnesso, agenti atmosferici, irraggiamento solare insistente, umidità e così via.
- **PVB (Polivinilbutirrale) o le fibre di poliestere** sono coinvolti nella realizzazione degli airbag, cinture di sicurezza o seggiolini per bambini.

Un punto di forza notevole è rappresentato dalla possibilità di integrare componenti quali additivi di vario genere al fine di migliorare le performances meccaniche delle parti in plastica, oltre che conferire particolari attributi e caratteristiche di natura estetica e funzionale (come la resistenza allo scolorimento dovuto all'irraggiamento solare).

Per capire quanto vasto possa essere il potenziale di questo tipo di materiali, una statistica molto interessante è stata riportata da un'azienda leader nel mercato asiatico nel settore dello stampaggio ad iniezione di parti in materiale plastico: **Odin Mould**.

Secondo questa ricerca, dopo il 2000, la quota di mercato dei serbatoi per carburante, in **plastica**, ha superato il 90% negli Stati Uniti ed in Giappone, sovrastando quelli in metallo classico, ancora utilizzati in alcuni particolari contesti. [5]

La maggior parte delle plastiche ha la capacità di smorzare efficacemente le vibrazioni meccaniche, garantendo un comfort ottimale, oltre che di attutire parzialmente i rumori provenienti dall'esterno, contribuendo all'isolamento acustico dell'abitacolo. La maggior parte dei polimeri plastici, è capace di resistere a condizioni di lavoro particolarmente ostili, in presenza di agenti chimici (anche molto corrosivi), ambienti umidi e in generale ambienti che favoriscono e supportano il processo degradativo. L'interesse nei confronti dei materiali plastici applicabili all'intera vettura (anche esternamente) è molto vivo nel mercato dei veicoli totalmente elettrici (BEV), specialmente quelli di media-piccola taglia.

Difatti, una delle principali problematiche che affligge questa categoria di veicoli è l'importante surplus di massa dovuto alla presenza del pacco batterie che va a contribuire in maniera non indifferente al totale.

Questa è infatti la principale ragione per la quale la trazione completamente elettrica è particolarmente svantaggiata per i veicoli pesanti e viene presa poco in considerazione.

A differenza della ridotta dimensione dei motori, a parità di potenza e coppia erogate rispetto ad un classico ICE, le moderne batterie agli ioni di litio sono caratterizzate da valori di **densità volumetrica di energia (kWh/m^3) estremamente bassi**, il che rende necessario, un maggior ingombro all'interno dell'abitacolo della vettura.

1.3 Il tema della sostenibilità

Un altro tema, al centro dell'attenzione delle aziende e delle istituzioni da ormai diversi anni, è quello della sostenibilità energetica, ambientale ed economica.

Essendo i polimeri più leggeri dei metalli, oltre alla riduzione dei pesi dei veicoli, che comporta un minor quantitativo di energia necessaria ad alimentarli, di conseguenza ridotte emissioni inquinanti allo scarico (e non solo), vi è anche una riduzione del consumo energetico in fase di fabbricazione delle singole parti, poiché i metodi di produzione sono più rapidi e meno dispendiosi in termini di manodopera.

Un esempio significativo è rappresentato dalle lenti dei fari, le quali vengono ad oggi spesso realizzate in policarbonato (PC), il quale sostituisce il classico vetro.

Basti pensare che il PC costa circa 1.5 dollari al kg, a dispetto dei 2 dollari al kg del vetro.

Mentre sul singolo pezzo la differenza è irrisoria, in termini di produzione di massa, l'impatto sui costi è chiaramente percepibile.

Solamente alcune di queste plastiche, con specifiche formulazioni chimiche, sono quasi interamente riciclabili (solitamente a questa categoria appartengono i cosiddetti **termoplastici**), al contrario i **termoindurenti** non sono riciclabili, vengono spesso destinati al rimpiego come materiale aggiuntivo per il catrame per realizzare strade, marciapiedi ed altre opere pubbliche.

Come sottolineato da diversi studi, si tende istintivamente a pensare che le emissioni inquinanti generate da una moderna automobile siano da imputare esclusivamente all'alimentazione del motore, quindi al tipo e alla quantità di carburante utilizzato per la trazione vettura.

In realtà, le cose sono molto più complesse.

Questa visione è probabilmente viziata dal fatto che si tende a concentrare l'attenzione sempre sul prodotto finale, ciò di cui possiamo avere esperienza diretta, senza pensare al mondo che vi è dietro quell'oggetto.

Nel caso di un'automobile, intendiamo l'intero ciclo di vita della vettura, dalle prime fasi di concezione del progetto al termine della sua vita.

Il punto di vista delle cose sta progressivamente evolvendo, specialmente con l'avvento delle auto elettriche nel confronto con le varianti termiche.

In questa visione allargata, rientra anche la produzione, utilizzo e smaltimento delle materie plastiche, come già detto particolarmente abbondanti specie negli interni vettura.

Si stima che nel solo mercato automotive si impieghino, ogni anno, circa 14 milioni di tonnellate di plastica.

L'Unione Europea vorrebbe imporre, entro pochi anni, che le nuove vetture immesse nel mercato debbano essere composte da plastica riciclata per una quota minima del 25% del totale.

Nonostante le regolamentazioni sempre più complesse e stringenti abbiano già in parte accelerato il cambiamento, l'obiettivo, ad oggi, sembra piuttosto ambizioso, in quanto c'è poca coordinazione sull'intera filiera fra le diverse parti in gioco, oltre che forse una scarsa volontà di prendere una strada nuova ed inesplorata anche a causa dei forti interessi dell'industria petrolchimica.

Una soluzione di "immediata" applicabilità consiste nel **riciclo meccanico delle plastiche**, che prevede la frantumazione, fusione e riformulazione dei materiali senza modificarne la struttura chimica.

Il processo, però, è comunque ancora troppo dipendente dalla qualità estremamente variabile del prodotto riciclato e dai costi di lavorazione.

In alternativa, il **riciclo chimico** potrebbe risultare più efficace e garantire una qualità media dei prodotti più elevata.

Esso consiste, passando per specifici processi chimici, nella scomposizione del componente plastico in monomeri (costituenti fondamentali) o materie prime, i quali possono essere poi ricombinati per realizzare nuovi prodotti con proprietà rigenerate.

Il riciclo chimico non è ancora disponibile su larga scala a causa dei costi molto elevati e della complessità dei processi coinvolti.

Una terza possibilità è quella di installare impianti noti come **termovalorizzatori**, centrali che mirano a produrre energia elettrica sfruttando i rifiuti.

Questa idea nasce da una considerazione importante: le comuni plastiche hanno origine da petrolio, gas ed in generale da molecole di idrocarburi, per questo motivo possono essere teoricamente impiegati come combustibili, una volta fatti bruciare, rilasciano un certo quantitativo di energia.

I termovalorizzatori mirano a sfruttare questa loro proprietà per produrre energia elettrica, esattamente come una centrale termoelettrica, a partire, però, dall'incenerimento dei rifiuti.

Di positivo c'è che, con le modalità di combustione studiate all'interno di questi impianti, grazie alle elevate temperature in gioco, il rilascio di diossine ed altri agenti inquinanti risulta molto basso.

Per non parlare del fatto che essi potrebbero letteralmente ripulire le città, specialmente quelle più grandi, dai rifiuti che formano grandi agglomerati ai lati delle strade, migliorando notevolmente la qualità di vita.

In Italia sono attualmente operativi circa 37 impianti, principalmente distribuiti nel Nord Italia.

Alcuni dei paesi più popolosi del mondo ne contano già diverse centinaia, ad esempio la Cina ne ha circa 300 in funzione.

Sulla carta l'idea è estremamente convincente, ma come tutte le cose, essa deve scontrarsi con le necessità e le problematiche del mondo reale.

In primis questi impianti hanno dato vita ad un tema sociale molto acceso: nessuno vorrebbe delle centrali di produzione di energia nelle quali, ogni giorno, vengono scaricate ed ospitate tonnellate e tonnellate di rifiuti proprio di fianco alla propria abitazione.

Inoltre, esse risultano costose da realizzare e da mantenere correttamente in funzione, oltre il fatto che, per lavorare con un **rendimento sufficientemente elevato**, devono operare su un **regime costante**. Quest'ultimo aspetto, implica che in alcuni casi potrebbe essere necessario acquistare rifiuti dall'estero.

Bisogna sottolineare anche che i termovalorizzatori sono di per sé estremamente complessi al fine di poter funzionare nel rispetto delle normative antinquinamento più recenti, includono infatti sistemi come depuratori, precipitatori elettrostatici e particolari filtri capaci di catturare i composti da non dover rilasciare nell'ambiente. Purtroppo, non in tutti i paesi che adottano questa soluzione vi sono delle regole ferree, chiare ed aggiornate riguardo il corretto utilizzo di questi impianti.

Ancor peggio, in molti casi, al fine di poter risparmiare sulla manutenzione e sul controllo periodico delle emissioni delle centrali, le leggi che normano il loro funzionamento vengono parzialmente o totalmente ignorate.

Questa circostanza è assolutamente da evitare, in quanto il lavoro stesso delle centrali risulterebbe completamente vano.

In ottica futura, bisogna considerare che, con l'aumento costante del numero delle centrali in tutto il mondo, il loro contributo all'**effetto serra**, comincerebbe a pesare in maniera non indifferente.

Uno studio riporta che nel 2016, gli Stati Uniti hanno rilasciato, in atmosfera, circa 12 milioni di tonnellate di anidride carbonica, della quale la metà proveniva dal ciclo della plastica. [7]

In ogni caso, moltissimi studi hanno confermato che l'incenerimento dei rifiuti plastici, rispetto ai processi di riciclaggio, risulta in pratica sempre sconveniente dal punto di vista energetico.

Ciò deriva anche dal fatto che, riciclando la plastica, si riduce la necessità di estrazione di idrocarburi di origine fossile per produrne di nuova.

La crescente sensibilità nei confronti delle tematiche ambientali ha spronato gli addetti ai lavori a cercare di sperimentare soluzioni innovative, possibilmente di origine naturale, a sostituzione almeno parziale dei materiali polimerici classici.

Sempre più spesso sentiamo parlare di **bioplastiche**, le quali rappresentano sicuramente un'alternativa sulla carta molto valida, la completa sostituzione però delle

plastiche convenzionali è ancora relegata ad un futuro piuttosto remoto.

L'Italia, nel contesto Europeo, è uno dei paesi leader nella produzione di materie bioplastiche per svariati usi.

L'idea alla base di questi materiali innovativi sta nell'incentivare il concetto di **circularità dell'economia**, le bioplastiche deriverebbero principalmente da materiale di scarto di colture agricole (quale ad esempio la cellulosa prodotta a partire da piante di barbabietola da zucchero, lino e similari).

Alla fine della loro vita, esse diverrebbero fertilizzanti per alimentare il terreno per le nuove colture che, a loro volta, fornirebbero la nuova materia prima per le industrie produttrici di materiale plastiche.

L'intento è quello di cercare di sostenere le realtà industriali cercando di indirizzare progressivamente una percentuale sempre maggiore di investimenti verso attività economiche in linea con gli obiettivi climatici a lungo termine, preservando al contempo la loro competitività nei mercati globali di riferimento.

Per ora, l'impiego anche solo marginale di bioplastiche gode purtroppo di una marcata esclusività, sono di fatto circoscritte al mondo racing ed al mercato delle auto di alta e altissima gamma (lusso e sportive).

Oltre a ciò di cui appena discusso, negli ultimi anni sta crescendo l'interesse nei confronti delle **fibre naturali**.

Uno degli esempi più significativi riguarda l'impiego della fibra di lino al posto della fibra di carbonio classica, sperimentata da McLaren per la sua vettura di F1 già nel 2020, durante i test pre-stagionali in Bahrain.

Un esempio applicativo è quello riportato nelle figure 1.1, 1.2 e 1.3.

L'idea della fibra di lino è scaturita da esigenze regolamentari in termini di peso vettura.

McLaren stima che l'impatto ambientale in termini di emissione di CO₂, con questa soluzione innovativa, si sia ridotto del 75%.

Le proprietà meccaniche, tra l'altro, sono assolutamente comparabili e questa fibra naturale manifesta eccellenti capacità di smorzamento delle vibrazioni, oltre che un margine di risparmio di peso non indifferente.



Figura 1.1: Sedile in fibra di carbonio (sx) vs sedile in fibra naturale (dx). [8]



Figura 1.2: Dettaglio fibra di lino per sedile McLaren F1. [8]



Figura 1.3: Trama posteriore fibra di lino sedile McLaren F1. [8]

Anche Ferrari, in alcuni suoi modelli, ha già avuto modo di sperimentare l'utilizzo di componenti compositi in fibra naturale come rinforzanti di normali plastiche, specialmente termoindurenti.

È stato già dimostrato come la fibra di lino, opportunamente lavorata, possa avere proprietà meccaniche abbastanza simili alla fibra di carbonio (la quale, tra l'altro, non è riciclabile), è perfettamente compatibile con i processi classici di laminazione del carbonio, in termini di costi prevalgono quelli di lavorazione, i quali sono ancora molto simili a quelli che riguardano il carbonio (la materia prima, difatti, è virtualmente gratuita, trattandosi a tutti gli effetti di erba secca e sterpaglie).

Porsche, addirittura, ha sperimentato diversi kit sulle sue vetture, realizzati interamente in fibra di lino, molti dei quali già testati in competizioni motoristiche ufficiali. (figura 1.4)

Una delle più grandi limitazioni dell'utilizzo ed impiego di tale materiale, è la sua elevata **igroscopicità**.



Figura 1.4: Bodykit installato su una Porsche 718 Cayman GT4 Clubsport MR, concorrente alla 24 ore del Nurburgring del 2021. [9]

Ciò significa che esso tenderà ad assorbire molto facilmente l'acqua, con conseguenti disastrosi effetti sulle sue proprietà fisico-meccaniche.

Per quanto riguarda la produzione di serie, i costi da sostenere sono ancora assolutamente proibitivi in relazione ai benefici ottenibili.

In quest'ultimo settore, si cerca di incentivare piuttosto l'uso di materiali plastici riciclati, che possano soddisfare da una parte i requisiti della legislazione in continuo aggiornamento, dall'altro poter essere realmente accessibili alle realtà industriali. Un esempio virtuoso, in questo senso è costituito da Volvo, la quale fa largo uso di materiali plastici **riciclati** e di origine naturale per gli interni vettura, ormai già da qualche anno.

1.4 Cenni storici ai polimeri

I primi utilizzi dei polimeri di origine naturale, sia animale che vegetale, risalgono alle epoche più remote del genere umano. Tra questi annoveriamo il legno, la gomma, il cotone, la lana, il cuoio e la seta. Altri polimeri naturali quali proteine, enzimi, amidi e cellulosa risultano fondamentali in molti processi biologici e fisiologici. Basti pensare che la cellulosa e la lignina costituiscono, messe insieme, circa il 70% della biomassa totale presente sul pianeta. Con lo sviluppo sempre più rapido delle tecnologie e capacità industriali, si è iniziato a studiare la struttura di questi materiali, al fine di poterli replicare artificialmente, dando così origine ai **polimeri sintetici**. Eventi di grande portata con la Seconda Guerra Mondiale hanno fornito un impulso decisivo in questa direzione. Rispetto ai polimeri di origine naturale, abbiamo l'enorme vantaggio di poter controllare, in maniera ormai molto fine, i processi atti a sintetizzarli. Nello specifico riusciamo a conferire determinate proprietà a questi materiali, gran parte delle volte decisamente superiori alle controparti messe a disposizione dalla natura. Inoltre, i processi coinvolti nella loro generazione sono caratterizzati da costi generalmente piuttosto contenuti. Come per metalli e materiali ceramici, anche nel caso dei polimeri le proprietà termo-meccaniche sono strettamente correlate alla loro struttura molecolare. Scopo di questo capitolo,

consiste nel fornire alcuni concetti di base essenziali al fine di comprendere l'origine chimica di questi materiali, i costituenti fondamentali, oltre che di esplorare le loro proprietà, cercando di capire come fattori come il peso molecolare e la temperatura possano incidere sulle loro prestazioni e caratteristiche.

1.5 Molecole degli idrocarburi

La gran parte dei polimeri sono costituiti da molecole **organiche**.

La maggior parte dei materiali organici ha come costituenti fondamentali le molecole di **idrocarburi**, composti formati da **carbonio** e **idrogeno**.

I legami fra atomi sono di natura **covalente**, legami chimici molto forti.

Ciascun atomo di carbonio possiede **quattro elettroni di valenza** che può condividere con altri atomi di elementi vicini al fine di formare i legami chimici.

L'idrogeno, al contrario, possiede un **solo elettrone di valenza**.

Un **legame covalente singolo**, si instaura nel momento in cui ogni atomo che vi partecipa condivide un elettrone.

Al contrario, **legami covalenti doppi e tripli** hanno luogo nel momento in cui gli atomi coinvolti mettono a disposizione del legame chimico, rispettivamente, 2 o 3 elettroni.

Un esempio molto semplice di idrocarburo, è la molecola di **etilene** (C_2H_4), la cui formula di struttura è riportata in figura 1.5.

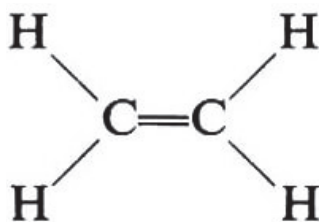


Figura 1.5: Molecola dell'etilene. [12]

Osserviamo che i due atomi di carbonio condividono 4 elettroni, realizzando così un doppio legame, al tempo stesso, mettono a disposizione 1 elettrone ciascuno nei confronti di un atomo di idrogeno rispettivamente.

Molecole che presentano legami doppi e tripli, vengono dette **insature**, dal momento che ogni atomo di carbonio non è legato al **numero massimo** di altri atomi (ovvero 4).

Questa circostanza si manifesta nella molecola di etilene.

Al contrario, una molecola di idrocarburo in cui sono presenti esclusivamente **legami saturi**, si dice **satura**.

La differenza rilevante sta nel fatto che in una molecola **insatura**, variando la disposizione di un atomo o di un gruppo di atomi laterali, è possibile aggiungere altri atomi o gruppi di atomi.

Questa cosa **non** è realizzabile in una molecola **satura**.

Abbiamo già specificato che i legami fra le molecole sono di tipo **covalente**, legami molto forti.

Al contrario, i legami che si instaurano fra **molecole**, sono molto più **deboli**, di

solito di tipo a **idrogeno** o di **Van der Waals**, pertanto, le temperature di fusione e di ebollizione **non sono molto alte**.

Un fenomeno molto interessante prende il nome di **isomeria**.

L'isomeria si ha nel momento in cui, due composti idrocarburici presentano la stessa composizione (o stessa formula bruta), ma differente disposizione spaziale.

Mettendo a confronto, ad esempio, le due molecole di **normal-butano** e **isobutano**, possiamo notare questa differenza. (figure 1.6 e 1.7)

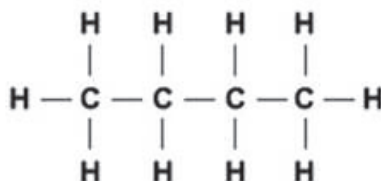


Figura 1.6: Molecola di n-butano. [12]

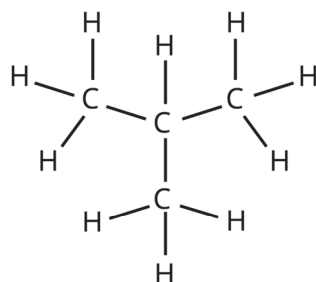


Figura 1.7: Molecola di isobutano. [12]

Alcune proprietà fisiche degli idrocarburi dipendono dal loro stato isomerico, questo aspetto verrà approfondito in seguito.

1.6 Chimica e struttura molecolare delle molecole polimeriche

Le molecole polimeriche sono originate dai **meri**, cioè le singole unità strutturali che si ripetono in successione lungo la catena del polimero stesso.

Le catene polimeriche si formano a partire dalla generazione di un mero attivo dato dalla reazione tra un iniziatore o specie catalitica (indicato spesso, per semplicità, con **R**) ed una molecola di idrocarburo semplice, prendiamo come esempio l'etilene, di cui abbiamo già visto prima la struttura molecolare.

In opportune condizioni di temperatura e pressione, in presenza di un **catalizzatore** di reazione, **l'etilene** (che possiamo trovare a pressione e temperatura ambiente sotto forma di **gas**), si trasforma in **polietilene** (il quale invece si presenta sotto forma di **solido**).

Altre molecole polimeriche, si formano semplicemente per sostituzione degli atomi di idrogeno con altri elementi.

Ad esempio, a partire dal polietilene, sostituendo tutti gli atomi di idrogeno con atomi di **fluoro**, si ottiene un polimero chiamato *politetrafluoroetilene* **PTFE**, conosciuto con il nome commerciale di **Teflon**, il quale appartiene alla famiglia dei **fluorocarburi**.

Sostituendo **un solo** atomo di idrogeno con uno di cloro, si ottiene il **cloruro di polivinile (PVC)**, mentre la sostituzione di ogni atomo di cloro con un **gruppo metile (CH_3)**, comporta la formazione del *polipropilene* **PP**.

Non è detto che le unità monomeriche presenti in una catena polimerica siano tutte dello stesso tipo, in questo caso parliamo di **copolimeri**.

Se invece le unità monomeriche sono tutte dello stesso tipo, allora parliamo di **omopolimeri**.

Come nel caso dell'etilene, i monomeri vengono detti **bifunzionali** quando presentano **due legami attivi** in grado di formare legami covalenti con altri monomeri al fine di dare origine a catene più lunghe (polimeri).

Esistono anche monomeri **trifunzionali**, come il *fenolo-formaldeide*, ovvero che hanno **tre legami attivi** in grado di formare una struttura a rete che si espanderà nello spazio, quindi tridimensionale.

1.6.1 Peso molecolare

In generale, il peso molecolare di catene polimeriche più **lunghe** risulta essere più **grande**.

Durante il **processo di polimerizzazione**, nel quale vengono sintetizzati polimeri complessi a partire dall'unione di molecole più piccole, non è detto che tutte le molecole raggiungano la stessa lunghezza.

A questo proposito, si parla più appropriatamente di **distribuzione di lunghezze** e di **pesi molecolari**.

Non seguirà alcun approfondimento in questa sede di tale tematica, molto articolata e complessa da sviscerare, eccessiva per le nostre finalità di studio.

Ci limitiamo a dire che moltissime caratteristiche dei polimeri dipendono dall'entità del peso molecolare.

Una di queste è sicuramente la temperatura di fusione, la quale **cresce** al crescere del peso molecolare stesso (per un peso molecolare medio sino a circa $100\,000\text{ g/mol}$).

È inoltre possibile stilare una classificazione dei polimeri sulla base proprio del peso molecolare come segue:

- **Polimeri allo stato liquido o gassoso**: caratterizzati da catene molto corte e pesi molecolari dell'ordine dei 100 g/mol .
- **Solidi cerosi (come cere, paraffine o resine morbide)** : caratterizzati da catene più lunghe e pesi molecolari attorno ai 1000 g/mol .
- **Polimeri solidi**: noti anche come **alti polimeri**, sono caratterizzati da pesi molecolari che vanno da circa $10\,000$ a diversi milioni di g/mol .

1.6.2 Forma delle molecole

Anche se per una questione di immediatezza e semplicità vengono sovente schematizzate linearmente su un piano, è necessario tener presente che le catene polimeriche

possono presentare differenti conformazioni a zig-zag, sia nello spazio che nel piano.

Questo è dovuto al fatto che i legami interatomici possono ruotare e flettersi.

Inoltre, se un atomo presenta un certo angolo rispetto alla direzione principale della catena, esso può posizionarsi in qualunque punto della circonferenza determinata dal cono di rivoluzione caratterizzato da quello specifico angolo.

Per questo motivo, è molto facile che una catena polimerica possa assumere delle particolari forme, quasi casuali, intrecciate e ritorte, con cappi, piegamenti e contorcimenti. (figura 1.8)

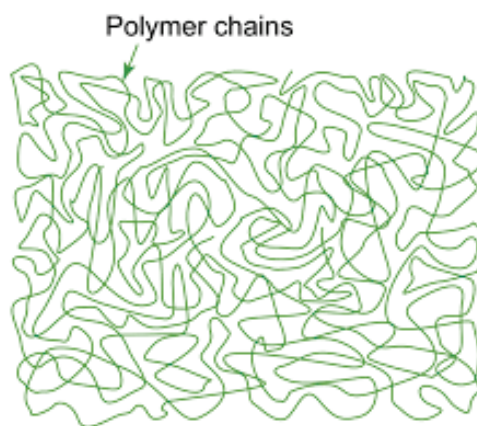


Figura 1.8: Classica struttura a gomitolo di una catena polimerica. [12]

È doveroso notare che la distanza inizio-fine della catena, è solitamente molto più breve della lunghezza complessiva della catena.

Questa caratteristica peculiare delle lunghe catene polimeriche di presentare aggrovigliamenti e strutture con disposizione casuale, è all'origine di alcune delle proprietà più importanti per un polimero, tra queste la **grande estensibilità elastica offerta**, specialmente dalle **gomme**.

A questo proposito, molte caratteristiche meccaniche e termiche di un polimero dipendono dalla capacità dei diversi segmenti di ruotare in risposta a sforzi applicati od oscillazioni termiche (**proprietà reologiche**).

Ad esempio, la presenza di un doppio legame fra due atomi di carbonio implica una maggior rigidità della struttura molecolare, così come la presenza di uno o più gruppi laterali voluminosi impediscono, almeno parzialmente, i movimenti rotazionali.

1.6.3 Struttura molecolare

Sino ad ora abbiamo parlato della forma delle molecole polimeriche e del loro peso molecolare, sottolineando come queste due caratteristiche incidano su alcune proprietà dei polimeri.

Descriveremo, di seguito, le diverse **configurazioni strutturali** possibili per le catene polimeriche, rappresentate schematicamente in **figura 1.9**:

Polymer Structure

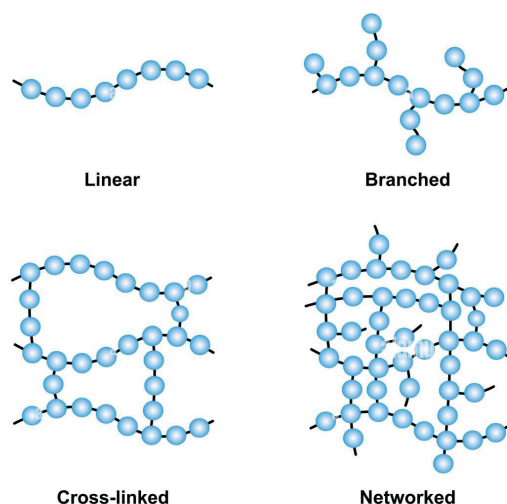


Figura 1.9: Le quattro strutture molecolari più comuni per una catena polimerica. [12]

1. Polimeri lineari (Linear)

In questi polimeri, le unità monomeriche sono unite da un estremo all'altro in una singola catena. Solitamente queste catene sono piuttosto lunghe e possiedono una certa flessibilità. Tra i polimeri lineari di maggior impiego ricordiamo il polietilene, il PVC, il polistirene, polimetilacrilato (PMMA), nylon e fluorocarburi.

2. Polimeri ramificati (Branched)

In questo caso, i polimeri vengono sintetizzati in maniera tale che dalla catena si dipartano delle ramificazioni laterali. I rami sono generati a partire da reazioni che coinvolgono i gruppi laterali, che avvengono durante la sintesi del polimero. Solitamente, a causa della riduzione della capacità di impacchettamento, la densità di questi polimeri **diminuisce**.

3. Polimeri a legami incrociati (Cross-linked)

Durante il processo di sintesi o nel caso di reazioni chimiche non reversibili ad elevata temperatura, è possibile che si instaurino legami covalenti fra atomi appartenenti a due catene principali adiacenti, grazie all'interposizione di altri atomi fra le due catene. Si parla, in questo caso, di **legami incrociati** fra catene. Molti materiali elastici (come le gomme ad esempio), presentano una struttura a legami incrociati. Nello specifico, per le gomme, questa caratteristica è nota come **vulcanizzazione**.

4. Polimeri reticolati (Networked)

Le unità monomeriche **trifunzionali**, cioè quelle che presentano tre legami attivi covalenti, formano reti **tridimensionali**, dando così vita ai **polimeri reticolati**. Essi non sono nient'altro che complessi polimeri a legami incrociati,

i quali formano una struttura a rete. Un esempio sono le **resine epossidiche**, alla base di materiali compositi come la **fibra di carbonio**.

Sottolineiamo infine che questa distinzione ci può aiutare a comprendere le strutture basilari dei polimeri.

Nella realtà, essi si presentano spesso con una conformazione che comprende diverse tipologie di strutture fra quelle esposte sopra.

Ad esempio, un polimero prevalentemente lineare, potrebbe avere delle ramificazioni limitate o alcuni legami incrociati.

1.6.4 Configurazioni molecolari

Per i polimeri che presentano più di un atomo o gruppi di atomi legati lateralmente alla catena principale, l'entità, la regolarità e la simmetria del particolare gruppo laterale possono influenzare considerevolmente le proprietà del polimero stesso.

Ad esempio, prendiamo in considerazione una semplice **unità monomerica** (figura 1.10):

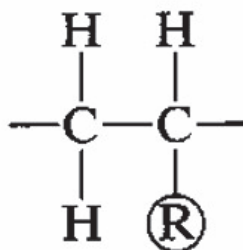


Figura 1.10: Generica unità monomerica. [12]

Esistono due configurazioni possibili per una successione di unità monomeriche: nella **prima**, il **gruppo R** (che può rappresentare sia un singolo atomo che un gruppo di atomi), può trovarsi sempre nella **stessa posizione** nel singolo monomero.

In questa maniera, **R** si alternerà lungo la catena, questa configurazione prende il nome di **testa-coda** (figura 1.11):

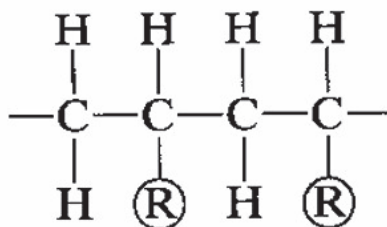


Figura 1.11: Configurazione testa-coda. [12]

L'altra possibilità; consiste nel posizionare gli **R** in maniera tale che questi si leghino ad atomi **adiacenti** lungo la catena principale. Quest'ultima configurazione; prende il nome di **testa-testa** (figura 1.12):

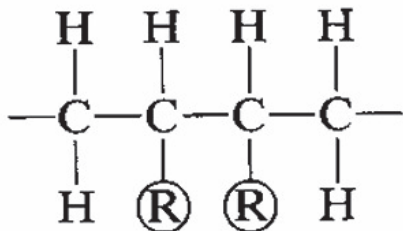


Figura 1.12: Configurazione testa-testa. [12]

La maggior parte dei polimeri si organizzano seguendo una configurazione di tipo **testa-coda**, questo perché nella configurazione testa-testa si manifesta una **repulsione polare** fra i **gruppi R**.

Abbiamo precedente definito il fenomeno dell'**isomeria**, cioè quella circostanza per la quale due molecole aventi la **stessa composizione chimica**, presentano **differenti disposizioni a livello atomico**.

Illustreremo, nel seguito, le due tipologie di isomeria più frequenti e rilevanti:

- **Stereoisomeria**

Data una stessa molecola polimerica, osserviamo un fenomeno di **stereoisomeria**, nel momento in cui è presente una stessa configurazione di tipo **testa-coda**, **ma la disposizione spaziale degli atomi differisce nei due casi**. Facciamo alcuni esempi. Quando tutti i **gruppi R** sono situati nello stesso lato della catena, abbiamo a che fare con una configurazione detta **isotattica** (figura 1.13):

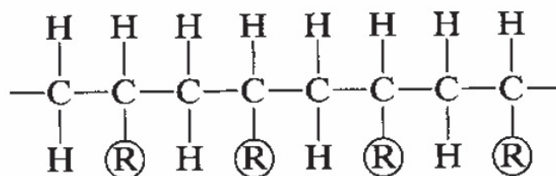


Figura 1.13: Configurazione isotattica. [12]

Nel momento in cui, invece, i **gruppi R** si alternano sui due lati della catena, la configurazione sarà di tipo **sindiotattica** (figura 1.14):

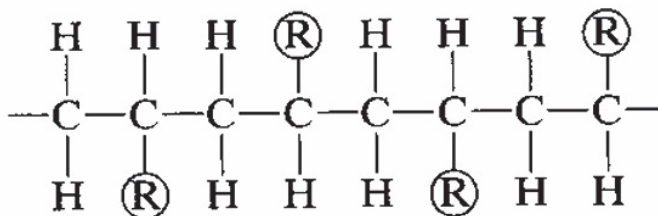


Figura 1.14: Configurazione sindiotattica. [12]

Per un posizionamento **casuale**, abbiamo a che fare con una configurazione **atattica** (figura 1.15):

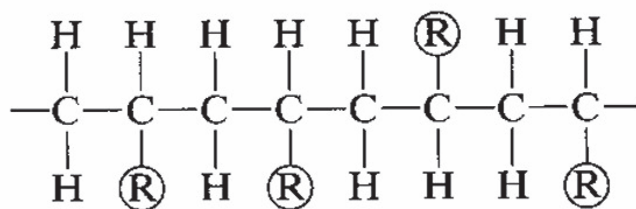


Figura 1.15: Configurazione atattica. [12]

Lo specifico processo di sintesi del polimero; determina la configurazione risultante fra quelle appena discusse, inoltre, uno stesso polimero può presentare più di una configurazione.

Ricordiamo infine che, per passare da una configurazione all'altra, non è sufficiente effettuare una semplice rotazione dei legami atomici nella catena.

Difatti, risulta necessario dapprima **recidere** tali legami, successivamente procedere a ruotarli in maniera appropriata per poi ricostituirli.

- **Isomeria geometrica**

Prendendo in considerazione le unità monomeriche che presentano un doppio legame fra i due atomi di carbonio centrali, esistono altre importanti configurazioni possibili di una stessa molecola polimerica. In questo caso si parla di **isomeria geometrica**.

Prendiamo come esempio il monomero dell'**isoprene** (figura 1.16):

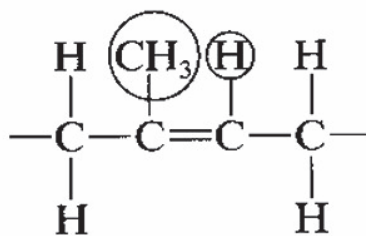


Figura 1.16: Monomero dell'isoprene: configurazione cis-. [12]

Notiamo che le due specie legate ai due atomi di carbonio centrali, il **gruppo metile** (CH_3) e l'atomo di **idrogeno** (**H**), sono situati dalla stessa parte rispetto alla catena principale.

Questa configurazione della struttura; viene chiamata **cis**, la molecola risultante prenderà il nome quindi di **cis-poliisoprene**.

Il polimero alternativo, cioè quello in cui il gruppo metile e l'atomo di idrogeno sono situati ai due opposti rispetto alla catena principale, acquisisce il prefisso **trans**. (figura 1.17)

Si parlerà, quindi, di **trans-poliisoprene**.

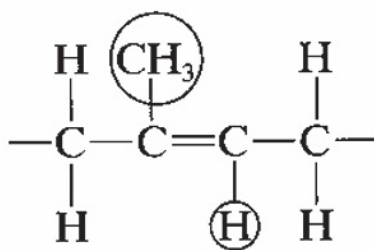


Figura 1.17: Monomero dell'isoprene: configurazione trans-. [12]

Le due strutture **cis** e **trans**; sono caratterizzate da proprietà fisiche profondamente diverse.

Sottolineiamo come, anche in questo caso, sia impossibile ottenere una configurazione cis a partire da una trans e viceversa per mezzo della semplice rotazione dei legami chimici della catena, per via anche del fatto che un doppio legame fra due atomi di carbonio le conferisce una certa rigidità.

In figura 1.18, è riportato un riassunto delle caratteristiche molecolari dei polimeri.

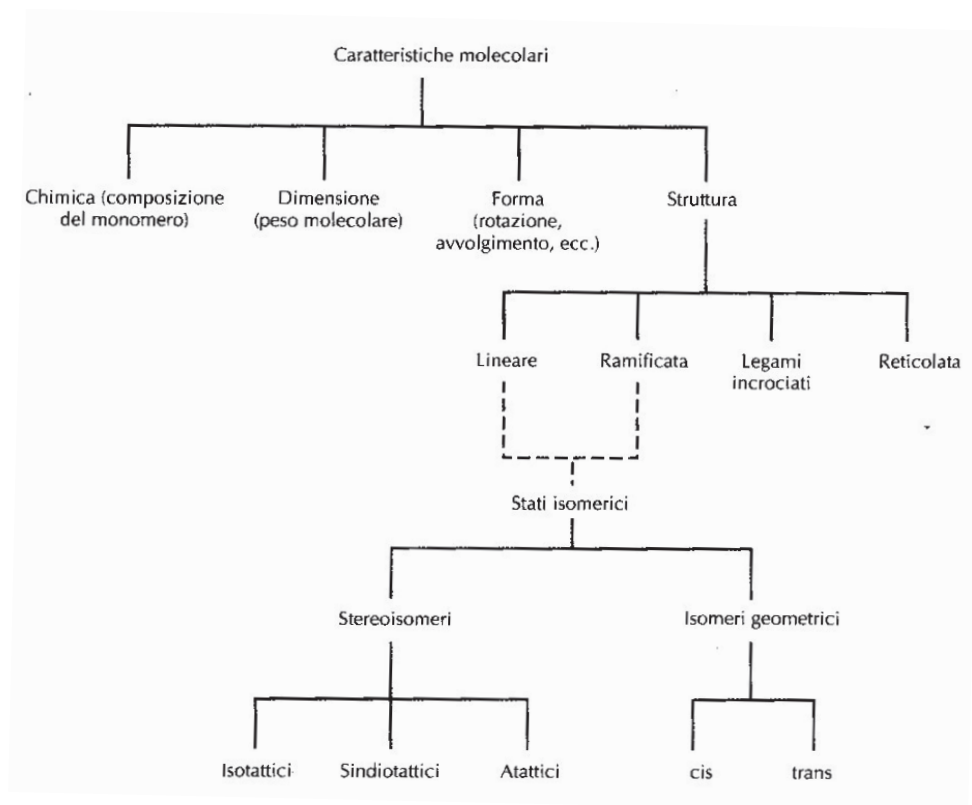


Figura 1.18: Classificazione schematica delle caratteristiche molecolari dei polimeri. [12]

1.7 Fenomeni di cristallizzazione, fusione e transizione vetrosa nei polimeri

1.7.1 Cristallinità dei polimeri

Il concetto di **cristallinità** dei polimeri è simile a quello valido per i materiali metallici.

Possiamo definirla come la capacità delle catene molecolari di impacchettarsi, generando una struttura più o meno ordinata a livello atomico.

A causa della complessa disposizione della struttura polimerica, è molto difficile che tali materiali possano esistere allo stato **cristallino puro**.

Al contrario, la maggior parte delle catene polimeriche si presenta prevalentemente sotto forma **semicristallina** (**parzialmente cristalline**, quindi con delle regioni **cristalline**, immerse nella restante massa **amorfa**, **priva quindi di una qualunque struttura ordinata**).

Abbiamo già detto che le catene di polimeri si presentano secondo delle particolari forme attorcigliate, con cappi, torsioni e secondo delle strutture aggrovigliate.

Questo aspetto incentiva ancor di più la comparsa di zone amorfe. Il **grado di cristallinità**; può oscillare da un valore di 0 (nel caso di un polimero totalmente amorfo), ad un valore superiore al 95% (nel caso quindi di un polimero quasi totalmente cristallino).

A **parità di peso molecolare**, la **densità** di un polimero cristallino, è **maggiore** di quella dello stesso polimero **amorfo** dal momento che, come già accennato, in una struttura cristallina le catene sono raggruppate insieme secondo un certo ordine, divenendo più compatte.

Il **grado di cristallinità**; può essere determinato mediante accurate misure della densità, secondo la seguente formula:

$$\% \text{ di cristallinità} = \frac{\rho_c(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s(\rho_c - \rho_a)} \times 100$$

Dove:

- ρ_s è la densità del campione del quale si vuole determinare la percentuale di cristallinità.
- ρ_a è la densità del polimero **totalmente amorfo** (rilevato per via sperimentale).
- ρ_c è la densità del polimero **perfettamente cristallino** (rilevato per via sperimentale).

Il grado di cristallinità del polimero finale dipende innanzitutto dalla **velocità di raffreddamento** della materia fusa iniziale, in quanto bisogna lasciare sufficiente tempo alle catene, fortemente disperse ed aggrovigliate nel liquido viscoso, di potersi riorganizzare generando una configurazione ordinata.

