POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale In Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale Simulazione e ottimizzazione del processo di Heat&Cool nello stampaggio a iniezione per componenti estetici in ambito automotive



Relatore Prof. Paolo Minetola Tutor Aziendale Ing. Alessandro Agnello Candidato Matteo Presta

Anno Accademico 2019/2020

"Mia madre non aveva poi sbagliato a dir che un laureato conta più di un cantante" F.G.

Sommario

Capitol	o 1 – Introduzione	. 8
Capitol	o 2 – La plastica nell'automobile	11
2.1	Materiali plastici utilizzati nelle auto	15
2.2	Materie plastiche all'interno del veicolo	18
2.3	Materie plastiche all'esterno del veicolo	18
2.4	Materie plastiche nel gruppo propulsore	21
2.5	Materie plastiche nei sistemi di alimentazione	22
2.6	Materie plastiche in sistemi di illuminazione	23
Capitol	o 3 – Generalità sullo stampaggio ad iniezione	24
3.1	Fasi di funzionamento	26
3.2	Descrizione delle parti principali di una macchina per lo stampaggio ad iniezione	29
3.2	.1 Pressa ad iniezione	29
3.2	.2 Sistema di alimentazione	30
3.2	.3 Sistema di controllo	30
3.2	.4 Vite	30
3.2	.5 Sistema di iniezione	32
3.2	.6 Stampo	32
3.2	.7 Canali Caldi	33
3.3	Difetti nei prodotti realizzati per stampaggio a iniezione	36
3.3	.1 Warpage	36
3.3	.2 Flash	37
3.3	.3 Flow Mark	38
3.3	.4 Linee di giunzione	38
Capitol	o 4 – Heat & Cool	40
4.1	Influenza dei parametri di processo	40
4.2	Heat & Cool	43
4.3	Vantaggi del H&C	50
4.3	.1 Finitura superficiale migliore	50
4.3	.2 Linee di giunzione	53
4.4	Difetti dell'H&C	55
4.4	.1 Difetto di deformazione	55
4.4	.2 Difetto segni di risucchio	55

Capitolo 5	– La simulazione	58
5.1 E	Breve storia della simulazione per lo stampaggio ad iniezione	62
5.2 N	Aoldex3D	65
5.2.1	Equazione di governo	66
5.2.2	Benefici	69
Capitolo 6	– Analisi termica dello stampo	71
6.1 7	eoria	71
6.2 F	Fase di riscaldamento	72
6.3 F	ase di raffreddamento	74
6.4 I	influenza della temperatura dei mezzi di raffreddamento e riscaldamento	75
Capitolo 7	- Casi studio	81
7.1 N	Materiali	82
7.1.1	Polipropilene	82
7.1.2	Policarbonato	83
7.1.3	Acciaio P20	85
7.2 F	Progettazione Plancia CIM	86
7.2.1	Scelta punti di iniezione	86
7.2.2	Parametri di processo	88
7.2.3	Canali di iniezione	89
7.2.4	Canali di raffreddamento	90
7.3 F	Risultati della CIM per la plancia	92
7.3.1	Linee di saldatura	92
7.3.2	Riempimento	95
7.3.3	Mantenimento	96
7.3.4	Raffreddamento	97
7.4 A	Applicazione dell'Heat & Cool sulla plancia	99
7.5 F	Progettazione Cover CIM 1	.07
7.5.1	Scelta punti di iniezione 1	.07
7.5.2	Parametri di processo 1	.09
7.5.3	Canali di iniezione 1	10
7.5.4	Canali di raffreddamento 1	.10
7.6 F	Risultati della CIM per la cover 1	.12
7.6.1	Linee di saldatura 1	.12
7.6.2	Riempimento 1	.12

7.6.3 Mantenimento		
7.6.4 Raffreddamento		
7.7 Applicazione H&C sulla cover		
Capitolo 8 - Conclusioni		
Bibliografia		
ndice delle figure		
ndice delle tabelle		

Capitolo 1 – Introduzione

Nel campo dell'industria manifatturiera la ricerca si è rivolta, in particolare, verso materiali in grado di soddisfare i requisiti di economicità e praticità di produzione. Una delle famiglie di materiali che soddisfa questi requisiti sono le plastiche. Con plastica si intende una vasta gamma di solidi organici semisintetici o sintetici, che vengono trasformati o modellati in numerosi prodotti essenziali per la nostra vita, e in tutti i settori della produzione: elettronica di consumo, articoli per la casa, giocattoli, imballaggio, cura personale, componenti automobilistici, solo per citarne alcuni tra i più diffusi. A causa del basso costo, facilità di produzione, abbondanza di materie prime, la plastica ha sostituito nella maggior parte dei loro usi molti materiali convenzionali tra cui metallo, vetro, legno e carta. Tuttavia, man mano che le applicazioni della plastica diventano più diversificate, aumenta anche la complessità delle tecniche di lavorazione. Ciò determina la costante necessità, per i fornitori di materiali, di ottimizzare continuamente la loro formulazione, al fine di resistere alle condizioni di lavorazione e soddisfare le proprietà richieste dai prodotti finali.

L'industria automobilistica attualmente non è solo sotto la pressione del *time-to-market*, ma deve anche affrontare sfide di progettazione sempre più complesse, tra cui il risparmio di carburante e il risparmio di materiali.

Poiché sempre più materie plastiche sono scelte come alternativa ad esempio ai metalli, l'ottimizzazione dei processi di stampaggio a iniezione delle materie plastiche è essenziale affinché le case automobilistiche rimangano competitive nel settore.

Tema di questa tesi è l'analisi della recente introduzione nel processo dello stampaggio ad iniezione per materie plastiche della tecnica dell'*Heat & Cool*.

Questa tecnica prevede che la cavità dello stampo venga rapidamente riscaldata a una temperatura elevata prima dell'iniezione di plastica fusa per ottenere così un riempimento migliore. Successivamente la cavità viene raffreddata per consentire la solidificazione del materiale plastico al suo interno.

Con lo scopo di conoscere meglio la tecnologia di stampaggio ad iniezione e in particolare dell'*H&C*, così da poter approcciare nel migliore dei modi le osservazioni sperimentali, le analisi sono state precedute da un periodo di ricerca sul tema.

L'obiettivo della tesi è stato quello di analizzare e valutare vantaggi e svantaggi di questo tipo di processo produttivo, ed effettuare uno studio di fattibilità mediante la simulazione su alcuni componenti estetici in ambito *automotive* e infine progettare come ottimizzare tale processo.



Il lavoro di tesi è stato svolto presso il Centro Ricerche FIAT, nella la sede principale di Orbassano (To).

Il CRF è stato fondato nel 1978 ed è diventato il punto di riferimento per le attività di ricerca di FCA (Fiat Chrysler Automobiles). In particolare la missione del Centro ha tre obiettivi principali:

- Sviluppare motopropulsori, sistemi veicolo, materiali, metodologie e processi innovativi per migliorare la competitività dei prodotti di FCA;
- Rappresentare FCA negli ambiti della ricerca collaborativa a livello europeo e nazionale, partecipando a progetti di ricerca precompetitiva e promuovendo lo sviluppo di una rete di contatti e partenariati a livello internazionale;
- Supportare FCA nella valorizzazione del proprio capitale intangibile.

Il CRF focalizza la propria ricerca su tre aree:

- la **sostenibilità ambientale**, concentrando le proprie attenzioni su progetti finalizzati all'aumento dell'efficienza energetica e alla riduzione dell'impatto ambientale;
- la sostenibilità sociale;
- la **competitività economicamente sostenibile**, ricercando possibili soluzioni di ottimizzazione delle prestazioni e della funzionalità del veicolo riducendone i costi.

Il progetto di tesi è stato svolto nel reparto "Innovation & Research: Process Technologies". In questa divisione ci si interessa in particolare di tutte le possibili innovazioni per il ramo *Manufacturing* nel settore *automotive*: ricerca di materiali e tecnologie di processo per l'alleggerimento; miglioramento delle prestazioni e della qualità; riduzione dell'impatto ambientale durante il ciclo di vita del veicolo; sviluppo e convalida iniziale di tecnologie, dispositivi e metodi di produzione per aumentare la competitività; sostenibilità del prodotto negli stabilimenti in sinergia con la metodologia di World Class Manufacturing.

Gli studi e le analisi sono stati effettuati mediante un software dedicato alla simulazione dello stampaggio a iniezione e tutte le sue possibili alternative come ad esempio il *Gas-Assisted injection molding*, il sovrastampaggio o appunto *l'Heat & Cooling*. Il software in questione si chiama "Moldex 3D". Al fine di un corretto utilizzo del software il CRF ha messo a disposizione un corso di *training* per acquisire le capacità per impostare correttamente le simulazioni. Il corso è stato tenuto da un responsabile tecnico dell'azienda sviluppatrice del software.

Capitolo 2 – La plastica nell'automobile

Le esigenze della moderna industria automobilistica sono sempre molto elevate. Gli automobilisti vogliono auto ad alte prestazioni, ma allo stesso tempo cercano affidabilità, sicurezza, comfort, efficienza per i consumi, stile, prezzi competitivi e, sempre più, rassicurazione circa l'impatto ambientale. La plastica è una famiglia di materiali che sta affrontando la sfida per cercare di adempiere a tali richieste potenzialmente contrastanti. "Plastica" è un termine generico utilizzato principalmente dagli utenti finali di questi materiali. In termini tecnici, la nomenclatura scientifica che più comunemente definisce le materie plastiche è polimeri, composti da lunghe catene di molecole unite da legami covalenti. Con la loro combinazione unica di proprietà, i polimeri sono fondamentali per fornire innovazione tecnologica tenendo conto dell'efficienza in termini di costi e sostenibilità.



Figura 1- Valori tipici della Capacità di assorbimento di alcuni materiali (Herman 2002) [1]

Le materie plastiche offrono numerosi vantaggi in termini di caratteristiche prestazionali se utilizzate singolarmente, come miscele di polimeri differenti e come materiali rinforzati con diverse tipologie di fibre. Ad esempio, le materie plastiche sono resistenti, leggere, hanno una grande capacità di assorbire gli urti e possono essere rese trasparenti, traslucide o opache. Nella Figura 1 è possibile osservare un confronto della capacità di assorbimento di alcune famiglie di materiali.

Allo stesso modo, le materie plastiche possono essere morbide, flessibili o dure e possono essere modellate in quasi ogni forma, dimensione o colore. Le materie plastiche possono fornire resistenza al calore, alle sostanze chimiche e alla corrosione, a seconda di come sono formulate. Inoltre, i materiali plastici sono eccellenti isolanti termici ed elettrici ed è possibile creare miscele al fine di ottenere conducibilità termica ed elettrica in una certa misura. Nella maggior parte dei casi, le materie plastiche sono convenienti e offrono ai produttori di automobili la libertà di incorporare sicurezza, stile e comfort nei progetti dei veicoli.

Nell'ultimo decennio sono stati compiuti progressi significativi nelle capacità di recupero e riciclaggio delle materie plastiche per autoveicoli, ma resta ancora molto da fare. Pertanto, ci sono molte buone ragioni per cui gli ingegneri automobilistici ritengono che la plastica sia un materiale attraente e vantaggioso da utilizzare nella progettazione dei veicoli. Con il manifestarsi delle preoccupazioni in merito alla sicurezza e alla leggerezza del peso, la plastica continuerà a svolgere un ruolo chiave nel settore automobilistico.

La domanda di materie plastiche è quindi data dal fatto che si tratta di materiali forti ma leggeri, versatili e flessibili, che quindi consentono innovazione tecnologica e libertà progettuale. L'ingegnere automobilistico richiede un materiale che possa, dunque, adattarsi a un'estetica sofisticata, che consenta un'adeguata sicurezza, comfort, efficienza nei consumi, che sia compatibile alle richieste ingegneristiche ed elettroniche in modo economico.

Non è da tralasciare il fatto che la plastica fornisca maggiore sicurezza e protezione, caratteristiche indispensabili per guidatori e passeggeri. Negli ultimi anni vi è, inoltre, una crescente necessità di studiare nuove opportunità per la riduzione del peso dei veicoli al fine di aumentare il risparmio di carburante. Tuttavia, questo obiettivo dovrebbe essere raggiunto senza sacrificare gli attuali livelli di sicurezza dei mezzi. Materie plastiche innovative e materiali compositi rinforzati con fibre offrono un mezzo per alleggerire le strutture dei veicoli. Precedenti studi hanno dimostrato che le strutture composite deformano in modo differente da quello dei componenti strutturali realizzati con materiali convenzionali come acciaio e alluminio. I complessi meccanismi di frattura rendono difficile modellare analiticamente e numericamente il comportamento al collasso di strutture composite rinforzate con fibre. Questi aspetti hanno limitato l'applicazione di materiali compositi per la produzione di massa nell' industria automobilistica.

Dunque, oltre che per l'aiuto che apportano al design automobilistico e alle prestazioni, i produttori di veicoli scelgono sempre più questi materiali per i loro benefici ambientali e per il contributo allo sviluppo sostenibile. La plastica ha un ruolo importante da svolgere nello sviluppo dell'auto sostenibile di domani e plasmare il futuro successo dell'industria automobilistica. Oltre a contribuire a ridurre al minimo le emissioni che incidono sui cambiamenti climatici, si ottiene anche una maggiore possibilità di recupero.

L'obiettivo principale dei moderni progetti di ricerca è identificare e valutare i vantaggi delle applicazioni di materiali plastici e compositi, più leggeri dei materiali tradizionali e quindi più efficienti, a parità di sicurezza, in termini di consumo di carburante.

L'innovazione tecnologica da parte dell'industria delle materie plastiche è una caratteristica chiave nello sviluppo. Oggi vengono fornite soluzioni multi-componente su misura per molte nuove esigenze, sostituendo nel processo materiali più tradizionali e più pesanti.

È essenziale un maggiore uso della plastica per produrre auto con una maggiore efficienza energetica. Innovazione tecnologica significa strutture più leggere, più sottili ma più forti. Le parti in plastica vengono utilizzate per svolgere una gamma crescente di ruoli nell'auto moderna. Nonostante il loro uso diffuso, le risorse naturali necessarie per la produzione della plastica automobilistica rappresenta solo 0,3 % del consumo globale di petrolio. Allo stesso tempo, il risparmio di peso raggiunto attraverso l'uso della plastica è significativo, circa 100 kg di plastica in un'auto moderna sostituiscono da 200 a 300 kg di materiali tradizionali. A parità di altri fattori, queste modifiche hanno ridotto il consumo di carburante per le auto mediamente di 750 litri ogni 150000 km. Calcoli aggiuntivi suggeriscono che ciò riduce il consumo di petrolio di 12 milioni di tonnellate e di CO₂ di 30 milioni di tonnellate all'anno in Europa occidentale. [2]

Usando la plastica, i produttori sono stati in grado di ridurre tempi e costi del montaggio del veicolo. Paraurti, parafanghi e cruscotti ora possono essere modellati come parti singole. In passato, questi elementi erano realizzati con materiali tradizionali che richiedevano la produzione di molti parti e un assemblaggio multicomponente.

La versatilità delle materie plastiche consente soluzioni avanzate soprattutto per le forme senza compromettere sicurezza, comfort o stabilità di un'auto. Queste qualità rendono i materiali polimerici molto attraenti per i designer. La loro resistenza e la loro durata hanno giocato un ruolo importante anche sulla durata media di un'auto che ha permesso di superare i 12 anni, ad esempio fornendo migliore protezione contro la corrosione. [3]

Attualmente, i veicoli mediamente montano circa 150 kg di componenti in materiali plastici e compositi a matrice polimerica contro 1163 kg di ferro e acciaio, dunque circa il 10-15% del peso totale della vettura. Negli anni questa percentuale è aumentata molto ed è destinata ad aumentare ulteriormente. Nella Figura 2 è riportato un grafico che evidenzia la quantità di materiali polimerici utilizzati mediamente nella realizzazione di un autoveicolo con il passare del tempo.

Massa materiali polimerici (kg)



Figura 2 - Variazione della massa di materiali polimerici all'interno dell'autovettura con il passare del tempo [3]

Durante l'enorme crescita del numero di componenti in plastica negli autoveicoli i vantaggi nell'utilizzare tali soluzioni sono cambiati. I costi di montaggio sono sostenuti dalla capacità della plastica di essere modellata in componenti di geometrie molto complesse, sostituendo spesso diverse parti realizzate in altri materiali e offrendo accessori integrali che si sommano a un assemblaggio più semplice. Molti tipi di polimeri sono utilizzati in più di mille parti diverse di tutte le forme e dimensioni. Mediante uno sguardo veloce all'interno di qualsiasi modello dell'auto si vede che la plastica è ora utilizzata per componenti esterne ed interne come paraurti, porte, finestrini, fari, alloggiamenti per gli specchietti, coperchi del bagagliaio, cofani e griglie. Sebbene in un singolo modello di auto possano essere utilizzati fino a 13 polimeri diversi, sono solo tre i tipi di plastica che costituiscono circa il 66% della plastica totale utilizzata in un'automobile: polipropilene (32%), poliuretano (17%) e PVC (16%). [4]

2.1 Materiali plastici utilizzati nelle auto



Figura 3 – Classificazione dei principali polimeri [1]

La Figura 3 rappresenta una macro suddivisione dei principali polimeri, di seguito vengono riportati quelli che è possibile ritrovare principalmente all'interno di una autovettura.

Il polipropilene (o polipropene, abbreviato in PP) è un polimero termoplastico che può mostrare diversa tatticità. Il prodotto più interessante dal punto di vista commerciale è quello isotattico: è un polimero semicristallino caratterizzato da un elevato carico di rottura, una bassa densità, una buona resistenza termica e all'abrasione. Si ottiene per polimerizzazione del gas propilene, derivante dai processi di Cracking del petrolio, con meccanismo simile a quello dell'etilene. È un polimero estremamente resistente agli agenti chimici e quasi completamente impermeabile acqua. Il nero ha la migliore resistenza ai raggi UV ed è sempre più utilizzato nel settore edile. Le applicazioni del PP per gli interni dell'automobile sono cruscotto, porta cruscotti, rivestimento delle colonne, tasche della porta, pannelli porta, console e sedie. Per la parte esterna il PP viene impiegato per paraurti, spoiler per paraurti, spoiler tetto/tronco, binari laterali, pannelli oscillanti, pannelli della carrozzeria fodere passaruota. Il PP rappresenta mediamente circa 64 kg di contenuto del veicolo e si prevede che questa cifra crescerà fino a 84 kg, in quanto il PP rinforzato dovrebbe sostituire i metalli in alcuni componenti sotto il cofano e per alcune parti esterne (come i portelloni posteriori). [5]

I policarbonati (PC) sono un gruppo di polimeri termoplastici contenenti gruppi di carbonati nelle loro strutture chimiche. I policarbonati utilizzati in ingegneria sono materiali resistenti e in alcuni casi possono anche essere trasparenti. Sono facilmente lavorabili, vengono modellati

e termoformati. Il policarbonato ha una buona resistenza agli agenti atmosferici e ai raggi UV, con livelli di trasparenza quasi buono come acrilico. Il policarbonato è un materiale più forte e resiste più a lungo a temperature estreme rispetto a molti altri tipi di polimeri. Il policarbonato è altamente trasparente alla luce, risultando migliore a molti tipi di vetro. Le applicazioni sono: schermi di sicurezza, pannelli di aeromobili, paraurti, lenti per occhiali, lenti per proiettori. [6] Con il termine Poliuretano (PU) si indica una vasta famiglia di polimeri in cui la catena polimerica è costituita di legami uretanici -NH-(CO)-O-. I polimeri uretanici sono largamente impiegati nella produzione di una grande varietà di materiali. Esistono due tipi di schiume realizzate con il PU: le schiume flessibili molto comuni e le schiume rigide che invece vengono utilizzate in applicazioni di nicchia. Gli applicativi principali di questi materiali sfruttano la capacità di isolamento acustico, la capacità di assorbimento di vibrazioni e la durezza. Il contenuto medio di PU del veicolo è di circa 23 kg. Il PU sotto forma di schiume occupa circa il 55% del totale mentre il PU rigido occupa il 45%. I materiali poliuretanici sono ampiamente utilizzati nelle sedute in schiuma flessibile ad alta resilienza, pannelli rigidi isolanti in schiuma, guarnizioni e guarnizioni in schiuma microcellulare, ruote elastomeriche resistenti e pneumatici, boccole per sospensioni automobilistiche, composti di impregnazione elettrici, parti in plastica dura (ad es come per gli strumenti elettronici). [7]

Il Polivinilcloruro (PVC) si ottiene facendo polimerizzare in emulsione o in sospensione il gas cloruro di vinile, ha una buona resistenza all'attacco chimico e ai solventi. Il contenuto di vinile gli conferisce una buona resistenza alla trazione e una discreta flessibilità. Può essere colorato o trasparente. Le applicazioni sono: pannelli automobilistici, guaine di cavi elettrici, tubi, porte, indumenti impermeabili, serbatoi chimici. [8]

L'Acrilonitrile Butadiene Stirene (ABS) è una resina stirolica termoplastica ottenuta per polimerizzazione di gomma butadienica con acrilonitrile e stirene o copolimero acrilonitrile/stirene. È un materiale termoplastico durevole, resistente agli agenti atmosferici e ad alcuni prodotti chimici, si utilizza principalmente per i componenti formati sotto vuoto. È una plastica rigida con caratteristiche simili alla gomma che gli conferiscono una buona resistenza agli urti. Trova applicazione soprattutto negli interni, quali griglie interne, rifiniture, intestazioni console centrale, specchio esterno/interno. È però in calo l'uso di questo tipo di materiale a favore del polipropilene. Il contenuto medio di ABS pertanto dovrebbe scendere da 10,5 kg a 9,5 kg. L'ABS rimarrà la plastica di prima scelta in applicazioni in cui è prevista la verniciatura o è necessaria l'adesione ad altre superfici. [9]

La Poliammide (PA) può essere sintetizzata tramite polimerizzazione per condensazione di un acido dicarbossilico e di una diammina oppure tramite polimerizzazione per apertura d'anello di un lattame. La poliammide è conosciuta anche come nylon 6.6 o nylon 6. È un polimero con un'alta resistenza all'abrasione, basso attrito, buona resistenza chimica ed elevato allungamento. La Poliammide (PA) si trova in alcuni componenti sotto il cofano come ingranaggi, boccole, camme, cuscinetti. Viene anche impiegata per maniglie delle portiere, parti di montaggio

dell'airbag, quadro dei comandi ma anche per le leve finalizzate all'utilizzo di sedili e pedali. Il contenuto medio di PA si aggira intorno agli 11kg e si prevede che tenderà a crescere sostituendo polimeri come il Poliparafenilensolfuro (PPS) per applicazioni sotto il cofano, ad esempio per i condotti dell'aria. All'esterno le applicazioni in cui è utilizzata la PA sono quelle in cui il componente non ha bisogno di soddisfare la Classe A (alta qualità estetica) dei requisiti di superficie. [10]

Il polistirene (PS) o più comunemente Polistirolo, è un polimero idrocarburico aromatico sintetico a base di monomeri di stirene. È molto popolare, facile da fabbricare, ma ha una scarsa resistenza ai raggi UV. Applicazione: alloggiamenti per attrezzature, pulsanti, accessori per auto, basi di visualizzazione. [11]

Il polietilene (PE) ha una buona resistenza chimica. Vengono utilizzati due tipi, a bassa densità polietilene (LDPE) e polietilene ad alta densità (HDPE) possono essere fabbricati in una gamma 30 di densità. Applicazione: vetro rinforzato per carrozzeria, isolamento elettrico, imballaggio, dove la forza e l'estetica sono importanti. [12]

