



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in **Ingegneria Meccanica**

**Analisi del processo di stampaggio ad iniezione e
progettazione dello stampo di un oblò per lavatrice**

**Analysis of the injection molding process and design of the
mold for a washing machine door**

Relatore:
Prof. **Marco Sasso**

Tesi di Laurea di:
Cristiano Fazzi

Correlatore:
Fiorenzo Caponi

A.A. 2022 / 2023

INDICE

OBIETTIVI E INTRODUZIONE.....	Pag.6
1. PROGETTAZIONI DEI SEMOVENTI.....	Pag.9
1.1 Modellazione: Cad e materiali.....	Pag.9
1.2 Fem (Finite Element Method).....	Pag.11
1.3 Analisi dei risultati.....	Pag.18
1.4 Lettura dei dati e confronto dei risultati.....	Pag.32
2. PROGETTAZIONE DELLO STAMPO.....	Pag.34
2.1 Applicazione del Fem.....	Pag.34
2.2 Tensionamento dello stampo.....	Pag.35
2.3 Analisi della chiusura stampo.....	Pag.35
2.4 Analisi dei risultati.....	Pag.37
3. PROGETTAZIONE DEL COMPONENTE HE001 OUTER DOOR TRAMITE MOLDEX3D.....	Pag.39
3.1 La mesh in Moldex3d.....	Pag.40
3.2 Processo e materiale di Moldex3d.....	Pag.42
3.3 Impostazioni della simulazione.....	Pag.51
3.4 Lettura dei risultati.....	Pag.54
4. MISURE CORRETTIVE.....	Pag.73

5. CONCLUSIONI.....Pag. 77

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....Pag.80

RINGRAZIAMENTI

Vorrei dedicare innanzitutto questo spazio per:

- Ringraziare il prof. Marco Sasso, per la disponibilità ed il supporto alla stesura della tesi, al supporto nella mia formazione professionale e per avermi guidato nella prima scelta della mia carriera lavorativa.
- Ringraziare Fiorenzo Caponi, per avermi dato la possibilità di entrare nel mondo dello stampaggio ad iniezione e per la stima e la fiducia che mi ha sempre dimostrato, ovviamente ricambiata, e per il suo apporto nella mia formazione professionale
- Ringraziare tutte le persone dell'ufficio tecnico di Linea3 per avermi supportato nella mia formazione professionale e per il contributo nella mia crescita nella carriera lavorativa
- Ringraziare i miei genitori il principale merito di tutto questo va a chi infatti ha reso possibili i miei studi e mi ha sempre supportato anche nei momenti più difficili
- Ringraziare l'università Politecnica delle Marche per avermi formato, grazie alla preparazione e alle conoscenze dei professori

OBIETTIVI

- Simulare un modello FEM che sia descrittivo del fenomeno di carico a cui è sottoposto il semovente durante il ciclo di lavoro
- Stimare il ciclo vita di un semovente
- Descrivere problemi che potrebbero verificarsi in fase di stampaggio del prodotto e la metodologia corretta per risolverli
- Prevedere possibili difetti sul pezzo finale, e se possibile risolverli

INTRODUZIONE

Questa tesi si pone l'obiettivo di illustrare al lettore una serie di analisi di tipo strutturale e di analisi del processo eseguite al fine di progettare in maniera corretta uno stampo per la produzione in serie di un prodotto, basandosi sulla personale esperienza con una cornice Haier Outer Door, il cui codice di produzione aziendale presso Linea3 s.r.l. è HE001. Tali analisi sono state eseguite per varie motivazioni, che saranno richiamate punto per punto durante la lettura. Per comprendere a grandi linee il funzionamento di uno stampo non vi è bisogno di molte parole: esso è una costruzione (in metallo, soprattutto acciaio, se si parla di componenti in materiali polimerici) con all'interno una cavità formata dal negativo dell'oggetto che si vuole ottenere. Per ottenere tale oggetto, lo stampo viene inserito in una pressa che, fondendo la plastica ed esercitando una pressione sul fluido (funzionamento riconducibile a quello delle pompe volumetriche), riempie questa cavità. Una volta che il fluido solidifica con l'abbassarsi delle temperature, l'unica azione rimanente è quella di liberare il pezzo: per far questo, la struttura di uno stampo viene suddivisa in 2 parti (che vedremo essere chiamate parte fissa e parte mobile) che separandosi l'una dall'altra permettono la fuoriuscita dell'oggetto. Nel caso l'apertura non basti (e molto spesso è così), si inseriscono dei componenti mobili che aiutano la fuoriuscita dell'oggetto solidificato, spingendolo o liberandone delle parti vincolate.

Al fine di favorire la scorrevolezza di lettura sono state eseguite delle omissioni di processi ripetuti o esclusivamente meccanici, cercando di organizzare le fasi di costruzione di uno stampo in diversi capitoli, ognuno dei quali affronterà una tematica indipendente. Si riportano qui di seguito alcuni cenni sui concetti fondamentali inerenti a uno stampo per materie plastiche ed ai suoi accessori finalizzati all'estrazione del pezzo. Nei successivi due capitoli verrà

illustrato nel dettaglio il metodo di analisi e progetto per gli estrattori e per l'intero stampo; nell'ultimo capitolo verrà mostrato il caso di studio di un oblò per lavatrice, con tanto di simulazioni numeriche di processo ed analisi e superamento delle criticità riscontrate.

COS'E' UNO STAMPO E A COSA SERVE

Uno stampo è un assemblato di componenti il cui fine è la produzione ripetuta di un componente: dovendo ad ogni ciclo aprirsi per favorire la fuoriuscita del componente completo, possiamo suddividere uno stampo fondamentalmente in 2 parti: la parte fissa e la parte mobile. Per esercitare il proprio compito, uno stampo deve poter essere inserito in una pressa, in modo tale che queste due parti siano separate e movimentate nella maniera corretta.

Alla fine del ciclo di stampaggio, come accennato poco fa, la parte fissa e la parte mobile si separano, ma il componente finale non sempre cade dallo stampo, quindi è necessario favorire il distacco del componente. Questo è lo scopo di due componenti: estrattori e semoventi.

ESTRATTORI E SEMOVENTI

Non sempre è facile distinguere le differenze fra questi in quanto spesso dei semoventi possono comportarsi anche come estrattori, quindi si cerca di schematizzarlo in maniera più chiara possibile:

- **ESTRATTORI:** esercitano sul componente una forza che agevoli la separazione del pezzo dalla cavità stampo
- **SEMOVENTI:** non necessariamente esercitano forze sul componente, bensì l'obiettivo principale di essi è quello di eseguire un movimento tale, da liberare il pezzo da eventuali sottosquadri.

Sia i semoventi che gli estrattori sono, nella maggior parte dei casi, situati nella parte mobile dello stampo, e vengono movimentati da piattelli mobili collegati alla piastra di estrazione della pressa: è importante tenere conto di questo fattore durante la costruzione dello stampo, in

quanto il componente finale, se non dovesse separarsi in maniera autonoma, deve piuttosto rimanere nella parte mobile, in modo tale che questi componenti possano esercitare il proprio compito nella maniera corretta. Infatti, potrebbe succedere in fase di stampaggio che un componente rimanga incastrato nella parte fissa, dove potrebbero non essere stati progettati componenti adibiti all'estrazione, e se il macchinista non ferma immediatamente la pressa, lo stampo si chiude nuovamente con il componente completo già in cavità: questo è spesso causa di guasti anche importanti.

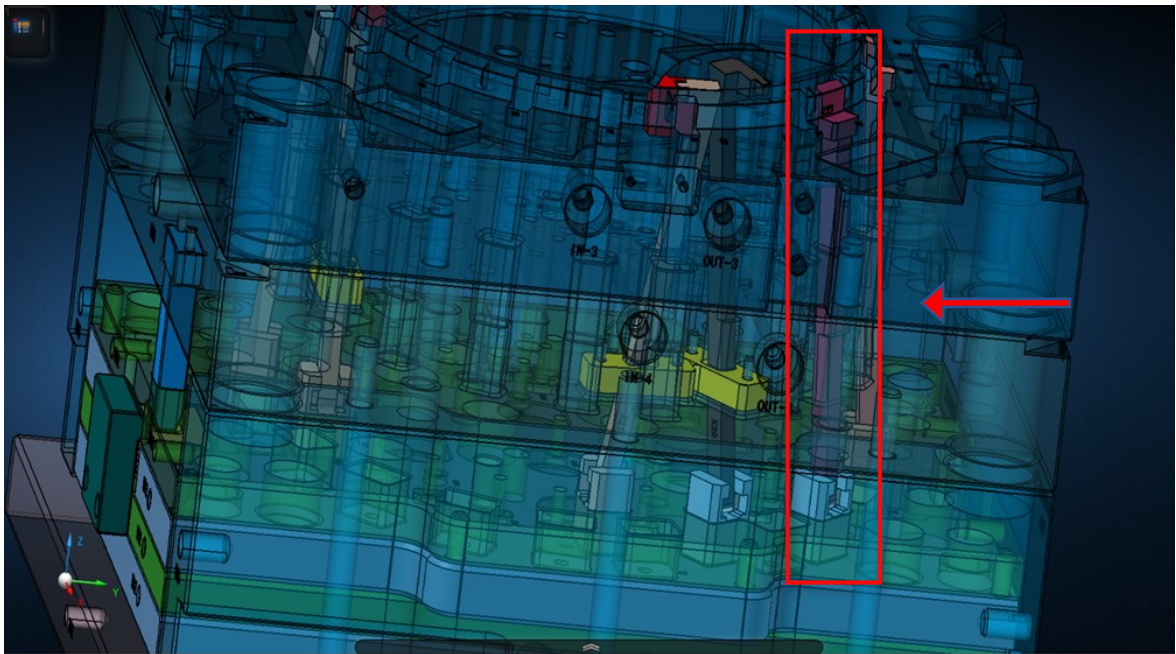


Figura 1.1: Stampo dell'HE001 in trasparenza con evidenziato il meccanismo di funzionamento del semovente

1. PROGETTAZIONE DEI SEMOVENTI

1.1 MODELLAZIONE: CAD E MATERIALI

Si è partiti da uno studio dei principali componenti meccanici e del materiale costituente lo stampo, un acciaio utilizzato spesso nell'industria dello stampaggio, l'AISI 1.2311, successivamente sottoposto ad un processo di tempra e indurimento tramite nitrurazione gassosa in atmosfera a base di azoto ed ammoniaca.

Qualità materiale	40CrMnMo7	Stato di fornitura:	Scheda Dati			
Norma di riferimento	Werkstoff	Bonificato	Lucefin Group			
Numero	1.2311					
Composizione chimica						
C%	Si%	Mn%	P% max	S% max	Cr%	Mo%
0,35-0,45	0,20-0,40	1,30-1,60	0,035	0,035	1,80-2,10	0,15-0,25
± 0,03	± 0,03	± 0,04	+ 0,005	+ 0,005	± 0,05	± 0,03
Scostamenti ammessi per analisi di prodotto						

Figura 1.1.1: Composizione chimica dell'AISI P20

Qualità materiale		40CrMnMo7			Stato di fornitura:		Scheda Dati								
Norma di riferimento		Werkstoff			Bonificato		Lucefin Group								
Numero		1.2311													
Composizione chimica															
C%	Si%	Mn%	P% max	S% max	Cr%	Mo%									
0,35-0,45	0,20-0,40	1,30-1,60	0,035	0,035	1,80-2,10	0,15-0,25									
± 0,03	± 0,03	± 0,04	+ 0,005	+ 0,005	± 0,05	± 0,03									
Scostamenti ammessi per analisi di prodotto															
Temperature in °C															
Deformazione a caldo	Tempra ¹⁾	Rinvenimento ¹⁾	Tempra ²⁾	Rinvenimento ²⁾											
1050-850	840-870 olio o polimero b.t. (180-210*)	650-670 aria calma minimo 2 cicli	860-880 aria calma o forzata	180-220 aria calma											
Ricottura di lavorabilità	Distensione	Normalizzazione			Preriscaldamento per saldatura		Distensione dopo saldatura								
720-780 raffredd. forno max 20*h (HB max 230)	50 sotto la temperatura di rinvenimento	850-900 aria			250-300		650 raffreddamento forno								
				AC1	AC3	Ms	Mf								
				760	800	260	140								
b.t. = bagno di sali o termale															
Proprietà meccaniche															
Trattamento termico: tempra a 860 °C in olio e rinvenimento a 600 °C. Esperienza LucchiniSidermeccanica KeyLos 2311															
Valori medi a ½ spessore su Ø 400 mm							HB alla profondità di mm								
N/mm ²	N/mm ²	Kv	J in longitudinale				294	286 264 min							
R	1000 890	8	20	30	40	50 60 75	336	327 311 max							
Rp 0,2	880 750						100	200 300 mm							
Prove a °C	20	200	0	20	40	60 80 100 120									
Tabella di rinvenimento dopo tempra a 860 °C in olio															
HB	496	496	489	482	468	455	442	432	409	390	353	336	271	240	
HRC	51	51	50,5	50	49	48	47	46	44	42	38	36	28	21	
R	N/mm ² 1820 1820		1790	1760	1700	1640	1580	1520	1430	1340	1180	1110	900	800	
Kv	J					8	8	8	7	9	14	20	30		
Rinvenim. a °C	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
Espansione termica		10 ⁻⁶ · K ⁻¹		12,8		13,0	13,4	13,8	14,0	14,2	14,4	14,5			
Modulo elastico		long. GPa		210		196		177							
Modulo elastico		tang. GPa		81		75		68							
Prove a		°C		20		100	200	250	300	400	500	600	700		
Calore specifico	Densità	Conducibilità		Termica W/(m·K)			Resistività Elettrica		Conducibilità elettrica						
J/(Kg·K)	Kg/dm ³	20 °C		250 °C	500 °C		Ohm·mm ² /m		Siemens·m/mm ²						
460	7.83	34,0		33,4	33,0		0,19		5,26						

Figura 1.1.2: Determinazione dei valori di durezza e di tensione di rottura dell'AISI P20 dalla scheda di lavorazione

In particolare le grandezze di interesse sono:

$$\sigma_r = 1760 \text{ Mpa}$$

$$E = 210 \text{ Gpa}$$

$$G = 81 \text{ GPa (ossia un Poisson circa di 0,3)}$$

Si è risalito a questi parametri tramite l'interpolazione nella scheda tecnica della temperatura di rinvenimento a cui è stato sottoposto l'acciaio (valore medio) nella tabella.

L'unica grandezza mancante per poter costruire un modello adatto è il valore del coefficiente di attrito dinamico: per questo motivo si è cercato un valore stimato da letteratura.

Fonte: <http://www.pasquali.org/dispense/Coefficienti%20di%20attrito.pdf>

COEFFICIENTI DI ATTRITO

MATERIALI		m_s	m_k	Condizioni
Acciaio	Acciaio	0.74	0.54	-
Acciaio	Acciaio	0.11	0.05	Lubrificato
Acciaio	Aria	0.001	0.001	-
Acciaio	Ghiaccio	0.027	0.014	-
Acciaio	Piombo	0.9	0.9	-
Acciaio	Teflon	0.04		Pulito e asciutto
Acciaio inox	Acciaio inox	0.8		-
Alluminio	Acciaio	0.61	0.47	-
Alluminio	Alluminio	1.1 ÷ 1.7		-
Cuoio	Legno	0.3 ÷ 0.5		Pulito e asciutto
Cuoio	Metallo	0.6		Asciutto
Cuoio	Metallo	0.4		Bagnato
Ghisa	Acciaio	0.4		Pulito e asciutto

Figura 1.1.3: Coefficiente di attrito considerato per la simulazione FEM

Nota: È consigliabile utilizzare del grasso sui semoventi ad ogni cambio stampo, di conseguenza la scelta dell'attrito si basa su questa buona condotta.

Una volta stabilite le grandezze principali che descrivono il comportamento dell'acciaio, si è passati allo sviluppo del modello FEM, dapprima per il semovente e successivamente per lo stampo.

Il CAD utilizzato per il modello è privo delle tolleranze utilizzate nel pezzo reale per favorire la convergenza del risultato e questa semplificazione è ritenuta accettabile in quanto va a favore della sicurezza nel calcolo della vita a fatica (sovrastima i carichi a cui è sottoposto il semovente e di conseguenza le usure).

1.2: FEM (FINITE ELEMENT METHOD)

Prima di tutto si è inserito il CAD all'interno di Apex (un software MSC), data la sua duttilità nel semplificare modelli geometrici e nel riuscire a costruire mesh ordinate. Con qualche opportuna seppur semplice modifica della geometria si è riusciti ad ottenere una mesh ad esaedri, che sono favoriti sui tetraedri per la loro capacità di costituire una mesh con un grado d'ordine maggiore.

Una volta inseriti opportunamente i vincoli della struttura del semovente, il modello è stato esportato in Marc, il vero e proprio solutore del modello FEM.



Figura 1.2.1: Rappresentazione della mesh creata attraverso Apex

Il compito dei semoventi all'interno dello stampo è quello di favorire l'uscita del manufatto stampato dalla cavità, eliminando le problematiche legate ai sottosquadri. Ne consegue che i carichi nell'interfaccia pezzo-semovente sono trascurabili.

Le condizioni di lavoro dello slider sono le seguenti:

- Corsa dell'estrattore: $z = 40\text{mm}$
- Velocità del piattello mobile: $v = 40\text{mm/s}$ (può essere modificata)
- Durata ciclo di estrazione: 5s (presa da parametri di produzione)

Dopodiché si è proceduto ai contatti e al software è stato chiesto di creare una matrice di contatti in maniera automatica: quindi il software è stato in grado di capire da solo quali corpi sono fra loro in contatto (riempiendo la matrice con una T) e di capire quali non sono fra loro in contatto (spazio vuoto). Da notare che la matrice dei contatti deve sempre essere simmetrica per il terzo principio della dinamica.

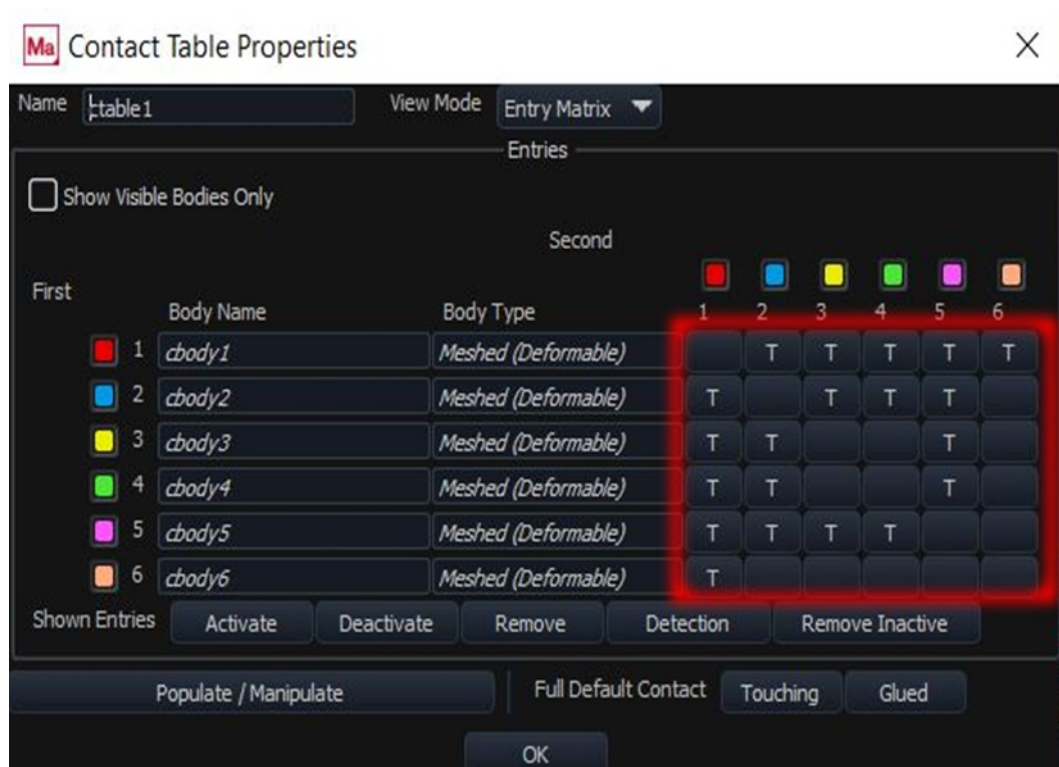


Figura 1.2.2: Contact table di Marc Mentat, dove con T sono indicati i vari contatti di tipo “touching”

Una volta creata la matrice dei contatti, se ne è stabilito il tipo: è stato impostato per tutti i corpi un contatto di tipo touching (che consente moti relativi) con inserimento del coefficiente di attrito del materiale (tutti i corpi sono costituiti dallo stesso tipo di acciaio).

Il passo successivo è stato quindi quello di vincolare l’assemblato in modo coerente alla fisica dei problemi e di creare il movimento di estrazione come posizione $x=x(t)$.

A tal proposito, il software Marc Mentat mette a disposizione il comando “Table”, che consente di creare una tabella che, dati un numero finito di punti, interpola questi ultimi in modo tale da creare una funzione posizione-tempo. La tabella è stata creata con una stima dei movimenti data dai parametri assunti: sappiamo infatti che durante la fuoriuscita del semovente, la velocità è di 40mm/s. Quindi è stato creato il primo tratto che va da posizione 0 al tempo 0 a posizione 1 al tempo 1 (posizione 1 che moltiplicata per il fattore di scala inserito esternamente alla table come visto nella slide precedente equivale a dire che in un secondo esegue una traslazione di 40mm). Dopodiché la fase di rientro è stata «addolcita» in quanto essendo il ciclo di estrazione completo e della durata di 5 secondi, la velocità può anche essere ridotta di parecchio. I tratti orizzontali equivalgono a semovente fermo.

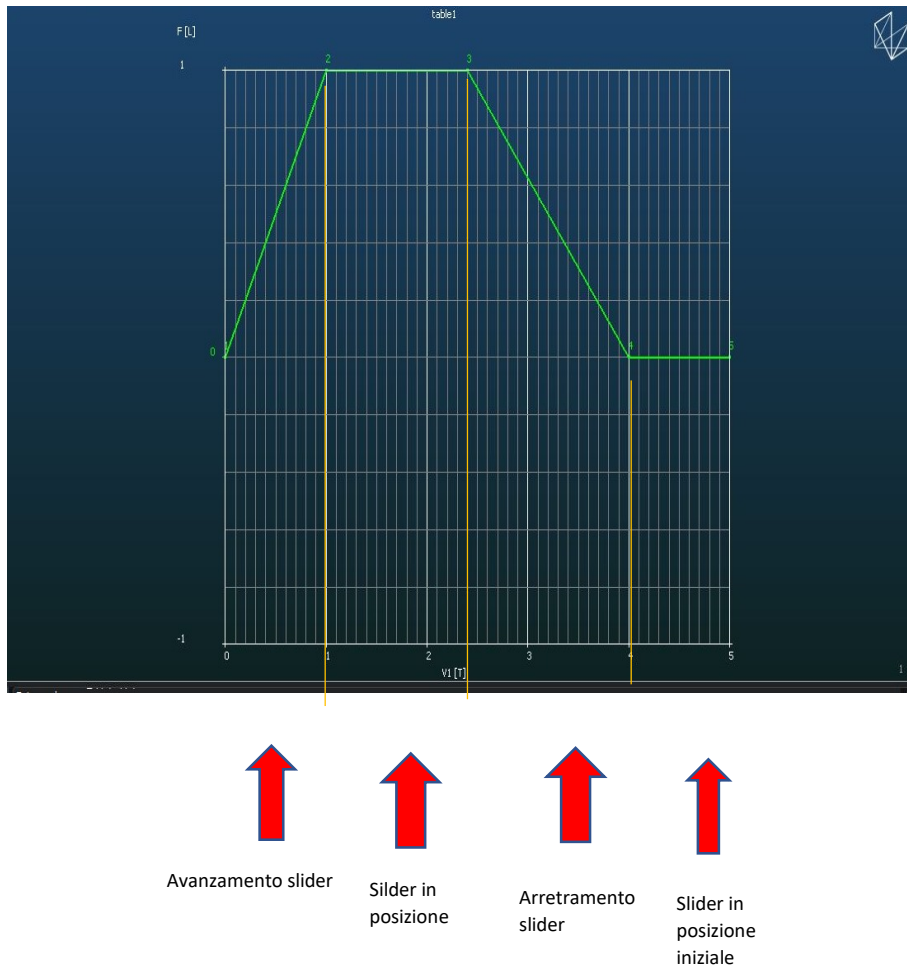


Figura 1.2.3: “table” per la variazione temporale della posizione del semovente

Questo spostamento è determinato dal piattello mobile a cui il semovente è collegato, quindi è stato attribuito ai soli nodi di contatto fra questi 2 componenti.