Anche la **composizione chimica** e la **configurazione della catena** polimerica stessa; incidono fortemente sulla capacità di un polimero di cristallizzare.

La cristallinità non è certamente favorita dalla presenza nella struttura polimerica di monomeri chimicamente molto complessi, d'altro canto risulta molto difficile evitare la cristallizzazione nei polimeri con strutture piuttosto semplici, pur impiegando tempi di raffreddamento molto rapidi.

I **polimeri lineari** sono quelli che **più facilmente tendono a cristallizzare** (per via della facilità con la quale le catene possono riorganizzarsi), al contrario è molto difficile ottenere un buon grado di cristallinità nei polimeri **ramificati**, stessa cosa per quelli **reticolati**.

Infatti, in queste ultime due tipologie, le ramificazioni laterali impediscono parzialmente o totalmente i movimenti e le rotazioni dei legami atomici.

I polimeri **a legami incrociati**; possono invece manifestare un buon livello di cristallinità.

Di seguito, alcune importanti considerazioni:

- In generale, **tanto più le strutture sono grandi e voluminose, tanto minore è la tendenza alla cristallizzazione.**
- Inoltre, **quanto più i monomeri all'interno della catena sono disposti irregolarmente e casualmente, tanto minore è la tendenza a cristallizzare.**
Ad esempio, i copolimeri casuali, sono di norma tutti **amorfi**.
- **Le proprietà fisiche dei materiali polimerici sono influenzate dal grado di cristallinità degli stessi.**

1.7.2 Processi di fusione e transizione vetrosa

La fusione di un polimero corrisponde alla trasformazione inversa della cristallizzazione.

Dato un fuso di materiale avente una struttura molecolare altamente disordinata, mediante raffreddamento, esso tenderà a formare strutture organizzate, dando vita ad una fase solida (Cristallizzazione).

La fusione di un polimero consiste, invece, nel riscaldamento di una fase solida altamente ordinata, a dare vita ad un liquido più o meno viscoso la cui struttura è fortemente disordinata.

Tale trasformazione si verifica di norma nel momento in cui, riscaldando, si giunge ad una temperatura detta di fusione (T_m).

A differenza dei metalli, però, per i polimeri plastici non parliamo di uno specifico valore di temperatura di fusione, bensì di un **range di temperature** in corrispondenza delle quali abbiamo la fusione.

Il processo stesso dipende dalla storia precedente del campione di materiale preso in esame, specialmente dalla temperatura alla quale è avvenuta la cristallizzazione, oltre che dalla velocità di riscaldamento del materiale stesso.

In genere, tanto più velocemente riscaldiamo il materiale, quanto più la temperatura di fusione sarà alta.

Il processo di fusione interessa i materiali cristallini o le porzioni cristalline nei materiali semicristallini.

I materiali amorfi, al contrario, subiscono unicamente il fenomeno della transizione vetrosa, il quale si manifesta durante il graduale raffreddamento del polimero.

Si verificano due transizioni di fase durante il raffreddamento, la prima comporta il passaggio dalla fase liquida ad una gommosa intermedia, la seconda il passaggio da questa fase intermedia ad una completamente solida.

Quest'ultima trasformazione; viene definita transizione vetrosa.

Una peculiarità di tale processo consiste nella permanenza della struttura disordinata del polimero, anche una volta avvenuta la solidificazione completa, quasi come se la struttura molecolare si "congelasse".

Il polimero risultante sarà quindi un amorfo.

I materiali amorfi vengono anche detti **liquidi congelati**, in quanto la struttura disordinata (tipica dei liquidi e degli aeriformi), rimane immutata allo stato solido. Dal punto di vista industriale e produttivo, la temperatura di fusione e quella di transizione vetrosa, costituiscono parametri molto importanti di valutazione e scelta del materiale da impiegare.

La T_m e la T_g , definiscono inoltre, rispettivamente, il limite **superiore** ed **inferiore** di impiego di molti polimeri in numerose applicazioni.

Nello specifico, per quanto riguarda un polimero **semicristallino**, il range di temperature di utilizzo ottimale è compreso in un intervallo di valori **superiori alla T_g e inferiore rispetto alla T_m** .

Per quanto riguarda i polimeri **amorfi**, invece, è buona norma far lavorare il pezzo in un range di temperature **al di sotto della T_g** , di modo da preservare le proprietà meccaniche del materiale.

Ricavare i valori di T_g e T_m risulta spesso molto difficile, in quanto essi sono fortemente influenzati dalle condizioni al contorno che si instaurano durante le prove sperimentali.

I due valori di temperatura vengono determinati a partire da un grafico che presenta sull'asse delle ordinate il volume specifico, contrapposto alla temperatura, riportata sull'asse delle ascisse. (figura 1.19)

Tale grafico viene ricavato sperimentalmente.

Possiamo compiere diverse osservazioni:

- La presenza di 3 curve, una che illustra il comportamento di un tipico materiale amorfo (A), una per un materiale semicristallino (B) e l'ultima per un cristallino puro (C).
- In corrispondenza del raggiungimento della temperatura di fusione (T_m), la curva A **NON** presenta una discontinuità nel volume specifico (a differenza degli altri due andamenti), risulta invece continua.
- Nella curva A, abbiamo un cambio di pendenza in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa (T_g), nel caso nella curva C, invece, tale circostanza non si manifesta.
- La curva B, presenta un andamento intermedio fra la A e la C in quanto è interessata sia dai fenomeni relativi alla transizione vetrosa che alla fusione.

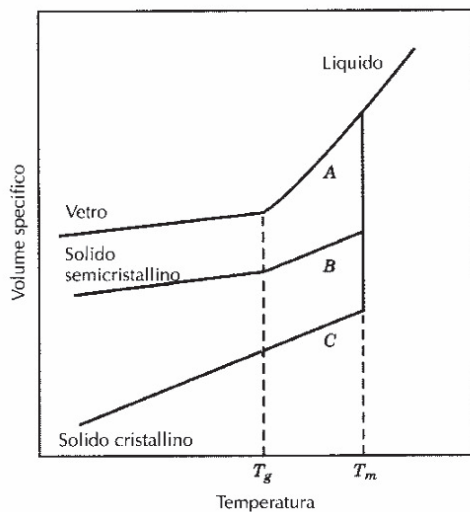


Figura 1.19: Andamento del volume specifico, rispetto alla temperatura, a partire da un fusso per polimeri *amorfi* (curva A), *semicristallini* (curva B) e *cristallini* (curva C). [12]

1.7.3 Fattori che influenzano T_m e T_g

Abbiamo già detto che la fusione di un polimero, è un processo che avviene entro un range di temperature e non ad uno specifico valore.

Il motivo principale risiede nella dipendenza di T_m dal **peso molecolare** del polimero.

In particolare, più il polimero presenta nella catena monomeri diversi (in termini di peso molecolare), più ampio sarà il range di temperature di fusione.

La chimica e la struttura molecolare, influenzano anch'esse la capacità delle molecole nella catena polimerica di riassetarsi, in seguito al riscaldamento, e di movimentarsi.

La flessibilità della catena influenza fortemente il valore del punto di fusione, in quanto una catena più rigida tenderà ad innalzarlo, difatti avremo bisogno di molta energia al fine di spezzare i legami intermolecolari che tengono unita la catena.

A sua volta la flessibilità, come già sottolineato, dipende dalla presenza di legami doppi, di gruppi laterali più o meno voluminosi, che a loro volta possono condizionare la libertà di rotazione attorno ai legami chimici.

Il grado di ramificazione, al contrario, può influire sulla temperatura di fusione **abbassandola**.

Questo avviene perché vengono introdotte delle imperfezioni nel materiale cristallino.

Per la maggior parte dei polimeri, l'intervallo di temperature di fusione è di norma dell'ordine di alcuni gradi centigradi.

Per quanto riguarda la temperatura di **transizione vetrosa**, possiamo grossomodo fare le stesse osservazioni.

Le molecole, al di sotto della T_g , si ritrovano congelate nella loro posizione, a formare un solido con struttura però fortemente disordinata.

Aumentando la temperatura, al di sopra di T_g , tali molecole cominciano a movi-

mentarsi, ruotando e traslando nello spazio.

Al contempo, osserviamo la transizione da una fase solida ad un'altra fase solida "gommosa".

Possiamo quindi intuire, come nel caso di T_m , che anche per T_g ricopre un ruolo di primo piano la **rigidità della catena polimerica**.

Anche in questo caso, più la catena è **flessibile**, **più bassa** sarà la temperatura di transizione vetrosa (T_g).

La presenza eventuale di doppi legami, gruppi laterali voluminosi, influenzano quindi il valore di T_g .

Un peso molecolare più **grande** comporta un **innalzamento** della temperatura di transizione vetrosa. (figura 1.20)

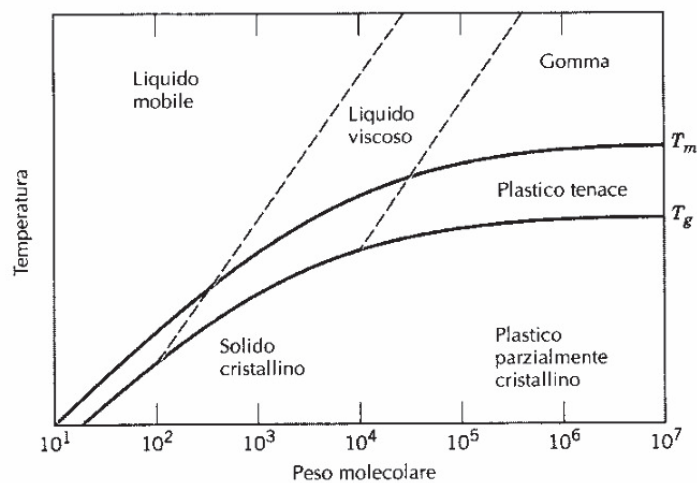


Figura 1.20: Dipendenza di T_m e T_g dal peso molecolare. [12]

Inoltre, una ramificazione esasperata della catena, tende anch'essa ad **innalzare** la temperatura di transizione vetrosa, siccome comporta una riduzione significativa della mobilità della catena stessa. Alcuni polimeri amorfi, che presentano un'alta densità di legami incrociati, vedono virtualmente annullata la loro mobilità molecolare tanto da non manifestare, a tutti gli effetti, alcuna transizione vetrosa.

Di norma, si rileva che il valore di T_g è pari a circa 0.5-0.8 volte T_m .

Riassumiamo, quindi, i fattori da cui T_g e T_m dipendono:

- Lunghezza e struttura delle catene polimeriche
- Presenza di sostanze additivanti quali plastificanti
- Pressione
- Capacità di assorbire l'umidità

1.8 Caratteristiche termo-meccaniche dei polimeri plastici

1.8.1 Panoramica

Come per i materiali metallici, anche per i polimeri il **modulo di elasticità**, il **carico a rottura** e la **resistenza all'impatto ed alla fatica**, rappresentano alcuni dei più rilevanti parametri per valutarne le prestazioni.

In figura 1.21, possiamo distinguere **tre andamenti tipici** di una curva **sforzo-deformazione** per un polimero:

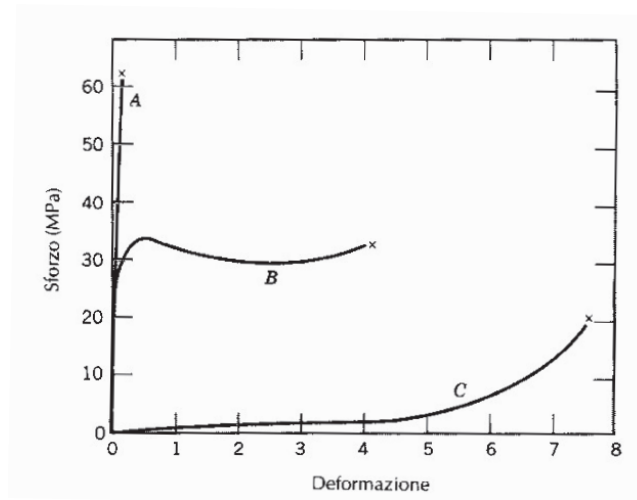


Figura 1.21: Curve sforzo-deformazione per un polimero **fragile** (curva A), **plastico** (curva B) ed **altamente elastico** (elastomero) (curva C). [12]

- A) Comportamento **fragile**, come si nota dal fatto che la rottura avviene quando si è ancora in **campo elastico**.
- B) Comportamento **simile ai metalli**, cioè all'inizio si ha una **deformazione elastica**, successivamente si giunge allo **snervamento**, ed infine si osserva una regione a **comportamento plastico**.
- C) Comportamento **completamente elastico**, in questo caso il materiale è in grado di deformarsi considerevolmente, senza però subire deformazioni permanenti.

Quest'ultima casistica è tipica dei cosiddetti **elastomeri**.

Le caratteristiche meccaniche dei polimeri sono profondamente diverse da quelle dei metalli.

Basti pensare che, mentre per i s il **modulo elastico** può variare in un range compreso all'incirca fra i 48 ed i 410 GPa (per un acciaio comune si parla di 210 GPa), per quanto riguarda i polimeri si naviga in un campo di variabilità che va dai 7 MPa ai 4 GPa come **valore massimo**.

Per quanto riguarda il **carico massimo a trazione**, con il quale si intende il massimo carico applicabile sottoponendo un provino di materiale a sforzo di trazione

prima della rottura, parliamo di valori nell'ordine dei 100 MPa per i materiali plastici mentre di valori anche attorno ai 4100 MPa per alcuni metalli particolarmente performanti.

Al contrario però, quando si parla di **allungamento a rottura**, ovvero il massimo allungamento a cui il provino di materiale può essere sottoposto prima di giungere al **fallimento**, la situazione si ribalta completamente.

Difatti, per quanto riguarda i metalli, l'allungamento massimo a rottura non supera **mai** il 100% mentre, per quanto riguarda i polimeri, si può arrivare a performare allungamenti sino addirittura al 1000% in alcuni casi di polimeri **altamente elastici**.

Un altro aspetto di cui tener conto; consiste nel fatto che le proprietà meccaniche dei polimeri, sono molto sensibili alle **variazioni di temperatura**, soprattutto per valori vicini a quella **ambiente**.

Come esempio possiamo citare il ***polimetilmetacrilato (Plexiglas)***, e specialmente la variazione dell'andamento della relativa curva sforzo-deformazione al variare della temperatura.

Si possono compiere alcune interessanti osservazioni: in primis l'aumento di temperatura determina una **diminuzione del modulo elastico (1)**, la **riduzione del carico di rottura (2)**, un **aumento della duttilità (3)**, considerando che a 4°C il comportamento del materiale è **completamente fragile**, mentre a 50 e 60°C, si osserva una considerevole **deformazione plastica**. (figura 1.22)

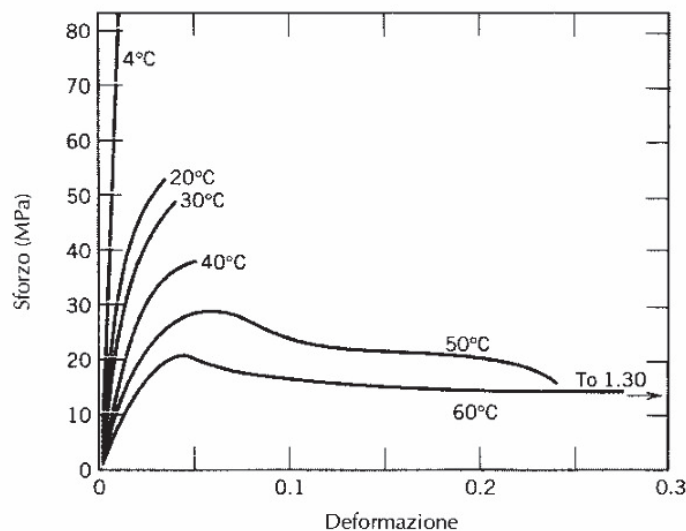


Figura 1.22: Andamenti curva sforzo-deformazione per un polimero al variare della temperatura. [12]

In figura 1.23, sono rappresentate due curve (una valida per i polimeri semicristallini, l'altra per gli amorfi), che mostrano l'andamento del modulo elastico (E), espresso in Mpa, rispetto alla temperatura.

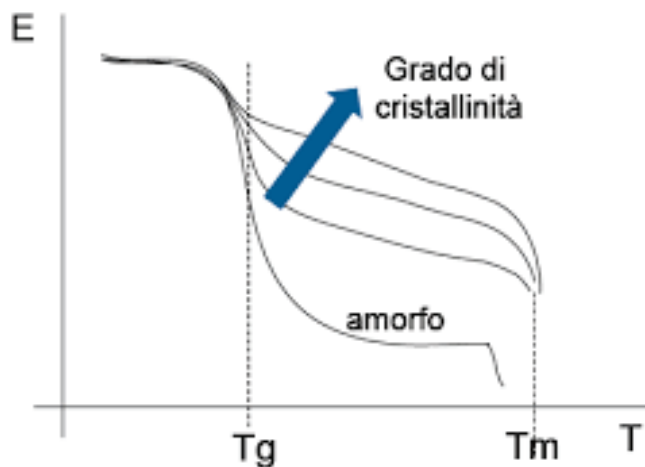


Figura 1.23: Variazione della rigidità del polimero al variare della temperatura. Differenze fra un amorfo e un semicristallino. [12]

Osserviamo che, specialmente per un polimero **amorfo**, in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa (T_g), abbiamo un crollo repentino della resistenza meccanica del materiale.

La curva continuerà a scendere fino ad andare virtualmente a 0 per temperature talmente elevate, che il materiale subirà una vera e propria degradazione termomeccanica.

Per quanto riguarda un **semicristallino**, osserviamo un comportamento simile, con la differenza che, al contrario del caso precedente, il modulo elastico non scende molto e si mantiene su degli ottimi valori fino a temperature molto alte.

Anche la **velocità di deformazione**, in base all'entità dello sforzo applicato, influenza in maniera importante il comportamento del materiale. In generale, una diminuzione della velocità di deformazione, ha lo stesso effetto di un aumento della temperatura, cioè quello di rendere il materiale più **morbido e duttile**.

Abbiamo già descritto, in precedenza, la struttura a livello molecolare delle catene di un polimero.

Nel momento in cui un polimero semicristallino è sottoposto ad uno sforzo di trazione, le catene polimeriche tenderanno pian piano ad allungarsi e ad allinearsi nella direzione stessa dello sforzo.

Nel caso di polimeri semicristallini, una sufficiente deformazione a trazione genera in essi delle strutture **altamente orientate** nella direzione dello sforzo applicato.

Inoltre, è bene sottolineare che la deformazione subita, può essere recuperata riscaldando il materiale ad una temperatura **vicina** a quella di fusione.

Questo implica che il processo deformativo, è solitamente in **gran parte reversibile**.

Sottoponendo un provino di materiale ad uno sforzo, dal punto di vista **macroscopico**, nel momento in cui raggiungiamo il primo punto di snervamento (quello più alto), inizierà a formarsi una **piccola strizione** nella zona centrale del provino.

In questa regione in cui è sorta tale strizione, la resistenza del materiale sarà **aumentata**, come in una sorta di processo di **incrudimento** (fenomeno presente nel caso dei materiali metallici).

In particolare, nel caso di materiali polimerici, tale processo è noto come **stiramento**, appunto l'analogo dell'incrudimento tipico dei metalli. Per questo motivo, incrementando lo sforzo applicato, la deformazione deve necessariamente estendersi nelle regioni vicine alla strizione. (figura 1.24)

Questo implica che quest'ultima occuperà zone utili del provino non ancora deformate.

Le catene polimeriche, contemporaneamente, tenderanno sempre più ad allinearsi. I due fenomeni di **orientamento progressivo delle catene** e di **estensione della strizione**; sono strettamente correlati fra di loro.

Questo comportamento a trazione; contrasta con quanto trovato invece nei materiali metallici duttili, per i quali una volta formata la strizione, tutta la deformazione successiva viene localizzata in quella specifica regione.

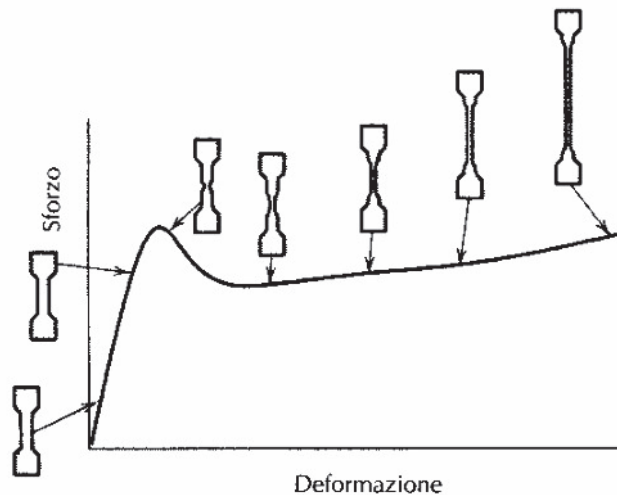


Figura 1.24: Comportamento di un provino di materiale al variare dello sforzo applicato, quindi della relativa deformazione subita. [12]

1.8.2 Effetto dei fattori legati alla struttura della catena

Abbiamo già parlato degli effetti, su di un materiale polimerico, della variazione della temperatura e della velocità di deformazione.

Analizzeremo ora, alcuni degli altri parametri che possono modificare, anche profondamente, il comportamento di un polimero.

Per quanto riguarda i fattori legati alla **struttura** della catena polimerica, ne esistono diversi da tenere in considerazione.

Un grande aggrovigliamento delle catene molecolari o una concentrazione significativa di legami secondari (di tipo Van der Waals) possono inibire considerevolmente la capacità di moto relativo delle catene.

L'effetto risultante consiste in un **aumento del modulo elastico**.

È interessante notare che, nonostante come già discusso i legami secondari fra molecole siano di per sé piuttosto **deboli**, nel caso di catene strutturate e complesse, si può costituire una rete di forze intermolecolari **molto significativa**.

Il peso molecolare non sembra influenzare in maniera diretta il modulo elastico, al

contrario, **la resistenza a trazione cresce al crescere del peso molecolare.**

Il grado di cristallinità; riveste un ruolo importante nel determinare lo specifico comportamento del materiale polimerico.

Ricordiamo che una cristallinità compresa fra 0 e 1, comporta la **coesistenza** di regioni **cristalline** ed **amorfe** nel materiale, cioè regioni con catene molto ordinate e ben impacchettate, contrapposte a regioni invece piuttosto disordinate e con le catene polimeriche disposte in maniera casuale.

Il **grado di cristallinità** è collegato all'estensione dei legami intermolecolari secondari.

Nello specifico, nelle regioni cristalline, il numero di legami secondari è molto grande e, grazie all'ordine generale presente nella struttura, il **modulo elastico** tende ad **aumentare** in tali zone.

Al contrario, esso tenderà a diminuire nelle **regioni amorfe**.

Il risultato finale consiste in un **aumento del modulo elastico all'aumentare del grado di cristallinità** in polimeri semicristallini.

Ad esempio, per il polietilene, il modulo elastico aumenta quasi di **un ordine di grandezza** quando il grado di cristallinità cresce da 0.3 a 0.6.

Inoltre, la maggiore cristallinità comporta un generale aumento della resistenza, ma il materiale tende a diventare **più fragile**.

1.8.3 Tecniche per migliorare le proprietà di un polimero

- **Stiramento**

Esistono diverse tecniche utili per migliorare le proprietà meccaniche di un polimero, una di queste è lo **stiramento**. Lo stiramento; è un processo di deformazione permanente di un polimero, grazie all'applicazione di un determinato sforzo. Come già accennato, lo stiramento è il trattamento per i materiali polimerici analogo all'incrudimento nei metalli. È molto interessante notare come le proprietà di un polimero stirato, siano fortemente **anisotrope**. Considerando il caso di materiali stirati in direzione **uniassiale** (lungo una sola direzione), il modulo elastico e la resistenza a trazione sono molto più **grandi** nella direzione di applicazione dello sforzo (quindi della deformazione) che non nelle altre. In direzione trasversale, quindi perpendicolare a quella di allineamento, la resistenza a trazione potrà ridursi di un terzo fino alla metà. Mettendo a confronto uno stesso provino di materiale, nel caso di un materiale **stirato**, il modulo elastico può aumentare di un fattore tre rispetto al caso di provino non sottoposto a tale processo.

- **Trattamento termico**

Il trattamento termico (**ovvero la ricottura**) di un polimero semicristallino, porta a variazioni considerevoli sia nella dimensione che nella perfezione delle cristalliti (cioè delle strutture fondamentali dei polimeri).

In generale, per materiali **non trafilati**, cioè quei materiali polimerici che **non** vengono **estrusi**, un **aumento** della temperatura di ricottura avrà i seguenti effetti: (1) **aumento del modulo elastico**, (2) **aumento del carico di snervamento**, (3) **riduzione della duttilità**.

Per i materiali metallici, l'incremento della temperatura ha in genere effetti

opposti, in particolare comporterà un **indebolimento**, **addolcimento** ed **aumento della duttilità**.

Nel caso di alcune fibre polimeriche, **che vengono trafilate**, l'influenza sul modulo elastico può essere totalmente opposto: si osserva la **diminuzione** del modulo all'**aumentare** della temperatura di ricottura a causa della **perdita di orientazione** delle catene ed alla conseguente **decescente cristallinità**.

1.8.4 Additivi nei polimeri

Quasi tutte le proprietà di cui abbiamo parlato in questo capitolo, sino ad ora, sono governate dalla struttura molecolare del polimero, esse sono pertanto intrinseche.

In base al tipo di applicazione, però, è spesso necessario cercare di potenziare alcune caratteristiche o addirittura di conferirne di nuove, modificando di fatto il polimero originario.

Per ottenere tali risultati, si altera la struttura molecolare del polimero aggiungendo delle sostanze estranee, note come **additivi**.

Fra di essi possiamo distinguere gli **additivi di processo**, cioè quelli impiegati in fase di lavorazione del materiale fuso (ad esempio i **lubrificanti** ed i **distaccanti**), e gli additivi che fungono da **stabilizzanti in esercizio**, cioè quelli studiati per garantire la conservazione delle proprietà e caratteristiche meccaniche durante la vita utile del polimero.

Vengono di seguito riportati esempi di alcuni degli additivi più impiegati in ambito industriale per modificare le prestazioni di un polimero:

- **RIEMPITIVI**

I materiali di riempimento sono aggiunti spesso ai polimeri al fine di migliorare la loro stabilità dimensionale e termica, alcuni di questi permettono di ottenere benefici anche dal punto di vista della resistenza alla trazione o compressione, all'abrasione o sulla loro durezza.

Tra i riempitivi annoveriamo la segatura di legno, la silice, vetro, argilla, talco, calcare.

Le particelle di queste sostanze, solitamente inerti, possono avere dimensioni microscopiche (attorno ai 10 *nm*), fino ad arrivare a dimensioni nell'ordine di alcuni millimetri.

Le cariche minerali, fra le sostanze più utilizzate, sono utili al fine di incrementare nello specifico la stabilità dimensionale del componente, in quanto esse **non ritirano**.

Inoltre, alcune di queste come il **talco**, permettono di ottenere delle ottime finiture superficiali.

Ricordiamo infine che siccome questi materiali sostituiscono porzioni del più costoso polimero, essendo essi molto più economici, comportano una **riduzione**, spesso significativa, **del prezzo del prodotto finale**.

- **PLASTIFICANTI**

I plastificanti, in genere liquidi a bassa tensione di vapore e basso peso molecolare, vengono aggiunti a quei polimeri caratterizzati da elevate rigidità, durezza e relativamente fragili. Agiscono andandosi ad insinuare nelle cavità poste fra

le grandi molecole delle catene, indebolendo così i legami intermolecolari secondari. Relativamente alla fragilità, essi vanno ad abbassare la temperatura di transizione vetrosa, di modo che possano risultare duttili, morbidi e flessibili anche a temperatura ambiente. Alcuni esempi di polimeri additivati di questo tipo sono le pellicole sottili e le tubazioni plastiche.

- **STABILIZZATORI**

Al fine di evitare che un polimero possa deteriorarsi meccanicamente a causa dell'esposizione alla radiazione solare (nello specifico quella ultravioletta, fenomeno noto come **fotodegradazione**), oppure per via dell'ossidazione dovuta all'esposizione all'aria, alcune plastiche vengono alterate utilizzando delle sostanze note come stabilizzatori.

- **COLORANTI**

Al fine di conferire una colorazione specifica ad un polimero, vengono impiegati alcuni additivi sotto forma di tinture o pigmenti. Alcuni di questi possono anche rendere più o meno opaco il prodotto, oltre che colorarlo.

- **RITARDANTI DI FIAMMA**

In termini di sicurezza, una delle problematiche più serie riguardanti i polimeri è quella dell'**infiammabilità**. Basti pensare alla fabbricazione dei tessuti o dei giocattoli per bambini. Essendo composti principalmente da idrocarburi, tutti i polimeri presentano una certa infiammabilità allo stato puro, fatta eccezione per quelli che contengono sufficienti quantità di cloro e/o fluoro. A tal proposito, possono essere utilizzati degli additivi chiamati ritardanti di fiamma. Essi agiscono interferendo con la fase gassosa del processo di combustione oppure innescando una reazione chimica che incentivi il raffreddamento dell'area di combustione e la cessazione del fuoco.

1.9 Classificazione dei polimeri

Esistono diversi criteri sulla base dei quali possiamo classificare i polimeri.

In primis ci si può basare sulla tipologia specifica di **reazione di sintesi** adottata al fine di generare quel polimero.

Due sono i processi principali di sintesi di un polimero:

- 1) **POLIADDIZIONE**

Consiste in un processo che sfrutta l'apertura di uno o più legami di una singola unità monomerica, al fine di permettere ad altri monomeri di legarsi a formare la catena.

- 2) **POLICONDENSAZIONE**

La catena viene generata a partire dall'espulsione di una molecola di acqua nell'unità monomerica, al fine di liberare legami e permettere a più molecole di unirsi.

I materiali polimerici possono inoltre essere suddivisi in **cristallini**, **semicristallini** ed **amorfi**.

Abbiamo già accennato, nei precedenti paragrafi, alla loro differenza. Un polimero si dice **cristallino** nel momento in cui, a livello molecolare, possiamo distinguere delle strutture compatte e ordinate, in genere caratterizzate da un orientamento preciso. Sottolineiamo che un polimero, non sarà mai totalmente cristallino, pur riuscendo a raggiungere percentuali di cristallinità molto alte.

Questo è dovuto al fatto che, a differenza delle molecole metalliche, quelle dei polimeri hanno dimensioni decisamente maggiori, ciò comporta che esse non potranno mai riorganizzarsi, al 100%, secondo una struttura perfettamente ordinata.

I **polimeri amorfi**, in contrapposizione ai cristallini, possiedono una struttura molecolare fortemente disordinata, questa caratteristica conferisce particolari proprietà al materiale, come ad esempio la trasparenza (basti pensare al vetro), una bassa densità (a differenza dei cristallini e semicristallini), scarsa resistenza chimica e all'usura, sono inoltre interessati da un ritiro piuttosto contenuto, ciò implica che sono **dimensionalmente più stabili**.

Possiamo dire, inoltre, che un polimero amorfo è particolarmente adatto nel caso di applicazioni in cui necessitiamo di una certa flessibilità oltre che una buona resistenza agli urti.

I **polimeri semicristallini**, i più diffusi ed utilizzati in genere, presentano delle strutture ordinate (possiedono quindi un certo grado di cristallinità), immerse in una matrice amorfa.

Il loro comportamento a livello termo-meccanico, si pone a metà fra i due estremi presentati.

Essi, in generale, si adattano molto bene a requisiti di resistenza meccanica e rigidità.

A valle di questa classificazione piuttosto accademica, ne proponiamo una più familiare e più interessante ed efficace dal punto di vista ingegneristico oltre che applicativo industriale.

Tale distinzione, si basa sulla differente risposta meccanica di detti materiali ad elevate temperature.

1.9.1 Polimeri termoplastici

I termoplastici, sono materiali polimerici molto impiegati in ambito automotive, al fine di realizzare diversi componenti di finizione interna ed esterna, a stretto contatto con gli elementi di scocca.

Il loro nome deriva dal comportamento che manifestano una volta riscaldati.

Essi tendono ad ammorbidirsi, all'aumentare della temperatura, fino a liquefarsi mentre si induriscono se raffreddati: tali processi sono **totalmente reversibili** e possono essere ripetuti in più cicli di lavorazione, a patto non si lavori con temperature eccessivamente alte che potrebbero comportare la degradazione irreversibile della catena.

Questa circostanza fa sì che l'agitazione molecolare sia talmente elevata che le importanti vibrazioni atomiche possano rompere i legami covalenti primari, sfaldando così la struttura portante della catena polimerica.

I termoplastici, in generale, sono relativamente morbidi e duttili.

Questa proprietà li rende particolarmente adatti alla realizzazione di elementi come i paraurti, capaci di assorbire urti di piccola-media entità, senza incorrere in dan-

neggiamento o cedimento del componente.

Molti polimeri lineari, ed alcuni polimeri ramificati a catena flessibile sono termoplastici.

I termoplastici, per quanto detto, possono essere quindi **riciclati** e rifusi per poterli impiegare nuovamente per la realizzazione di altri pezzi.

Tra le tecnologie produttive destinate alla produzione di componenti in termoplastico annoveriamo lo stampaggio ad iniezione, particolarmente adatto alla loro realizzazione.

1.9.2 Polimeri termoindurenti

A differenza dei termoplastici, i polimeri termoindurenti, in seguito ad un crescente apporto di calore, tendono ad indurirsi e non subiscono alcun ammorbidimento se sottoposti a riscaldamenti successivi.

Durante il trattamento iniziale di riscaldamento, infatti, la loro struttura tende ad irrobustirsi a seguito della formazione di legami incrociati covalenti tra catene molecolari adiacenti.

Questi legami ancorano le catene fra di loro in maniera tale da renderle particolarmente resistenti, anche a fronte di sollecitazioni vibrazionali molto intense, imposte dalle elevate temperature alle quali sono esposti.

Tali legami possono essere scissi unicamente se il materiale subisce temperature estremamente elevate, tali da provocare la degradazione del polimero stesso.

I termoindurenti, rispetto ai termoplastici, sono **più duri, più resistenti** (possiedono una maggior **tenacità**), ma allo stesso tempo anche più **fragili**.

Un'altra caratteristica importante è la loro **ottima stabilità dimensionale**.

Le proprietà appena citate, giustificano il loro ampio utilizzo in ambito automotive per la realizzazione di svariati componenti di finizione interna ed esterna.

Alcuni esempi possono essere i paraurti, i fondi aerodinamici, i proiettori ed i fanali. A differenza dei termoplastici, i termoindurenti sono difficilmente riciclabili, tanto che, a fine vita, essi vengono finemente triturati al fine di poterli mescolare al bitume per gli asfalti.

Tutti i polimeri a legami incrociati e reticolati, sono in genere termoindurenti.

Infine, tra i processi produttivi atti alla realizzazione di componenti in materiale termoindurente, annoveriamo lo stampaggio ad iniezione e lo stampaggio a compressione.

1.10 Processi industriali di molding

Nel mondo del Design for Manufacturing (DFM), le tecniche di formatura sono ormai piuttosto diffuse e consolidate nell'ambito della produzione industriale di componenti, più o meno complessi, a base di materie plastiche, appartenenti principalmente a due macroclassi: termoplastici e termoindurenti.

La formatura delle materie plastiche si definisce come quel macroprocesso, o insieme di singoli processi che, tramite l'applicazione di calore, forze specifiche e relative pressioni, ci consentono di trasformare (deformare) un semilavorato al fine di fargli assumere una data forma desiderata.

Una delle caratteristiche principali consiste nell'impiego di temperature relativamen-

te basse di lavorazione (dalla temperatura ambiente, sino a valori limite attorno ai 350 °C), variabili a seconda del particolare processo di lavorazione da noi scelto, strettamente correlato alle esigenze produttive.

Ciò comporta un **primo considerevole vantaggio** rispetto alle possibili alternative nell'ambito della produzione industriale: gli stampi possono resistere più a lungo (sono quindi adatti alla realizzazione di un numero elevato di esemplari), ciò ci consente anche di ammortizzare, nel tempo, i costi di produzione necessari da sostenere. Lo stampo, di solito, viene realizzato tramite **fresatura** e rifinito attraverso processi tecnologici ben più costosi come **l'elettroerosione od il taglio ad acqua**, specialmente nel caso di stampi complessi come quelli multi-cavità. Gli stampi sono realizzati in maniera tale da riprodurre, il più fedelmente possibile, le fattezze del componente finale, questo significa che, di solito, non sono richieste post lavorazioni (lavorazioni secondarie) per ottenere la geometria e la finitura desiderate, se non in alcuni casi circoscritti.

La quasi totalità delle tecniche di formatura si basa sull'utilizzo di granuli o polveri di materiale plastico, che verranno fusi tramite l'impiego di calore, fino a formare una sorta di pasta incandescente, la quale verrà poi iniettata in uno stampo chiuso, e fatta raffreddare al fine di consentire al materiale di riempirlo correttamente ed evitare difetti che comprometterebbero l'estetica e/o la funzionalità del pezzo stesso. Fra le tecniche di formatura più note annoveriamo:

- 1) Estrusione
- 2) Stampaggio ad iniezione (Injection Molding)
- 3) Stampaggio mediante soffiatura
- 4) Stampaggio rotazionale
- 5) Termoformatura
- 6) Stampaggio a compressione
- 7) Stampaggio a trasferimento

Il focus di questa trattazione; sarà rivolto allo stampaggio ad iniezione (injection molding) di materie plastiche, al fine di realizzare componenti di finizione per automobili.

1.11 Panoramica sullo stampaggio ad iniezione

Lo stampaggio ad iniezione è certamente la modalità di realizzazione di componenti in materiale plastico, con composizioni chimiche estremamente variegata, più ampiamente impiegato nell'industria odierna.

Questo processo ci consente di realizzare manufatti di ogni dimensione, da oggetti molto piccoli (del peso di 1 mg), fino a componenti molto grandi (fino ai 10 Kg di massa).

La macchina utensile impiegata in questo ambito è la **pressa ad iniezione** (figura 1.25), un oggetto piuttosto complesso, il quale è costituito principalmente da una

tramoggia di alimentazione (Hopper) nella quale inseriremo i granuli o le polveri plastiche, esse verranno quindi convogliate verso la camera principale (**cilindro o barrel**), la quale ospiterà una **vite o coclea (screw)**.

Il calore generato dal sistema di fasce (o resistenze) riscaldanti presenti sulla superficie esterna del cilindro e l'attrito scaturito dalla rotazione della vite all'interno dello stesso, favoriranno la fusione (melting) del pellet plastico solido.

La vite, inoltre, può spostarsi lungo il proprio asse, in maniera tale da poter spingere il materiale fuso verso l'ugello, una strizione che permette l'iniezione del materiale nello stampo.

La porzione di pressa sinora descritta; viene anche detta **gruppo iniezione**.

Parliamo ora del cosiddetto **gruppo chiusura**, l'altro sottoassieme di una pressa ad iniezione.

La seconda parte del macchinario è composta da due piatti, di cui uno fisso ed uno mobile, entro i quali alloggeranno le piastre dello stampo.

L'obiettivo del gruppo di chiusura consiste nel cercare di contrastare la spinta del materiale fuso all'interno dello stampo, potendo così garantire una tenuta ottimale, evitando l'insorgere di bave in fase di stampaggio.

Parliamo di pressioni di iniezione molto grandi, esse possono spingersi sino a valori attorno ai 2000 bar.

La porzione mobile, nello specifico, deve essere collegata ad un sistema meccanico o idraulico che consenta di reggere queste forti pressioni e mantenere quindi in posizione lo stampo per tutta la durata del processo.

Quattro colonne (tie bar), consentono l'allineamento delle due piastre oltre che lo scorrimento di quella mobile, al fine di favorire, in maniera agevole, la chiusura o l'apertura dello stampo.

Ad oggi sono stati implementati sistemi più complessi ed efficienti di reggispinga che consentono, oltretutto, anche di occupare meno spazio e garantire una maggiore accessibilità allo stampo.

