

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA “ENZO FERRARI”

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

A.A. 2019-20

**SIMULAZIONE E VALIDAZIONE
SPERIMENTALE DEI PARAMETRI DEL
PROCESSO DI STAMPAGGIO A
INIEZIONE PER LA MINIMIZZAZIONE
DELLA DEFORMAZIONE DI UN
COMPONENTE IN MATERIALE
POLIMERICICO**

Relatore:
Dott. Ing. Francesco Gherardini

Candidato:
Giovanni Garlaschelli

Correlatore:
Dott. Ing. Simone Malagola

Indice

Prefazione	4
Riassunto.....	6
Introduzione	8
Capitolo 1: Stato dell'arte.....	15
1.1 Scelte realizzative per lo stampo.....	15
1.2 Deformata del prodotto	17
1.3 Validazione sperimentale del processo standard.....	24
Capitolo 2: Metodo e strumenti	28
2.1 Defeaturing della parte	29
2.2 Considerazioni sulla dimensione degli elementi.....	32
2.3 Scelta della mesh.....	34
2.4 Design Of Experiments	38
Capitolo 3: Risultati	43
3.1 Effetti della mesh sul raffreddamento	43
3.2 Confronto tra modellazioni diverse del raffreddamento	50
3.3 Influenza dei parametri di processo variati	54
3.3.1 Studio del ritiro volumetrico uniforme.....	54
3.3.2 Approfondimento sull'aumento della pressione di packing.....	60
3.3.3 Studio sulla deformazione uniforme	63
Conclusioni	66
Ringraziamenti.....	69

Prefazione

Ho realizzato il seguente lavoro di tesi in conclusione del corso di laurea magistrale in Ingegneria del Veicolo, al fine di conseguire il relativo titolo di studio. L'obiettivo assegnatomi mi ha consentito di esprimere quanto appreso nei corsi d'esame, frequentati presso il Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari dell'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia. L'argomento trattato e gli strumenti utilizzati sono stati un'opportunità per fare esperienza delle metodologie di lavoro che sono alla base della ricerca tecnica, al fine di indagare un campo di interesse per l'azienda che mi ha offerto questa opportunità, in collaborazione con l'Università. Ho potuto così approfondire nuove tematiche e argomenti, di cui fino ad ora possedevo solo una conoscenza teorica. L'esperienza svolta ha confermato il mio entusiasmo per la ricerca e lo sviluppo, oltre ad essere stata altamente formativa.

Purtroppo per via delle contingenti condizioni di pandemia globale in cui viviamo, le modalità con cui si è svolto il tirocinio aziendale non sono state quelle tradizionali. Per motivi di sicurezza, la maggior parte del lavoro si è svolto da remoto, mantenendo un contatto costante con il mio tutor aziendale. Questa modalità ha riguardato tutta la parte di simulazione del processo di stampaggio ad iniezione, tramite l'utilizzo del software Moldex3D (CoreTech System Co., Ltd.). La mia presenza in azienda si è limitata alle fasi di realizzazione pratica del processo, in cui ho potuto assistere alla produzione del componente scelto per lo studio e di tutta la parte di controllo qualità successiva, utilizzata con lo scopo di validare il lavoro svolto al calcolatore.

L'azienda con la quale si è svolta la collaborazione è la Cattini Engineering Plastics s.r.l. di San Martino in Rio (RE). Essa nasce nel 1963 e si è sempre dedicata all'attività di stampaggio di tecnopolimeri e superpolimeri, maturando un'elevata esperienza e know how. Storicamente l'azienda si è distinta per la capacità di realizzare prodotti sfruttando materiali dal complicato processo di trasformazione, che hanno quindi portato ad un alto livello di innovazione e ricerca. Anche gli stampi sono progettati e realizzati internamente, garantendo un'integrazione di tutto il processo di

realizzazione del prodotto finito. Oltre ad un ufficio tecnico, dove vengono svolte le attività di progettazione e ingegnerizzazione di stampi e prodotti, nonché le attività di Ricerca e Sviluppo, l'azienda dispone quindi di un'area di produzione dedicata alle presse per lo stampaggio (idrauliche ed elettriche). Infine vi è il reparto dedicato al controllo dimensionale dei prodotti realizzati, dove ha luogo il controllo qualità.