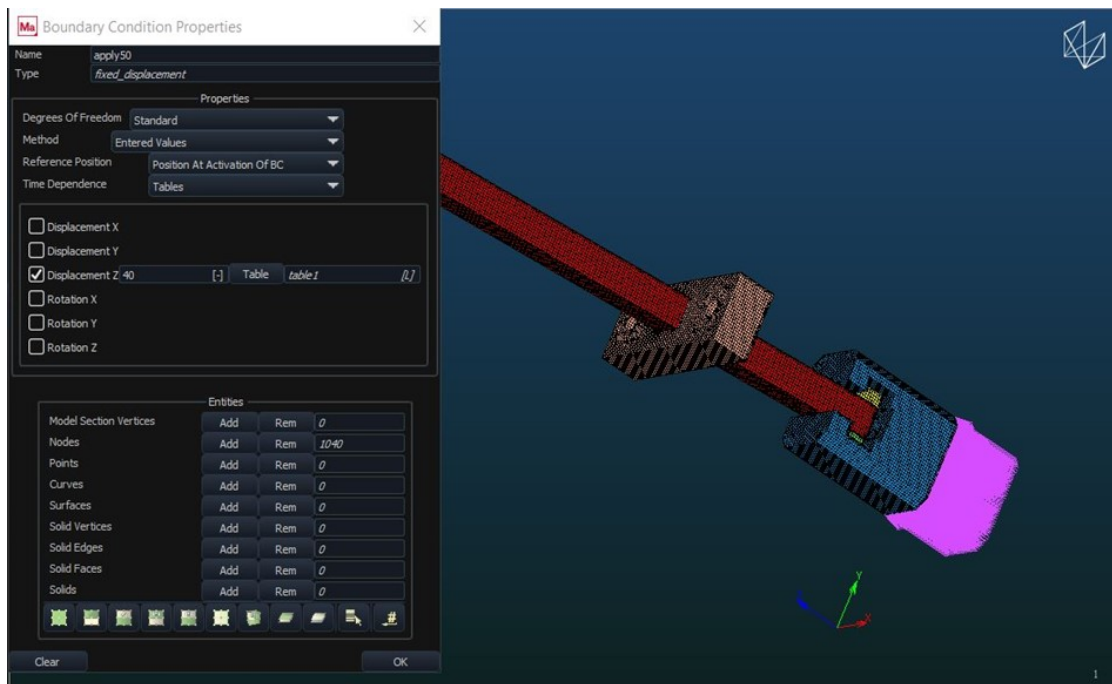


Figura 1.2.4: Applicazione del comando di traslazione in z sui nodi della superficie dello slider a contatto con i piattelli mobili

Inoltre, il semovente scorre in una placca in ottone che viene invece fissata alla parte statica dello stampo tramite viti filettate, quindi si sono aggiunti degli incastri in questi punti.

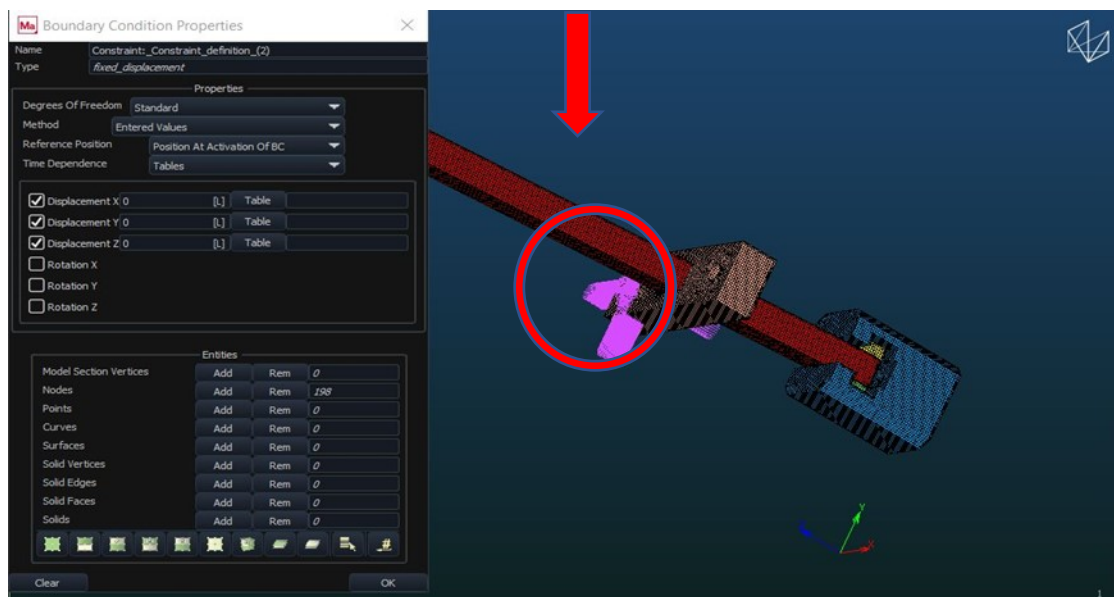


Figura 1.2.5: Applicazione dell'incastro su un filetto

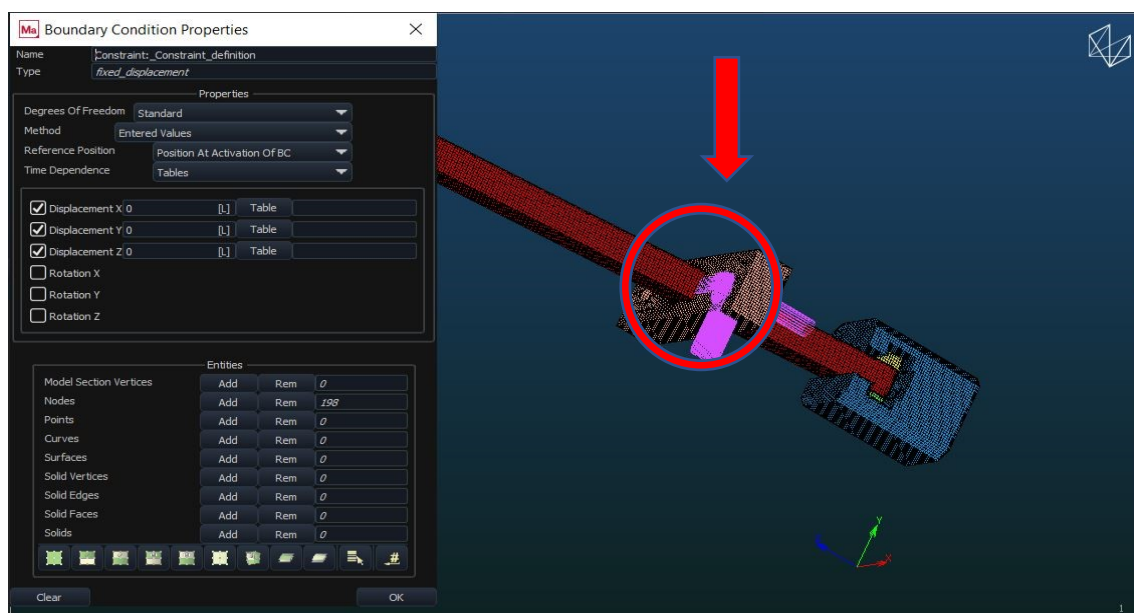


Figura 1.2.6: Applicazione dell'incastro su un filetto

Dopo aver completato il modello prototipale del semovente, rimane solo l'impostazione del solutore: nel mondo del FEM vi sono difatti due possibili scelte, solutori impliciti e solutori espliciti. I solutori impliciti sono comunemente usati dov'è richiesta una maggior accuratezza, ma hanno di contro problematiche legate al modello matematico dove vi sono non linearità di materiali e contatti o dove vi sono grandi spostamenti, oltre a richiedere maggior tempo per essere risolti. Di contro i solutori espliciti non hanno questo tipo di problematiche, seppur a parità di mesh hanno la tendenza ad essere meno accurati.

Il modello di semovente analizzato si adatta molto bene ad un solutore di tipo implicito in quanto non vi sono forti gradienti di velocità e non è sottoposto a carichi eccessivi, ed essendo quindi l'acciaio anche un materiale dal comportamento lineare (non viene infatti mai raggiunto il punto di snervamento, quindi il modello di sforzo-deformazione è quello di Hooke), non è sottoposto a grandi deformazioni. È inoltre intuibile dalla geometria stessa del componente che non vi sono non linearità di contatto, in quanto la geometria è molto semplice e squadrata (i nodi di contatto del semovente con il piattello costituiscono un prisma).

Per i motivi citati si è scelto di utilizzare il "MUMPS Direct Solver", un solutore implicito diretto di Marc capace di risolvere grandi sistemi lineari utilizzando matrici definite positive. La particolarità di questo tipo di solutore è la capacità di scomporre il problema in più parti,

ognuna delle quali può essere attribuita ad un processore logico: questa caratteristica permette al MUMPS di avere l'accuratezza di un solutore implicito, ma di essere più veloce rispetto ai solutori della sua categoria, migliorando quella che, come visto poco fa, è una caratteristica di questo tipo di solutori.

Inoltre, per avere una migliore linearizzazione dei contatti, nonostante la geometria banale, si è scelto di attivare la modellazione del contatto "segment to segment": questo tipo di comando, differentemente dal "node to segment", non va a valutare il contatto come interferenza fra il nodo di un corpo ed il segmento (che unisce 2 nodi dello stesso elemento) di un altro, bensì interpola i dati di 2 nodi dello stesso segmento nella valutazione della compenetrazione. Questo tipo di comportamento favorisce una minore oscillazione dei risultati fra 2 nodi vicini, permettendo al modello di contatto di avere un comportamento ancora più vicino a quello reale, oltre a poter risolvere, ove ce ne fosse la necessità, il problema legato alle singolarità, in cui un singolo nodo di un componente può risultare sottoposto a carichi eccessivi rispetto al reale per problemi legati alla matematica dell'elemento.

Il time-step necessario per trovare una soluzione accettabile, data la modellazione del problema, non è stato eccessivo: sono infatti risultati sufficienti 100 step da 0,05s l'uno. Il software Marc dà la possibilità, nei casi in cui la scelta del time-step size fosse complicata per motivi legati anche alla variabilità del problema che si affronta, di scegliere step-time variabili di tipo "adaptive", cioè scompone il problema in più parti adattando per ognuna di esse il corretto step temporale. Nell'esempio di questa tesi, non vi era questo tipo di problema, e si è visto che i risultati non cambiavano di quantità significative, quindi viene reputata la scelta migliore l'utilizzo di uno step-time costante, in quanto permette il completamento del calcolo in un tempo di gran lunga più breve.

1.3: ANALISI DEI RISULTATI

È stato chiesto al software come output non solo il tensore di sforzi e deformazione, oltre alla tensione secondo Von Mises, ma anche l'usura superficiale per ciclo dei componenti costituenti il sistema: è infatti di interesse mostrare al lettore che il semovente, nel momento della progettazione, viene dimensionato non solo per vita a fatica, che come vedremo a breve secondo

il diagramma di Woelher risulta essere a “vita infinita”, ma soprattutto viene dimensionato in previsione del fatto che sia soggetto ad usura tribossidativa/abrasiva durante il normale ciclo di estrazione del processo di stampaggio.

Infatti, il risultato della simulazione ci dimostra che il massimo carico a cui è sottoposto il componente durante il ciclo di estrazione è di circa 260Mpa, un carico tensionale che non si avvicina nemmeno minimamente al punto di snervamento di un acciaio nitrurato. Questo carico inoltre, si concentra in particolare in un punto del raccordo interno della placca del semovente, punto che normalmente da letteratura risulta essere critico in quanto concentra la tensione. È quindi possibile modellare una curva di Woheler per l’AISI P20 nitrurato: conoscendo infatti la tensione di rottura del materiale (non è stato possibile risalire alla tensione di snervamento per costruire tale modello), si può risalire alla σ_f attraverso la seguente formula:

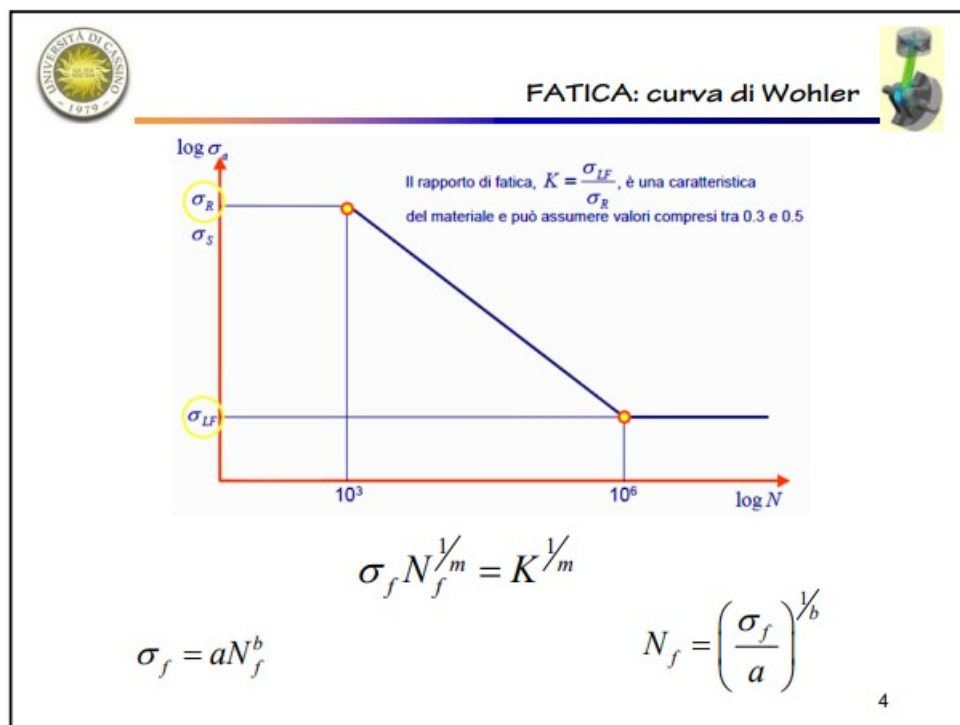


Figura 1.3.1: Rappresentazione grafica e matematica del modello di Wohler

Questa immagine è stata presa dalla fonte <http://cdmunicas.it/notes/PEM/2016/L9%20-%20fatica%20parte%202.pdf> e mette in relazione la tensione limite di un materiale con la

propria tensione di rottura attraverso la costante K; essendo tale costante caratteristica del materiale, e variando come viene mostrato in genere fra i valori 0,3 e 0,5, si è assunto, favorendo la sicurezza, il primo dei due valori come costante per poter ottenere la:

$$\sigma_{lf} = K * \sigma_r$$

Come inoltre si può trovare in letteratura, la tensione limite di fatica viene associata ad un numero di cicli pari ad $N = 10^6$, ma per completare la curva e costruire un modello corretto, dobbiamo vedere anche la tensione ammissibile per un numero di cicli $N = 10^3$. In questo caso da letteratura si è trovato che, utilizzando la stessa formula vista poco fa, si può ottenere la tensione $s(N = 10^3)$ con $K = 0,9$: viene usualmente utilizzato questo valore in quanto va a favore della sicurezza.

Questi 4 valori di carico, corrispondenti a 4 valori di numero di cicli massimi raggiungibili, individuano 4 punti della curva di Wohler: interpolandoli fra loro si ottiene quindi la curva che rappresenta il modello di resistenza a fatica del semovente. Su base statistica, per come viene costruita la curva di Wohler, tutti i punti di suddetta curva individuano i valori per cui si ha il 50% di possibilità che il componente esaminato possa rompersi: è bene tenere conto di questo in fase di progettazione.

Per affrontare questa tematica vi sono 2 possibilità fra cui scegliere: si può optare per un coefficiente di sicurezza, oppure si possono cercare, come in questo caso, dei valori di coefficienti aggiuntivi, dovuti ad esempio al tipo di finitura superficiale, di tipologia di carichi o altro ancora, che riducono l'effettiva tensione di rottura del sistema esaminato.

Essendo il semovente un cinematismo, e quindi dovendo esso scorrere per sfregamento su una guida, è necessario che questo componente abbia una finitura lucida: dalla fonte <http://cdmunicas.it/notes/PEM/2016/L9%20-%20fatica%20parte%202.pdf> è possibile venire a conoscenza di un grafico che, in funzione del tipo di lavorazione cui un corpo è sottoposto, restituisce come output un valore di k.

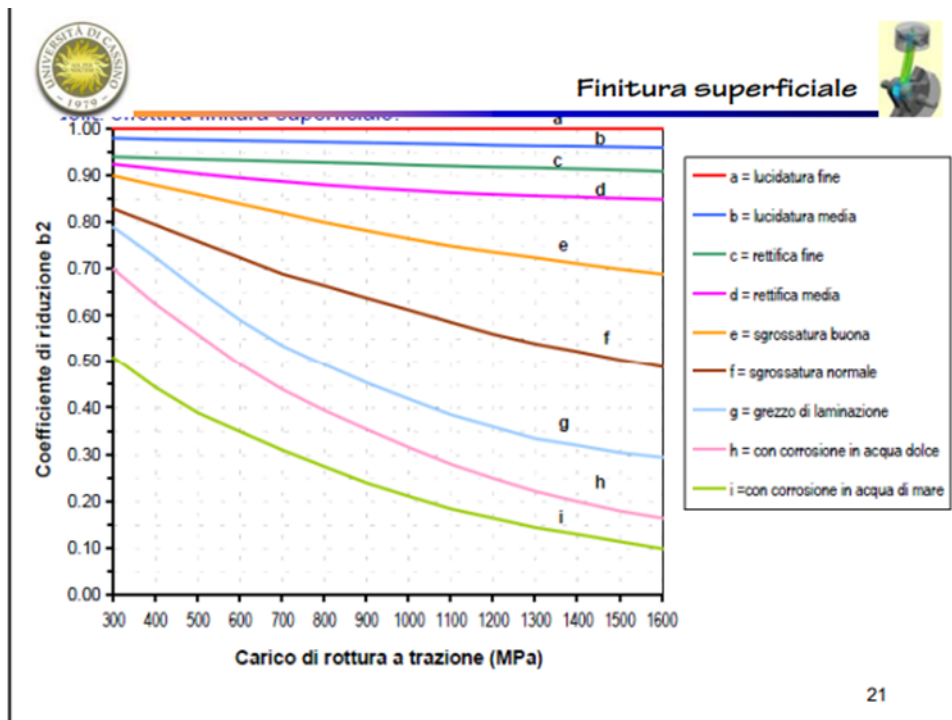


Figura 1.3.2: Determinazione del coefficiente riduttivo b_2 in funzione della finitura superficiale e del carico di rottura del materiale in analisi

Tale lucidatura non può comunque essere assunta come a specchio, in quanto presso l'officina di Linea3, dove questo semovente è stato costruito, non vi sono dimensioni della vite della fresa che soddisfino questi requisiti. Quindi, assumendo per corretta la curva "b" corrispondente ad una lavorazione di lucidatura media e sapendo che il carico di rottura a trazione dell'acciaio AISI P20 costituente il semovente è di 1760Mpa, risulta corretto secondo questo grafico assumere un valore di K (finitura superficiale) pari a 0,9.

Dal punto di vista della tipologia di carichi a cui è sottoposto il semovente, possiamo assumere per com'esso assemblato all'interno dello stampo un modello di asta incernierata in più punti: quest'assunzione, che risulta coerente con il modello di carichi risultanti, fa sì che si possa determinare un ciclo di carichi esclusivamente diretti in direzione della trave. Semplificando, l'intero ciclo di lavoro del semovente risulta determinato da carichi di trazione-comprensione.

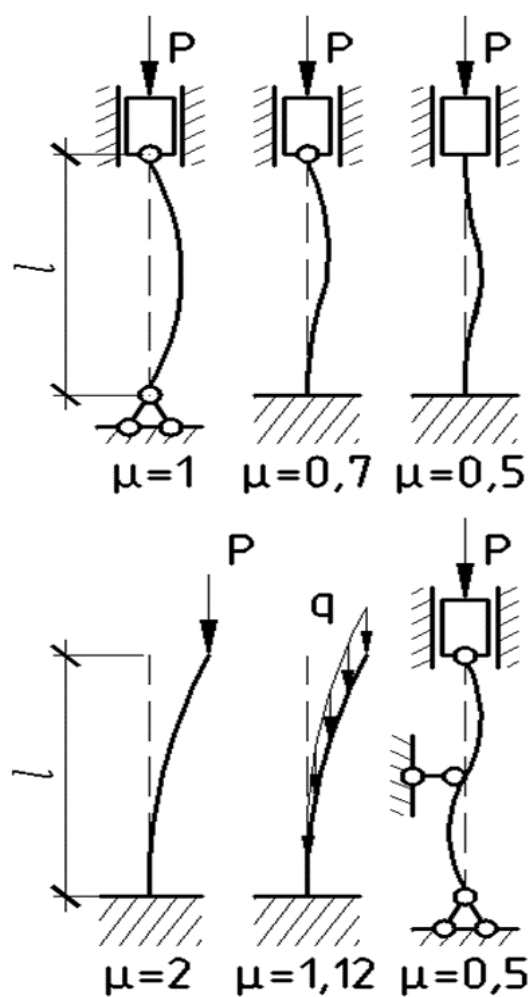


Figura 1.3.3: Configurazioni delle sbandate in funzione dei vincoli di una trave sottoposta a carico assiale

Effetto delle dimensioni (effetto scala) (C_S)

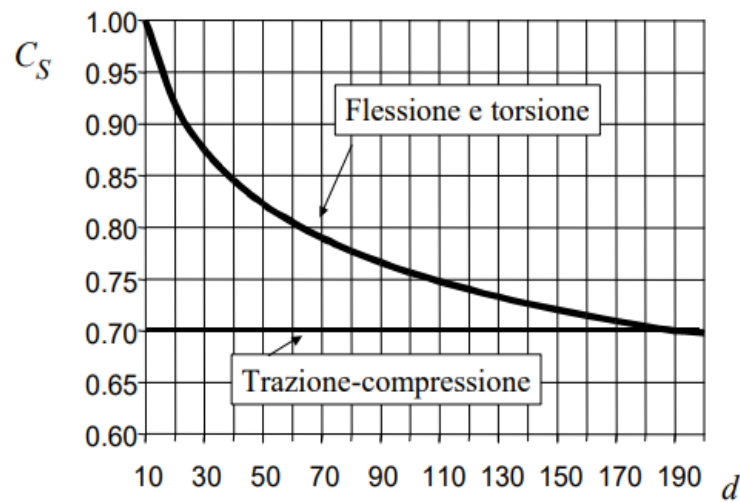


Figura 1.3.4: Coefficiente correttivo dovuto all'effetto di scala per oggetti sottoposti a carico flessionale/torsionale, o di trazione/compressione

Come si può vedere dall'immagine in figura 1.3.4, non abbiamo quindi un effetto delle dimensioni nella determinazione del K da utilizzare per il tipo di carichi: esso, infatti, va assunto con il valore di 0,7 indipendentemente dalle dimensioni.

Una volta determinati questi coefficienti, essi vanno semplicemente moltiplicati ai 4 carichi precedentemente visti per ottenere 4 nuovi carichi corrispondenti alle tensioni limite per numero di cicli equivalenti a 10^0 , 10^4 , 10^7 e 10^{10} .

A tali scopi è risultato comodo allo scrittore di questa tesi servirsi di Microsoft Office Excel per i calcoli seguentemente riportati: nell'immagine 1.3.5 vengono quindi riportati i dati finora analizzati.

MATERIALE			
	sR	1760	Mpa
	$\sigma(N=10^4)$	1584	MPa
	σ_{LM}	700	Mpa
PARAMETRI CORRETTIVI			
	LUCID.	0.9	
	TRAZ-COM	0.7	
	tot	0.63	

Figura 1.3.5: Valore delle tensioni e dei parametri correttivi utilizzati nella creazione del modello matematico di Wohler

Essendo quindi da letteratura:

$$\sigma_{Wh} = \frac{\sigma_R}{\eta_{Lc} \cdot \eta_{TC}}$$

$$\sigma_N = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m^2}{\sigma_{Wh}^2}}$$

Dove η_{Lc} e η_{TC} sono rispettivamente i parametri di correzione dovuti al tipo di lavorazione e a carichi di trazione-compressione, è possibile ottenere la curva di Wohler in scala logaritmica:

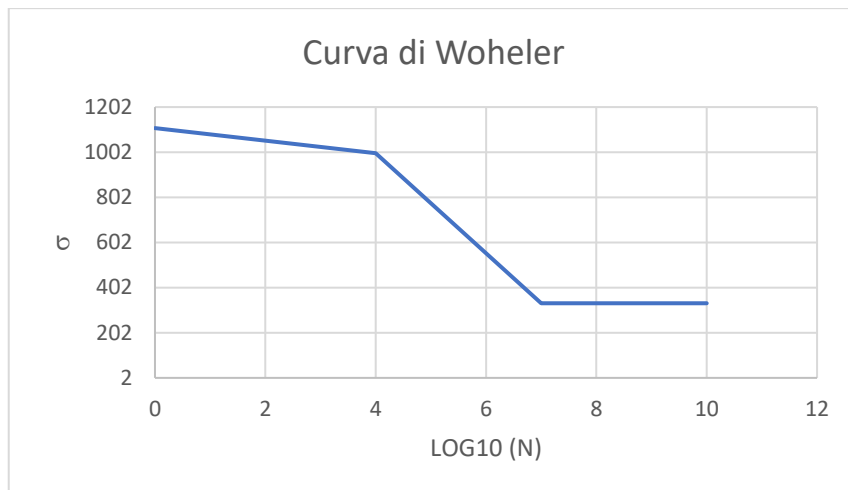


Figura 1.3.6: Costruzione della curva di Wohler in Excel con tensione ammissibile in Mpa

Il modello di carichi di vita a fatica è stato invece creato con il modello di Soderberg: essendo il semovente sottoposto ad un carico alterno-simmetrico nell'intero ciclo di lavoro (fase di avanzamento corrispondente ad un carico di compressione e fase di arretramento corrispondente ad un carico di trazione):

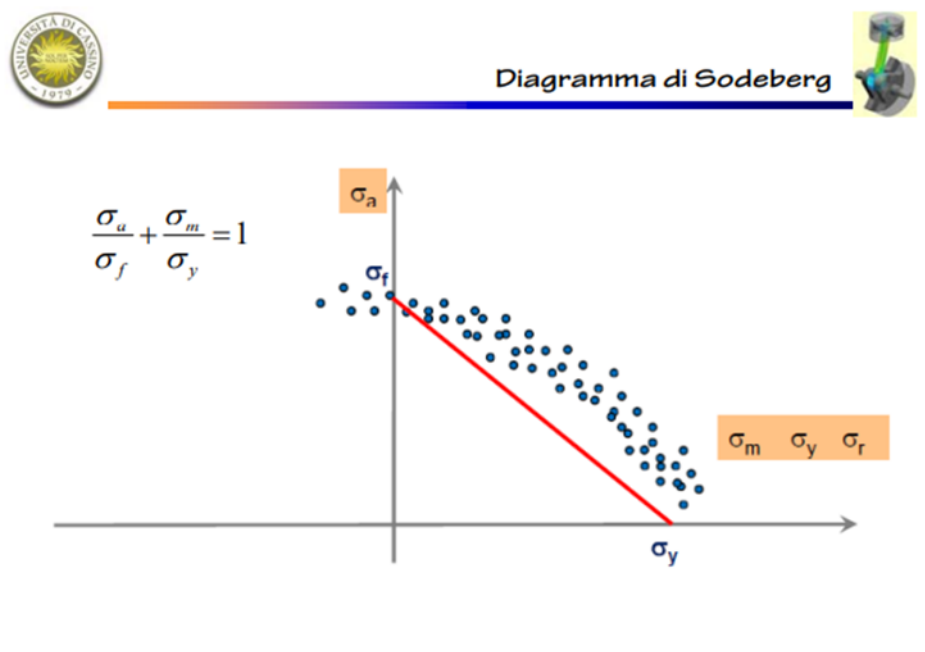


Figura 1.3.7: Diagramma e funzione di Soderberg



Criterio	Goodman	Sodeberg	Gerber	ASME
Tipo della equazione	$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$	$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$	$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \frac{y}{b} = 1$	$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1$
Espressione del criterio	$\frac{\sigma_m}{\sigma_r} + \frac{\sigma_a}{\sigma_f} = 1$	$\frac{\sigma_m}{\sigma_s} + \frac{\sigma_a}{\sigma_f} = 1$	$\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_r}\right)^2 + \frac{\sigma_a}{\sigma_f} = 1$	$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_s}\right)^2 = 1$
Espressione di σ_f	$\sigma_f = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m/\sigma_r}$	$\sigma_f = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m/\sigma_s}$	$\sigma_f = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m^2/\sigma_r^2}$	$\sigma_f = \sigma_a \sqrt{\frac{1}{1 - \sigma_m^2/\sigma_r^2}}$

Figura 1.3.8: Diversi criteri di rottura per limite di fatica messi a confronto

Fonte: <http://cdmunicas.it/notes/PEM/2016/L9%20-%20fatica%20parte%202.pdf>

si ottiene che la σ_f (dove f sta per “failure”), è di 260Mpa. Questo accade per la particolarità dei cicli alterno-simmetrici di avere la $\sigma_m = 0$.