Il poliossimetilene (POM) noto anche come poliacetale o poliformaldeide, ha una grande rigidità e una resa eccellente, stabile anche alle basse temperature. Prodotto chimico molto buono e resistenza al carburante. Applicazione: profili interni ed esterni, sistemi di alimentazione, piccoli ingranaggi. [13]

Il polimetilmetacrilato (PMMA) è una materia plastica formata da polimeri del metacrilato di metile, estere metilico dell'acido metacrilico. Nel linguaggio comune il termine metacrilato si riferisce generalmente a questi polimeri. L'acrilico è più trasparente del vetro, ha una resistenza alla trazione ragionevole (infrangibile sono disponibili gradi) e buona resistenza ai raggi UV e agli agenti atmosferici, alta qualità ottica e superficie finire con una vasta gamma di colori. Applicazione: finestre, display, schermi. [14]

Il Polibutilentereftalato (PBT) ha una buona resistenza chimica e proprietà elettriche, duro, resistente all'assorbimento d'acqua, ottima resistenza a sollecitazioni dinamiche, termiche e stabilità dimensionale. Facile da fabbricare: cristallizzazione rapida, raffreddamento rapido. Applicazione: alloggiamenti e cornici fendinebbia, parti anteriori del tetto apribile, alloggiamenti dei sistemi di bloccaggio, maniglie delle porte, paraurti, componenti del carburatore. [15]

Il polietilene tereftalato (PET) è la resina polimerica termoplastica più comune della famiglia dei poliesteri e viene utilizzata nelle fibre per abbigliamento, contenitori per liquidi e alimenti, termoformatura per la produzione e in combinazione con fibra di vetro per resine ingegneristiche. Il polietilene tereftalato ha condizioni simili a PBT, buona stabilità termica, buona proprietà elettriche, bassissimo assorbimento d'acqua, eccellenti proprietà superficiali. Applicazione: braccio del tergicristallo e relativi alloggiamenti, supporto del proiettore, coperchio del motore, alloggiamenti dei connettori. [16]

L'Acrilonitrile Stirene Acrilato (ASA), chiamato anche Acrilico Stirene Acrilonitrile, è un materiale termoplastico amorfo sviluppato come alternativa all'acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), ma con una migliore resistenza agli agenti atmosferici ed è ampiamente usato nell'industria automobilistica. L'ASA ha una grande tenacità e rigidità, una buona sostanza chimica resistenza e stabilità termica, eccezionale resistenza agli agenti atmosferici, all'invecchiamento e all'ingiallimento, e lucido. Applicazione: alloggiamenti, profili, parti interne e applicazioni esterne. [17] [18]

2.2 Materie plastiche all'interno del veicolo

I componenti interni rappresentano la quota maggiore di plastica nei veicoli. Tradizionalmente i pannelli degli strumenti erano costituiti da diversi componenti metallici che dovevano essere verniciati e tenuti insieme da una struttura portante in acciaio. La plastica inizialmente è entrata nel mercato dei pannelli degli strumenti per migliorarne l'aspetto. Con l'avanzare del tempo, i materiali polimerici si stanno espandendo ulteriormente in questo segmento di applicazione, facilitando progetti complessi e permettendo una riduzione di costi e peso. La Figura 4 mostra alcune delle tipiche applicazioni interne per le quali la plastica è prevalentemente il materiale di scelta. [19]



Figura 4 - Componenti interni in materiali polimerici

2.3 Materie plastiche all'esterno del veicolo

La plastica si è fatta strada anche verso l'esterno dei veicoli, in particolare nelle applicazioni come paraurti prima, e poi come protezioni sottoscocca e maniglie delle porte esterne. Tuttavia, le condizioni ambientali e le sollecitazioni ne hanno limitato l'uso solo ad alcune parti esterne dei veicoli. Nuove applicazioni automobilistiche per materie plastiche continuano a essere trovate e il loro futuro dipenderà dall'innovazione di design.

Negli anni '20 i paraurti anteriori e posteriori divennero di serie su tutte le auto. Quelle che erano semplici travi metalliche in quel momento si sono evolute in complessi componenti ingegneristici diventati parte integrante della protezione dei veicoli in caso di collisioni a bassa

velocità. La plastica è entrata in queste applicazioni negli anni '80 grazie a una serie di vantaggi come il loro aspetto esteticamente gradevole, la resistenza alla corrosione, la leggerezza del peso e la facilità di progettazione. [20]

La plastica ha trovato grande possibilità di applicazione anche perché i paraurti (Figura 5) non devono essere inclusi nella catena di montaggio con i metalli e quindi possono essere verniciati separatamente e assemblati successivamente sul veicolo. [21]



Figura 5 – Paraurti anteriore e posteriore in materiali polimerici

Le maniglie delle porte esterne (Figura 6) sono un'altra applicazione che si è rivolta alla plastica per bilanciare la resistenza chimica e le proprietà meccaniche. Molti materiali termoplastici riempiti come miscele di PC e PBT, PET e Nylon sono stati provati o utilizzati in questa applicazione, il nylon è risultato il più adeguato.



Figura 6 – Maniglia di una porta esterna in materiale polimerico

Anche gli alloggiamenti degli specchietti esterni (Figura 7) utilizzano molte soluzioni termoplastiche come ABS, PC / ABS, miscele di polistirene (PS), nylon, miscele di PP e ABS resistente alle intemperie. Ancora una volta, il nylon domina chiaramente questa applicazione in termini di volume. Molte altre parti esterne continuano ad adottare soluzioni termoplastiche.



Figura 7 – Alloggiamento specchietto esterno (Fiat Ducato)

Elementi strutturali, come ad esempio l'interasse sono ancora considerati una sfida per la plastica. Nessuna grande azienda ha ancora introdotto ruote realizzate interamente in plastica. L'uso della plastica ha invece grande riscontro nei segmenti decorativi della ruota. Le borchie, o coppe ruota (Figura 8), sono parti decorative fissate alla ruota in acciaio che copre i dadi. Generalmente l'ABS verniciato è usato più spesso nella realizzazione di questi componenti. L'emulsione cromata ABS viene utilizzata anche in questa applicazione per i clienti che preferiscono l'aspetto del cromo. La cromatura è un trattamento di finitura che utilizza la deposizione elettrolitica del cromo.



Figura 8 - Coppa ruota in materiale polimerico (FIAT 500)

2.4 Materie plastiche nel gruppo propulsore

Il tasso iniziale di utilizzo nel mercato delle materie plastiche sotto il cofano dei veicoli era stato rallentato dal fatto che gli ingegneri ritenevano che solo i materiali metallici potessero soddisfare le condizioni impegnative riscontrate vicino ai motori. Dopo un lungo periodo di progetti in cui sono state utilizzate materie plastiche ottimizzate, le aziende automobilistiche hanno finalmente iniziato a progettare parti sfruttando le proprietà dei materiali polimerici. I collettori sotto il cofano (Figura 9), le griglie del radiatore e i tappi terminali quindi rappresentano un segmento di applicazione relativamente nuovo per la plastica.



Figura 9 – Un esempio di collettore di aspirazione dell'aria in materiale polimerico

Il nylon e il PBT sono i polimeri predominanti in queste applicazioni. Il PBT viene utilizzato principalmente sotto il cofano, vicino ai connettori elettrici ed elettronici del motore, per spine di alimentazione e componenti elettrici, interruttori e controlli, custodie di interruttori di circuito e vari alloggiamenti. PBT e resine modificate offrono resistenza chimica, eccezionale rigidità dielettrica, proprietà elettriche, prestazioni a bassa temperatura fino a -40 ° C, resistenza e modulo a temperature elevate, buona processabilità e, ultimo ma non meno importante, resistenza alla fiamma. I condotti e le console di riscaldamento e condizionamento dell'aria per l'abitacolo attualmente vengono realizzate mediante resine plastiche. I collettori di aspirazione dell'aria sono tipicamente fabbricati con resine di ABS, nonché resine di polipropilene (PP). La forza trainante per i collettori di aspirazione in plastica non è solo la riduzione del peso e dei costi, ma anche il miglioramento del flusso d'aria, la resistenza alla corrosione, la flessibilità dell'imballaggio e la riduzione del rumore. [22]

Il nylon è da subito diventato un materiale di scelta abbastanza comune per i collettori di aspirazione dell'aria. L'uso della plastica ha permesso un flusso d'aria ottimizzato, cosa che non era ottenibile con il metallo fuso, come, ad esempio, pareti interne eccezionalmente lisce. Gli

stilisti apprezzano anche la finitura opaca uniforme e il tema coordinato della plastica sotto il cofano. Sebbene inizialmente le materie plastiche fossero considerate inadatte agli ambienti estremi, tipicamente vicino ai motori dei veicoli, ora appaiono in più aree sotto il cofano come sostituti dei metalli. Molti materiali plastici sono in grado di soddisfare i requisiti di resistenza, alte temperature e persino resistenza alla fiamma necessari per le applicazioni di propulsione, offrendo allo stesso tempo i vantaggi di peso ridotto, basso costo, flusso d'aria migliorato e resistenza alla corrosione.

2.5 Materie plastiche nei sistemi di alimentazione

Nei sistemi di alimentazione per veicoli, il serbatoio del carburante (Figura 10) è il più grande componente in plastica. Per i carburanti apolari, il polietilene ad alta densità (HDPE) è il materiale più comune e conveniente. L'elevato peso molecolare dell'HDPE con una architettura ramificata a catena lunga per un'elevata resistenza allo scioglimento ha permesso alle aziende di introdurre sul mercato serbatoi di HDPE realizzati mediante stampaggio per soffiaggio già da molto tempo.





Nel tempo, le normative riguardanti le emissioni sono diventate più stringenti, di conseguenza i serbatoi multistrato hanno iniziato a essere fabbricati con giunti e design migliorati. Questi cambiamenti hanno portato anche a cambiamenti nell'architettura molecolare della resina HDPE di base. Alcuni produttori hanno risposto alla sfida con soluzioni a base di nylon. Le applicazioni tipiche delle materie plastiche a base di nylon includono anche elementi di fissaggio per componenti interni ed esterni, connettori, dispositivi di fissaggio e tappi terminali del radiatore. Il materiale è una scelta eccellente per questa applicazione a causa della sua intrinseca tenacità e resistenza agli effetti combinati di temperatura e vapore di benzina.

2.6 Materie plastiche in sistemi di illuminazione

Le lenti dei fari di vetro (Figura 11) sono state sostituite quasi completamente con plastica in policarbonato trasparente (PC). Queste plastiche per PC sono progettate per resistere a livelli elevati di calore e frantumazione e possono essere modellate in quasi tutte le forme. Un'altra scelta per questo mercato è l'uso della plastica acrilica. Chiaramente, il PC ha la combinazione più avanzata di proprietà come resistenza agli urti, duttilità, chiarezza, stabilità dimensionale, resistenza intrinseca all'accensione, resistenza alle alte temperature, rigidità e resistenza al creep. I punti deboli del PC risiedono nella sua scarsa resistenza ai solventi (sostanze organiche), resistenza all'abrasione, resistenza ai raggi ultravioletti (UV) (limitata), sensibilità alla tacca e stabilità idrolitica (limitata). Il policarbonato offre una buona resistenza ai raggi UV ma mostra ingiallimento. La stabilità ai raggi ultravioletti può essere estesa con assorbitori, rivestimenti e strati di tappi. Le tipiche applicazioni di illuminazione esterna per autoveicoli si basano sulla protezione UV tramite rivestimenti proprietari. La resistenza ai solventi è un problema per alcune applicazioni automobilistiche che altrimenti utilizzerebbero il PC. Ad esempio, l'uso del PC e delle sue miscele in parti che possono venire a contatto con la benzina è sconsigliato a causa del potenziale stress cracking che potrebbe provocare la parte dopo l'esposizione alla benzina. [23]



Figura 11 – Faro fanale proiettore anteriore Fiat 500

Capitolo 3 – Generalità sullo stampaggio ad iniezione

"In sostanza, lo stampaggio ad iniezione è un processo in cui viene riscaldato un materiale termoplastico solido fino a raggiungere uno stato di fluidità (liquido), viene quindi trasferito sottopressione (iniettato) in uno spazio chiuso (cavità dello stampo), e poi raffreddato nello stampo fino a che ritorna nuovamente allo stato solido, assumendo la forma della cavità dello stampo. " [24]

Lo stampaggio ad iniezione è un processo di fabbricazione ormai molto consolidato, atto a produrre parti mediante iniezione di materiale fuso all'interno di uno stampo. Utilizza un pistone a vite per forzare il materiale plastico fuso all'interno della cavità dello stampo fino al totale riempimento, la cavità ha la forma del negativo del componente finale. Una volta solidificato quindi il materiale assume la forma desiderata. [25]

I campi di applicazione di questa tecnologia sono molteplici, in Figura 12 è possibile valutare qualitativamente quale siano i segmenti industriali che maggiormente la impiegano.



Figura 12 - Campi di applicazione industriale dello stampaggio ad iniezione [26]

I materiali che possono essere utilizzati sono innumerevoli, comunemente per questa tecnologia vengono usati i polimeri termoplastici e i termoindurenti. Lo stampaggio ad iniezione dei materiali termoplastici è la tecnologia più diffusa nella trasformazione delle materie plastiche (approssimativamente il 30 % dei termoplastici viene stampato a iniezione). Si producono, in modo discontinuo, pezzi di forma e dimensioni diverse e dal peso variabile da pochi grammi a svariati chili. [27]

Ci sono sette fasi dallo sviluppo del prodotto alla produzione in serie per lo stampaggio a iniezione:



Figura 13 – Fasi di sviluppo di un prodotto realizzato mediante stampaggio ad iniezione [28]

- Fase d'inizio (Kickoff): vengono prese le prime decisioni mediante disegni 3D / 2D e vengono scelte le tecniche, le macchine, i materiali e i metodi di elaborazione da utilizzare.
- Progettazione (Design): implica la finalizzazione della configurazione generale dello stampo e l'analisi della simulazione dello stampaggio, la lavorazione dell'acciaio, del CNC (controllo numerico computerizzato) e l'approvazione del disegno di progettazione. Dunque c'è la necessità di realizzare i disegni dei prodotti in base alle sue funzioni, al suo aspetto, al materiale e ai processi e consegnarli alle fabbriche per gli stampi. I tecnici hanno il compito di realizzare la progettazione dello stampo, il disegno, la lavorazione, il sistema di chiusura e altre procedure una volta ricevuti i disegni del prodotto, dei campioni o delle specifiche pertinenti relative a materiale, peso, colore, ecc. Gli stampi fabbricati saranno consegnati alle fabbriche di stampaggio per test di stampo, modifiche e rilevamento;
- Fabbricazione (Manufacture): l'acciaio grezzo viene lavorato per realizzare lo stampo secondo i disegni di progettazione.
- T1 (prima prova): lo stampo viene realizzato, assemblato e caricato su una macchina per lo stampaggio per la prima prova per verificare che lo stampo sia realizzato secondo i disegni di progettazione e soddisfi i requisiti. Gli ingegneri dello stampaggio eseguono i test per ottenere le condizioni di stampaggio più fluide durante la fase di test dello stampo e fornire commenti di feedback sullo stampo, eventuali modifiche relative ai punti critici per lo stampaggio. Il test dello stampo sarà eseguito ripetutamente dopo la modifica dello stampo fino alla raggiunta della qualità del prodotto richiesta. Le fasi di follow-up non devono essere avviate fino al raggiungimento della qualità della sperimentazione. Il rendimento di produzione viene migliorato attraverso la produzione su piccola scala e, una volta ottenuta la certificazione di qualità, si passa alla di produzione di massa.

- Approvazione o benestare
- Spedizione
- Servizio

[26] [28]

La progettazione del processo fisico è una delle fasi più delicate e considera l'analisi del riempimento, delle deformazioni, delle sollecitazioni. La progettazione e la realizzazione dello stampo sono passaggi effettuati da uno stampista (o produttore di attrezzature). I materiali utilizzati per lo stampo solitamente sono acciaio o alluminio, lavorati con precisione per formare le caratteristiche della parte desiderata. Lo stampaggio a iniezione è ampiamente utilizzato per la produzione di una vasta gamma di componenti per i settori più disparati, da piccoli componenti agli interi pannelli delle automobili.

Le parti da realizzare devono essere progettate con molta cura al fine di facilitare il processo di stampaggio; il materiale, la forma e le caratteristiche desiderate della parte, così come il materiale dello stampo e le proprietà della macchina di stampaggio devono essere presi tutti in considerazione. La versatilità dello stampaggio ad iniezione è facilitata da questa vasta gamma di considerazioni e possibilità progettuali.

3.1 Fasi di funzionamento

La materia prima, chiamata resina, è di solito sotto forma di granuli. Questi granuli sono conservati in una tramoggia di alimentazione, ovvero un contenitore forato sul fondo che rifornisce la pressa. I granuli polimerici devono essere fusi per consentire l'iniezione nella cavità dello stampo, cioè un vuoto che ha il negativo della forma finale del prodotto. La macchina è quindi dotata di un'unità di plastificazione per fondere la resina. L'unità di plastificazione è una vite, che ruotando, scioglie i granuli. Gran parte del calore è generato dall'attrito nella rotazione della vite ma solitamente vengono aggiunte delle bande di riscaldamento per integrare la generazione di calore.

La vite ruota spingendo in avanti il materiale solido all'interno di un cilindro mantenuto, almeno nella zona vicina allo stampo, ad una temperatura di iniezione, maggiore di quella di fusione o di transizione vetrosa del polimero.

Il polimero fuso si accumula nella camera di iniezione e, quando il volume di materiale accumulato è diventato sufficiente per il riempimento dello stampo, viene spinto attraverso un ugello nella cavità dello stampo da una traslazione in avanti dalla vite stessa (fase di iniezione). Il polimero fuso raggiunge la cavità (che ha la forma del negativo del manufatto desiderato) attraverso opportuni canali, dei quali spesso il primo (detto materozza) è a geometria troncoconica. Prima di entrare nella cavità, il fuso percorre un breve tratto di sezione notevolmente minore detto "gate" o attacco di iniezione. Riempita la cavità, inizia la fase di mantenimento durante la quale il polimero viene tenuto sotto elevata pressione al fine di forzare all'interno della cavità altro materiale per compensare l'aumento di densità, e di conseguenza il ritiro del manufatto (Figura 14). [29]



Figura 14 – Andamento della pressione nel tempo

Per garantire la chiusura dello stampo ed evitare le bave, ovvero delle fuoriuscite laterali della massa polimerica, viene applicata una forza di serraggio. La pressione applicata viene generata da una pressa, generalmente con una guida idraulica o un sistema elettrico. Al termine del raffreddamento avviene l'apertura dello stampo e il manufatto viene sganciato dallo stampo per mezzo di estrattori automatici.

Se il prodotto fabbricato ha una geometria complessa, sono presenti sottosquadri e per la sua sformatura, è possibile sfruttare elementi mobili.

L'acciaio e l'alluminio sono i materiali più comunemente utilizzati nella realizzazione degli stampi. L'alluminio è meno costoso e ha proprietà termiche migliori ma la durata della vita utile è minore il che si traduce in un numero inferiore di prodotti realizzati rispetto all'acciaio. Lo stampo viene riscaldato quando viene iniettata la plastica fusa, successivamente, per abbattere la temperatura del fuso e favorire la solidificazione solitamente si utilizzano dei canali di raffreddamento. Questi sono realizzati forando opportunamente il blocco dello stampo. Il fluido di raffreddamento maggiormente usato è l'acqua. Un raffreddamento inappropriato comporta dei difetti sul componente che, in alcuni casi, lo rendono inutilizzabile. Molte ricerche si sono infatti soffermate su questa fase dello stampaggio a iniezione. Recentemente, per migliorare

l'efficienza del sistema di raffreddamento, sono stati studiati diversi aspetti: il design dei canali, i fluidi di raffreddamento, i materiali dello stampo, la tecnologia per la realizzazione dello stampo. [30]

I seguenti passaggi generali descrivono un ciclo di iniezione di base:

- Chiusura degli stampi (fase di movimentazione);
- La vite punzonante spinge il fuso nella cavità (riempimento, pressurizzazione);
- La vite punzonante applica una pressione (mantenimento) al fuso in raffreddamento nella cavità finché il gate si sigilla;
- La vite si ritrae e contemporaneamente gira, in modo da preparare del nuovo materiale per la stampata successiva (plastificazione). Il fuso nello stampo continua a raffreddarsi;
- Apertura degli stampi (fase di movimentazione; contemporanea alla prima fase).

Il raffreddamento è un processo importante nello stampaggio ad iniezione. Può rappresentare oltre il 60% del tempo totale del ciclo di stampaggio, influenzando direttamente il ritiro e la deformazione della parte in plastica. Pertanto, la progettazione di un buon sistema di raffreddamento è molto importante in quanto influenza notevolmente il tempo di ciclo, la qualità e indirettamente il prezzo del prodotto. Di seguito, nella Figura 15, è riportato il ciclo di stampaggio ad iniezione classico.



Figura 15 – Ciclo stampaggio ad iniezione classico [28]

3.2 Descrizione delle parti principali di una macchina per lo stampaggio ad iniezione

3.2.1 Pressa ad iniezione

La Figura 16 mostra una macchina per lo stampaggio ad iniezione di base (pressa ad iniezione), che è adatta alla fabbricazione di prodotti di forme diverse da termoplastici o materie plastiche termoindurenti. Esistono solo due funzioni di base, riscaldamento della plastica allo stato fuso e applicazione dell'alta pressione per iniettare la plastica fusa per riempire completamente la cavità dello stampo. [31]

Ottimizzazione, automazione e razionalizzazione delle apparecchiature ausiliarie per la lavorazione della plastica giocano un ruolo nel determinare la qualità del prodotto e la fattibilità economica del processo.



Figura 16 – Schema di una pressa ad iniezione [32]

La macchina è composta da due sottogruppi: l'unità di iniezione e l'unità di serraggio (Figura 16). Il compito dell'unità d'iniezione è accogliere il materiale in granuli, portarlo a fusione e renderlo omogeneo (eventualmente mescolandolo anche con additivi). Successivamente deve iniettare il materiale fuso in cavità e pressurizzarlo durante la fase di mantenimento per effettuare la compensazione dei ritiri.

L'unità di serraggio invece deve consentire l'apertura dello stampo per l'estrazione del manufatto. Inoltre deve fornire la forzane per garantire la perfetta chiusura dello stampo in fase di riempimento.

La geometria dei cinematismi permette movimentazioni veloci durante la corsa e lenti all'approssimarsi dei finecorsa.

3.2.2 Sistema di alimentazione

La tramoggia installata su una pressa ad iniezione di solito ha la forma di una trottola o cono, è capace di contenere materiale per il funzionamento della pressa ad iniezione fino a due ore, per i sistemi più grandi. I sistemi di alimentazioni di plastica in molti macchinari hanno misuratori per l'alimentazione di materiale di quantità o peso costanti, alcuni sono dotati di dispositivi di riscaldamento o asciugatura. Per operazioni mista di aggiunta di polvere di tintura o agenti schiumogeni, il design della vite dovrebbe includere una corretta unità di miscelazione. Se si utilizza solo una normale vite, la pressione sul retro aumenta, è dunque necessario un controllo adeguato poiché la plastica tende a fluire nello stampo sotto grande pressione sul retro. Nel caso di aggiunta di polvere colorante, la temperatura di iniezione viene aumentata.