I principali settori con i quali collabora Cattini Engineering sono quello automotive, medicale e alimentare. All'azienda si rivolgono realtà internazionali in ciascuno di questi ambiti. Nello specifico, il lavoro da me svolto si è concentrato su un componente per motori a combustione interna ad elevate prestazioni, già presente nel catalogo aziendale, realizzato per alcuni dei motori per vetture stradali prodotte da Ferrari.

La mia attività è stata supervisionata dal Responsabile della produzione e area R&D, Ing. Simone Malagola, che vanta anche grande esperienza nella simulazione software del processo. La sua esperienza ha consentito di impostare il lavoro in modo integrato tra realtà del processo produttivo e simulazione al computer. Nella parte di controllo qualità sono stato invece affiancato dal personale del reparto qualità, che mi ha illustrato gli strumenti e le metodologie impiegate per i principali controlli dimensionali richiesti.

Per quanto riguarda la parte universitaria, il mio lavoro è stato seguito dall'ing. Francesco Gherardini, ricercatore del Laboratorio IDEA – Integrated Design and Engineering Applications del dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari” di Unimore.

Riassunto

La realizzazione di un prodotto in materiale polimerico, tramite il processo di stampaggio ad iniezione, comporta l'ottenimento di una forma che si discosta da quella ideale in maniera correlata ad un elevato numero di parametri, che regolano il processo produttivo stesso. Nel seguente lavoro si è voluta indagare l'influenza che la variazione di alcuni di questi parametri di processo ha sulla deformata del componente, alla ricerca di una possibile modifica del processo che consentisse una riduzione dell'entità della deformazione. Lo studio non ha preso in considerazione l'influenza delle caratteristiche del materiale utilizzato (mantenuto invariato rispetto alla corrente produzione e considerato come un dato in ingresso all'analisi) e le scelte progettuali che hanno portato alla realizzazione dello stampo. L'unico campo di azione disponibile sono stati i parametri del processo che potessero avere una rapida realizzazione in produzione. In particolare si è agito sulla velocità di iniezione e sulla pressione della fase di mantenimento.

La metodologia seguita è stata quella di simulare il processo tramite il software Moldex3D, confrontando i risultati ottenuti al variare dei parametri scelti, secondo un approccio di tipo Design of Experiments. Si è quindi valutato il risultato delle varie combinazioni di valori per i parametri selezionati, alla ricerca di una tendenza che desse delle indicazioni sull'impatto dei singoli parametri sulla geometria finale del prodotto. Questa fase ha evidenziato come la pressione di mantenimento fosse il parametro più influente ai fini del raggiungimento dell'obiettivo di contenere gli effetti termici che deformano il prodotto finito. Si è quindi proceduto alla realizzazione di ulteriori simulazioni per valutare se, compatibilmente con i limiti della pressa a disposizione, fosse possibile trovare un valore di tale parametro al quale corrispondesse la massima qualità del pezzo ottenuto. I risultati delle simulazioni sono stati sottoposti ad una validazione sperimentale, tramite il confronto con i valori storicamente ottenuti dal controllo dimensionale del componente, per valutare l'effettiva conformità del prodotto ottenuto con il processo modificato.

Si è potuta constatare una riduzione della deformazione, nella zona più critica del componente, all'aumentare della pressione di mantenimento e un peggioramento delle condizioni geometriche con l'aumento della velocità di iniezione. In particolare le simulazioni, effettuate per un ulteriore approfondimento, sono state realizzate tornando al valore di velocità abitualmente utilizzato durante il processo, concentrandosi quindi su variazioni della sola pressione di packing. Inoltre si è realizzata un'ulteriore analisi sull'uniformità della deformazione ottenuta al variare dei parametri selezionati, realizzando un secondo calcolo con metodologia DOE. Si è quindi potuta constatare una perdita di uniformità degli spostamenti all'aumentare della pressione di mantenimento, che si concentra però in una specifica zona del pezzo.