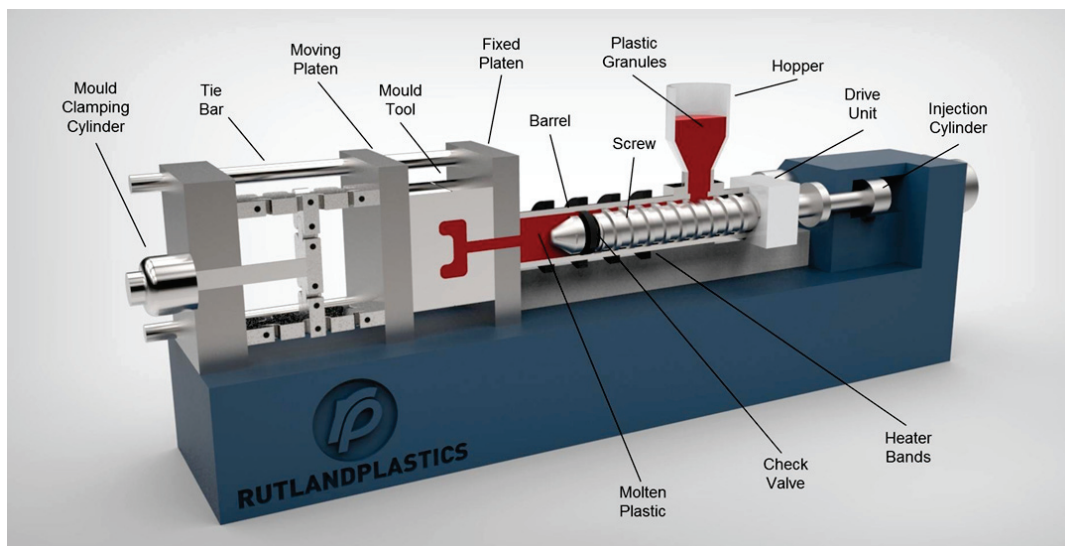


Figura 1.25: Pressa per stampaggio ad iniezione. A **destra** il gruppo iniezione, a **sinistra** il gruppo chiusura. [15]

1.11.1 Fasi principali del processo

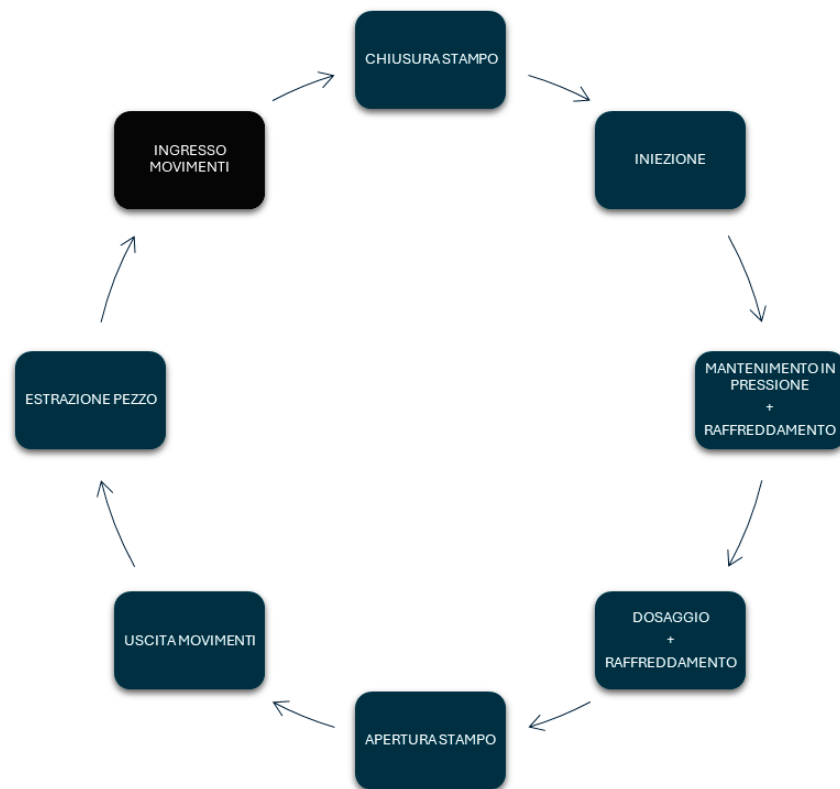


Figura 1.26: Fasi che caratterizzano un processo di stampaggio ad iniezione. [20]

Quello in figura 1.26, è un esempio di ciclo di stampaggio classico (standard), impiegato in ambito industriale, la sua struttura può variare in base ad una moltitudine di fattori, quali la complessità del pezzo, le sue dimensioni, la sua geometria, requisiti specifici di produzione, requisiti del cliente, condizioni di operatività e così via.. La somma di ogni singola fase descritta da ciascun blocco definisce il **tempo ciclo del processo**.

Il tempo ciclo, è uno dei parametri più rilevanti per lo stampaggio, in quanto influisce in maniera considerevole sull'efficienza produttiva, sui costi e sulla qualità del prodotto finale.

Si descrivono, brevemente, le **principali fasi** del processo fra quelle presenti in figura 1.26:

- 1) **Introduzione materia prima nella pressa:** il polimero solido, spesso sotto forma di pellet, **viene immesso, tramite la tramoggia, all'interno della camera principale**, nella quale verrà agevolata la sua fusione grazie alla conduzione termica ed alla frizione generata dalla rotazione della vite. Nel momento in cui avremo abbastanza materiale fuso da poter realizzare il pezzo, la rotazione della vite verrà arrestata ed essa inizierà a muoversi facen-

dolo avanzare verso lo stampo.

- 2) **Fase di iniezione:** durante questo step, l'obiettivo consiste nel riempire lo stampo correttamente, il flusso di materiale fuso deve quindi avere una certa velocità, deve essere iniettato ad una certa temperatura e così via.
Al fine di favorire lo scorrimento del flusso di materiale, è fondamentale preriscaldare lo stampo e mantenerlo ad una data temperatura, dipendente dalle caratteristiche fisiche del materiale che stiamo iniettando.
Al crescere della pressione nello stampo, è importante evitare che si verifichi un ritorno del flusso verso la camera principale, a questo proposito, la porzione anteriore della vite viene equipaggiata con una **valvola di non ritorno**.
- 3) **Fase di mantenimento e dosaggio:** bisogna assicurarsi che il polimero riempia completamente lo stampo, a questo proposito, al fine di contrastare il ritiro termico del materiale causato dal raffreddamento dello stesso, si garantisce l'iniezione di una certa portata di fuso (di solito ridotta rispetto alla fase precedente), al fine di evitare che si generino risucchi, vuoti interni ed altri difetti nel pezzo.
In questa fase, risulta fondamentale mantenere un valore adeguato di pressione all'interno dello stampo, evitando sia che questo possa essere troppo basso, sia che possa aumentare in maniera incontrollata.
- 4) **Raffreddamento del pezzo:** una volta che il flusso di materiale viene arrestato, e lo stampo è stato correttamente riempito, inizia la fase di raffreddamento del manufatto, esso può avvenire per semplice conduzione e convezione termica, oppure assistito da un sistema di raffreddamento apposito dello stampo, al fine di accorciare le tempistiche del processo ed aumentare la produttività.
N.B. Tenendo conto che il materiale inizia a raffreddarsi all'interno dello stampo, già a partire dalla prima iniezione, di solito si tende a considerare le due fasi di mantenimento e raffreddamento come separate, si impostano quindi due tempi differenti nella pressa.
Ma in alcune di esse, nonostante si impostino due valori indipendenti di tempo, l'istante di inizio del tempo di raffreddamento viene considerato a partire dall'inizio del mantenimento, che concettualmente è più corretto.
- 5) **Estrazione del pezzo:** una volta che la pressione, sempre monitorata tramite apposita sensoristica, si sarà azzerata o sarà scesa notevolmente sino a valori molto prossimi a quella ambientale all'interno dello stampo, si procederà alla sua apertura, tramite perni o agevolata dall'utilizzo di aria compressa.
Il pezzo verrà poi espulso dallo stampo tramite appositi movimenti al suo interno.
Il raffreddamento finale, potrà essere completato in aria, o in alcuni casi particolari tramite immersione in acqua.
- 6) **Fine ciclo:** a questo punto le due metà dello stampo verranno richiuse e ci si preparerà per un nuovo ciclo di stampaggio.

1.11.2 Sistema di alimentazione e circuito di raffreddamento

Lo stampo è probabilmente il componente dell'attrezzatura di stampaggio più importante e complesso da progettare e realizzare.

A causa delle fortissime pressioni che si generano al suo interno, i materiali impiegati per la loro realizzazione appartengono, la maggior parte delle volte, alla classe degli acciai speciali, i quali possiedono delle ottimali caratteristiche di resistenza meccanica e conferiscono un'ottima rigidità alla struttura.

Un esempio è l'acciaio bonificato 1.2311, conosciuto anche come 40CrMnMo7.

Questo materiale consente di avere una superficie esterna dello stampo molto dura, senza però sacrificare la tenacità degli strati più interni. Inoltre, permette di costruire stampi plastica con specifiche esigenze di finitura superficiale.

Come già accennato, gli stampi vengono in buona parte ottenuti per **fresatura ed elettroerosione**, tecnica quest'ultima, che ci consente anche di realizzare più cavità all'interno di un singolo stampo, in maniera tale da produrre più pezzi contemporaneamente durante ogni ciclo di stampaggio.

Al fine di garantire un flusso ottimale del fuso nei canali interni e per evitare che il prodotto finale possa presentare difetti superficiali, le diverse cavità vengono spesso **lucidate**, in maniera tale da rendere le superfici perfettamente lisce.

Lo stampo, al suo interno, presenta un **sistema di alimentazione**, a sua volta composto dal canale principale ed i canali di distribuzione (i cosiddetti runner) e il gate di alimentazione.

Risulta fondamentale la presenza di sfoghi d'aria, cioè delle piccole cavità che possano permettere la fuoriuscita dei gas all'interno dello stampo, evitando al contempo che il flusso di materiale possa fuoriuscire.

Questo espediente è di **vitale importanza** per evitare la presenza di difetti, anche gravi, nel prodotto finale, quali zone di corrosione superficiale, mancata saldatura dei flussi nei punti d'incontro, riempimenti incompleti, proprio a causa dell'intrappolamento di questa aria all'interno dello stampo.

In base alla complessità dello stampo, è possibile stilare una classificazione come segue (figura 1.27):

- 1) **Stampi a 2 piastre e a canali freddi:** la configurazione più semplice e basilare.
- 2) **Stampi a 3 piastre e a canali freddi:** il sistema di iniezione viene separato dalla parte dopo l'apertura dello stampo.
- 3) **Stampi a canali caldi:** soluzione più complessa e costosa delle due precedenti.

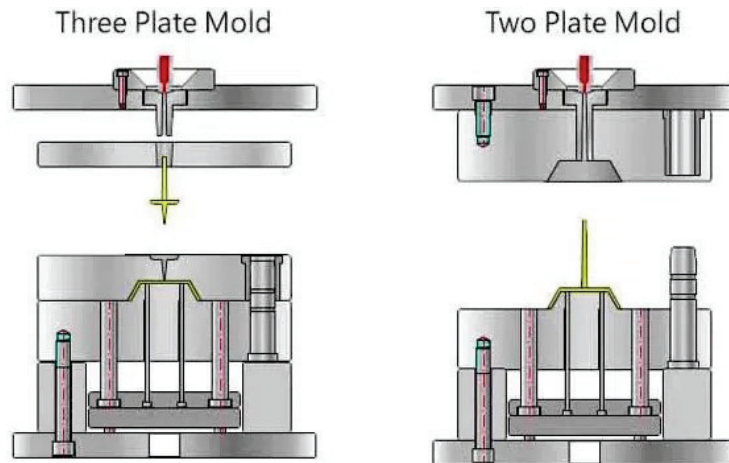


Figura 1.27: Differenza fra uno stampo a **due** o **tre** piastre. [16]

Gli **stampi a canali freddi**, sono largamente impiegati in ambito industriale per la loro relativa semplicità, difatti il canale di alimentazione si solidificherà al termine del processo, questo significa che, per riuscire ad aprire lo stampo, risulterà necessario separare il canale di alimentazione o tramite una **tranciatura** successiva, oppure sfruttando un sottosquadro previsto in fase di progettazione, che realizzerà la separazione delle due parti tramite la semplice apertura dello stampo.

Fra i vantaggi che scaturiscono dalla scelta di un sistema a canali freddi abbiamo:

- Design del sistema più semplice rispetto alla controparte a canali caldi.
- Possibilità di impiegare una gamma più ampia di materiali, in quanto non avremo problemi di corrosione chimica o fenomeni legati alle alte temperature.
- Costi ridotti per lo stampo ed il sistema nel complesso.

Non mancano, di certo, alcuni svantaggi:

- L'adozione di un sistema a canali freddi, risulta più idoneo nel caso di produzioni medio-piccole, in quanto il tempo ciclo, a causa della necessità di raffreddare completamente l'alimentazione, sarà **inevitabilmente più lungo**.
- Risulterà necessario l'impiego di presse più grandi, in quanto il quantitativo di materiale totale da iniettare, rispetto alla controparte, sarà **maggiore**.
- Per quanto detto in precedenza, molto materiale dovrà essere processato e gettato via in quanto i canali, una volta solidificati, non saranno più riutilizzabili.

Negli **stampi a canali caldi**, il materiale all'interno del sistema di alimentazione non si raffredderà fino al punto da solidificarsi, per questo motivo lo stampo sarà progettato in maniera tale da dividere le due porzioni (calda e fredda), tramite opportune valvole (gate), tenendo il materiale ad una certa temperatura ottimale, già pronto per il prossimo ciclo.

Vi sono diversi vantaggi nell'adozione di un sistema di canali caldi nello stampo:

- Non essendo necessario far solidificare i canali, avremo un minor spreco di materiale ed energia per la sua movimentazione oltre che per il suo processamento a valle del ciclo.
- Le macchine utilizzate per stampare, potranno essere più piccole, in quanto il quantitativo di materiale da iniettare durante ogni singolo ciclo, sarà decisamente minore.
- Il tempo ciclo necessario, risulterà sensibilmente ridotto.
- Tutti i punti precedenti comportano in generale una **riduzione dei costi** non indifferente.
- Risulterà più semplice realizzare pezzi che necessitano di molti gate per essere riempiti (quindi anche molto estesi e/o complessi).
- Le pressioni di iniezione richieste sono relativamente più basse, questo comporta minori tensioni nel materiale in fase di stampaggio oltre che meno tensioni residue una volta completato.
- Quanto detto al punto precedente, ci consente di ottenere pezzi di **qualità superiore**.

Anche un sistema di alimentazione a canali caldi, non è certo esente da contro e svantaggi:

- Su tutti possiamo certamente asserire che il sistema sia molto più complesso, questo comporta un innalzamento dei costi in termini di acquisti da fornitori e/o progettazione.
Risulta necessario sottolineare, però, che uno stampo a canali caldi viene spesso utilizzato per realizzare un numero piuttosto importante di manufatti.
Questo aspetto, unito ad una scelta consapevole ed ottimale del materiale da impiegare, ci consente di ottenere dei vantaggi in termini economici sulla produzione.

I **punti di iniezione (o gates)**, costituiscono le sezioni di passaggio fra il sistema di alimentazione e la cavità nello stampo. La determinazione della loro posizione non è mai banale, essi devono trovarsi in una zona tale da non intralciare il processo, che possa favorirne la corretta rimozione, non devono essere posizionati in corrispondenza di superfici che richiedono una particolare finitura e non devono trovarsi in aree del manufatto finale che saranno particolarmente sollecitate durante la messa in esercizio, in quanto il gate potrebbe far insorgere degli stress residui nel pezzo, risultando così un punto strutturalmente debole. Al contempo, devono garantire il riempimento ottimale di tutto il volume. Bisogna in ogni caso tener conto di una serie di fattori, che ci aiuteranno a comprendere meglio quanti gates inserire e, soprattutto, dove posizzarli:

- spessore del pezzo (favorire l'iniezione nel punto più spesso)
- variazioni di spessore del pezzo (perdite di carico e cristallizzazione del fuso)

- estensione e peso del pezzo
- tipo di materiale stampato (differenti viscosità)
- requisiti estetici, dimensionali e meccanici del pezzo (finitura superficiale, deformazioni, tensioni residue)
- presenza di vincoli meccanici a stampo quali condizionamenti e/o movimenti
- numero delle impronte e loro disposizione nello stampo

Per quanto riguarda il **sistema di raffreddamento**, esso ha il chiaro compito di agevolare la riduzione della temperatura dello stampo, e di ciò che c'è all'interno, al fine di poterlo aprire secondo i tempi previsti dal ciclo di stampaggio.

Nella scelta della modalità di raffreddamento del manufatto, bisogna stare attenti a due aspetti decisivi ai fini della riuscita del processo:

- In primis un sistema di raffreddamento molto efficace richiede l'impiego di temperatura criogeniche (cioè, molto prossime allo zero assoluto), questo si traduce in un maggior consumo di energia per far funzionare il sistema, quindi in un considerevole aumento dei costi di produzione (talvolta anche esponenzialmente).
- Si potrebbe inoltre erroneamente pensare che un raffreddamento più veloce possa portare notevoli benefici al processo, in realtà non è proprio così.

Se il pezzo viene sottoposto ad uno sbalzo di temperatura eccessivo, con minime al di sotto del punto di rugiada, potrebbero manifestarsi fenomeni di condensa nello stampo, estremamente dannosi per il prodotto finale, in quanto potrebbero generare fenomeni di ossidazione e corrosione non solo nel pezzo finale ma addirittura sulle superfici dello stampo stesso.

A questo proposito, è buona norma monitorare la differenza di temperatura del fluido refrigerante fra l'ingresso e l'uscita del sistema, questa non dovrebbe mai superare gli 1-5°C.

Il delta di temperatura, ci permette di seguire il comportamento (la regolarità) della portata del materiale fuso all'interno del sistema, specialmente ci consente di rilevare eventuali cadute di pressione, che potrebbero generarsi, ad esempio, a causa di strozzature dovute magari a delle dimensioni dei gate e/o dei canali errate.

1.11.3 Linee guida per injection molding

Nel corso del tempo, grazie all'esperienza accumulata dagli addetti al settore, sono state stilate, e costantemente aggiornate, delle linee guida ai fini del corretto allestimento dello stampo in un processo di injection molding:

- 1) Valutare la **dimensione degli spessori** da realizzare nel pezzo: essi dovrebbero essere abbastanza ridotti da permettere l'utilizzo di minor materiale possibile e da ridurre il tempo ciclo, allo stesso tempo abbastanza grandi da non dover richiedere l'impiego di macchine per iniezione eccessivamente performanti, quindi costose.

Il trade-off ottimale dipende fortemente dalla disponibilità economica e dalle nostre esigenze produttive.

Ricordiamo inoltre che, se il pezzo presenta in genere spessori differenti, risulta opportuno prevedere determinate soluzioni al fine di rendere le transizioni le più dolci possibili e regolarizzare, quindi, il flusso di materiale in quelle zone.

- 2) Prevedere delle **nervature** che non rispondano ad esigenze funzionali (ad esempio strutturali), bensì **esigenze di natura produttiva**, in quanto aiutano a convogliare il materiale in zone magari più difficili da raggiungere nello stampo.

Esse, inoltre, possono fungere anche da guide durante la fase di assemblaggio dello stampo.

Viceversa, potrebbe risultare necessario adottare dei **restringitori di flusso**, al fine di impedire che troppo materiale si addensi in alcune zone dello stampo.

La progettazione delle nervature dovrebbe tener conto di diversi aspetti quali:

- **Spessori:** essi non devono essere eccessivi, in quanto favorirebbero delle concentrazioni di volumi e materiale che, durante il suo ritiro a causa della solidificazione, potrebbero causare deformazioni indesiderate. Una regola empirica suggerisce che lo spessore della nervatura debba essere massimo 0,7 volte lo spessore della parete sulla quale si appoggia nel caso di **pareti estetiche**.

Al contrario, nel caso di **pareti di appoggio funzionali**, la **regola** suggerisce che lo **spessore ideale massimo** debba essere di **0,3 volte lo spessore della parete**.

- **Altezza:** nervature molto alte ci consentono di garantire un ottimale supporto strutturale alla parte, allo stesso tempo però potrebbero comportare una certa difficoltà nel riempimento dello stampo, in quanto il materiale potrebbe far fatica nel raggiungere determinate zone.

Una **regola di massima** suggerisce di realizzare nervature che abbiano **un'altezza circa tre volte la loro base**.

- **Posizione e quantità:** in generale conviene realizzare più nervature di dimensioni ridotte, piuttosto che una singola nervatura molto grande.

- 3) **Controllare il ritiro del materiale** in fase di raffreddamento (come già discusso prima).
- 4) Rispettare la **dimensione dei raggi esterni** del pezzo, in modo tale da garantire uno spessore costante nella regione di curvatura (**raggio ext.=raggio int.+spessore**).
- 5) **Al fine di evitare concentrazioni di tensioni**, a causa dell'effetto intaglio nel nostro pezzo, occorre prevedere dei raggi di raccordo minimi nelle regioni di interconnessione fra diverse porzioni. Una **buona regola** è di adottare un **raggio del valore minimo di 0,25 mm**.
- 6) Uno degli aspetti cruciali nella corretta impostazione dello stampo, consiste nel prevedere la realizzazione di opportuni **angoli di sforno** (**minimo 0,5°**,

ottimale almeno 1°), su tutte le superfici parallele alla direzione di sfilamento delle due metà dello stampo. Si intuisce, quindi, che le due metà dovranno avere **angoli di sforno opposti fra di loro**. L'assenza di sforni potrebbe causare la generazione di forze d'attrito molto elevate fra manufatto e stampo che andrebbero a rendere complessa l'estrazione, inoltre potrebbero provocare il danneggiamento superficiale del pezzo.

- 7) Bisogna prestare particolare attenzione alla presenza di **sottosquadri**: lo stampaggio ad iniezione, di norma, non prevede la possibilità di realizzare sottosquadri nei propri pezzi (questi, infatti, andrebbero ad impedire l'estrazione del pezzo). Nel caso in cui essi fossero necessari, l'utilizzo di stampi complessi che prevedano la presenza di carrelli è obbligatorio.
- 8) Le geometrie filettate possono essere realizzate o utilizzando dei particolari inserti, con **asse sempre perpendicolare** a quello del piano di separazione dello stampo (in genere sono però molto costosi), oppure direttamente tramite il processo fusorio, in questo caso si tratta di realizzare filettature non troppo profonde (comunque sia sempre **minore** della profondità del foro stesso).
- 9) **Evitare** di realizzare **fori di pezzo con una parete**, questo perché, a causa dei differenti ritiri nelle diverse sezioni di materiale, potrebbero generarsi delle **rientranze (sink)**. Una delle soluzioni più adottate, ad esempio, consiste nel separare il foro dalla parete tramite l'impiego di **costole**.
- 10) Evitare gli **spigoli vivi**, zone in corrispondenza delle quali potrebbero rimanere intrappolate bolle d'aria pericolose. A questo proposito, si consiglia di realizzare opportuni **smussi**.
- 11) Ad oggi, la **simulazione computerizzata**, costituisce uno strumento potentissimo in grado di prevedere l'andamento del processo di stampaggio in maniera molto affidabile. Quando possibile, risulta estremamente utile effettuare simulazioni del processo produttivo e/o dell'attrezzatura di produzione.

1.11.4 Difetti Injection Molding

Durante un processo di injection molding, molti sono i possibili difetti da cui dobbiamo ben guardarci al fine di ottenere un prodotto conforme alle nostre aspettative, ne esamineremo qui di seguito alcuni, valutando anche alcune soluzioni o accorgimenti al fine di ridurli o evitarli del tutto.

- In primo luogo, parliamo delle **linee di flusso**, una circostanza per la quale osserviamo, sulla superficie del pezzo finito, delle linee o striature ben riconoscibili.

Vi sono diverse cause possibili, una di queste consiste nella variazione brusca di direzione del flusso, dovuta alla presenza o di spessori molto differenti oppure di una variazione nella velocità di raffreddamento di diverse porzioni del componente.

Tra i possibili rimedi annoveriamo l'aumento della velocità e della pressione di iniezione, l'aumento di temperatura della lega o dello stampo, tutte accortezze

che ci consentono di aumentare i tempi di raffreddamento del pezzo e renderlo in generale più omogeneo ed isotropo.

- I **segni di bruciatura** in uno stampato sono un'altra possibile problematica che può manifestarsi in un processo di stampaggio ad iniezione.

Fenomenologicamente si manifestano come delle porzioni di superficie del pezzo di colore in genere scuro (nero o color ruggine perlopiù), causate da dell'aria intrappolata all'interno dello stampo che, surriscaldandosi, provoca delle vere e proprie "ustioni" sulla superficie stessa.

Anche l'eccessiva velocità di iniezione o l'eccessiva temperatura del materiale fuso possono provocare le bruciature.

Al fine di evitare tali circostanze, bisogna monitorare attentamente la temperatura di fusione oltre che quella dello stampo, ridurre eventualmente la velocità di iniezione per scongiurare o limitare l'intrappolamento di aria nello stampo, adottare sfiati di dimensione adeguata.

Questi primi due difetti sono prevalentemente di natura estetica, in genere non incidono strutturalmente sul pezzo, a meno che, come nel caso delle bruciature, queste non abbiano penetrato talmente tanto in profondità nel pezzo da portare il materiale plastico al punto di degrado.

- Le **deformazioni (warpage)**, si manifestano nel momento in cui porzioni diverse del pezzo hanno tempi di raffreddamento estremamente dissimili oppure quando porzioni diverse, a causa delle loro proprietà chimico-fisiche, si restringono in maniera non uniforme.

Questa circostanza può provocare delle sollecitazioni flessionali e/o torsionali nel componente, durante la fase di solidificazione/raffreddamento.

Per prevenire tale problematica risulta fondamentale, a monte, progettare uno stampo che abbia pareti di spessore più uniforme possibile sull'intera estensione della parte, possibilmente il più simmetrico possibile (per garantire una maggiore stabilità durante il raffreddamento).

In generale, bisogna essere certi di utilizzare un polimero che abbia dei tempi di raffreddamento abbastanza lunghi da riuscire a far sì che la solidificazione sia la più lenta, graduale ed uniforme possibile.

- Abbiamo già nominato, in questa trattazione, i **vuoti (o sacche d'aria)**. In alcuni casi, a causa specialmente di pressioni di iniezione insufficienti, alcune bolle d'aria, più o meno grandi, possono rimanere intrappolate all'interno dello stampo.

La circostanza è particolarmente sfavorevole, in quanto parte di volume che dovrebbe essere occupato dal materiale, viene invece occupato dall'aria.

In casi estremi, l'integrità del pezzo stesso potrebbe essere compromessa. Un'altra possibile causa, da non sottovalutare, consiste nel fatto che il materiale scelto per l'iniezione, potrebbe essere molto sensibile alla formazione di vuoti a causa della variazione considerevole della sua densità al variare delle temperature di esercizio.

Scegliere un materiale più stabile da questo punto di vista, aumenterebbe sicuramente la qualità del prodotto finale.

Aumentare la pressione di iniezione, potrebbe risolvere efficacemente il proble-

ma, in questo modo riusciamo ad espellere la maggior parte dell'aria presente nello stampo.

- Abbiamo già accennato alle **rientranze (o sink marks)**, un possibile difetto provocato dal raffreddamento più rapido della parte interna del materiale fuso, il quale tende a restringersi ed a tirare verso di sé le porzioni più esterne che devono ancora raffreddarsi completamente.

Per riuscire a contrastare la formazione di queste rientranze o depressioni, è possibile aumentare il tempo di mantenimento del materiale nello stampo, oltre che aumentare la pressione di iniezione (al fine di riempire tutto lo stampo in un tempo non troppo dilatato).

Anche il progetto di uno stampo con pareti più sottili, può giocare a nostro favore in quanto le porzioni più esterne tenderanno a raffreddarsi più velocemente.

- Le **linee di giunzione (weld lines)**, possono formarsi in seguito alla generazione di due o più fronti di materiale fuso, che divergono magari a causa della particolare geometria del pezzo. In un secondo momento, quando queste due si ricongiungeranno, è possibile che le condizioni di velocità e temperatura dei singoli flussi, non saranno ottimali al fine di generare un legame sufficientemente forte nel materiale. Questa circostanza può indurre una riduzione anche significativa delle proprietà meccaniche del pezzo in quella zona. Tra i rimedi più comuni vi sono quello di aumentare pressione e velocità di iniezione, al fine di evitare che il materiale possa anche solo parzialmente solidificarsi prima che abbia riempito l'intero stampo, adottare un materiale con temperatura di fusione minore, oppure che abbia viscosità inferiore, al fine di avere un flusso più rapido che possa riempire uniformemente ed in tempi più brevi lo stampo.

- Il **getto** comporta la presenza di "impronte" sulla superficie del pezzo terminato, a causa di una velocità di iniezione eccessiva.

Essenzialmente, nel momento in cui si inietta a velocità troppo elevate, il flusso non riesce a aderire correttamente alle pareti dello stampo contro le quali andrà ad impattare violentemente.

A causa della considerevole differenza di temperatura, il getto espulso dall'ugello si solidificherà molto velocemente.

Nel momento in cui il restante fuso verrà iniettato, le porzioni già solidificate verranno spinte contro le pareti, lasciando alla fine delle impronte sulla superficie del pezzo.

Bisogna prestare particolare attenzione alla dimensione ed alla posizione del punto di iniezione, in maniera tale che il materiale non schizzi improvvisamente e che vi sia un'adesione ottimale del fuso sulle pareti dello stampo.

In alcuni casi, risulta sufficiente ridurre la pressione di iniezione per ottenere un risultato accettabile.

- Una parte stampata, a volte, può presentare delle porzioni il cui colore non è quello che avevamo preventivato, questo fenomeno può manifestarsi a strisce oppure a chiazze sulla superficie del pezzo.

Il difetto appena descritto è noto come **scolorimento**. Esso compromette l'estetica del pezzo e non la struttura.

Vi sono differenti cause scatenanti, fra queste la possibilità che l'ugello possa essere parzialmente ostruito, oppure che nello stampo o nella tramoggia, vi sia del residuo di precedenti cicli di lavorazione.

Infine, anche la stabilità chimica dell'agente colorante ricopre un ruolo fondamentale.

Bisogna quindi prestare attenzione alla pulizia dei macchinari impiegati tra un ciclo e l'altro e l'adozione di agenti coloranti chimicamente stabili, cioè che non risentano eccessivamente della variabilità delle condizioni di lavoro (temperatura, pressione...).

- Uno dei difetti più gravi dal punto di vista strutturale è sicuramente la **dela-minazione**.

Fenomenologicamente si manifesta con degli strati sottili (come delle squame) sulla superficie della nostra parte stampata, i quali spesso si rompono o si staccano con molta facilità.

Due sono le cause più accreditate per un simile difetto, in primis la possibile contaminazione del materiale originario da parte di un agente estraneo.

Anche una quantità di umidità eccessiva assorbita dal materiale può a volte provocare un simile difetto.

Esistono, difatti, dei materiali che sono particolarmente sensibili all'umidità dell'ambiente di lavoro: essi sono detti **igroscopici**.

Oltre alla sua capacità di assorbimento dell'umidità, diversi altri fattori concorrono all'aumento del contenuto di acqua nel pellet, quali:

- Tempo che intercorre fra la produzione del granulo e il suo effettivo utilizzo
- Tempo che intercorre fra l'apertura dell'imballaggio e l'impiego del granulo
- Il tipo di imballaggio adottato

Ogni polimero, deve essere trattato adeguatamente ed essiccato secondo specifiche procedure al fine di prepararlo correttamente al processo.

Importante, quindi, cercare di preservare e maneggiare correttamente il pellet di resina da parte degli operatori, oltre che tenere sotto controllo le temperature di esercizio e verificare l'umidità del pellet stesso prima di utilizzarlo nel processo.

- La **stampa incompleta (short shot)**; è una delle casistiche peggiori in assoluto in cui possiamo imbatterci.

In questo caso, il prodotto finale presenta letteralmente delle porzioni mancanti, questo difetto può provocare il fallimento completo del ciclo di stampaggio. La causa più comune è la scarsa portata del flusso causata da gate troppo stretti o addirittura bloccati.

È possibile che all'interno dello stampo vi sia eccessiva aria intrappolata, oppure che il materiale impiegato sia talmente denso che esso non riesca a riempire completamente lo stampo prima del suo completo raffreddamento.

Anche un'inadeguata temperatura dello stampo oltre che insufficienti pressioni e velocità di iniezione, possono provocare questi difetti grossolani.

- Infine, abbiamo le **sbavature (flash)**.

Consistono in un eccesso di materiale di stampaggio che tende a fuoriuscire dal piano di divisione dello stampo sotto forma di un sottile labbro (che poi ritroveremo nel pezzo finito), tipicamente dovuto al fatto che, per qualche ragione, il materiale è defluito al di fuori dei canali di flusso previsti. Diverse possono essere le cause, processo condotto in condizioni di pressione e temperatura troppo elevate, stampo usurato, degradato o ancor peggio mal progettato, od anche il fatto che la forza di serraggio che stiamo applicando fra le due piastre risulta insufficiente per garantire una tenuta stagna dello stampo.

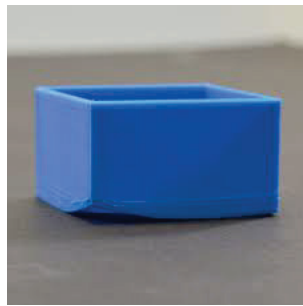
Esempi reali di tali difetti, sono rappresentati nella rassegna di immagini 1.28.



(a) *Linee di flusso.*



(b) *Segni di bruciatura.*



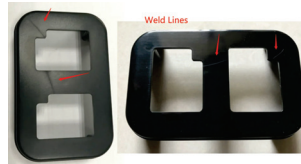
(c) *Deformazioni (warping).*



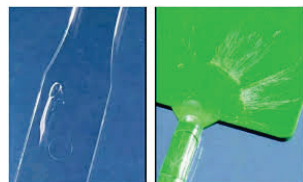
(d) *Vuoti o sacche d'aria.*



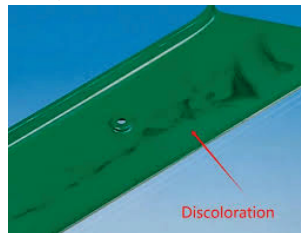
(e) *Rientranze (sink marks).*



(f) *Linee di giunzione (weld lines).*



(g) *Getto (jetting).*



(h) *Scolorimento.*



(i) *Delaminazione.*



(j) *Stampa incompleta (short shot).*



(k) *Sbavature (flash).*

Figura 1.28: Difetti che possono presentarsi durante un processo di stampaggio ad iniezione. [10]

1.12 Presentazione del componente mostrina

Il lavoro di tesi, si è concentrato sul processo di realizzazione di una mostrina estetica per una vettura di un costruttore di automobili della Motor Valley molto importante, il quale ha richiesto all'azienda in cui ho svolto il tirocinio, STAR-7, una consulenza tecnica.

L'idea di poter coniugare l'attività reale alla stesura di un elaborato, è nata da un mio collega che, nonostante abbia meno di trent'anni, possiede già un background notevole in tema di stampaggio di materie plastiche, nello specifico per quanto riguarda lo stampaggio ad iniezione, frutto di un'esperienza maturata in oltre dieci anni di lavoro nel settore, a partire dal mondo dell'ottica, fino a quello automotive ormai da qualche anno.

La mostrina è parte integrante di una nuova vettura, che andrà a sostituirla una attualmente in produzione, come **seconda serie**.

Il componente in questione è molto simile a quello di figura 1.29, il quale è la variante equipaggiata dalla prima serie, come vedremo nei prossimi paragrafi, è leggermente cambiata, le dimensioni complessive sono leggermente diverse.

La sua forma è pressochè **trapezoidale**, con gli spigoli raccordati ed è leggermente bombata, presenta quindi una curvatura.

Il caso in esame possiede una peculiarità: il posizionamento della mostrina in vettura visibile in figura 1.29, potrebbe far pensare che possa trattarsi di un componente di **scocca** vettura, per questo motivo il materiale impiegato potrà verosimilmente essere una lega di alluminio.

Notiamo che la mostrina è posta all'esterno della vettura posteriormente, in una zona tale da essere sovrastata dal lunotto nelle varianti **coupè**, e dalla **capote in tela** nella varianti spyder.

Sugli altri tre lati, invece, deve interfacciarsi con la scocca vettura, quindi con le **fiancate laterali**, le quali comprendono anche il frame delle porte della vettura, e con il **cofano posteriore**.



Figura 1.29: Posizionamento mostrina in vettura, in questo caso nella variante in fibra di carbonio. (credits: google images)

In realtà, il cliente ha scelto, sin dalla prima serie, di produrla in **materiale plastico** per le versioni "base" e di poter inserire l'optional della **fibra di carbonio** a richiesta.

Molti sono i driver che hanno guidato i tecnici dell'azienda nella scelta di realizzare questo componente in materiale polimerico piuttosto che in alluminio ad esempio, fra questi possiamo citare la **ripetibilità del processo produttivo**, i costi comunque **ridotti** rispetto alle varianti di scocca, nonostante la realtà di cui stiamo parlando sia una delle più importanti di sempre nel settore automotive e, a livello economico, non hanno particolari necessità di ottimizzazione dei costi.

Da questo punto di vista, parliamo di un **volume di produzione totale** che si aggira su cifre che vanno dai 10 000 ai 12 000 pezzi.

Per tale motivo, il risparmio sul singolo pezzo si aggirerebbe su cifre piuttosto contenute.

La quotaparte di costo associata al processo di stampaggio in sè, non è di certo così importante, la maggior parte della spesa coinvolge la realizzazione della struttura di supporto, che prende il nome di **ossatura**, la quale verrà poi incollata alla mostrina, oltre che la presenza di altri elementi quali **inserti filettati** al fine di poter accoppiare questo sottoassieme al telaio vettura.

Un altro fattore, forse il più importante di tutti, è quello dello **stile**, la plastica pone veramente pochi limiti alle possibilità **creative**, in quanto estremamente **versatile** in termini di ottenimento di forme anche molto complesse, abbastanza facilmente e con una resa **estetica** complessivamente superiore.

1.13 Valutazione del processo produttivo

Il cliente, ha posto dei vincoli molto chiari in termini di processo produttivo da impiegare e, di conseguenza, di categoria di materiali da utilizzare.

Vi è da precisare che, la mostrina equipaggiata dalla prima serie vettura, era stata realizzata in **R-RIM (Reinforced Reaction Injection Molding)**, un processo di stampaggio per alcuni aspetti simile a quello ad iniezione classico, utilizzato per realizzare manufatti in materiale **termoindurente** piuttosto che termoplastico.

Tale processo è conosciuto in italiano con il nome di **stampaggio ad iniezione**. (figura 1.30)

Solitamente adatto a **bassi volumi produttivi**, il RIM sfrutta la reazione fra due sostanze principali l'**isocianato** ed il **poliolo**, che, una volta miscelate, andranno incontro ad una **espansione**, per poi legarsi chimicamente durante la reazione di **polimerizzazione**, dando vita a materiali termoindurenti come il **poliuretano**.

Grazie alla notevole versatilità del processo in termini di materiali, però, possono essere talvolta anche utilizzati dei termoplastici.

Al fine di incrementare le loro proprietà meccaniche e la loro resistenza alle elevate temperature, ai reagenti possono essere aggiunte delle **fibre** cortissime di **vetro** e/o **carbonio**, in questo caso si parla di **rinforzi** al materiale (da cui il nome di **Reinforced-RIM**).

Il RIM è particolarmente adatto alla produzione di componenti di grandi dimensioni, relativamente leggeri, con buona resistenza, durevoli e con forme complesse.

L'impiego principale in ambito automotive consiste nella realizzazione di **assorbitori di energia** per urti leggeri, oppure, ad esempio, per la realizzazione di cruscotti

per automobili, i quali oltre ad avere una funzione estetica, devono rispondere a specifici requisiti in termini strutturali, specialmente negli urti frontali.

Confrontando il RIM e lo stampaggio ad iniezione, si possono evidenziare le seguenti differenze:

Materiale e processo chimico:

- Nel RIM, nella quasi totalità dei casi, le due sostanze reagenti si legano a formare un materiale plastico di tipo **termoindurente**, polimerizzando in modo permanente.
- Nel caso dello stampaggio ad iniezione, invece, si impiegano materiali termoplastici i quali vengono fusi ed iniettati nello stampo, per poi farli raffreddare. Tali materiali, possono essere poi rifusi e rimodellati, al fine di realizzare nuovi manufatti.

Ciclo produttivo:

- A causa delle temperature e delle pressioni di esercizio più basse, oltre che per il tempo che è necessario attendere al fine di permettere la reazione chimica e l'indurimento del materiale, nel RIM il singolo ciclo produttivo risulta più **lungo**.
- Nel caso dello stampaggio ad iniezione, i cicli produttivi sono più **rapidi**.

Complessità e caratteristiche delle parti:

- Il RIM, come già detto, consente la produzione di componenti di dimensioni ragguardevoli, con ottime proprietà meccaniche e buone finiture superficiali, inoltre, in generale è un processo più semplice.
- Lo stampaggio ad iniezione, d'altro canto, è decisamente più adatto alla produzione di componenti di dimensioni **ridotte** ed in **grandi volumi**, inoltre risulta molto più complesso e delicato da gestire.