3.2.3 Sistema di controllo

Uno dei maggiori problemi incontrati nello sviluppo comune e nel controllo di qualità dei prodotti stampati durante il processo di produzione è il controllo inefficace della qualità dovuto all'utilizzo di un metodo indiretto unidirezionale per il funzionamento di macchine a iniezione e dispositivi di controllo del sistema. Quando il sistema di stampo è installato nella pressa ad iniezione, di solito la tabella di prova dello stampo viene convertita nelle condizioni operative per il processo di fabbricazione e immessa nella macchina tramite il pannello operatore.

A seconda del tipo di materia prima, ogni parametro è adeguatamente controllato per lo stampaggio a iniezione, come la temperatura di iniezione, la velocità di iniezione, la pressione di iniezione, la forza di serraggio dello stampo, ecc. La temperatura di riscaldamento di un cilindro di materiale è generalmente divisa in 3 o 5 livelli. Le specifiche principali delle unità di controllo della potenza sono la potenza del motore, il volume del serbatoio dell'olio, la velocità di risposta e varie funzioni di controllo del programma. Teoricamente, maggiore è il volume pieno del serbatoio dell'olio, minore è il volume dell'aria da trasportare insieme all'olio di estrazione della pompa. Inoltre, una maggiore quantità di olio migliora anche la dissipazione del calore e la sedimentazione delle impurità, ma comporta anche un costo maggiore per l'acquisto di petrolio.

3.2.4 Vite

La vite punzonante (Figura 17), l'elemento fondamentale della pressa ad iniezione, ha il compito essenziale di fluidificare il polimero e iniettarlo all'interno dello stampo. Gli ultimi sviluppi tecnologici, permettono di effettuare controlli sempre più accurati in tutte le fasi della plastificazione, fino ad arrivare a programmare profili di velocità e pressione con precisione massima nelle macchine totalmente elettriche.



Figura 17 – Esempio di una vite di alimentazione [26]

Dunque, la vite è il sistema che la macchina utilizza per plastificare il materiale, ne esistono diverse tipologie: a vite singola, doppia, controrotante, viti dotate di elementi di taglio, miscelazione e taglio. Il materiale viene fuso grazie all'azione della temperatura impostata all'interno del cilindro ma anche grazie all'azione rotatoria della vite, la cui velocità aggiunge alla carica un ulteriore apporto termico dovuto all'attrito con i filetti della vite stessa. In passato, per l'iniezione del fuso veniva utilizzato un pistone. Il vantaggio del metodo a vite rispetto a quello a pistone è che l'avanzamento della vite consente una fusione più omogenea poiché vi è un continuo mescolarsi della sostanza da iniettare. Mediamente le velocità massima di rotazione delle viti di plastificazione sono di 320 giri/minuto. Un compromesso ottimale è quello di portare la vite ad una velocità di rotazione pari al 60% del suo valore massimo. Impostare elevate velocità rotative può portare al degrado del polimero per effetto di un errato profilo di temperature sul cilindro non considerando l'elevato ΔT dovuto all'attrito vite-polimero. Lungo la direzione del flusso del materiale la vite si suddivide in tre zone:

- Zona di alimentazione;
- Zona di compressione;
- Zona di dosaggio.

Il diametro esterno della vite rimane costante in tutta la sua lunghezza, il diametro di nocciolo interno, invece, varia. La prima zona, quella di alimentazione, ha un valore del diametro minimo al fine di accogliere un elevato volume di materiale in granuli, la parte del dosaggio ha un diametro massimo a causa della riduzione del volume di polimero che arriva trasformato in fuso. Nella parte intermedia si ha un aumento lineare per raccordare le due zone esterne. Un

parametro di grande importanza è il rapporto L/D, ovvero il rapporto tra la lunghezza della vite di plastificazione e il suo diametro, da questo valore dipende la scelta della pressa su cui avviare il processo. Più è elevato tale valore, maggiore sarà il percorso che il materiale deve effettuare dall'ingresso nel cilindro fino all'ugello di iniezione. Un valore standard di una vite ad uso normale è di 20/21 diametri della vite. La lunghezza della vite viene misurata a partire dal secondo filetto dal lato dalla bocca di alimentazione fino all'ultimo filetto prima del puntale. La zona di alimentazione della vite generalmente ha una lunghezza che varia tra il 50 e il 75% della lunghezza totale. La sua lunghezza dipende essenzialmente dalla quantità di calore da apportare alla plastica che arriva della tramoggia. In alcuni casi può avvenire un preriscaldamento. La sezione di compressione, o transizione, è dove si verifica l'ammorbidimento della plastica e dove successivamente si trasforma in una fuso continuo. Tale zona può occupare dal 5 al 50% della lunghezza della vite. Questa sezione deve essere sufficientemente lunga da assicurarsi che la plastica sia completamente fusa. Nella sezione di dosaggio, la plastica viene miscelata per garantire composizione e temperatura finali. La lunghezza della zona dipende dalla sensibilità al calore della plastica e dalla necessità di eventuali miscelazioni aggiuntive. Per alcune materie plastiche sensibili al calore è tollerabile un'azione di dosaggio minima. Solitamente, per le materie più comuni occupa mediamente il 20-25% della lunghezza della vite. La parte conclusiva della vite è formata da tre elementi: puntale, ralla e valvola di anti-ritorno. [33]

3.2.5 Sistema di iniezione

Il sistema di iniezione è principalmente responsabile del riempimento e del mantenimento. Per la fase di riempimento, la vite si sposta in avanti per iniettare la plastica fusa nella cavità dello stampo chiusa attraverso l'ugello per completare il processo di riempimento. Quando la plastica fusa entra nella cavità, l'aria viene espulsa dal perno di espulsione, dalla linea di divisione e dai fori di sfiato. La sotto-iniezione si verificherebbe se la liquidità risultasse scarsa o la pressione di iniezione fosse insufficiente. Al contrario, se la liquidità dovesse essere troppo elevata, si verificherebbe un flash sul piano di separazione della parte in plastica.

3.2.6 Stampo

La struttura di base di uno stampo (Figura 18) è generalmente divisa in tre tipi: a due piastre, a tre piastre e canale caldo. La decisione per una particolare struttura di stampo viene generalmente presa dai clienti o in base ai prodotti. Uno stampo per la plastica è costituito da sette sistemi principali: sistemi di guida, supporto, stampaggio, sistemi di colata, raffreddamento, espulsione e ventilazione. Nel caso di sottosquadri esistono diversi sistemi come ad esempio l'uso di un blocco scorrevole, in altri casi invece il meccanismo di apertura e chiusura dello stampo è sufficiente per la divisione laterale, l'estrazione del pezzo e il ripristino della posizione di chiusura.



Figura 18 – Esempio stampo

Un tempo di ciclo completo dello stampaggio ad iniezione di materie plastiche consiste in tempi di riempimento, mantenimento, raffreddamento e apertura dello stampo. Il tempo di raffreddamento ha la percentuale più elevata tra circa il 70-80%. Pertanto, la progettazione del sistema di raffreddamento è un passaggio fondamentale che influisce direttamente sulla durata del ciclo, sull'efficienza della produzione e sui costi. I canali di raffreddamento convenzionali sono lavorati nei componenti dello stampo con trapani a pistola. [34] Un sistema di raffreddamento dello stampo è tipicamente composto dai seguenti elementi: unità di controllo della temperatura, pompa, collettore di alimentazione, tubi flessibili, canali di raffreddamento nello stampo e collettore di raccolta. Di fatto lo stampo stesso può essere considerato come uno scambiatore di calore, con il calore del polimero caldo fuso portato via dal liquido di raffreddamento in circolazione.

3.2.7 Canali Caldi

Un sistema a canali caldi è un insieme di componenti riscaldati che iniettano plastica fusa nelle cavità dello stampo. Al contrario, un canale freddo è semplicemente un canale formato tra le due metà dello stampo, allo scopo di trasportare la plastica dall'ugello del macchinario per lo stampaggio ad iniezione alle cavità. Ogni volta che lo stampo si apre per espellere le parti in plastica appena formate, viene espulso anche il materiale nel canale, con conseguente spreco. Un sistema a canali caldi di solito include un collettore riscaldato e un numero di ugelli riscaldati. Il compito principale del collettore è distribuire la plastica che entra nello stampo ai vari ugelli che la misurano precisamente ai punti di iniezione nelle cavità.

I vantaggi dei canali caldi sono:

- Tempo di ciclo più breve: nessun canale che controlla il tempo di raffreddamento;
- Avvio semplificato: senza i canali da rimuovere e il ciclo automatico si verifica più velocemente e più frequentemente;
- Minori segni di dispersione e parti non riempite: a differenza di quando la plastica scorre attraverso un canale freddo e perde calore nelle piastre dello stampo;
- Flessibilità di progettazione: si può disporre il gate in molti punti della parte;
- Flusso di fusione bilanciato: canali di fusione separati si trovano in collettori riscaldati esternamente che sono isolati dalle piastre di stampo che li circondano. [35]

I canali caldi sono sistemi abbastanza complicati, devono mantenere il materiale plastico al loro interno uniformemente riscaldato, mentre il resto dello stampo ad iniezione viene raffreddato per solidificare rapidamente il prodotto. Per questo motivo vengono solitamente assemblati da componenti pre-fabbricati da aziende specializzate.

I canali caldi di solito rendono lo stampo più costoso da produrre e gestire, ma consentono risparmi riducendo gli sprechi di plastica e riducendo i tempi di ciclo. Nella Figura 19 viene riportato lo schema di configurazione di alimentazione a camera calda.



Figura 19 – Schema canali caldi [35]

3.3 Difetti nei prodotti realizzati per stampaggio a iniezione

I difetti del prodotto presentano un'altra preoccupazione quando la plastica viene trasformata nel prodotto finale attraverso i processi precedenti. La plastica prende forma gradualmente attraverso il raffreddamento durante il processo di stampaggio ad iniezione e di solito ha la forma di un prodotto quasi finito quando lascia lo stampo. Se ci sono difetti nel prodotto in plastica, è necessario analizzare e comprendere i fattori che ne sono la causa. I possibili difetti sono numerosi, vengono di seguito esaminati i più comuni e i più interessanti ai fini del progetto di tesi.

3.3.1 Warpage



Figura 20 – Tendenza alla deformazione delle parti dovuta alla differenza di temperatura, globale o localizzata, dello stampo [13]

Il Warpage è una distorsione in cui le superfici della parte stampata non seguono la forma prevista del disegno. È il tipo di difetto più comunemente riscontrato nei prodotti stampati ad iniezione. Tuttavia, anche se il prodotto non è parte di un assemblato ma un singolo prodotto, questo tipo di difetto può causare reclami e restituzione del prodotto. La plastica fusa inizia a raffreddarsi e solidificarsi quando entra nella cavità dello stampo e si ritira durante il processo di raffreddamento e solidificazione. Se il coefficiente di ritiro fosse distribuito uniformemente sul prodotto, la curvatura non verrebbe vista e ne risulterebbe un ritiro omogeneo in tutte le direzioni. Tuttavia, con l'interazione tra i fattori esterni, come ad esempio le condizioni di stampaggio, il design del raffreddamento dello stampo, il design del prodotto o le caratteristiche della plastica (catena molecolare e orientamento della fibra) è molto difficile che i prodotti finiti in plastica si ritirino uniformemente o comunque con una bassa percentuale di ritiro tale da essere ininfluente. [28]

In Figura 20 è possibile valutare qualitativamente l'effetto della disomogeneità termica dello stampo sul componente finale.
Dunque, esistono vari motivi che causano questo tipo di deformazione, inclusi fattori geometrici come la progettazione delle parti, l'effetto dell'inserto, le condizioni di processo tra cui pressione e temperatura o proprietà dei materiali come fibre e comportamento pressione-volume-temperatura (PVT). Per risolvere la deformazione, è fondamentale identificarne le cause. Normalmente un diagramma a lisca di pesce, come mostrato nella Figura 21, viene utilizzato per elencare tutte le possibili cause di deformazione, che possono quindi essere confrontate con il caso reale per restringere la fonte.



Figura 21 - Diagramma dei parametri che influenzano ili problema di deformazione [13]

3.3.2 Flash



Figura 22 – Esempio di flash [13]

Il flash viene generato in quanto esiste un gap sul piano di divisone attraverso il quale la plastica fusa si inserisce all'esterno della cavità dello stampo, come mostrato nella Figura 22. Le principali cause di tale formazione sono le seguenti:

- La forza di serraggio dello stampo è troppo piccola: una forza di spinta viene applicata allo stampo dalla plastica fusa durante il processo di stampaggio ad iniezione, specialmente se l'area centrale della cavità dello stampo è soggetta a un'eccessiva alta pressione che separerà lo stampo nel piano di divisione;
- Distanza tra gli stampi: il lato mobile e il lato stazionario dello stampo non entrano completamente in contatto a causa di un piano di divisione difettoso e non parallelo tra

ciascun lato oppure per la presenza di impurità sul piano di divisione che ne genera spazi vuoti sulla divisione;

- Condizioni di stampaggio inadeguate: selezione errata della pressa ad iniezione, temperatura troppo alta delle materie plastiche fuse e pressione di iniezione eccessiva sono tutte cause della generazione di flash;
- Sistema di sfiato improprio: verranno generati dei flash se lo sfiato è insufficiente o la scanalatura di sfiato è troppo profonda;
- La fluidità del materiale è troppo elevata: il materiale troppo fluido ha una maggiore facilità a inserirsi tra le piastre dello stampo.

3.3.3 Segni di flusso

I segni di flusso vengono generati principalmente se la temperatura della plastica fusa non viene distribuita uniformemente o la plastica fusa presenta un'eccessiva viscosità. Una temperatura eccessivamente bassa provoca attrito e spinta tra la plastica e la cavità dello stampo e provoca l'indurimento della plastica troppo rapidamente lasciando il segno di flusso, come mostrato nella Figura 23.



Figura 23 – Esempio linee di flusso [36]

3.3.4 Linee di giunzione

Le linee di giunzione possono determinare nel componente difettosità funzionali e/o estetiche. Le linee di giunzione costituiscono, infatti, dei punti deboli del componente e, tranne nel caso in cui i due flussi si incontrano a 45°, tali linee sono chiaramente visibili perché caratterizzate da variazioni nel colore e nella lucentezza superficiale, in Figura 24 se ne vede un esempio. Le linee di giunzione si formano dove si incontrano due o più flussi di materiale fuso; si generano quando sul pezzo sono presenti degli elementi che separano il flusso (ad esempio dei fori) o più punti di iniezione.



Figura 24 – Esempi di linee di saldatura [37]



Figura 25 – Schema di valutazione delle linee di giunzione [fonti FCA]

- $0 < \theta < 135^{\circ}$ giunzione di scarsa qualità (weld line)
- $135^{\circ} < \theta$ migliore qualità della giunzione (meld line)

Capitolo 4 – Heat & Cool

4.1 Influenza dei parametri di processo

La qualità delle parti realizzate mediante stampaggio ad iniezione a iniezione può essere influenzata da molti fattori: il design, il materiale o le condizioni di lavorazione. Ritiro, peso e finitura superficiale sono alcuni degli importanti fattori che determinano la qualità delle parti realizzate mediante stampaggio a iniezione. [38]

Ad esempio la riduzione di volume dovuta al cambio di temperatura dei prodotti stampati è maggiormente influenzato dalla pressione di mantenimento e dalla temperatura di fusione, un aumento di questi parametri permette una riduzione del ritiro. Il valore della temperatura dello stampo e della temperatura del fuso sono principalmente determinati dal materiale plastico e dalla geometria della parte. La gestione di questo parametro risulta complessa in quanto la temperatura di fusione dipende dalla combinazione di due fattori: la temperatura imposta dalle fasce di riscaldamento e dall'attrito del fuso attraverso i canali. Gli effetti della velocità di iniezione e della temperatura dello stampo non hanno invece grande impatto sul ritiro. [39]

È possibile intuire dalla Figura 26 come tutti i parametri tra di loro siano collegati, la modifica di uno di questi comporta lo stravolgimento del processo produttivo. In ogni situazione ci si concentra su determinati aspetti piuttosto che su altri. Per ridurre il tempo del ciclo di stampaggio e produrre pezzi di qualità è richiesto un controllo più preciso nell'operazione di stampaggio ad iniezione. Quando il tasso di produzione è elevato si cerca di ridurre al minimo gli scarti. Inoltre, l'impiego sempre maggiore di sistemi automatizzati porta ad una ottimizzazione delle operazioni automatizzate di spostamento che muovono i prodotti direttamente dalla pressa ad iniezione alle stazioni di assemblaggio. Quindi un efficace controllo di processo è essenziale per mantenere i benefici della moderna tecnologia di processo.



Figura 26 – Schema di influenza dei fattori di input sull'output [26]

Uno studio di Nagahanumaiah [40] ha evidenziato che velocità di iniezione e temperatura del fuso hanno grande influenza sul peso del pezzo e sul ritiro. Quando la viscosità è bassa, il fuso fluisce facilmente nello stampo. L'impostazione della temperatura dell'ugello dipende dal design dello stesso, dal tipo di resina e dalla dimensione del manufatto.

La temperatura della superficie dello stampo è, quindi, uno degli aspetti critici nel processo di stampaggio ad iniezione della plastica. Impostando un'elevata temperatura superficiale dello stampo è possibile ottenere una finitura del componente migliore. Il problema è che un aumento della temperatura della superficie dello stampo comporta un aumento del tempo di raffreddamento e la possibilità, qualora il fuso resti troppo tempo a una temperatura elevata, che la plastica possa deteriorarsi. In fase di progettazione, per il processo di stampaggio ad iniezione, bisogna dunque considerare anche l'aspetto termico lavorando con un materiale polimerico sottoposto a dei cambiamenti di fase e continuamente in contatto con delle superfici metalliche. Il rapporto costo-efficacia del processo di iniezione dello dipende principalmente dal stampo tempo



Figura 27 – Correlazione tra alcuni Input e alcuni Output [26]

impiegato nel ciclo che comprende l'iniezione, il raffreddamento, il movimento della piastra mobile e l'espulsione. Inoltre, per evitare difetti nelle parti in plastica, la temperatura nello stampo deve essere omogenea. Pertanto, la progettazione di un buon sistema di raffreddamento è cruciale, essendo in grado di ridurre drasticamente il tempo del ciclo e di migliorare la qualità del pezzo e di abbassarene il prezzo. [41]

Generalmente, il calore deve essere estratto rapidamente ed uniformemente dal materiale plastico fino a quando il pezzo non raggiunga uno stato stabile, il che permette di estrarlo senza alcun rischio di deformazione. Una progettazione adeguata è necessaria per il processo ottimale di trasferimento del calore tra il materiale plastico fuso e lo stampo. Il processo di progettazione tradizionale si basa sull'esperienza e sull'intuizione, creando diversi fori rettilinei di forma diversa all'interno dello stampo e della cavità e poi costringendo un fluido di raffreddamento a far circolare e condurre via l'eccesso di calore.

La fase di raffreddamento delinea, generalmente, circa il 50% del tempo ciclo ed in alcune situazioni si arriva fino al 90%. [42]

Quindi è logico affermare che la componente termica del sistema non può essere trascurata, anche se spesso è uno degli aspetti a cui si dedica la minore attenzione a livello industriale.

Bisognerebbe prestare particolare attenzione alle problematiche termiche a partire dalla progettazione dello stampo. È facile vedere canali di raffreddamento/riscaldamento degli stampi mal dimensionati e posizionati non correttamente che determinano un raffreddamento non uniforme dello stampo o zone di accumulo di calore.

4.2 Heat & Cool

Una delle tematiche degli attuali studi su questo tipo di tecnologia è proprio un approfondimento dell'aspetto termico del processo produttivo, in particolare è stata sviluppata una tecnica che prevede di aumentare la temperatura superficiale dello stampo, al fine di migliorarne il riempimento, e cercare di mantenere un tempo di ciclo breve. Recentemente è stato quindi sviluppato e proposto un metodo chiamato Heat & Cool (H&C) ma è possibile trovarne definizioni alternative come "Rapid Isolation Cooling & Heating" (RICH) o "Rapid Heat Cycle Molding" (RHCM). Nel nuovo processo di stampaggio, la superficie della cavità dello stampo viene inizialmente riscaldata a una temperatura dello stampo elevata prima dell'iniezione di fusione, di solito superiore alla temperatura di transizione vetrosa (Tg) di un polimero amorfo o vicino al punto di fusione (Tm) di un polimero semi-cristallino, quindi mantenuta ad alta temperatura durante la fase di riempimento e successivamente raffreddato rapidamente per solidificare il fuso polimerico sagomato in cavità.

In contrasto con lo stampaggio ad iniezione tradizionale (Classic Injection Molding – CIM), nell' Heat&Cool, la temperatura dello stampo viene aumentata notevolmente, quindi, dopo la fase di riempimento, lo stampo subisce il raffreddamento con acqua fredda. Con l'aiuto del processo di riscaldamento, il fuso può facilmente riempire la cavità con un livello basso della pressione di iniezione. Inoltre, i difetti superficiali come linee di saldatura, segni del flusso e fibre galleggianti possono essere eliminate. Dunque, mediante una temperatura dello stampo più elevata le fasi di riempimento e impaccamento migliorano, lo strato congelato che risulta inevitabile nel processo tradizionale può essere completamente eliminato tramite questa tecnica con il risultato che la resistenza al flusso di fusione è ridotta, la pressione di iniezione richiesta e la forza di serraggio della pressa ad iniezione vengono diminuite e non solo. Si può anche ottenere una distribuzione uniforme della pressione di riempimento della cavità. Utilizzando un raffreddamento rapido è possibile mantenere il tempo del ciclo di stampaggio a un livello accettabile. Molte ricerche in letteratura dimostrano che il processo RICH può migliorare la replicazione delle microstrutture [43], migliorare l'aspetto superficiale [44] e ridurre l'orientamento molecolare indotto dal flusso [45] senza aumento significativo del tempo ciclo.

Esistono diversi metodi per riscaldare lo stampo ma si dividono in due gruppi, riscaldamento di superficie e riscaldamento di volume. Si possono utilizzare metodi che sfruttano l'effetto Joule mediante delle resistenze, oppure attraverso una bobina di induzione elettromagnetica. [46]

Esiste un metodo che applica il riscaldamento attraverso un sistema a infrarossi per la superficie dello stampo. Uno dei sistemi più utilizzati invece sfrutta vapore ad alta temperatura così da poter sfruttare gli stessi canali del raffreddamento. Il vantaggio del riscaldamento di superficie è l'elevata efficienza, consente dunque un'ottima riduzione del tempo ciclo. Però questo metodo necessita di uno speciale design dello stampo soprattutto se la forma del pezzo finale è complessa e sono dunque necessarie apparecchiature per il calcolo dei parametri per un prodotto di alta qualità.

Per il riscaldamento di volume, il modo più economico per raggiungere una temperatura elevata dello stampo prevede l'utilizzo di acqua calda a una temperatura massima di 90 °C o 100 °C per il riscaldamento e acqua fredda ad una temperatura tra i 20 °C e i 40 °C per il raffreddamento. Quando la temperatura dello stampo deve essere superiore a 100 °C, può essere utilizzato un sistema di alimentazione di acqua in pressione o olio caldo. [47] Il rischio però è il danneggiamento degli ingressi dei canali e a lungo termine la sicurezza potrebbe essere un problema. L'uso dell'olio è limitato a causa della scarsa efficienza dal punto di vista energetico, il coefficiente di scambio termico dell'olio non è, infatti, adeguatamente alto.