È quindi dimostrato che secondo il modello di Wohler il semovente è strutturato in modo tale da avere una vita infinita a cicli di fatica a cui è sottoposto.

Presso la sede di Linea3 però si è venuti a conoscenza che il fornitore di semoventi di ricambio (ne sono stati prodotti altri ma non nell’officina della suddetta azienda) ha garantito un ciclo vita corrispondente a $N = 10^6$ cicli.

È stato quindi di interesse per l’azienda indagare ulteriormente sulle cause di tali garanzie, ed è per questo che attraverso il FEM si è andati a studiare anche l’usura.

Il modello di usura contenuto in Marc si basa sul modello secondo Archard, che in letteratura troviamo come segue:

Il modello dell'usura di Archard

Un modo semplice per la verifica del volume asportato a causa dell'usura è l'utilizzo di una formula sviluppata da Holm e Archard, nota comunemente come "Legge di Archard". La sua semplicità di applicazione ha reso questa relazione matematica molto conosciuta in ambito tribologico, la si riporta in seguito:

$$Q = \frac{kWL}{H}$$

Dove:

Q=volume asportato per usura [m³];

k=coefficiente adimensionale ricavato dalla sperimentazione;

W=carico applicato [N];

L=lunghezza del contatto [m];

H=durezza del materiale oggetto di studio [Pa];

Classification	Wear Mechanisms	Wear coefficient K (range)
Wear dominated by mechanical behavior of materials	<ol style="list-style-type: none"> 1. Asperity deformation and removal 2. Wear caused by plowing 3. Delamination wear 4. Adhesive wear 5. Abrasive wear 6. Fretting wear 7. Wear by solid particle impingement 	<ol style="list-style-type: none"> 10⁻⁴ 10⁻⁴ 10⁻⁴ 10⁻⁴ 10⁻² to 10⁻¹ 10⁻⁶ to 10⁻⁴ -
Wear dominated by chemical behavior of Materials	<ol style="list-style-type: none"> 1. Solution wear 2. Oxidation wear 3. Diffusion wear 4. Wear by melting of the surface layer 5. Adhesive wear at high temperatures 	

Figura 1.3.9: Dettaglio esplicativo del modello di Archard

Il modello matematico di Archard è molto conosciuto in ambito tribologico per la sua semplicità di utilizzo. La determinazione di k però non è immediata: i valori che vediamo infatti nella tabella di sinistra sono dei riferimenti (ordini di grandezza) relativi al fenomeno di usura che si sta studiando, ma la determinazione esatta di questi valori è sperimentale.

Non avendo riferimenti specifici al nostro caso in esame, si è determinato il valore di k a ritroso, basandosi sui risultati dell'usura dei semoventi presi in esame (controllati al 20x dopo circa 10000 cicli di stampaggio).

In figura viene rappresentato il danneggiamento ad usura risultante da circa 10000 cicli di stampaggio del semovente in esame, viste con il microscopio 20X. Possiamo vedere che le conformazioni di asportazione di materiale sono coerenti con quanto visto nella simulazione, e la conformazione è tipica dell'asportazione delle asperità superficiali, descrivibile attraverso il modello di usura di Archard.

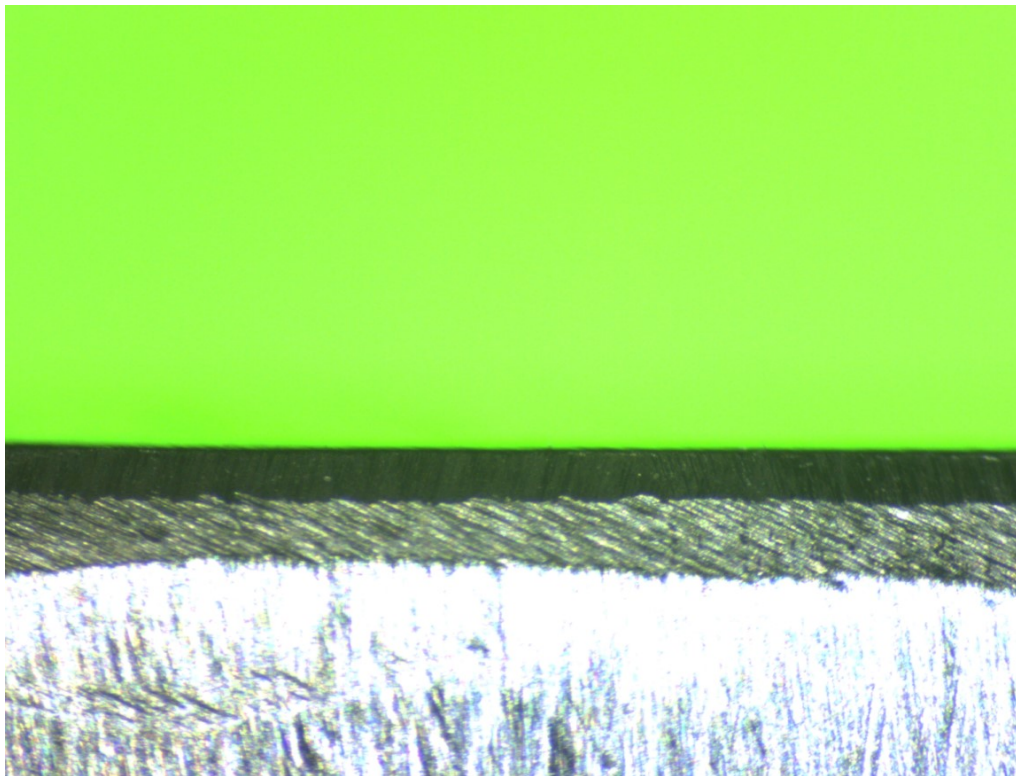


Figura 1.3.10: Superficie del semovente Haier Outer Door He001 dopo 10^4 cicli

Da letteratura si evince che il valore di k è pari a $1 \cdot 10^{-4}$.

Di conseguenza si è chiesto al software Marc di effettuare un calcolo dell'usura per ogni ciclo: infatti con l'utilizzo di questo software è possibile vedere l'usura come un effetto di disattivazione dei nodi più esterni che vengono "consumati", e quindi avere un modello esatto delle zone più usurate e della conformazione del semovente una volta sottoposto ad usura. Infatti, come possiamo vedere dall'immagine "Figura 1.3.10", ci sono molte similitudini fra il modello di Marc e quanto visto invece attraverso il microscopio 20x: le zone più sollecitate a

tale fenomeno sono gli spigoli del semovente e la zona centrale (indicata dalla freccia) che va più volte a contatto con la placca di fissaggio allo stampo.

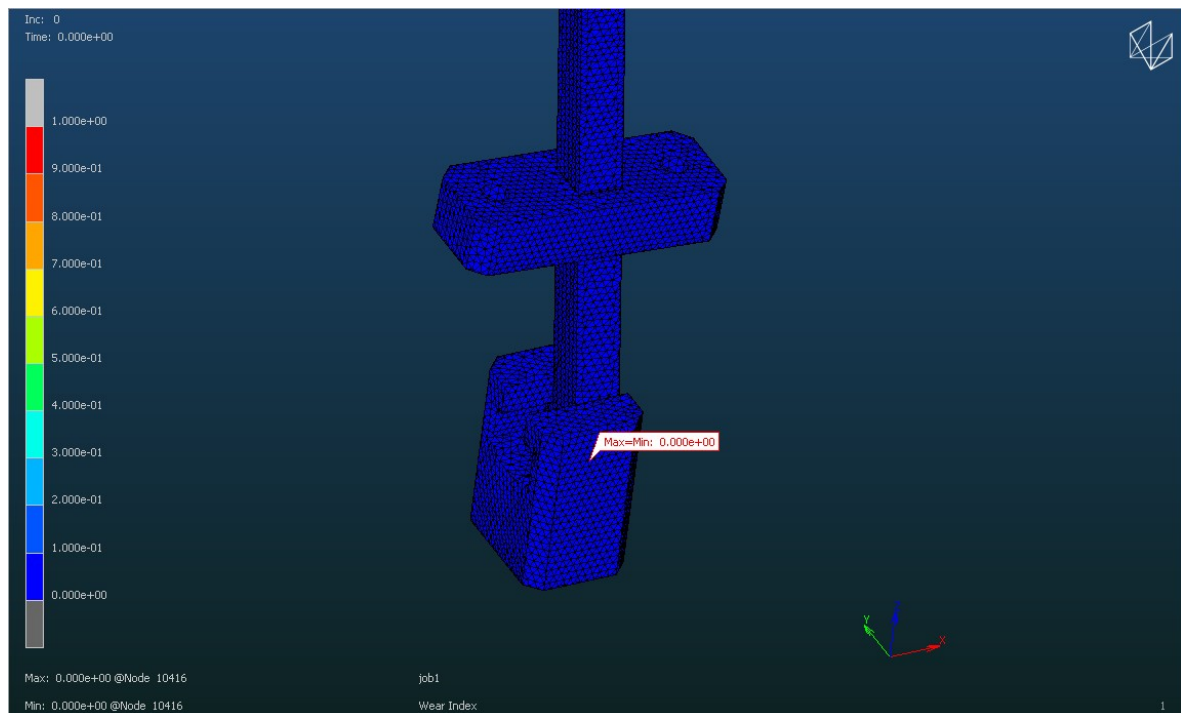


Figura 1.3.11: Gif animata con rappresentazione dei carichi di punta massimi raggiunti

Dal risultato del ciclo di movimenti si è preso il punto di massima usura per poter costruire, sempre tramite Excel, un modello capace di descrivere l'andamento di tale fenomeno nei cicli successivi: sapendo infatti che la nitrurazione non è un processo omogeneo, in quanto più efficace sulla superficie esterna e molto meno nelle zone più interne del semovente fino ad assumersi dall'effetto nullo dopo una profondità di $x = 0,3\text{mm}$, come trovato dalla fonte <https://it.airliquide.com/soluzioni/trattamenti-termici-dei-metalli/qual-e-la-corretta-profondita-di-penetrazione-di-un-trattamento-termico-superficiale>.

Si è assunta un'efficacia di tale processo di lavorazione come una funzione quadratica che unisce questi 2 punti, cioè efficienza massima nella superficie più esterna del semovente (100%) e nulla nello strato a 0,3mm.

Si è inoltre assunto, come verosimilmente accade nei cicli di stampaggio, come rottura l'usura di tutto lo strato nitrurato del semovente: infatti, una volta superata questa soglia, l'usura diventa di molti ordini di grandezza più elevata e, di conseguenza, il semovente ha ancora pochi cicli vita prima di rompersi per grippaggio (come visto anche in sede Linea3 in altri stampi costruiti precedentemente).

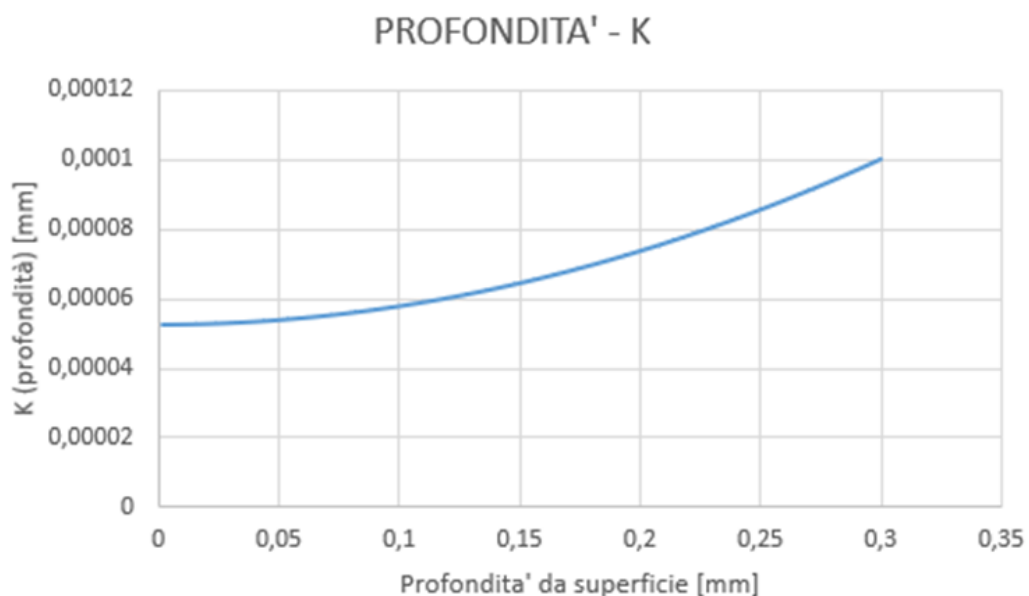


Figura 1.3.12: grafico Excel con rappresentazione della K in funzione della profondità rispetto alla superficie originaria del semovente

Nell'immagine in figura 1.3.12 viene rappresentata la curva della $K = f(\text{profondità})$; nella descrizione del modello, come precedentemente visto, si è partiti dal concetto che la nitrurazione ha un'efficacia maggiore nello strato più esterno del componente, fino a diventare praticamente nullo oltre un certo strato, assunto pari a 0,3mm. In tutti gli strati intermedi il modello è stato descritto tramite una funzione quadratica, che interpola questi 2 punti precedentemente visti. In questo modo è stato possibile, sapendo il valore di usura per ciclo ricavato tramite la simulazione in Marc, conoscere per tutti i cicli successivi il valore di usura,

determinando ciclo per ciclo il valore della x di tale grafico (x = profondità di superficie): in poche parole abbiamo dato al valore k una funzione del ciclo di stampaggio, assumendo come profondità la somma degli strati precedentemente rimossi tramite usura.

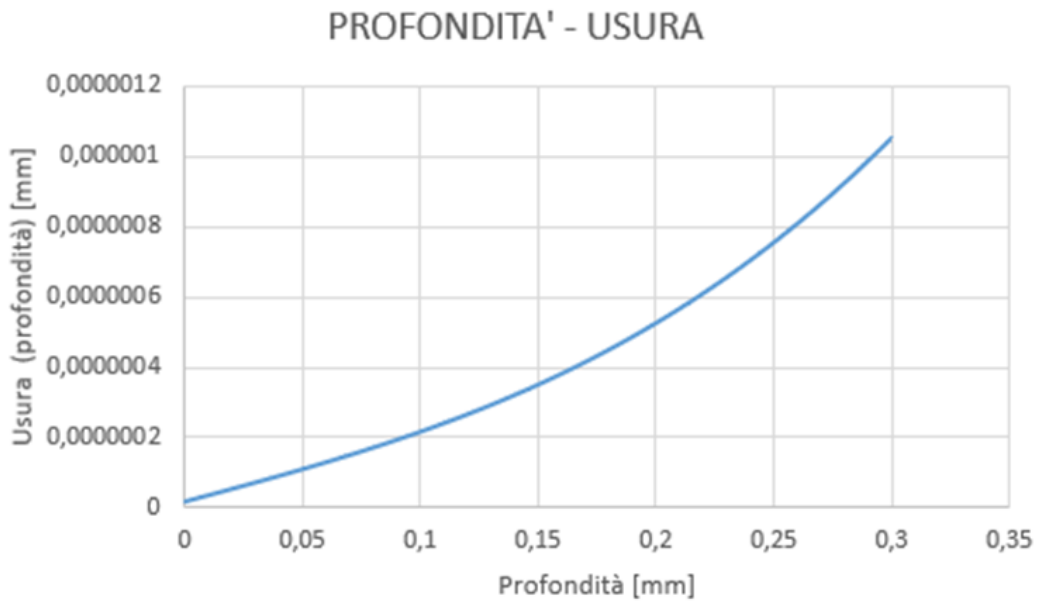


Figura 1.3.13: Grafico Excel dell'usura in funzione dello spessore di materiale rimosso per usura

Tramite la semplice applicazione della formula di Archard è stato quindi possibile creare un grafico che rappresentasse la funzione dell'usura in funzione della profondità. Per il calcolo dell'usura cumulativa è stato invece usato un semplice comando somma: infatti il grafico nell'immagine 1.3.13 fornisce come output l'usura del solo ciclo N , ma non tiene conto di tutti gli strati di materiali asportati dal ciclo 1 a $N-1$; in questo modo il calcolo era completo ed il numero di cicli è stato facilmente determinabile.

1.4: LETTURA DEI DATI E CONFRONTO DEI RISULTATI

Tale modello ha restituito come vita utile del semovente un numero di cicli pari a 1812370,873 cicli.

Questo risultato è stato assunto come corretto in funzione di quanto visto precedentemente; tuttavia è opportuno analizzare bene il fenomeno per poter comprendere anche il possibile discostamento che può esserci nella realtà da questo modello: per poter affermare che tale calcolo sia corretto deve essere assunto che l'attrito rimanga costante (cioè che il semovente sia ingrassato molto spesso, almeno una volta al giorno durante le stampate), che non ci siano carichi straordinari (cioè che i carichi utilizzati nel ciclo della simulazione rimangano costanti in tutti i cicli dello stampaggio reale, cosa che difficilmente avviene), che sia sempre pulito ad ogni cambio stampo, che non ci siano fenomeni di usura che comportino un ulteriore aumento del valore di K nella formula di Archard e che il semovente sia montato sempre correttamente. Infatti, se anche solo una di queste condizioni non dovesse essere rispettata, il ciclo vita del semovente potrebbe subire una brusca diminuzione, ma non è scopo di questa tesi definirla; tuttavia può risultare di interesse vedere uno di questi fenomeni e il relativo danneggiamento sul semovente.

Per esempio, nell'immagine in figura 1.3.13, possiamo vedere al microscopio 20x un'immagine che rappresenta lo stesso semovente analizzato precedentemente che è stato sottoposto da un'usura per abrasione: un detrito si è depositato all'interno del cinematismo e, scaldandosi per attrito, ha asportato una quantità di materiale abbastanza elevata, lasciando un foro e una scia in direzione di marcia del semovente.

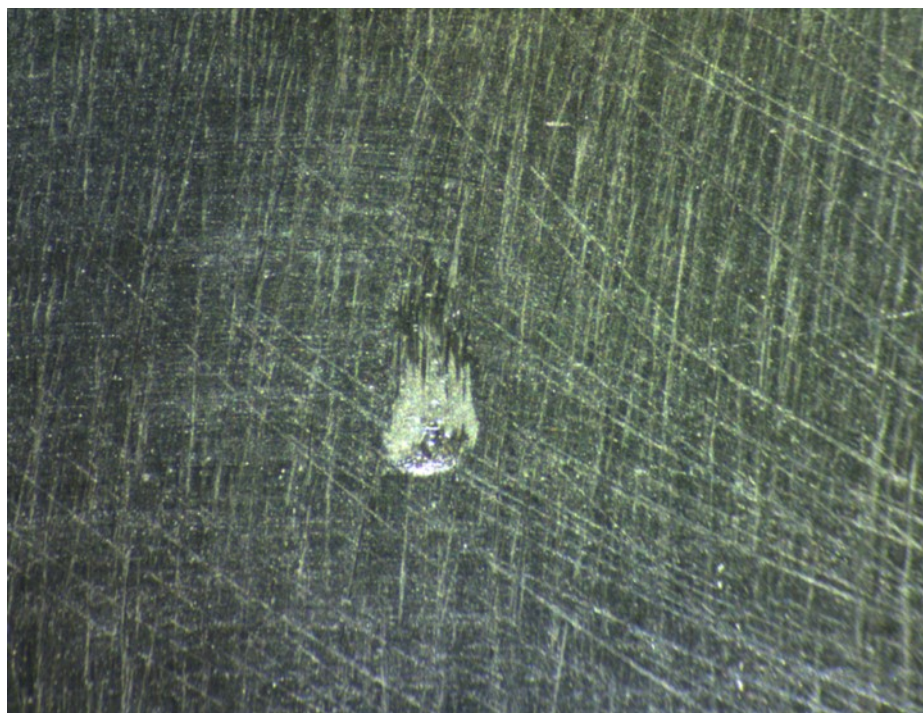


Figura 1.3.13: Particolare al microscopio 20X del seme con rimozione di materiale per abrasione

2. PROGETTAZIONE DELLO STAMPO

2.1: APPLICAZIONE DEL FEM

In sede Linea3 si è ritenuto opportuno verificare tramite il FEM anche lo stato tensionale dello stampo, verificando che non ci fossero criticità dal punto di vista costruttivo.

Tale analisi ha preso forma in funzione anche di un'altra simulazione effettuata tramite Moldex3D, un software Mold Flow che riproduce il processo di stampaggio in tutte le sue fasi, che sarà successivamente analizzato più nel dettaglio: difatti solo tramite questo software era possibile comprendere i carichi che si sviluppano all'interno della cavità stampo durante un ciclo lavorativo dello stampo, e questo era fondamentale per la corretta modellazione del FEM. Oltre a questo, senza dilungarsi di nuovo nella costruzione del modello, si è messo un incastro nella superficie di appoggio della parte fissa dello stampo a contatto con il piano pressa, e si è sottoposto lo stampo (con un carico distribuito sulla superficie del piano mobile dello stampo) ad un carico di 320 ton: tale carico è di semplice derivazione sperimentale, in quanto tale stampo è stato progettato, date le dimensioni e la superficie proiettata del manufatto, per una pressa da 320T. In sede Linea3 infatti si è usata una pressa dotata di questo tonnellaggio, che è capace di erogare un carico di chiusura stampo con tale forza.

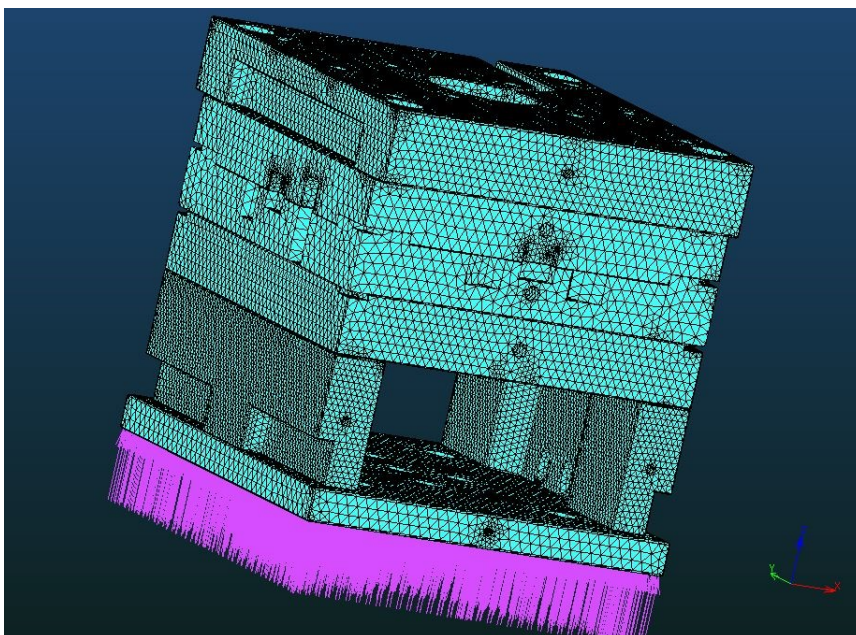


Figura 2.1.1: Costruzione del modello FEM dello stampo HE001

2.2: TENSIONAMENTO DELLO STAMPO

Il risultato di tale analisi ha fornito come risultato un carico massimo pari a 65,7Mpa, un valore che come precedentemente visto è molto basso per un acciaio AISI P20:

dal punto di vista dei carichi difatti lo stampo viene costruito per avere vita infinita, e di conseguenza non vi sono criticità per quello che riguarda i carichi.

Tuttavia tale analisi è servita allo scrittore della tesi per comprendere le vere problematiche legate alla costruzione dello stampo: fra i vari risultati visionabili in Marc infatti è possibile controllare anche i vari “displacement” (cioè le deformazioni dello stampo), e nonostante i carichi non fossero elevatissimi, si è notato da subito, dalla lettura dei risultati, un valore molto elevato di tali deformazioni.