Le valutazioni sui risultati devono tenere conto dell'impossibilità di agire sullo stampo e quindi di variare parametri come la sezione dei gate, che avrebbero potuto influire sul risultato finale. Inoltre non è detto che i valori di pressione di mantenimento più elevati portino ad un effettivo miglioramento della qualità del componente per via dell'insorgere di bave.

Introduzione

La realizzazione di un componente tramite l'impiego di polimeri tecnici richiede l'attuazione di un processo di stampaggio per iniezione del materiale. Il numero dei parametri coinvolti in questo processo di trasformazione rende complicata la valutazione di quali siano le cause delle deformazioni, che portano ad una riduzione della qualità del prodotto ottenuto. Si vuole quindi indagare quale possa essere l'influenza che un numero limitato di parametri di processo scelti possa avere sul risultato finale della produzione. In particolare l'obbiettivo è quello di capire come poter ridurre la deformazione del componente.

Ci si prefigge quindi lo scopo di individuare quale sia l'influenza di due parametri di processo sui fenomeni che allontanano la geometria del prodotto da quella nominale. In particolare nell'indagine seguente sono stati scelti la velocità di iniezione del materiale e la pressione della fase di mantenimento come parametri da sottoporre a variazione, rispetto a quello che è lo stato dell'arte attuale internamente all'azienda. Si è quindi ricavata una tendenza di un parametro di qualità del pezzo al variare di pressione di mantenimento e velocità di iniezione. Il legame ottenuto ha suggerito ulteriori indagini sulla pressione di mantenimento, che si è rivelato come il parametro più promettente per il raggiungimento dello scopo di minimizzazione del ritiro volumetrico.

Il prodotto scelto come soggetto per lo studio è un elemento del condotto di aspirazione di un motore termico ad alte prestazioni per veicolo stradale. La geometria del pezzo è complicata dalla presenza della sede per l'alloggiamento del sensore per la rilevazione della portata di aria in aspirazione (debimetro).