Altre ricerche hanno previsto l'uso di vapore acqueo nel riscaldamento dello stampo con una speciale configurazione dello stampo. Questo mezzo di riscaldamento ha consentito di arrivare ad un aumento adeguato della temperatura dello stampo così da aiutare il fuso a riempire facilmente la cavità e ridurre, dunque, alcuni difetti nel prodotto. Il sistema in questione prevede l'utilizzo di vapore in fase di riscaldamento e successivamente l'uso di acqua per il raffreddamento. Per migliorare l'efficienza dei fluidi tra una fase e l'altra viene soffiato un flusso d'aria all'interno del canale per rimuovere l'acqua o il vapore in eccesso. [48] [49]



Figura 28 – Confronto tra i cicli di Classic Injection Molding e Rapid Heat Cycle Molding [50]

Nella seguente ricerca è stato utilizzato come mezzo di riscaldamento proprio il vapore acqueo, verrà dunque analizzata solo questa tecnica di riscaldamento. In fase di processo, successivamente al riscaldamento dello stampo, il fuso caldo viene solidificato utilizzando acqua fredda.

L'efficienza del riscaldamento a vapore, come detto, aumenta con la pulizia dei canali dall'acqua al termine della fase di raffreddamento, prima che ricominci il ciclo di produzione. Nella Figura 28 è possibile intuire come le fasi del processo produttivo cambino utilizzando questo tipo di approccio.

In Figura 29 si può osservare l'andamento della temperatura media della superficie dello stampo durante le diverse fasi dello stampaggio.



Figura 29 – Andamento della temperatura media della cavità dello stampo nel tempo [51]

Nel dettaglio il ciclo di H&C prevede, inizialmente, l'apertura della valvola del vapore acqueo così che possa scorrere nei canali realizzati nello stampo. In una piccola prima fase un quantitativo d'aria si trova ancora all'interno del canale e va a miscelarsi con il vapore. La combinazione dello stadio di questi fluidi, però, non è stabile, il risultato è il basso coefficiente

di trasferimento del calore tra il vapore acqueo e le pareti del canale. Successivamente il flusso di vapore si stabilizza, tutta l'aria viene espulsa e solo il vapore attraversa i canali. Pertanto, il coefficiente di trasferimento di calore aumenterà molto rapidamente. L'energia trasferita dal vapore allo stampo riscalda la superficie della cavità. Quando la superficie della cavità raggiunge il livello di temperatura richiesto lo stampo si chiude completamente in preparazione al processo di riempimento. Il terzo passaggio sono le fasi di iniezione di mantenimento che possono essere più o meno lunghe a seconda del materiale e della geometria del componente. Durante queste due fasi all'interno dei canali di riscaldamento/raffreddamento in alcuni casi viene iniettata dell'aria ad alta pressione per pulire i canali dal vapore. Successivamente mediante il controllo di una valvola si passa all'iniezione del flusso d'acqua nei canali e inizia il processo di raffreddamento. Durante i primi secondi l'acqua si mescola o al vapore o all'aria e crea nuovamente un stadio instabile con basso coefficiente di scambio termico. Successivamente, dopo poco tempo, tutto il vapore fuoriesce dai canai e all'interno rimane solo il flusso d'acqua, in questa fase l'efficienza dello scambio di calore è ottimale. La quinta e ultima fase prevede il raggiungimento della temperatura che consente l'apertura dello stampo. Per preparare il nuovo ciclo i canali vengono nuovamente puliti dal fluido refrigerante mediante un getto d'aria governato dall'unità di controllo. [51]

Il processo di controllo della temperatura dello stampo necessita di un impianto per il ricircolo del vapore acqueo, di un impianto di raffreddamento ad acqua, di un sistema per la pulizia dei canali mediante aria, di un'unità per il controllo delle valvole. Tale impianto è schematizzato in Figura 30. [48]

La sorgente per la produzione di vapore è solitamente una caldaia adatta a sopportare le alte temperature che raggiunge il vapore per il processo di riscaldamento. Utilizzando una temperatura dell'acqua più bassa, circa 20 °C, è possibile ottenere un raffreddamento più rapido. È possibile così compensare l'elevata temperatura del fuso non allungando eccessivamente i tempi del ciclo. La velocità dell'acqua di raffreddamento deve essere mantenuta ad una velocità tale da ottenere un flusso di natura turbolenta all'interno dei canali di raffreddamento per avere un migliore coefficiente di scambio termico del fluido refrigerante. Questo sistema permette di risparmiare spazio poiché entrambi i fluidi, di raffreddamento e di riscaldamento, circolano all'interno dei medesimi canali. Inoltre vi è un risparmio energetico poiché i fluidi vengono recuperati.



Figura 30 – Schema dell'impianto per lo stampaggio ad iniezione con sistema H&C [51]

Nel processo tradizionale di stampaggio ad iniezione la superficie della cavità non necessita un riscaldamento particolare per la maggior parte dei polimeri. La temperatura delle cavità è dettata molto dalla temperatura di ingresso del fuso, dopo che il processo di riempimento termina il raffreddamento viene effettuato mediante acqua fredda. I canali, dunque, non vengono attraversati da altri fluidi e di conseguenza non necessitano di pulizia tra una fase e l'altra del processo produttivo. La qualità del prodotto non è elevata e la qualità della superficie spesso ha molti problemi che devono essere risolti.

Mediante l'uso di vapore acqueo caldo nello stampaggio ad iniezione, la temperatura della cavità nella fase di riempimento, dunque, viene aumentata, il che aiuta i flussi di fuso a riempire lo stampo e a migliorare l'impaccamento. Inoltre utilizzando una bassa temperatura dell'acqua per la fase di raffreddamento, il tempo di ciclo totale non risulta eccessivamente più lungo del processo di stampaggio classico.

L'efficienza di riscaldamento/raffreddamento e l'uniformità della temperatura del sistema di stampaggio dipendono principalmente dalla progettazione dello stampo dalla struttura e dal metodo di riscaldamento/raffreddamento. Poiché il mezzo di riscaldamento e il mezzo di raffreddamento potrebbero fluire negli stessi canali, la struttura generale dello stampo per l'H&C sembra simile a quella dello stampo classico. Molti dettagli, invece, nella struttura dello stampo, incluso il layout dei canali di riscaldamento / raffreddamento, i modelli di isolamento, ecc., sono diversi da quelli del CIM e dovrebbero essere ragionevolmente progettati per ridurre perdita di calore e miglioramento dell'efficienza. [52]

La Figura 32 mostra la struttura schematica di uno stampo adatto all' H&C. Gli strati isolanti tra la cavità dello stampo e le corrispondenti piastre di ritenuta vengono utilizzati proprio per ridurre al minimo dispersione del calore nelle piastre. Inoltre, il blocco cavità è fissato con alcuni piccoli blocchi di tallone attorno, quindi le intercapedini d'aria tra blocchi cavità e piastre di ritenuta possono anche ridurre la perdita di calore.

Dal momento che l'uniformità di temperatura ha un effetto significativo sulla qualità delle parti, la disposizione dei canali di riscaldamento/raffreddamento deve essere realizzata nel migliore dei modi. È necessario quindi che i canali di riscaldamento/raffreddamento siano il più possibile conformi alla geometria per ottenere un riscaldamento o un raffreddamento conforme. I canali di riscaldamento / raffreddamento vengono progettati cercando di mantenerli tutti sullo stesso piano per semplificarne la realizzazione che avviene mediante foratura del blocco, altrimenti una soluzione alternativa è la realizzazione del blocco dello stampo mediante Additive Manufacturing e dunque la creazione dei così detti "Canali conformali".

Lo sviluppo di uno stampo in grado di aumentare la temperatura da 25 ° C a 250 ° C in 2 secondi e raffreddare a 50 °C entro 10 secondi genera diverse problematiche. Al fine di ridurre gli stress termici negli strati durante il riscaldamento e il raffreddamento vengono usati materiali con basso coefficiente di dilatazione termica.

Attualmente questo tipo di tecnologia viene utilizzato per la produzione di alcune cornici per schermi TV LCD. (Figura 31)



Figura 31 – Cornici TV a schermo piatto prodotti con processo RHCM [52]



Section A-A

Figura 32 – Schema di uno stampo realizzato per un processo di H&C [52]

4.3 Vantaggi del H&C

4.3.1 Finitura superficiale migliore

La finitura superficiale di un componente realizzato mediante Heat & Cool sarà di una qualità superiore rispetto a un componente realizzato mediante un processo di iniezione classico (CIM). Inoltre le facce esterne del manufatto H&C hanno una lucentezza migliore se le superfici della cavità sono correttamente realizzate rispettando determinate tolleranze di rugosità. La brillantezza superficiale è un'impressione soggettiva creata dal flusso luminoso riflesso da una parte. Nella pratica industriale, la brillantezza di superficie è spesso espressa in relazione al riflesso di una superficie nera ideale lucidata in direzione speculare. La lucentezza è misurata con un lucentimetro, uno strumento che viene utilizzato per misurare la lucentezza speculare riflessa di una superficie. [53] La lucentezza è determinata proiettando un fascio di luce di una certa intensità e un angolo fissi su una superficie e misurando la quantità di luce riflessa ad un angolo uguale ma opposto, i risultati sono espressi in unità di lucentezza (GU). Nella Figura 33 è possibile osservare un confronto di come cambi la lucentezza di un componente realizzato mediante stampaggio tradizionale e stampaggio H&C su un componente realizzato in ABS.



Figura 33 - Confronto della lucentezza del componente realizzato con un sistema CIM e con un sistema H&C [37]

Per la misurazione della brillantezza sono disponibili diverse geometrie, ognuna delle quali dipende dal tipo di superficie da misurare. Per i materiali non metallici, come i rivestimenti e le materie plastiche, la quantità di luce riflessa aumenta con un angolo di illuminazione maggiore, poiché una parte della luce penetra nel materiale superficiale e viene assorbita o

diffusa da esso a seconda del colore. I metalli hanno una riflessione molto più elevata e sono quindi meno dipendenti dalla forma angolare. Inoltre, grazie all'elevata temperatura in fase di riempimento la plastica fusa ha un'ottima capacità di fluire all'interno dello stampo e di riempire facilmente la geometria della cavità. [54]

Il miglioramento della lucentezza è ovviamente subordinato al miglioramento della finitura superficiale. Nella Figura 34 è possibile notare il confronto tra i valori della rugosità superficiale, in varie direzioni, tra un componente realizzato mediante "Classic Injiection Molding" (CIM) e "Rapid Isolation Cooling & Heating" (RICH).



Figura 34 - Confronto della rugosità nelle varie direzione tra un componente realizzato mediante CIM e uno realizzato mediante RICH (fonti YUDO)

Il rapido riscaldamento e raffreddamento della superficie dello stampo porta ad un significativo miglioramento della brillantezza superficiale quando si riscalda lo stampo fino ad una temperatura superiore a T_g o a T_m . Ciò è dovuto principalmente al fatto che l'elevata temperatura superficiale della cavità impedisce che il fuso congeli prematuramente nella fase di riempimento e impaccamento e la replicazione della superficie della cavità finita a specchio ne trarrebbe beneficio, ottenendo un'estetica superiore e una maggiore brillantezza. Con questa tecnica, anche i segni di flusso vengono eliminati o comunque limitati.

In Figura 35 è possibile apprezzare come la temperatura in cavità risulti maggiore nella zona centrale e minore a contatto con lo stampo. Nella zona limitrofa alla superficie dello stampo la temperatura scende fino a raggiungere la temperatura di solidificazione e crea quello che viene definito "Strato congelato".



Figura 35 – Andamento della temperatura lungo un canale in fase di riempimento



Figura 36 – Differenza dello strato congelato in base alla temperatura dello stampo [37]

In Figura 36 vengono confrontati i fusi di due processi, uno in cui la temperatura dello stampo è inferiore alla temperatura di transizione vetrosa (T_g) del polimero e uno in cui è superiore.

4.3.2 Linee di giunzione

Inoltre, il riscaldamento della cavità dello stampo combinato con il rapido raffreddamento della parte stampata contribuisce ad eliminare lo sviluppo di linee di saldatura visibili e a produrre parti ad alta brillantezza. In Figura 37 si nota come risulta un componente con o senza linee di giunzione.



Figura 37 - Confronto delle linee di giunzione di componenti realizzati mediante CIM e H&C [37]

Da letteratura è stato valutato il valore di un range massimo di circa 10 °C che deve esserci tra i fronti di flusso che si incontrano per avere una corretta giunzione. Inoltre la qualità della linea di giunzione aumenta a temperature più elevate. L'esperienza di operatori competenti ha valutato una temperatura di circa 20 °C inferiore alla temperatura di iniezione come temperatura limite entro cui sarebbe ideale l'incontro dei fronti di flusso. Questo valore è stato analizzato per alcuni tipi di Polipropilene, per famiglie di Policarbonato tale differenza cresce. In Figura 38 è possibile apprezzare un grafico qualitativo sulla visibilità delle linee di giunzione in base alla temperatura dei fronti di flusso. Come già anticipato nel capitolo precedente, un altro parametro da valutare per ottenere una migliore qualità delle linee di giunzione è l'angolo di incontro dei fronti di flusso. In Figura 39 viene evidenziata, in uno stesso componente, come potrebbero apparire le linee di giunzione in due casi differenti.



Figura 38 – Grafico qualitativo della visibilità delle linee di giunzione in base alla temperatura dei fronti di flusso



Figura 39 – Confronto tra linee di giunzione

Il controllo della temperatura consente, dunque, sostanziali guadagni in termini di qualità estetica per il processo di stampaggio ad iniezione. Inoltre ci sono due aree principali di risparmio sui costi: riduzione dello spessore delle pareti e riduzione del tonnellaggio delle presse.

4.4 Difetti dell'H&C

Tuttavia, l'applicazione di questo metodo richiede costi aggiuntivi per aggiungere e rimuovere il calore ad ogni ciclo. Un altro svantaggio del rapido raffreddamento della superficie dello stampo è rappresentato dalle grandi sollecitazioni termiche indotte nel materiale circostante. Infatti durante il processo H&C, lo stampo subisce un maggiore stress termico a causa della sua elevata temperatura di esercizio. Le cricche da fatica si formano facilmente sulla cavità dello stampo, quindi la durata di vita dello stampo H&C è solitamente più breve di quella dello stampo ad iniezione convenzionale.

L'aumento della temperatura dello stampo e della temperatura di fusione avrà un effetto significativo su alcuni parametri come la pressione in cavità, la pressione idraulica, il peso del pezzo e anche il ritiro come descritto nell'analisi di cui sopra. Il ritiro longitudinale (ritiro in direzione del flusso) diminuisce quando la temperatura dello stampo viene aumentata.

I difetti comuni che si verificano nello stampaggio ad iniezione convenzionale (CIM), le linee di flusso, le linee di saldatura, il segno del getto, le fibre esposte, ecc. vengono si eliminate nell'H&C, vengono però amplificati alcuni difetti. Deformazioni e difetti di ritiro sono due tipologie di difetti che si verificano principalmente nello stampaggio ad iniezione a causa delle alte temperature impiegate e del complesso design del pezzo.

4.4.1 Difetto di deformazione

La deformazione è una distorsione della forma della parte stampata che si discosta dalla forma richiesta del disegno. È causata dalle tensioni residue nella parte in plastica stampata dopo il raffreddamento e l'espulsione. Le tensioni residue si verificano a causa del ritiro non uniforme del materiale plastico in diverse parti del pezzo. Il ritiro non uniforme è inevitabile a causa del raffreddamento non uniforme, della struttura del prodotto, della distribuzione non uniforme della pressione, della progettazione dello stampo, delle condizioni di lavorazione. A causa di tali fattori, minimizzare la deformazione è un compito molto complicato. Di fondamentale importanza risulta la progettazione del sistema di raffreddamento per ottenere una distribuzione della temperatura il più uniforme possibile.

4.4.2 Difetto segni di risucchio

I segni di risucchio sono delle depressioni o delle piccole fosse sulla superficie del pezzo, causate dal ritiro localizzato, relativamente maggiore, del materiale plastico in prossimità della variazione di spessore della sezione trasversale. Durante la fase di raffreddamento, le sezioni più spesse si restringono di più delle sezioni più sottili adiacenti, con conseguenti depressioni sulla superficie anteriore della parte in plastica. Queste depressioni, di solito simili a scanalature o fossette, sono chiamate segni di risucchio. Il ritiro localizzato maggiore si verifica a causa della struttura locale a pareti spesse, come nervature, borchie, ecc. Sia i difetti di deformazione che i segni di risucchio sono il risultato di un ritiro non uniforme dei materiali plastici. Per

migliorare l'uniformità della temperatura e della pressione, alleviando l'orientamento delle molecole e degli additivi, e anche riducendo il ritiro del pezzo bisogna aumentare la pressione di impaccamento, che dovrebbe contribuire a ridurre le deformazioni e i segni di risucchio.

Facendo un sunto i principali vantaggi di questo tipo di tecnologia applicata all'industria sono:

- Finitura Super High Gloss (su stampi lucidati);
- Eliminazione di tutte le linee di saldatura, saldatura e flusso della superficie visibile;
- Nessuna visibilità in fibra di vetro (superficie ricca di resina);
- Nessun segno di argentatura o splay (resine schiumate);
- Migliore replica della superficie dello stampo;
- Pressioni di riempimento inferiori (fino al 50%);
- Percorsi di flusso più lunghi con sezione di parete inferiore (peso leggero);
- Minori deformazioni e distorsioni (inferiore modellato nelle sollecitazioni).

Di seguito, in Figura 40, sono riportati alcuni dati forniti da YUDO, azienda che realizza sistemi di controllo RICH, in cui vengono confrontati i cicli di componenti realizzati mediante stampaggio classico e stampaggio RICH.





Figura 40 - Confronto tra vari modelli di controllo RICH fornito da YUDO

Capitolo 5 – La simulazione

La simulazione è uno strumento che ha avuto un'ampia diffusione nelle aziende produttive ed ha assunto un'importanza oramai quasi fondamentale, tutto ciò è stato possibile grazie al grande sviluppo tecnologico in ambito hardware e software. Lo sviluppo è stato ulteriormente agevolato grazie alla facilità e alla rapidità di interconnessione dei calcolatori.

I computer permeano tutte le aree dell'industria della plastica dalla concezione del prodotto, alla progettazione, alla lavorazione delle materie prime, al marketing e alle vendite, al riciclaggio e così via. La componente umana preposta all'utilizzo di questi sistemi assume un ruolo fondamentale, infatti i tecnici e gli operatori dei computer, devono essere dotati di adeguate competenze e conoscenze sia dell'hardware che del software, al fine di ottenere un uso efficiente di queste tecnologie. Il processo di produzione industriale, così come viene praticato oggi nel settore dello stampaggio ad iniezione, si basa su un'interazione fluida tra la tecnologia di controllo del processo, le applicazioni di manipolazione industriale e l'informatica. L'informatica è particolarmente importante per le funzioni di integrazione che svolge, per le attrezzature ausiliarie, per la movimentazione dei materiali e così via fino alla gestione aziendale stessa.

Per i prodotti stampati, lo scopo delle simulazioni è cercare di realizzare la producibilità dei prodotti progettati. Lo scopo dell'analisi dello stampaggio è garantire che la progettazione dei prodotti o degli stampi sia adeguata in fase di progettazione e che quindi sia possibile ottenere una buona qualità di produzione.



Figura 41 – Ciclo per la realizzazione di un prodotto mediante l'uso di un sistema CAE [50]

La simulazione dello stampaggio può essere effettuata utilizzando strumenti CAE, ovvero software di ingegneria assistita da computer e analisi tecnica, per aiutare nella diagnosi e nello

sviluppo di complicati processi di stampaggio ad iniezione. I software CAE facilitano la rapida integrazione di complesse proprietà reologiche, termiche e meccaniche dei materiali, consentendo a progettisti e sviluppatori di eseguire analisi e diagnosi qualitative e quantitative per la progettazione di parti e stampi. Pertanto, possono analizzare e diagnosticare a fondo gli stampi e le condizioni operative esistenti. La Figura 41 riporta il ciclo di realizzazione di un prodotto, in particolare di uno realizzato mediante stampaggio ad iniezione, mediante l'utilizzo di sistemi CAE.

Una delle tecnologie più rivoluzionarie che ha maggiormente influenzato lo stampaggio ad iniezione negli ultimi decenni è certamente l'analisi computerizzata del riempimento e del raffreddamento. Utilizzando la simulazione e, quindi, limitando costosi e tediosi metodi di prova e correzione del passato, è stato possibile prevedere con un discreto grado di accuratezza la corretta riproduzione di un mezzo attraverso lo stampo.

Gli strumenti software operativi computerizzati hanno ridotto drasticamente i tempi di lancio dei nuovi prodotti, bypassando o comunque riducendo la prototipazione intermedia a favore di una maggiore velocità ed economicità della "prototipazione al computer". [55] I computer hanno assunto un ruolo importante nella vita del business dello stampaggio ad iniezione in tutto il mondo, fornendo l'elaborazione di testi, database, software, fogli di calcolo, progettazione, supporto alla produzione, ecc. In molti ritengono che, se usati correttamente, questi sistemi, possono migliorare la produttività e la qualità della vita eseguendo funzioni di routine, così come compiti che richiedono tempi lunghi e azioni ripetitive. Nell'industria delle materie plastiche e in particolare l'area di stampaggio ad iniezione, i computer forniscono un prezioso servizio complessivo nella progettazione delle fasi del prodotto, della fabbricazione di stampi e nella previsione delle prestazioni del prodotto, in quanto comportano il controllo dei macchinari e della gestione delle aree. I costi dello stampo possono essere ridotti dal 10 al 40%, tempi di consegna ridotti del 20 al 50%, tempo di ciclo ridotto del 10 - 50%, utilizzo del materiale ridotto dal 5 al 30% e il tempo di ciclo del prodotto ridotto del 50-80%.

L'uso del computer con un software appropriato ha portato ad una migliore comprensione dei requisiti operativi di uno stampo e, quindi, ad un migliore controllo del processo. Altri vantaggi derivanti dalla tecnologia CAD/CAM/ CAE per la progettazione di stampi sono:

- Un avvio più rapido dello stampo con meno rilavorazioni necessarie;
- Un aumento complessivo della qualità delle parti;
- Meno errori nei disegni, il che migliora qualità dello stampo e velocizza i tempi di consegna;
- Una migliore precisione di lavorazione;
- Una standardizzazione di parti e componenti, che riduce la quantità di supervisione richiesta in un impianto di produzione;
- Maggiore velocità e precisione nella preparazione del preventivo;
- Una risposta più rapida al mercato.