Questo dato è importante per comprendere che lo stampo viene sovradimensionato dal punto di vista dei carichi per far fronte al problema della flessione delle 2 parti (quella mobile e quella fissa), che durante la fase di stampaggio devono rimanere chiuse per permettere il corretto stampaggio del pezzo; il passo successivo di tale analisi FEM è stato quindi quello di studiare il contatto fra la parte fissa e la parte mobile dello stampo, sottoposta a tali carichi. Questo è stato possibile tramite un comando in Marc che si chiama “contact Status”, dove viene semplicemente indicato lo stato di contatto fra 2 corpi, indicando con 0 un non contatto e con un valore di 1,5 le parti a contatto con interferenza.

2.3: ANALISI DELLA CHIUSURA STAMPO

Il “contact status” di Marc non ci fornisce dei valori di interferenza-gioco dello stampo, perciò non è un indicatore numerico dell'ordine di grandezza di tali valori: tuttavia è di semplice utilizzo e molto adatto alla situazione, dove non è di interesse ottenere un certo valore di interferenza, ma il semplice contatto fra le 2 parti è più che sufficiente per poter affermare che la progettazione dello stampo sia stata effettuata correttamente.

Ricordando che la parte di interesse per questa analisi è esclusivamente la parte stampante (cavità stampo) si è andati a leggere i risultati prima nella parte mobile poi nella parte fissa separatamente, come verrà mostrato nelle successive immagini.

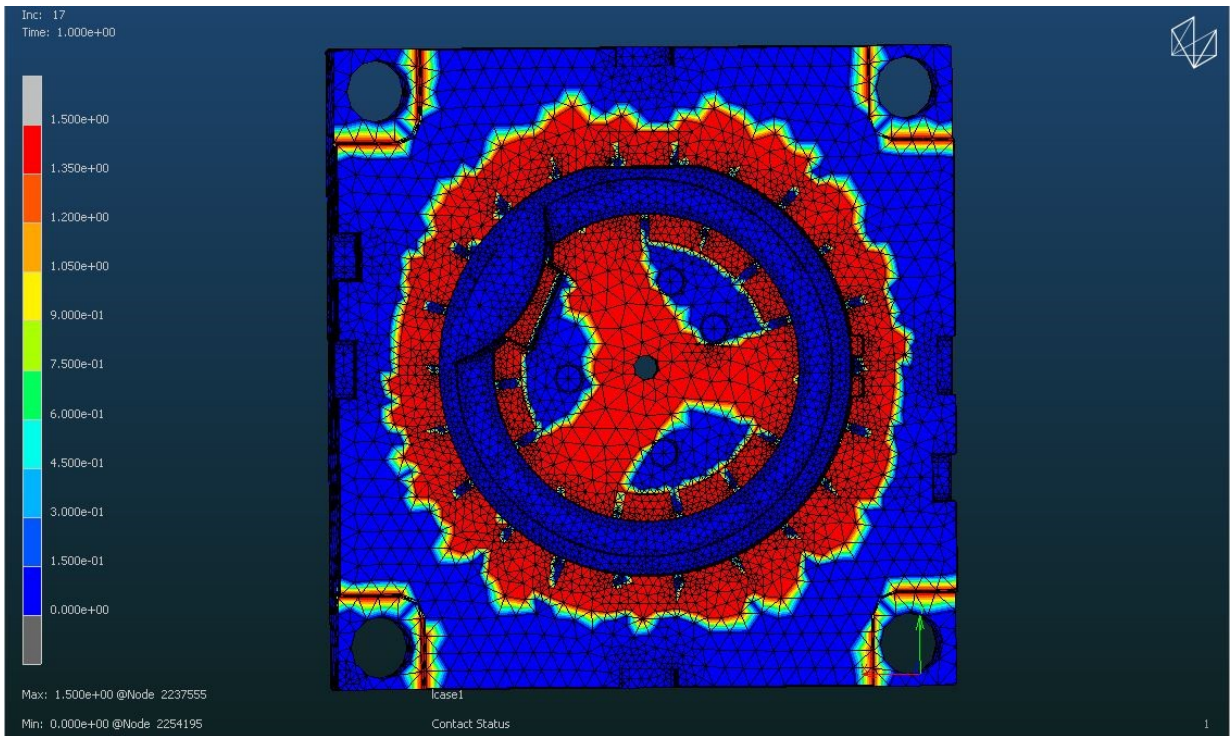


Figura 2.3.1: Contact status di Apex per la parte mobile dello stampo HE001

Nell'immagine in figura 2.3.1 possiamo vedere in rosso tutte le parti a contatto con interferenza, in blu le parti non a contatto e con i restanti colori si rappresentano tutte le superfici di transizione interferenza-gioco.

La cavità stampo è ben delineata, e deve ovviamente non avere contatti, in quanto deve essere quella parte che poi conterrà il fuso a base polimerico durante la fase di stampaggio; tale cavità come possiamo vedere è chiusa internamente ed esternamente, nonostante le forze che si sviluppano al suo interno. Questo vuol dire che nella parte fissa non ci sono problemi che coinvolgono la corretta chiusura dello stampo.

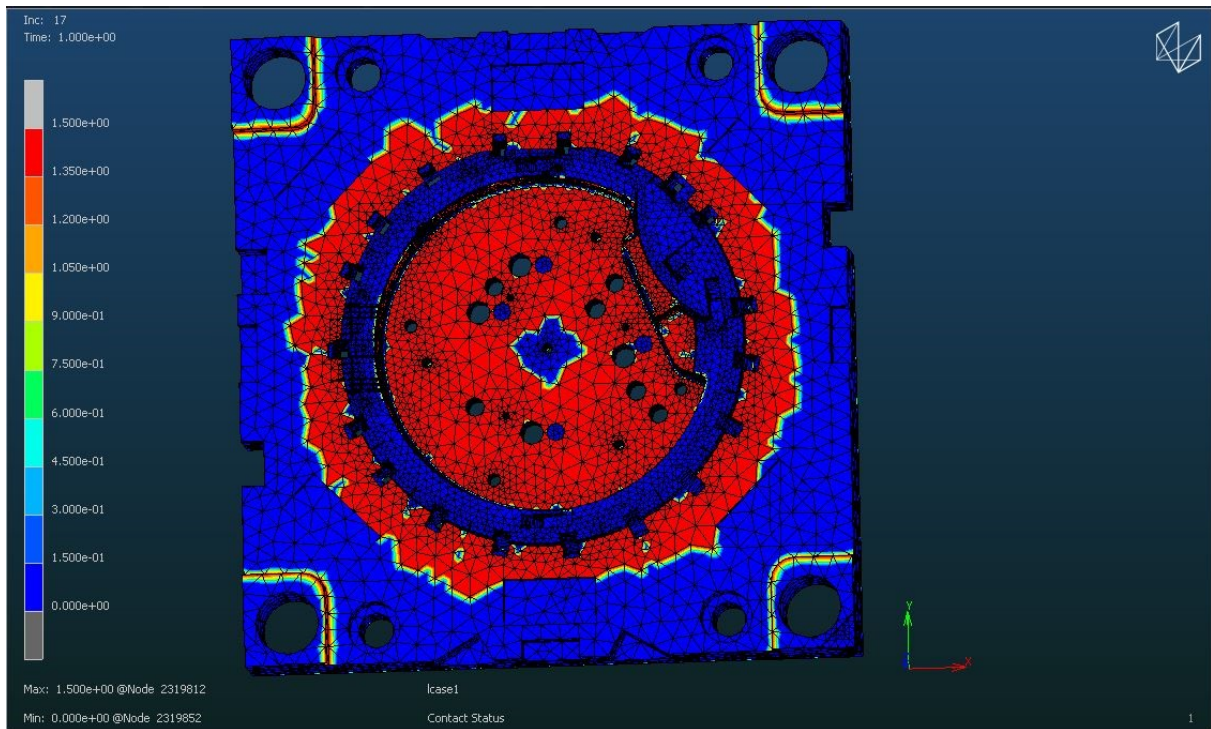


Figura 2.3.2: Contact status di Apex per la parte fissa dello stampo HE001

Stesso discorso vale per la parte mobile, illustrata nella figura 2.3.2: anche in questo caso la cavità stampo è infatti delineata correttamente, non ha zone a contatto, mentre viene chiusa sia internamente che esternamente ad interferenza.

Tali chiusure, se dovesse risultare insufficiente il tonnellaggio della pressa, possono essere migliorate tramite l'aiuto di tamponi di contrasto: spesso infatti può succedere che nella fase di costruzione dello stampo, vi siano zone che, diversamente da quanto preventivato in fase di progettazione, non sono completamente a chiusura; questo può essere dovuto a lavorazioni non sufficientemente precise, a sbilanciamenti, o ad una simulazione incerta.

Tuttavia, queste zone non a contatto sono spesso causa di interferenze maggiori in altre zone: l'obiettivo di usare tali tamponi è quindi quello di "riazzerare" lo stampo, dando uno spessore nelle zone non a contatto, in modo da ripristinare le giuste condizioni di contatto ed avere la corretta chiusura.

2.4: ANALISI DEI RISULTATI

Il FEM è risultato coerente con quanto visto nella realtà: non vi sono stati infatti nella fase di stampaggio del prodotto HE001 Outer door problemi di chiusura dello stampo.

Tale analisi è di fondamentale importanza in quanto una chiusura stampo non adeguata può formare sul prodotto finale un difetto che viene chiamato bava o, addirittura, se il flusso di materiale dovesse raggiungere le zone dei cinematismi, provocare la rottura di semoventi ed estrattori.

3. PROGETTAZIONE DEL COMPONENTE HE001 OUTER DOOR TRAMITE MOLDEX3D

Una volta completata l'analisi del progetto dello stampo, si è proceduto successivamente all'analisi della progettazione del prodotto finito, tramite un software nominato precedentemente, Moldex3D. Con l'utilizzo di questo programma è infatti possibile comprendere le varie fasi del processo di stampaggio, per comprenderne i fenomeni fisici e le relative problematiche. In sede aziendale questo software è stato spesso utilizzato per prevedere difetti di tipo estetico e strutturali, per cercare delle soluzioni pre-produzione e ridurre l'impatto economico di possibili errori di processo.

Tali layout sono spesso infatti inseriti anche in documenti condivisi con i clienti, come ad esempio i TDR (technical design review), in quanto tali difetti estetici a volte sono inevitabili (intrinsecamente definiti dalla geometria del pezzo in questione) o comunque vengono accettati in quanto non di grande impatto o comunque in zone che non sono definite dal cliente estetiche. Tale documento è di fondamentale importanza per l'azienda, in quanto oltre ad avere la funzione di migliorare la comunicazione cliente-fornitore nell'ambito della descrizione del prodotto finito, fornisce in un certo senso una sorta di contratto di responsabilità: queste responsabilità definiscono quali eventuali modifiche da apportare al progetto devono essere finanziate nuovamente dal cliente e quali invece debbano ricadere sul fornitore, in quanto non previste nel documento e di impatto negativo sul progetto finale. Si comprende perciò la sua importanza anche dal punto di vista finanziario e, di conseguenza, l'importanza di effettuare una simulazione di processo che sia il più possibile vicina alla realtà in modo da avere un risultato veritiero e non omettere alcuna problematica legata allo stampaggio del prodotto finito.

In questa tesi vedremo tutte queste tematiche, come già detto, per il prodotto Haier outer door HE001; tale codice, che possiamo vedere nell'immagine 3.1, è un oblò di una lavatrice, e rappresenta nel particolare l'interfaccia con l'utente finale del prodotto: per questo motivo la superficie esterna (in vista) è da considerarsi estetica.

In quanto tale, già in fase di progettazione del processo è da tenere ben presente che questa superficie deve avere il minor numero di difetti possibili, se non addirittura 0 difetti. Nel caso in esame vedremo che quest'ultima opzione è impossibile da percorrere, tuttavia esistono delle tecniche per "nascondere" tali difetti.

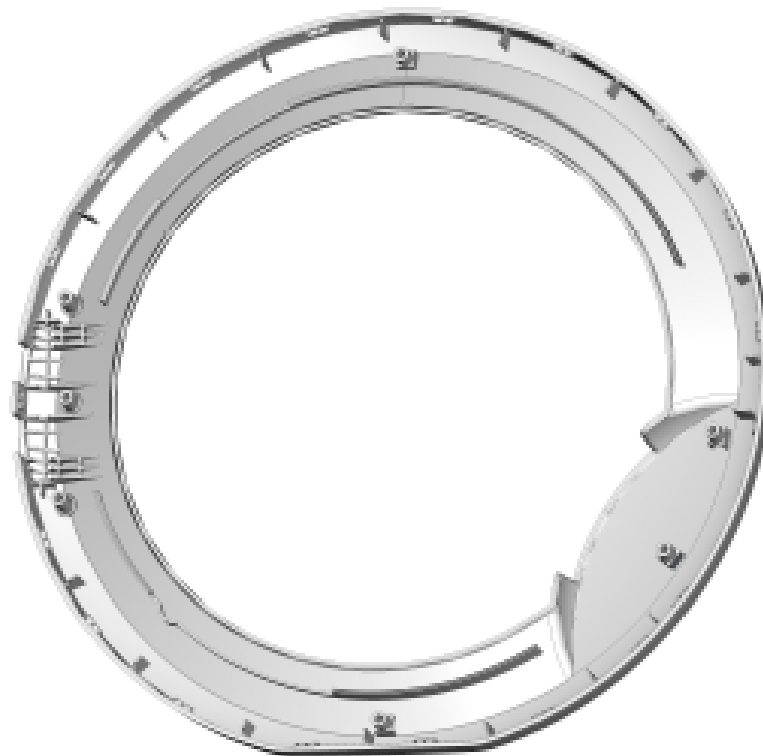


Figura 3.1: Modello Cad 3D dell'Haier Outer Door HE001

3.1 LA MESH IN MOLDEX3D

Differentemente da quanto visto per il Fem, in questo caso abbiamo a che fare con dei corpi che non sono esclusivamente solidi: difatti il fuso della plastica è da considerarsi matematicamente come un accoppiamento fra un fluido dotato di flusso viscoso ed un solido, e per questo motivo, come possiamo vedere nell'immagine 3.1.1, la mesh si deve adattare a descrivere tale comportamento.

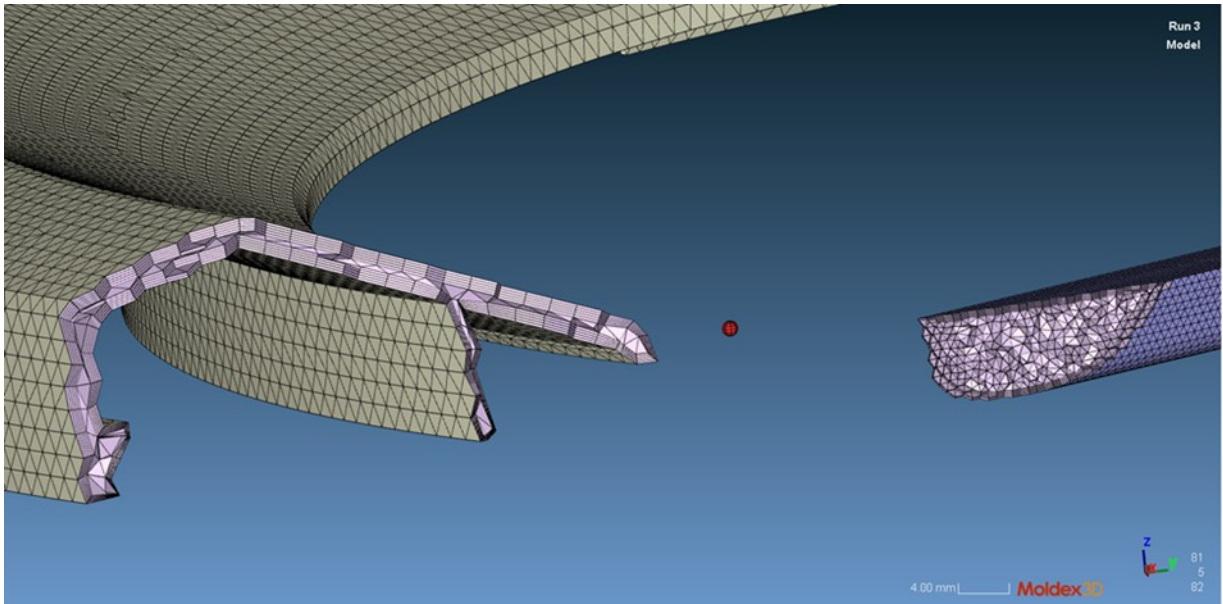


Figura 3.1.1: Particolare della sezione della mesh di Moldex3d ottenuta attraverso il comando “Chisel”

Per i più avvezzi ai software di simulazione può essere di semplice intuito la similitudine, nello strato più esterno della materozza, con le mesh generate nei software di CFD: questo tipo di elementi (prismatici) si utilizzano nella descrizione di flussi viscosi per la loro accuratezza nella soluzione degli effetti di bordo. In Moldex3D non vi sono particolari difficoltà nella costruzione di queste mesh strutturate in quanto il software, se impostato bene il problema, riconosce automaticamente dove e come utilizzare correttamente la mesh, ed in particolare dove gli effetti viscosi sono più evidenti (cioè nei canali freddi, caldi e nei canali di raffreddamento) utilizzerà questo tipo di struttura mentre, dove l'effetto viscoso è minore (vedi cavità stampo), la mesh sarà semplicemente tetraedrica.

3.2 PROCESSO E MATERIALE IN MOLDEX3D

Per quanto riguarda il materiale da utilizzare nella simulazione, Moldex3D utilizza un'ampia libreria chiamata Material Wizard.

Tale libreria contiene tutti i dati solitamente contenuti nei data sheet dei materiali mandati dai fornitori di tale materie prime, come ad esempio indice di viscosità, densità, tensioni di rottura/snervamento, dielettricità, ecc..

Il prodotto in esame è realizzato con un ABS dell'azienda Lotte-Formosa, un Elix P2H-AT, presente nella libreria Moldex. Questo tipo di ABS ha la peculiarità di avere temperature di stampaggio molto elevate, essendo stabilizzato con degli additivi a tale scopo, per compensare un indice di fluidità non elevatissimo e favorirne l'utilizzo.

Nell'immagine 3.2.1 viene mostrato infatti che la temperatura minima di stampaggio consigliata è di 220 gradi, mentre la massima è di 280; questo è infatti il riferimento che va utilizzato quando si parametrizza lo stampaggio per impostare le temperature delle resistenze del cilindro di plasticizzazione.

Item Name	Item Data	Unit
Melt Temperature (minimum)	220	°C
Melt Temperature (normal)	250	°C
Melt Temperature (maximum)	280	°C
Melt Temperature Range	220~280	°C
Mold Temperature (minimum)	60	°C
Mold Temperature (normal)	72.5	°C
Mold Temperature (maximum)	85	°C
Mold Temperature Range	60~85	°C

Figura 3.2.1: Temperature di stampaggio dell'ABS Elix P2H-AT

Oltre alla temperatura del fuso, il Material Wizard di Moldex consente anche di avere le giuste temperature per lo stampo vero e proprio: in questo caso, diversamente dal cilindro, la temperatura corretta non si otterrà attraverso termoresistenze, ma attraverso i canali di raffreddamento dello stampo, che saranno collegati ad una centralina. Solitamente le temperature dello stampo differenziali (una per la parte mobile ed una per la parte fissa) vengono utilizzate per compensare le deformazioni reali del prodotto finale, ma in questo caso, essendo un prodotto prettamente estetico con richiesta dal cliente di una superficie lucida nella parte di interfaccia, non vi sono ampi margini di scelta: quando infatti vi sono delle texture nel prodotto scelte dal cliente, è buona norma per ottenere il risultato desiderato scegliere la parte stampante con tale texture come fredda (a temperatura minore). Per questo motivo la parte fissa sarà la parte fredda (temperatura della centralina = 60°C), mentre la parte mobile sarà quella calda (temperatura della centralina =70°C).

Item Name	Item Data	Unit
Melt Temperature (minimum)	220	°C
Melt Temperature (normal)	250	°C
Melt Temperature (maximum)	280	°C
Melt Temperature Range	220~280	°C
Mold Temperature (minimum)	60	°C
Mold Temperature (normal)	72.5	°C
Mold Temperature (maximum)	85	°C
Mold Temperature Range	60~85	°C

Figura 3.2.2: Temperature stampo consigliate per lo stampaggio dell'ABS Elix P2H-AT:

Una volta completata l'impostazione dei parametri delle temperature di stampaggio, rimangono da impostare i parametri di velocità e pressione. Il software Moldex permette di utilizzare due diversi metodi simulativi: il CAE ed il Machine Mode.

Il simulatore CAE simula un processo di stampaggio del prodotto in via del tutto indipendente dalla pressa in cui lo stampo viene inserita, perciò permette di simulare senza avere limitazioni dovute alla macchina fisica. Tale tecnica viene solitamente utilizzata nei primi passi dello sviluppo del processo di stampaggio, in quanto permette di comprendere più velocemente la fisica del problema senza limitarsi alla macchina e anzi cercando di capire quale sia quella più adatta per il processo.

Il simulatore Machine mode di contro è più lento, richiede più tempo per essere computato e non permette di superare i parametri della pressa impostata, tuttavia è il metodo più accurato e che meglio si adatta a convalidare un progetto: questo perché tiene conto dei limiti della macchina fisica e dei parametri impostabili. In poche parole uno stampo potrebbe tecnicamente funzionare benissimo anche se progettato con il CAE mode, ma se non si ha a disposizione una macchina capace di erogare la portata necessaria o di avere il corretto tonnellaggio, questo stampo montato sulla macchina fisica potrebbe non funzionare come preventivato. Di conseguenza di norma, è bene partire da una simulazione CAE ed una volta individuato un valido processo di stampaggio, trasformare tale simulazione in una Machine mode e controllare che effettivamente questo processo sia riproducibile sulla macchina designata: in Moldex, infatti, vi è la possibilità di copiare una Run Cae e di trasformarla in Machine Mode, e il software adatta automaticamente tutti i parametri impostati nella prima in comandi effettivi da inserire nella macchina fisica.

Lo stampo HE001, quando lo scrittore della tesi in questione è arrivato in azienda, era già stato creato e collaudato, di conseguenza non si aveva la necessità di utilizzare una simulazione CAE e si è partiti direttamente dai processi utilizzati nella macchina fisica, procurati attraverso la scheda di stampaggio MOD056.

Quindi si è proceduto ad inserire la corretta macchina utilizzata, una pressa Billion 320T Hercule Plus H1300-60, e ad impostare i vari parametri di stampaggio. La prima cosa è stata quella di ricreare il profilo di velocità come da scheda di stampaggio, con velocità variabile in funzione della posizione della vite: come possiamo vedere nell'immagine 3.2.3 infatti si hanno 4 profili di velocità diversi, che determinano la portata di fluido da inserire in cavità stampo in funzione delle diverse posizioni della vite della macchina.

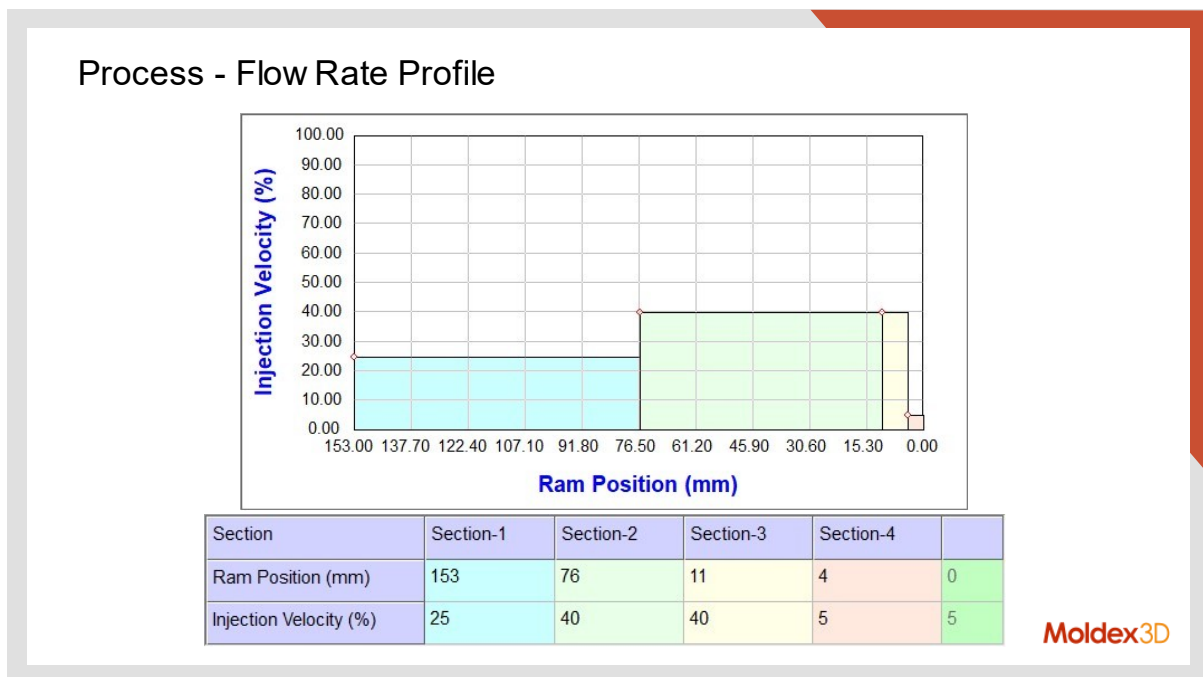


Figura 3.2.3: Profilo di velocità della fase di iniezione impostato per lo stampaggio dell'HE001

Dopodichè è stato inserito un risucchio della vite (suck back): questo parametro imposta sulla macchina un movimento indietro della vite che, prima di iniziare il processo di riempimento, aspira parte di aria della cavità stampo, creando una leggera depressione in cavità che favorisce lo stampaggio del prodotto. È importante sottolineare che tale parametro va limitato al minimo necessario in quanto un'aspirazione eccessiva di aria può provocare sul prodotto finale un difetto di striature da aria inglobata: infatti la maggior parte dei materiali plastici può assorbire una certa quantità di aria, ma se essa arriva a saturazione rimane non miscelata nel prodotto.