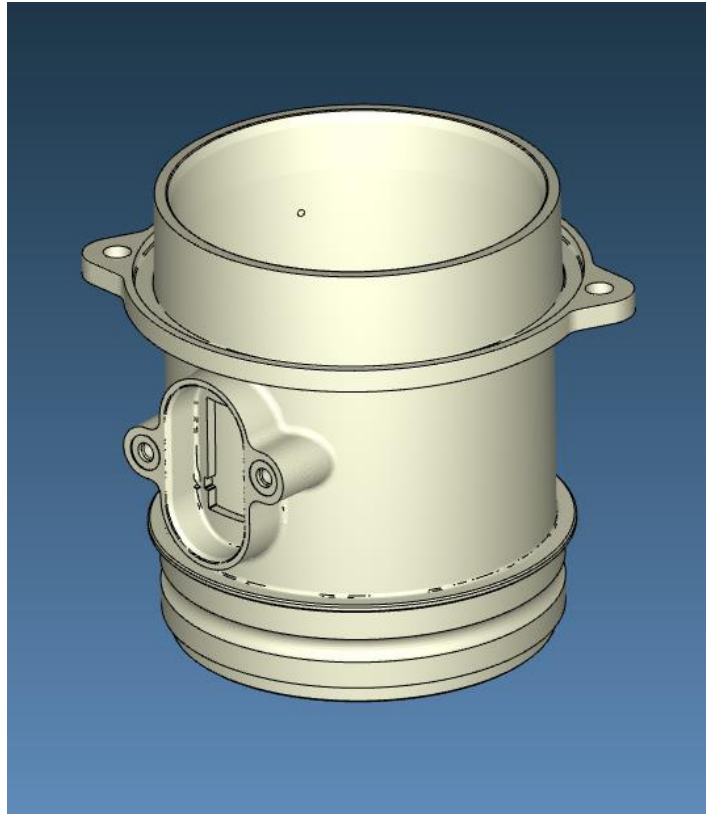


Figura 1. Immagine del prodotto oggetto dello studio descritto

Nell'attuale realizzazione del componente le specifiche progettuali vengono già raggiunte, soddisfacendo i requisiti dimensionali e geometrici stabiliti in fase di progettazione. La scelta di questo soggetto di studio è stata quindi dettata dall'elevato grado di conoscenza delle criticità della sua realizzazione e delle sue caratteristiche di deformazione. Si dispone cioè di un elevato grado di conoscenza e di una buona quantità di dati storici, tali da consentire valutazioni accurate sulla variazione delle caratteristiche della sua produzione e una validazione sperimentale di ciò che si è ottenuto tramite la simulazione del processo.

Il materiale impiegato è Polibutilene Tereftalato (PBT) caricato con fibra di vetro al 30%. Il PBT ha ottime caratteristiche meccaniche (rigidità e tenacità), termiche, tribologiche (coefficiente d'attrito e usura), estetiche (eccellente brillantezza e colorabilità). Inoltre assorbe un bassissimo contenuto di umidità, quindi il pezzo stampato è molto stabile dal punto di vista dimensionale. Grazie alle sue elevate

caratteristiche di scorrevolezza, tale materiale risulta stampabile con cicli molto rapidi anche con presse tradizionali.

L'indagine viene condotta mediante simulazione con il software Moldex3D, che consente di impostare i parametri di processo di stampaggio a iniezione come sulla pressa. Di seguito vengono riportate le curve che rappresentano l'andamento della velocità di iniezione e della pressione di mantenimento come sono impostate sulla pressa per la realizzazione del processo, secondo lo stato dell'arte finora ottenuto nella produzione.