Come già detto, per l'analisi dello stampo una delle preoccupazioni maggiori è ottenere un efficace trasferimento di calore. Ciò significa che il calore dello stampo deve essere rimosso il più rapidamente possibile. Il raffreddamento è efficiente se la rimozione del calore viene effettuata con la minima spesa possibile di capitale e di energia. Una corretta analisi dello stampo deve avere come risultati massima prestazione dello stampo e corretta progettazione del sistema di raffreddamento. Le condizioni operative ottimali che sono determinati da questo processo includono: tipo di refrigerante, portata, pressione di alimentazione e temperatura. Ma se la descrizione del processo appare semplice, per la simulazione ci sono complicazioni, vale a dire:

- La natura dello stampaggio ad iniezione e in particolare la fisica di base del processo. Il
 processo di stampaggio ad iniezione comporta diversi meccanismi di trasferimento del
 calore, è di natura transitoria e inoltre comporta un cambiamento di fase e variazioni
 temporali dello strato congelato nel riempimento, nell'imballaggio e durante il
 raffreddamento;
- Le proprietà del materiale. I polimeri per lo stampaggio a iniezione possono essere classificati come semi-cristallini o amorfi. Entrambi hanno un comportamento termo-reologico complesso che influisce sul processo di stampaggio. I materiali termoplastici hanno in genere una viscosità che diminuisce con il taglio e l'aumento della temperatura mentre aumenta con la pressione. Le loro proprietà termiche dipendono dalla temperatura e possono dipendere dallo stato di stress. [56]

Nel caso di materiali semi-cristallini, le proprietà dipendono anche dalla cronologia del flusso e dalla velocità di variazione della temperatura. Un'ulteriore complessità, nella simulazione dello stampaggio ad iniezione, è la necessità di incorporare un'equazione di stato per calcolare la variazione di densità in funzione della temperatura e della pressione. L'equazione di stato si riferisce al volume specifico del materiale (l'inverso della densità), pressione e temperatura. Questa viene definita caratteristica pVT del materiale;

 Complessità geometrica dello stampo. Le parti stampate a iniezione sono generalmente strutture con pareti sottili e possono avere una forma estremamente complessa. La combinazione di pareti sottili e velocità di iniezione rapida porta tensioni di taglio e velocità di deformazione significative. Queste, unite alle complesse caratteristiche di viscosità del materiale, portano a grandi variazioni della viscosità del materiale e quindi a variazioni nei modelli di riempimento. Bisogna anche considerare che lo stampo ha due funzioni. La prima è quella di dare la forma al pezzo da fabbricare e la seconda è quella di rimuovere il calore dallo stampo stesso il più rapidamente possibile.

L'elevata efficienza dei calcolatori permette di effettuare calcoli molto complessi considerando tutti questi fattori che influenzano il processo produttivo. Ne consegue che alcuni parametri di

output, come ad esempio il tempo di ciclo, possono essere accuratamente previsti ancora prima della costruzione dello stampo. In particolare, l'analisi computerizzata dello stampo può:

- Migliorare la qualità dei pezzi, l'uniformità e l'equilibrio del raffreddamento nello stampo. Questo elimina le sollecitazioni termiche che causano deformazioni.
- Aumentare la produzione. In alcuni casi, la produttività della macchina è aumentata di oltre l'80%.
- Ridurre i costi di refrigerazione. L'analisi del trasferimento di calore dello stampo fornisce i dati necessari per selezionare il flusso, la pressione e i livelli di temperatura ottimali per il refrigerante utilizzato nei sistemi di raffreddamento della pressa ad iniezione. Questo elimina le congetture sul dimensionamento dei sistemi di raffreddamento ed elimina le spese non necessarie per i refrigeratori e le pompe sovradimensionate.
- Ridurre gli investimenti di capitale. Uno stampo progettato correttamente, raffreddato da un efficace sistema di raffreddamento, produce più pezzi; sono necessarie meno presse ad iniezione per soddisfare le esigenze di produzione in termini di volumi produttivi. Questo importante risparmio di capitale è aumentato dalla riduzione del tonnellaggio di raffreddamento e dall'acquisto di stampi. La capacità di interagire correttamente con un minor numero di macchine consente inoltre di risparmiare superficie dell'impianto.
- Ridurre i costi di esercizio e di manutenzione. Condizioni operative ottimali rendono più efficiente l'uso dell'energia, con una riduzione dei costi di gestione e manutenzione.

5.1 Breve storia della simulazione per lo stampaggio ad iniezione

L'analisi della simulazione dello stampaggio ha origine dal Dr. Kamal della McGill University, in Canada, negli anni '70. Nel 1978, Colin Austin sviluppò il primo programma commerciale che eseguiva l'analisi del percorso del flusso posando una parete piatta sottile 1D usando il metodo layflat. [57]



Figura 42 – Evoluzion dei modelli di mesh per la simulazione [50]

L'evoluzione delle tecniche di mesh, come mostrato nella Figura 42, è partita dal metodo layflat negli anni '70. Successivamente negli anni '80, sono stati sviluppati il metodo 2.5, chiamato midplane, e i metodi shell, seguiti dai modelli quasi-3D e dual domain negli anni '90, fino agli anni 2000 quando sono stati sviluppati i modelli mesh 3D . Grazie all'enorme crescita delle prestazioni computazionali, il numero di reti mesh che possono essere elaborate è aumentato in modo significativo. In teoria, l'approccio 3D produce risultati più accurati. Dopo il metodo layflat, Cornell ha sviluppato la tecnica a maglia sottile 2.5D nel programma Cornell Injection Molding (CIMP). Il presupposto di base è di semplificare un modello 3D in uno 2.5D e di prendere il piano geometrico medio come elemento di calcolo. La base teorica di questo metodo del piano medio 2.5D deriva dall'equazione di Hele Shaw (o Hele-Shaw generalizzata). [58]



Figura 43 – Passaggio dalla geometria 3D al modello 2.5D [50]

La teoria utilizza la caratteristica secondo cui la cavità dello stampo ad iniezione è più sottile nella direzione dello spessore e ignora il gradiente di pressione nella direzione dello spessore, ovvero un'equazione di Poisson di pressione 2D semplificata viene utilizzata per la conservazione di massa e quantità di moto. Per la conservazione dell'energia, sebbene la convezione termica nella direzione dello spessore e la conduzione termica nel piano di flusso siano trascurate, come mostrato nella Figura 43, devono ancora essere considerate le variazioni 3D della temperatura nel sistema. Di conseguenza, l'intero sistema viene semplificato in un problema del campo di pressione 2D accoppiato con un campo di temperatura 3D, da queste considerazioni il nome che prende è "2.5D".



Figura 44 – Limitazioni dell'approccio 2.5D [50]

I metodi numerici utilizzati per risolvere un problema 2.5D sono due, il metodo dianalisi agli elementi finiti viene utilizzato per risolvere le equazioni di pressione e il metodo FDM viene utilizzato per gestire il campo di temperatura nella direzione dello spessore. Tuttavia, in alcune aree di flusso, come mostrato nella Figura 45, come quella di iniezione nella parte anteriore del fuso, aree a forma di T come le nervature o dove si verifica un improvviso cambiamento di spessore, l'assunto che ignora la pressione nella direzione dello spessore diventa falsa con la conseguenza di errori di calcolo non trascurabili.

Il modello 2.5D non fornisce un quadro completo per le parti con inserti o pori in cui la conduzione del calore sulla parete laterale può essere significativa. Un altro problema dell'approccio 2.5D è la creazione del modello del piano medio dalla parte 3D, che di solito richiede molto tempo. Il metodo a dual domain, è nato per migliorare i limiti della tecnica 2.5D. Questo metodo utilizza direttamente le mesh di superficie del modello 3D. In questo approccio, il solutore 2.5D viene applicato alla mesh superficiale (skin) del modello. Vengono calcolati il modello di flusso su entrambi i lati della cavità di uno stampo e l'introduzione di coefficienti di collegamento aggiuntivi corregge il comportamento del flusso su due lati del modello. In questo modo, il modello produce risultati che assomigliano al 3D e non è necessario estrarre i piani intermedi.



Figura 45 - Limiti dell'approccio 2.5D: fusione delle zone frontali e di variazione dello spessore e comportamento del flusso della fibra indotta dalla fusione [50]

Per quanto semplice, il metodo dual domain presenta ancora un rischio quando si tratta di parti difficili da definire per lo spessore. Per una geometria rettangolare all'interno e circolare all'esterno, o viceversa, si possono facilmente verificare errori di valutazione dello spessore agli angoli rettangolari. Errori come la discontinuità del fuso possono anche verificarsi con il metodo a doppio dominio a causa dell'approccio del connettore. [59]

Infine, tra le tecniche di mesh proposte fino ad ora, il modello di mesh 3D risulta essere il metodo più accurato, perché non richiede alcuna semplificazione geometrica e le equazioni di governo descrivono esattamente lo spazio 3D del sistema, i risultati della simulazione risultano essere più vicini alla situazione reale. La chiave per l'uso di questo metodo di mesh sono la stabilità e le prestazioni del solutore.

5.2 Moldex3D

Una ricerca finanziata dal governo di Taiwan e condotta presso la National TsingHua University (NTHU) di Taiwan ha studiato lo stampaggio a iniezione dal 1989 al 1999. Ciò ha portato alla creazione di un'entità commerciale denominata CoreTech System Co. Ltd. nel 1995. [50]

Commercializzati con il nome Moldex, i loro prodotti originali erano basati sulla tecnologia 2.5D midplane e offrivano analisi di tutte le fasi dello stampaggio ad iniezione. Utilizzando il metodo del volume finito proposto da Chang e Yang [60], Core Tech ha prodotto un'analisi 3D nel 2001 chiamata Moldex3D / Solid. Questo prodotto utilizza elementi di varie forme per l'analisi. I sistemisti della CoreTech hanno sviluppato un sistema chiamato Boundary Layer Meshing (BLM), un sistema in cui è possibile creare una mesh con diversi elementi parallelepipedi a base triangolare vicino alla parete dello stampo ed elementi tetraedrici al centro. L'idea è di migliorare i calcoli del trasferimento di calore vicino alla parete dello stampo. La Figura 46 mostra diverse alternative di mesh interna di un componente sezionato. Il numero di fianco alla L indica il numero di Layer che si intende avere vicino alla superficie dello stampo, ovvero il numero di elementi regolari prima di avere gli elementi tetraedrici. Si può inoltre impostare il rapporto tra la dimensione principale dell'elemento e il numero di layer per ottenere una mappatura più uniforme.



Figura 46 - Possibili alternative all'uso del BLM [50]

Moldex3D è quindi un software realizzato per i produttori di componenti in materiali plastici indirizzati allo stampaggio a iniezione e agli studi ingegneristici di progettazione. Permette di simulare e verificare parti e relativi stampi complessi basati sulla tecnologia 3D. Con Moldex3D, i progettisti o i produttori sono in grado di gestire il ciclo di vita di un prodotto dal suo concepimento, attraverso la progettazione e la produzione. In Figura 47 è mostrato in che segmento del ciclo di realizzazione di un prodotto si va a collocare Moldex3D. Questo aiuta anche i progettisti o i fornitori di componenti di superare la maggior parte dei potenziali problemi che nascono nelle prime fasi. Inoltre, attraverso l'interfaccia FEA Moldex3D, i prodotti con potenziali variazioni indotte dal processo come l'orientamento della fibra e lo stress residuo possono essere analizzati con vari pacchetti di analisi della struttura.



Figura 47 – Impiego di Moldex3D nello sviluppo di un prodotto [50]

Moldex3D è uno dei CAE leader a livello mondiale per l'industria dello stampaggio ad iniezione di materie plastiche. Con una delle migliori tecnologie di analisi del settore, Moldex3D può aiutare a simulare un'ampia gamma di applicazioni dei processi di stampaggio ad iniezione per ottimizzare la progettazione e la fabbricabilità del prodotto e di conseguenza ridurre il time-to-market.

5.2.1 Equazione di governo

Il modello matematico alla base delle due fasi è costituito essenzialmente da un sistema di equazioni differenziali e da una serie di condizioni al contorno che ne permetta l'integrazione. Le equazioni alla base della modellazione sono quelle classiche della fluidodinamica, opportunamente adattate e semplificate alle condizioni dei polimeri iniettati.

Poiché un fuso polimerico è comprimibile, la conservazione dell'equazione di massa assume la forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho v) = 0$$
Equazione 1

Dove:

- $\rho = \rho(x, y)$ è la densità del fluido
- v = v(x, y) è la velocità del fluido

L'equazione di conservazione del momento della quantità di moto può essere scritta:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v v = \nabla \cdot \underline{\sigma} + \rho g$$
Equazione 2

Dove:

- $\underline{\sigma}$ è il tensore degli sforzi
- g = g(x, t) è l'accelerazione di gravità

Infine la conservazione dell'energia prende la forma:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial T} + v \cdot \nabla p \right) + p \nabla \cdot v + \underline{\sigma} : \nabla v + \nabla \cdot (k \nabla T)$$
Equazione 3

Dove:

- c_p è il calore specifico
- T = T(x, y) è la temperatura
- β è il coefficiente di espansione volumetrica
- *p* è la pressione
- *k* è la conducibilità termica

Le equazioni di cui sopra sono abbastanza generali.

Le due macro fasi si distinguono a seconda delle condizioni al contorno imposte ed alle ipotesi semplificative sulla geometria e sul materiale più adatte a descrivere il flusso del polimero fuso. Per simulare lo stampaggio ad iniezione, è possibile effettuare alcune semplificazioni considerando:

- Proprietà dei materiali;
- Considerazioni geometriche;
- Manipolazione matematica.

Per il flusso di iniezione, trascurando l'incomprimibilità del fluido polimerico, l'equazione di continuità del flusso incomprimibile è la seguente:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Equazione 4

L'equazione della quantità di moto è:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)$$
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)$$
$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$$
Equazione 5

Dove:

- η è la viscosità del polimero
- *p* è la pressione

Combinando le equazioni di continuità e la conservazione della quantità di moto, è possibile ottenere l'equazione di pressione:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0$$
$$S = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz$$
Equazione 6

Dove:

- *h* è lo spessore della cavità;
- *S* è la fluidità.

Se si trascura la conduzione del calore in direzione z, l'equazione della quantità di moto può essere espressa

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial T}{\partial z}$$
Equazione 7

Dove:

• $\dot{\gamma}$ è la velocità di deformazione definita come:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)^2}$$
Equazione 8

In sintesi, il sistema di calcolo utilizza diversi approcci di analisi numerica per integrare le equazioni ricavate: mediante il metodo degli elementi finiti si risolvono le equazioni della massa e del momento, il metodo delle differenze finite viene utilizzato per la risoluzione dell'equazione dell'energia ed infine col metodo ai volumi finiti si calcola la posizione del fronte di flusso. Per ogni istante di tempo il flusso raggiunge una determinata posizione e dallo step precedente sono note le caratteristiche del fuso in termini di temperatura, shear rate e shear stress; quindi da questi valori si aggiorna il valore della viscosità della nuova posizione, il quale viene utilizzato per calcolare la portata in ciascun volume di controllo al fronte di flusso. Da questa informazione si determina quale sarà il prossimo volume di controllo a riempirsi e quindi dove avanzerà il fronte di flusso. Per la fase di impaccamento le ipotesi semplificative sono sostanzialmente le stesse della fase di riempimento, fatta eccezione per il fuso che non può più considerarsi incomprimibile; inoltre si ipotizza che la pressione agente in cavità sia di tipo idrostatico.

5.2.2 Benefici

Moldex3D possiede uno strumento di pre-elaborazione con robuste tecnologie di mesh e diversi elementi mesh per aumentare l'efficienza del lavoro nella preparazione di mesh solide. Offre mesh a superficie triangolare pura e mesh a superficie dominante quadrilatera, mesh a strato limite, mesh ibrida e generazione di mesh voxel, consente anche la realizzazione di mesh molto sottili per complesse geometrie 3D grazie anche alla possibilità di utilizzare una mesh ibrida, come mostrato in Figura 48. Fornisce strumenti di controllo e correzione automatica per garantire la migliore qualità della mesh per l'accuratezza dell'analisi.



Figura 48 – Tecnologia di mesh ibrida [50]

Il software consente la personalizzazione degli elementi di esportazione dei risultati per la collaborazione di analisi e per alleggerire le dimensioni del file. Supporta la visualizzazione dei risultati multi-run e il confronto sincrono dei risultati.

Inoltre, per lo sviluppo dello stampo i progettisti possono utilizzare il controllo della temperatura "variotherm" per adattare lo stampaggio ad iniezione al caso particolare analizzato nel presente lavoro di tesi. Tramite questo tool è possibile analizzare non solo la temperatura finale dello stampo, ma anche l'andamento della distribuzione della temperatura dello stato precedente che va ad influire successivamente sulla temperatura dello stampo. Tutto ciò è fondamentale soprattutto quando ci sono layout multipli del controllo della temperatura dello stampo con diversi fonti di riscaldamento e fonti di raffreddamento.

Il processo di H&C analizzato, infatti, consiste nell'aumentare la temperatura dello stampo durante la fase di riempimento e raffreddare rapidamente lo stampo al termine del riempimento. Pertanto, le linee di saldatura delle parti stampate potrebbero formarsi ad alta temperatura e il fatto che il processo di raffreddamento inizi a una temperatura inferiore potrebbe ridurre il tempo di ciclo richiesto. Grazie al suo eccellente equilibrio tra prestazioni del prodotto e costi di produzione, il tool "Variotherm" ha recentemente guadagnato molte attenzioni nel settore dello stampaggio ad iniezione di materie plastiche.

Quindi per soddisfare le esigenze dell'analisi CAE per il processo di stampaggio Heat & Cool, Moldex3D offre uno strumento completo per simulare varie condizioni di stampaggio rapido di riscaldamento e raffreddamento, integrando un vero approccio numerico 3D completamente transitorio, considerando l'interazione tra le fasi di riscaldamento, riempimento, impaccamento e raffreddamento. Ciò consente di determinare i parametri relativi al sistema di raffreddamento, il sistema di riscaldamento, la temperatura dello stampo, il tempo di raffreddamento, ecc. Supporta la visualizzazione della distribuzione e della variazione della temperatura nel tempo sulle superfici dello stampo e su qualsiasi sezione trasversale. Risolve i problemi di riempimento e imballaggio delle parti con rapide variazioni di temperatura. Simula l'efficienza della rete di raffreddamento e identifica potenziali problemi. Grazie alle capacità del software è dunque possibile migliorare le linee di saldatura, i segni di flusso, il ritiro, la planarità, ecc.

A differenza dei concorrenti nel settore Moldex3D ha deciso di sviluppare un tool completamente dedicato a questo tipo di processo che permette di ottenere risultati validi. Diventa quindi un supporto di fondamentale importanza nello sviluppo di un nuovo progetto poiché permette di valutare e identificare molti dei possibili problemi in cui è possibile imbattersi durante la produzione reale. Ovviamente il solo utilizzo della simulazione non è sufficiente allo sviluppo di un progetto destinato alla produzione, ma consente di arrivare a effettuare dei test fisici con un kwow-how decisamente diverso.

Capitolo 6 – Analisi termica dello stampo

L'analisi termica è la parte più importante nella fase di studio dello stampo. La combinazione di parametri è notevoli: materiali del pezzo e dello stampo, temperature del fuso e dello stampo, etc.

Come già detto, il calore deve essere introdotto e rimosso dallo stampo il più rapidamente possibile. La resistenza dipende dalle proprietà di conduzione del calore del materiale di cui è composto lo stampo, dalle dimensioni, dalla progettazione e dal posizionamento dei canali di raffreddamento rispetto al pezzo da stampare. Il tasso di produzione delle parti termoplastiche stampate ad iniezione e la percentuale di quelle conformi ai requisiti di qualità accettabili può essere aumentata in modo sostanziale migliorando il trasferimento di calore dallo stampo. Questo miglioramento può consistere nell'accelerare il tasso di trasferimento di calore [61] e nell'equilibrare il trasferimento di calore in modo uniforme in tutto lo stampo.

In base alle caratteristiche dell'H&C la simulazione del trasferimento di calore viene divisa in due parti la fase di riscaldamento e quella di raffreddamento. In fase di riscaldamento, la superficie della cavità dello stampo deve essere riscaldata dal mezzo caldo fino alla temperatura designata. La condizione al contorno del mezzo caldo è la convezione sulle superfici dei canali di riscaldamento / raffreddamento. Inoltre la modalità di trasferimento del calore attorno a tutte le superfici esterne dello stampo è il trasferimento di calore per convezione con l'aria esterna. In fase di raffreddamento, la condizione al contorno della convezione forzata del refrigerante viene caricata di conseguenza sui canali di riscaldamento / raffreddamento. In questa fase, però il fuso polimerico deve essere considerato in simulazione poiché apporta calore al sistema.

6.1 Teoria

La teoria su cui si basa lo studio è quella della conservazione dell'energia. Il fenomeno complessivo del trasferimento di calore è governato da un'equazione tridimensionale di Poisson:

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

Equazione 9

Dove:

- *T* è la temperatura;
- *t* è il tempo;
- *x*, *y* e *z* sono le coordinate cartesiane;
- ρ è la densità;
- C_p è il calore specifico;
- *k* è la conducibilità termica.

L'equazione (1) vale sia per lo stampo che per la parte in plastica con le dovute modifiche delle proprietà termiche.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno viene considerato l'apporto di calore che viene scambiato con l'ambiente esterno quindi dall'aria che circonda le superfici esterne della base dello stampo tramite un meccanismo di convezione termica. In questo studio, l'effetto della radiazione termica viene ignorato. Le condizioni definite sulle superfici limite e le interfacce dello stampo sono specificate come:

per
$$t \ge 0$$
, $-k_m \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0)$
Equazione 10

dove *n* è la direzione normale al bordo dello stampo. Sulle superfici esterne dello stampo (Γ_m): $h = h_{air}, \quad T_0 = T_{air}, \quad per \ \vec{r} \in \Gamma_m$

Il coefficiente di trasferimento del calore viene ricavato empiricamente tenuti dalle equazioni empiriche citate nel testo standard dei fenomeni di trasporto.

6.2 Fase di riscaldamento

Lo stampo viene riscaldato mediante l'uso di vapore saturo ad alta temperatura che percorre i canali che attraversano lo stampo. La fase di riscaldamento termina quando lo stampo raggiunge la temperatura richiesta ovvero nell'intorno della temperatura di transizione vetrosa del polimero che viene utilizzato. In questa prima fase la schematizzazione del sistema (stampo) è rappresentata nella Figura 49.



Figura 49 - Schema andamento del calore nella fase di riscaldamento

Nelle figura:

• Q_{in} è il calore apportato mediante il fluido di riscaldamento (in questo caso il vapore).
• Q_{ext} è il calore dissipato, si perde principalmente attraverso le pareti dello stampo ma anche attraverso tutti gli organi accessori.

La legge che lega il calore apportato (o sottratto) a un corpo e la variazione di temperatura è la seguente:

$$Q = m c \Delta T$$

Equazione 11

In questo particolare caso Q rappresenta la differenza tra il calore da apportare e il calore disperso, m è la massa dello stampo, c è il calore specifico del materiale di cui è fatto lo stampo e ΔT è la differenza di temperatura tra quella iniziale e quella che deve essere raggiunta. L'equazione finale risulta essere:

$$Q_{in} = Q_{ext} + m c (T_2 - T_1)$$

Equazione 12

La temperatura della superfice della cavità dello stampo viene inizialmente riscaldata fino quasi alla temperatura di transizione vetrosa (Tg) di un polimero amorfo o vicino al punto di fusione (Tm) di un polimero semi-cristallino, appena prima che inizi l'iniezione e successivamente raffreddata fino alla temperatura di estrazione del polimero in questione.

La temperatura iniziale del sistema è circa uguale a quella dell'ambiente circostante, ovvero nell'intorno dei 25°C. La temperatura iniziale del polimero quando comincia la fase di iniezione dipende dal materiale in questione. In accordo con i parametri di processo raccomandati dai produttori di polimeri tale temperatura è, ad esempio, nell'intorno dei 250 °C per il Polipropilene e 350 °C per il Policarbonato.

Il vapore rilascia il calore quando viene a contatto con le pareti fredde dei canali, pertanto, la corrispondente modalità di trasferimento termico è il trasferimento di calore di condensa e il coefficiente di trasferimento di calore medio può essere calcolato con la seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} \alpha = (5 + 0.015 \ Re^{a} \ Pr^{b}) \frac{\lambda}{D} \\ a = 0.88 - \frac{0.24}{4 + Pr} \\ b = 0.333 + 0.5 \ e^{-0.6Pr} \\ Equazione \ I3 \end{cases}$$

Dove:

- *Re* è numero di Reynolds
- *Pr* è il numero di Prandtl
- k è il coefficiente di conducibilità termica medio del fluido di riscaldamento
- *D* è il diametro dei canali di raffreddamento.