A differenza dello stampaggio ad iniezione standard, nel RIM si opera con pressioni e temperature decisamente **inferiori**, sfruttando molto di più la **chimica** delle sostanze in gioco e la loro **miscelazione** in maniera tale da creare la giusta coesione nel pezzo finale.

Parliamo, nello specifico, di pressioni di iniezione corrispondenti a **centinaia** di bar, nel caso dello stampaggio ad iniezione, come già detto, necessitiamo di valori di pressione di iniezione dell'ordine delle **migliaia** di bar.

Come possiamo osservare, la differenza è notevole, parliamo difatti di un ordine di grandezza.

Infine, a livello di costi, nel RIM possono essere impiegati utensili più leggeri e meno costosi rispetto alla tipica pressa per lo stampaggio ad iniezione.

Nel caso della mostrina in oggetto, l'R-RIM non riusciva a soddisfare appieno i **requisiti estetici**, mentre risultava piuttosto efficace per quanto concerne quelli **funzionali**.

La finitura superficiale ottenuta nei manufatti finali, una volta terminato il ciclo di

Reaction Injection Molding (RIM) Process

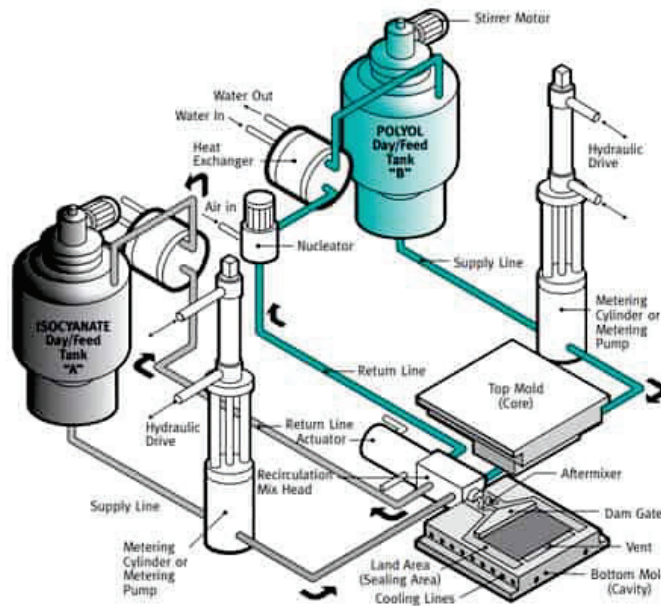


Figura 1.30: Schema del processo di R-RIM. [13]

lavorazione primario, **risultava piuttosto scarsa**.

Inoltre, la maggior parte delle volte, vi era la necessità di eseguire **più cicli di lucidatura** al fine di ottenere una superficie ben **verniciabile**.

Questo implicava la necessità di ulteriori lavorazioni che facevano salire notevolmente il costo del singolo pezzo.

Per questi motivi, quindi, si è scelto di passare al più convenzionale **stampaggio ad iniezione**, sicuramente più costoso, ma che allo stesso tempo potesse garantire una qualità complessiva del pezzo **molto elevata**, una volta estratto dallo stampo. Questa manovra, chiaramente, comportava la necessità di cambiare il target di materiale da dover utilizzare, si è passati infatti dal mondo dei termoindurenti a quello dei termoplastici.

La sfida che ci si poneva davanti non era così banale prestazionalmente parlando.

1.14 Mostrina seconda serie

Entriamo, così, nello specifico della mostrina della seconda serie di questa vettura, oggetto dell'elaborato di tesi.

1.14.1 Caratteristiche dimensionali e geometriche

La mostrina "nuova", ha delle dimensioni ed una forma abbastanza simili alla precedente, pressochè trapezoidale, presenta due alette laterali rialzate rispetto ad una regione centrale ben visibile nelle figure 1.31, 1.32, 1.33, e 1.34 di seguito:

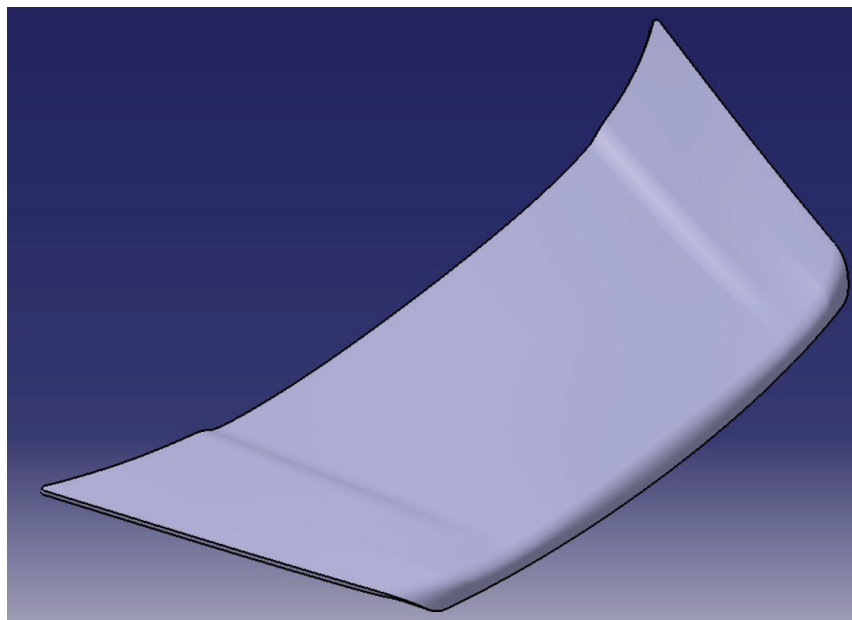


Figura 1.31: Vista isometrica della mostrina dal posteriore vettura.

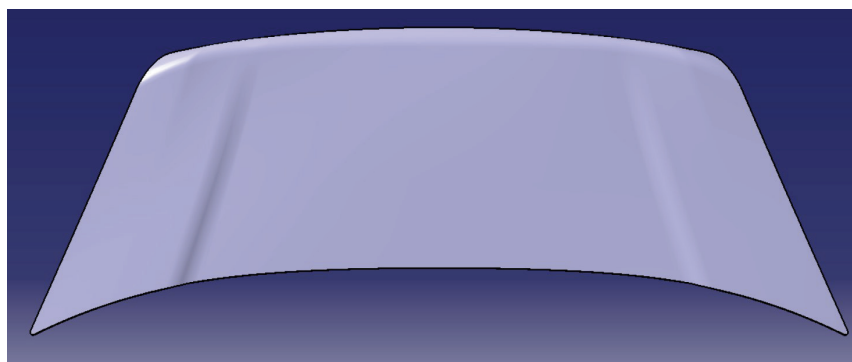


Figura 1.32: Vista dall'alto della mostrina.

In generale, il pezzo presenta due minime curvature, sia in senso longitudinale vettura (dimensione secondaria del pezzo), sia in senso trasversale (dimensione principale del pezzo).



Figura 1.33: Vista laterale mostrina (direzione trasversale vettura).



Figura 1.34: Vista anteriore (direzione longitudinale vettura).

Il pezzo presenta le seguenti dimensioni:

- 900 *mm* per quanto riguarda la dimensione principale, in direzione della larghezza vettura (contro un 600-700 *mm* della vecchia).
- 300 *mm* per quanto riguarda la dimensione secondaria, in direzione di marcia della vettura (contro i circa 350 *mm* della vecchia).
- 3 *mm* di spessore, uniforme sull'intero pezzo.

Nello specifico, per quanto riguarda lo spessore, si era partiti da un valore teorico di 2 *mm*, successivamente si è scelto di portarlo a 2.5 *mm*, per poi fissarlo a 3 *mm*. Queste modifiche successive sono state dettate da due osservazioni scaturite dai risultati di alcune valutazioni ed indagini preliminari:

- Come prima cosa, riempire un pezzo di questa estensione, con uno spessore distribuito uniformemente così ridotto, risultava essere piuttosto complesso, pur scegliendo materiali con delle ottime viscosità, che potessero fluire agevolmente nello stampo, oltre che con un ottimale condizionamento dello stesso.
- Come seconda cosa, come vedremo sarà molto importante, le deformazioni riscontrabili nel pezzo risultavano eccessive. Il componente tendeva a svergolare molto facilmente e questo effetto era ancor più amplificato dalle generose dimensioni.

Per quanto detto, siccome gli ingombri longitudinale e trasversale erano ormai fissati, si è scelto di procedere aumentando lo spessore oltre che realizzando un'apposita nervatura di supporto che verrà analizzata successivamente.

Complessivamente la geometria risulta piuttosto semplice, la difficoltà però sta proprio nell'importante estensione, si intuisce quindi come queste osservazioni influenzino in maniera sostanziale sia l'impostazione del modello da analizzare, sia il setup della simulazione.

Capitolo 2

Obiettivi, metodo adottato e strumenti utilizzati

2.1 Requisiti e target associati alla mostrina

L'obiettivo di questo elaborato di tesi, consiste nell'indagare la fattibilità dell'impiego del nuovo processo di stampaggio ad iniezione della mostrina estetica, al posto dell'R-RIM scelto per la prima versione, tenendo conto anche del cambiamento in termini di materiale.

La buona riuscita di questo caso applicativo, è misurata sulla base di una serie di target e requisiti che il componente deve soddisfare.

Di seguito, si riporta la *requirement list*:

- 1) La mostrina dovrà rispettare specifici ingombri, quindi delle misure complessive di 900x300x3 *mm*. Questo comporta il dover tener conto del fenomeno del **ritiro** durante lo stampaggio, tramite il **sovradimensionamento** della mostrina, stimato a partire dai dati presenti nel datasheet del materiale.
- 2) Per quanto riguarda l'aspetto estetico, la mostrina, come già detto, deve essere direttamente verniciabile, senza dover eseguire ulteriori lavorazioni. Uno dei parametri da tener sotto controllo, a questo proposito, sarà la **portata di materiale fuso** da introdurre nello stampo, nello specifico la **velocità** con la quale lo stampo si riempie. L'ideale sarebbe avere un riempimento il più **rapido** ed **uniforme** possibile. Un altro fattore che concorre alle proprietà estetiche è il **tempo di mantenimento**, deve essere sufficientemente **elevato** da poter spingere il fuso, per contrastare il ritiro, fino alla solidificazione completa, ma allo stesso non troppo lungo da non permettere più ai gate, già raffreddati, di poter spingere.
- 3) Il **warpage** deve rispettare i seguenti valori di riferimento:
 - Deformazione ± 1 mm in direzione x e y
 - Deformazione di ± 1 mm in direzione z

A tale fine, è importante cercare di avere dei campi di pressione e temperatura più uniformi possibile sull'intero pezzo: questo implica una scelta consapevole dei valori iniziali, come anche la corretta sequenza di apertura dei gate di

iniezione, al fine di non iniettare con eccessivo ritardo in alcune zone piuttosto che in altre. È doveroso precisare che questi sono target teorici, inoltre, il ritiro in direzione z risulta quello più importante ai fini del risultato finale, in direzione x e y è sufficiente verificare che il ritiro abbia un comportamento conforme a quello atteso.

- 4) Un altro target è quello del peso: il riferimento è quello del PLUSFIL BR151G, un materiale termoplastico la cui densità è di 1.23 g/cm^3 . L'obiettivo è di cercare di contenere la massa entro **1 chilogrammo**.
- 6) Infine, il cliente, esegue dei test di qualità, basati su dei **cicli termici**, descritti in delle normative interne all'azienda, prima di poter deliberare definitivamente il pezzo per il montaggio su vettura. Nonostante questi test non riguarderanno il mio lavoro, poichè verranno eseguiti sui prototipi stampati (ad oggi non ancora disponibili), se ne riporta comunque la descrizione:

- 4h ogni ciclo per n°10 cicli = totale 40h

Dettaglio struttura ciclo:

- 70-80°C(1h),
- 80-90°C(1h),
- 90-100°C(1h),
- ramp-up 105°C(1h)

2.2 Selezione preliminare dei materiali

Come si è potuto apprezzare ancor di più attraverso le simulazioni, il materiale, per questo caso applicativo, ha rivestito un ruolo a dir poco **fondamentale**, per questo motivo la prima fase di scouting è risultata molto importante e proficua.

L'obiettivo consisteva nel cercare un materiale già di per sè con le caratteristiche ideali da poter essere immediatamente simulato.

Sono stati definiti i seguenti requisiti di guida per la sua selezione:

- Comportamento più **isotropo** possibile, ergo, i **ritiri longitudinale e trasversale** dovrebbero essere teoricamente **uguali**.
- **CLTE (Coefficient of Linear Thermal Expansion)** indicativamente inferiore a $35 * 10^{-6}/K$, in ogni caso il più basso possibile.
- Densità non troppo dissimile dal valore del PLUSFIL BR151G, cioè di 1.23 g/cm^3 .
- Temperatura di esercizio continuativo (da technical datasheet materiale, teorico): 105°C.
- Temperatura di distorsione sotto carico: 110°C (o superiore).
- La presenza di **carica minerale talco**, che consente di aumentare la stabilità dimensionale e ridurre il costo del materiale, a fronte di una diminuzione accettabile delle proprietà meccaniche.

Sono stati vagliati moltissimi materiali con caratteristiche sulla carta valide per realizzare la mostrina, alcuni di questi sono riportati in figura 2.1:

Nome Commerciale	Famiglia Polimero	Cariche	Additivi	RITIRO		CLTE		Deflection Under Load ISO 75-1-1,-2	Densita'	Note
				Longitudinale	Trasversale	Longitudinale	Trasversale			
PLUSFIL BR151G	PA6	15% Fibra di vetro	Stabilizzanti al Calore	0.3%	0.9%	30x10 ⁻⁶ K	80x10 ⁻⁶ K			T0 → KO PEZZO MOLTO DEFORMATO -- CICLI TERMICI → NON TESTATO
LANKESS Poca KU 1-7313	PBT+PET	15% Fibra di vetro	-	0.5%	1.0%	50x10 ⁻⁶ K	110x10 ⁻⁶ K	165 [°C] 1,8Mpa 220 [°C] 0,45Mpa	1430 [Kg/m³]	T0 → KO PEZZO MOLTO DEFORMATO -- CICLI TERMICI → NON TESTATO
COVESTRO Bayblend T85 XF	PC+ABS	-	-	0.68%	0.68%	75x10 ⁻⁶ K	80x10 ⁻⁶ K	107 [°C] 1,8Mpa 126 [°C] 0,45Mpa	1140 [Kg/m³]	T0 → KO PEZZO MOLTO DEFORMATO CICLI TERMICI → NON TESTATO
XILOY Q219	PC+PET	Minerale	-	0.65%	0.65%	60x10 ⁻⁶ K	62x10 ⁻⁶ K	123 [°C] 1,8Mpa 108 [°C] 0,45Mpa	1270 [Kg/m³]	T0 → OK PEZZO MOLTO DEFORMATO CICLI TERMICI → NON TESTATO PROPOSTO PER MOSTRINA TONNEAU COVER F168MS
WARPI B FV15 U2 FER	PA6	15% Fibra di vetro	Stabilizzanti al Calore e UV	0.3%	0.8%	77x10 ⁻⁶ K	77x10 ⁻⁶ K	205 [°C] 1,8Mpa 165 [°C] 0,45Mpa	1230 [Kg/m³]	
NORYL GTX 810	PPE+PA6	10% Fibra di vetro	-	0.6%	1.0%	60x10 ⁻⁶ K	80x10 ⁻⁶ K	777 [°C] 1,8Mpa 777 [°C] 0,45Mpa	1183 [Kg/m³]	
NANVYNCH 1051 UV	PA6	Nano Cariche	Stabilizzanti al Calore e UV	0.85%	0.98%	68x10 ⁻⁶ K	70x10 ⁻⁶ K	180 [°C] 1,8Mpa 135 [°C] 0,45Mpa	1140 [Kg/m³]	
Amodel® A-1145 HS	PPA	45% Fibra di vetro	Stabilizzanti al Calore	0.2%	0.6%	50x10 ⁻⁶ K	35x10 ⁻⁶ K		1590 [Kg/m³]	
Zytel® HTNFG301 NC010 (PA*) Celanese	PPA	45% Fibra di vetro	Stabilizzanti al Calore	0.2%	0.6%	50x10 ⁻⁶ K	35x10 ⁻⁶ K		1590 [Kg/m³]	
Xencor® PP4 LGF-1930 FW HS BK545-9	PPA	45% Fibra di vetro	Stabilizzanti al Calore	0.2%	0.6%	50x10 ⁻⁶ K	35x10 ⁻⁶ K		1590 [Kg/m³]	

Figura 2.1: Tabella riassuntiva materiali vagliati per la mostrina e loro proprietà.

I materiali coinvolti nella selezione, sono perlopiù **amorfi**, in quanto i semicristallini hanno, in genere, un comportamento prevalentemente **anisotropo** vista la forte direzionalità impressa alle catene polimeriche dalla loro struttura molto ordinata. Inoltre, come già discusso nei capitoli introduttivi, analizzando il diagramma che mette in relazione **volume specifico** e **temperatura**, in genere i semicristallini manifestano un comportamento **non lineare** nel range che va da T_g a T_m .

Il **PLUSFIL BR151G** (della famiglia delle *poliammidi*) è stato inizialmente preso in considerazione per lo stampaggio ad iniezione della mostrina, in quanto termoplastico, come si vede dalla tabella di figura 2.1.

Il materiale in questione è stato testato sperimentalmente alla pressa sulla geometria della prima serie della mostrina, con esiti però estremamente negativi, in quanto il pezzo finale risultava molto deformato.

Si è scelto quindi di non sottoporlo ai cicli termici, visti i risultati scadenti della prima fase.

Il motivo di tale fallimento risiede molto probabilmente nella presenza di **fibra vetro** nella struttura della mostrina, essa difatti permette sì di ottenere notevoli vantaggi dal punto di vista meccanico, ma allo stesso tempo tende a rendere ancor più anisotropo il ritiro del materiale.

A riprova di ciò, basta osservare i dati sulle percentuali di ritiro: vi è una **differenza notevole** fra quello longitudinale e il trasversale.

Il vantaggio consistente di alcuni di questi blend di polimeri, caricati fibra vetro, è la loro **leggerezza**.

Molti degli altri materiali testati, la maggior parte dei quali caricati in fibra vetro, hanno dato gli stessi risultati del PLUSFIL, per questo motivo si è scelto di testare un'alternativa molto interessante.

Si tratta dello **Xiloy Q219**, una miscela di PC+PET, la cui composizione specifica è riservata e nota solo al produttore, ma analizzando le caratteristiche tecniche, si può pensare sia composto perlopiù da **PC** (*Polycarbonato*), con un certo contributo di **PET** (*Polietilene tereftalato*).

Dalla tabella di figura 2.1, si può dedurre come il suo comportamento possa essere piuttosto **isotropo**, inoltre, questo materiale soddisfa tutti i requisiti precedentemente citati:

- 1) CLTE abbastanza alto ma pressochè **identico** nella direzione del flusso ed in quella trasversale.
- 2) Il ritiro longitudinale e trasversale sono **uguali**.
- 3) La temperatura di distorsione sotto carico (dato importante anche ai fini del superamento dei successivi cicli termici), è solo **di poco al di sotto** del valore di soglia (110°C).
- 4) La densità di 1.27 g/cm^3 è decisamente comparabile a quella di riferimento di 1.23 g/cm^3 .
- 5) Infine, il materiale possiede della **carica minerale**, la quale lo aiuta nel contenere i ritiri e le deformazioni.

Una volta testato sperimentalmente, il materiale presentava ritiri e deformazioni accettabili a T_0 , cioè una volta estratto dallo stampo.

Sfortunatamente però, esso non è riuscito a superare il test dei cicli termici, per questo motivo si è scelto di scartarlo.

Visto però che i risultati ottenuti sono stati abbastanza buoni, si è scelto di proseguire con lo Xiloy, è cominciata quindi la ricerca di un blend simile, facente parte quindi della stessa famiglia, che potesse incrementare le già buone prestazioni del predecessore.

Si è pervenuti allo Xiloy 32 316, un PC+PET al 15% di carica minerale talco, il quale è specificamente studiato per l'injection molding e che possiede un CLTE piuttosto **basso**, ritiro fortemente **isotropo**, oltre che una viscosità **contenuta**, quindi un **indice di fluidità (MVF)** molto **alto**.

Inoltre l'azienda che sintetizza tale miscela, promette delle finiture superficiali **molto buone** per pezzi stampati ad iniezione.

Non essendo direttamente presente nel database Moldex, si sono presi in considerazione, all'inizio della campagna simulativa, due materiali differenti: un PC+PBT e un PC+PET.

Per semplicità, d'ora in poi tutte le considerazioni che faremo saranno riferite a questi ultimi.

2.3 Metodo sviluppato per l'analisi

Per valutare la fattibilità dello stampaggio del componente mostrina, ci si è avvalsi del seguente schema logico di procedimento.

I principali aspetti sui quali si lavorerà sono: **parametri di processo**, **geometria della mostrina** e **layout del sistema di alimentazione**.

Innanzitutto, il modello della mostrina verrà preliminarmente analizzato e preparato ai fini simulativi, secondo le linee guida dell'injection molding, valutando quindi l'implementazione di alcune soluzioni tecniche atte a migliorare la geometria.

Successivamente, comincerà l'impostazione dell'apparato simulativo.

Il **primo step** consiste nella **scelta del corretto materiale**, a questo proposito, la prima famiglia di simulazioni si concentrerà su questo aspetto.

Il layout del sistema di alimentazione sarà piuttosto basilare, di solito, per queste simulazioni esplorative, si adotta un **singolo punto ad iniezione diretta**, posizionato tenendo conto di una serie di fattori quali il rapporto fra la lunghezza pezzo ed il suo spessore, oltre che la conformazione geometrica.

Si andranno ad indagare tutte le principali fasi del processo di stampaggio, in primis il corretto riempimento, quindi la valutazione della fluidità di scorrimento del materiale in relazione alla sua temperatura ed alla temperatura stampo, oltre che al tempo effettivo di riempimento.

L'impostazione di questa fase del processo si baserà sui valori dei parametri consigliati dal software, dalla letteratura scientifica a disposizione e dalle informazioni a cui si ha accesso riguardanti il processo reale, seppur spesso piuttosto scarse.

Successivamente, verrà valutata la fase di **mantenimento** in termini di istante di **congelamento dei gate**, al fine di determinare fino a che punto il sistema è capace di spingere il materiale nello stampo.

Questa analisi ci permetterà di capire quale tempo di mantenimento impostare nel solutore e di capire se i valori e la distribuzione della pressione di mantenimento siano corretti.

Infine, si analizzeranno le deformazioni risultanti, specialmente in direzione **Z** ed in termini **totali**, nello specifico verranno valutate sia la **distribuzione** che i **valori assoluti**.

L'output di questa fase è la determinazione del materiale da impiegare per le successive simulazioni, valutato quindi sulla base dei seguenti fattori: tempo e modalità di riempimento, entità della deformazione (specialmente in termini di valore assoluto), percentuale di ritiro materiale.

Il **secondo step** consiste nell'introduzione di un sistema di alimentazione della cavità stampo a tre punti di iniezione, sfruttando la particolare geometria a banana per permettere l'ingresso del materiale.

La struttura dell'analisi sarà la medesima citata in precedenza: in primis si valuta la fase di riempimento, poi il mantenimento ed infine la deformazione risultante.

In questo caso, si punterà la lente d'ingrandimento anche sulla possibile presenza di difetti quali **linee di giunzione**, **rientranze (o sink marks)** e **bolle d'aria**, valutandone l'impatto dal punto di vista estetico e strutturale sul componente.

Una volta testato questo layout intermedio, nel **terzo step** si passerà a quello definitivo a cinque punti di iniezione, tali da coprire l'intera estensione del pezzo.

In questo caso è stata eseguita una minuziosa **ottimizzazione del processo** tramite la valutazione degli effetti delle variazioni di ogni singolo parametro di processo, oltre che della loro interazione sugli esiti.

Siccome il target principale delle simulazioni consiste nel contenere la deformazione della mostrina, l'idea di base che ha guidato il mio lavoro è stata la seguente: **5 sono i parametri critici per il ritiro del materiale: sezione del punto di iniezione**, la quale determina la portata del flusso di materiale nella mostrina (quindi

la sua velocità), il **tempo di mantenimento**, la **pressione di mantenimento** e la **sua distribuzione**, la **temperatura di stampaggio**, cioè la temperatura del fuso in ingresso nella cavità stampo ed infine la **temperatura dello stampo**. [17]
La dipendenza del ritiro percentuale da ognuno dei parametri citati è riportata in figura 2.2.

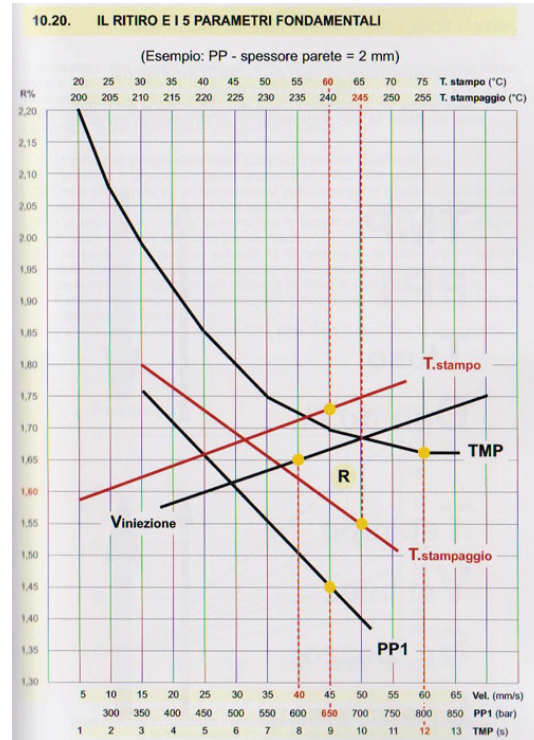


Figura 2.2: Influenza dei parametri di stampaggio sul ritiro percentuale. Trascurando i valori numerici, gli andamenti hanno una valenza generale. [17]

Questi, quindi, sono i parametri principali fatti variare nel corso di queste simulazioni.

Il **timing di apertura** dei gate, è l'altro fattore assolutamente rilevante, come si vedrà, al fine di ottenere un ritiro (quindi una deformazione) ottimali.

Una volta constatato il mancato raggiungimento del target previsto in termini di deformazione, partendo dal setup di processo che avrà prodotto i migliori risultati, si procederà valutando diverse soluzioni alternative:

1. Possibilità di adottare o modificare alcune soluzioni tecniche secondo le linee guida dell'injection molding, al fine di potenziare ulteriormente la geometria della mostrina.
2. Una seconda possibilità per certi versi più drastica, che è quella della proposta di modifica di stile nelle zone soggette a maggior deformazione, verrà valutata e sottoposta a simulazione.
3. Adozione di tecniche di "viziatura" dello stampo, al fine di adattare la sua geometria in risposta all'entità della deformazione constatata nelle simulazioni.

2.4 Introduzione al software Moldex 3D

Come già citato, il software impiegato per la modellazione CAD della mostrina, e per tutte le modifiche successive, è CATIA V5.

La realizzazione al virtuale del componente ha richiesto lo studio approfondito del modulo superfici del software CAD, indispensabile per ricreare la geometria, siccome sarebbe risultato pressochè impossibile utilizzando il più comune ambiente di Part Design.

Per poter invece eseguire le simulazioni, l'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia ha messo a disposizione delle licenze di un software **CAE** (*Computer Aided Engineering*), molto importante nella progettazione di tutto ciò che concerne l'universo dello stampaggio delle materie plastiche: **Moldex 3D**.

Nello specifico, parliamo della versione 2024 di Moldex 3D nel pacchetto Studio, il quale ha da pochi anni unificato tutti gli ambienti di simulazione ai vari stadi in uno solo, in maniera tale da rendere il software più semplice da utilizzare, specialmente da parte di utenti alle prime armi come il sottoscritto, oltre che di poter gestire i diversi progetti con più versatilità.

Il software è stato sviluppato dall'omonima società nel 1995 in Taiwan, da un team di ingegneri con una forte passione ed esperienza nel mondo dello stampaggio delle materie plastiche, di cui, ad oggi, i paesi asiatici sono fra i più importanti player a livello mondiale.

Moldex 3D va ad aggiungersi ad altri software simili come Moldflow di Autodesk, probabilmente uno dei più completi ed importanti in questo settore, anche se, come vedremo, la logica e le interfacce di funzionamento sono in pratica le medesime per un pò tutte le versioni.

All'avvio, la schermata principale si presenta come in figura 2.3, in alto a sinistra, nella scheda **Home**, è possibile creare un nuovo progetto (**New**), attribuendogli nome e percorso di destinazione.

All'interno di tale percorso, saranno presenti tutte le run che lanceremo ed i dati associati ad esse, come il setup ed i risultati ottenuti.

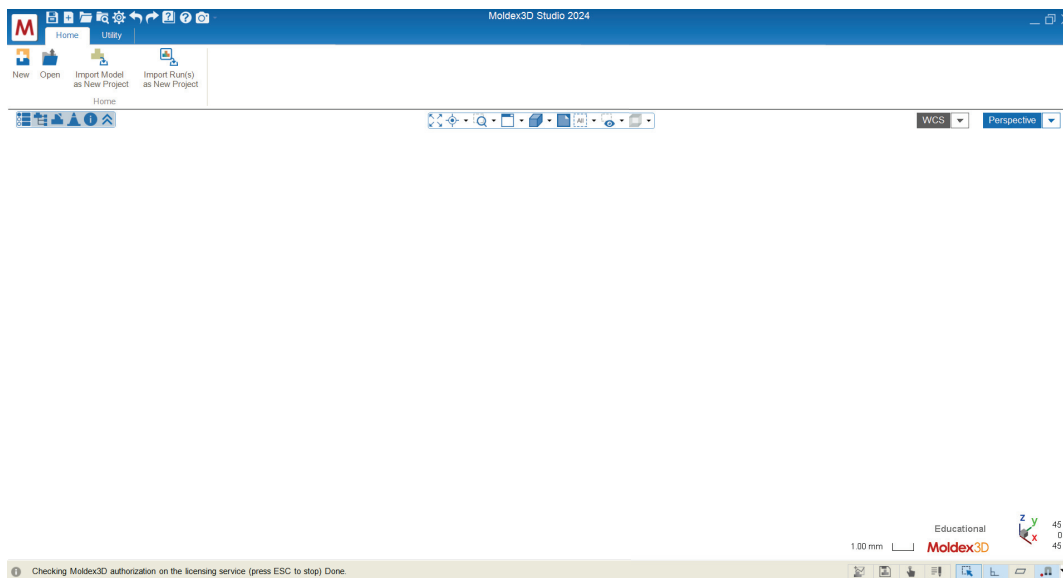


Figura 2.3: Schermata principale di Moldex 3D Studio.

Il workflow di una simulazione in Moldex 3D, si sviluppa come segue:

1) **Importare la geometria:**

è possibile farlo attraverso la schema **Home** → **Import geometry**.

In quest'ultima opzione, è presente anche quella di **Auto Heal**, la quale ci permette di importare il modello STEP demandando al software la correzione di eventuali difetti geometrici, a patto che essi siano di piccola entità. Nel caso decidessimo di importare la geometria **senza** Auto Heal, è opportuno verificarla con il comando **Check geometry**.

2) **Riconoscere il modello importato:**

Cliccando **due** volte sul modello oppure dalla scheda **Model** → **attribute**, è possibile specificare l'attributo da associare ad ogni modello che stiamo importando nell'ambiente di simulazione: **parte** (cioè il pezzo che dovrà poi essere riempito con il materiale fuso, quindi la cavità interna dello stampo), **hot o cold runner** per far capire al software che si tratta del sistema di alimentazione dello stampo, **hot runner gate** quindi gli ugelli di iniezione dello stampo che affaceranno direttamente sul pezzo da stampare oltre a tante altre opzioni più specifiche per simulazioni avanzate.

3) **Definire il sistema di alimentazione:**

nella scheda **Model** → **Runner system**, abbiamo tutti i comandi utili al fine di disegnare in ambiente Moldex 3D l'intero sistema di alimentazione, oppure permetterci di identificare tutti i componenti del sistema già importato da noi disegnato con un CAD esterno.

Nel caso in cui decidessimo di disegnarlo internamente, Moldex ci mette a disposizione degli strumenti di disegno nella scheda **Tool**, molto basilari ma sufficienti allo scopo.

4) **Generazione blocco stampo e sistema di raffreddamento:**

dalla scheda **Model** → **Cooling system**, è possibile creare il **Moldbase** (blocco stampo) oltre che il sistema di canali di raffreddamento.

Anche in questo caso, possiamo disegnare liberamente ed importare i file in formato questa volta **STL** da un ambiente CAD esterno per poi assegnare l'attributo che vogliamo.

Sempre importante eseguire un **check** del cooling system, al fine di evitare eventuali incongruenze nella direzione dei flussi nei canali, dovute ad un'erronea associazione delle superfici di in/out del liquido refrigerante.

5) **Generare la mesh di calcolo:** esistono due tipi di mesh:

- Mesh **e-Design**
- Mesh **BLM (Boundary layer mesh)**

La mesh di **design**, costituisce un approccio più semplice e diretto alla generazione della mesh.

Presenta un'interfaccia interattiva, che facilita la modellazione di parti e stampi e fornisce la tecnologia di mesh **automatica**, consentendo agli utenti di disporre di una preparazione efficiente del modello e di lavorare in ambiente CAD senza la necessità di conoscenze avanzate.

L'accurato modello 3D consente di ottenere approfondimenti sul prodotto, visualizzare le proprietà di flusso e termiche e ottimizzare i processi prima della costruzione delle parti fisiche.

Moldex3D eDesign quindi aiuta le aziende a progettare prodotti con qualità, ridurre i costi di sviluppo e abbreviare il time to market. Tale soluzione è valida quando non si hanno molte risorse in termini di calcolo a disposizione, quando si vuole eseguire una simulazione più basilare, magari esplorativa, oppure quando non si hanno sufficienti conoscenze da poter settare e gestire una mesh solida in tutti i suoi aspetti.

È da sottolineare che, un approccio del genere, seppur molto comune nelle versioni passate di Moldex, alcune delle quali consentivano l'impiego della sola mesh di Design, ad oggi è sempre preferibile adottare un approccio BLM.

Oltre all'interfaccia eDesign, il pacchetto Moldex3D Professional permette di ottenere approfondimenti e proprietà dei prodotti e di ottimizzare ulteriormente i processi prima della costruzione delle parti fisiche.

La Boundary Layer Mesh (BLM) è una delle tecnologie di mesh più adatte per l'applicazione CAE dello stampaggio ad iniezione di materie plastiche e a differenza della mesh generata in modalità eDesign, essa permette di ottenere delle **mesh ibride**, cioè permette di affiancarne diverse tipologie in modo da rendere l'analisi del processo più precisa e completa.

I parametri per il BLM come la dimensione delle maglie, il numero di livelli (o strati) limite e il rapporto di offset sono regolabili individualmente secondo le necessità.

Ciò consente agli utenti di applicare diversi tipi di mesh per diversi attributi come cavità, inserimento parte, guida e canale di raffreddamento.

I tipi di mesh supportati in Designer BLM includono Tetra e BLM a più livelli.

In maniera predefinita, il programma determinerà la dimensione corretta di riferimento per la creazione della **mesh di superficie**, tramite il comando **Seeding** nella scheda **Mesh**.

A questo punto, spostandoci nella voce **Parameters** della mesh BLM, un certo numero di strati, da noi scelto, riempiranno di elementi prismatici la regione più esterna del runner e della cavità mentre, al fine di discretizzare con più **precisione e affidabilità** il volume **interno**, ci affideremo ad una mesh a base di elementi **tetraedrici**.

Per il resto, il software è capace di gestire automaticamente eventuali conflitti ed imperfezioni nella mesh, qualsiasi problematica presente, viene messa immediatamente in risalto dopo aver fatto un **check** della mesh stessa.

6) **Scelta del materiale:**

Moldex mette a disposizione un database piuttosto ampio di possibilità di scelta in termini di materiali, dagli amorfi ai cristallini, dai polimeri puri ai blend sintetizzati da alcuni dei più importanti produttori al mondo.

Dopo aver portato a termine i passaggi precedenti, noteremo che l'icona **Material**, presente nella scheda **Home**, sarà ora disponibile.

Cliccando due volte su di essa, possiamo accedere al database e, una volta scelto il materiale, con il tasto destro selezionare **Add to project** per aggiungerlo alla nostra simulazione.

7) **Impostazione del processo:** in questa sezione, è necessario scegliere fra due modalità di simulazione: la **CAE mode**, utilizzata nel caso in cui non abbiamo informazioni sulla pressa che verrà poi impiegata nel processo di stampaggio reale, impostando così alcuni dei parametri fondamentali quali **pressione di iniezione massima, pressione di mantenimento massima, tempo di riempimento e di mantenimento** fra i più importanti.

Dovessimo invece avere la possibilità di poter caratterizzare la macchina, cosa che darebbe ancor più valore alla nostra simulazione, potremmo optare per la **machine mode**, in modo da ricostruire virtualmente la pressa utilizzata.

8) **Settaggio dell'analisi:** il passo successivo consiste nel settare il tipo di analisi che il solutore deve svolgere, quindi i risultati che vogliamo poi visualizzare alla fine del processo.

Andando nella scheda **Home**, oltre alle analisi di Filling (riempimento), packing (mantenimento) e warpage (deformazione), le tre più comuni, è possibile effettuarne una **transient (transitoria)**, cioè che includa anche l'analisi del sistema di raffreddamento, oltre che un'analisi di **Quick Flow**, utile per valutare velocemente il riempimento della parte.

Le analisi possono essere effettuate singolarmente, oppure è possibile creare un setup **customizzato** ad hoc in base alle nostre esigenze.

9) **Scheda Computation:** qui possiamo settare i parametri di calcolo, fra questi, ad esempio, il tipo di solutore da impiegare (in base alle nostre disponibilità in termini di calcolo ed al tipo di calcolo da svolgere in termini di qualità e di affidabilità dei risultati finali).

Soprattutto in caso di primo approccio con il software, è consigliato mantenere le impostazioni di default.

Capitolo 3

Risultati casistiche di simulazione

3.1 Modellazione mostrina e sistema di alimentazione in CATIA V5

Per quanto riguarda il file CAD da importare successivamente in Moldex 3D, esso è stato opportunamente preparato per il simulatore.

Non potendo accedere alla geometria reale della mostrina, per veto di riservatezza imposto dal cliente, trattandosi di una vettura non ancora presente sul mercato, si è reso necessario ricostruire il pezzo traendo ispirazione dal file originale della mostrina, partendo dalle dimensioni macroscopiche, fino a curare le più piccole sfaccettature, ricreando passo passo l'intero componente in ambiente CATIA V5.

Inizialmente, sono partito disegnando 3 curve di riferimento lungo la dimensione principale del pezzo, le quali sarebbero poi servite per creare delle connessioni fra di esse, in maniera tale da realizzare una superficie che ricalcasse la forma principale della mostrina. (figura 3.1)

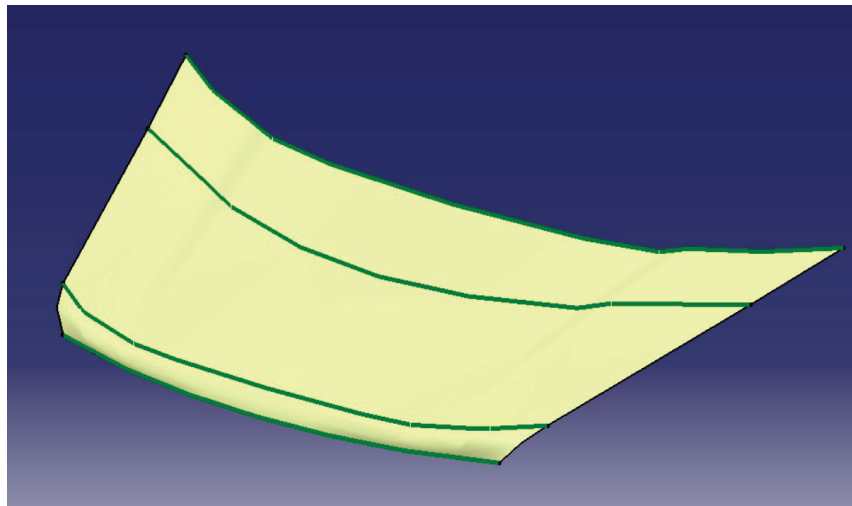


Figura 3.1: In verde le 4 curve da cui sono state generate le superfici. In giallo la superficie della mostrina.