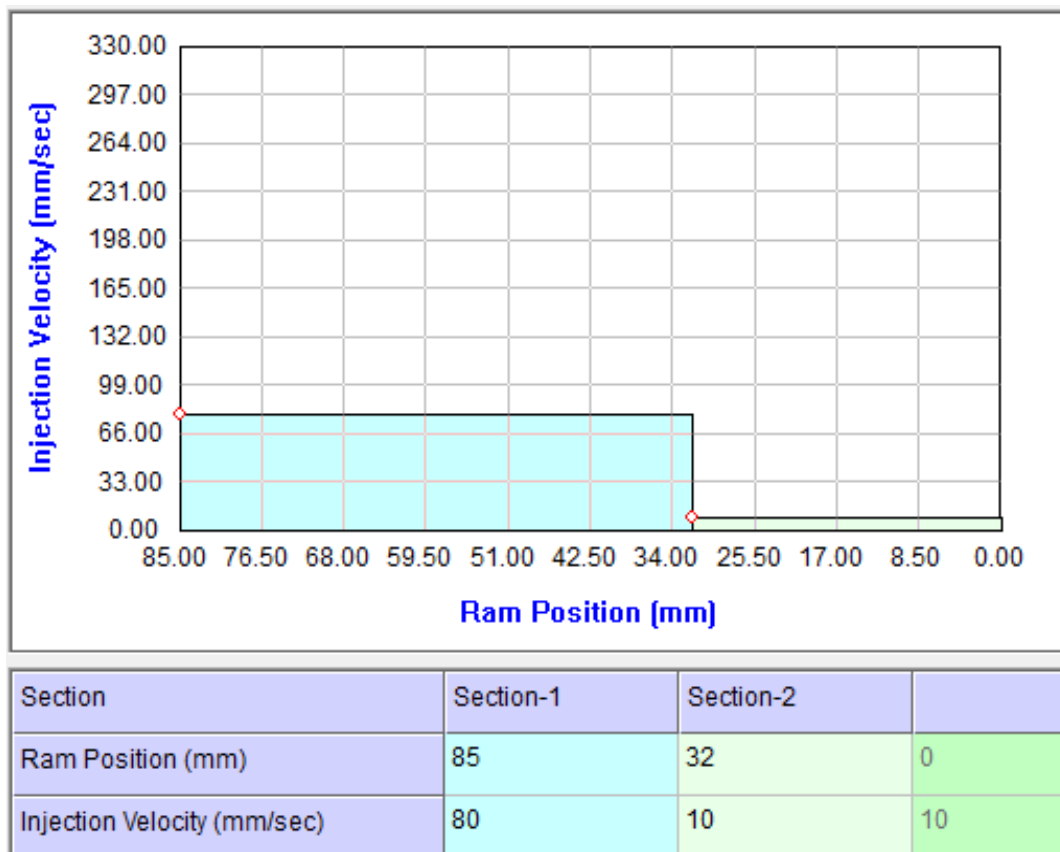


Figura 2. Curva della velocità di iniezione in funzione del tempo

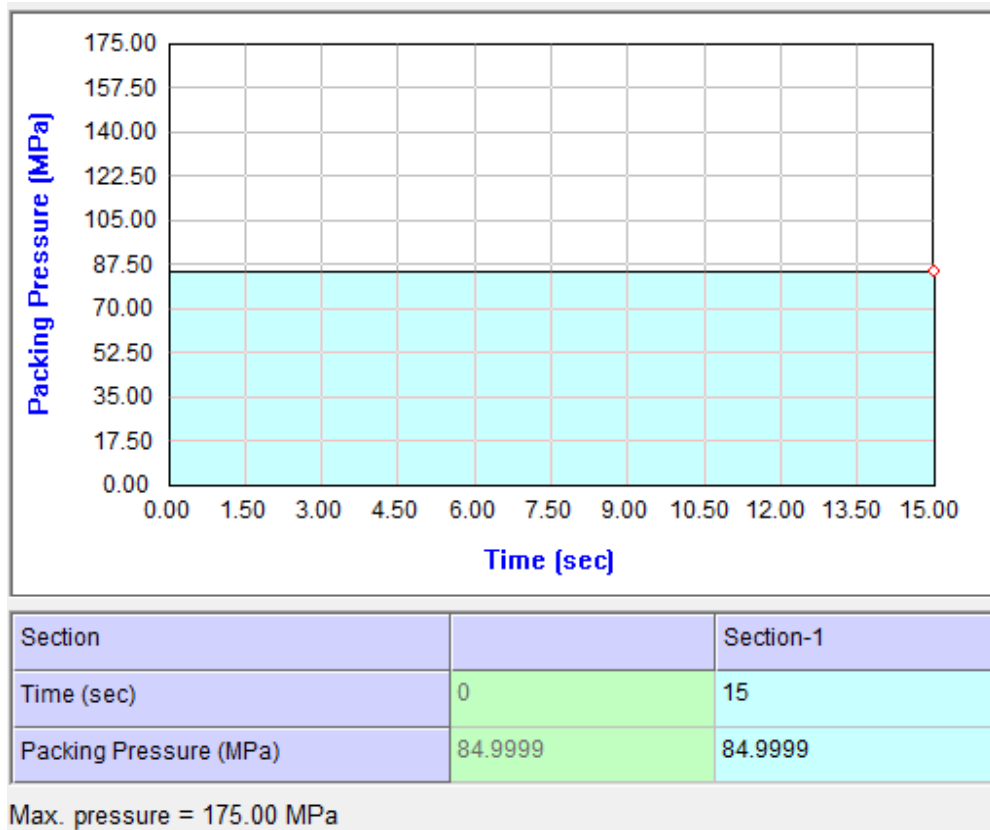


Figura 3. Curva della pressione della fase di mantenimento in funzione del tempo

Come si può notare, la curva della velocità di iniezione parte da un valore di 80 mm/s, mantenuti costanti per tutta la prima fase dell'iniezione, per poi calare ad un valore di 10 mm/s quando ormai la quasi totalità della cavità risulta riempita dal materiale. Questo andamento viene utilizzato per evitare un picco della pressione nella fase terminale del riempimento, che sarebbe causa della formazione di bave. I valori impostati hanno consentito di ottenere un prodotto finito esente da tali difetti ed è stato quindi mantenuto nella normale pratica realizzativa. Per quanto riguarda la pressione di mantenimento si ha un valore impostato a 85 Mpa per un tempo di mantenimento di 15 s. In questo modo si riesce ad apportare una quantità di materiale, a compensazione del ritiro, senza incorrere in problemi di eccessivo mantenimento in alcune zone del pezzo. Nella figura seguente è possibile osservare i valori massimi e minimi del raggio per una circonferenza, presa ad esempio, per evidenziare il livello di precisione dimensionale ottenuto.