Al fine di ottenere un trasferimento di calore molto efficiente tra lo stampo metallico e il fluido che scorre all'interno dei canali è necessario un flusso turbolento del fluido. La turbolenza del fluido è quantificata dal numero adimensionale di Reynolds che può essere definito dalla seguente espressione

$$Re = \frac{D u}{v}$$
Equazione 14

Dove:

- *D* è il diametro del canale
- *u* è la velocità del flusso
- ν è la viscosità cinematica

Nei canali, il flusso turbolento si verifica quando il numero di Reynolds è superiore a 10.000. Combinando le due equazioni si deduce che il coefficiente di scambio termico convettivo, alfa, può essere aumentato incrementando la velocità del flusso. In altre parole, maggiore è la velocità del flusso, più efficacemente il fluido rilascia o assorbe il calore.

La conoscenza della teoria che c'è alla base di questo fenomeno ha permesso un approccio più consapevole alla simulazione mediante elementi finiti.

Per la fase di riscaldamento rapido, la condensa del vapore nei canali di raffreddamento è modellata tenendo conto del calore latente. Per calcolare il calore latente della condensa durante la simulazione, vengono utilizzate tabelle di vapore saturo. [62]

Sono state applicate opportune e già note formulazioni di condensa per ottenere il coefficiente di trasferimento del calore per ogni fase durante la fase di riscaldamento a vapore. [63]

Poiché il vapore condensa, viene anche considerata la qualità mutevole del vapore, che è il rapporto tra massa di vapore e massa totale.

6.3 Fase di raffreddamento

Il totale del calore da sottrarre allo stampo per il suo raffreddamento sarà dato da: il calore necessario ad abbassare la temperatura dello stampo, il calore apportato dalla presenza del materiale fuso ad alta temperatura meno il calore che fuoriesce per convezione libera verso l'esterno dello stampo. Lo schema è riportato in Figura 50

$$Q_{out} = Q_1 + m c (T_1 - T_2) - Q_{ext}$$

Equazione 15

La componente di quantità di calore da sottrarre allo stampo per diminuzione della temperatura del pezzo stampato durante un ciclo di stampaggio Q_1 vale:

$$Q_1 = P_1 C_p (T_1 - T_2)$$
Equazione 16

Dove:

- P_1 è il peso di una stampata,
- C_p è il calore specifico del materiale plastico,
- T_1 è la temperatura di plastificazione del polimero,
- T_2 è la temperatura di estrazione del componente.



Figura 50 - Schema andamento del calore nella fase di raffreddamento

La quantità di calore oraria (FRIGORIE) da sottrarre allo stampo q_h :

 $q_h = P_h C_p (T_1 - T_2)$ Equazione 17

Dove:

- P_h è il peso di componenti prodotti in 1 ora [kg/ora],
- C_p è il calore specifico del materiale plastico, T_1 è la temperatura di plastificazione del polimero, T_2 è la temperatura di estrazione del componente.

6.4 L'influenza della temperatura dei mezzi di raffreddamento e riscaldamento

Secondo la legge di base del trasferimento di calore, le efficienze di riscaldamento e di raffreddamento possono essere migliorate aumentando rispettivamente la temperatura del mezzo di riscaldamento e riducendo la temperatura del fluido di raffreddamento. Tuttavia, in tal caso, il consumo di energia potrebbe aumentare, il vapore ad alta pressione e l'acqua potrebbero di conseguenza aumentare il costo di produzione. In questa sezione, si cerca di trovare una temperatura ottimale di riscaldamento o raffreddamento al fine di raggiungere la temperatura richiesta dal processo produttivo. Come riferimento è stato valutata la temperatura media della superficie della cavità. Ovviamente si è subito notato come la velocità di riscaldamento possa essere notevolmente migliorate aumentando la temperatura del mezzo di riscaldamento e viceversa come si possa migliorare il raffreddamento utilizzando un mezzo più freddo.

Nella fase di riscaldamento del processo di Heat & Cool, il mezzo di riscaldamento scorre continuamente nei circuiti dello stampo per riscaldarlo. Il flusso di massa del mezzo di riscaldamento può essere espresso con la seguente espressione

$$W = \frac{\rho}{4} \pi \sum_{i=1}^{N} D_i^2 u_i$$
Equazione 18

- ρ è la densità del mezzo di riscaldamento
- N rappresenta il numero totale di canali in parallelo dello stampo
- D_i è il diametro del canale i-esimo
- u_i è la velocità del mezzo di riscaldamento nel canale i-esimo.

Considerando tutte le tubazioni parallele con lo stesso diametro D e supponendo una velocità del mezzo di riscaldamento in tutte le tubazioni costante pari a u l'equazione precedente può essere semplificata

$$W = \frac{\rho}{4} N \pi D^2 u$$
Equazione 19

Per ogni mezzo di riscaldamento, che sia vapore saturo surriscaldato o l'acqua, esistono speciali apparecchiature, come la caldaia a vapore o lo scaldabagno. L'efficienza termica di questi apparecchi viene rappresentata con il simbolo η_h .

Nel processo di produzione, il mezzo di riscaldamento dello stampo verrà riciclato e riutilizzato dai corrispondenti sistemi di recupero in modo da ridurre la perdita di energia. L'efficienza di recupero energetico di questi sistemi è indicata come η_r . L'energia consumata in un processo di riscaldamento può essere espressa come:

$$E = W \left(H_T - H_{T_0} \right) t \eta_h^{-1} \left(1 - \eta_r \right)$$

Equazione 20

Dove:

- H_T è l'entalpia alla temperatura T
- H_{T_0} è l'entalpia alla temperatura T_0

Combinando le equazioni precedenti si ottiene:

$$E = \frac{N}{4}\pi D^2 u \rho \left(H_T - H_{T_0}\right) t \eta_h^{-1} (1 - \eta_r)$$

Equazione 21

Ancora una volta lo studio della teoria ha permesso di approcciare nel migliore dei modi il problema che è stato risolto mediante l'utilizzo del software Moldex3D.

La tabella 1 elenca il tempo necessario affinché la superficie della cavità dello stampo sia completamente riscaldata alla temperatura richiesta di 120 °C. Viene anche analizzata la quantità di energia necessaria al riscaldamento mediante il mezzo e la temperatura in questione.

	Vapore saturo		Acqua surriscaldata	
Temperatura (°C)	Tempo di riscaldamento (s)	Consumo di energia (kJ)	Tempo di riscaldamento (s)	Consumo di energia (kJ)
140	36	875	32	4368
160	23	966	22	3494
180	19	1237	17	3141
200	16	1629	15	2960

Tabella 1 – Tempo di riscaldamento e consumo di energia corrispondenti a diverse temperatura dei mezzi di riscaldamento

Dalla tabella si evince come l'acqua in pressione surriscaldata possa avere una capacità di riscaldamento migliore ma a costo di un decisamente maggiore consumo energetico. La Figura 51 e la Figura 52 forniscono il confronto tra i tempi di riscaldamento richiesti per i due mezzi. Si può vedere chiaramente che il tempo di riscaldamento richiesto diminuisce gradualmente con l'aumento della temperatura del mezzo di riscaldamento.



Figura 51- Andamento della temperatura dello stampo - Temperatura del mezzo di riscaldamento = 160 °C



Figura 52 - Andamento della temperatura dello stampo - Temperatura del mezzo di riscaldamento = 200 °C



Figura 53 – Confronto del consumo di energia dei mezzi di riscaldamento in base alla temperatura

La Figura 53 mette a confronto il consumo energetico dei due mezzi di riscaldamento. Dal grafico si può notare che il consumo energetico del riscaldamento a vapore aumenta gradualmente con l'aumentare della temperatura del mezzo di riscaldamento, mentre diminuisce leggermente quando viene utilizzata l'acqua. La pressione del vapore saturo ad alta temperatura

e dell'acqua surriscaldata aumenta con l'aumento delle loro temperature, per esempio, la pressione del vapore saturo a 220 °C è fino a 23,2 bar. Tale alta pressione potrebbe aumentare il rischio di incidente nonché i costi di produzione. Pertanto, si evince che i metodi di riscaldamento a vapore e ad acqua calda sono più adatti quando la temperatura superficiale della cavità richiesta non è molto alta, fino circa a 180 °C.

Nella fase di raffreddamento, sono stati valutati diversi liquidi refrigeranti con temperature diverse per valutare l'efficienza di raffreddamento. Per sistemi in cui i mezzi di riscaldamento sono vapore o acqua il mezzo refrigerante deve essere acqua poiché i canali in cui passano i fluidi sono i medesimi, di conseguenza alternare fluidi differenti non è possibile per via dei residui, ne comporterebbe una riduzione di efficienza qualora acqua e olio dovessero mescolarsi. Per sistemi riscaldati a vapore o ad acqua, come mezzo di raffreddamento è stata valutata acqua a 20 °C. Poiché è molto difficile ottenere un flusso turbolento per l'olio a bassa temperatura, così da aumentare l'efficienza di scambio termico, la temperatura è stata valutata pari a: 40°C, una temperatura relativamente alta.



Figura 54 – Andamento della temperatura dello stampo nel tempo in base a diversi mezzi di raffreddamento

La Figura 54 fornisce le risposte sulla temperatura media della superficie dello stampo considerando i due mezzi di raffreddamento. Per il raffreddamento ad acqua, l'efficienza di raffreddamento può essere migliorata abbassando la temperatura del fluido stesso, ma il suo effetto non è molto evidente. Pertanto, l'acqua di raffreddamento a temperatura ambiente è sufficiente per il processo di H&C. Anche per il raffreddamento ad olio, l'effetto della temperatura dell'olio sull'efficienza di raffreddamento è molto bassa. Inoltre, si evince che la

velocità di raffreddamento dello stampo con il raffreddamento ad olio è molto più lento di quello ad acqua. In conclusione, poiché il riscaldamento migliore si ottiene mediante vapore, il sistema migliore per questo tipo di processo tecnologico è quello in cui è prevista una fase di riscaldamento mediante vapore d'acqua in pressione ad alta temperatura e una fase di raffreddamento tramite acqua a temperatura ambiente.

Un importante aspetto da tenere in considerazione in questo tipo di tecnologia, rispetto allo stampaggio ad iniezione convenzionale, è la progettazione dei canali di riscaldamento/raffreddamento in quanto hanno il compito di apportare energia termica e rimuoverla nel modo più efficiente, raggiungendo anche zone complesse del componente.

Capitolo 7 - Casi studio

Nel presente lavoro di tesi è stato simulato uno studio di fattibilità di alcuni componenti estetici e infine è stata valutata la possibilità di ottimizzare tale processo. Essendo uno studio preliminare e sperimentale non sono stati valutati aspetti economici che potrebbero avere un impatto notevole sul processo produttivo, a cominciare dal costo dell'unità di controllo H&C fino all'incremento del tempo ciclo. Sono state però valutate situazioni che potrebbero in un secondo momento essere replicate fisicamente. I componenti che sono stati analizzati nel dettaglio sono due, un corpo plancia e una cover. Per motivi di riservatezza i modelli dei componenti non vengono mostrati nella loro interezza ma solo le immagini necessarie alla comprensione del progetto di tesi. I due componenti sono radicalmente diversi tra di loro per forma e dimensioni. L'obiettivo, infatti, è quello di analizzare come l'applicazione dell'Heat&Cool nel processo di stampaggio a iniezione possa influenzare una gamma di componenti caratterizzati da esigenze estetiche più ampia possibile.



Figura 55 - Casi studio

Per una migliore conoscenza del processo di H&C è risultato di fondamentale importanza una progettazione corretta del processo classico di stampaggio ad iniezione così da poter confortare i risultati della simulazione con casi reali.

7.1 Materiali

I materiali utilizzati nelle analisi sono due, un polipropilene per la plancia e un policarbonato per la cover. Anche in questo caso si è cercato di ampliare la ricerca andando a valutare materiali con caratteristiche totalmente diverse tra di loro. I nomi ufficiali dei materiali non sono stati riportati per questione di riservatezza. Un terzo materiale che bisogna conoscere per le analisi che vengono effettuate è quello dello stampo. È stato utilizzato un classico acciaio P20 da stampo.

PP XXX				
Mechanical Properties	Pure Polymer-Anisotropic properties			
Melting Temperature	130°C			
Poisson's ratio ν_{12}	0.4			
Poisson's ratio ν_{23}	0.4			
Modulus E_1 (flow direction)	1850 MPa			
Modulus E_2 (transverse direction)	1490 MPa			
Shear Modulus G ₁₂	618 MPa			
CLTE α_1 (flow direction)	4,82*10^-5 1/K			
CLTE α_1 (transverse direction)	5,63*10^-5 1/K			

7.1.1 Polipropilene

Tabella 2 - Scheda materiale PP



Figura 56 - Grafico Temperatura Capacità termica del PP



Figura 57 – Grafico pVT del PP

Il polipropilene (o polipropene, abbreviato in PP) è un polimero termoplastico. È un polimero estremamente resistente agli agenti chimici e quasi completamente impermeabile all'acqua. Essendo il nero il colore con la maggiore resistenza ai raggi UV viene utilizzato principalmente per questo tipo di componente poiché si tratta di un elemento che è esposto ai raggi del sole per la maggior parte del tempo. Come già anticipato nel "Capitolo 2-La plastica nell'auto" è il materiale maggiormente utilizzato all'interno dell'autoveicolo e dunque quello su cui un eventuale miglioramento attraverso il processo Heat&Cool porterebbe benefici.

7.1.2 Policarbonato

PC XXX			
Mechanical Properties	Pure Polymer-Isotropic properties		
Glass Temperature	145°C		
Poisson's ratio ν	0.4		
Modulus <i>E</i>	2340 MPa		
CLTE a	6,8*10^-5 1/K		
Tabella 3 - Scheda materiale PC			

Il Policarbonato è un materiale che raggiunge temperature più elevate, è stato scelto per effettuare le simulazioni della cover. Le temperature che questo materiale può sopportare

permettono di spingersi a fondo nelle ricerche sulla tencnolgia dell'H&C così da poter valutarne più sfaccetature possibili.



Figura 58 - Grafico Temperatura Capacità termica del PC



Figura 59 - Grafico pVT del PC

7.1.3 Acciaio P20

P20		
Density	7.85 g/cm3	
Thermal conducivity	29-34 W/m K	
Modulus E	205 GPa	
CTE linear	12.8 μm/m °C	
Tabella 4 Schoda materiale D20		

Tabella 4- Scheda materiale P20

7.2 Progettazione Plancia CIM

7.2.1 Scelta punti di iniezione

Il primo passo nella progettazione di un componente realizzato mediante stampaggio ad iniezione è la scelta di uno o più punti attraverso cui iniettare il materiale fuso. La scelta dei punti di iniezione è fondamentale per ottenere un flusso bilanciato, per orientare e modificare la posizione delle linee di saldatura, per evitare che la temperatura cali troppo in fase di riempimento, per evitare fenomeni di esitazioni attraverso zone in cui cambia la sezione del pezzo. Le considerazioni che si fanno per componenti complessi e di dimensioni notevoli come quelli in esame sono molteplici. Di fondamentale importanza è stato il confronto con gli addetti ai lavori.



Figura 60 - Scelta dei punti di iniezione - Plancia

Confrontando diversi casi, non riportati per esigenze di sintesi, è stato valutato un numero di punti di iniezione pari a nove con la disposizione che è possibile vedere in Figura 60. La presenza di un numero elevato di punti di iniezione comporta la formazione di più linee di giunzione. Per aggirare questo problema è possibile, attraverso l'uso di canali caldi,

temporizzare i gate per migliorare il riempimento e modificare la presenza di alcune linee di giunzione.

Per componenti di queste dimensioni è inevitabile l'uso di canali di iniezione caldi, questo perché il fuso impiegherebbe troppo tempo ad arrivare dall'ugello ai gate e rischierebbe di arrivare troppo freddo. È inoltre impossibile pensare di iniettare ad una temperatura troppo alta perché si raggiungerebbe la degradazione del materiale. I gate 1 e 6 sono i gate principali, in sostanza quelli da cui parte il fuso. Gli altri gate si apriranno in due modalità, al passaggio del fuso, ovvero quando il flusso dei gate principali passerà nell'intorno del gate secondario, oppure ad un determinato istante di tempo. Nella Tabella 5 sono state riportate le tempistiche di apertura dei gate.

Temporizzazione Gate				
2	Al passaggio del fuso			
3	Al passaggio del fuso			
4	Al passaggio del fuso			
5	Dopo 3s			
7	Al passaggio del fuso			
8	Dopo 3s			
9	Al passaggio del fuso			

. .

Tabella 5 - Temporizzazione di apertura dei gate secondari - Plancia

Utilizzando questa metodologia il riempimento cambia radicalmente, il risultato è visibile nella Figura 61. Utilizzando questa tipologia di riempimento si ottiene un percorso del fuso più omogeneo e capace di raggiungere anche le parti più complesse del componente in condizioni ottimali. Ogni qualvolta il polimero fuso passa da uno dei gate che si aprono, la temperatura risale poiché vi è l'apporto di nuovo materiale a temperatura di iniezione. Dalla figura è anche possibile notare la nuova configurazione delle linee di giunzione, le quali si presentano in numero inferiore e in zone meno in vista.



Figura 61 – Tempi di riempimento - Plancia

CIM		
Tempo di riempimento	5 s	
Temperatura di iniezione	240 °C	
Temperatura stampo	40 °C	
Tempo di mantenimento	15 s	
Pressione di mantenimento	70% della pressione finale di riempimento	
Tempo di raffreddamento	20 s	
Temperatura mezzo di raffreddamento	30 °C	

7.2.2 Parametri di processo

Tabella 6 - Parametri di processo - CIM - Plancia

Lavorando su un componente molto grande e con una geometria molto complessa è stato difficoltoso trovare i parametri ottimali. Le scelte sono state effettuate basandosi su più simulazioni e cercando un compromesso. Il punto di partenza sono stati i parametri di default consigliati dal software. Questi parametri vengono estrapolati da algoritmi che tengono principalmente conto del materiale e del volume da riempire. Non considerano, o comunque considerano solo in parte, la complessità geometrica e l'utilizzo finale del componente. Dopo

una serie di iterazioni e con il supporto di addetti ai lavori è stato possibile trovare i parametri ottimali di processo. Di fatto i parametri di Input sono un risultato dato da una serie di valutazioni basate sui parametri di Output di ogni fase del processo.

7.2.3 Canali di iniezione

Come già anticipato il presente lavoro di tesi è uno studio preliminare del processo produttivo, non è stata effettuata la progettazione complessiva dello stampo del componente. Lo schema dei canali di iniezione (Figura 62) è una prima valutazione di come potrebbero realmente essere. La fase di schematizzazione dei canali di riempimento è stata basata su progetti precedenti di componenti simili.



Figura 62 - Canali di iniezione - Plancia

7.2.4 Canali di raffreddamento

Nel caso dei canali di raffreddamento invece, ricoprendo un aspetto fondamentale nel processo di H&C, la progettazione è stata approfondita valutando diverse soluzioni.

Come già anticipato nel "Capitolo 6 – Analisi termica dello stampo" la configurazione dei canali di raffreddamento ha un ruolo fondamentale nella realizzazione di un componente di qualità, sia che si tratti di iniezione classica (CIM) sia che si tratti di stampaggio H&C. Il ruolo fondamentale dei canali è quello di apportare e sottrarre il calore in modo omogeneo dal componente. La progettazione risulta complicata perché i canali devono seguire il più possibile le forme della cavità dello stampo e allo stesso tempo non devono risultare troppo vicini ai canali di iniezione, i quali potrebbero risentire del fluido in fase di raffreddamento. Ricordiamo infatti che all'interno dei canali caldi il polimero viene mantenuto alla temperatura di iniezione mediante delle resistenze, la presenza di canali di raffreddamento rischierebbe di comprometterne il corretto funzionamento.



Figura 63 - Canali di raffreddamento iniziali - Plancia

La scelte prese nello schema iniziale, mostrato in Figura 63, si sono basate sulla conformazione del componente e sulla possibile disposizione dei canali di raffreddamento all'interno dello stampo. Come anticipato non è stata eseguita una progettazione approfondita dello stampo.

Di conseguenza non sono stati valutati i sottosquadri e i possibili tasselli mobili presenti, di cui non si è tenuto conto nemmeno per la realizzazione dei canali di raffreddamento. Per permettere al circuito di raffreddamento di raggiungere parti del componente più complesse è stato deciso di utilizzare lo schema Baffle. Si tratta di diaframmi o setti inseriti all'interno dei canali per deviare il percorso del fluido come mostrato in Figura 64.



Figura 64 - Schema baffle

Lo schema finale del sistema di condizionamento dello stampo è mostrato in Figura 65. Dalla stessa figura è possibile anche notare i punti di ingresso e uscita del fluido. L'utilizzo di flussi in controcorrente consente di ottenere una distribuzione della temperatura più omogena come appreso dalla teoria degli scambiatori termici. In fase di progettazione è stato scelto un diametro dei canali pari ad 8 mm. Scegliendo i parametri di raffreddamento è stato possibile anche scegliere il numero di Reynolds del fluido all'interno dei canali così da realizzare una condizione di flusso turbolento.



Figura 65 - Canali di raffreddamento ottimizzati - Plancia

7.3 Risultati della CIM per la plancia

Di seguito vengono riportati i risultati più importanti delle simulazioni di CIM ma soprattutto vengono analizzati quegli aspetti su cui è possibile, attraverso l'uso dell'H&C intervenire per ottenere un prodotto finale di qualità superiore

7.3.1 Linee di giunzione

Come già anticipato nel "Capitolo 3 – Generalità sullo stampaggio ad iniezione" e nel "Capitolo 4 – Heat & Cool" le linee di giunzione hanno un grande impatto sull'estetica del componente e, in alcuni casi, la loro presenza potrebbe anche compromettere le proprietà meccaniche del manufatto.

I criteri per lo studio delle linee di saldatura o di fusione si basa sull'approfondimento di due aspetti:

- L'angolo di incontro dei fronti di flusso
- La temperatura dei fronti di flusso

Per angoli maggiori di 135° si considerano di "fusione" ed avranno una qualità superiore delle linee in cui l'angolo di saldatura sarà minore di 135° e prenderanno il nome di linee di "giunzione". L'esperienza degli addetti ai lavori di FCA ha portato a considerare come angolo discriminante di incontro dei fronti di flusso, un valore pari a 90°. Per valori inferiori le linee risulteranno evidenti, per valori superiori non saranno tali. La temperatura invece deve essere il più vicina possibile alla temperatura di iniezione. Inoltre la differenza di temperatura dei fronti di flusso deve essere all'interno di un determinato range (circa 10°C). Nella Figura 66 analoga alla Figura 38 viene riportato uno schema qualitativo sulla visibilità delle linee di giunzione in un componente realizzato mediante stampaggio ad iniezione.