Successivamente, si è reso necessario modellare più nel dettaglio la zona centrale della mostrina, ponendo particolare attenzione alle zone di transizione laterali, che hanno reso necessario l'impiego di raccordi piuttosto generosi, al fine di evitare spigoli vivi o passaggi troppo bruschi di sezione. (figura 3.2)

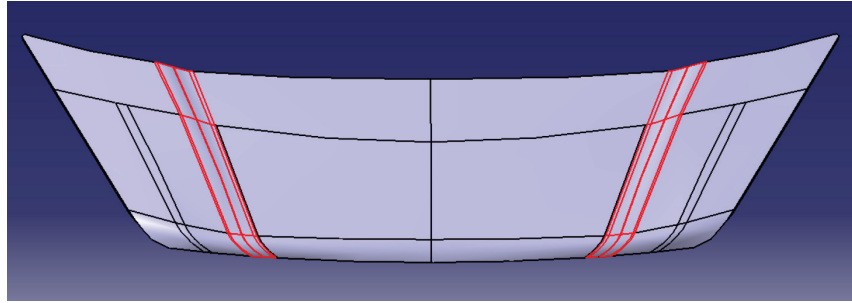


Figura 3.2: In rosso la zona raccordata della mostrina.

Per agevolare il processo di stampaggio, si è scelto di realizzare una nervatura che corresse lungo il lato **maggiore** del trapezio, con un perimetro che arriva fino alla zona terminale delle porzioni laterali della mostrina, in maniera tale da irrigidire la struttura, aiutandola a contenere le deformazioni compressive.

Tale nervatura è stata implementata sulla superficie **non estetica**, cioè quella inferiore che verrà poi accoppiata all'ossatura. (figura 3.3)

Non è stato ritenuto necessario prolungarla ulteriormente.

La sezione è **quadrata**, di dimensioni $2 \times 2 \text{ mm}$.

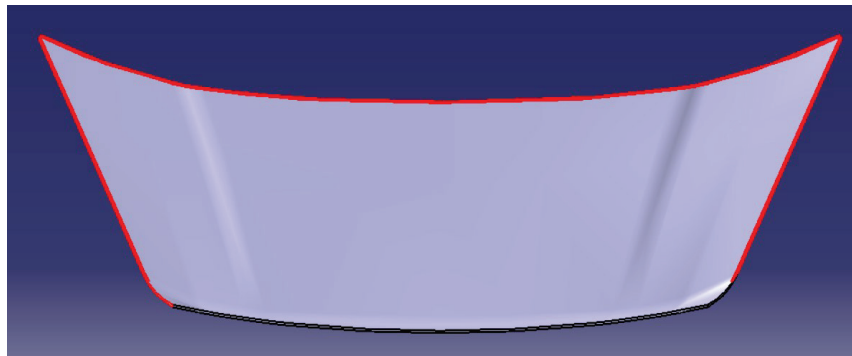


Figura 3.3: Vista dal basso (superficie **non estetica**): Profilo della nervatura applicata alla mostrina.

Dopo aver preparato per bene tutte le superfici, stando attento specialmente alle condizioni di tangenza fra di esse, mi sono spostato nell'ambiente di Part Design, dal quale ho potuto conferire uno spessore all'intero pezzo. (figura 3.4)

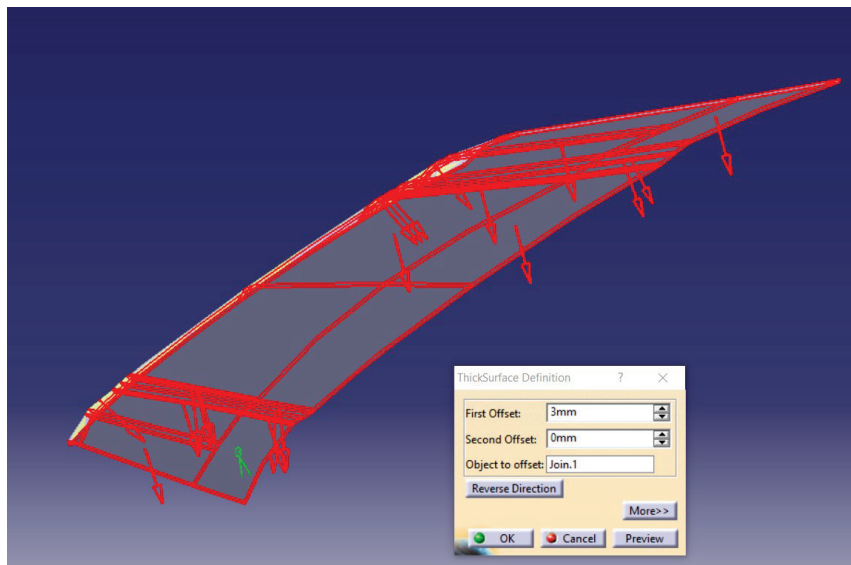


Figura 3.4: Conferimento dello spessore di 3mm alla mostrina.

Sempre in ambiente CAD, è stata realizzata anche la geometria del sistema di iniezione, il quale è composto dalle cosiddette **banane** o **cashew**, le quali, come vedremo saranno poi importate di pezzo con la mostrina ed identificate in Moldex come **parte**.

Questa manovra si è resa necessaria per posizionare correttamente i punti di iniezione caldi (gate).

Dopo aver completato il modello, esso è stato esportato in formato **STEP** da CATIA V5, come richiesto da Moldex 3D per poter poi lavorare in ambiente simulativo, questo perchè lo STEP garantisce una qualità di discretizzazione delle geometrie superiore al formato CATpart oppure ad un STL.

Generando la materozza in Moldex 3D, ed assegnandole l'attributo di **canale freddo (cold runner)**, il software non permetteva di posizionare il gate di iniezione in corrispondenza dell'ingresso nella banana.

Per questo motivo, è sorta la necessità di realizzare le banane in ambiente CAD, successivamente importate di pezzo con la mostrina, ed infine assegnare l'attributo di **parte** a tutto il modello, consapevoli che i risultati delle simulazioni sarebbero stati leggermente condizionati dalla loro presenza. (figura 3.5)

Tale è stato il compromesso da adottare al fine di posizionare correttamente i gate di iniezione.

Per quanto riguarda le loro dimensioni, come suggerito dalla letteratura scientifica a riguardo, ho impostato un diametro **minore** di 5 mm , uguale all'altezza, ed un diametro **maggiore** di 10 mm .

La geometria così determinata, consente di **minimizzare le cadute di pressione**. [17]

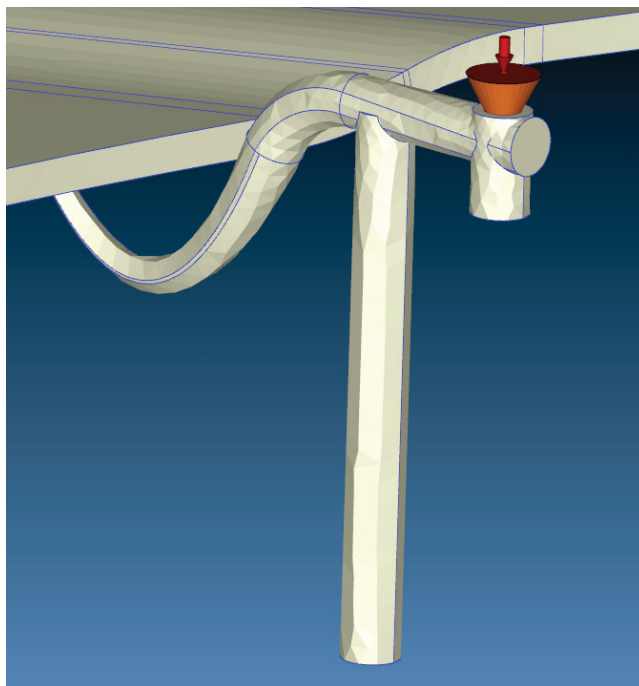


Figura 3.5: Complessivo materozza più gate di iniezione.

Infine, si precisa che per semplicità non è stato modellato il sistema di alimentazione completo, in quanto esso deve essere opportunamente studiato in termini di **diametri delle sezioni di passaggio** oltre che di **lunghezza dei runner** in maniera tale da garantirne il corretto **bilanciamento**, fondamentale per una buona stampata.

3.2 Simulazione con iniezione diretta centrale

Nel primo pattern di simulazioni, ci si è concentrati su una configurazione semplificata di sistema di iniezione, sufficiente al fine di eseguire una prima valutazione riguardo i due materiali selezionati per far girare le simulazioni: si tratta di due scelte prese in considerazione dal catalogo **Covestro**, multinazionale tedesca specializzata nella produzione di polimeri di ogni genere, nello specifico della famiglia dei **Makroblend**, caratterizzati da una notevole **tenacità** (anche alle basse temperature), ottima resistenza a molti agenti chimici, ridotta suscettibilità ai cedimenti meccanici causati dall'accumulo di stress residui, **ottima verniciabilità**. [24]

Le proprietà meccaniche sono eccellenti e, soprattutto, garantiscono un'ottima finitura superficiale, requisito indispensabile per la mostrina oggetto delle simulazioni. Nello specifico, l'attenzione è stata rivolta verso due alternative: il **Makroblend KU-7609** ed il **Makroblend UT235M**, il primo è composto da una miscela di *Policarbonato* e *Polibutylene tereftalato* (PC/PBT), quindi da un **amorfo** e da un **semicristallino**, con ottime proprietà meccaniche, CLTE **uniforme** nelle direzioni parallela e normale al flusso, densità compatibile con quella target, ritiro abbastanza isotropo, contenuto di carica minerale talco del 20%.

Per quanto riguarda il secondo materiale, parliamo di una miscela di *Policarbonato*

e *Polietilene tereftalato* (PC/PET), il quale è composto dagli stessi polimeri dello Xiloy 32316 scelto per il processo reale, con carica minerale talco del 15%, ritiro basso e uniforme nelle due direzioni principali, CLTE basso ed isotropo, densità solo leggermente superiore al target, con delle ottime proprietà meccaniche, ottima stabilità dimensionale e, soprattutto, l'**indice di fluidità o scorrimento** è considerevolmente più alto del PC+PBT.

Quindi, da una prospettiva teorica, il PC+PET dovrebbe poter scorrere più facilmente nella cavità stampo, facilitandone un riempimento rapido ed uniforme.

3.2.1 Preparazione modello ed impostazione mesh

- **Setup modello CAD mostrina in Moldex 3D**

La mostrina è stata importata nella simulazione come file STEP, senza nient'altro a corredo.

Il singolo punto di iniezione o gate, a forma di tronco di cono (figura 3.7), è stato posizionato in corrispondenza della superficie inferiore **non estetica** della mostrina, come in figura 3.6.

Esso è stato impostato come **cold runner (canale freddo)**, immaginando che appena dietro si trovasse la camera calda, con il fuso all'interno da iniettare direttamente.

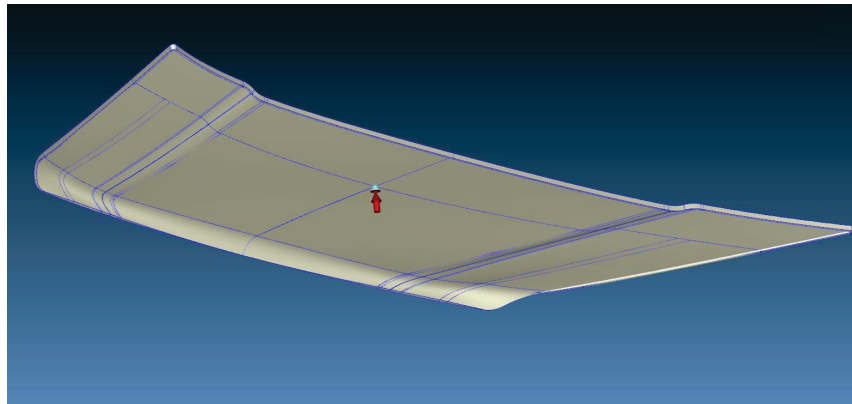


Figura 3.6: Posizionamento punto di iniezione diretto sulla mostrina.

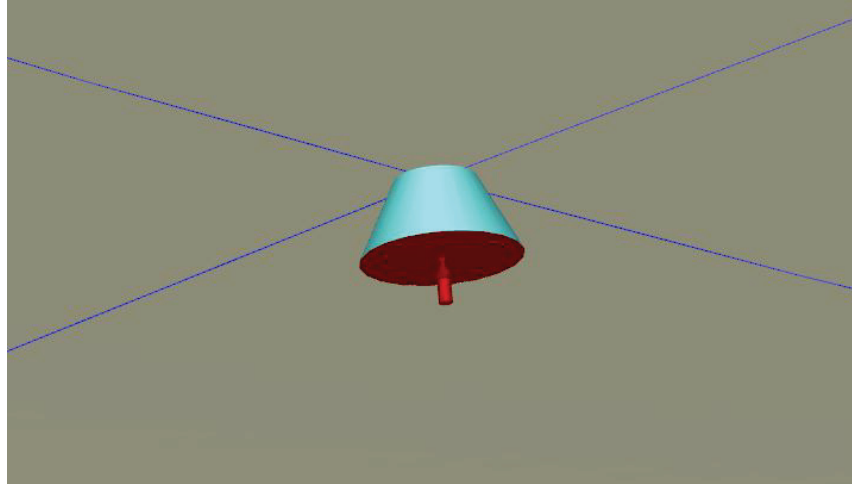


Figura 3.7: Particolare della geometria del gate di iniezione.

- **Creazione mesh di calcolo**

Per quanto riguarda la mesh, il primo settaggio riguarda la mesh di superficie, quindi la cosiddetta **mesh size**, la quale definisce la distribuzione dei punti di calcolo sulle superfici della mostrina.

Con un valore di mesh size uguale a **3**, il numero di elementi superficiali stimati dal software ammonta a 258 359. Successivamente, è importante settare correttamente i **parametri** che definiranno la mesh **solida**.

In questo caso, l'approccio sicuramente più conveniente è quello della mesh BLM (Boundary layer mesh) che, con un numero adeguato di strati a parete, è capace di cogliere correttamente le sfaccettature dei profili di velocità e temperatura del fluido, a partire dai quali vengono stimate tutte le altre grandezze come output del calcolo.

Il supporto delle figure professionali che hanno supervisionato il mio lavoro è risultato fondamentale ai fini della corretta impostazione di una buona mesh. Nonostante le risorse di calcolo a mia disposizione fossero piuttosto limitate, abbiamo cercato di adottare un approccio che potesse comunque essere in grado di restituire dei risultati sensati ed affidabili, consapevoli che, probabilmente, considerando lo spessore **molto ridotto** della parte oltre che la sua **grande estensione**, ci fosse bisogno di un numero ben più elevato di strati a parete.

In definitiva, è stato ritenuto sufficiente lasciare le impostazioni di default così com'erano già impostate, il solutore, difatti, calcola automaticamente un buon setup della mesh sulla base del modello che dobbiamo simulare.

La struttura superficiale della mesh è composta da elementi **prismatici**, mentre gli strati interni sono stati popolati da elementi **tetraedrici**, più complessi e raffinati dei primi in termini di corretto riempimento della cavità.

Il blocco stampo, in acciaio 40CrMnMo7 (o 1.2311), è stato generato lasciando le dimensioni di default, valutate dal software in base all'ingombro del componente, inoltre è stato **omesso** il sistema di raffreddamento.

Quest'ultima scelta sarà comune a tutte le simulazioni eseguite, non tanto per il dimensionamento del sistema in sé, nè per la sua realizzazione al CAD,

quanto per l'estrema complessità e pesantezza in termini di calcolo per il pc, le risorse richieste sarebbero andate ben oltre quelle disponibili.

A questo proposito, occorre tener conto del fatto che, l'implementazione di un sistema di raffreddamento adeguato, avrebbe sicuramente permesso di migliorare **sensibilmente** i risultati ottenuti.

La mesh è stata poi generata senza riscontrare alcuna problematica a livello geometrico nella parte.

La struttura interna degli strati della mesh è rappresentata in figura 3.8, possiamo notare che la porzione interna riempita con elementi tetraedrici ben distribuiti, è racchiusa entro i **6 strati a parete** (3 in corrispondenza di quella superiore, 3 in corrispondenza di quella inferiore).

Analizzando il file di log della simulazione, è presente l'informazione sul numero di elementi di cui la mesh solida è composta, il quale ammonta a circa 527 000, sufficienti per il nostro calcolo.

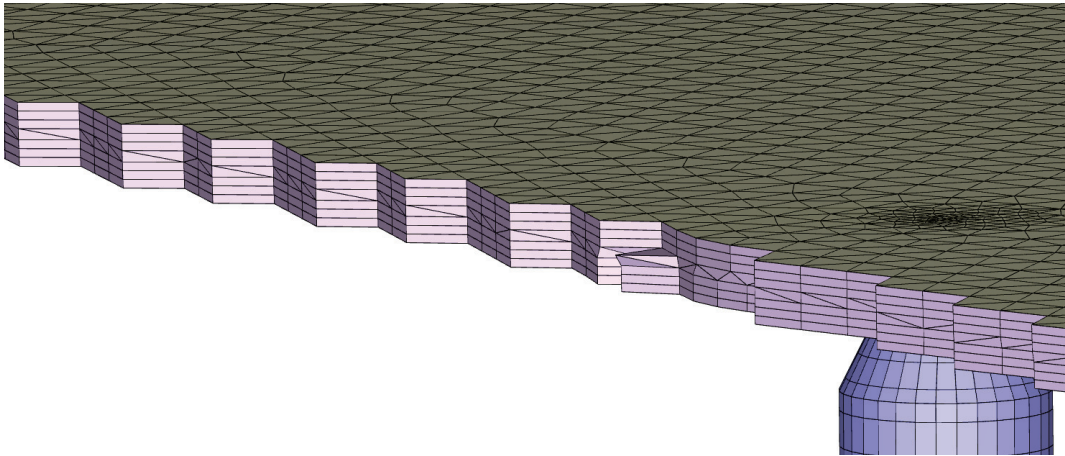


Figura 3.8: Struttura interna della mesh di calcolo.

3.2.2 Settaggio parametri di processo

Dopo aver scelto il materiale nel database di Moldex 3D, è arrivato il momento di settare il processo, probabilmente la parte più delicata ed importante prima di poter avviare la simulazione.

Il software configura il processo basandosi sui dati prelevati dal datasheet del materiale selezionato presente in Moldex, adattando i restanti in base alle sue proprietà e caratteristiche, esso è chiaramente modificabile a partire da questo primo setup.

Andremo ora a valutare i settaggi impostati per i due Makroblend scelti:

- **Makroblend KU-7609 (PC+PBT)**

Innanzitutto, la modalità di simulazione è stata impostata su **CAE mode**, un settaggio più ingegneristico e semplice per far eseguire il calcolo alla macchina. La machine mode, è adatta al contrario nei casi in cui siamo a conoscenza della specifica pressa che l'azienda andrà ad utilizzare per la stampata.

- La **pressione di iniezione massima** è stata settata tenendo in considerazione un range di valori fra i 100 ed i 150 Mpa.
I due valori considerati nelle simulazioni sono di 100 e 120 Mpa.

- A partire da questo primo dato, la **pressione di mantenimento massima**, è stata scelta tenendo conto delle indicazioni riportate nel datasheet del materiale, il quale consiglia di mantenersi in un range compreso fra il 50 ed il 75% del valore di pressione di iniezione massima settato.
Il valore scelto ammonta a 80 Mpa.
- Come valori di **temperatura del fuso** e di **temperatura stampo** sono stati lasciati invariati quelli settati di default, rispettivamente 260 ° C e 90 ° C.
Il datasheet del materiale considera valido un intervallo di temperature stampo compreso fra i 60 °C e gli 80 °C.
Per quanto riguarda invece la temperatura del fuso, il range consigliato è fra i 250 °C ed i 270 °C.
- Il **filling time** ed il **packing time**, cioè le durate rispettivamente delle fasi di riempimento e di mantenimento, sono state lasciate inizialmente invariate, permettendo al software di calcolare quelle stimate sulla base dei dati a sua disposizione.
- La stessa cosa è stata fatta per il **VP switch**, anche se quest'ultimo è sempre consigliato settarlo fra il 94% ed il 98%.
Settare correttamente quest'ultimo valore risulta **fondamentale** al fine del controllo del ritiro e per prevenire la formazione dei difetti nelle fasi successive.
Nella prima fase di riempimento, quando abbiamo bisogno di apportare grandi quantità di materiale fuso in tempi brevi effettuiamo un controllo in **portata (o velocità)**, mentre quando la cavità è quasi totalmente riempita, ci si sposta su un controllo in **pressione**, riducendo considerevolmente la portata di materiale da iniettare, applicando una certa pressione che possa tenere il più fermo possibile il materiale all'interno dello stampo, contenere i ritiri e terminare il riempimento.
- In questa pagina, inoltre, è possibile effettuare altri settaggi riguardanti il **profilo di pressione d'iniezione**, il **profilo di portata** e il **profilo di pressione di mantenimento** durante l'intera durata della simulazione. Non avendo molti dati a disposizione, ed essendo interessati ad altri aspetti del settaggio variabili, si è preferito lasciare tutto come da impostazione predefinita.
- Passando alla terza pagina, entriamo più nel merito dell'impostazione del **raffreddamento**, con la possibilità di variare molti valori come è possibile vedere in figura 3.9.
Per il momento, nessun parametro è stato variato.
Nell'ultima scheda, è presente un riassunto del setup del processo.

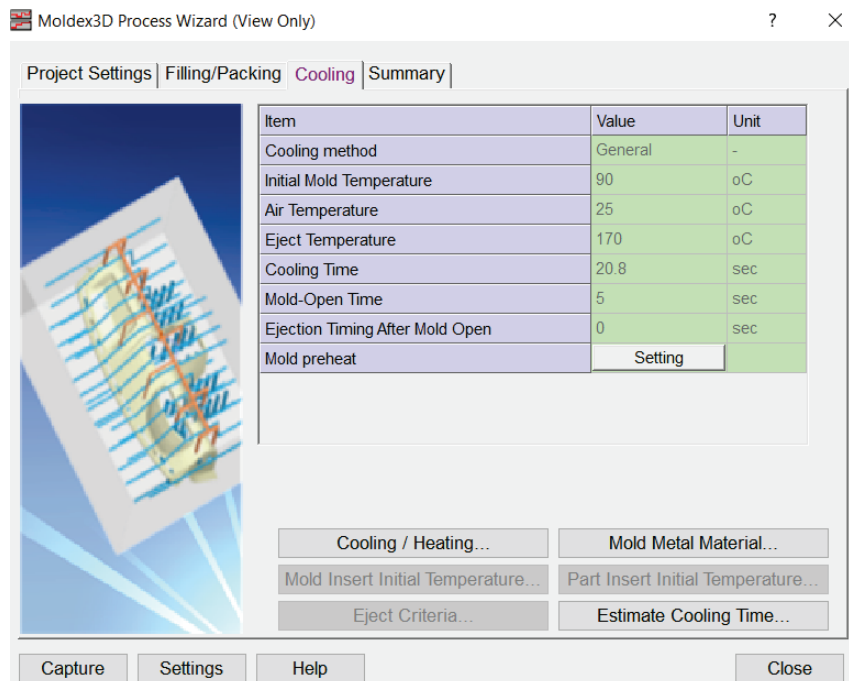


Figura 3.9: Scheda cooling in Moldex 3D.

- **Makroblend UT235M (PC+PET)**

Anche qui la modalità di simulazione è stata impostata su **CAE mode**, per gli stessi motivi già citati, andiamo a dare quindi uno sguardo ai valori settati:

- La **pressione di iniezione massima** è stata settata a 120 Mpa, mentre la **pressione di mantenimento massima** è stata impostata a 80 Mpa.
- Anche in questo caso il **filling time** ed il **packing time** sono stati lasciati come di default, senza modificare nulla, la stessa cosa vale per i profili di **flow rate**, **packing pressure** e **injection pressure**. Rispetto al caso precedente, la **temperatura del fuso** e la **temperatura dello stampo** sono state automaticamente impostate dal sistema a 270 °C e 70 °C rispettivamente.
- Per quanto riguarda il cooling, la **temperatura di estrazione pezzo** è l'unica variabile ad essere cambiata, in questo caso il sistema ha impostato un valore di 140 °C.

3.2.3 Discussione dei risultati

- 1) **Analisi della fase di riempimento (filling):** Le prime simulazioni riguardano la verifica del riempimento della mostrina, con i due materiali selezionati. Alla pressione di **iniezione** di 100 Mpa, in entrambi i casi si fa molta fatica a terminare il riempimento della cavità, la porzione rimasta vuota si trova in corrispondenza delle punte, per il loro posizionamento e per la loro geometria già difficilmente raggiungibili. (figura 3.10).

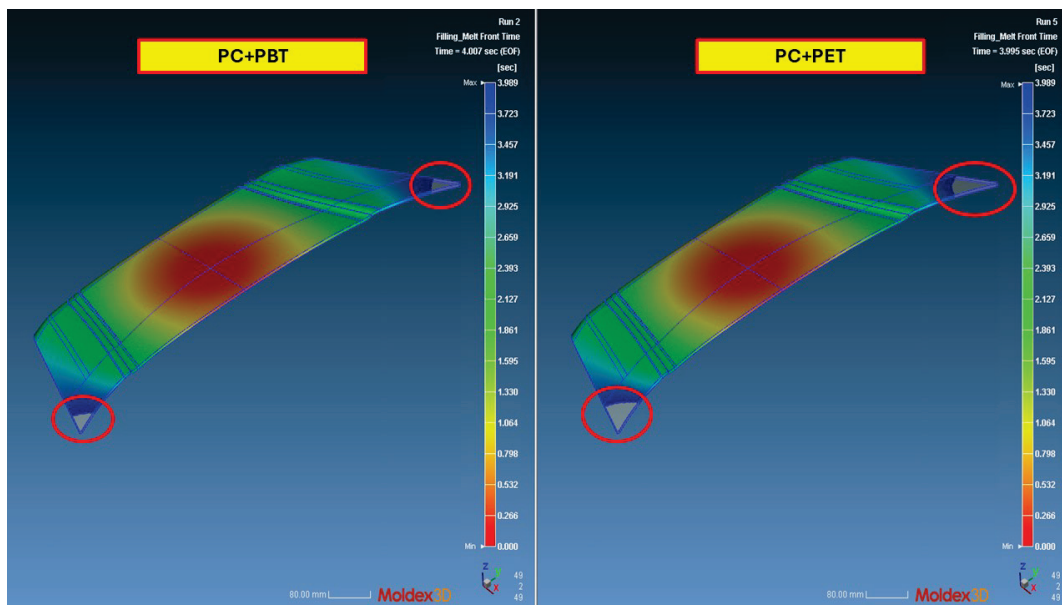


Figura 3.10: Riempimento incompleto della cavità per PC+PBT e PC+PET.

Si osserva che nel caso del PC+PET (a **destra** nella figura 3.10), nonostante sulla carta sia **più viscoso** del PC+PBT (a **sinistra** nella figura 3.10), il volume **non riempito** risulta **maggiore**.

Dopo aver consultato i datasheet interni di Moldex, ed aver fatto un confronto dei diagrammi che mostrano l'andamento della **viscosità** rispetto alla **velocità di deformazione** dipendente dagli **sforzi tangenziali** che agiscono sul materiale, notiamo che il PC+PET è sì **meno viscoso** quando lo shear rate è **piccolo**, ma vi è un'inversione di tendenza per valori di shear rate **grandi**. (figura 3.11)

L'interpretazione potrebbe essere quindi la seguente: mano a mano che la cavità viene riempita, ed il materiale inizia a raffreddarsi, risultando più denso e viscoso, gli sforzi tangenziali agenti sul materiale aumentano ed il fronte fa più fatica ad avanzare.

Questo effetto, è più significativo per il PC+PET piuttosto che il PC+PBT, ciò determina, nel primo, il riempimento incompleto per una percentuale maggiore.

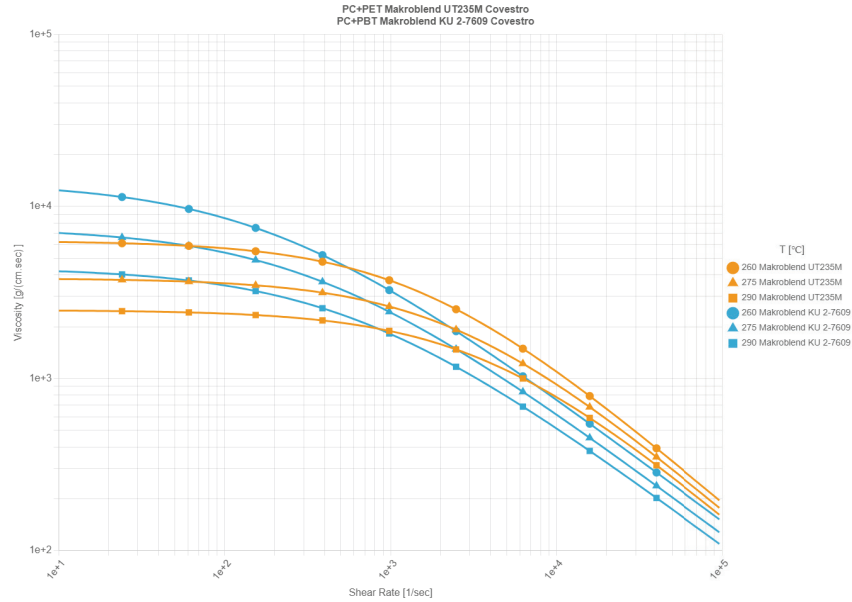


Figura 3.11: Confronto fra gli andamenti della viscosità in funzione dello shear rate, a parità di temperatura.

Portando il valore di pressione di iniezione a 120 Mpa, invece, non sorgono particolari problemi con nessuno dei due materiali, il riempimento è ottimale ed il tempo necessario è pressochè lo stesso per i due casi.

Si fornisce una stima del **tempo di riempimento** secondo la seguente formula molto semplice:

$$\text{Tempo di riempimento stimato} = \frac{\text{Volume cavità [cm}^3\text{]}}{\text{Portata volumetrica media [cm}^3\text{/s]}}$$

Possiamo verificare che i tempi risultanti di riempimento, rispettivamente di 3.3 s circa per il PC+PBT e di poco meno di 4 s per il PC+PET, sono in linea con un **flow rate medio** che varia dai 170 ai 200 cm³/s circa.

Osservando le curve di flow rate nei due casi, la stima è verosimile. (figura 3.12)

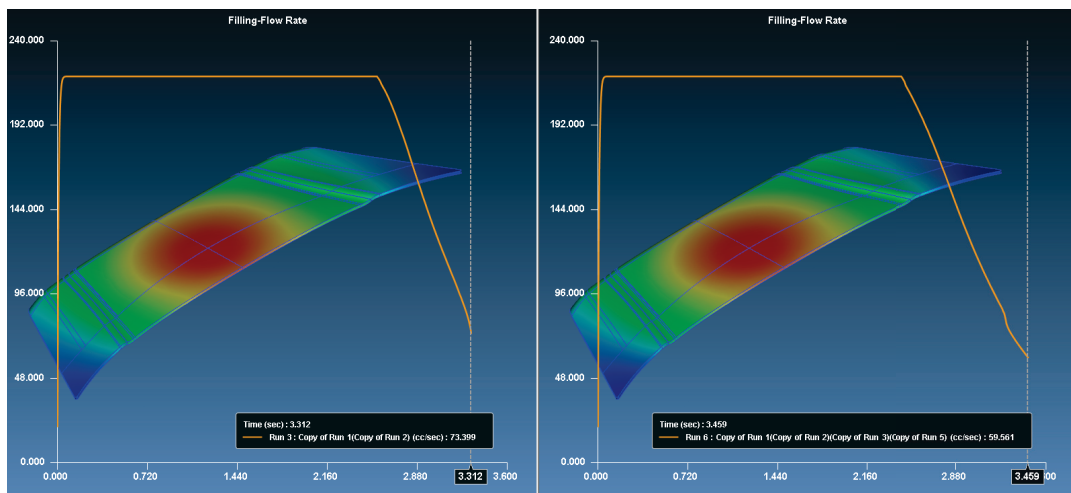


Figura 3.12: Flow rates materiali a confronto.

2) **Analisi della fase di mantenimento (packing):** Una volta verificato che la mostrina possa riempirsi correttamente con entrambi i materiali, tenendo anche conto che probabilmente, dato l'elevato rapporto fra la lunghezza e lo spessore, un solo punto di iniezione sia **insufficiente** ed impraticabile nel caso **reale** di stampaggio, si è passati all'analisi di mantenimento ed alle deformazioni.

Per quanto riguarda il **PC+PBT**, nonostante la fase di packing sia stata impostata dal software su un valore di 15 s, il file di log della simulazione ci riporta che il gate si è **congelato** a 7.293 s, per questo motivo, oltre quel tempo, la pressa non sarà più in grado di spingere ulteriormente il materiale nella cavità.

A tutti gli effetti, quindi, il packing termina attorno ai 7-7.5 s.

Non si riscontrano particolari problematiche in termini di **linee di giunzione**, per quanto riguarda i **sink marks (o rientranze)**, esse si manifestano con valori **irrisori**, in corrispondenza dei bordi della mostrina, specialmente quelli laterali.

Infine, osservando le **bolle d'aria**, quelle presenti si trovano tutte in corrispondenza dei bordi. (figura 3.13)

Esse possono essere rimosse includendo, nello stampo, dei canali che fungano da sfiati.

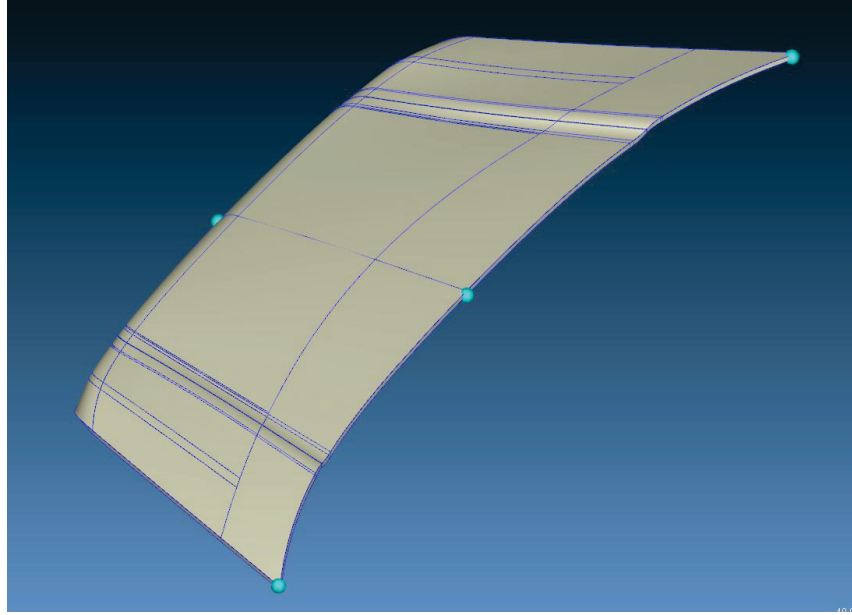


Figura 3.13: Bolle d'aria sui bordi della mostrina (PC+PBT).

Per il **PC+PET**, osserviamo una situazione pressochè identica, con un tempo di mantenimento fissato anche qui a 15 s.

Il congelamento del gate, come riportato nel log, è avvenuto dopo 8.127 s, circa **un secondo dopo** rispetto al caso precedente, a parità di parametri di processo, gli unici che variano sono quelli legati al materiale.

Per quanto riguarda le **bolle d'aria**, abbiamo una circostanza simile a quella del PC+PBT, in questo caso ne abbiamo **di meno** e sempre localizzate in corrispondenza dei bordi della mostrina.

A livello di **rientranze**, esse sono meno diffuse ed il loro valore in termini di spostamento risulta **inferiore**.

Anche in questo caso, non osserviamo **linee di giunzione**.

- 3) **Analisi delle deformazioni (warpage)**: Analizzando il warpage, iniziamo a notare le prime consistenti differenze fra i due materiali.

Per il PC+PBT, il campo di deformazione si presenta come in figura 3.14 e 3.15, notiamo che la mostrina tende ad imbarcarsi nella zona centrale, mentre inizia ad alzarsi in corrispondenza delle porzioni laterali, specialmente sulle punte, sulle quali la deformazione è la più alta riscontrata.

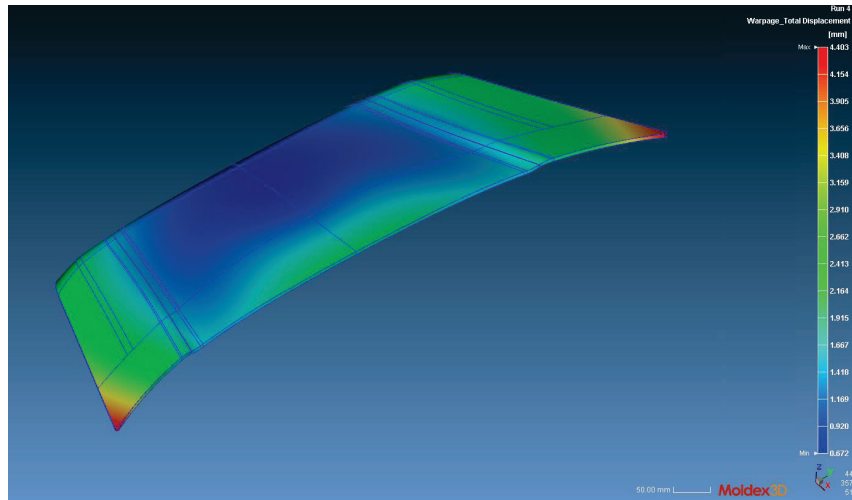


Figura 3.14: Campo di deformazione sulla mostrina con PC+PBT.

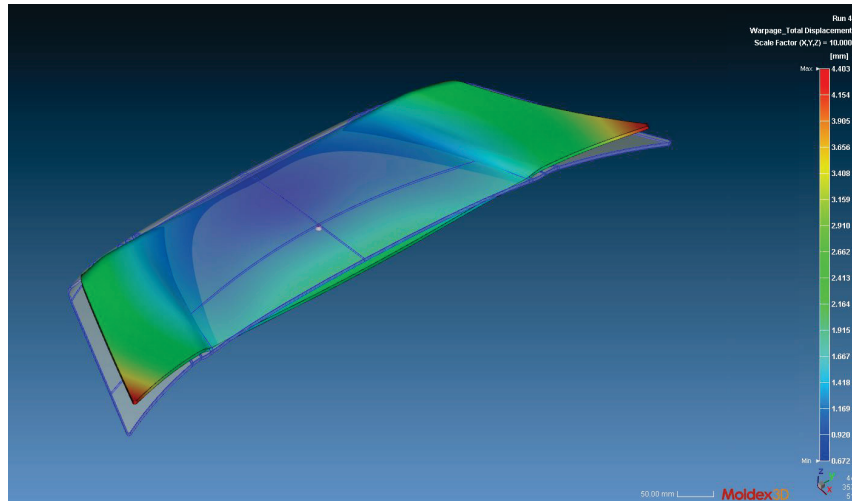


Figura 3.15: Deformata amplificata, da notare l'effetto di imbarcamento centrale e di innalzamento laterale (PC+PBT).

Il valore **minimo**, (0.672 mm), rientra nel target fissato, mentre quello **massimo**, (4.403 mm), è ben al di sopra del limite.

Analizzando i risultati, si osserva che la percentuale della mostrina, in termini di estensione, che ha subito una deformazione **superiore al millimetro**, ammonta all'**80%**, valore decisamente alto, sintomo del fatto che con questa configurazione di iniezione nel pezzo non si ha molto controllo sul processo.

Allo stesso tempo, la deformazione più consistente copre lo **0.25%** dell'estensione del pezzo, valore non indifferente. (figura 3.16)

Considerando che la dimensione principale della mostrina è di 900 mm , la porzione più deformata corrisponde ad un tratto lungo **2.25 mm**, in termini di accoppiamento con la scocca circostante, come allineamento fra le superfici, la differenza è molto importante.