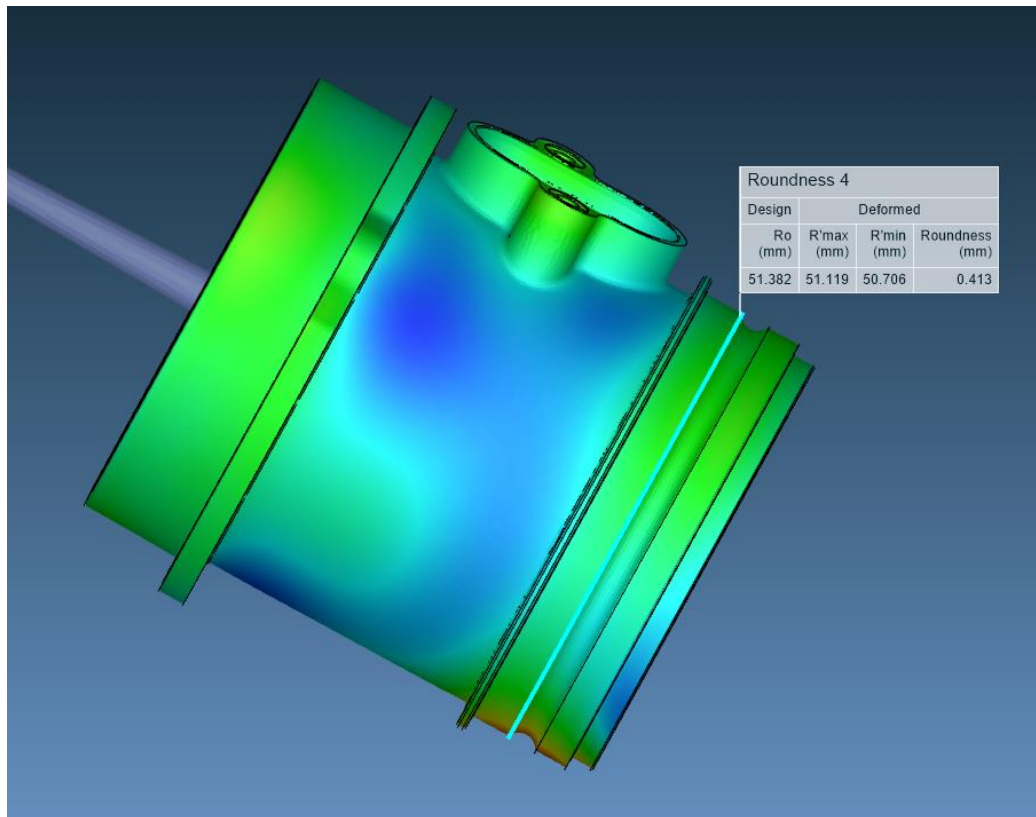


Figura 4. Valori dimensionali di una delle circonferenze verificate con il controllo qualità. Il parametro di circolarità misurato sul modello è validato dall'evidenza sperimentale del controllo qualità, evidenziando una buona correlazione tra il modello stesso e la produzione reale

I valori restituiti dalle simulazioni, impostate secondo gli stessi parametri utilizzati sulla pressa, hanno evidenziato valori dei diametri, e delle relative tolleranze, in linea con quelli rilevati durante il controllo qualità, validando il modello sottoposto a simulazione prima della realizzazione del componente. Inoltre hanno evidenziato come la produzione, secondo i parametri attuali, sia in grado di soddisfare i requisiti dimensionali di progetto del componente, e i valori di circolarità desiderati sulle superfici funzionali e sulle sedi di accoppiamento in fase di assemblaggio (ricorrendo ad una maschera per il condizionamento del raffreddamento solo dell'estremità opposta alla flangia). Tale tolleranza viene usata internamente all'azienda come parametro per valutare la qualità del prodotto, mentre non è richiesto un suo valore specifico per il componente in esame.