Oltre al profilo della velocità, sempre in fase di riempimento, è stato impostato il valore massimo della pressione raggiungibile: questo valore permette al cilindro di limitare tale grandezza che, se non opportunamente controllata, potrebbe raggiungere valori tali da aprire lo stampo e provocare bave.

Tale analisi, come visto in precedenza, è stata controllata anche con il FEM dello stampo: abbiamo visto in precedenza al capitolo 2.2 che impostando una pressione massima nella fase di riempimento di 40Mpa lo stampo non si apre e le parti di chiusura della cavità stampo

rimangono tutte a contatto. In Moldex questo viene controllato con il risultato derivante dalla “Clamping Force”, che dà come risultato la minima forza necessaria da applicare sullo stampo, per far sì che non si abbia questo difetto di stampaggio. Si è quindi impostato tale parametro al valore analizzato come mostrato nell’immagine 3.2.4.

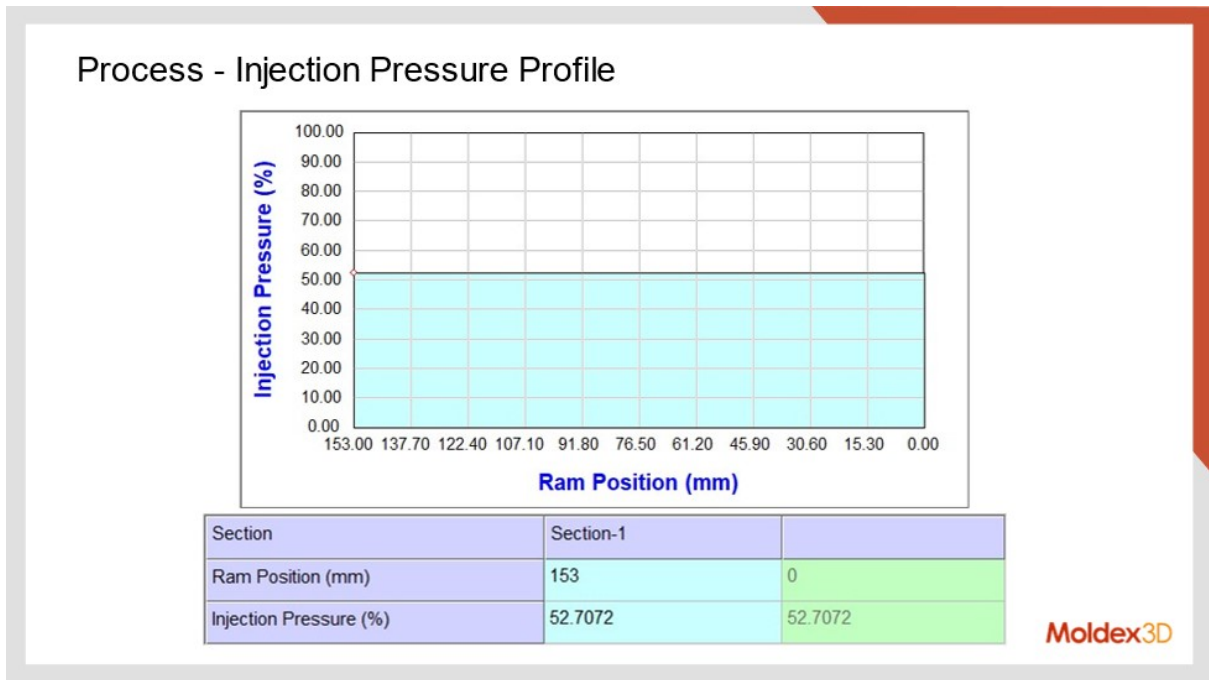


Figura 3.2.4: Impostazione della massima pressione raggiungibile in fase di riempimento

In generale la fase di riempimento non arriva a completare il pezzo, ma si raggiunge un valore pari al 98% del volume e questo perché, arrivando al 100% con velocità troppo elevate, si potrebbe sempre avere una apertura dello stampo. Per tale motivo, quando si raggiunge questa quota del volume, le macchine vengono impostate per passare dalla fase di riempimento, che viene controllata attraverso il profilo di velocità, ad una fase in cui il controllo viene effettuato in pressione: tale fase è definita come fase di mantenimento.

Tale fase viene descritta attraverso un profilo di pressioni variabili, tali da finire inizialmente di riempire il volume, dopodiché la pressione applicata in cavità deve essere tale da non permettere al flusso di tornare indietro nel cilindro e deve essere applicata fino a che il pezzo non si sia raffreddato, più in particolare soprattutto nel/i punto/i di iniezione (il restringimento che

delimita la superficie di ingresso del fuso in cavità stampo). Nell'immagine 3.2.5 viene mostrato il profilo impostato per il caso in esame ricavato dalla scheda di stampaggio.

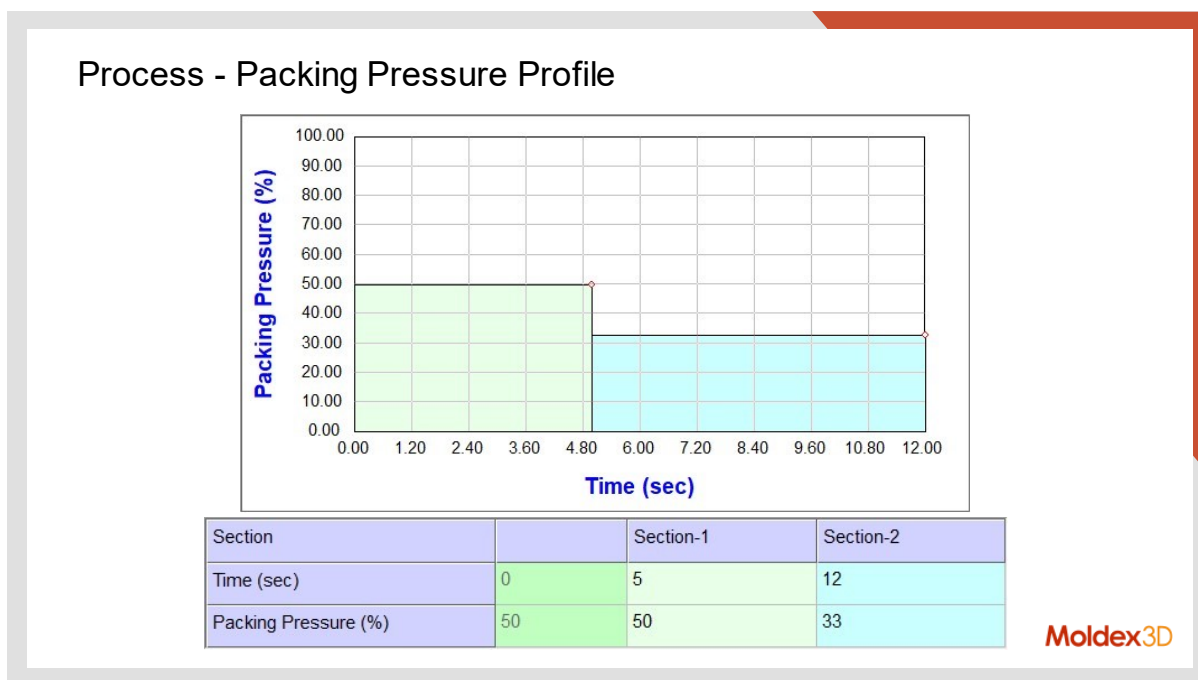


Figura 3.2.5: Impostazione del profilo di pressione in fase di mantenimento preso dalla scheda parametri MOD056

Una parte molto importante da illustrare è anche quella delle temperature del cilindro di plastificazione. Tali temperature devono essere impostate in maniera molto accurata, in quanto non determinano solo la temperatura di ingresso del fuso in cavità stampo: infatti mantenere in alcune zone del cilindro una temperatura troppo bassa potrebbe non permettere al materiale plastico di essere sufficientemente fluido, mentre al contrario mantenerle troppo elevate potrebbe provocarne la degradazione.

Come analizzato in precedenza il range di temperature deve essere compreso fra i 220° C e i 280° C, e per impostare tali parametri si parte dalla conoscenza di tali valori. Tuttavia per comprendere bene la difficoltà di questo processo, si deve prima di tutto sapere che il cilindro di iniezione ha una dimensione fisica costante, ed il materiale contenuto al suo interno potrebbe (ed in genere è così) contenere un volume diverso da quello del prodotto finale. Questo vorrebbe

dire che, una quantità di materiale potrebbe avere un certo tempo di permanenza del cilindro, mentre in altre zone questo tempo potrebbe essere diverso. Nel caso in esame infatti, il volume di materiale contenuto nel cilindro di iniezione è di 600cm^3 mentre il componente ha un volume di circa 191cm^3 , come mostrato in figura 3.2.7, e questo vorrebbe dire che parte del materiale rimane nel cilindro per la durata di 4 cicli di stampaggio, mentre un'altra parte rimane per 5 cicli. Questa parte di materiale rimane per uno di questi 5 cicli nella zona 3 del cilindro (immaginiamo il cilindro diviso in 3 parti uguali, le zone sono numerate in ordine a partire dalla zona dell'ugello). Per questo motivo le temperature della zona 4 sono state diminuite, in modo tale che il materiale non venga degradato quando poi, passando nella zona 1 al terzo ciclo di permanenza nel cilindro, viene nuovamente riscaldato alla temperatura di ingresso in cavità.

A tal proposito ci sono delle precise limitazioni che vengono utilizzate nella scelta della pressa da utilizzare per stampare un prodotto: come possiamo vedere dalla fonte <https://www.ptonline.com/articles/revisiting-shot-size-vs-barrel-capacity>, infatti, il rapporto fra il volume del prodotto e del cilindro di plasticizzazione deve essere compreso fra 0,25 e 0,65: se si è dentro questi valori si ha la scelta ottimale della pressa, mentre al di sotto del primo valore si ha il rischio di avere una bassa qualità del materiale stampato che potrebbe degradare più facilmente mentre, al di sopra del primo valore, potremmo non riuscire a riscaldare sufficientemente il materiale in modo tale da renderlo fluido e quindi avere problemi di incompletezza e otturazione del cilindro. In Moldex vengono calcolate le stampate, che risultano essere (arrotondando ad un numero finito) 4: perciò il rapporto è molto ai limiti della fattibilità, essendo $\frac{1}{4} = 0,25\%$, come mostrato in figura 3.2.6.

Item	Feed section	Transition section	Metering section	Unit
Pitch Size	60	--	--	mm
Flight Width	6	--	--	mm
Channel Depth	7.5	7.5 ~ 2.5	2.5	mm
Section Length	600	300	245	mm
Number of Pitch	10	5	4.08333	--
Nozzle Diameter	2	--	--	mm
Nozzle Length	10	--	--	mm

Figura 3.2.6: Riassunto delle condizioni di stampaggio con rapporto del volume massimo della vite e il volume della cavità stampo

Summary - Process Condition

Filling	Item Data	Unit
Filling Time	0.966633	sec
Melt Temperature	220	°C
Mold Temperature	60	°C
Max Injection Pressure	181	MPa
Injection Volume	190.91	cc
Packing		
Packing Time	12	sec
Max Packing Pressure	181	MPa

Moldex3D

Figura 3.2.7: Breve riassunto delle fasi di riempimento e mantenimento, con calcolo del volume totale della cavità stampo

Gli ultimi parametri di processi rimasti da impostare sono i tempi: il tempo di riempimento è automaticamente determinato dal profilo di velocità, mentre rimangono i tempi di mantenimento e i tempi di raffreddamento.

Tali valori sono stati presi dalla scheda di stampaggio, e sommati ai tempi di riempimento e di estrazione (che non vengono simulati in Moldex, ma possono essere inseriti al suo interno come fittizi) determinano il tempo ciclo totale del processo.

Nell'immagine 3.2.8 a pagina seguente possiamo vedere tali valori.

Summary - Process Condition

Cooling	Item Data	Unit
Cooling Time	35	sec
Mold Open Time	5	sec
Ejection Temperature	85	°C
Air Temperature	25	°C
Cycle Time	55	sec

Moldex3D

Figura 3.2.8: Rappresentazione dell'impostazione dei tempi di raffreddamento, apertura stampo e risultato totale del ciclo di stampaggio

3.3 IMPOSTAZIONI DELLA SIMULAZIONE

Si vuole fare un breve cenno anche a come sono stati impostati i parametri della simulazione e alle varie possibilità che vengono permesse da Moldex.

Si è infatti parlato delle varie fasi di processo di stampaggio, cioè raffreddamento, riempimento, mantenimento, estrazione, ma, in caso di bisogno, Moldex offre la possibilità di vedere solo le fasi di nostro interesse. Esse sono selezionabili e personalizzabili, in base a ciò che si vuole richiedere al software. Inoltre, oltre a vedere tali fasi, Moldex offre anche il pacchetto “Warpage”, cioè deformazione, che permette di simulare il dimensionamento e le deformazioni del prodotto finito una volta completamente raffreddato. Impostando una temperatura dell’ambiente (solitamente lo standard fa riferimento ad una temperatura di 20°C), il simulatore ci permette di vedere ciò quando il 99% del volume del prodotto finale ha raggiunto tali temperature. Questo risulta essere molto utile per comprendere se la cavità stampo sia stata dimensionata bene per ottenere nel prodotto finale le quote richieste dal cliente, ancor prima di cominciare a costruire lo stampo, in modo tale da non dover rischiare di avere costi dovuti ad errori in fase progettuale.

Nel caso in esame, ad esempio, si sarebbe potuto anticipare un problema di circolarità del prodotto finale che in alcune direzioni rispetta le quote del diametro esterno, mentre in altre è risultato troppo piccolo; tale deformazione comportava infatti un difficile accoppiamento con la relativa controcornice (parte interna dell’oblò della lavatrice, sempre prodotta in sede Linea3).

Dopodiché per le varie fasi di riempimento mantenimento e raffreddamento il software richiede il numero di step da memorizzare: infatti il software ha un suo time-step in cui calcola tutto, ma non li tiene tutti in memoria in quanto occuperebbe troppo spazio sulla scheda rigida. Per questo motivo, in base alle esigenze di chi svolge la simulazione, può essere scelto un certo numero di punti in cui invece si può visualizzare qualunque grandezza nel risultato finale. Nel nostro caso in esame si è scelto di avere 10 output nella fase di riempimento (secondo l’esperienza personale è il numero minimo per avere un’idea di massima di quel che succede nella fase di riempimento), 3 step per il mantenimento (in questo caso sono più che sufficienti, ed è lo standard del software) e 3 per i raffreddamenti (potrebbe essere utile averne di più quando si hanno centraline con variazioni di temperatura durante il processo, cosa che nel caso in esame non è stata fatta).

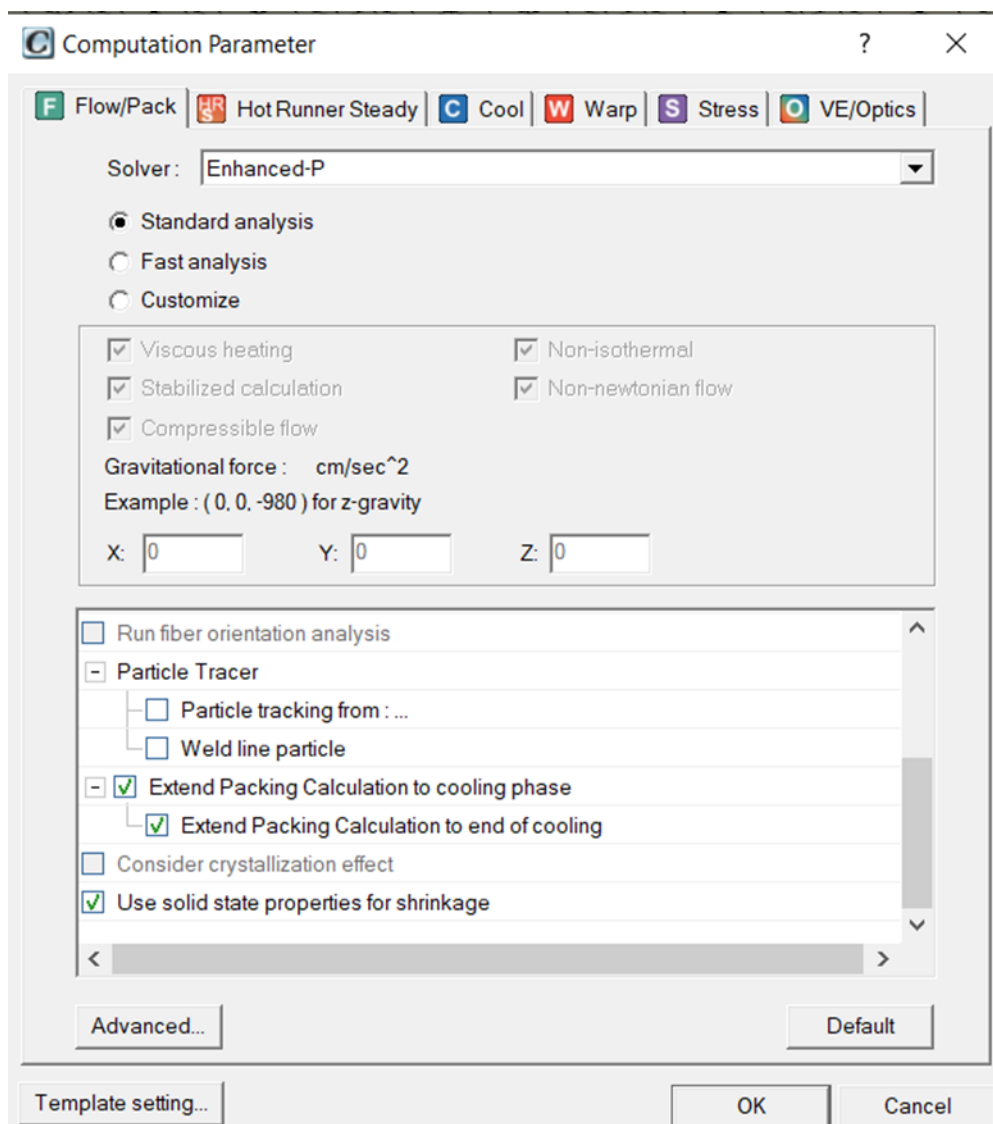


Figura 3.3.1: Impostazioni del computing parameter di Moldex con richiesta di calcolare automaticamente il necessario tempo di mantenimento, estendendo il calcolo del mantenimento fino alla conclusione della fase di raffreddamento

Si è inoltre impostato di stimare il corretto tempo di mantenimento e di raffreddamento secondo il calcolo del simulatore (consiglio di farlo sempre, per avere un confronto con ciò che è stato impostato da chi svolge le simulazioni e correggere eventuali errori o apportare migliorie al processo)

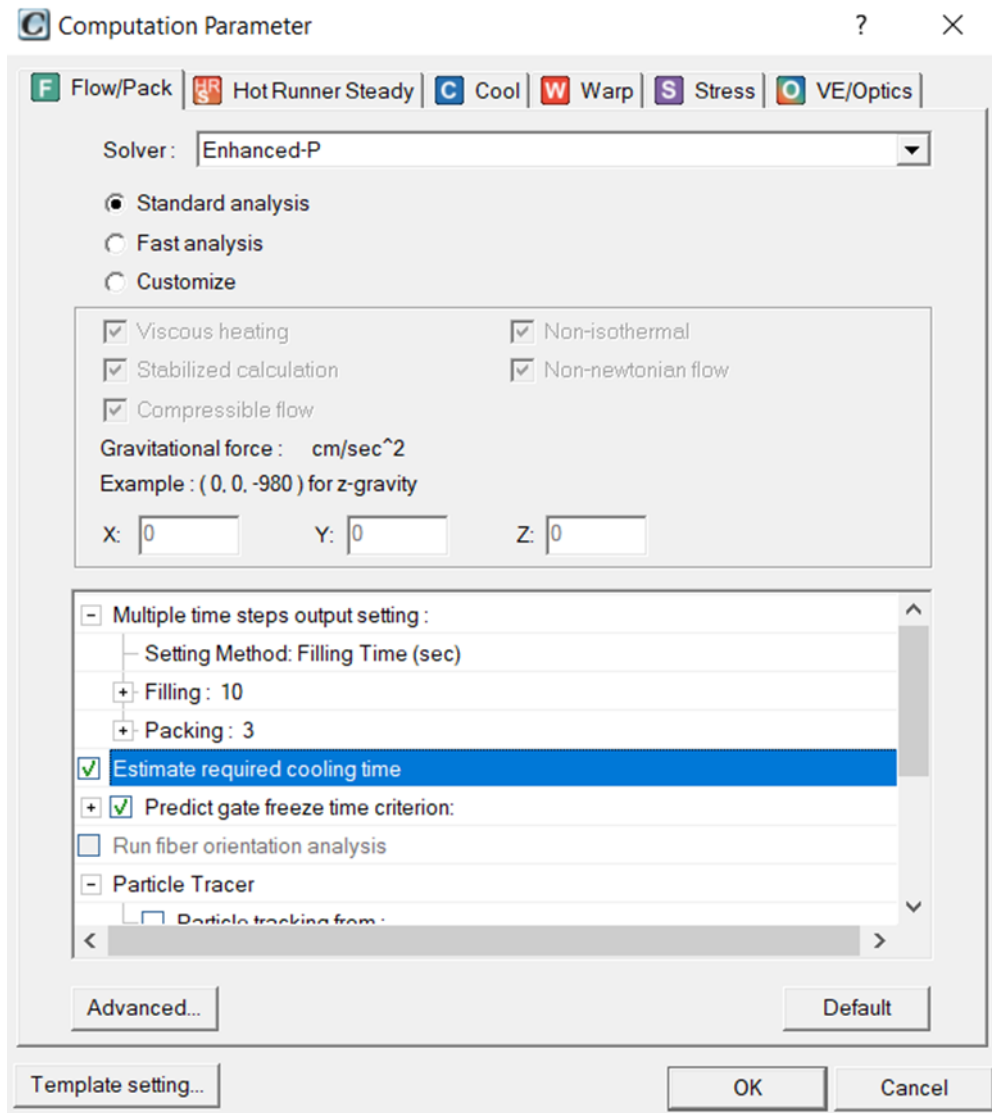


Figura 3.3.2: Richiesta della stima del tempo di raffreddamento al Computing Parameter di Moldex3D

3.4 LETTURA DEI RISULTATI

L'output della simulazione fornisce un elenco di risultati che si cercherà di sviscerare in questo capitolo. Uno di questi, il più immediato, è il “melt front time”, che mostra secondo per secondo l'avanzamento del flusso di materiale in cavità stampo (mostrato in figura 3.4.1)

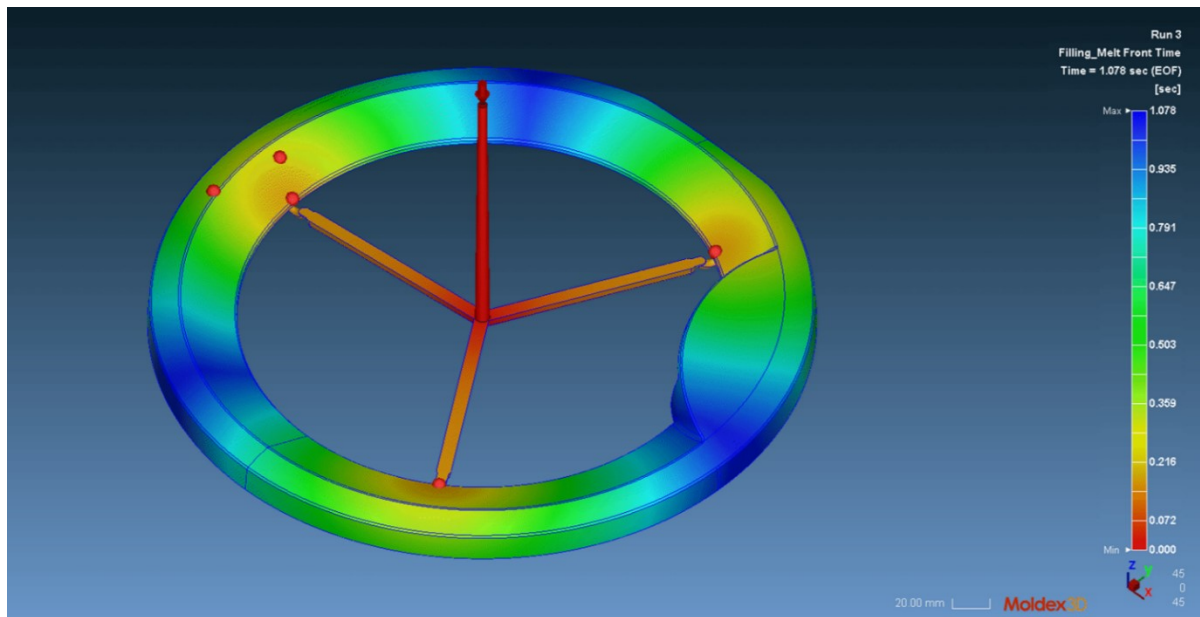


Figura 3.4.1: Risultato del “Filling Melt front Time” del processo di stampaggio dell’HE001

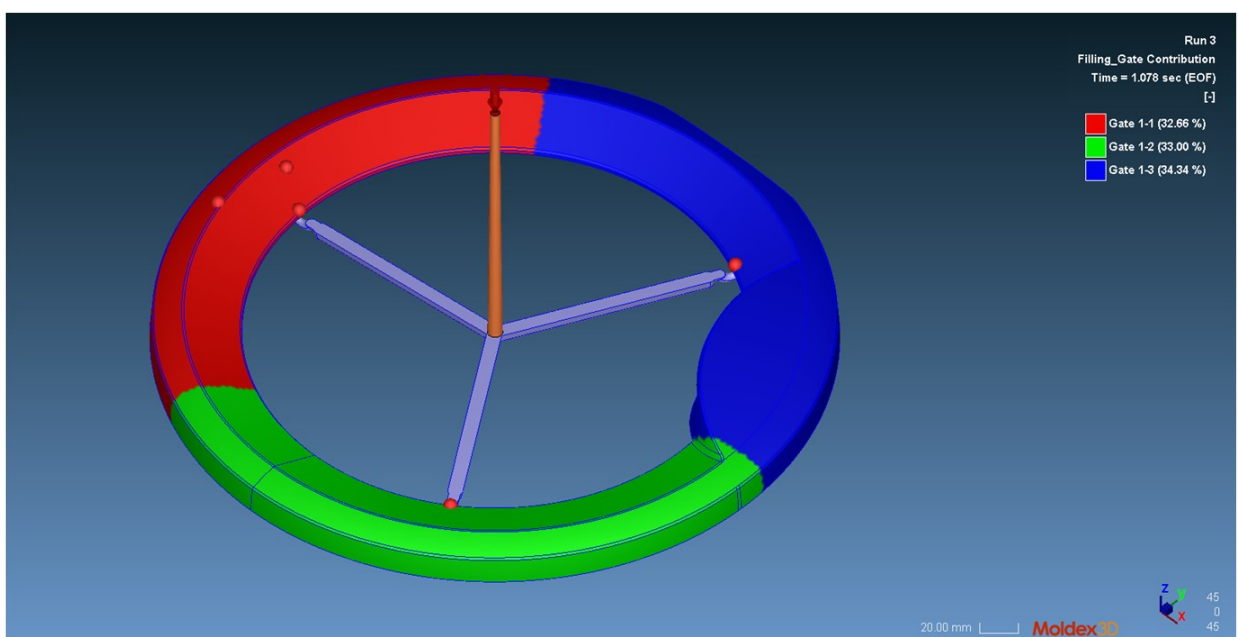


Figura 3.4.2: Contributo dei 3 punti di iniezione della materozza in percentuale di volume

Ciò che risalta subito all'occhio è il fatto che il flusso entra in cavità da 3 punti separati, e si incontra in 3 sezioni del manufatto. Questo dà luogo ad un difetto di tipo estetico e strutturale chiamato linea di giunzione: tale difetto ha un comportamento molto simile alle saldature, in cui si ha quindi una separazione netta della struttura molecolare del polimero, che nel nostro caso, trattandosi di un ABS, non è semicristallino, bensì amorfo. Tale separazione non è perciò concettualmente uguale alle saldature che si potrebbero immaginare negli acciai, ma rappresenta una zona di discontinuità delle lunghe catene polimeriche dell'ABS che in questa particolare sezione hanno maggior difficoltà di attraversamento. Questo tipo di comportamento determina perciò, oltre che una minor resistenza meccanica, un aspetto differente del polimero in tale zona, che rende perciò visibile anche ad occhio nudo questo fenomeno fisico.