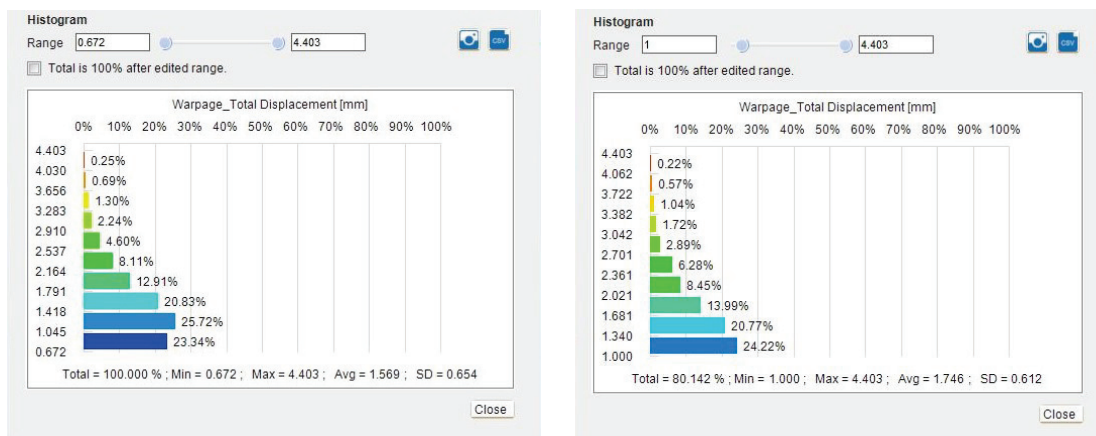


Figura 3.16: A sinistra: ripartizione percentuale della deformazione mostrina. A destra: quotaparte mostrina deformata per più di 1 mm.

Nonostante i campi di **pressione** e **temperatura** siano **uniformi** su tutto il pezzo, il ritiro volumetrico è abbastanza **alto**, pur essendo ben distribuito. (figura 3.17)

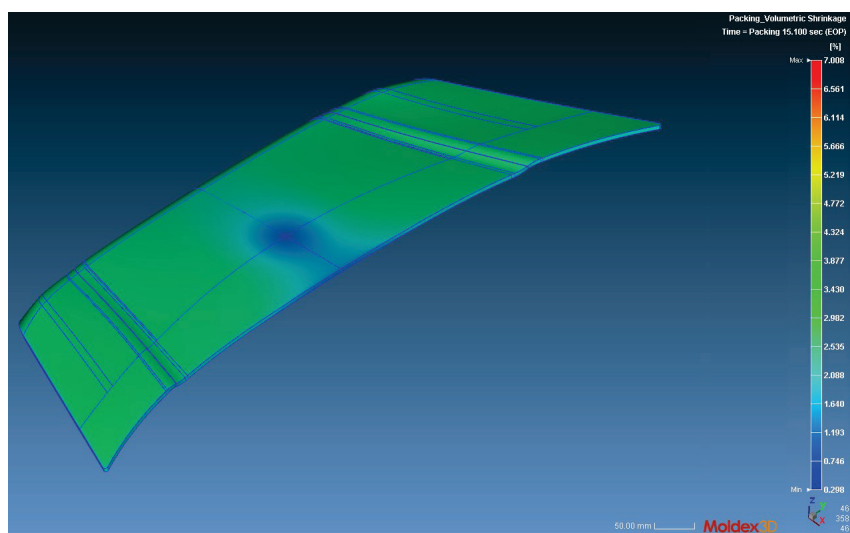


Figura 3.17: Ritiro volumetrico per il PC+PBT.

Passando al caso del PC+PET, invece, il campo di deformazione si presenta come in figure 3.18 e 3.19.

La distribuzione è molto simile al caso precedente, anche in questo caso la mostrina tenderà ad imbarcarsi nella regione centrale, per poi alzarsi oltre quest'ultima, ai lati.

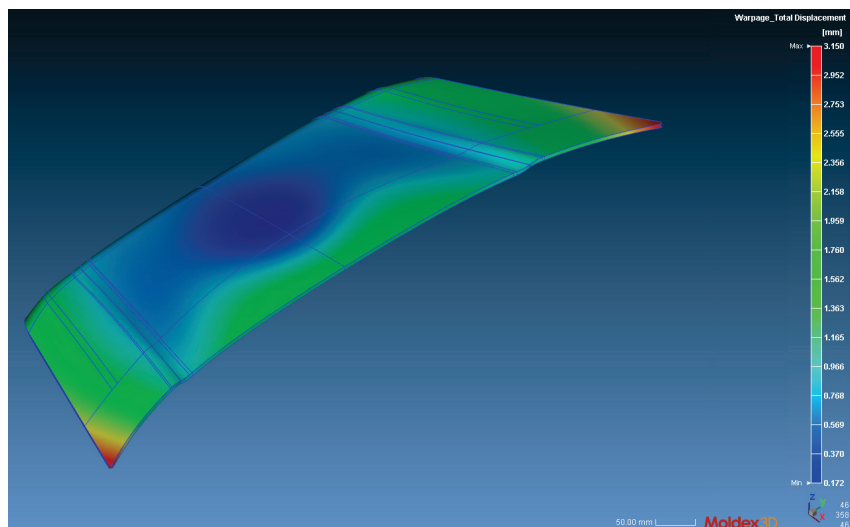


Figura 3.18: Campo di deformazione della mostrina con PC+PET.

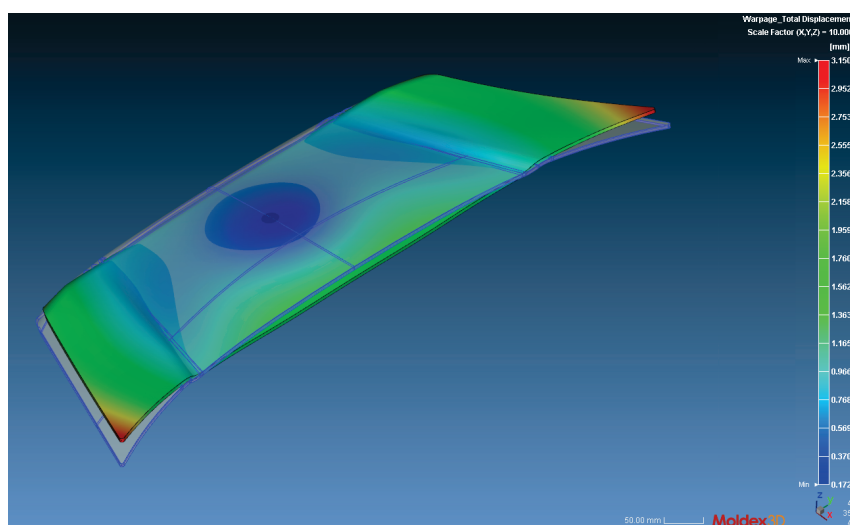


Figura 3.19: Deformata amplificata, da notare l'effetto di imbarcamento centrale e di innalzamento laterale (PC+PET).

I valori **massimo** e **minimo**, però, sono decisamente più bassi, specialmente il limite superiore.

Gli estremi di deformazione sono rispettivamente 3.150 mm e 0.172 mm , si nota che il miglioramento, a parità di parametri di processo impostati, è decisamente **rilevante**.

Il materiale risulta più stabile dal punto di vista dimensionale, questo lo si può notare in figura 3.20, nella quale possiamo leggere che, in percentuale, il **ritiro volumetrico** è sensibilmente **ridotto** rispetto all'impiego del PC+PBT.

In questo caso, il valore medio si attesta sull'1.6%, contro il 3.3% circa del PC+PBT.

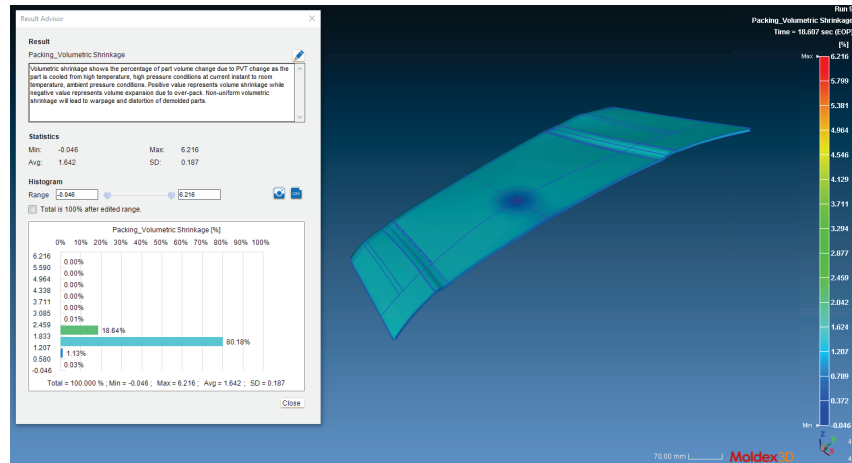


Figura 3.20: Ritiro volumetrico PC+PET alla fine del packing: distribuzione dei valori.

Studiando ora la deformazione, confrontando con il caso del PC+PBT, il valore **medio** è sceso da 1.568 mm a 0.992 mm , in percentuale, la deformazione è ripartita in maniera simile rispetto al caso precedente. Per il PC+PET, il range di deformazione **superiore** al millimetro, ricopre circa il **40%**, valore dimezzato rispetto al precedente del PC+PBT. (figura 3.21)

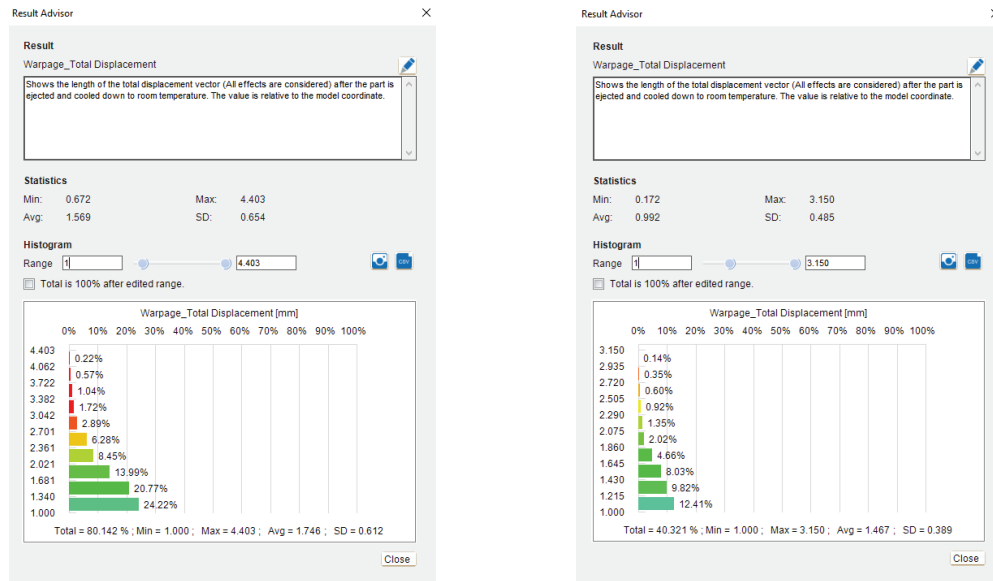


Figura 3.21: Quotaparte mostrina deformata per più di 1 mm : a sinistra PC+PBT, a destra PC+PET.

Proprio come per il PC+PBT, anche per il PC+PET i campi di pressione e di temperatura sono uniformi alla fine del mantenimento.

3.2.4 Analisi finale delle simulazioni

Dall'analisi dei risultati delle simulazioni condotte sui due materiali selezionati, a parità di geometria indagata e di parametri di stampaggio (a meno di quelli legati alle proprietà del materiale), si possono trarre le seguenti conclusioni:

- 1) A livello di **riempimento**, il PC+PET ed il PC+PBT si comportano bene o male **allo stesso modo**, questo lo si evince osservando i tempi di filling e l'andamento della fase di riempimento simulata.
- 2) Il PC+PET manifesta una **migliore** stabilità dimensionale, con un ritiro decisamente minore e al tempo stesso più uniforme rispetto al rivale.
- 3) A livello di difetti non sorgono molte differenze, entrambi i materiali sono poco soggetti a fenomeni di linee di giunzione, sink marks, e vuoti d'aria, nonostante il singolo punto di iniezione.
- 4) Il PC+PET si comporta decisamente meglio in quanto a **deformazione**, manifestando una equa distribuzione sulla superficie del pezzo, con valori sensibilmente più bassi. Alla fine di questa indagine preliminare, si è scelto di proseguire la campagna di simulazione testando solo il **PC+PET**, complessivamente superiore in termini prestazionali.

3.3 Inserti di iniezione a banana

Per effettuare il passaggio al sistema di alimentazione definitivo, si è reso necessario modificare il file CAD della mostrina presentato ad inizio capitolo, andando a modellare anche le banane.

Pur essendo presente già in Moldex 3D un preset dedicato, potendole inserire in maniera più semplice e veloce, si è preferito prendere ispirazione dal catalogo **Meusburger**, azienda Austriaca leader nella progettazione e produzione di attrezzatura per stampaggio ad iniezione, come stampi, elementi di termoregolazione, guide, spine, centratori ed accessori vari.

La scelta di modellarle a CAD, con un approccio **parametrico**, ha permesso delle modifiche successive in maniera più semplice ed immediata, potendole spostare ed adattare in base alle diverse necessità.

Nello specifico, l'azienda di Ingegneria che ha supportato il cliente nella realizzazione delle simulazioni, ha optato per il modello di inserto denominato **E1692/45**, ritenuto adatto alla geometria, alle sue dimensioni ed al materiale impiegato per la simulazione. [22]

La scelta delle banane è stata dettata da più fattori, fra questi spicca il fatto che esse avrebbero lasciato un residuo (**o testimone**) una volta separate dal pezzo, più **piccolo**, in maniera tale da non intaccare eccessivamente l'aspetto superficiale.

Inoltre, a livello pratico, sono più semplici da implementare.

Meusburger fornisce degli inserti a forma di parallelepipedo, i quali contengono già al loro interno la geometria della banana, inseribili in un apposito alloggiamento nello stampo e fissabili tramite un collegamento filettato ad esso. (figura 3.22)

Per favorire il riempimento del pezzo, e per evitare di deturpare la superficie **estetica**, si è scelto di contattarlo in corrispondenza della superficie **non estetica**.

Per questo motivo, la mostrina avrà la superficie **estetica** rivolta verso la parte **fissa** dello stampo mentre, la superficie inferiore **non estetica**, con le banane di iniezione, sarà inglobata nella parte **mobile**. (figura 3.23)

In questo modo, all'apertura dello stampo, la mostrina rimarrà solidale alla parte **mobile**, successivamente, una volta azionati gli espulsori, essa si separerà dalla **materozza**, entro la quale il materiale non è ancora totalmente solidificato, permettendo alla banana di **flettersi** e di **tranciarsi**. (figura 3.23)

Con materozza, si intende il complessivo di canali **freddi** composto dalla banana, assieme alla sezione di iniezione (gate) e una serie di elementi cilindrici di materiale che contribuisce all'**espulsione** della mostrina e alla conseguente separazione del sistema di alimentazione da essa.

La lunghezza del **tratto di espulsione** è **uguale** alla lunghezza complessiva della banana, tale da permetterne la totale fuoriuscita dallo stampo (circa 75 mm).

Le principali dimensioni della banana, riportate in figura 3.22, sono state riprese dal catalogo di Meusburger.

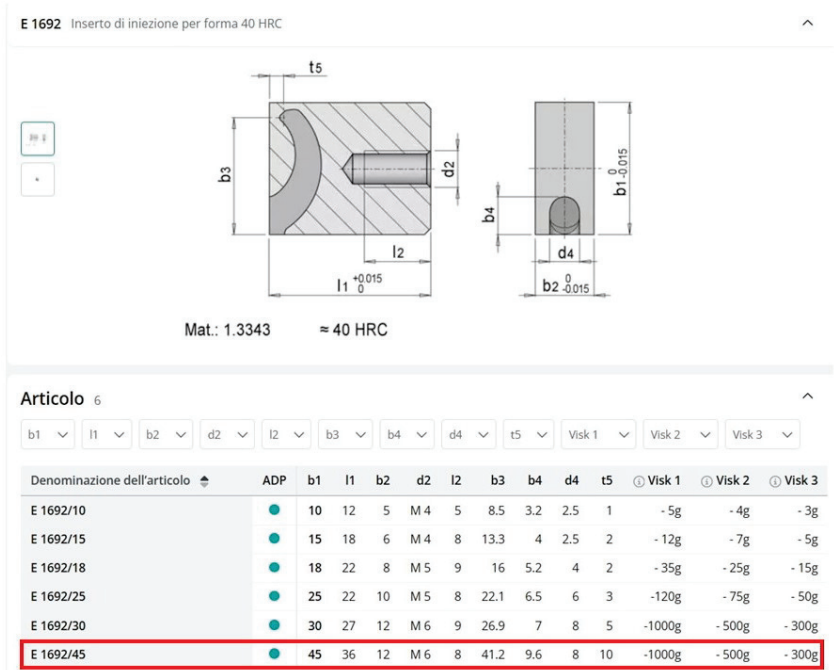


Figura 3.22: Inserto E1692/45 da catalogo Meusburger. [22]

La sezione di passaggio fra la materozza ed il pezzo, a geometria circolare, è stata inizialmente settata a 3 mm, tale dimensione è stata valutata tenendo in considerazione che la banana deve poter essere asportata con relativa facilità ed in maniera automatica, in relazione allo spessore molto contenuto della mostrina di 3mm.

Una sezione troppo grande fa fatica a tranciarsi, ma allo stesso tempo garantisce un ottimale apporto di materiale entro la cavità stampo.

D'altro canto, una sezione più piccola facilita la separazione, ma rischia di creare **eccessive** perdite di carico all'interno del sistema di alimentazione.

Le altre sezioni sono tutte ugualmente circolari, con diametro di 8 mm, come da

catalogo.

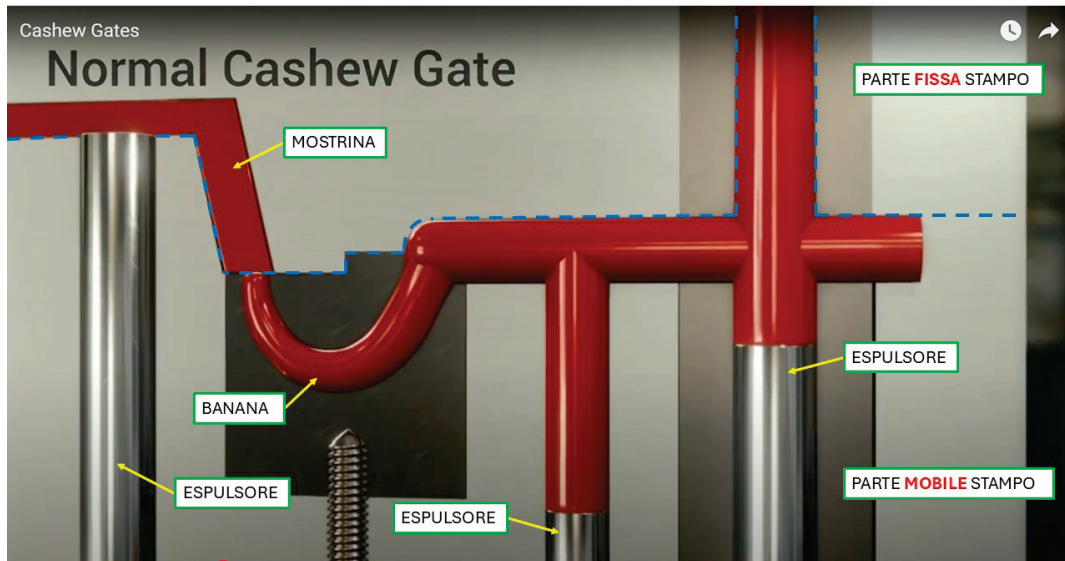


Figura 3.23: Rappresentazione schematica posizionamento materozza nello stampo. [23]

3.4 Passaggio ai 3 punti di iniezione

Dopo aver indagato i materiali per la simulazione, ed aver scelto fra i due il PC+PET, prima di arrivare alla configurazione definitiva, si passa per una intermedia con caratteristiche molto simili.

La configurazione a **tre punti** può fornire spunti interessanti di riflessione, oltre che poterci dare un'idea di massima riguardo il comportamento della configurazione definitiva.

Le tre banane sono state modellate direttamente in ambiente CAD per questione di praticità e perchè, come vedremo fra poco, i gate di iniezione devono essere posizionati opportunamente sulle materozze. (figura 3.24)

Le dimensioni delle sezioni delle banane rispettano quelle indicate nel catalogo di Meusburger di cui si è parlato nel paragrafo precedente, ricordando brevemente, tutte le sezioni sono **circolari**, il loro diametro è di 8 mm, tranne per il passaggio fra la materozza ed il pezzo, la cui sezione ha un diametro di 3 mm.

La necessità di realizzare le banane di iniezione nel CAD, è sorta da una problematica riscontrata nel momento in cui si andava ad importare il modello CAD della sola mostrina, andando a realizzare le banane tramite il tool dedicato in Moldex 3D.

Difatti, identificando le materozze come **canali freddi (cold runner)**, il software non faceva posizionare i gate nella bocca di ingresso di tali elementi, in quanto eccessivamente distanti dalla parte da simulare.

Il problema è stato quindi aggirato realizzandole al CAD, importandole di pezzo con la mostrina, e conferendo all'intero modello l'attributo di **parte**.

Le banane laterali sono state disposte simmetricamente rispetto a quella centrale

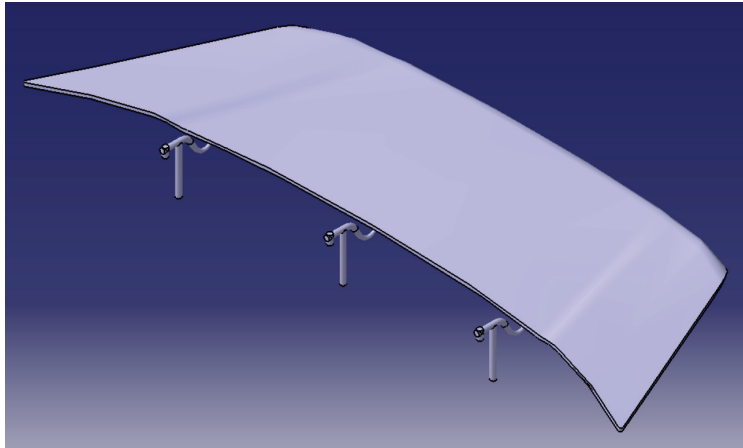


Figura 3.24: Configurazione a 3 banane di iniezione.

(posta sul piano di simmetria della mostrina), ad una distanza di 250 mm l'una. Sono state lanciate tre simulazioni, la prima con un'impostazione delle variabili di processo identica al caso migliore di simulazione diretta, tranne per la pressione di iniezione a 150 Mpa , la seconda iniziando a variare tali parametri nell'intorno dei valori già presenti.

Per quanto riguarda la terza, si è lavorato sul timing di apertura delle banane laterali. Analizzando il primo calcolo, nonostante tutto, la mostrina non si riempie. (figura 3.25)

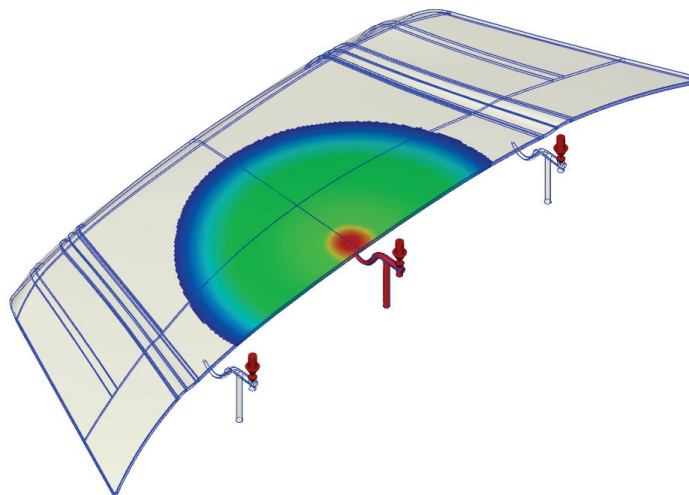


Figura 3.25: Configurazione a 3 punti: riempimento incompleto.

Si applicano, ora, delle variabili di processo nuove, i cui valori sono:

- 1) pressione di iniezione massima 120 Mpa
- 2) pressione di mantenimento massima 100 Mpa ,
- 4) tempo di filling 6 s ,

- 4) tempo di packing 10 s,
- 5) temperatura del fuso invariata 270°C,
- 6) temperatura dello stampo 60°C,
- 7) temperatura di estrazione pezzo 110°C,
- 8) timing di apertura delle banane laterali a 3 s.

I risultati, come si vede in figura 3.26, sono notevolmente cambiati:

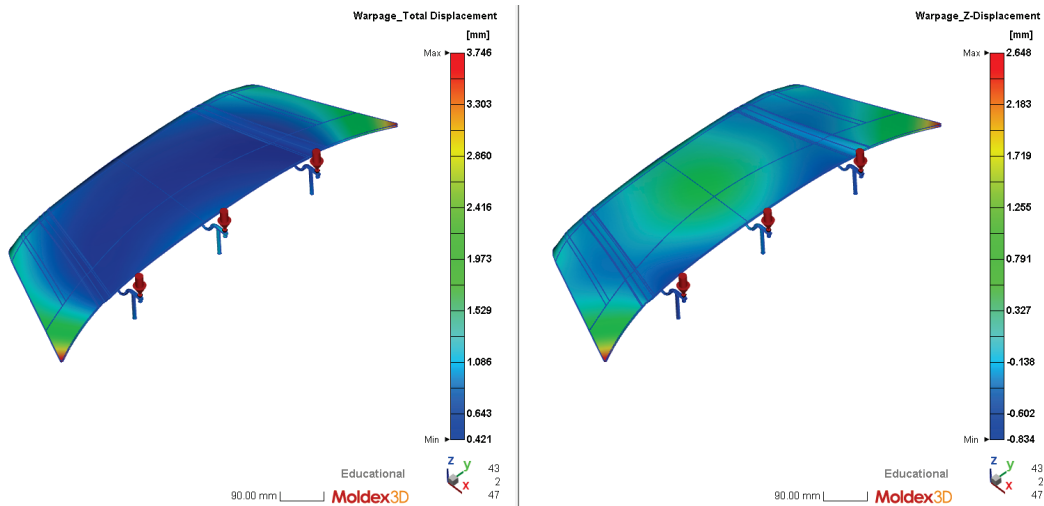


Figura 3.26: Total e Z warpage con apertura a 3 s.

Variando il timing di apertura a 4 s, la situazione migliora ancora di più (figura 3.27):

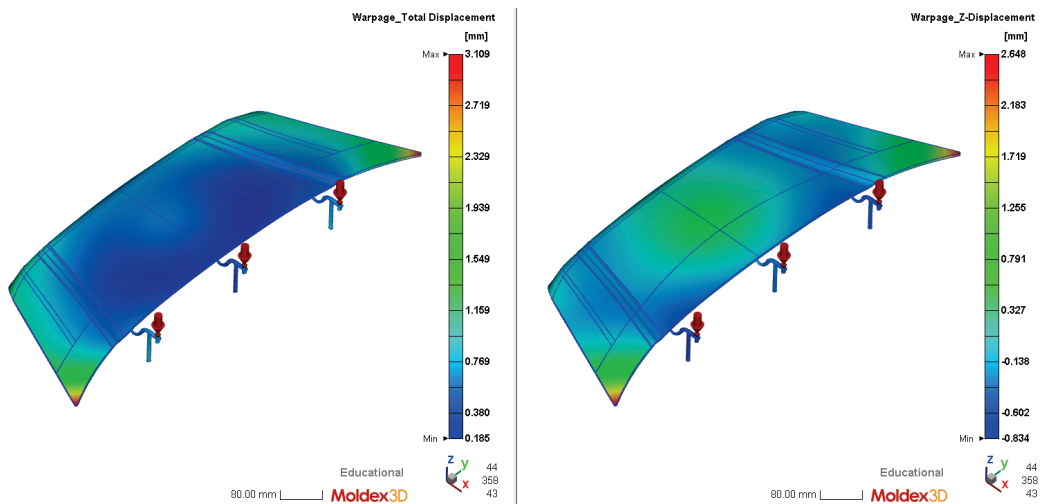


Figura 3.27: Total e Z warpage con apertura a 4 s.

In generale, questo è un comportamento che si ripresenterà anche nelle successive simulazioni con i cinque punti di iniezione, cioè che **ritardando** l'apertura dei gate,

otteniamo dei **benefici** sul warpage.

Due sono gli aspetti critici messi in risalto, però, dalle simulazioni condotte:

- 1) Innanzitutto, si osserva che con soli tre punti di iniezione, **non** abbiamo sufficiente controllo sul flusso in termini di direzionalità, non riusciamo a garantire il corretto riempimento e la conformità del pezzo.
- 2) Come seconda cosa, come si può notare in figura 3.28, si manifestano alcune linee di giunzione, la cui temperatura è tendenzialmente **bassa** (oltre che molto lontana dal range di temperature del fuso in cavità). Questa condizione può risultare **critica** in quanto potenzialmente, potrebbe generare delle separazioni nel flusso (dei punti di **non** saldatura nel materiale), le quali danno luogo a zone di locale indebolimento della struttura.

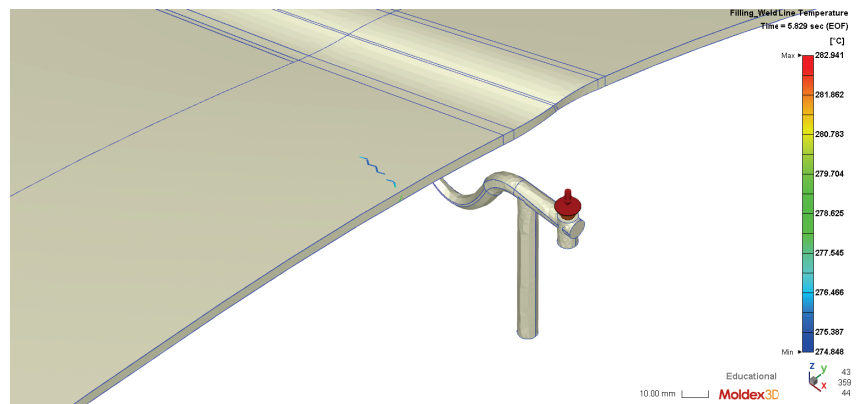


Figura 3.28: Campo di temperatura linee di giunzione.

Per tali motivi, e siccome si presumeva già da subito che la configurazione a cinque punti avrebbe potuto portare a risultati più soddisfacenti, si è preferito concentrare gli sforzi per andare ad ottimizzare il più possibile il layout definitivo.

3.5 Passaggio ai 5 punti di iniezione

L'ultima famiglia di simulazioni, concerne la soluzione definitiva a **cinque banane** di iniezione, nello specifico sono stati studiati due **layout differenti** in termini di distribuzione delle banane lungo la dimensione principale della mostrina.

Nel primo caso, sono state disposte equidistanziate nella zona centrale della mostrina a 125 mm una dall'altra.

Per questione di immediatezza, ci si riferirà ad essa come configurazione **raggrupata**. (figura 3.29)

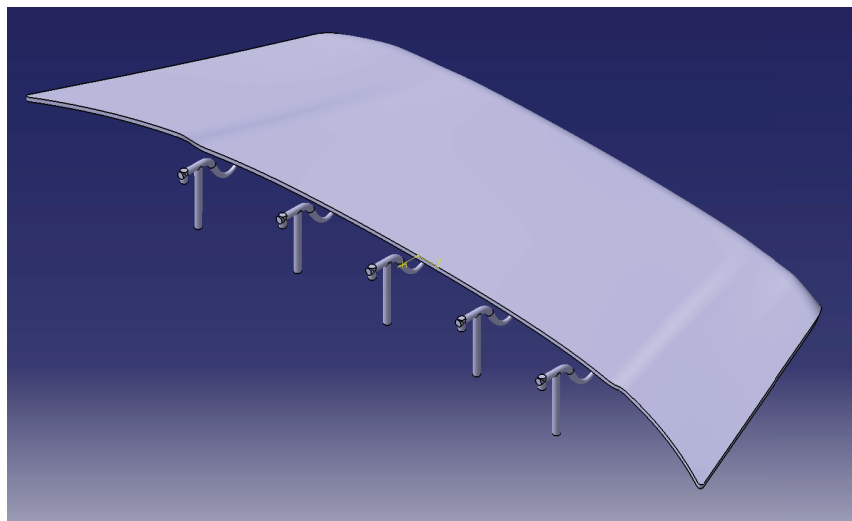


Figura 3.29: Configurazione **raggruppata** dei punti di iniezione.

Nel secondo caso, invece, le banane di iniezione sono state ripartite sull'**intera** lunghezza del pezzo.

Questa configurazione è nata dall'idea di favorire lo scorrimento del flusso a raggiungere le regioni delle **punte** estremali più facilmente siccome, come già abbiamo avuto modo di constatare nella simulazione diretta, queste erano proprio le zone in corrispondenza delle quali il fluido faceva più fatica ad arrivare.

A questa configurazione, ci riferiremo per semplicità con il nome di **distribuita**. (figura 3.30)

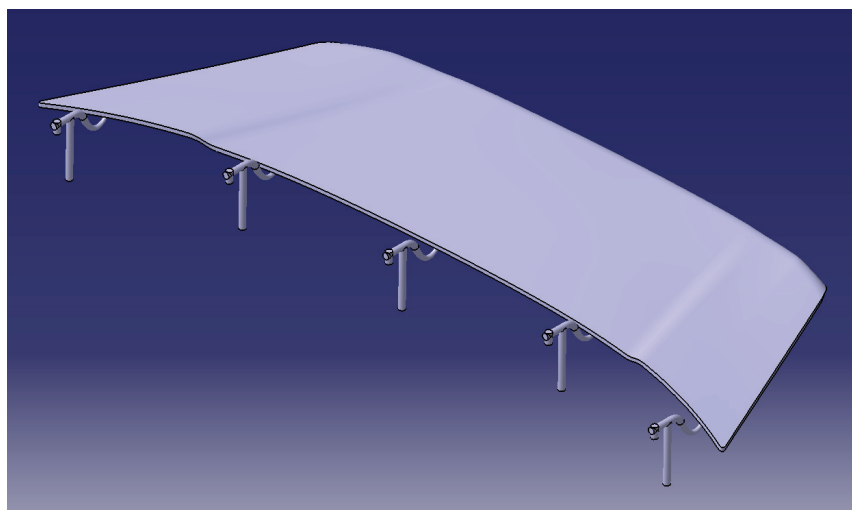


Figura 3.30: Configurazione **distribuita** dei punti di iniezione.

Il percorso seguito, si compone di test condotti su 4 soluzioni differenti, tutte sulla carta valide al fine del raggiungimento dei target previsti.

3.5.1 Ottimizzazione parametri di processo

Di seguito verranno esposti i setup e discussi i risultati delle simulazioni condotte.

- **Configurazione raggruppata delle banane**

La configurazione **raggruppata** delle banane di iniezione è stata la prima ad essere realizzata al CAD e poi testata in Moldex 3D.

Due simulazioni preliminari sono state condotte al fine di valutare il corretto riempimento della mostrina.

In questa fase, **tutti i gate** sono stati aperti **contemporaneamente** all'istante **zero** ad inizio simulazione.

A livello di **setup del processo**, sono state testate le pressioni di iniezione di **100 e 120 Mpa**, oltre che messi a confronto il riempimento con il tempo stimato dal software (variabile a seconda del caso specifico fra i 3 ed i 3.5 s), con il tempo di riferimento ritenuto idoneo tenendo conto del processo reale, di 6 s.

Per quanto riguarda la **pressione di mantenimento massima**, è stato preservato il valore di 80 Mpa, così come per gli andamenti del profilo di iniezione, di pressione di iniezione e della pressione di mantenimento stessa.

In tutte le simulazioni condotte, **non si riscontrano problemi di riempimento della cavità**.

Analizzando però più a fondo i risultati, è subito saltato all'occhio un fenomeno interessante e teoricamente prevedibile.

Come possiamo notare in figura 3.31, quattro **linee di giunzione** si formano in corrispondenza delle sezioni di contatto dei **singoli fronti di fuso** (figura 3.32).

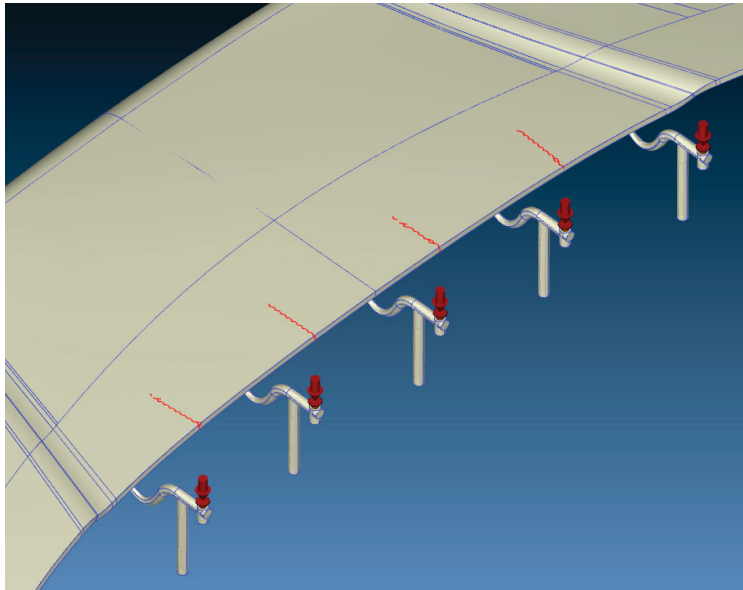


Figura 3.31: In rosso: linee di giunzione sulla superficie della mostrina.

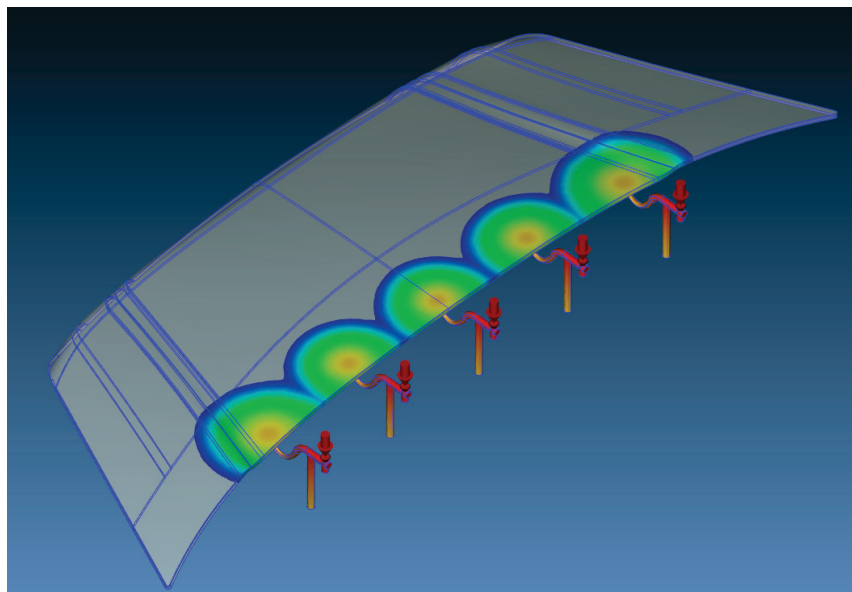


Figura 3.32: Animazione avanzamento fronte, istante di contatto dei singoli fronti (dopo circa 1 s).

Una caratteristica a cui prestare molta attenzione, è la **temperatura** delle linee di giunzione.

Se troppo bassa, si può manifestare la parziale separazione del flusso in quelle regioni, generando delle discontinuità, le quali a loro volta potrebbero causare l'indebolimento locale della mostrina.

Nel nostro caso non vi sono particolari problemi siccome, come possiamo osservare in figura 3.33, la temperatura alla quale si manifestano è molto simile a quella del fuso in cavità (la cui distribuzione è riportata in figura 3.34).

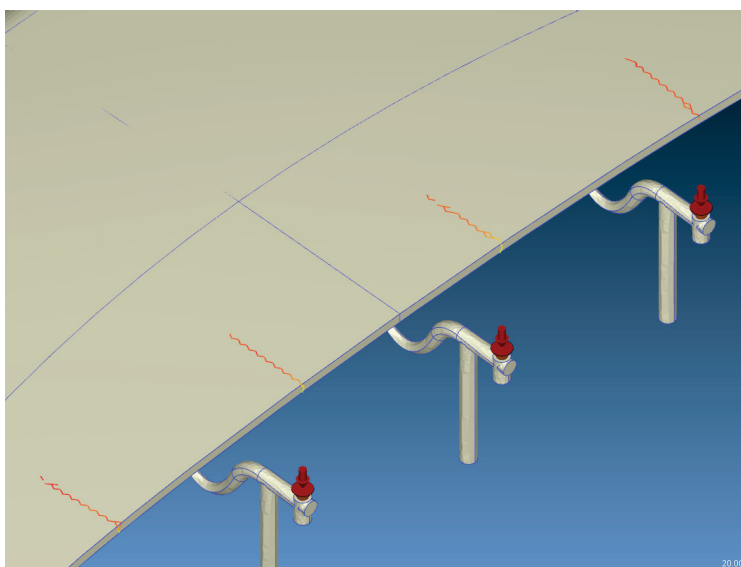


Figura 3.33: Temperatura delle linee di giunzione.