Analizzando tali risultati e valutando quali fossero i parametri che potessero avere un maggiore effetto sulla deformazione del pezzo, si è iniziato quindi il seguente studio. In particolare la scelta fatta di aumentare la velocità di iniezione è volta ad avvicinarsi progressivamente alla condizione ideale di riempimento istantaneo della cavità, che porterebbe tutti i punti della stessa ad iniziare la fase di raffreddamento nello stesso istante, ottenendo un ritiro volumetrico più uniforme. La variazione della pressione di mantenimento è stato invece dettato dal tentativo di variare l'apporto di materiale durante il ritiro del pezzo, per osservare l'efficacia di tale parametri nel contenimento del ritiro volumetrico. Entrambe le scelte sono state fatte al fine del raggiungimento dell'obiettivo di riduzione della deformazione. In particolare, durante le fasi di simulazione, si è preso in considerazione il ritiro volumetrico e lo spostamento totale dei vari punti della discretizzazione. Con un approccio di tipo Design Of Experiments, si è valutata quale fosse la combinazione dei valori scelti di pressione di mantenimento e velocità di iniezione che minimizzasse il ritiro e la deformazione uniformi. Si accetta quindi una geometria finale del pezzo che possa essere "scalata" rispetto a quella ideale, ma che si distacchi il meno possibile da questa.

I risultati ottenuti hanno confermato come l'aumento della pressione di mantenimento abbia effettivamente degli effetti benefici sulla qualità del pezzo compensando efficacemente il suo ritiro, mentre l'aumento della velocità di iniezione non ha consentito il raggiungimento dei miglioramenti sperati. Anzi, l'aumento di questo parametro rispetto a quello di base ha portato ad un peggioramento della qualità del prodotto. Si è deciso di tornare quindi al valore di velocità di iniezione di partenza e di proseguire nell'aumento della pressione di mantenimento per verificare se fosse possibile ottenere ulteriori miglioramenti, tenendo conto dei limiti della pressa utilizzata e valutando gli effetti negativi dell'aumento di tale variabile, riscontrati nella fase precedente , a livello di spostamenti.

I risultati ottenuti sono da considerare in un contesto in cui si è scelto di non apportare nessuna modifica al materiale utilizzato e allo stampo precedentemente realizzato. L'unico campo di azione consentito è stato quello dei parametri del processo. In quest'ottica si può ipotizzare che i mancati miglioramenti della qualità del prodotto con l'aumento della velocità di iniezione siano imputabili ad un aumento eccessivo

degli sforzi viscosi che si sviluppano durante il riempimento, con un conseguente aumento delle temperature. Si sarebbero potuti mitigare tali sforzi agendo sulla sezione dei gate ma, per le condizioni imposte al progetto, questo aspetto non è stato preso in considerazione. Sarebbe inoltre opportuna la verifica dell'insorgere di bave sul pezzo con un aumento così consistente della pressione di mantenimento, oltre a considerazioni sulla resistenza meccanica dello stampo. Questi aspetti potrebbero porre un limite alla realizzabilità del processo secondo i valori dei parametri scelti.