Figura 66 - Grafico qualitativo della relazione tra la visibilità delle linee di giunzione e la temperatura

Le linee di saldatura nel componente in esame che si generano in fase di iniezione sono molte, solo alcune però richiedono un'analisi approfondita poiché sono quelle che si troveranno in zone a vista del componente. Le zone da studiare sono state evidenziate nella Figura 67 e nella Figura 68. La Figura 67 in particolare mette in evidenza l'angolo di incontro delle linee di saldatura. Nell'immagine sono state evidenziate le linee di giunzione che si incontreranno a meno di 90°, essendo questo il parametro di riferimento utilizzato in FCA. Le zone in cui si troveranno linee di saldatura, ma per le quali l'angolazione non risulta un parametro modificabile mediante H&C, non sono state approfondite in questo studio. Per quanto riguarda la temperatura invece sono state effettuate analisi più accurate, con l'obiettivo di capire la flessibilità del modello di simulazione della tecnologia H&C analizzata nel presente progetto di tesi. La temperatura di iniezione è di 250 °C, questo comporta che le linee che si generano a ridosso delle griglie dei bocchettoni dell'aria nell'intorno della temperatura limite di visibilità, hanno dunque una maggiore probabilità di essere visibili e riconoscibili sul componente finito.



Figura 67 - Angoli di incontro dei fronti di flusso - Plancia



Figura 68 – Temperatra delle linee di saldatura – CIM - Plancia

7.3.2 Riempimento

In fase di riempimento i parametri da valutare sono diversi, quelli che però maggiormente influenzano il processo sono la temperaturara del fuso e il tempo di riempimento.

Il tempo di riempimento è stato già valutato in fase di scelta dei punti di iniezione e deve essere tale da permettere al fuso di riempire tutte le zone del componente. La temperatura invece deve rimanere a un livello tale per cui il fuso non solidifichi prima di aver completato il riempimento. Nella Figura 69 è possibile visualizzare una mappa della temperatura del componente. I risultati mostrati mettono in evidenza come tutto il componente sia completamente riempito. La tempratura superficiale è molto bassa, questo perché il fuso, a contatto con lo stampo, cede calore e la temperatura scende avvicinandosi a quella dell'acciaio di cui è fatto lo stmapo. Per via di questo meccanismo di trasmissione del calore si genera lo strato congelato. La finitura superficiale del componente non sarà ottimale perché lo strato congelato si genera in fase di movimentazione del fuso e non al termine del riempimento.



Figura 69 – Temperatura a fine mantenimento – CIM - Plancia

In alcune zone la tempratura è invece ancora abbastanza alta grazie all'apertura temporizzata dei gate che riforniscono la cavità con nuovo materiale a temperatura di iniezione.

Il fuso non deve solidificare in questa fase perché altrimenti non subirebbe l'effetto della pressione di mantenimento.

Tra quelli valutati il risultato che viene mostrato è quello che maggiormente soddisfa i requisiti per l'ottenimento di un buon componente.

7.3.3 Mantenimento

In fase di mantenimento, mediante il sistema di iniezione, nonostante il fuso abbia completamente riempito la cavità dello stampo, viene iniettata un'ulteriore quantità di materiale e dunque viene applicata una pressione con l'obiettivo di impaccare il materiale e limitare le deformazioni causate dal ritiro.

Nella Figura 70 viene mostrata la mappa delle pressioni durante una fase del mantenimento. Quando la pressione risultante è nulla è perché il fuso si è solidificato. L'obiettivo nello stadio di progettazione di questa fase è quello di avere una pressione il più possibile uniforme all'interno della cavità perché non si verifichino fenomeni di sovraimpaccamento o sottoimpaccamento.



Figura 70 - Pressione di mantenimento - CIM - Planica

Anche in questo caso la complessità geometrica del componente è risultata essere un grosso ostacolo per la progettazione. La pressione imposta per il mantenimento dipende dalla pressione finale della fase di riempimento. In questo caso si è fissato un livello di pressione pari al 70%. Ancora una volta, i risultati ottenuti sono frutto di una serie di iterazioni e vengono riportati solo quelli ritenuti migliori.

7.3.4 Raffreddamento

Al termine del mantenimento inizia la fase di raffreddamento. Si estrae il calore dal componente, attraverso l'impianto di condizionamento visto in precedenza, per portarlo alla temperatura di estrazione. Questo parametro dipende dal materiale e corrisponde a un valore per cui il materiale, non solo risulta solido, ma possiede comunque un'adeguata resistenza superficiale per non subire deformazioni in fase di estrazione. Nella Figura 71 è riportata la fase di solidificazione del fuso all'interno della cavità. La parte in blu è quella che ha una temperatura superiore alla temperatura di solidificazione del materiale (126°C), anche se a fine raffreddamento non tutto il materiale è solidificato, ipotesi plausibile, soprattutto nel caso di componenti di queste dimensioni. È fondamentale che risulti solidificata almeno la superficie esterna del componente.



Figura 71 - Fasi di solidificazione del fuso – CIM - Plancia

7.4 Applicazione dell'Heat & Cool sulla plancia

Dopo aver analizzato il processo di stampaggio ad iniezione classico (CIM) per il componente in esame è stato possibile applicare la tecnica dell'H&C. La scelta dei tempi e delle temperature di riscaldamento e raffreddamento scelte è basata sulle analisi effettuante in precedenza nel "Capitolo 6 – Analisi termica dello stampo".

Dopo diversi studi di combinazioni di tempi e temperature dei mezzi di riscaldamento e raffreddamento, il ciclo di Heat&Cool ottimale, per il componente in esame, è risultato quello rappresentato in Figura 72.



Figura 72-Tempi e temperature nelle fasi del H&C - Plancia

Lo schema indica che, come appreso dalla teoria, già in fase di apertura e chiusura dello stampo comincia il riscaldamento dello stesso attraverso vapore ad alta pressione a 200 °C.

Il riscaldamento prosegue anche in fase di riempimento e successivamente la fase di raffreddamento viene effettuata mediante acqua a 20 °C. I risultati riportati in Figura 73 mostrano come la temperatura superficiale del fuso è molto alta. Nel dettaglio si può osservare la temperatura superficiale in una zona del componente, la quale risulta essere pari a 138 °C. Questo dato conferma che le scelte sui tempi del riscaldamento e sulla temperatura del mezzo sono corrette in quanto la superficie del componente è a una temperatura superiore a quella di solidificazione. Come anticipato questa tecnologia comporta elevati stress termici sul materiale del componente e sull'acciaio dello stampo con conseguente riduzione della vita utile dell'attrezzatura.



Figura~73-Temperatura~al~termine~della~fase~di~iniezione~-~H&C~-~Plancia



Figura 74 – Confronto tra la temperatura al termine dell'iniezione tra la plancia realizzata mediante CIM e quella realizza mediante H&C - Plancia

Nella Figura 74 sono state messe a confronto le temperature al termine della fase di iniezione nel caso di H&C e nel caso di CIM. Il confronto è stato fatto per mettere in risalto la differenza di temperatura superficiale dei due metodi. Inoltre è possibile apprezzare l'omogeneità della temperatura nel caso dell'H&C. L'omogeneità è segno di una corretta progettazione del sistema di condizionamento dello stampo. Un fenomeno che non si deve verificare è che ci siano zone in cui la temperatura dello stampo superi la temperatura di fusione del materiale e zone in cui questo non avviene. Questa condizione comporterebbe segni evidenti sul componente in quanto

in alcune zone si rischierebbe la formazione dello strato congelato caratteristica che, tramite l'H&C, si cerca di eliminare.



Figura 75 - Temperatura delle linee di giunzione - H&C - Plancia

Nella Figura 75 è possibile visualizzare la nuova configurazione delle linee di giunzione che si trovano al di sotto della temperatura limite di visibilità. L'effetto positivo dell'H&C è dunque immediatamente percepibile. La percentuale di linee la cui temperatura è inferiore alla temperatura limite di visibilità è scesa del 60%. Il problema è che mediante il software non è possibile avere un'effettiva stima dell'estetica del componente che per questo tipo di analisi risulterebbe fondamentale.

Il riscaldamento dello stampo comporta un allungamento del tempo ciclo, ma utilizzando una temperatura del mezzo di raffreddamento più bassa è possibile realizzare un condizionamento dello stampo che non implica un'eccessiva estensione della durata del processo. Nella Figura 76 sono riportate le fasi di solidificazione del fuso durante il nuovo processo H&C.

Il componente richiede maggiore tempo per solidificare completamente. La quantità di materiale fusa al termine del riempimento è prossima al 100 %, compresa la superficie a contatto con lo stampo. Il raffreddamento risulta abbastanza omogeneo nonostante la complessità della plancia.



Figura 76 - Fasi di solidificazioni del fuso - H&C – Plancia

La progettazione dei canali, dei tempi e delle temperature di raffreddamento risulta dunque corretta. Anche in questo caso al termine del raffreddamento c'è ancora una percentuale di fuso ma si trova all'interno della guaina solidificata. Una volta aperto lo stampo la temperatura del componente plastico viene abbattuta arrivando rapidamente alla temperatura ambiente. In questa fase si ottiene la completa solidificazione del materiale.

La Figura 77, estrapolata direttamente dal software, mostra come effettivamente la temperatura media della superficie della parte oscilli intorno alla temperatura di fusione del componente. È un'ulteriore dimostrazione della correttezza delle scelte progettuali prese in fase decisionale.



Figura 77 - Grafico tempo temperatura media della superficie della parte – H&C - Plancia



Figura 78 - Confronto Forza di chiusura - Plancia

Una conseguenza dell'H&C è anche una riduzione della pressione in fase di mantenimento e una conseguente riduzione della forza di chiusura richiesta dalla pressa. La Figura 78 mette in relazione le forze di chiusura nei due processi CIM e H&C. Nel caso di H&C si ha una riduzione del picco del 10%. Si ha però un prolungamento dell'applicazione della forza a causa della maggiore percentuale di fuso ancora presente all'interno della cavità dovuta alla temperatura più alta per la fase di riscaldamento dello stampo.



Figura 79 – Deformazione percentuale – H&C - Plancia

L'aspetto che maggiormente limita l'utilizzo dell'H&C in ambito industriale è però la deformazione. In Figura 79 è riportata la mappa della deformazione percentuale. Dalle analisi svolte è stata esclusa la percentuale di ritiro del materiale pari allo 0,5%. La percentuale riportata nella mappa tiene esclusivamente conto degli spostamenti percentuali, rispetto alle misure nominali, dovute all'aspetto termico. Come anticipato questo tipo di difetto è quello che si ritrova maggiormente nei prodotti stampati e in questo caso viene addirittura amplificato. Il problema è il coefficiente di ritiro che non è distribuito uniformemente sul componente a causa degli elevati stress termici. In particolare la deformazione percentuale analizzata mette in relazione la distanza che dovrebbero avere le zone del componente rispetto a un punto di riferimento, che è stato considerato essere la zona centrale, e la distanza effettiva. Per

intervenire su questo parametro le possibilità sono diverse, solitamente si interviene sulla pressione di mantenimento oppure sul condizionamento dello stampo.

I risultati che sono stati riportati sono quelli considerati migliori tra le varie simulazioni effettuate. In alcuni casi si raggiunge una deformazione del 1,8%, ma i valori non risultano essere in linea con le specifiche di tolleranza della plancia. Bisognerebbe dunque intervenire. Qualora si volesse utilizzare in produzione la tecnologia H&C, sulla progettazione del pezzo, ad esempio aumentando la resistenza del componente mediante nervature, oppure sullo stampo. Si potrebbe modificare la cavità dello stesso così da avere, dopo il raffreddamento, la solidificazione e le distorsioni, il componente in linea con le tolleranze richieste. A causa della limitata accuratezza dei risultati di simulazione l'approccio di modifica della cavità dello stesso fisici in via preliminare.

7.5 Progettazione Cover CIM

Dopo i risultati, non ottimali sulle deformazioni, ottenuti sul componente plancia, si è deciso di analizzare come un particolare più semplice come una cover reagisca al processo di H&C. Per ottenere dei risultati in linea con la precedente analisi si è deciso di seguire per la cover lo stesso approccio della plancia. Il punto di partenza è stata l'analisi del processo standard per poi, in un secondo momento applicare il sistema H&C.



7.5.1 Scelta punti di iniezione

Figura 80 – Possibili alternative con tre punti di iniezione - Cover

Anche in questo caso il primo passo è stata la scelta dei punti di iniezione del componente. Nonostante sia un componente più semplice rispetto al precedente, la cover è di notevole dimensioni e presenta zone complesse per il transito del fuso. Anche in questo caso sono state valutate diverse opzioni, alcune riportate in Figura 80 e Figura 81.

Ovviamente la presenza di un foro centrale e di più punti di iniezione ha reso inevitabile la presenza di linee di saldatura.



Figura 81 - Possibili alternative con quattro punti di iniezione - Cover

Sono state valutate dunque più soluzioni, alla fine è stata scelta una configurazione che permettesse di ottenere un corretto riempimento ma che comportasse la presenza di una linea di giunzione evidente in una zona facilmente visibile sul componente. Questa scelta è stata effettuata perché l'obiettivo del presente lavoro di tesi non è la migliore progettazione del processo produttivo del componente ma la possibilità di investigare l'efficacia della tecnologia H&C valutandone tutte le possibili sfaccettature. Di base, però, è necessaria una corretta simulazione dello stampaggio classico (CIM) altrimenti i risultati di confronto non sarebbero validi. Anche in questo caso si è dimostrato di fondamentale importanza il confronto con gli addetti ai lavori e la consultazione di progetti produttivi già consolidati. Le scelte hanno portato all'utilizzo di canali caldi e dunque alla possibilità di temporizzazione dei gate. A differenza del caso precedente sono stati valutati anche i canali freddi, ma è risultato subito eccessivamente complessa la gestione della temperatura di iniezione e dei tempi di riempimento per la soluzione a canali freddi. I risultati ottenuti non sono stati considerati in quanto privi di utilità. La configurazione finale scelta per le analisi effettuate è quella riportata in Figura 82.

Il gate centrale è stato scelto come gate principale e i due laterali come secondari. Secondo progettazione i gate secondari si aprono nel momento in cui il fuso proveniente dal gate centrale passa nel loro intorno.


Figura 82 - Punti di iniezione finali - Cover

7.5.2 Parametri di processo

CIM		
Tempo di riempimento	3 s	
Temperatura di iniezione	310 °C	
Temperatura stampo	100 °C	
Tempo di mantenimento	20 s	
Pressione di mantenimento	70% della pressione finale di riempimento	
Tempo di raffreddamento	25 s	
Temperatura mezzo di raffreddamento	80 °C	

Tabella 7 - Parametri di processo – CIM - Cover

I parametri di processo sono molto influenzati dalla differenza di materiale, in particolare le temperature di iniezione e dello stampo.

C'è da specificare che i parametri riportati sono quelli ricavati al termine della progettazione del processo produttivo, sono dunque frutto di una serie di iterazioni basate su tutti i risultati ottenuti per le fasi di riempimento, mantenimento e raffreddamento.

Utilizzando un materiale come il Policarbonato i range di temperatura in cui si lavora sono molto più estremi. In fase di raffreddamento, infatti, è stata utilizzata acqua a 80 °C, questo significa che bisogna utilizzare una caldaia per riscaldare in precedenza il fluido e non è possibile utilizzare acqua a temperatura ambiente.

7.5.3 Canali di iniezione



Figura 83 – Canali di iniezione - Cover

Come per la plancia è stato ipotizzato uno schema dei canali di iniezione del componente basandosi su progetti simili e sotto la supervisione di un addetto ai lavori.

7.5.4 Canali di raffreddamento

Anche nel caso della cover il lavoro di progettazione dei canali di raffreddamento è stato di fondamentale importanza. Per la plancia la sfida più impegnativa era data dalla dimensione e dalla complessità geometrica del pezzo. Per la cover l'obiettivo era quello di gestire nel migliore dei modi la differenza termica in quanto le temperature in gioco sono più estreme. Si è optato per due circuiti di iniezione, uno superiore e uno inferiore. Questa configurazione comporta tempi maggiori di riscaldamento e raffreddamento dello stampo ma riduce, seppur di poco, gli shock termici. Le zone verdi sono dei collegamenti, esterni allo stampo, tra i canali. Il risultato

finale è riportato in Figura 84. Anche in questa simulazione, i canali veritcali che si vedono sono stati modellati come Baffle.

L'uso del Policarbonato però, come già anticipato, richiede mediamente temperature più alte e situazioni più estreme. Di conseguenza si è scelta una dimensione dei canali maggiore rispetto a quelli realizzati nella progettazione della plancia. In questo caso i canali hanno una dimensione di 14 mm. Il numero di Reynolds anche in questo caso è stato impostato tale da avere un flusso turbolento all'interno dei canali.



Figura 84 – Schema canali di raffreddamento - Cover

7.6 Risultati della CIM per la cover

7.6.1 Linee di giunzione



Figura 85 – Angolo di incontro dei fronti di flusso – CIM - Cover

La linea di giunzione che si genera in questo componente, causata dalla presenza del foro, come è stato già anticipato, è voluta. In fase di analisi sono stati valutati anche casi in cui le linee di saldatura risultavano più piccole e nascoste. In quel caso si sarebbe raggiunta la corretta progettazione del processo produttiovo per realizzare il componente, ma non è questo lo scopo della ricerca. L'angolo di incontro dei fronti di flusso è nell'intorno di 90°, questo vuol dire che è nell'intorno del valore giudicato minimo per la visibilità. Di conseguenza un effettivo miglioramento della qualità della giunzione può essere apportata dal riscaldamento dello stampo.



7.6.2 Riempimento

Figura 86 - Temperatura alla fine del riempimento - CIM-Cover

In fase di scelta dei parametri di iniezione sono state valutate anche in questo caso diverse opzioni. I parametri su cui era possibile intervenire per migliroare la fase di riempimento erano principalmente la temperatura di iniezione, la temperatura dello stampo e il tempo di

riempimento. Sono state valutate diverse opzioni e la scelta finale ha condotto ai risultati mostrati in precedenza.

La fase di riempimento valutata per il componente è ottimale. Le zone agli estremi del componente terminano il riempimento praticamente nello stesso istante. Inoltre la mappa di temperatura riportata in Figura 86 mostra come ci sia una distrubuzione uniforme sul componente. Le estremità riportano una temperatura più alta a causa dell'apertura ritardata dei gate secondari che apportano materiale alla temperatura di iniezione. Questo strategia permette di avere una temperatura adeguata nelle zone che altrimenti rischierebbero di essere raggiunte da un fuso a temperatura troppo bassa.

7.6.3 Mantenimento



Figura 87 – Pressione all'inizio del mantenimento – CIM - Cover

La fase di mantenimento anche in questo caso è stata il frutto di una serie di iterazioni. In fase di processo il fuso deve essere tenuto uniformemente alla stessa pressione per ottenere un'uniformità di densità. Il parametro principale da valutare dunque è la pressione e la sua omogeneità all'interno della cavità. In Figura 87 è riportata la mappa di pressione. È possibile notare come essa sia pressoché uniformemente distribuita con uno stesso valore, e questa è la configurazione migliore tra quelle valutate in fase di sperimentazione.

La Figura 88 riporta la densità al termine della fase di mantenimento. Anche questo risultato è ottimo visto che il valore è praticamente equivalente in ogni punto del componente.





7.6.4 Raffreddamento

Un raffreddamento ottimale è garantito principalmente, come già detto, da una corretta progettazione del sistema di condizionamento e dalla corretta scelta della temperatura di raffreddamento. Le fasi di solidificazione del componente sono riportate in Figura 89. Al termine del riempimento tutto il materiale è ancora fuso a eccezione dello strato congelato. Al termine del raffreddamento invece tutto il materiale è completamente solido. Questo vuol dire che probabilmente sarebbe stato sufficiente un tempo di raffreddamento minore prima dell'estrazione del pezzo. Queste scelte hanno influenza in produzione poiché occupare lo stampo inutilmente fa diminuire la produttività e incide negativamente sui costi. In questa fase si è optato per non effettuare nuovamente il calcolo per valutare un tempo di raffreddamento più adeguato in quanto i tempi di simulazioni sono relativamente lunghi. Per un componente delle dimensioni della Cover un'analisi completa richiede circa 7h di calcolo.



Figura 89 - Fasi di solidificazione - CIM - Cover

7.7 Applicazione H&C sulla cover

Ultimata la fase di analisi dello stampaggio classico si è passati ad un'analisi accurata degli effetti della tecnologia Heat&Cool sul componente. Così come per i parametri scelti per il processo standard, la scelta degli Input ha richiesto una serie di simulazioni e di iterazioni per la ricerca dei parametri migliori per il caso in esame.



Figura 90 - Tempi e temperature nelle fasi del H&C - Cover

I fluidi di riscaldamento e raffreddamento utilizzati in fase di simulazione sono stati gli stessi di quelli analizzati nel caso precedente. I risultati ottenuti visti nel "Capitolo 6 – Analisi termica dello stampo" sono stati sfruttati anche in questo caso come punto di partenza. Il mezzo di riscaldamento scelto è il medesimo del caso precedente, vapore a 200 °C. Per quanto riguarda il raffreddamento si è preferito utilizzare un valore della temperatura dell'acqua più alto, in particolare 80°C, perché le temperature entro cui lo stampo deve rimanere sono molto alte nel caso del PC. Si sarebbe potuto realizzare un modello in cui si sfrutta un fluido più freddo per meno tempo. Tuttavia questo è sconsigliato per evitare cicli termici troppo elevati sullo stampo che ridurrebbero la sua vita utile, la quale risulta già molto sollecitata applicando questo tipo di tecnologia.

Il software non è in grado di rilevare aspetti come lo shock termico del materiale dello stampo, ma si è comunque preferito realizzare un modello che in un secondo momento potrebbe essere utilizzato come caso di studio per sperimentazioni fisiche.

I risultati ottenuti in questa analisi sono molto positivi. La temperatura superficiale del componente al termine della fase di riempimento è superiore a 145°C, temperatura di transizione vetrosa del materiale. La Figura 91 mostra in dettaglio la mappa di temperatura del componente e di una sezione. La temperatura delle zone in cui il materiale fuso è a contatto con lo stampo sono in un range che varia tra i 160 °C e i 190 °C circa. Internamente invece il fuso si trova a una temperatura molto alta che in alcune zone supera la temperatura di iniezione. Questo è dovuto al calore che internamente il fuso sviluppa per attrito.



Figura 91 - Temperatura in fase di riempimento – H&C-Cover



Figura 92 – Confronto delle temperature dei fronti di flusso - Cover

La Figura 92 mostra un confronto della temperatura alla quale, il fronte di flusso, attraversa le aree del componente. Si può notare come la tecnologia H&C apporti un significativo miglioramento alle linee di giunzione. In questo caso c'è infatti un incremento superiore di circa il 10% della temperatura nella zona di giunzione dei flussi. Si potrebbe ulteriormente migliorare questo aspetto ma si rischierebbe di incorrere in difetti di altro tipo. Inoltre la temperatura non deve superare valori limite per evitare segni di bruciatura sul componente. Come è possibile osservare in Figura 93, il tempo per arrivare alla temperatura di solidificazione è molto lungo.

A differenza del CIM al termine del raffreddamento, infatti, ci sono ancora alcune zone di materiale allo stato fuso.



Figura 93 – Fasi di solidificazione – H&C – Cover

Come già descritto in precedenza questo non risulta essere un problema. Tuttavia per aumentare la temperatura dello stampo bisognerebbe o utilizzare un mezzo di riscaldamento più caldo, scelta discutibile essendo già a 200 °C, oppure bisognerebbe prolungare il tempo di riscaldamento. Aumentando la temperatura dello stampo in fase di riempimento bisognerebbe migliorare il raffreddamento in un secondo istante. Anche in questo caso le strade sono due. Si potrebbe ridurre la temperatura dello stampo, ma questa non è una scelta percorribile, oppure aumentare il tempo di raffreddamento. In sintesi per aumentare l'efficacia dell'effetto

dell'H&C bisognerebbe prolungare i tempi di riscaldamento e raffreddamento. Questa strada non è stata percorsa in quanto i tempi ciclo sono già stati incrementati del 30% a discapito della produttività. Come già evidenziato lo scopo del presente lavoro di tesi è quello di analizzare il processo dell'Heat & Cool ma allo stesso tempo verificarne un possibile impiego in produzione. Per questo motivo sono state simulate e riportate solo soluzioni realizzabili. Analizzare a fondo situazioni estreme potrebbe essere interessante per investigare più a fondo questo tipo di tecnologia.