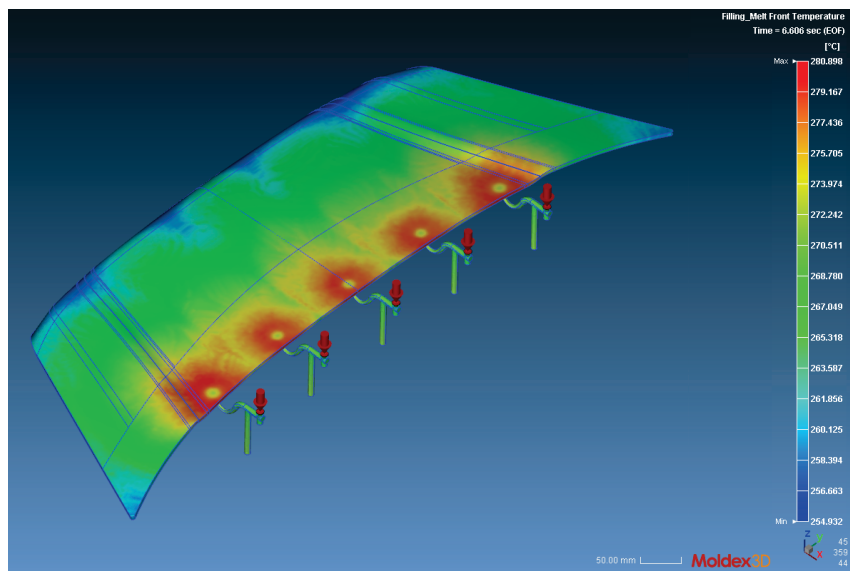


Figura 3.34: Campo di temperatura del fuso alla fine del filling.

Il warpage, calcolato per avere dei primi valori di riferimento, risulta molto alto. (figura 3.35)

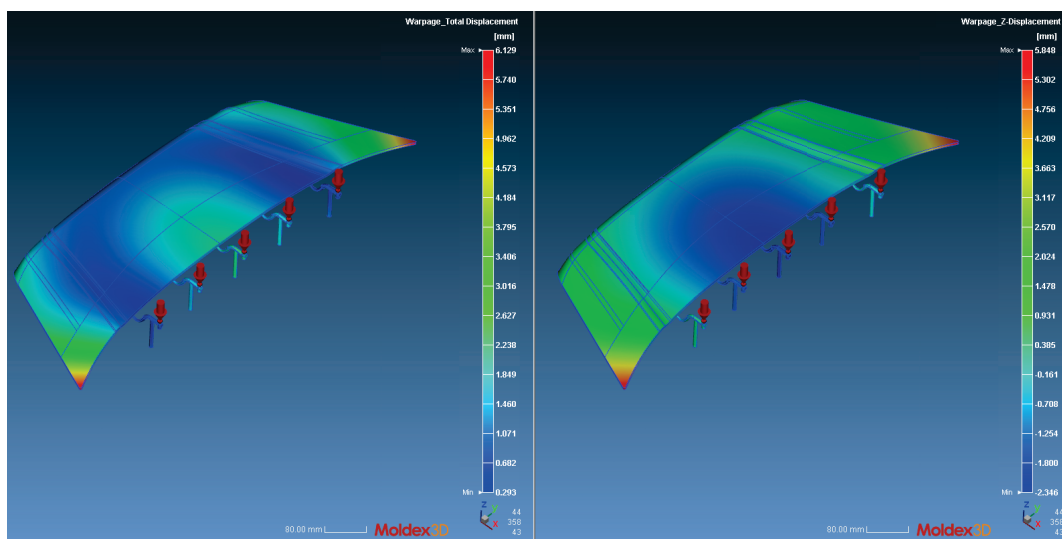


Figura 3.35: Deformazione in termini totali ed in direzione z.

Si è poi subito eseguito un tentativo di apertura **sequenziale** dei gate, cercando di capire secondo quale criterio ciò dovesse avvenire.

Moldex 3D ci fornisce diverse possibilità, nello specifico cinque: impostazione manuale del timing, apertura di un certo gate nel momento in cui il flusso lo raggiunge, apertura di un certo gate una volta che il flusso raggiunge un certo nodo della mesh, apertura di uno o più gate dopo che è stata riempita una certa percentuale in volume della cavità, infine la possibilità di aprire dopo il punto di V/P switch. (figura 3.36)

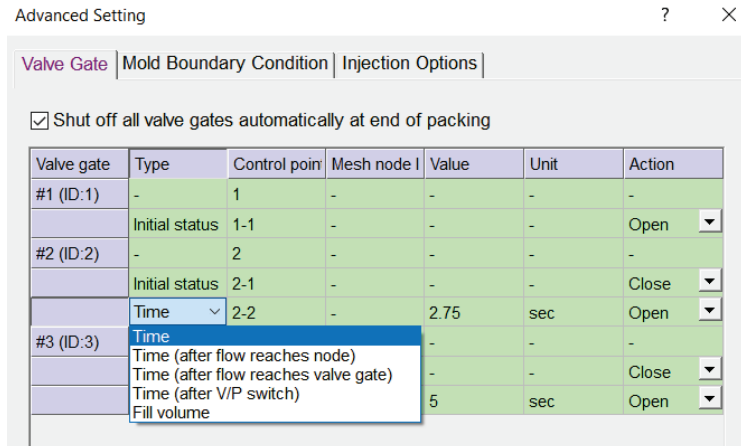


Figura 3.36: Opzioni di apertura differenziata gate messe a disposizione da Moldex 3D.

Siccome inizialmente non si aveva alcun dato a disposizione riguardo un possibile settaggio **manuale** del timing di apertura, il primo tentativo è stato eseguito cercando di aprire i gate in sequenza una volta che il flusso di materiale li avesse raggiunti.

Purtroppo, questa soluzione è risultata del tutto **inefficace**, in quanto, come si può notare in figura 3.37, il punto centrale non esercita una pressione sufficiente da permettere al flusso di risalire le banane ed aprire i gate.

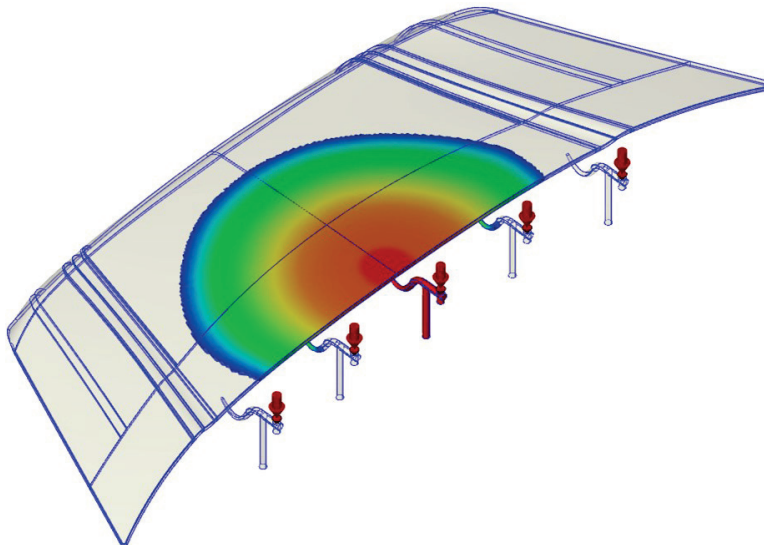


Figura 3.37: Riempimento incompleto dovuto ad una insufficiente pressione del gate centrale.

Il passo successivo è stato quello di lavorare al **timing di apertura**, con l'obiettivo di settarne uno manualmente e farlo variare progressivamente, in

maniera tale da trovare il compromesso ideale.

Data la simmetria del pezzo e la disposizione altrettanto simmetrica delle banane di iniezione, si è subito pensato di aprire sequenzialmente **a coppie simmetriche**.

Questo significa che all'istante zero si apre il gate centrale, successivamente a cascata i laterali ed infine gli estremali. (figura 3.38)

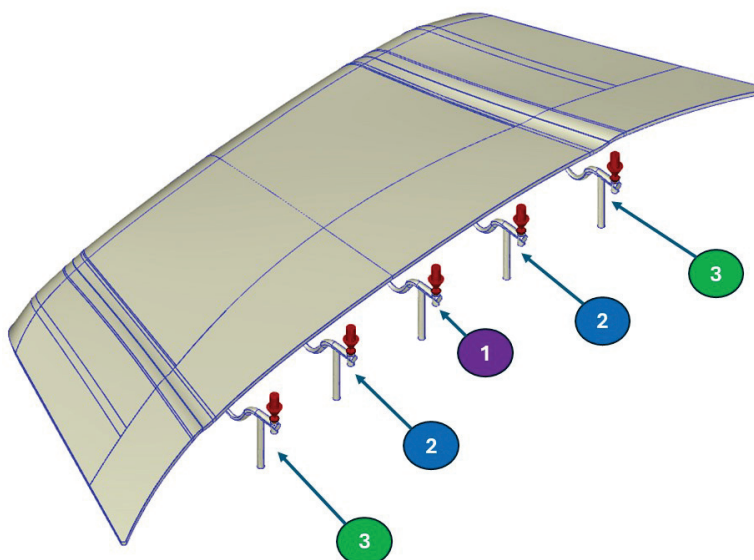


Figura 3.38: Schema ordine di apertura dei gate.

Una **prima proposta** è quella di ripartire l'ordine di apertura equamente sul tempo di filling settato di 6 s, quindi seguendo quest'ordine: centrale a 0 s, laterali a 2.75 s, le estremali a 5 s. (figura 3.39)

Advanced Setting ? X

Valve Gate | Mold Boundary Condition | Injection Options

☒ Shut off all valve gates automatically at end of packing

Valve gate	Type	Control poin	Mesh node I	Value	Unit	Action
#1 (ID:1)	-	1	-	-	-	-
	Initial status	1-1	-	-	-	Open
#2 (ID:2)	-	2	-	-	-	-
	Initial status	2-1	-	-	-	Close
	Time	2-2	-	2.75	sec	Open
#3 (ID:3)	-	2	-	-	-	-
	Initial status	3-1	-	-	-	Close
	Time	3-2	-	5	sec	Open

Figura 3.39: Setup apertura sequenziale dei gate.

Anche in questo caso, per il riempimento non ci sono problemi nei 6 s previsti, e come si può notare in figura 3.40, il warpage è in pratica **più che dimezzato** rispetto al caso di apertura **sincrona** di tutti i gate, si è verificato un passaggio nel valore di picco da 5.8 mm circa a 2.6 mm.

Anche in termini di valore minimo, il vantaggio ottenuto è **cospicuo**, si passa da un valore assoluto di 2.3 mm circa a 0.97 mm.

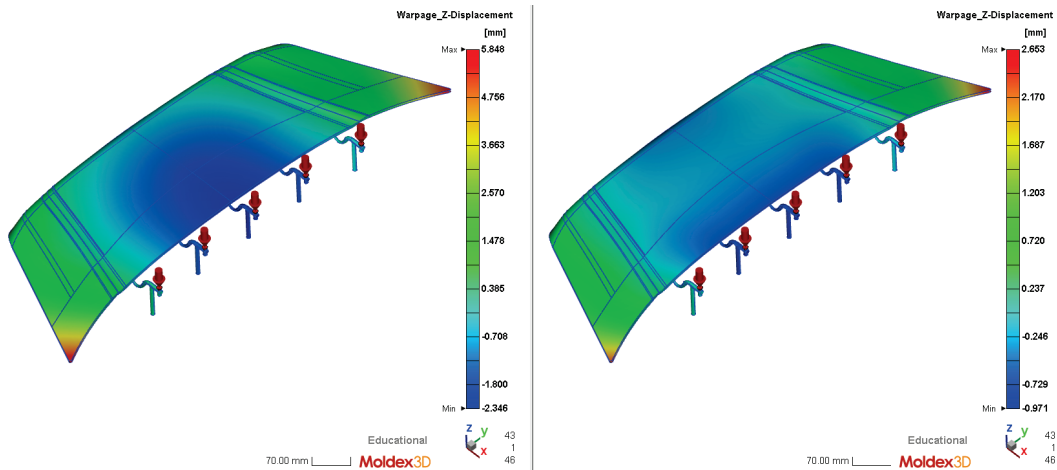


Figura 3.40: Differenza nel warpage in **Z** rispetto al timing di apertura settato: a destra il caso dei nuovi valori.

Inoltre, facendo variare il timing attorno a questi valori, nello specifico provando ad **anticipare** settandoli rispettivamente a 2 s e 4 s, poi ritardando portandoli a 3 s e lasciando i 5 s degli estremali invariati, le simulazioni hanno prodotto esiti sempre **peggiori**. (figura 3.41)

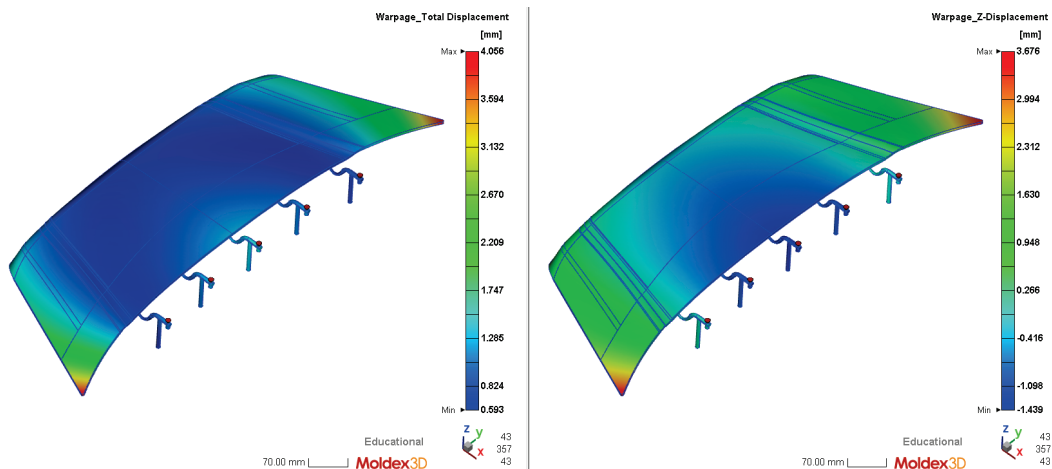


Figura 3.41: Risultati del total e Z warpage con timing impostato a 2 e 4 s.

La campagna simulativa è proseguita lavorando sugli altri parametri: in primis sul valore della pressione di mantenimento massima e sulla temperatura di estrazione pezzo.

Per quanto riguarda quest'ultima, il datasheet del PC+PET consiglia un valore di 140°C, si è pensato quindi di portarla a 120, poi a 110°C.

L'idea nasce da un'osservazione molto semplice, allungando il tempo di permanenza del pezzo all'interno dello stampo, grazie all'enorme rigidità dello stesso, la deformazione viene efficacemente contrastata.

Le simulazioni hanno confermato questa impressione, a parità degli altri parametri, facendo scendere la temperatura di estrazione del pezzo si ottengono dei buoni vantaggi sul warpage.

La stessa cosa avviene se si va ad aumentare la pressione di mantenimento massima a 100 Mpa, garantendo una spinta maggiore nei confronti del materiale.

Un altro dato di fondamentale importanza da non trascurare è il **tempo di mantenimento**, il quale va a braccetto con una distribuzione ben studiata in termini di valori di pressione.

Come asserto nella letteratura scientifica sullo stampaggio [17], il mantenimento dei polimeri **amorfi**, andrebbe condotto a **volume costante**, facendo variare a più livelli la pressione.

Ciò implica il partire da un valore di pressione **alto**, per poi scalarlo in percentuale del massimo progressivamente, creando un andamento **discreto** (cioè a blocchi), oppure **continuo**.

Detto ciò, il software propone già un andamento a **3 sezioni** come in figura 3.42.

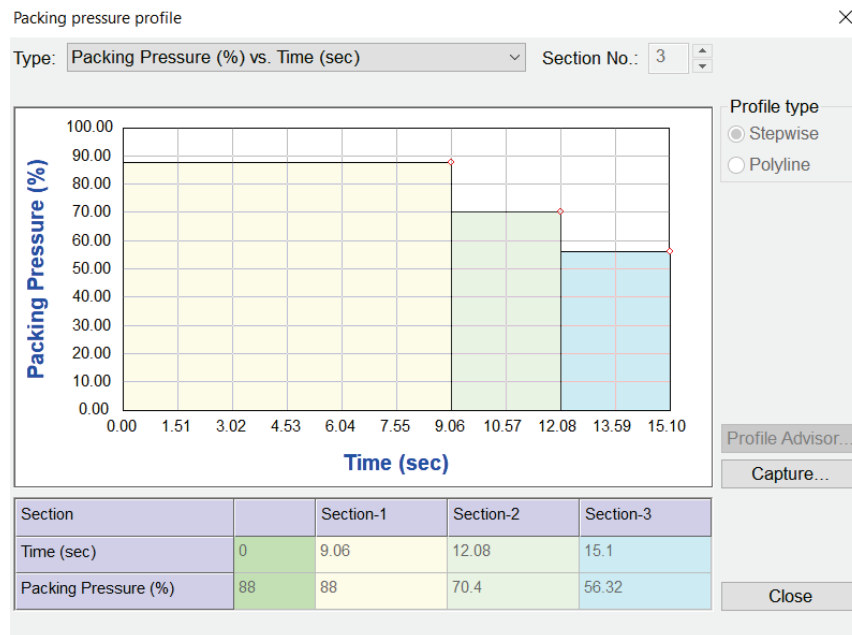


Figura 3.42: Profilo di pressione di mantenimento proposto dal software.

Come indicazione di massima, [17] consiglia di mantenere il valore **massimo** di pressione di mantenimento per un periodo uguale ai $\frac{2}{3}$ del tempo di packing impostato, per poi scalare il valore in base al numero di post-pressure di cui abbiamo bisogno.

I risultati ottenuti impostando un andamento a due blocchi (su 5 s di packing complessivo), settando per il **primo tratto** la pressione al 100% del valore, successivamente terminando con il 70%, risultavano piuttosto promettenti. Il file di log della simulazione, però, suggerisce che il tempo di raffreddamento dei gate gravita attorno a valori compresi fra i 9 ed i 10 s. Ciò ha portato ad **allungare** il tempo di packing a 10 s, creando una suddivisione a 3 sezioni, settando il 100% della pressione per i primi 4 s, l'80% per 2 s ed il 70% per i restanti 4 s del totale. (figura 3.43)

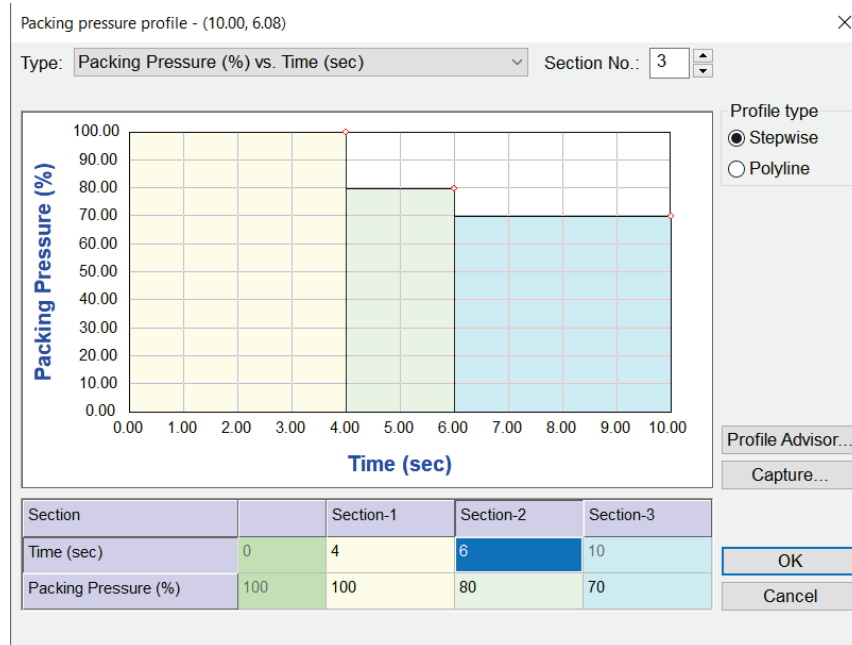


Figura 3.43: Profilo di pressione di mantenimento definitivo.

Visti i risultati positivi dell'adozione di tale strategia, nelle simulazioni successive il packing pressure profile sarà sempre settato secondo le modalità appena descritte.

Ricapitolando, la simulazione migliore ottenuta fino ad ora, eseguendo un'ottimizzazione sulle variabili di processo, è stata così settata: pressione di iniezione massima 120 Mpa, pressione di mantenimento massima 100 Mpa, tempo di filling 6 s, tempo di packing 10 s, temperatura del fuso invariata 270°C, temperatura dello stampo 60°C, temperatura di estrazione pezzo 110°C, timing di apertura dei gate impostati a 2.75 e 5 s.

Infine, il profilo di pressione di mantenimento è riportato in figura 3.43.

Il warpage risultante in termini di spostamento **totale** ed in direzione **Z**, sono riportati in figura 3.44.

La distribuzione della deformazione è comune a tutte le simulazioni sin'ora condotte e sarà comune anche a quelle che verranno discusse in seguito, a causa probabilmente della particolare geometria del pezzo simulato.

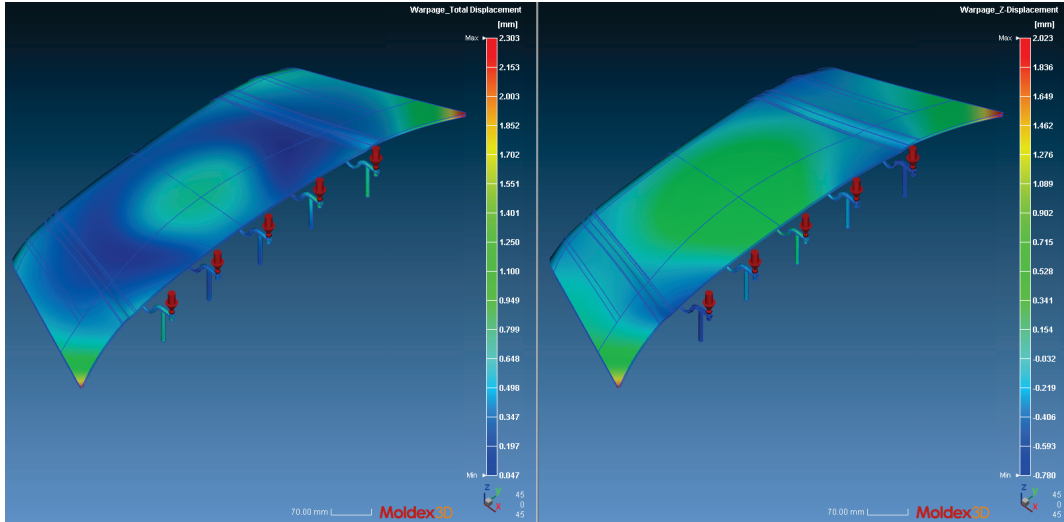


Figura 3.44: Risultati migliori in termini di warpage sin'ora ottenuti.

- **Configurazione distribuita delle banane**

Facendo tesoro dei risultati della prima carrellata di simulazioni sui cinque punti di iniezione "raggruppati", il lavoro è proseguito modificando la geometria CAD per realizzare la configurazione **distribuita**, semplicemente andando a spostare le banane ripartendole diversamente.

Le prime simulazioni sono state impostate esattamente come le migliori della configurazione **raggruppata**, facendo un veloce recap: pressione di iniezione massima 120 Mpa, pressione di mantenimento massima 100 Mpa, tempo di filling 6 s, tempo di packing 10 s, temperatura del fuso invariata 270°C, temperatura dello stampo 60°C, temperatura di estrazione pezzo 110°C, il profilo di pressione di mantenimento è stato replicato in maniera identica. (figura 3.43)

Il **timing di apertura dei gate**, come vedremo dai risultati, avrà un'influenza importante sul warpage sia in termini di valore assoluto, sia come distribuzione.

Per tale motivo, i suoi valori sono stati studiati a fondo al fine di capire quale potesse essere la scelta migliore possibile.

Replicando esattamente il pattern di parametri di processo appena descritti, la situazione in termini di warpage è la seguente (figura 3.45):

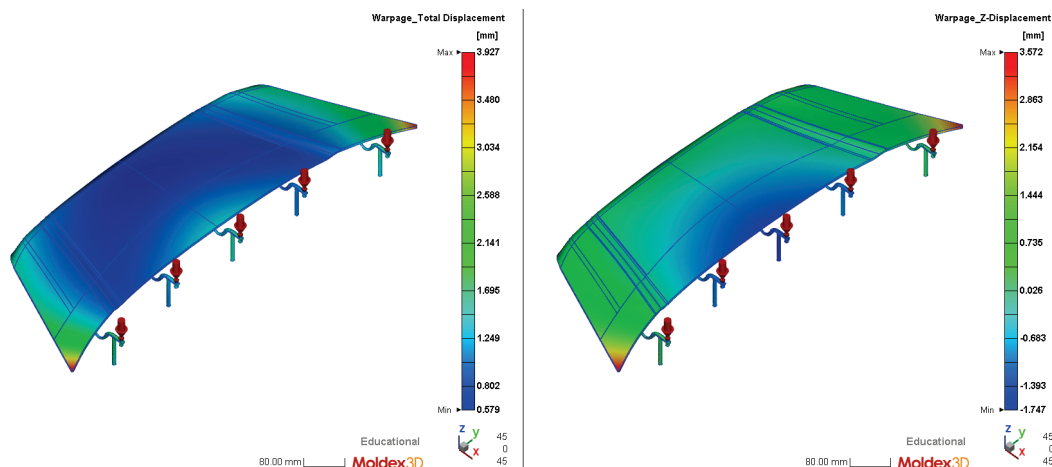


Figura 3.45: Valori di warpage di primo tentativo con la configurazione distribuita.

Si nota che i valori di deformazione sono più elevati del migliore risultato ottenuto con la configurazione **raggruppata** (il delta è superiore ad **1 mm**). (confronto fra figura 3.44 e figura 3.45)

Partendo da un timing di 2.75 s e 5 s, si è provato ad impostare l'apertura delle quattro **banane laterali** a 2.5 s, in maniera tale che il fuso potesse pervadere la cavità gradualmente ed in maniera più uniforme possibile.

Il risultato però, in termini di warpage, peggiora ulteriormente. (figura 3.46)

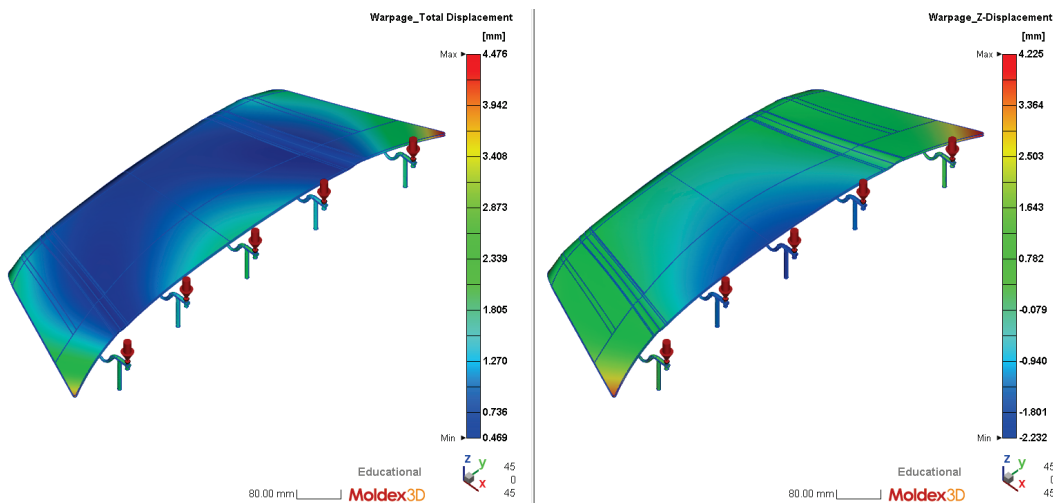


Figura 3.46: Warpage risultante da apertura sincrona a 2.5 s dei gate laterali.

Siccome anticipare l'apertura sembrava dare, in ogni caso, esiti sempre peggiori, il passo successivo è stato quello di tentare di **ritardarla**.

Dopo un confronto con le figure che mi hanno supportato nel lavoro, si è deciso di procedere in tal senso.

Tale scelta, difatti, risulta valida se si pensa che l'obiettivo consiste nel cercare di riempire le zone delle punte della mostrina il **prima possibile**, prima di permettere al fuso di convergere verso la zona anteriore della mostrina (per

poi arrivare alle punte).

Facendo arrivare il fuso in quelle zone prima, si lascia il tempo di raffreddare correttamente, evitando eccessive differenze in termini di temperatura e pressione.

A questo punto, quindi, si è pensato di porre a **3 s** l'apertura dei gate laterali, **ritardando** l'apertura degli estremali il **più possibile**, in maniera tale da fare in modo che, in corrispondenza delle punte, potesse crearsi una sorta di "muro" di materiale relativamente freddo (quindi solidificato), che potesse guidare il flusso in quelle zone.

In figura 3.47, viene mostrato la nuova "forma" che il fronte di avanzamento acquisisce:

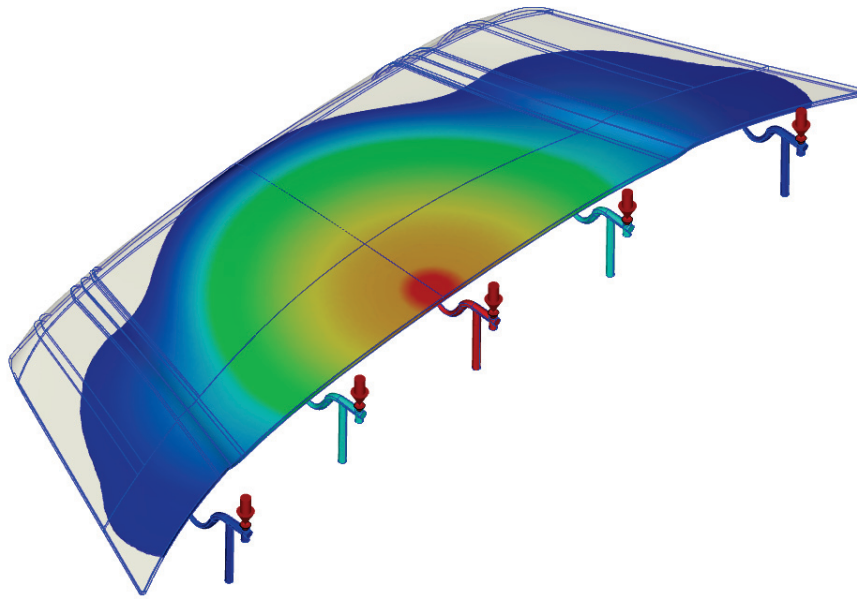


Figura 3.47: Nuova "forma" del fronte di avanzamento di fuso.

La base di partenza è **ottima**, non siamo eccessivamente distanti dalle migliori simulazioni con la configurazione **raggruppata**.

Provando a ritardare ulteriormente l'apertura dei gate laterali (quindi impostando la sequenza di apertura a 4 s ed a 5.3 s), in termini di valore assoluto la situazione sicuramente migliora, la distribuzione però ne risente un pò. (figura 3.48)

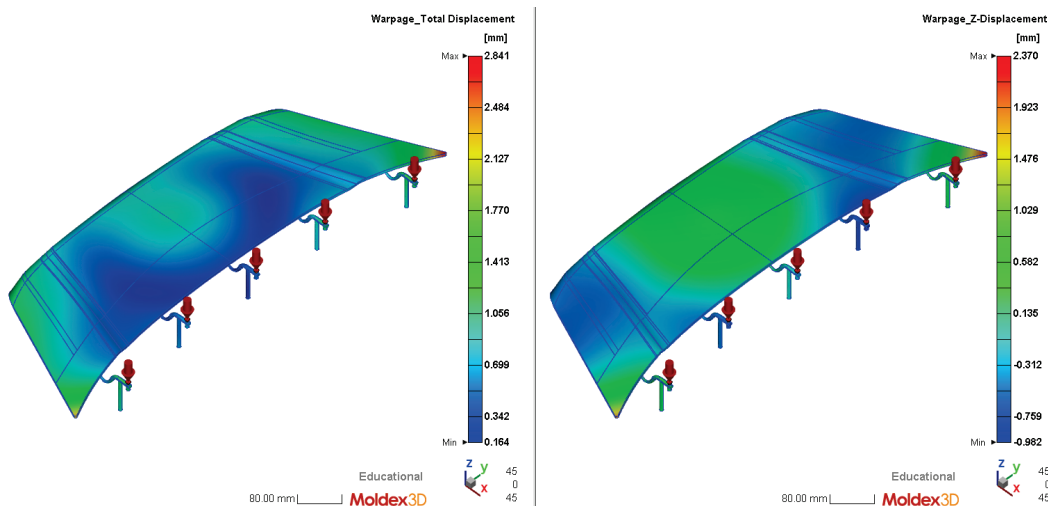


Figura 3.48: Warpage total e in Z con aperture a 4 e 5.3 s.

Le simulazioni successive, hanno evidenziato due aspetti molto interessanti:

1. aumentare la pressione di iniezione massima, **non sempre** porta benefici in termini di warpage (anzi, nel nostro caso si è verificata sempre la circostanza opposta). (figura 3.49)
2. **aumentando** il tempo di raffreddamento proposto dal software, inizialmente a 21 s, **non** si ottiene **alcun vantaggio** (sempre in termini di warpage). Il valore impostato è di 30 s ed andare oltre non sarebbe possibile per questioni pratiche in quanto il tempo ciclo ammonta già a circa 40 s. (confronto tra figura 3.48 e figura 3.50)

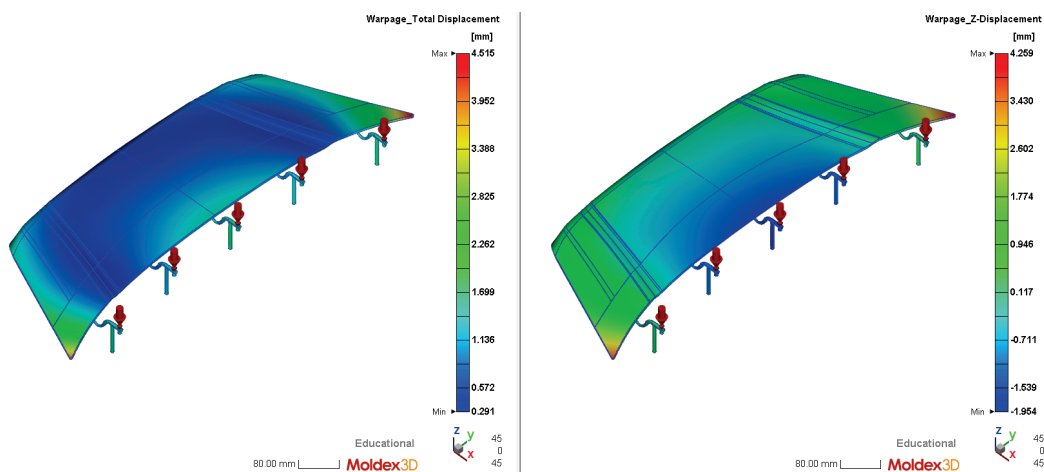


Figura 3.49: Warpage risultante portando la pressione di iniezione massima a 150 Mpa.

Dopo aver ricevuto il via libera dal cliente e dalla società di progettazione incaricata di rendere fattibile la produzione della mostrina, la sezione di passaggio fra **materozza** e **cavità stampo**, è stata aumentata portandola a 3.5

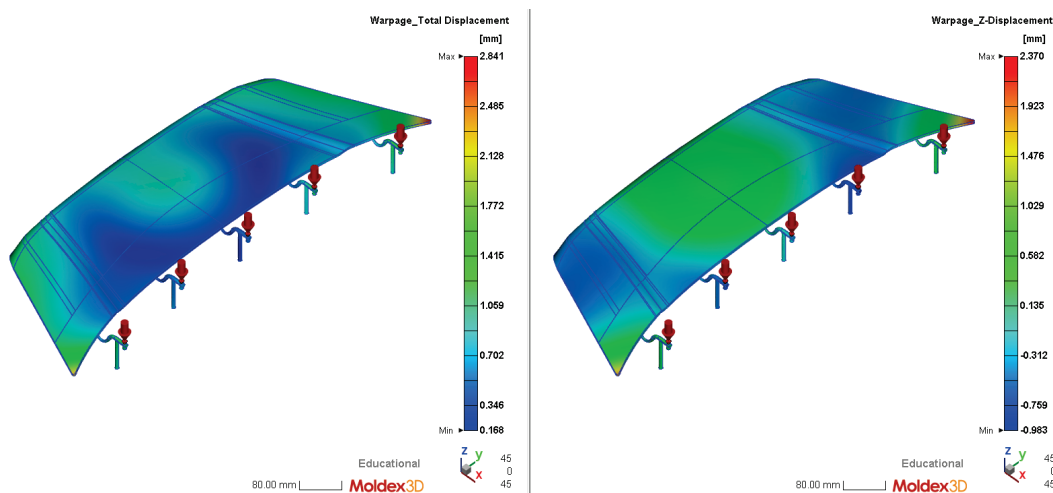


Figura 3.50: Warpage a 120 Mpa di pressione di iniezione massima, 30 s di cooling.

mm dai 3 di partenza.

La portata di fuso all'interno della mostrina, difatti, dipende principalmente da tre parametri: la **velocità**, la **densità del materiale fuso** e la **sezione di passaggio**, secondo la relazione $\dot{m} = \rho \dot{A} v$.

Essendo la sezione $A \propto d^2$, sorge una dipendenza **quadratica** della portata rispetto al diametro di passaggio.

Ciò significa che, aumentando di 0.5 *mm* il valore del diametro, il termine d^2 passerà da un valore di 9 *mm*², ad un valore di 12.25 *mm*², una differenza considerevole, tenendo conto che l'effetto è da moltiplicarsi per cinque.

Si è quindi proceduto ad aumentare la sezione di passaggio in maniera tale da regolarizzare il flusso nel processo reale, evitando strozzature e la possibilità che il materiale non riesca a raggiungere correttamente gli angoli più remoti dello stampo.

Il settaggio del timing di apertura dei gate di iniezione, risponde ai seguenti valori: il centrale apre a 0 s, i laterali a 4 s, gli estremali sono stati differenziati, in maniera tale da rendere un pò più omogeneo il warpage fra le due punte della mostrina (rispettivamente a 5.3 e 5.5 s).

Il miglior risultato è riportato in figura 3.51.

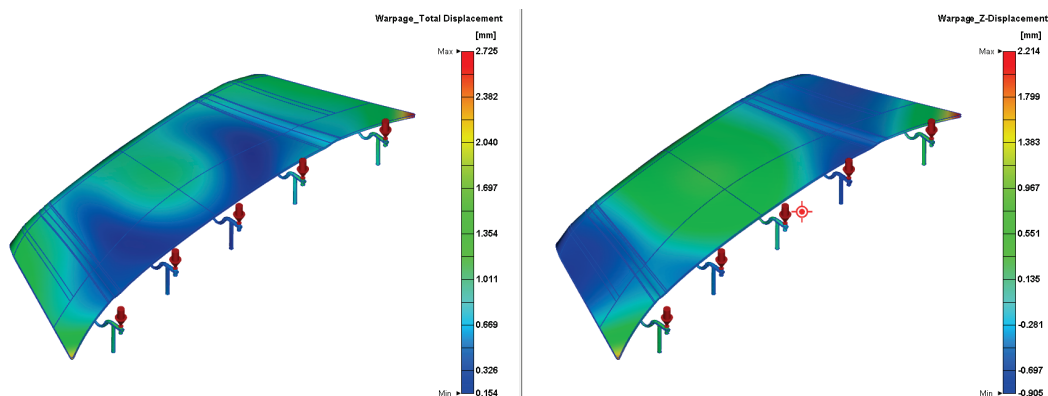


Figura 3.51: Warpage total e in Z con timing di apertura banane estremali differenziato.

Nonostante le prove condotte, si riscontra che la massima deformazione, oltre ad essere ancora eccessiva, è concentrata in un'area abbastanza circoscritta, ma non così tanto da permetterci di concludere che il risultato ottenuto possa essere accettabile.