Tali linee sono presenti nella maggior parte dei componenti che vengono prodotti per stampaggio ad iniezione; tuttavia, la non conoscenza di tale difetto fa sì che, se tenuti ben presenti alcuni fattori che vedremo a breve, tali difetti non vengano notati o comunque non risaltino all'occhio.

Rendere tali giunzioni, infatti, il meno visibili possibile non è qualcosa di banale: esse principalmente si formano da letteratura quando due fronti di flusso si incontrano con vettori velocità che formano angoli maggiori di 130 gradi, e a partire da tale valore, più ci si avvicina ai 180 gradi maggiormente influenzeranno la struttura del materiale e quindi saranno più visibili.

Oltre che a questo, la loro visibilità è anche influenzata dalla temperatura: questo perché mantenendo temperature più alte possibili, se si è oltre il valore di fusione del materiale che si sta stampando si dà più tempo al materiale di riorganizzare tale struttura. Ne deduciamo perciò che se si vuole cercare di rendere tale difetto il meno impattante possibile si deve cercare di tenere le temperature elevate (per un lasso di tempo più lungo possibile), cercando di far incontrare i flussi con angoli più bassi possibili.

Tali valori possono essere esaminati in Moldex3D: infatti con il comando "weld line" sarà possibile vedere dove si formano le giunzioni, per poi poter approfondire tale difetto dal punto di vista termico e geometrico attraverso i comandi "weld line temperature" e "weld line meeting angle".

Nell'immagine 3.4.5 possiamo vedere come i parametri utilizzati per lo stampaggio dell'Outer Door siano tali da permettere al fuso di riscaldarsi ulteriormente in cavità stampo per attrito:

questo permette di raggiungere temperature abbastanza elevate da “mascherare” la visibilità delle linee di giunzione, senza raggiungere i massimi valori dell’ABS ELIX (che da letteratura deve essere stampato fra i 220 e i 280 gradi, come visto precedentemente nell’immagine 3.2.1).

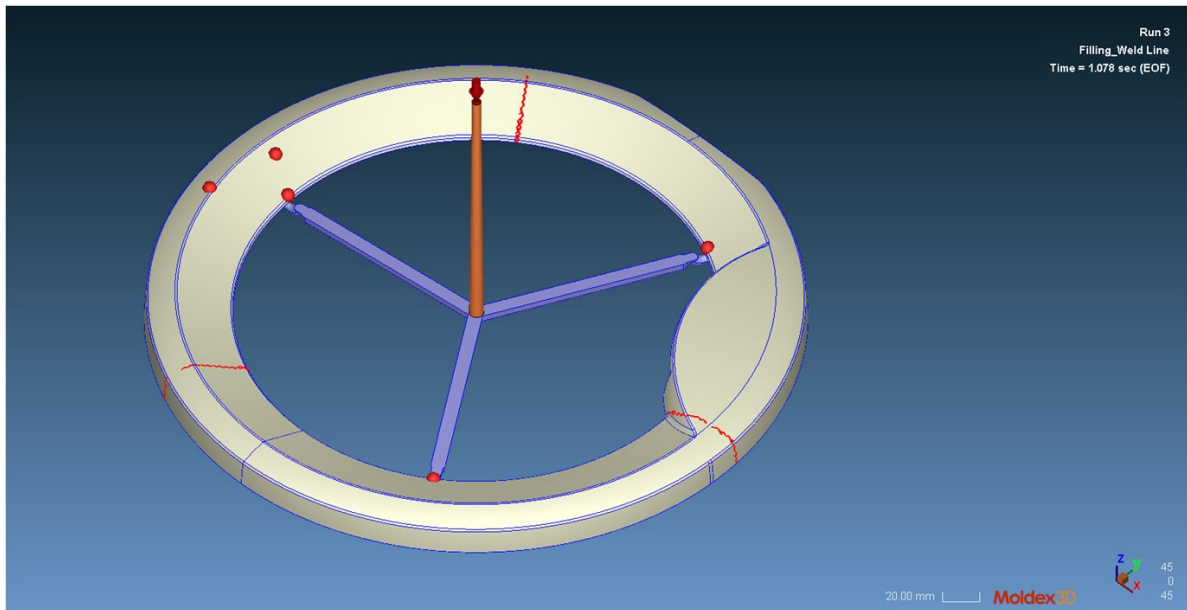


Figura 3.4.3: Risultato della formazione di giunzioni sul componente

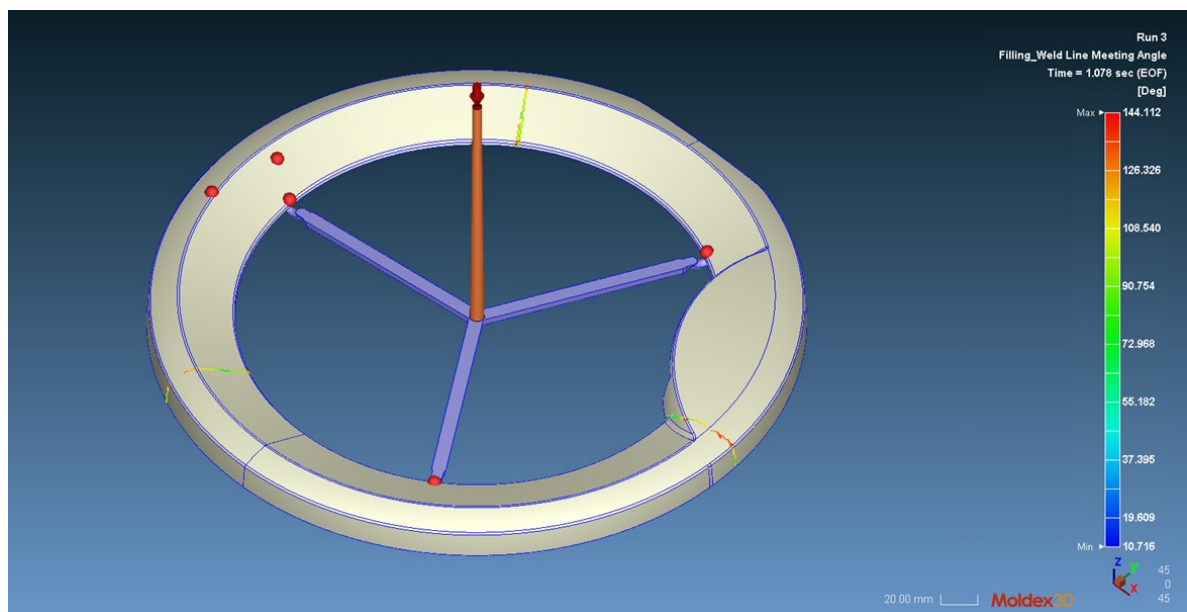


Figura 3.4.4: Angolo di incontro delle linee di flusso nei pressi delle linee di giunzione

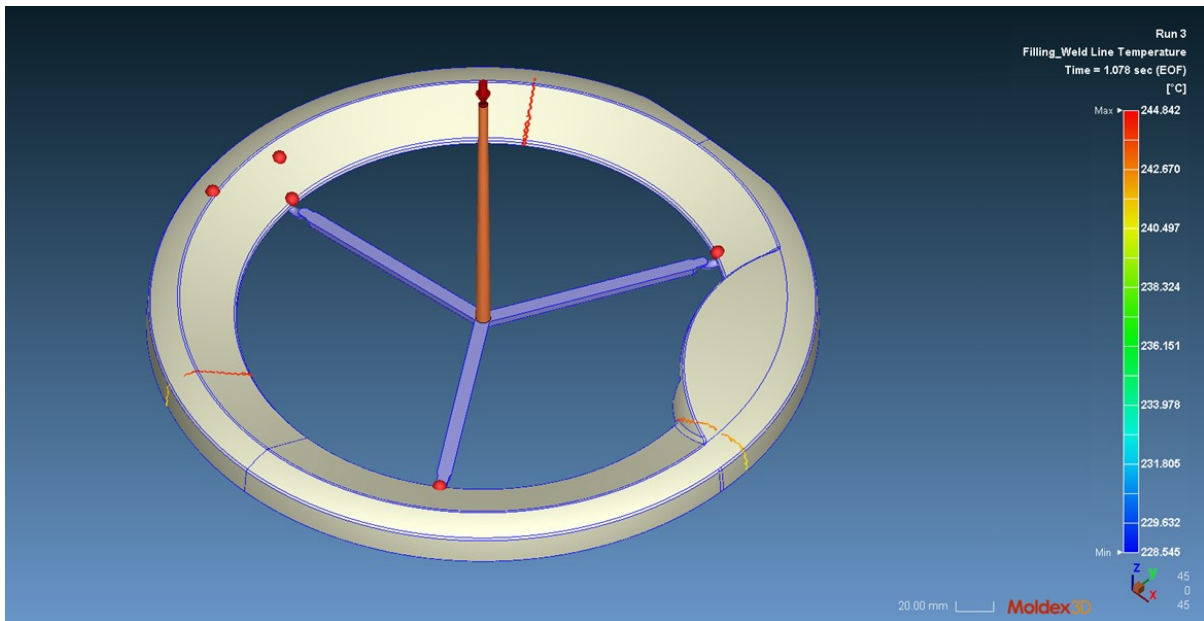


Figura 3.4.5: Temperatura del fuso durante la formazione delle linee di giunzione

Per quanto riguarda le linee di giunzione si è detto tutto, ma è bene precisare che questo fenomeno fisico si porta con sé un'altra tematica importante riguardante i possibili problemi derivati dalla fase di riempimento nello stampaggio: la cavità stampo, infatti, non dobbiamo immaginarla come una cavità vuota, in quanto dobbiamo comunque ricordare la presenza di aria. Questa rappresenta un problema per 2 diversi motivi: il primo è che essendo comprimibile, durante la fase di iniezione parte dell'aria in cavità stampo potrebbe comprimersi aumentando la pressione interna e generando quindi un'elevata resistenza allo scorrimento del flusso, e ciò potrebbe dar luogo ad incompletezze (dovute a zone non raggiungibili per la presenza di aria a pressione maggiore rispetto alla pressione di iniezione); il secondo problema si verifica invece se tale aria rimane inglobata nel fuso pur non avendo una pressione sufficiente a bloccare il riempimento; in tal caso si avrà sul manufatto un difetto che viene chiamato bruciatura o "effetto diesel".

Tale denominazione è già di per sé una descrizione perfetta di ciò che avviene: l'aria viene compressa dalla plastica, che sappiamo essere un prodotto derivato dai carbonfossili, e quando si raggiunge una pressione sufficiente, essa avvia un processo di combustione identico a quello che si verifica nei motori a combustione interna. Tale difetto rappresenta un problema generalmente di tipo estetico e risulta molto evidente.

Per evitare la formazione di tali difetti si deve fare in modo che l'aria in cavità non incontri ostacoli nell'uscita quando spinta dal fronte di flusso: per far questo sullo stampo vengono costruiti quelli che chiamiamo sfoghi dell'aria.

Gli sfoghi sono sostanzialmente dei passaggi molto sottili (10^{-2} mm come ordine di grandezza), che impediscono il passaggio della plastica in quanto troppo sottili per essere riempiti, ma permettono invece il passaggio dell'aria. Sono solitamente costruiti in modo tale da poter collegare la cavità stampo con l'ambiente esterno in tutti quei punti dove sappiamo, teoricamente o sperimentalmente, che vi sarà un accumulo di aria.

Dal punto di vista costruttivo non sono complicati né invasivi, ed è perciò semplice poterne costruire alcuni anche se non previsti in fase di progetto ove se ne presenti la necessità.

È di semplice comprensione quindi il collegamento che vi è fra aria inglobata e linee di giunzione: ove vi è un incontro di flussi, se vi sono 2 punti di contatto diversi l'aria compresa fra essi rimane inglobata nella plastica e può dare luogo ai difetti analizzati poco fa. Per questo motivo sono stati costruiti dei canali di sfogo dell'aria nei pressi delle linee di giunzioni ed in altri punti dove vi è questo accumulo. Tale analisi in Moldex viene analizzata con l'"Air trap", dove attraverso delle sfere dal colore azzurro vengono mostrati i punti di accumulo di aria.

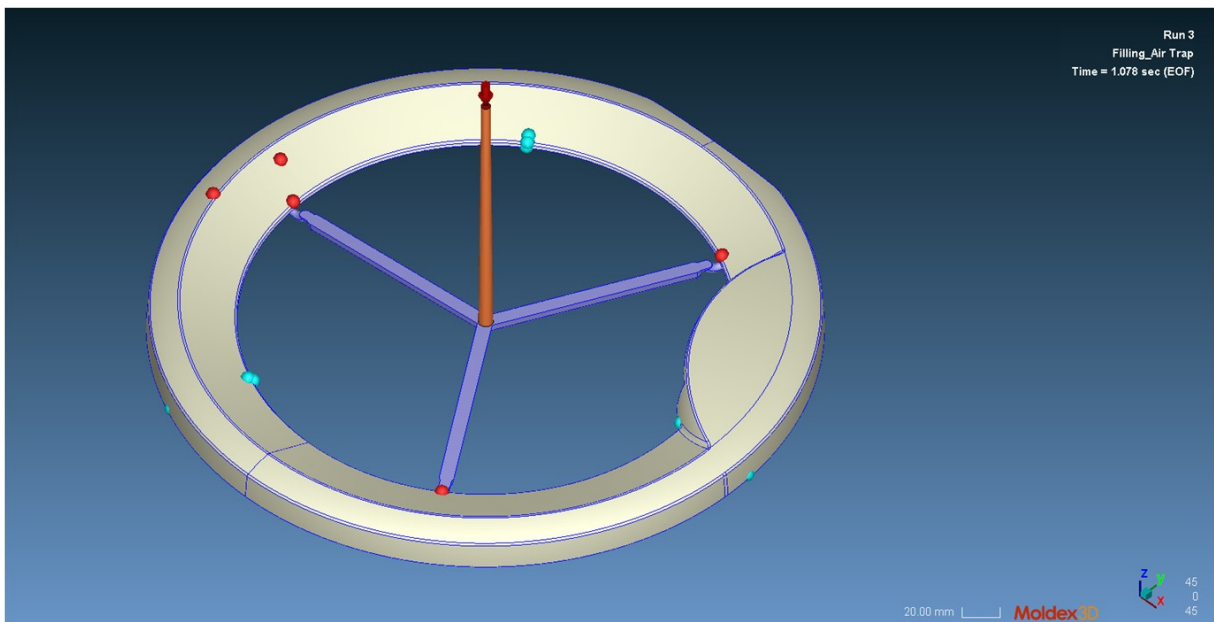


Figura 3.4.6: Risultato di Moldex3D con immagine grafica degli intrappolamenti di aria

Dopo aver analizzato l'effetto diesel, verrebbe spontaneo chiedersi cosa accade invece al manufatto quando le temperature del flusso in cavità stampo raggiungono temperature troppo elevate.

L'effetto diesel non ha infatti cause esclusivamente termiche come si potrebbe pensare, ma è la presenza di aria la causa principale come visto poco fa. In assenza di aria, seppur si hanno temperature elevate, tale problematica non si presenta, ma avviene un altro fenomeno che viene chiamato degradazione termica.

La degradazione termica del materiale si ha quando eccessive temperature dello stampo portano alla rottura di alcuni legami intermolecolari del polimero, che una volta raffreddato e solidificato si manifesta come un peggioramento delle caratteristiche meccaniche teoriche del polimero. La degradazione non è un processo istantaneo, sia esso di tipo termico o meccanico, perciò, la sua manifestazione è proporzionale allo stress cui è sottoposto. Solitamente tale difetto viene considerato esclusivamente strutturale, seppur in alcuni casi può manifestarsi anche dal punto di vista estetico: se infatti si ha a che fare con miscele o coloranti, si potrebbero notare delle discontinuità del colore nella superficie e ciò potrebbe essere causa di non conformità, soprattutto se si tratta di superficie repute estetiche dal cliente. Inoltre in taluni casi, il polimero può subire una degradazione tale da avere caratteristiche meccaniche completamente diverse da quelle teorizzate, tali da vedere sgretolato il manufatto alla fine del ciclo di stampaggio.

In Moldex3D quest'analisi può essere eseguita analizzando i risultati del "Melt Front temperature", che fornisce come output la temperatura del fronte di flusso istante per istante durante la fase di avanzamento.

Ciò che deve essere verificato è il rispetto del range di temperature prefissato dal materiale che si sta stampando: nel caso dell'ABS Elix P2H-AT, come già analizzato precedentemente, si deve verificare che le temperature mostrate dal solutore siano comprese fra i 220 e i 280 °C.

Nell'immagine 3.4.7 vengono mostrati i risultati, con scala a colori che mostra i valori minimi e massimi raggiunti, nel rispetto di tali condizioni di stampaggio.

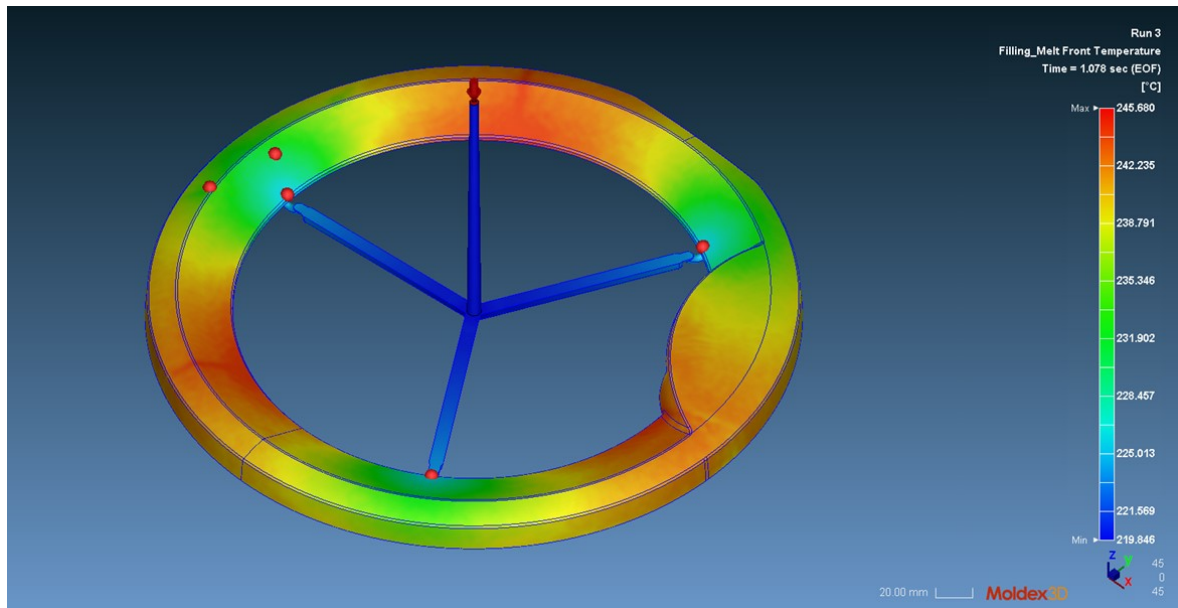


Figura 3.4.7: Temperatura del fronte di flusso durante la fase di riempimento in cavità stampo e nella materozza

Oltre alle condizioni termiche, un'altra causa possibile di degradazione del materiale è quella dovuta allo stress meccanico esercitato sul polimero in fase di entrata in cavità stampo.

Se infatti la pressione di iniezione diventa troppo elevata, o la superficie di passaggio (nei punti di iniezione) dovesse risultare troppo piccola, ciò che potrebbe accadere è che in tali zone si possono verificare condizioni per cui il materiale diventa molto meno viscoso e oppone resistenza al moto fluido. Queste condizioni possono portare all'attorcigliamento reciproco delle catene polimeriche e successivamente alla rottura dei legami.

Da un punto di vista fenomenologico, quindi, si ha una forte analogia con quanto analizzato nella degradazione termica, pur avendo due cause completamente diverse: per questo motivo gli effetti che si avranno sono molto simili.

L'unica differenza che si ha è l'analisi dei punti più critici, infatti, come è semplice intuire, lo stress meccanico si concentra soprattutto in quei punti dove vi sono sezioni di passaggio molto piccole, e soprattutto dove vi sono forti variazioni di sezione di passaggio del flusso; nell'Outer Door questo avviene nei 3 punti di iniezione della materozza.

Per valutare le condizioni di degradazione meccanica in Moldex3D vi è un importante risultato da valutare, che viene fornito dallo "Shear Rate".

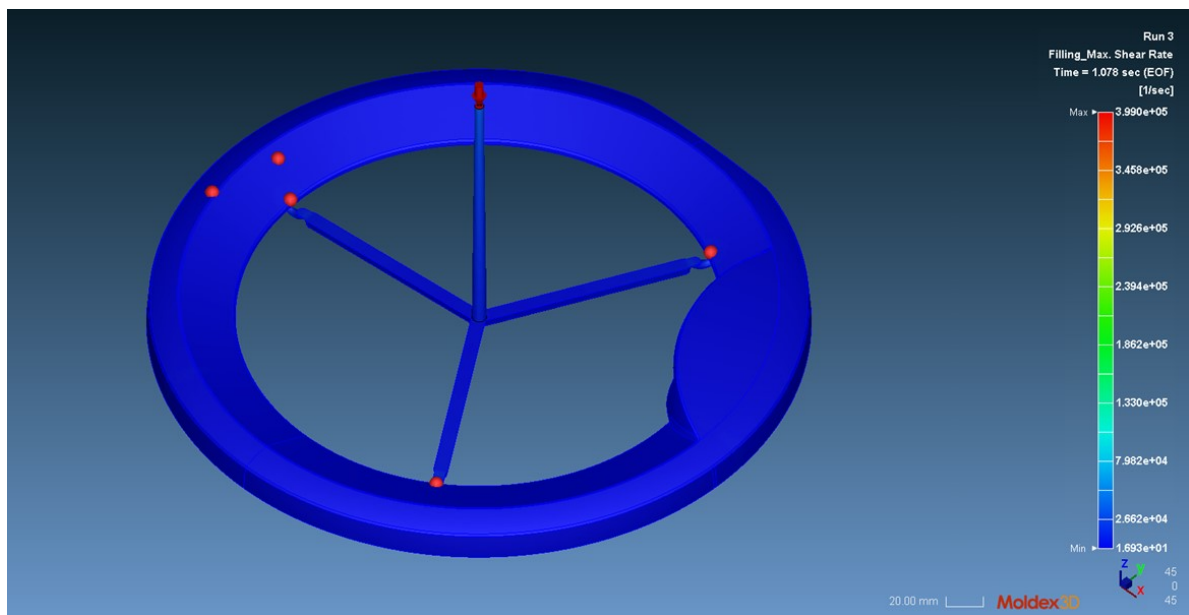


Figura 3.4.8: Analisi del massimo valore dello Shear Rate durante la fase di stampaggio dell'Elix P2H-AT

Per dare una chiara definizione di cosa sia lo Shear Rate mi avvalgo di quanto mostrato nella fonte https://en.wikipedia.org/wiki/Shear_rate

Lo shear rate di un fluido che scorre fra 2 piani paralleli uno in movimento e uno fisso viene definito come:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h},$$

dove:

- $\dot{\gamma}$ è lo shear rate, misurato in 1/sec
- v è la velocità del piano mobile
- h è la distanza fra i 2 piani misurata in metri

o:

$$\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}.$$

che semplificando in termini di portata volumetrica Q e del raggio di tubatura:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi r^3}.$$

Per fluidi Newtoniani, lo shear rate può essere messo in relazione con lo shear stress dalla:

$$\tau_w = \dot{\gamma}_x \mu'$$

Dove μ è la viscosità dinamica del fluido. Per fluidi non Newtoniani invece, la viscosità non può essere più assunta come una costante, quindi il modello 3D del fluido viene modellato considerando il secondo invariante del tensore della deformazione, secondo la:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\varepsilon : \varepsilon}.$$

Tale definizione è molto importante in quanto rende possibile comprendere al lettore le difficoltà legate a tale tematica: la maggior parte dei polimeri sono infatti fluidi non-Newtoniani, perciò la loro condizione di stampaggio non è di semplice intuito in quanto non legata a condizioni di linearità con viscosità costante. Tali affermazioni sono riscontrabili anche dalla fonte https://it.wikipedia.org/wiki/Fluido_non_newtoniano.