Figura 94 - Grafico tempo temperatura media della superficie della parte – H&C – Cover

La Figura 94 riporta l'andamento della temperatura media della superficie della cavità, effettuando una divisione delle varie fasi del ciclo. All'inizio del riempimento la temperatura media è tra i 155 °C e i 165 °C, adeguatamente sopra la temperatura di transizione vetrosa del materiale. Successivamente la temperatura raggiunge il picco in fase di iniezione, quando il fuso iniettato a 310 °C entra in contatto con lo stampo. Quando viene fatto circolare il fluido di raffreddamento la superficie si raffredda gradualmente con un gradiente di raffreddamento pari a 0.6 °C/s. Terminato il raffreddamento, inizia nuovamente la fase di riscaldamento dello stampo per riportarlo alla temperatura di inizio ciclo.

La Figura 95 mette a confronto le forze di chiusura dello stampo nel processo classico (CIM) e nell'H&C. Anche in questo secondo caso di studi il CIM ha un picco più alto, ma il tempo in cui quella forza deve essere mantenuta risulta maggiore nel caso dell'H&C. per quest'ultimo caso la riduzione del tonnellaggio di chiusura è di circa il 10%. Questo risultato si trova in linea con quelli ottenuti nel caso della plancia.



Figura 95 - Confronto Forza di chiusura - Cover

Il risultato più importatnte però è mostrato in Figura 96. Il confronto è svolto sulla direzione della lunghezza della cover, la quale è la dimensione più importante. A differenza del caso della plancia in cui le deformazioni maggiori superavano 1'1,5%, in questo caso i risultati ottenuti sono decisamente miglori. Il punto di riferimento è il baricentro del componente. La deformazione è di circa 0,5%. Questo risultato è di fondamentale importanza, perché in linea con le tolleranze di produzione. I risultati di simulazione dimostrano che la qualità della cover potrebbe essere effettivamente migliroata mediante il processo dell'Heat & Cool.



Figura 96 - Confronto della deformazione percentuale - Cover

Capitolo 8 - Conclusioni

La maggior parte dei problemi derivanti dall'ottimizzazione dei sistemi di ingegneria sono essenzialmente problemi multicriteri. In caso di obiettivi contraddittori, non esiste un'unica soluzione globale ed è spesso utile determinare un insieme di soluzioni che si adattino ad un insieme di soluzioni predeterminate per una definizione ottimale. Nella valutazione di qualsiasi sistema di stampaggio, il problema è la selezione di valori per un certo numero di variabili accoppiate, focalizzando l'attenzione su una singola variabile obiettivo, destinata a quantificare le prestazioni e la misurare la qualità della decisione. Questo obiettivo è massimizzato (o ridotto al minimo), fatti salvi i vincoli che possono limitare la decisione. È già noto che le variabili di un progetto o processo sono interdipendenti, e raggiungere l'equilibrio ottimale è complesso. Una delle principali sfide nel mondo della produzione è, aumentare le prestazioni diminuendo i costi. I vantaggi economici che si ottengono con il miglioramento di un aspetto del processo sono normalmente ottenuti riducendo i punti di inefficienza già presenti in un sistema.

Gli studi e le simulazioni vanno verso la continua ricerca di un sistema ottimale e dunque i risultati ottenuti e mostrati sono una delle possibili alternative del processo produttivo. Nello sviluppo della tesi si è cercato di valutare una delle migliori soluzioni cercando compromessi che minimizzassero determinati tipi di errore piuttosto che altri. La ricerca ha confermato quanto appreso dalla teoria relativamente al miglioramento teorico della qualità superiore della finitura superficiale del componente finale. Anche le analisi effettuate sulle linee di saldatura hanno condotto a risultati incoraggianti. Una temperatura maggiore è sinonimo di minore visibilità sul componente finale. Poiché, quindi, non ci sono dubbi sui vantaggi in termini di qualità, una questione importante diventa la realizzabilità del processo. Componenti di grandi dimensioni non si prestano a questo tipo di tecnologia in quanto risulta eccessivamente difficile controllare le distorsioni causate dall'effetto termico. Inoltre, nel caso della plancia i possibili aumenti dei costi di produzione con la nuova tecnologia, non sarebbero giustificati in quanto si tratta di un componente che presenta solo alcune zone effettivamente in vista all'interno dell'abitacolo. Molta della superficie della plancia viene ricoperta con elementi estetici. Viceversa nel caso della cover l'applicazione del processo di Heat & Cool potrebbe essere effettivamente perseguibile. Le distorsioni sono controllabili e trattandosi di un componente dalla forte valenza estetica beneficerebbe molto di un incremento della qualità superficiale.

Un ulteriore aspetto da prendere in considerazione è la scelta del materiale. Un materiale come il Policarbonato si è mostrato più adatto al processo H&C poiché in grado di sopportare situazioni più estreme in termini di temperatura e pressione. Il Polipropilene invece si è mostrato meno incline a condizioni particolari come quelle che si generano in questo tipo di tecnologia. Un possibile proseguimento di questa attività di ricerca potrebbe essere condotto sulla scelta di un particolare tipo di Polipropilene più adatto all'H&C, per esempio rinforzato con fibre di vetro. L'idea di approfondire le analisi di questo materiale sono dovute al fatto che esso è già ampiamente presente all'interno dell'autoveicolo e dunque un eventuale upgrade sarebbe applicabile a diversi componenti.

Il naturale proseguimento di questo lavoro di tesi sarebbe la validazione dei risultati delle simulazioni di processo con sperimentazioni fisiche nella produzione dei componenti reali.

Bibliografia

- [1] NHTSA, Investigation of Opportunities for Lightweight Vehicles Using Advanced Plastics and Composites, 2012.
- [2] Association of plastics manufacterers in Europe, *Plastics a material of choices for automotive industries*, 2009.
- [3] K. Szeteiova, Automotive materials plastics in automotive markets today, 2010.
- [4] «https://www.plasticsconverters.eu/automotiveandtransport,» [Online].
- [5] K. S. Whiteley, T. G. Heggs, H. Koch, R. L. Mawer e W. Immel, «Polyolefins,» Ullmann's Encycloperdia of industrial Chemistry, 2005.
- [6] M. Parvin e J. G. Williams, «The effect of temperature on the fracture of polycarbonate,» *Journal of material science*, 1975.
- [7] O. Bayer, «Das Di-Isocyanat-Polyadditionsverfahren (Polyurethane),» Angewandte Chemie, 1947.
- [8] P. Stuart, Practical guide to polyvinyl chloride, iSmithers Tapra Publishing, 2005.
- [9] Dynalab Corp, Plastic properties of ABS, 2010.
- [10] M. I. Kohan, S. A. Mestemacher, R. U. Pagliagan e K. Redemond, «Polyamides,» *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 2003.
- [11] W. George, «PS polystyrene,» in Hanbook of polymers, 2012.
- [12] IUPAC Recommendations, Compendium of Polymer terminology and nomenclature, 2008.
- [13] M. C. Wapler, I. Dragonu, D. v. Elverfeldt, M. Zaitsev e U. Wallarbe, Magnetic properties of materials for MR engineering, micro-MR and beyond, 2014.
- [14] makeitfrom, Polymethylmethacrylate (PMMA, Acrylic), 2015.
- [15] «Polybutylene terephthalate,» in CHEMICAL COMPOUND.
- [16] A. K. v. d. Vegt e L. E. Goavert, Polymeren, van keten tot kunstof, 2005.
- [17] «Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) Plastic,» 2017. [Online]. Available: https://plastics.ulprospector.com/generics/8/acrylonitrile-styrene-acrylate-asa.
- [18] F. M. Ashby, Materials Selection in mechanical design, ButterworthHeinemann, 2005.
- [19] B. S. Patty, C. M.L. e S. N.A., «Low Gloss ABS Advancements for Automotive Interior Components,» SAE international journal, 2006.

- [20] P. Naughton, J. Torrger e B. Bowser, «A New Approach to Hybrid Font-End System,» *SEa International journal*, 2002.
- [21] R. Gehm, «Material Innovations,» SEA International journal, 2007.
- [22] J. Schramm, «Design Consideration for the Use of Composite Materials in Intake Manifolds and Fuel Rails,» SEA International journal, 1992.
- [23] A. Tullo, «Polycarbonate,» Chemical & Engineering News, n. 3, 04 2001.
- [24] C. I. Weir, Introduction to Injection Molding, 1975.
- [25] S. A. Salvi, Plastica Tecnologia Design, Milano: Hoepli, 1997.
- [26] H. V. T. A. Osswald, L.-S. Turng e P. Grammann, Injection Molding Handbook, Vorwort, 2007.
- [27] Yasakawa America Inc., «Yasakawa America,» [Online]. Available: https://www.yaskawa.com/site/Industries.nsf/applicationDoc/appinjmold.html.
- [28] M.-L. Wang, R.-Y. Chang e C.-H. Hsu, Molding Simulation: Theory and Practice, Munich: Carl Hanser Verlag.
- [29] M. Guaita, F. Ciardelli, F. L. Mantia e E. Pedemonte, Fondamenti di Scienza dei Polimeri, Pisa: Pacini Editore, 1999.
- [30] S. Brukner, G. Allegra, M. Pegoraro, F. L. Mantia e E. Edises, Scienza e Tecnologia delle Materie Plastiche, Napoli, 2001.
- [31] B. M. Douglas, Plastic Injection Molding: Manufacturing Process Fundamentals, Society of Manufacturing Engineers, 1996, p. 277.
- [32] Dong Guan Sincere Tech, «plasticmold.net,» [Online]. Available: https://www.plasticmold.net/injection-moulding/.
- [33] M. Messori, «Tecnologie di Trasformazione dei Materiali Polimerici,» Modena.
- [34] N. Ivascu e C. Fetecau, «Dynamic Temperature Control in Injection Molding with New Conformal Heating/Cooling System,» THE ANNALS "DUNĂREA DE JOS" OF GALAŢI FASCICLE V, TECHOLOLOGIES IN MACHINE BUILDING, 2010.
- [35] «Seven Key Advantages of Hot Runner System,» 2002. [Online]. Available: https://www.moldmakingtechnology.com/blog/post/seven-key-advantages-of-hotrunner-systems.
- [36] Fallows Associates Plastics Consultants, [Online]. Available: https://www.fallowsapc.com/services/failure-analysis/process/.
- [37] YUDO, [Online]. Available: http://www.yudo.com/.

- [38] M. Kurt, Y. Kanyak e O. Kamber, «Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts.,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*, pp. 571-578, 2010.
- [39] K. M. B. Jansen, D. J. V. Dijk e M. H. .. Husselman, «Effect of Processing Conditions on Shrinkage in Injection Molding,» *Polymer Engineering and Science*, vol. 38, n. 5, 1998.
- [40] Nagahanumaiah e B. Ravi, «Effects of injection molding parameters on shrinkage and weight of plastic part produced,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 15, n. 3, pp. 179-186, 2009.
- [41] S. Mihila, D. Chira, I. Horge e V. Muset, «Study Regarding the Determination of the Cooling Time in Product Plan Shape from Plastical Materials Processing by Injection,» *Fascicle of Management of Technological Engineering*, vol. 6, n. 16, 2007.
- [42] Z. Huang, «The optimal Design of Injection mold Cooling System,» Advanced Materials Research, Vol. %1 di %2490-495, pp. 2647-2651, 2012.
- [43] S. Hong, I. Min, K. Yoon e J. Kang, «Effects of adding injection e compression to rapid heat cycle molding on the structure of a light guide plate,» *Journal of Micromechanics* and Microengineering, vol. 24, 2014.
- [44] S. C. Chen, Y. W. Lin, R. D. Chien e H. M. Li, «Variable mold temperature to improve surface quality of microcellular injection molded parts using induction heating technology,» *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 27, pp. 224-232, 2008.
- [45] D. G. .. Yao, T. E. .. Kimerling e B. Kim, «High-frequency proximity heating for injection molding application,» *Polymer Engineering & Science*, vol. 46, pp. 938-945, 2006.
- [46] P. C. Chang e S. J. Hwang, «Simulation of infrared rapid surface heating for injection molding,» *Internatioal Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, n. 21-22, pp. 3846-3854, 2996.
- [47] S. C. Chen, N.T.Chang, Y. C. Chen e S. M. wang, «Simulation and application of injection-compression molding,» *journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 18, n. 8, pp. 724-243, 1999.
- [48] G. Wang, G. Zhao, H.P.Li e Y. Guan, «Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding process, respectively, with steam heating and electric heating,» *Materials and Design*, vol. 31, n. 1, pp. 382-395, 2010.
- [49] X. P. Li, G. Q. Zhao, Y. J. Guan e M. X. Ma, «Oprtimal design of heating channels for rapit heating cycles injection mold based on response surface and genetic algorithm,» *Materials and DEsign*, vol. 30, n. 10, pp. 4317-4323, 2009.

- [50] CoreTech, «Moldex3D,» 2008. [Online]. Available: Http://Www.Moldex3d.Com/En/Cooverview/A01.Php. 2008.].
- [51] M. C. Jeng, S. Chen, P. S. Minh, J. Chang e C. S. Chung, «Rapid mold temperature control in injection molding by using steam heating,» *International Communications in Heat Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1295-1304, 2010.
- [52] W. Guilong, G. Zhao, H. Li e Y. Guan, «Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating/cooling systems for rapid heat cycle injection molding process,» *Materials and Design*, vol. 31, pp. 3426-3441, 2010.
- [53] ASTM International, «ASTM Standanrd D523 Standard Test Method for Specular Gloss,» West Conshohocken, 2008.
- [54] G. Lucchetta e M. Fiorotto, «Influence of Rapid Mould Temperature Variation on the Appearance of Injection-Moulded Parts,» *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 59, n. 11, pp. 683-688, 2013.
- [55] D. V. Rosato, Designing with Plastics and Composites: A Handbook, Kluwer, 1991.
- [56] J. D. Schieber, D. .. C. Venerus, K. Bush, V. Balasubramanian e S. Smoukov, «Measurement of Anisotropic Energy Energy Transport in Flowing Polymers by Using a Holographic Technique,» *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia.*, vol. 101, pp. 13142-13146, 2004.
- [57] A. L. Isayev, Injection and Compression Molding Fundamentals, New York: CRC PRess, 1987, p. 450.
- [58] P. K. Kennedy, Flow Analysis of Injection Molds, New York: Hanser, 1995.
- [59] H. G. Yu e R. Thomas, Method for Modelling Three Dimension Objects and Simulation of Fluid Flow, US Patent, 2000.
- [60] R. Y. Chang e W. Yang, «Numerical sImulation of Mold Filling in Injection Molding and Using a Three-Dimensional Finite Volume Approach,» *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 37, pp. 125-148, 2001.
- [61] D. V. Rosato, «Fundamentals of Designing with Plastic,» SPE injection molding Newsletter, n. 51, 1999.
- [62] Intenational Association for the properties of Water and Steam, «IAPWS-IF97,» 2007.
- [63] W. M. Rohsenow, «Film condenstation Chap 12,» in *Handbook of Heat Transfer*, New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1973.

Indice delle figure

Figura 1- Valori tipici della Capacità di assorbimento di alcuni materiali (Herman 2002) [1]	11
Figura 2 - Variazione della massa di materiali polimerici all'interno dell'auto con il passare	del
tempo [3]	14
Figura 3 – Classificazione dei polimeri [1]	15
Figura 4 – Componenti interni in materiali polimerici	18
Figura 5 – Paraurti anteriore e posteriore in materiali polimerici	19
Figura 6 – Maniglia di una porta esterna in materiale polimerico	19
Figura 7 – Alloggiamento specchietto esterno (Fiat Ducato)	20
Figura 8 - Coppa ruota in materiale polimerico (FIAT 500)	20
Figura 9 – Un esempio di collettore di aspirazione dell'aria in materiale polimerico	21
Figura 10 – Serbatoio del carburante in materiale polimerico	22
Figura 11 – Faro fanale proiettore anteriore Fiat 500	23
Figura 12 - Campi di applicazione industriale dello stampaggio ad iniezione [26]	24
Figura 13 - Fasi di sviluppo di un prodotto realizzato mediante stampaggio ad iniezione [2	28]
	25
Figura 14 – Andamento della pressione nel tempo	27
Figura 15 – Ciclo stampaggio ad iniezione classico [28]	28
Figura 16 – Schema di una pressa ad iniezione [32]	29
Figura 17 – Schema dell'unità di iniezione [26]	30
Figura 18 – Esempio di una vite di alimentazione [26]	31
Figura 19 – Esempio stampo	33
Figura 20 – Schema canali caldi [35]	35
Figura 21 - Tendenza alla deformazione delle parti dovuta alla differenza di temperatu	ıra,
globale o localizzata, dello stampo [13]	36
Figura 22 - Diagramma dei parametri che influenzano ili problema di deformazione [13]	37
Figura 23 – Esempio di flash [13]	37
Figura 24 – Esempio linee di flusso [36]	38
Figura 25 – Esempi di linee di saldatura [37]	39
Figura 26 – Schema di valutazione delle linee di giunzione [fonti FCA]	39
Figura 27 – Schema di influenza dei fattori di input sull'output [26]	41
Figura 28 – Correlazione tra alcuni Input e alcuni Output [26]	42
Figura 29 – Confronto tra i cicli di Classic Injection Molding e Rapid Heat Cycle Molding [50]
	44
Figura 30 – Andamento della temperatura media della cavità dello stampo nel tempo [51]	45
Figura 31 – Schema dell'impianto per lo stampaggio ad iniezione con sistema H&C [51]	47
Figura 32 – Cornici TV a schermo piatto prodotti con processo RHCM [52]	48

Figura 33 – Schema di uno stampo realizzato per un processo di H&C [52]49
Figura 34 - Confronto della lucentezza del componente realizzato con un sistema convenzionale
e con un sistema H&C [37]50
Figura 35 - Confronto della rugosità nelle varie direzione tra un componente realizzato
mediante CIM e uno realizzato mediante RICH (fonti YUDO)51
Figura 36 – Andamento della temperatura lungo un canale in fase di riempimento 52
Figura 37 – Differenza dello strato congelato in base alla temperatura dello stampo [37] 52
Figura 38 - Confronto delle linee di giunzione di componenti realizzati mediante CIM e H&C
[37]
Figura 39 – Grafico qualitativo della visibilità delle linee di giunzione in base alla temperatura
dei fronti di flusso
Figura 40 – Confronto tra linee di giunzione
Figura 41 - Confronto tra vari modelli di controllo RICH fornito da YUDO57
Figura 42 - Ciclo per la realizzazione di un prodotto mediante l'uso di un sistema CAE [50]
Figura 43 – Evoluzion dei modelli di mesh per la simulazione [50]
Figura 44 – Passaggio dalla geometria 3D al modello 2.5D [50]63
Figura 45 – Limitazioni dell'approccio 2.5D [50]63
Figura 46 - Limiti dell'approccio 2.5D: fusione delle zone frontali e di variazione dello spessore
e comportamento del flusso della fibra indotta dalla fusione [50]64
Figura 47 - Possibili alternative all'uso del BLM [50]65
Figura 48 – Impiego di Moldex3D nello sviluppo di un prodotto [50]66
Figura 49 – Tecnologia di mesh ibrida [50]69
Figura 50 - Schema andamento del calore nella fase di riscaldamento72
Figura 51 - Schema andamento del calore nella fase di raffreddamento75
Figura 52- Andamento della temperatura dello stampo - Temperatura del mezzo di
riscaldamento = 160 °C77
Figura 53 - Andamento della temperatura dello stampo - Temperatura del mezzo di
riscaldamento = 200 °C
Figura 54 - Confronto del consumo di energia dei mezzi di riscaldamento in base alla
temperatura78
Figura 55 - Andamento della temperatura dello stampo nel tempo in base a diversi mezzi di
raffreddamento
Figura 56 - Casi studio
Figura 57 - Grafico Temperatura Capacità termica del PP 82
Figura 58 – Grafico PVT del PP
Figura 59 - Grafico Temperatura Capacità termica del PC
Figura 60 - Grafico PVT del PC

Figura 61 - Scelta dei punti di iniezione – Plancia
Figura 62 – Tempi di riempimento - Plancia
Figura 63 - Canali di iniezione - Plancia
Figura 64 - Canali di raffreddamento iniziali - Plancia
Figura 65 - Schema baffle
Figura 66 - Canali di raffreddamento ottimizzati - Plancia
Figura 67 - Grafico qualitativo della relazione tra la visibilità delle linee di giunzione e la
temperatura
Figura 68 - Angoli di incontro dei fronti di flusso - Plancia
Figura 69 - Temperatra delle linee di saldatura - CIM - Plancia
Figura 70 – Temperatura a fine mantenimento – CIM - Plancia
Figura 71 - Pressione di mantenimento – CIM – Planica
Figura 72 - Fasi di solidificazione del fuso – CIM - Plancia
Figura 73-Tempi e temperature nelle fasi del H&C - Plancia
Figura 74 - Temperatura al termine della fase di iniezione - H&C - Plancia 100
Figura 75 - Confronto tra la temperatura al termine dell'iniezione tra la plancia realizzata
mediante CIM e quella realizza mediante H&C - Plancia 101
Figura 76 - Temperatura delle linee di giunzione - H&C - Plancia 102
Figura 77 - Fasi di solidificazioni del fuso - H&C – Plancia 103
Figura 78 - Grafico tempo temperatura media della superficie della parte - H&C - Plancia 104
Figura 79 - Confronto Forza di chiusura - Plancia104
Figura 80 – Deformazione percentuale – H&C - Plancia 105
Figura 81 – Possibili alternative con tre punti di iniezione - Cover
Figura 82 - Possibili alternative con quattro punti di iniezione - Cover
Figura 83 - Punti di iniezione finali - Cover
Figura 84 – Canali di iniezione - Cover
Figura 85 – Schema canali di raffreddamento - Cover
Figura 86 – Angolo di incontro dei fronti di flusso – CIM - Cover 112
Figura 87 – Temperatura alla fine del riempimento - CIM-Cover
Figura 88 – Pressione all'inizio del mantenimento – CIM - Cover 113
Figura 89 – Densità al termine della fase di mantenimento – CIM - Cover 113
Figura 90 – Fasi di solidificazione – CIM - Cover 114
Figura 91 - Tempi e temperature nelle fasi del H&C – Cover 115
Figura 92 - Temperatura in fase di riempimento – H&C – Cover 116
Figura 93 – Confronto delle temperature dei fronti di flusso - Cover
Figura 94 – Fasi di solidificazione – H&C – Cover 118
Figura 95 - Grafico tempo temperatura media della superficie della parte – H&C – Cover . 119

Figura 97 - Confronto della deformazione percentuale - Cover	. 12	21
--	------	----

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Tempo di riscaldamento e consumo di energia corrispondenti a diverse	e temperatura
dei mezzi di riscaldamento	77
Tabella 2 - Scheda materiale PP	
Tabella 3 - Scheda materiale PC	
Tabella 4- Scheda materiale P20	
Tabella 5 - Temporizzazione di apertura dei gate secondari - Plancia	
Tabella 6 - Parametri di processo - CIM - Plancia	
Tabella 7 - Parametri di processo - CIM - Cover	