Possiamo inoltre constatare che, la percentuale di mostrina deformata in termini di total displacement, per più dell'1%, è ancora abbastanza alta, come possiamo vedere dal report, al contrario, però, in Z il risultato è estremamente vicino al target fissato. (figura 3.52)

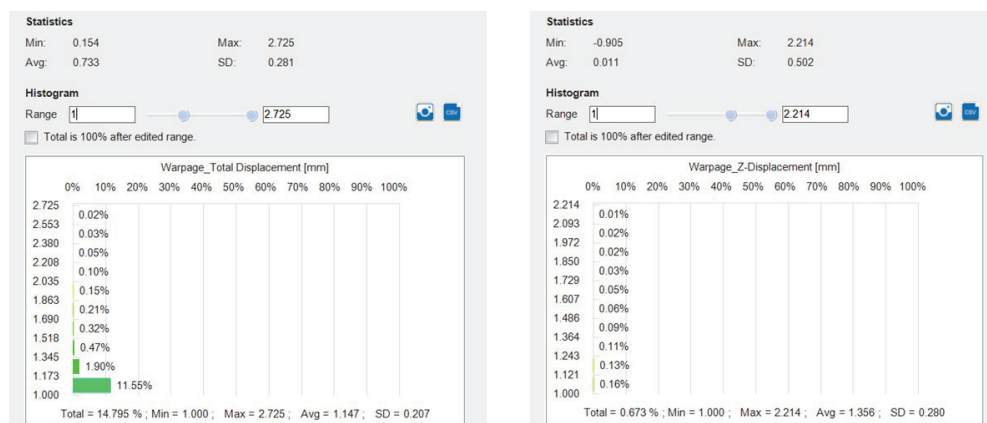


Figura 3.52: Distribuzione deformazioni in termini percentuale: a sinistra il total warpage, a destra il warpage in Z.

Infine, valutando il **ritiro volumetrico**, il suo valore medio percentuale è dell'**1.415%**, in linea con le aspettative, ricordando che il valore riportato nel datasheet dello **0.5-0.6%** sia in direzione **parallela** che **normale** al flusso, è

stato ricavato su un provino di materiale normalizzato (avente quindi una geometria e delle dimensioni completamente diverse), in determinate condizioni ambientali, di temperatura del fuso e così via.

Considerando come direzione principale del flusso la x, il ritiro percentuale, dal file di log, risulta dello **0.44%**, in linea con quanto riportato nel datasheet del Makroblend UT235M.

In **conclusione**, per quanto riguarda la configurazione **raggruppata**, l'ottimizzazione eseguita manualmente basandosi sulla letteratura scientifica a disposizione, ha prodotto dei buoni miglioramenti rispetto al punto di partenza.

Purtroppo, però, i risultati ottenuti non sono riusciti a collimare con i target richiesti, specialmente in termini di deformazione.

Le stesse considerazioni si possono fare anche per la configurazione **distribuita**, nella quale si ottengono risultati non troppo dissimili dalla geometria **raggruppata**.

Per questo motivo, altre soluzioni, a diversi livelli, sono state prese in considerazione.

3.5.2 Scatolamento della mostrina

Una prima proposta per contrastare la consistente deformazione in corrispondenza delle punte della mostrina, è quella di applicare un concetto denominato in gergo **scatolamento**.

Come già discusso nel capitolo di introduzione al componente, al fine di contenere la deformazione della mostrina, rendendola più rigida, è stata realizzata al CAD una **nervatura di rinforzo**.

Essa corre per gran parte del perimetro, fino alla base minore della struttura trapezoidale, inoltre, la sua sezione è quadrata di dimensioni $2 \times 2 \text{ mm}$.

L'idea per cercare di risolvere il problema dell'eccessiva deformazione in corrispondenza delle punte, consiste nel **rinforzare** ulteriormente la nervatura nelle zone che necessitano tale intervento.

Il risultato è pressochè identico alla mostrina di partenza, solamente che la nervatura è stata **inispessita gradualmente** fino ad arrivare in corrispondenza del raggio di raccordo, sul quale possiamo misurare un'altezza superiore di 3 mm rispetto alla geometria di partenza.

Trattandosi di un modello elaborato più e più volte, si correva il rischio che esso potesse corrompersi, creando problemi ad esempio nella generazione della mesh solida. In figura 3.53 ed in figura 3.54, il confronto fra le due nervature.

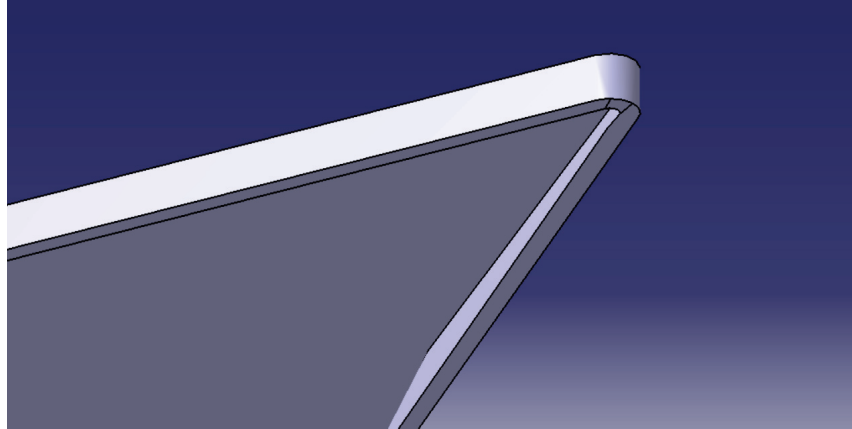


Figura 3.53: Geometria nervatura **prima** della modifica.

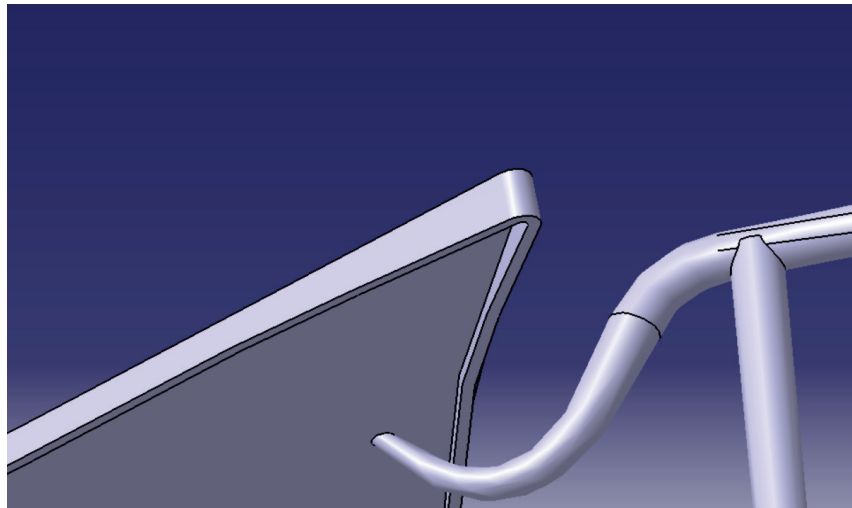


Figura 3.54: Geometria nervatura **dopo** la modifica.

Dopo aver sistemato correttamente la mostrina, sono riuscito ad inserirla nell'ambiente di simulazione senza alcun problema.

La simulazione, a livello di processo, è stata congelata ricalcando il pattern di variabili utilizzato nel caso della run migliore, in termini di risultati, per quanto riguarda la configurazione **distribuita**.

Per rinfrescare un pò la memoria, segue una lista dell'impostazione delle variabili:

- pressione di iniezione massima 120 Mpa;
- pressione di mantenimento massima 100 Mpa;
- tempo di filling 6 s;
- tempo di packing 10 s;
- temperatura del fuso invariata 270°C;

- temperatura dello stampo 60°C;
- temperatura di estrazione pezzo 110°C.

Il profilo di pressione di mantenimento è a tre sezioni, con valori decrescenti di pressioni a partire dal 100%, 80%, infine 70%.

Il timing di apertura segue questo ordine: la banana centrale si apre a 0 s, le laterali a 3 s e le estremali a 5.3 s.

Infine, le sezioni di passaggio fra la materozza ed il pezzo sono state portate a 3.5 mm.

Precisato ciò, andiamo a dare uno sguardo ai risultati del calcolo.

Come possiamo notare in figura 3.55 ed in figura 3.56, a livello di warpage non osserviamo particolari differenze, nè tantomeno otteniamo significativi vantaggi, sia in termini di total displacement che in direzione z.

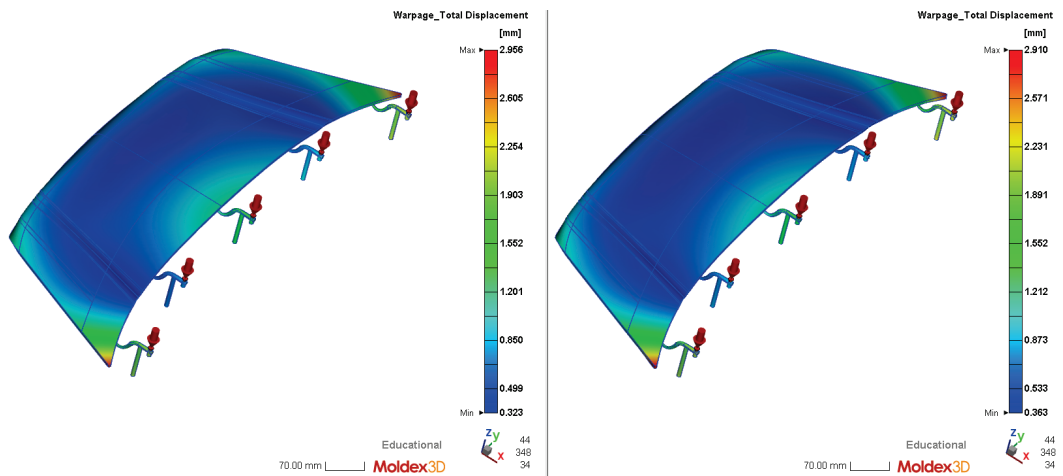


Figura 3.55: Total warpage: a destra la geometria con la nervatura modificata.

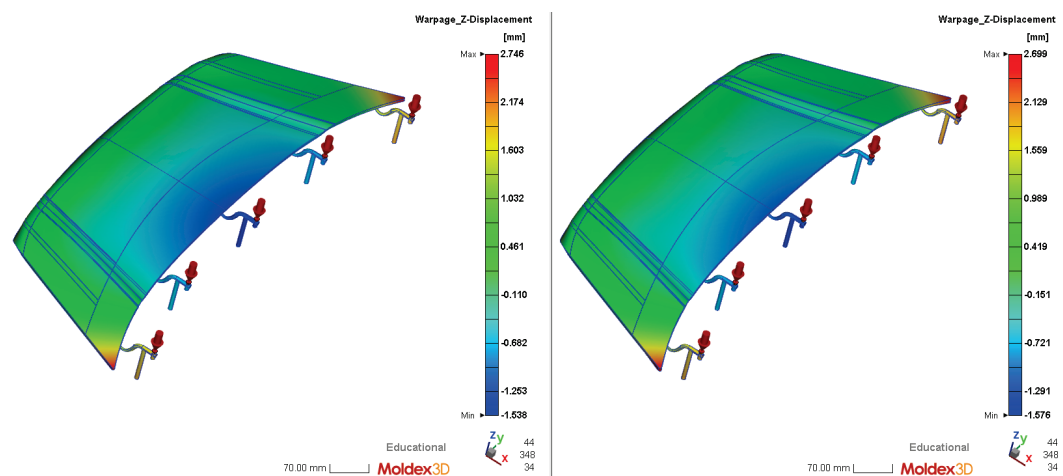


Figura 3.56: Z warpage: a destra la geometria con la nervatura modificata.

Si può ben notare come, nel caso della nervatura nuova, otteniamo dei vantaggi unicamente nel fatto che il valore **massimo assoluto** di warpage è più basso.

La distribuzione risulta essere abbastanza omogenea, anche se la zona di deformazione **massima** è più estesa nel caso nuovo, come dimostra il report in figura 3.57.

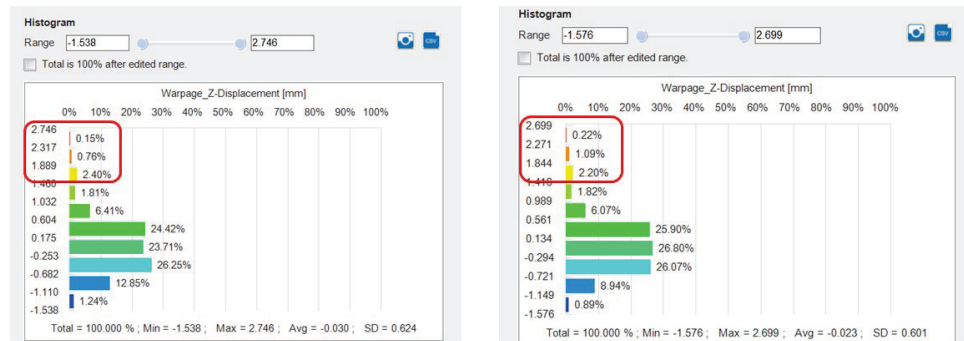


Figura 3.57: Report distribuzione percentuale z warpage: a destra il caso della nervatura modificata.

Questo risultato è dovuto al fatto che, anche se la nervatura va effettivamente ad irrobustire la struttura, provoca delle differenze nei ritiri, dovute al fatto che un maggior quantitativo di materiale dovrà raffreddarsi nelle zone inspessite.

In conclusione, neanche questa soluzione è capace di ridurre la problematica del warpage sulle punte, probabilmente, uno studio fatto ad hoc in tal senso da esperti del settore potrebbe permettere di raggiungere il nostro scopo.

3.5.3 Proposta modifica di stile: raggi di raccordo

Un'ulteriore soluzione, per certi versi drastica, sarebbe quella di alterare la geometria della mostrina, operando delle modifiche nelle zone critiche.

L'idea nasce dalla complessità di gestione dello stampaggio della zona delle punte, le quali possiedono una geometria sfavorevole molto aguzza (il raggio di raccordo è di soli **3 mm**).

Allora, per cercare di accumulare meno tensioni in quelle zone, occorre rendere più **generoso** il raggio di raccordo, addolcendo le forme della mostrina.

La simulazione condotta ha riguardato una mostrina del tutto simile a quella iniziale di riferimento (senza il rinforzo sulle punte di cui si è discusso nel paragrafo precedente), con un raggio di raccordo di **10 mm**.

L'aspetto, anche solo ad occhio, cambia già molto. (figura 3.58)

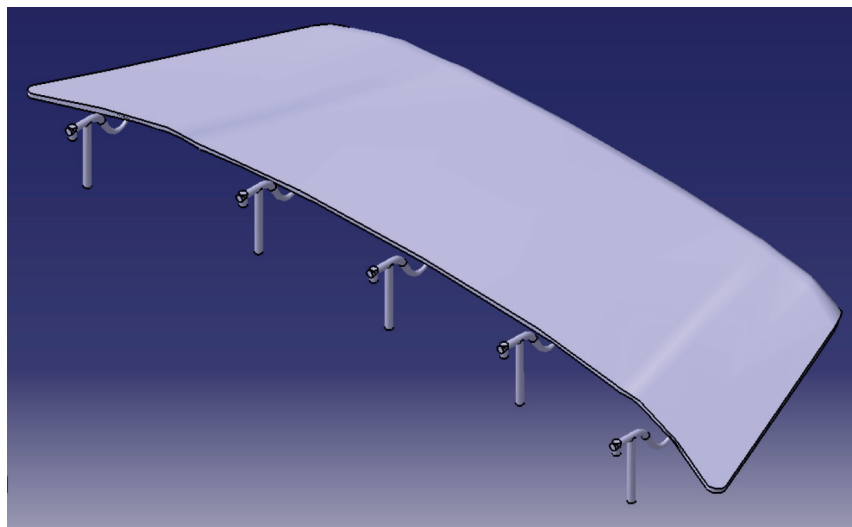


Figura 3.58: Nuovo stile mostrina con raccordo sulle punte portata a 10 *mm*.

Valutiamo ora, a partire dalle simulazioni, i reali vantaggi di una tale soluzione. Sempre a parità di tutti i parametri di processo, settati esattamente come nelle precedenti simulazioni, si osserva in figura 3.59 ed in figura 3.60 che, senza alcun tipo di ottimizzazione particolare su questo caso, siamo già riusciti ad ottenere dei risultati notevoli.

Per quanto riguarda la deformazione totale, come valore minimo rientriamo ampiamente nel target previsto e, nonostante siamo ancora distanti dal +1 *mm* preventivato come picco massimo accettabile, la differenza è piuttosto contenuta rispetto ai casi precedenti.

Ma è sulla deformazione in *z* che osserviamo i risultati più interessanti, a livello di valore massimo, riusciamo a scendere al di sotto dei 2 *mm* ed il risultato, visti i casi precedenti, può già quasi ritenersi soddisfacente. (figura 3.60)

Chiaramente, adottando dei raggi di raccordo ancora più ampi, otterremmo vantaggi ancora più corposi.

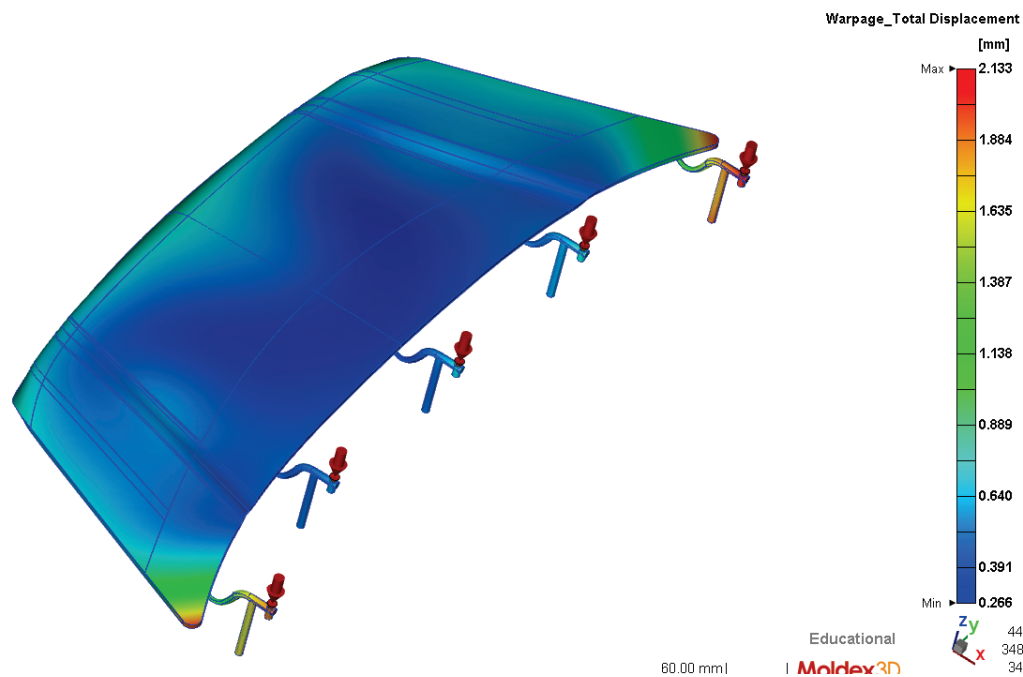


Figura 3.59: Total warpage per la mostrina con le punte raccordate.

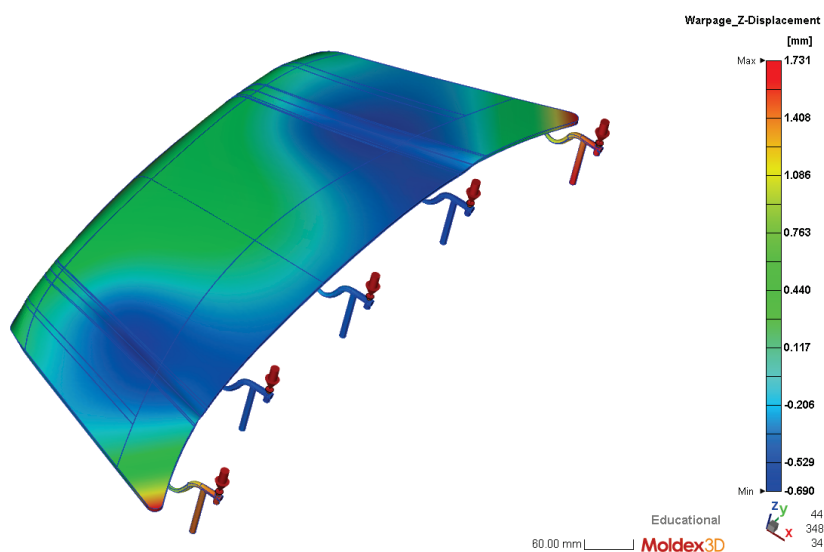


Figura 3.60: Z warpage per la mostrina con le punte raccordate.

Osserviamo che già così, la quota parte di mostrina deformata per più dell'1% è solo del 4% circa dell'estensione totale, la porzione invece di mostrina deformata in un range compreso tra l'1 e l'1.5% è **minore** del 2%. (figura 3.61)

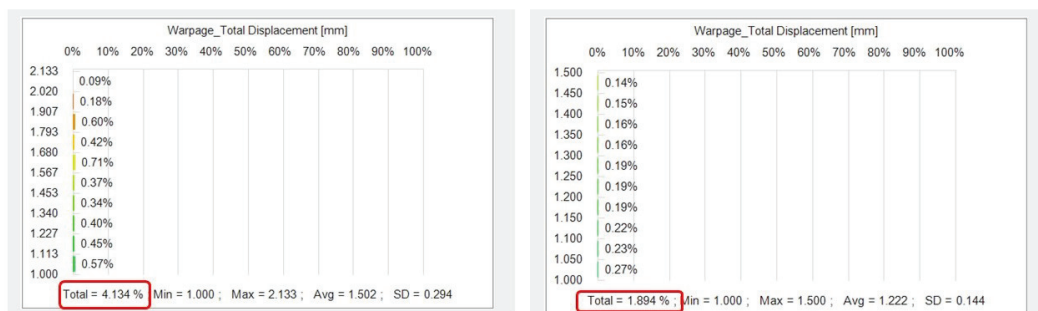


Figura 3.61: Quotaparte deformazione mostrina entro i range contrassegnati.

Nonostante i risultati significativi, a fronte di un cambiamento all'apparenza così piccolo, è doveroso fare alcune osservazioni.

Una proposta della modifica di stile, soprattutto quando si ha a che fare con clienti di questo livello, probabilmente **non è mai accettabile**.

Questo comporterebbe il ristudio delle zone circostanti di scocca della vettura per ottenere degli accoppiamenti esteticamente conformi, che possano garantire determinati standard in termini di **gap** fra le superfici (cioè due superfici adiacenti non devono essere distanziate da una fuga troppo ampia) e di **step** (le superfici devono essere allineate, non devono essere presenti gradini o passaggi bruschi fra una superficie e l'altra).

Esistono diverse tecniche che permettono di evitare simili circostanze.

3.5.4 Adattamento preventivo cavità stampo

In quest'ultimo paragrafo, verrà discussa una soluzione molto interessante, piuttosto efficace per risolvere il problema della deformazione delle punte.

Tale tecnica viene solitamente adottata dagli stampisti, ed è uno dei principali driver che guida la progettazione degli stampi, secondo lo specifico caso.

L'idea di base è molto semplice: dal momento che sappiamo che la zona critica della mostrina, in termini di picco di deformazione, è quella delle punte, cerchiamo di "viziare" lo stampo al fine di recuperare quella quota ed ottenere nominalmente il valore teorico atteso.

In termini pratici, occorre disegnare e poi realizzare lo stampo in maniera tale che la cavità risulti avere le punte abbassate di quel tanto che verrà poi recuperato con la deformazione, una volta terminato il ciclo di stampaggio.

Teoricamente, in questo modo, rispetto al profilo nominale della mostrina, il nostro risultato sarà molto coerente.

Per il pezzo in oggetto, sono partito da una delle simulazioni più buone in termini di deformazione, a questo punto, ho eseguito una simulazione identica alla precedente, ma importando il file CAD della mostrina, nel quale è stata eseguita la modifica, abbassando quindi le punte di 2 mm.

Una volta terminato il calcolo, ho creato un file di assieme in CATIA V5, nel quale ho sovrapposto la mostrina **non modificata** al modello deformato esportato dalla simulazione.

Confrontando le due parti, otteniamo i seguenti risultati (figura 3.62):

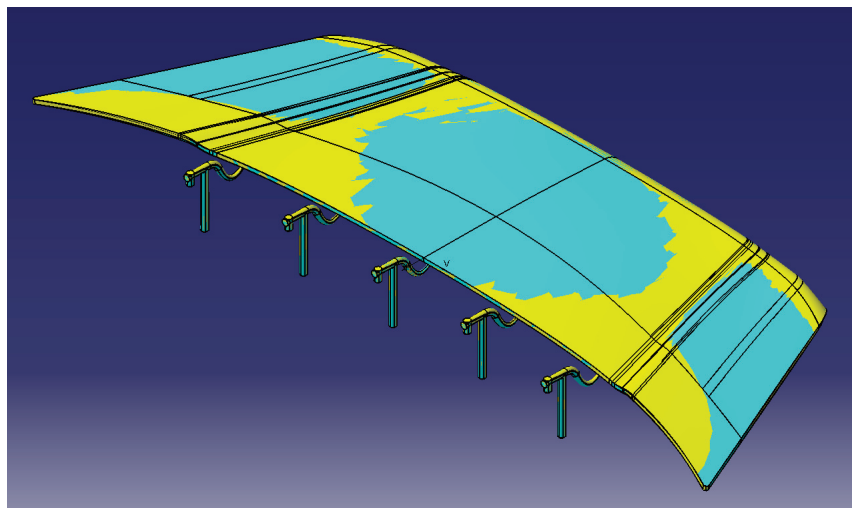


Figura 3.62: Confronto tramite sovrapposizione della mostrina deformata (in azzurro), rispetto alla mostrina nominale (in giallo).

L'espedito adottato, risolve **completamente** la criticità delle punte, come possiamo notare dalle figure 3.63 e 3.64, il delta fra il profilo nominale e quello deformato, rientra entro il $+1\text{ mm}$.

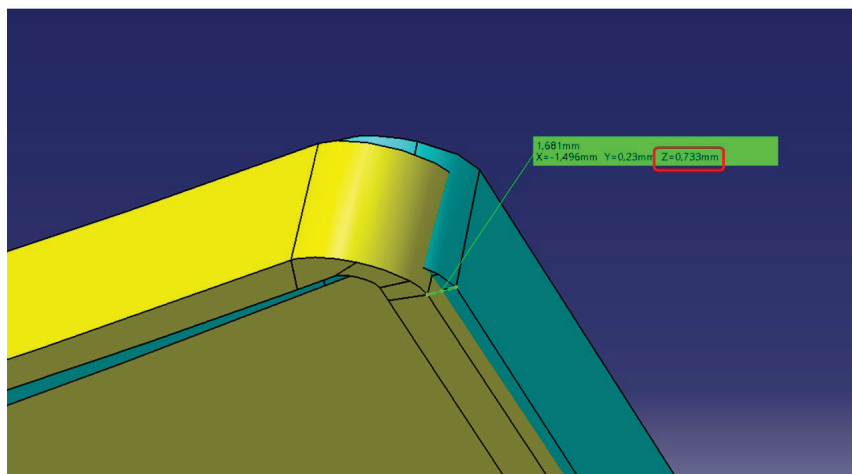


Figura 3.63: Scostamento punta destra mostrina deformata (in azzurro) rispetto alla posizione nominale (in giallo).

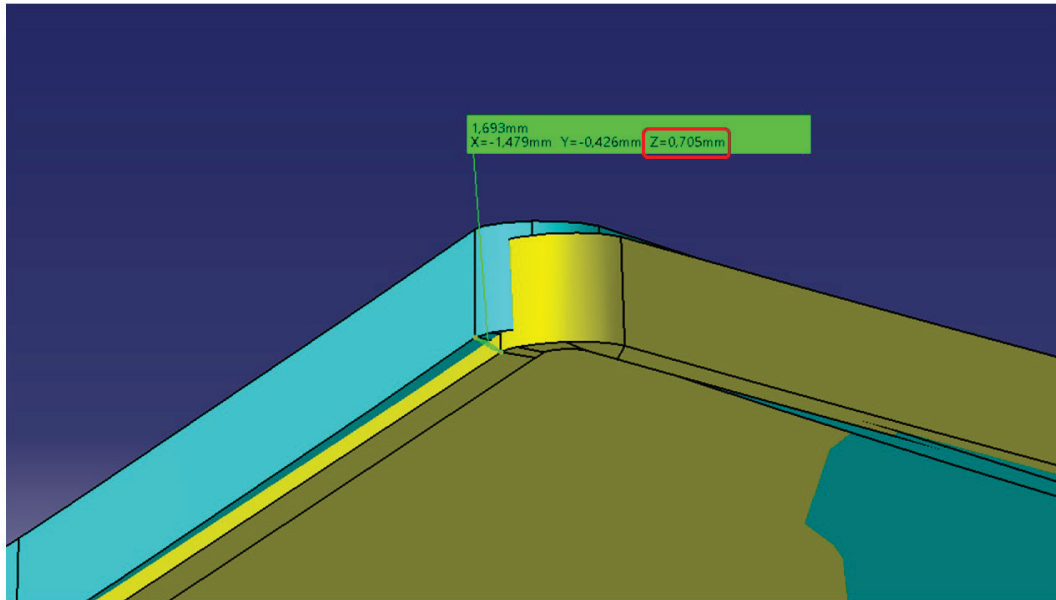


Figura 3.64: Scostamento punta sinistra mostrina deformata (in azzurro) rispetto alla posizione nominale (in giallo)

Siccome nel resto della mostrina non avevamo alcun problema di deformazioni eccessive, possiamo ritenere di aver soddisfatto il target principale brillantemente. Parlando degli altri requisiti, la finitura superficiale adatta è garantita dal processo di stampaggio ad iniezione e dalle proprietà eccezionali del PC+PET selezionato. Per quanto riguarda il ritiro lungo le due direzioni del flusso e normale ad esso, interrogando il file di log della simulazione, otteniamo i seguenti valori:

- Part Shrinkage Ratio X = 0.28%
- Part Shrinkage Ratio Y = 0.01%

Anche in questo caso, i dati sono coerenti con il technical datasheet del materiale, il quale riportava uno 0.5-0.6% in entrambe le direzioni.

Sempre dal file di log, inoltre, si legge che la massa della mostrina stampata è di **938.138 g**.

Volendo fare un controllo incrociato con i dati a nostra disposizione, cioè il volume del pezzo calcolato da CATIA V5 e la densità del materiale da datasheet:

- il volume della cavità è di $6.739 \times 10^{-4} m^3$
- la densità del PC+PET è di $1340 Kg/m^3$
- la massa risultante è: $(1340 * 6.739 \times 10^{-4}) = 9.03 \times 10^{-1} Kg = \mathbf{903 g}$

Tenendo conto che Moldex 3D considera anche le materozze nel computo della massa totale, alle quali è stato assegnato l'attributo di parte, i due risultati sono del tutto compatibili (siamo inoltre al di sotto del chilogrammo).

Si concludono i casi simulativi dicendo che, la tecnica di "viziatura" dello stampo, può essere implementata in svariati modi.

L'ideale sarebbe poter realizzare uno **stampo prototipale**, al fine di valutare la corretta geometria da adottare per il processo definitivo.

Molte volte però ciò non è possibile, sia per una questione di tempistiche strette che per una ragione di natura economica, già di per sé uno stampo è molto costoso, uno prototipale lo è molto di più.

Un'altra possibilità, consiste nel progettare lo stampo secondo una **logica modulare**, cioè composto da una serie di tasselli intercambiabili in base alle specifiche necessità, fissabili attraverso inserti filettati.

In ogni caso, l'adattamento dello stampo alla deformazione è una tecnica molto utilizzata e che presenta molti vantaggi:

- 1) Non comporta l'aumento dei costi variabili di produzione (cioè quei costi associati al singolo manufatto).
- 2) Non richiede la necessità di modificare la geometria della mostrina, non pregiudicando così il progetto iniziale.
- 3) Esistono software dedicati capaci di ottimizzare la forma dello stampo in relazione alla parte da stampare.

Non mancano, di certo, alcuni svantaggi:

- 1) Realizzare uno stampo così complesso non è sempre possibile nella pratica.
- 2) Lo stampo può risultare molto costoso.
- 3) In corrispondenza delle zone in cui lo stampo si scompone, è possibile che si formino dei segni visibili sul pezzo finale. Per evitare tale circostanza occorre prevedere dei cicli di carteggiatura in quelle zone oltre che a monte una progettazione consapevole, la quale contempi l'adozione di tolleranze strette.

Infine, citiamo altre due tecniche spesso utilizzate nella pratica al fine di correggere la deformazione di un pezzo stampato.

Fra queste vi sono l'utilizzo delle **dime di conformatura**. Esse consistono in dei pressori che vengono applicati in alcune zone specifiche del pezzo, appena estratto dallo stampo, applicando una forza e lasciandolo raffreddare. In questa maniera, si induce la parte a rimanere in geometria. Un'altra buona soluzione, è quella dell'applicazione di un **fissaggio** in corrispondenza delle punte sulla mostrina, in maniera opportuna, bloccando il pezzo in una data direzione (ad esempio in z, come nel caso di nostro interesse).

Capitolo 4

Conclusione e sviluppi futuri

In conclusione dell'elaborato, si fornisce un recap generale del lavoro svolto.

Sono partito da delle analisi preliminari, a singolo punto di iniezione diretta, con un setup del processo ancora provvisorio, al fine di valutare quale dei materiali, fra i due emersi dalla prima selezione, fosse adatto a continuare la campagna simulativa. Successivamente si sono esplorati diversi layout di sistemi di iniezione (prima a tre, poi a cinque punti), al fine di comprendere meglio le sfaccettature del processo reale di stampaggio della mostrina. Mentre la configurazione a tre punti di iniezione si è rivelata piuttosto inefficace, quella a cinque punti è risultata degna di approfondimento sotto differenti punti di vista. In primis è stata svolta un'ottimizzazione completa ed esaustiva del processo, dopodichè, constatato il mancato raggiungimento del principale target previsto, si è optato per diverse soluzioni che hanno interessato la geometria del componente. Nello specifico, la prima soluzione ha riguardato il potenziamento locale delle zone soggette a maggior deformazione della mostrina, la seconda la modifica dello stile del pezzo in tali zone, la terza l'adozione di un accorgimento detto "viziatura" dello stampo, al fine di indurre una specifica deformazione nella mostrina. L'unica soluzione che soddisfa appieno i target imposti è l'ultima citata, in quanto la deformazione è stata efficacemente contenuta. Le altre strade hanno prodotto dei buoni risultati, ma non pienamente soddisfacenti.

Tenendo conto di alcune limitazioni, come ad esempio il fatto di una mesh **poco raffinata** a causa di importanti limitazioni in termini di capacità di calcolo, la limitata conoscenza del software di simulazione, oltre che di una conoscenza basilare della tematica dei materiali, vi sono dei buoni margini di miglioramento. Nello specifico, con risorse adeguate, è possibile impostare un calcolo **DOE (*Design of Experiment*)** ben strutturato, tenendo conto dei control factors da poter variare e dei quality factors da impostare come target. Grazie ad un approccio fattoriale come quello di Taguchi, con 5-6 control factors, si può impostare un calcolo che possa dare esiti soddisfacenti. Bisogna inoltre tener conto del fatto che la geometria della mostrina sottoposta a simulazione, essendo stata ricreata a partire dall'originale, non sarebbe mai potuta esserle perfettamente fedele. Infine, lo studio di un adeguato **sistema di raffreddamento** avrebbe potuto produrre esiti molto diversi nelle simulazioni. Nonostante non sia stato implementato effettivamente in Moldex 3D, è stata realizzata una bozza preliminare di un possibile schema a 6 serpentine (tre per ognuna delle due superfici della mostrina), poste a circa 20 mm di distanza dall'impronta del pezzo. (figura 4.1)

Questo layout, consente di effettuare dapprima un'indagine preliminare settando la temperatura del liquido refrigerante, in tutti i canali, al medesimo valore, successivamente, per attuare un controllo più raffinato, è possibile differenziare opportunamente i contributi in base alle necessità.

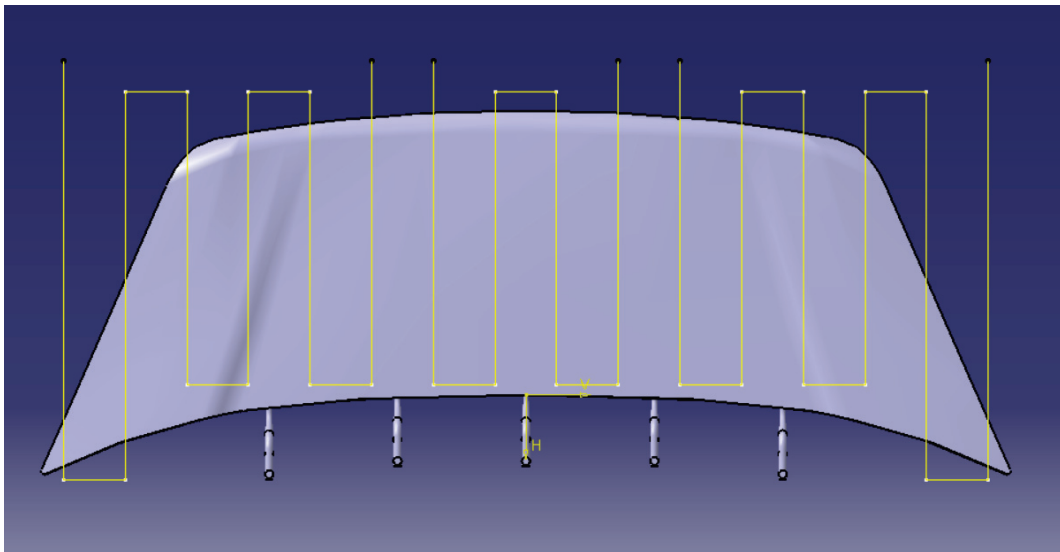


Figura 4.1: In giallo il layout di un possibile sistema di raffreddamento.

Bibliografia e sitografia

- [1] <https://www.continental-pneumatici.it/about-us/stories/sustainable-materials-in-cars/>;
- [2] <https://www.protolabs.com/it-it/risorse/white-papers/materiali-alternativi-per-lo-stampaggio-a-iniezione-in-plastica/>;
- [3] <https://eccoclimate.org/it/la-plastica-in-italia-vizio-o-virtu-2/>;
- [4] <https://www.greenplanner.it/2025/03/18/futuro-auto-sostenibile-materiali-alimentazione/>;
- [5] <http://it.bmcmould.com/news/automotive-exterior-enhanced-trend-in-plastic-28159934.html>;
- [6] <https://www.rapiddirect.com/it/blog/types-of-automotive-plastics/>;
- [7] <https://www.nationalgeographic.it/trasformare-i-rifiuti-di-plastica-in-energia-e-una-buona-idea>;
- [8] <https://www.formulapassion.it/motorsport/formula-1/f1-team/formula-1-mclaren-esplora-nuove-frontiere-materiali-seidl-lando-norris-carlos-sainz>;
- [9] <https://www.porschecitylife.it/citylife/i-vantaggi-del-lino/>;
- [10] Dispense del corso di Design Methods, prof F. Leali; Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università Degli Studi di Modena e Reggio Emilia;
- [11] Dispense del corso di Materiali per il Veicolo, prof P. Veronesi, Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università Degli Studi di Modena e Reggio Emilia;
- [12] Callister's materials science and engineering, Callister Jr, William D and Rethwisch, David G, 2020;
- [13] Dispense del corso di Scocca e finizioni in ambito automotive, prof A. Baldini, Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università Degli Studi di Modena e Reggio Emilia;
- [14] Dal Sasso DS-Group, Stampi e Stampaggio plastica; Canale tecnologico industriale;
- [15] <https://www.rutlandplastics.co.uk/plastics-moulding-methods/moulding-machine/>;
- [16] <https://www.zdcpu.com/knowledge-hub/2-plate-mold-vs-3-plate-mold/>;

- [17] Vademecum: lo stampaggio scientifico dei materiali termoplastici, Ing. Franco Adessa, 2019;
- [18] Corso polimeri: struttura, definizione e proprietà, Massimo Bertucci, CESAP srl, 2019;
- [19] Stampaggio ad iniezione: corso base, Gianbattista Bellina, CESAP srl, 2019;
- [20] Stampaggio ad iniezione: corso introduttivo, Mattia Grenzi, 2024;
- [21] <https://www.campusplastics.com/> (per datasheet materiali);
- [22] <https://www.meusburger.com/it-it/1000233076?categoryId=2428>;
- [23] <https://boyanmfg.com/injection-mold-gate-types/>;
- [24] <https://solutions.covestro.com/en/brands/makroblend>;
- [25] <https://reactioninjectionmolding.com/rim-parts-and-the-industries-that-use-them/>;
- [26] <https://blog.goldsupplier.com/it/reaction-injection-moldingrim/>.