Moldex3D, oltre a godere di un'ampia libreria di materiali, è anche un'utile libreria di dati ottenuti tramite prove sperimentali e ci permette perciò di affrontare tale tematica senza difficoltà, analizzando i valori ottenuti come output.

Nell'immagine 3.4.10. Viene infatti mostrato il legame che si ha nell'ABS Elix P2H-AT fra le grandezze di interesse, cioè Shear Rate e Viscosity.

Material	ABS
Grade Name	ELIX ABS P2H-AT
Producer	Elix Polymers
Comment	MFI(220,10)=37 g/10min .D=1.05 g/cm3
Moldex3D Bank Version	2022.2.2
Process condition	
Melt temperature (minimum)	220 °C
Melt temperature (normal)	260 °C
Melt temperature (maximum)	280 °C
Mold temperature (minimum)	60 °C
Mold temperature (normal)	80 °C
Mold temperature (maximum)	85 °C
Ejection temperature	85 °C
Freeze temperature	105 °C

Figura 3.4.9: Material Wizard di Moldex, comprensivo di alcuni dei dati presenti nella banca del software

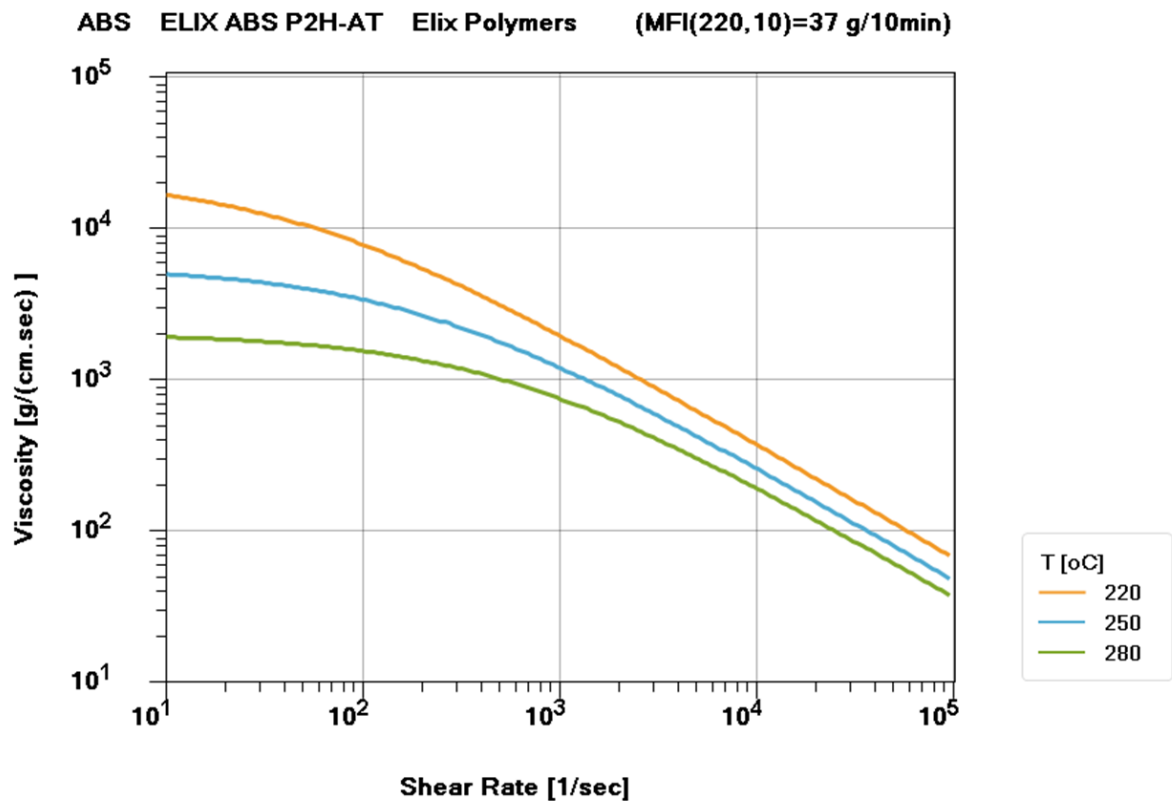
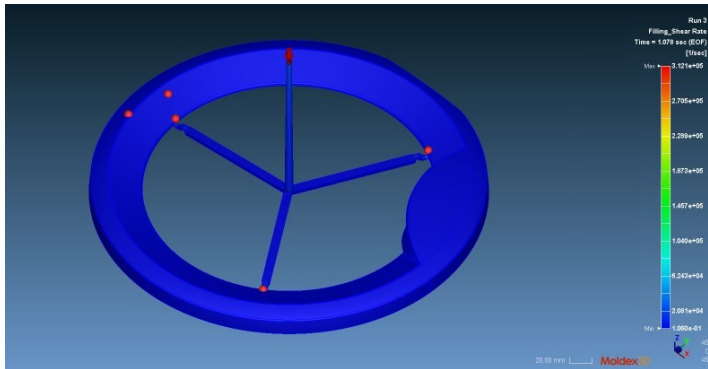


Figura 3.4.10: Grafico descrittivo del comportamento del polimero in esame con Shear rate funzione di viscosità e temperatura

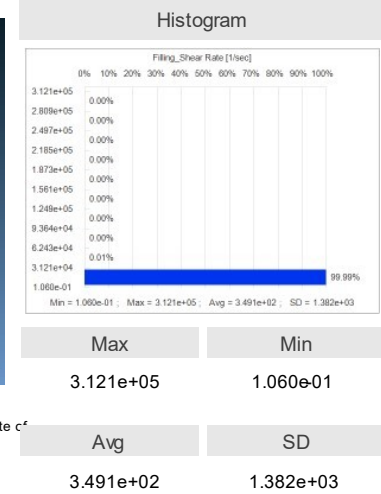
Quasi tutti i polimeri hanno problemi di degradazione meccanica quando si raggiungono valori dello Shear Rate prossimi all'ordine di grandezza di 10^5 , per questo motivo anche nell'immagine 3.4.10 viene preso tale valore come limite per la rappresentazione di tali grandezze.

Nell'immagine 3.4.12 tuttavia si è visto che il massimo valore di tale grandezza raggiunto supera ampiamente il limite che avremmo dovuto rispettare. Si è quindi andati ad analizzare ulteriormente il dato per cercare di comprendere cosa tale fenomeno avrebbe effettivamente comportato nel componente finale. Per far questo si è andati ad analizzare la porzione di flusso coinvolta da tale fenomeno con l'analisi ad istogrammi di Moldex3D.

Filling_Shear Rate



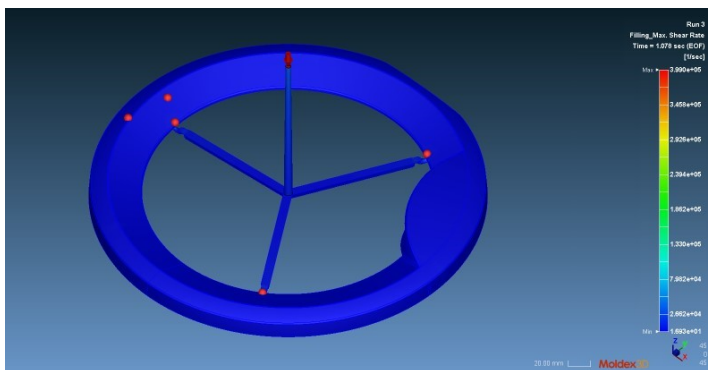
The distribution of shear rate of part cavity is shown in different colors at current instant. Shear rate is the rate of shear deformation of the material during the polymer processing. Shear rate distribution is related to the variation of velocity gradient and molecular orientation. High shear rate tends to drastically deform molecular chains even to break and then weaken the strength of product. Viscous heating due to high shear rate also should be noticed.



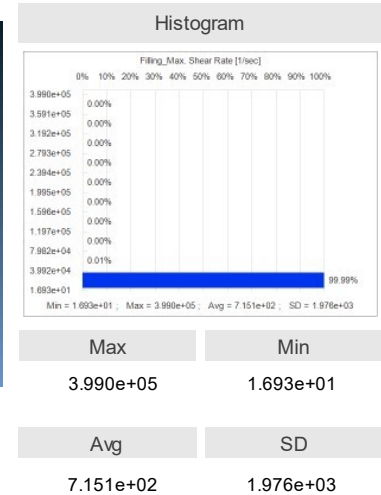
Moldex3D

Figura 3.4.11: Istantanea con valore medio totale e istogramma e spiegazione dell'helper di Moldex sul comportamento in cavità stampo dello shear rate

Filling_Max. Shear Rate



Max. shear rate at each element records the peak value of shear rate during the passing filling time.



Moldex3D

Figura 3.4.12: Massimo valore mediato durante la fase e istogramma dello Shear rate

Dall'analisi sia istantanea che complessiva del processo di stampaggio è emerso, tuttavia, che una piccolissima percentuale di volume del materiale è coinvolta da tale problematica. Sono esclusi, per questo motivo, problemi di tipo strutturale, in quanto la maggior parte del volume stampato non è sottoposto a processi degradativi. Tale analisi, tuttavia, ha permesso di comprendere la causa di un problema di tipo estetico visto successivamente nel componente stampato, che presentava delle opacità nei pressi dei punti di iniezione dovuti proprio a tale fenomeno.

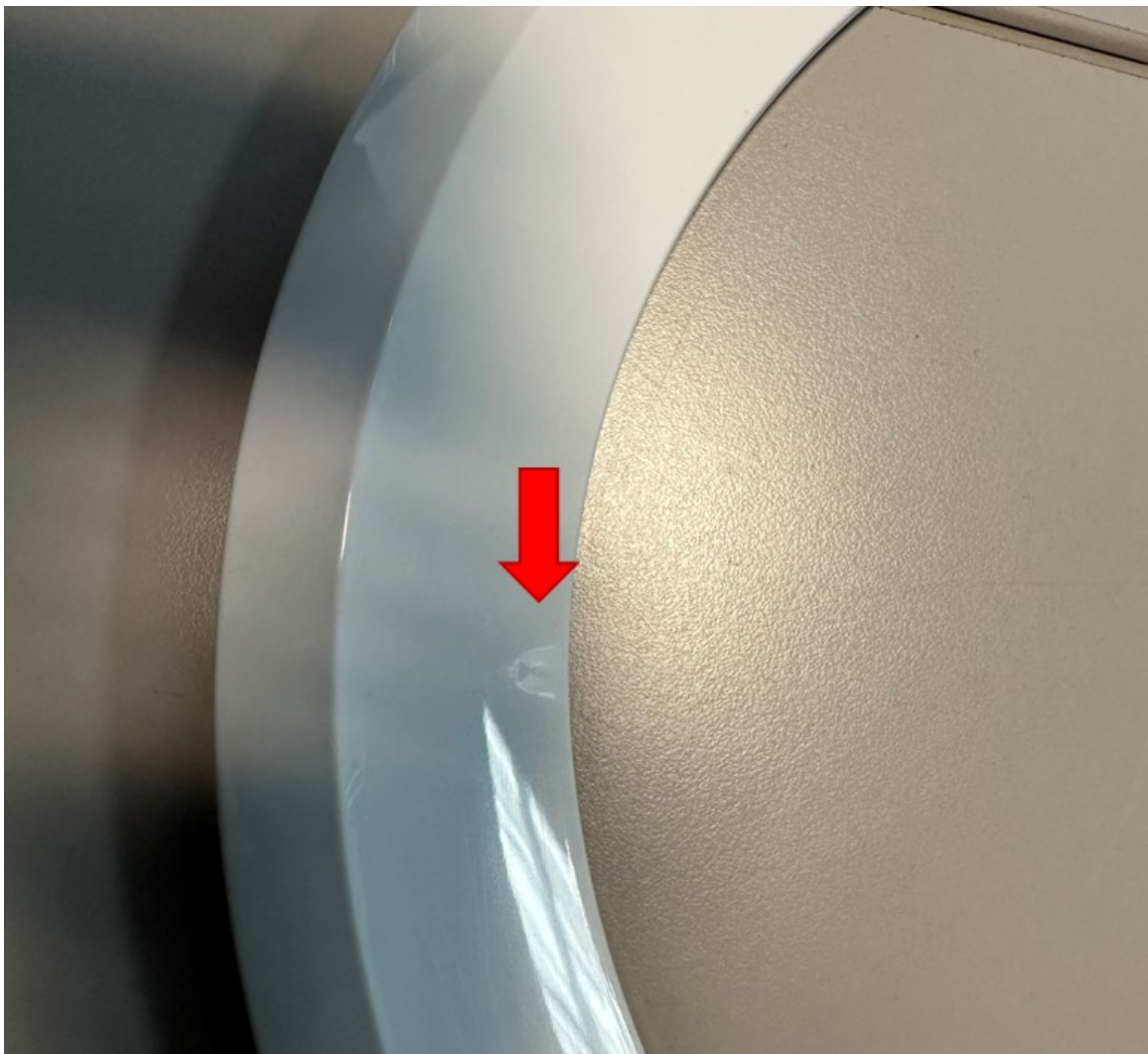


Figura 3.4.13: Opacità nei pressi dei punti di iniezione della materozza nel componente HE001 Outer door

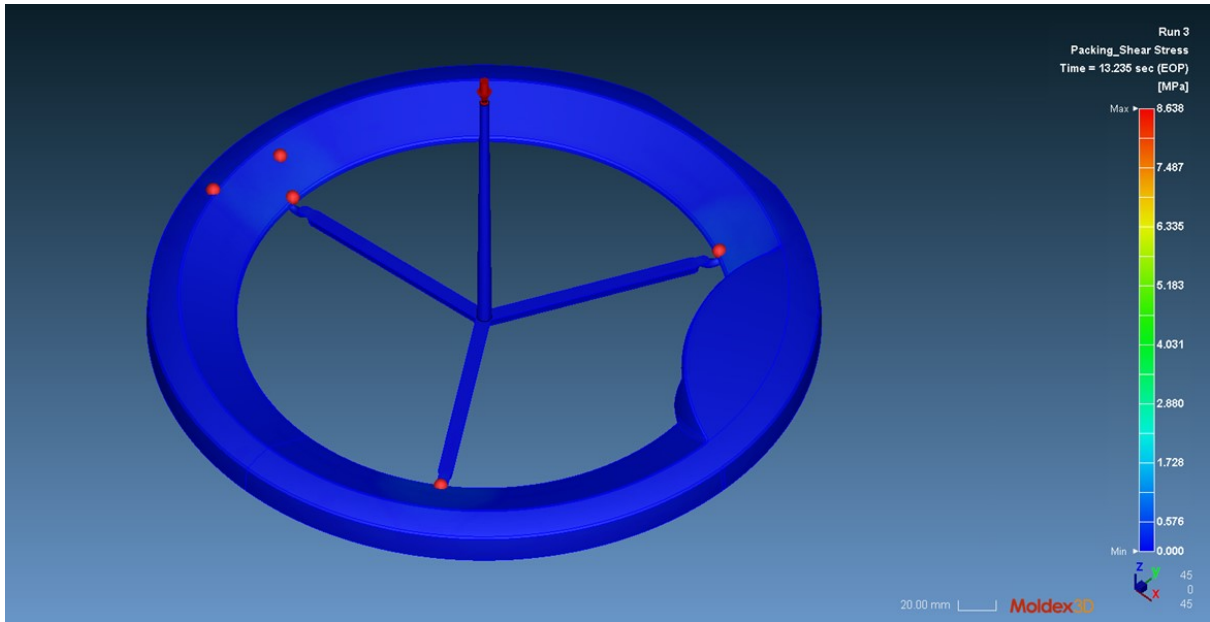
Riprendendo la definizione analizzata poco fa di fluido non-Newtoniano, i materiali polimerici tendono anche a comportarsi come materiali anaelastici, perciò, durante la solidificazione in fase di raffreddamento, soprattutto se non vi sono strutture appropriate o condizioni termiche adeguate, il materiale tende ad accumulare delle tensioni interne.

Questo stato tensionale che permane nel manufatto completo tende a deformare il componente finale, seppur in maniera non istantanea data l'anaelasticità: questo può comportare delle variazioni di forma, imbarcamenti, ecc. che possono rappresentare un problema per la conformità del manufatto finale.

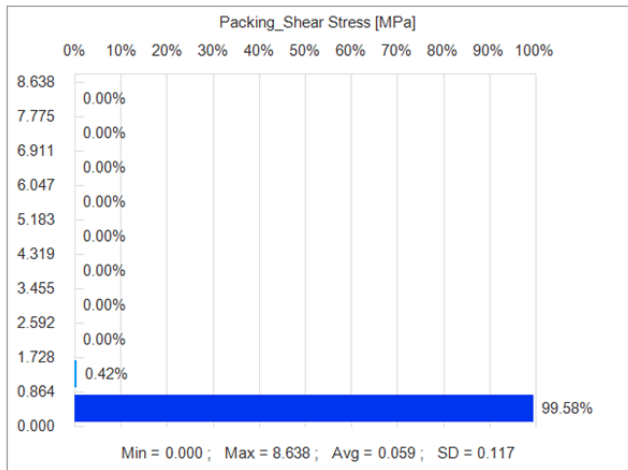
Tali deformazioni, infatti, sono la causa ad esempio di manufatti che non rispettano le quote di progetto, nonostante i ritiri dati in cavità stampo sono quelli opportuni.

È bene precisare che sul fatto del ritiro volumetrico dovuto al raffreddamento della plastica ci sarebbe da approfondire molto, in quanto si dovrebbe prima di tutto parlare di strutture amorfe o semicristalline e di come queste influenzino la non isotropicità della plastica; tali argomenti tuttavia non sono di interesse per i fini della tesi e non saranno analizzati, seppur il loro accenno sembrava opportuno. Tali questioni infatti sono ancor oggi dibattito importante per molti produttori di materie plastiche.

In Moldex3D è possibile analizzare un layout visivo dello stato tensionale del manufatto completo con il risultato dello Shear Stress. Tuttavia, tale risultato diventa di interesse non più nella fase di riempimento come analizzato finora, ma nella fase di mantenimento. Questo perché comunque durante la fase di mantenimento il cuscinio di materiale che spinge nel punto di iniezione per non far tornare indietro nel cilindro il materiale, continua ad esercitare sul fuso della pressione, e questo influenza lo stato tensionale finale del prodotto.



Histogram



Max	Min
8.638	0.000
Avg	SD
0.059	0.117

Shear stress at current instant is shown in different color according to different stress level. Shear stress is one of source of the molded-in residual stress in molded parts. If the shear stress is not distributed evenly, it will cause some dimensional problems. Too high the shear stress level will result in stress-induced problems in the molded part.

Figura 3.4.14: Risultato dello Shear stress con istogramma e spiegazione sulle conseguenze della presenza di tensionamenti sul componente dell'helper di Moldex3D

Il componente in analisi, dati i bassissimi valori di carico residuo cui era sottoposto, non ha subito grandi deformazioni: ad essere precisi l'unica deformazione è un imbarcamento lieve che comportava una perdita di planarità della circonferenza di base.

Infine, soprattutto sui componenti con superfici estetiche è importante effettuare un ulteriore controllo, che è ricercabile in Moldex3D sotto la voce "Sink Marks": tale risultato mostra all'utente un difetto tipicamente estetico che si manifesta sotto forma di piccole bozze superficiali, il risucchio.

Da letteratura il risucchio si forma, come mostrato in figura 3.4.16, quando lo spessore di poppette, rinforzi o qualunque altra struttura posizionata dietro una superficie è superiore al 50% dello spessore della struttura: nella figura infatti viene mostrato come spessori più sottili dietro la struttura permettano di alzare di posizione il baricentro termico e quindi riducano di molto l'impatto visivo di tale difetto. Viceversa spessori più grandi, come ad esempio rinforzi di pari spessore rispetto alla struttura, portano ad avvallamenti molto visibili, a valori che possono arrivare anche al 50% dello spessore totale.

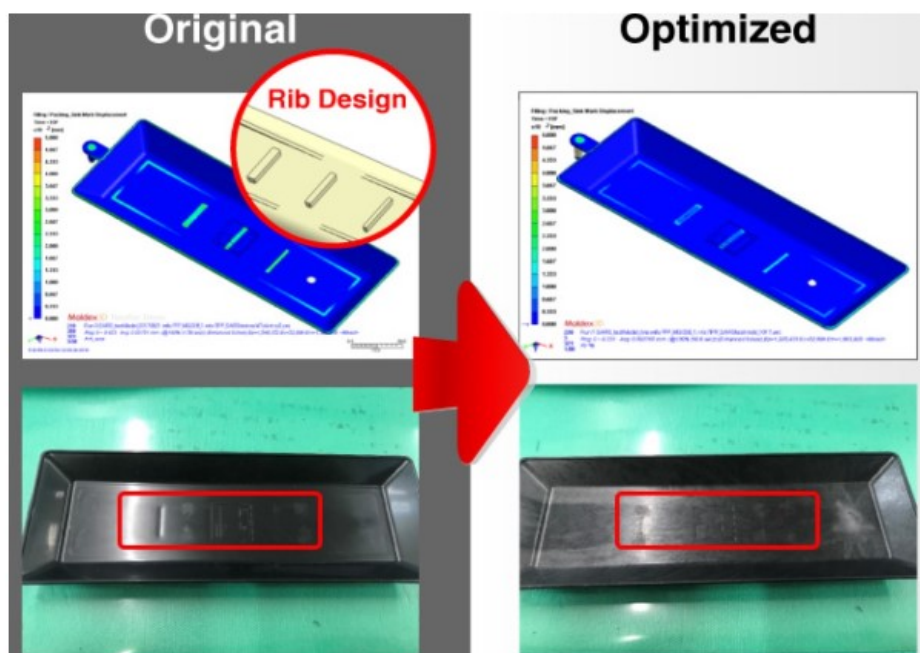


Figura 3.4.15: Rappresentazione grafica dei metodi correttivi per ridurre l'impatto dei risucchi, preso dall'helper di Moldex3D

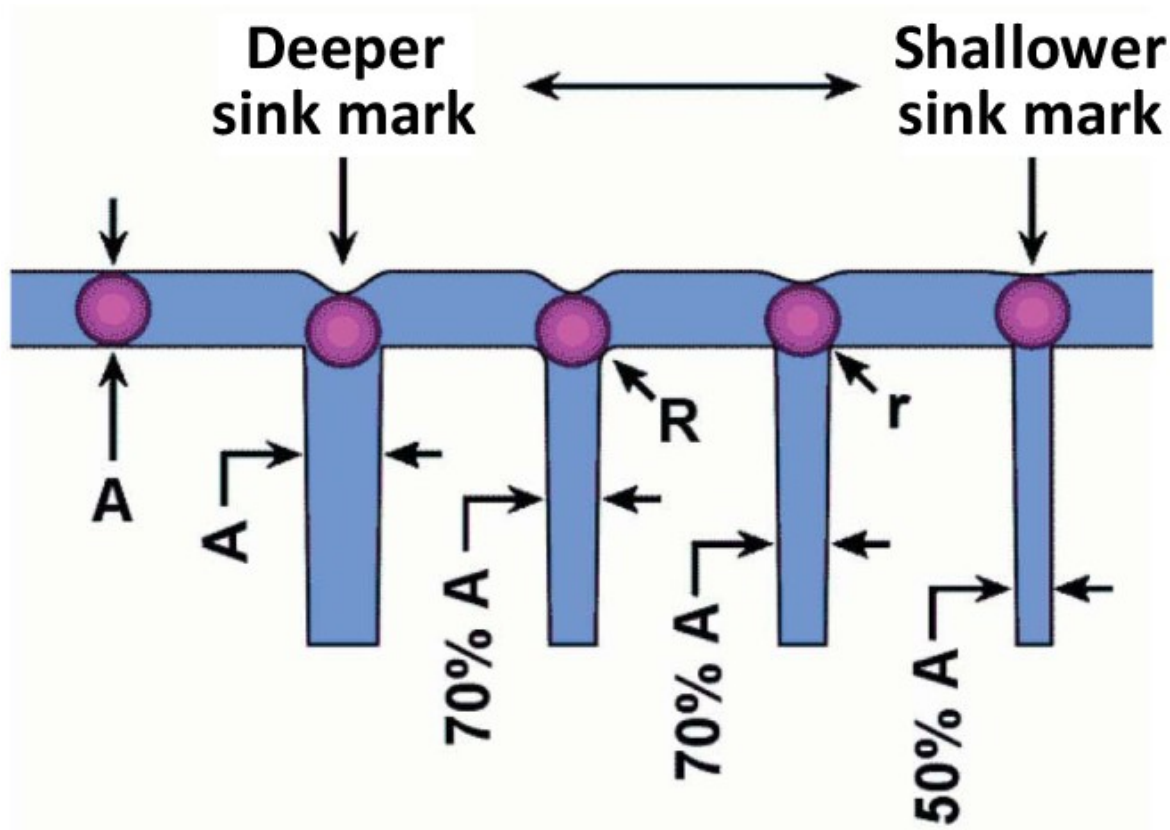


Figura 3.4.16: Spiegazione dettagliata dell'impatto del risucchio in funzione dello spessore del rinforzo sottostante

Condizione necessaria e sufficiente per la formazione di risucchi sono quindi legate esclusivamente a condizioni geometriche, tuttavia l'entità dei risucchi può essere influenzata anche da altri fattori: fra questi sono principalmente da menzionare la temperatura e la pressione.

La prima agisce negativamente su tale fenomeno in quanto, essendo il risucchio legato al processo di ritiro volumetrico del materiale durante la fase di raffreddamento, vi è una proporzionalità diretta fra l'intervallo termico cui è sottoposto il polimero e le dimensioni di tale difetto sulla superficie del prodotto. La seconda, invece, influisce positivamente su tale fenomeno, permettendo, soprattutto nella fase di mantenimento, una compattazione maggiore del materiale ed esercitando quindi sulla superficie che si raffredda (tenendo presente che le superfici esterne di un prodotto raffreddano più velocemente delle parti interne) una forza opposta alla direzione di ritiro del materiale. Di conseguenza, seppur consapevoli della formazione di tali difetti, in fase di progettazione si possono considerare tali fattori come

determinanti per l’impatto estetico del prodotto e, se si ha la corretta esperienza riguardo all’impatto visivo dato dalle dimensioni dei risucchi e si conoscono le esigenze del cliente per cui si sta effettuando tale lavoro, si può cercare di raggiungere dei valori ritenuti accettabili e conformare il processo.

Nel componente in esame i risucchi si formavano su 3 poppette su 7, in quanto queste, differentemente dalle altre, non sono state opportunamente “scaricate” da una struttura scatolare di rinforzo sulla base. In figura 3.4.17 vengono mostrati i risultati delle dimensioni dei risucchi che sono risultate coerenti con le misure effettuate nel laboratorio di Linea3.

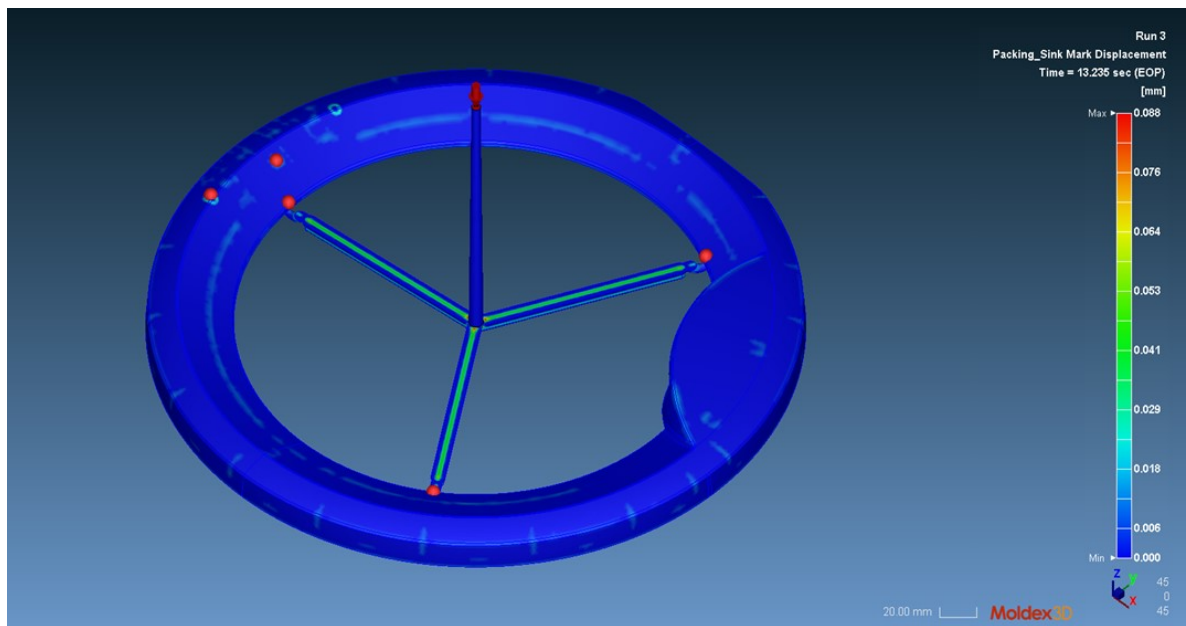


Figura 3.4.17: Layout della formazione di risucchi sul componente HE001

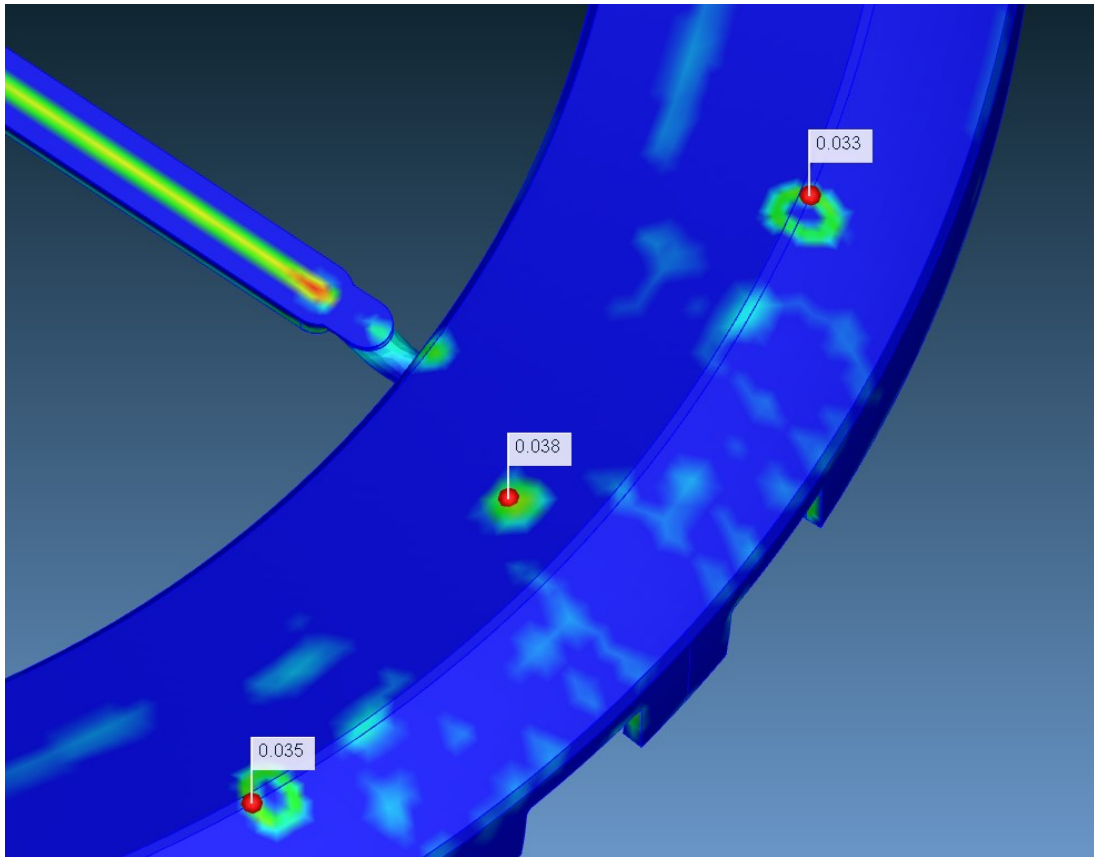


Figura 3.4.18: Particolare con labels numerico dei risucchi sulle poppette non rinforzate dell'HE001

È bene sottolineare che in questo capitolo è stato elencato un insieme di elementi di maggior interesse per la scrittura di tale tesi, tuttavia ve ne sono molti altri, alcuni dei quali non sono influenzati da veri e propri valori fisici. Per questo motivo si è coscientemente cercato di evitare di fare ulteriori menzioni, favorendo invece nel successivo capitolo la descrizione di alcune modifiche geometriche e di processo postume alla costruzione dello stampo, che sono state effettuate sul componente Haier Outer Door HE001 per raggiungere l'obiettivo di ottenere la conformità da parte del cliente (Haier appunto) e poter concludere il lavoro con la spedizione dello stampo.

4. MISURE CORRETTIVE

Durante la fase di stampaggio del prodotto sono state rilevate sul pezzo stampato 2 non conformità, segnalate dal gruppo Haier: la prima segnalazione riguardava la presenza di opacità nei pressi del punto di iniezione, la seconda invece riguardava la formazione di risucchi nei pressi delle 3 poppette. Sono state effettuate correzioni, nel primo caso nel processo di stampaggio, nel secondo si è dovuto intervenire con modifiche della geometria del componente, per poter risolvere o comunque diminuire l'impatto di tali problematiche ed ottenere la conformità del cliente.

Analizzando la simulazione di Moldex3D, come precedentemente visto, si è giunti alla conclusione che l'opacità nei pressi dei punti di iniezione era dovuta ad un valore eccessivamente elevato dello Shear Rate. Nella strozzatura creata dai punti di iniezione in cavità stampo si raggiungevano valori di pressioni tali da creare in superficie dei valori di lucidatura non uniformi. Tale problematica, essendo quindi legata al valore dello Shear rate, è stata affrontata cercando di diminuire la pressione esercitata nei punti di iniezione. Quindi la soluzione è stata trovata con un piccolo allungamento del ciclo di stampaggio, portando il tempo di riempimento da 1,15s a circa 1,5s, in quanto durante il riempimento, non avendo un controllo in pressione, la pressione viene regolata automaticamente in funzione della velocità, quindi ne è una conseguenza indiretta. Nelle figure 4.1 e 4.2 vengono mostrate il risultato di tale variazione prima e dopo (rispettivamente in alto e in basso).



Figura 4.1: Componente HE001 con opacità nei pressi del punto di iniezione



Figura 4.2: Componente HE001 senza opacità nei pressi del punto di iniezione dopo la modifica dei parametri di processo

È bene precisare che con un semplicissimo riferimento matematico, a parità di pressione di iniezione erogata dalla macchina, se si voleva diminuire la pressione nei punti di ingresso della materozza si sarebbe potuto pensare anche ad una modifica geometrica legata all'aumento della sezione di passaggio del flusso. Tuttavia, non essendo essa necessaria si è optato per evitarla, al fine di ridurre anche l'effetto seppur piccolo del risucchio dovuto all'ingresso della materozza stessa, che possiamo vedere nell'immagine 4.2

Nel caso invece dei risucchi, non si avevano purtroppo a disposizione margini per poter ottenere un risultato soddisfacente con la semplice revisione dei parametri di processo. Tuttavia, all'interno dell'azienda, è venuta in mente una modifica strutturale delle poppette, che dal punto di vista letterario avrebbe dovuto essere peggiorativa. Paradossalmente, i risultati di Moldex3D fornivano invece un risultato completamente diverso, con una leggera diminuzione della dimensione dei risucchi sulle 2 poppette meno impattanti (in quanto un po' "mascherati" dalla presenza dello smusso sulla superficie a vista) e un sostanziale impatto invece sul risucchio più evidente.

Di norma, infatti, se non è possibile costruire un apposito rinforzo di scarico sulle poppette, per evitare che esse possano formare dei risucchi eccessivamente visibili, vengono raccordate con una superficie di scarico, che sostanzialmente avrebbero dovuto far sì che in quel punto il materiale si raffreddasse più velocemente, limitando almeno in parte l'impatto visivo dei risucchi. Questo però, almeno nel nostro esempio, ha portato ad un'ulteriore strozzatura del materiale, che ne ha ostacolato leggermente il corretto impaccamento, portando ad un peggioramento del difetto.

Quindi, dal layout originale, mostrato nell'immagine 4.3 con il raccordo di scarico della poppetta si è passati alla soluzione mostrata nell'immagine 4.4 a spigolo vivo, che seppur solitamente sconsigliata da un punto di vista costruttivo, non essendo questo componente sottoposto a carichi elevati, è risultata essere la più idonea.

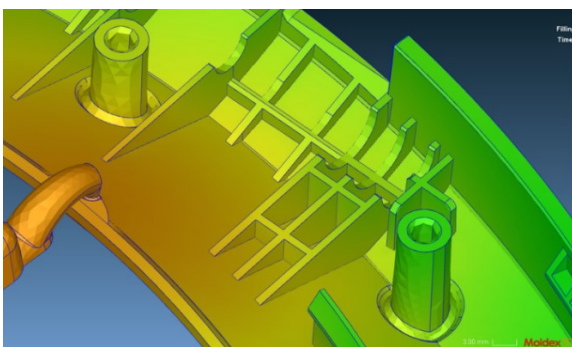


Figura 4.3: Configurazione della poppetta con raccordo di scarico

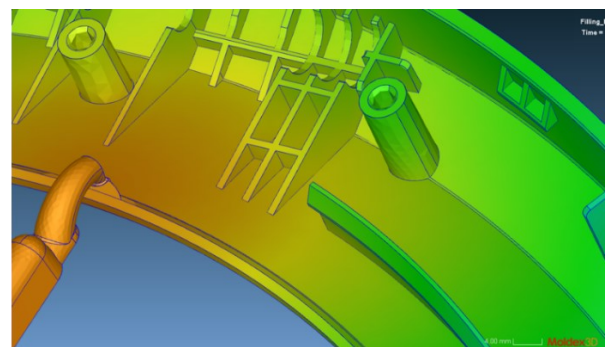


Figura 4.4: Configurazione della poppetta a spigolo vivo

Nell'immagine 4.5 vengono mostrati i risultati forniti da Moldex3D nel confronto fra le 2 soluzioni, con i risucchi sul componente effettivo di stampaggio dovuti ai relativi layout costruttivi: oltre a poter notare un miglioramento sostanziale effettivo già pronosticato con l'analisi effettuata, è di interesse riferire che anche le misure dei risucchi sono risultate coerenti con quanto previsto dalla simulazione Moldex3D.

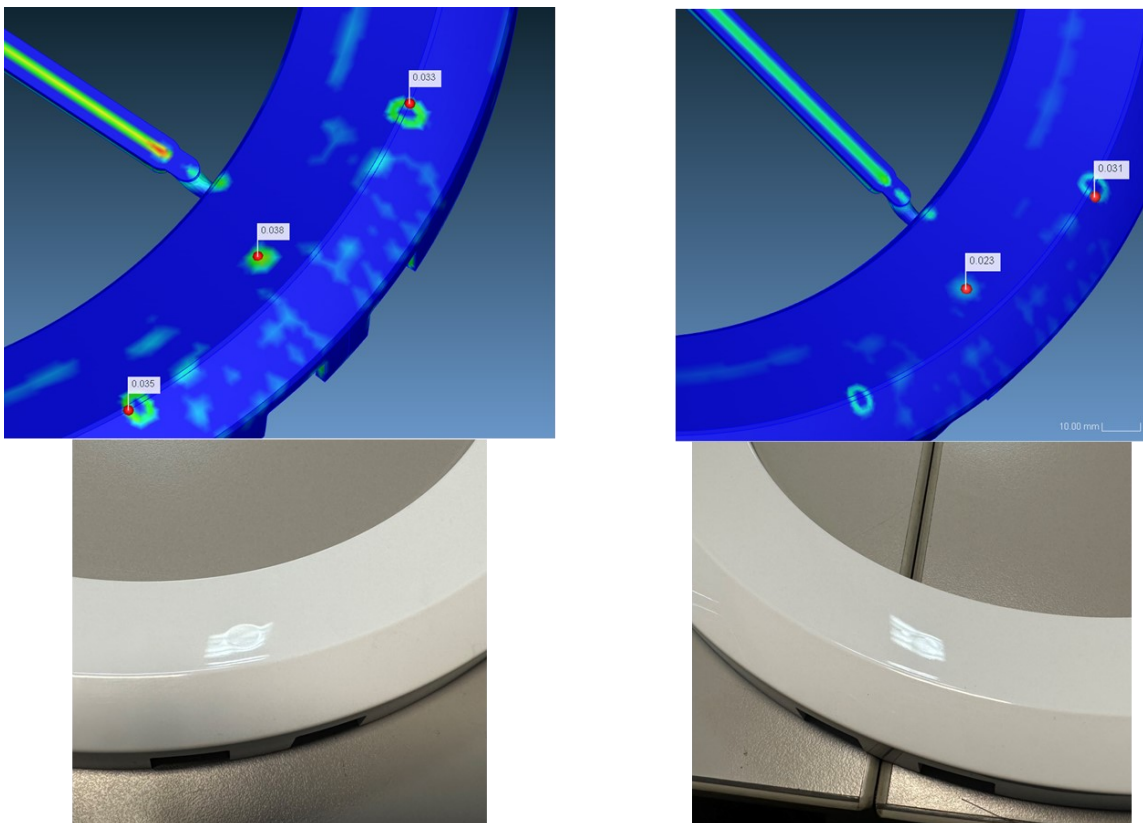


Figura 4.5: Confronto fra i risultati reali e simulati dei risucchi sul componente HE001 con raccordo di scarico (a sinistra) e a spigolo vivo (a destra)

5. CONCLUSIONI

Una volta completate le modifiche sullo stampo che hanno portato alla conformità del pezzo (come analizzato al capitolo 4 di questa tesi), sono state effettuate delle misurazioni ed una prova di assemblaggio dei componenti in sede Linea3, dopodiché il cliente ha concluso l'attività di prototipazione e lo stampo è stato spedito nella sede dell'Haier in Polonia per l'inizio della produzione vera e propria. Questo progetto è stato un esempio chiaro di quanto sia importante svolgere un'analisi accurata in fase di pre-costruzione dello stampo: ad esempio, per quel che riguarda i risucchi che abbiamo visto formarsi nei pressi delle 3 poppette senza struttura di rinforzo, tramite una lettura corretta, sarebbe stato possibile avere una chiara idea della qualità del prodotto già prima di cominciare la produzione del componente. Questo avrebbe potuto portare ad un notevole risparmio di tempo e a maggiori entrate per l'azienda, non avendo la necessità di portare delle modifiche su stampo non preventivate nel piano di costruzione dello stampo. Tali modifiche, inoltre, diversamente da quanto successo nel caso di esame, non sono sempre così semplici da apportare, a volte possono risultare impossibili per la presenza di altri componenti dello stampo che creano un ingombro per la loro fattibilità, e questo può comportare la ricostruzione di parti strutturali dello stampo se non l'intero stampo, con conseguente crescita dei costi di produzione. Tali costi, in funzione di accordi di assunzione di responsabilità durante il processo di progettazione dello stampo, possono ricadere sull'azienda produttrice, cioè nel caso in esame Linea3: tutti questi fattori portano a concludere che una corretta pianificazione è fondamentale. Quando inoltre non si riesce a trovare una soluzione adeguata a tali problematiche, che siano esse dovute ad impossibilità fisiche o a limiti tecnologici dell'azienda per cui si opera, risulta di fondamentale importanza anche un'adeguata informazione al cliente sugli esiti di tali analisi, cercando di essere più chiari possibili sulle problematiche legate allo stampaggio e provando a dare anche un'entità "dimensionale" di queste sul componente finale. In Linea3 tutto questo processo viene affrontato in un documento condiviso, il TDR (Technical Design Review), che viene presentato di norma al cliente in un meeting (a volte anche telematico) con spiegazione dettagliata di tutto ciò che è stato analizzato con particolare cura per ciò che potrebbe risultare non conforme. L'assunzione di responsabilità molto spesso si fonda su questi incontri: tutto ciò che è previsto e mostrato nel documento, se accettato dal cliente, non sarà preso a carico dell'azienda produttrice dello stampo.

Oltre a tutto ciò che abbiamo visto nella tesi, vi è da aggiungere anche qualche imperfezione di tali sistemi: la simulazione, infatti, funziona molto bene e descrive numericamente quasi tutto. Vi sono tuttavia ancora dei "punti oscuri" del mondo dei polimeri e del loro reale

comportamento, che devono ancora essere trattati con un modello matematico. Personalmente, in un confronto con colleghi in un meeting organizzato da un'azienda che ci fornisce materie prime, si è parlato molto anche del comportamento, ad esempio, durante le fasi di raffreddamento; non sempre è facile definire il ritiro di alcuni materiali, in quanto essi variano, all'interno dello stesso pezzo, in funzioni delle condizioni cui è sottoposto. Uno dei materiali che manifesta questo comportamento di instabilità al ritiro durante le fasi di raffreddamento è ad esempio il polipropilene. Questo comportamento del materiale può essere molto problematico soprattutto dal punto di vista delle tolleranze previste, e non sempre Moldex3D è capace di prevedere questo comportamento.

Una parte rilevante di questo fenomeno viene solitamente controllata attraverso l'impianto di condizionamento dello stampo, di cui in questa tesi si è parlato poco, in quanto il pezzo, durante la fase di raffreddamento, tende ad accumulare tensioni interne e a deformarsi solitamente quando ha un raffreddamento non uniforme: questo avviene soprattutto per i materiali semicristallini. Tuttavia, non vi è una particolare cura nell'uso comune per questo dettaglio, e spesso si finisce, nonostante i mezzi a disposizione e la possibilità di poterli studiare con Moldex3D, per costruire impianti e canali di raffreddamento nei "punti morti" dello stampo, dando priorità al resto della struttura. Alcuni stampi nella sede hanno prodotto molte parti non conformi proprio per questo motivo, quindi un punto molto importante per la soluzione di tali problemi è da ricercarsi in una buona progettazione dei canali già a monte della progettazione, cercando di analizzare se effettivamente ci sia un gradiente termico uniforme in tutta la cavità stampo. Un'ulteriore piccola nota: canali di raffreddamento costruiti male, in casi eclatanti, possono portare anche a difetti di tipo estetico, come ad esempio aloni o striature.

Questi ultimi concetti diventeranno ancor più importanti negli anni a venire, già a partire dal prossimo decennio: il mercato dei polimeri, infatti, verterà sempre di più sull'utilizzo di materiale riciclato, complicando ulteriormente il processo di progettazione. Infatti è importante sottolineare che il processo di stampaggio non è perfettamente stabile, ma i valori hanno una certa oscillazione che comporta una deviazione da ciclo a ciclo rispetto al piano produzione. Con il riciclato tale oscillazione può diventare parecchio più ampia, e questo crea dal punto di vista della stabilità di processo un problema che dovrà necessariamente essere risolto.

Tali oscillazioni, infatti, non sono dovute esclusivamente alla tecnologia, in quanto comunque sappiamo che anche le macchine hanno una tolleranza, ma del materiale stesso, che in Moldex3D viene considerato come "ideale". Tuttavia già, per esempio, piccole percentuali di umidità o di impurità possono compromettere i valori reali, fortunatamente non sempre peggiorandone le condizioni. Un caso esemplare nella mia personale esperienza è stato

riscontrato durante la misura dell'indice di fluidità del materiale ABS Starex HF06601, il cui indice MFI (Mold Fluidity Index) misurato con la normativa ISO1133, che prevede di misurare tale indice mantenendo a 210°C il polimero per 5 minuti, dovrebbe risultare di 3,4 mg/min. I risultati della macchina mostravano invece che il materiale analizzato in laboratorio aveva un indice MFI pari a 4,55mg/min con oscillazioni di circa $\pm 0,5$.

Tale valore potrebbe effettivamente essere stato influenzato dall'umidità, in quanto il materiale reperito non è stato precedentemente trattato. Queste condizioni vanno a favore della sicurezza, in quanto se tale indice cresce rende il materiale più facile da stampare: tuttavia è esplicativo di quanto le condizioni di processo siano incostanti. Se a tale analisi aggiungiamo le condizioni dei materiali riciclati, che devono essere trattati, rigenerati, e possono contenere impurità molto più facilmente, ci si può rendere subito conto della sfida che dovrà essere affrontata: a tal proposito molte grandi aziende, fra cui menziono Engel come costruttori di presse, Frigel come costruttori di centraline di condizionamento e Rohm come fornitore di materie prime, hanno già provveduto ad affrontare parte del problema, implementando soluzioni di tecnologia all'avanguardia, che tenderanno a restituire maggiore stabilità ai futuri processi di stampaggio per materiali rigenerati.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Brookfield Engineering – Glossary section on Viscosity Terms. Published in the year 2007, 06-09
- Darby, Ron (2001) – Chemical Engineering Fluid Mechanics (2nd ed.) CRC Press p. 64 ISBN 9780824704445
- IFC001 – Linea3
- Manuale helper Moldex3D
- Helper Hexagon
- <http://www.pasquali.org/dispense/Coefficienti%20di%20attrito.pdf>
- <http://cdmunicas.it/notes/PEM/2016/L9%20-%20fatica%20parte%202.pdf>
- <https://sites.unipa.it//giovanni.petrucci/Disp/Fatica1.pdf>
- <https://it.airliquide.com/soluzioni/trattamenti-termici-dei-metalli/qual-e-la-corretta-profondita-di-penetrazione-di-un-trattamento-termico-superficiale>
- <https://www.ptonline.com/articles/revisiting-shot-size-vs-barrel-capacity>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Shear_rate
- https://it.images.search.yahoo.com/yhs/search;_ylt=Awr.QongmJZkQkYq6ypHDwx.;;_ylu=Y29sbwMEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3BpdnM-?p=sink+marks&type=fc_ADDA49F0A8D_s58_g_e_d020222_n9998_c10¶m1=7¶m2=eJwti0sKgzAQQK8ySwWJk59VPEZXRvYkmmmpINKIplp6%2BI5TZvPd mZnJj1%2Fb3B0dUoIFd0a%2FkTdPUhNcKBQohSAYSjgRuuy4k4xpZrRIHSXGykapLhG9DtMSvC8GUmIFkp1vHeB6wJuDIIsAUKIWrhU6kczLYFe9qnd6nU8sZkBZmf0xIKCM5bmOzgYw7DvMfFlpwrhtfAYV5md%2F%2BXH9iFOt4%3D&hsimp=yhs-2461&hspart=fc&ei=UTF-8&fr=yhs-fc-2461#id=73&iurl=https%3A%2F%2Fai2-s2-public.s3.amazonaws.com%2Ffigures%2F2017-08-08%2Ffff89ea50692dae2a4fd7dd75d334421f9844d3%2F26-Figure8-1.png&action=click
- https://it.wikipedia.org/wiki/Fluido_non_newtoniano