Nei capitoli che seguono verrà effettuata la seguente suddivisione degli argomenti:

- Capitolo 1: si descrive lo stato dell'arte del processo, analizzando la deformata del prodotto ottenuta secondo i parametri di processo antecedenti lo studio in questione
- Capitolo 2: descrizione della metodologia, dei passaggi effettuati e delle scelte per l'ottenimento dei risultati illustrati
- Capitolo 3: descrizione dei risultati e valutazioni sulle loro limitazioni

Capitolo 1: Stato dell'arte

1.1 Scelte realizzative per lo stampo

L'esperienza maturata nel tempo dall'azienda ha rivelato come la configurazione del runner più idonea, all'ottenimento di un oggetto di geometria cilindrica, consista nello sfruttare tre gate, disposti secondo i vertici di un triangolo equilatero (quindi con i tre rami del runner separati tra loro da angoli di 120° , figura 5). Inoltre, quando possibile, i gate andrebbero posti nelle vicinanze delle regioni della cavità che presentano il volume maggiore. Secondo queste indicazioni sono state quindi scelte la configurazione e il posizionamento del runner, come mostrato nella seguente figura.

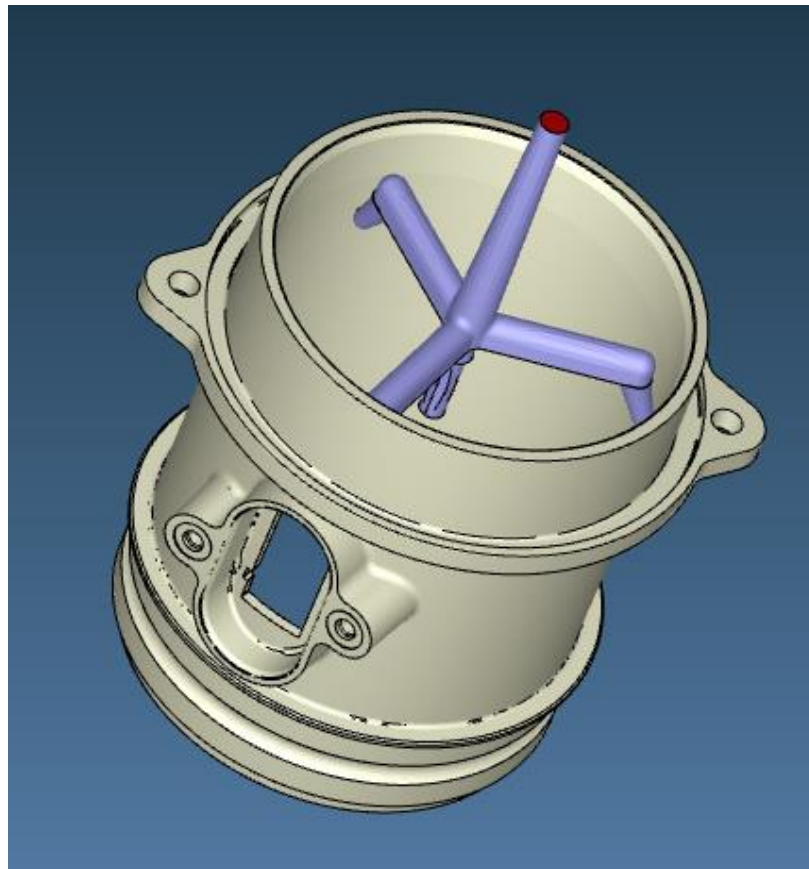


Figura 5. Configurazione e posizione del runner

Per il sistema di raffreddamento dello stampo, sono stati realizzati tre rami di condotti: il primo è ricavato interamente nella parte superiore dello stampo e va a raffreddare la parte alta della cavità, caratterizzata dallo spessore maggiore, mentre i restanti due sono ricavati in modo che il loro insieme circondi completamente il pezzo, interessando quasi tutta l'altezza della cavità. La parte più rilevante del raffreddamento è però a carico della fontana centrale. Le simulazioni hanno rivelato come essa contribuisca da sola al 30% del flusso termico scambiato dal sistema di raffreddamento. Questa è caratterizzata da due eliche coassiali (una che funge da ramo d'ingresso e l'altra da ramo d'uscita), ricavate all'interno di un apposito inserto dello stampo. Il fluido refrigerante accede a questo dispositivo dalla parte inferiore dello stampo.

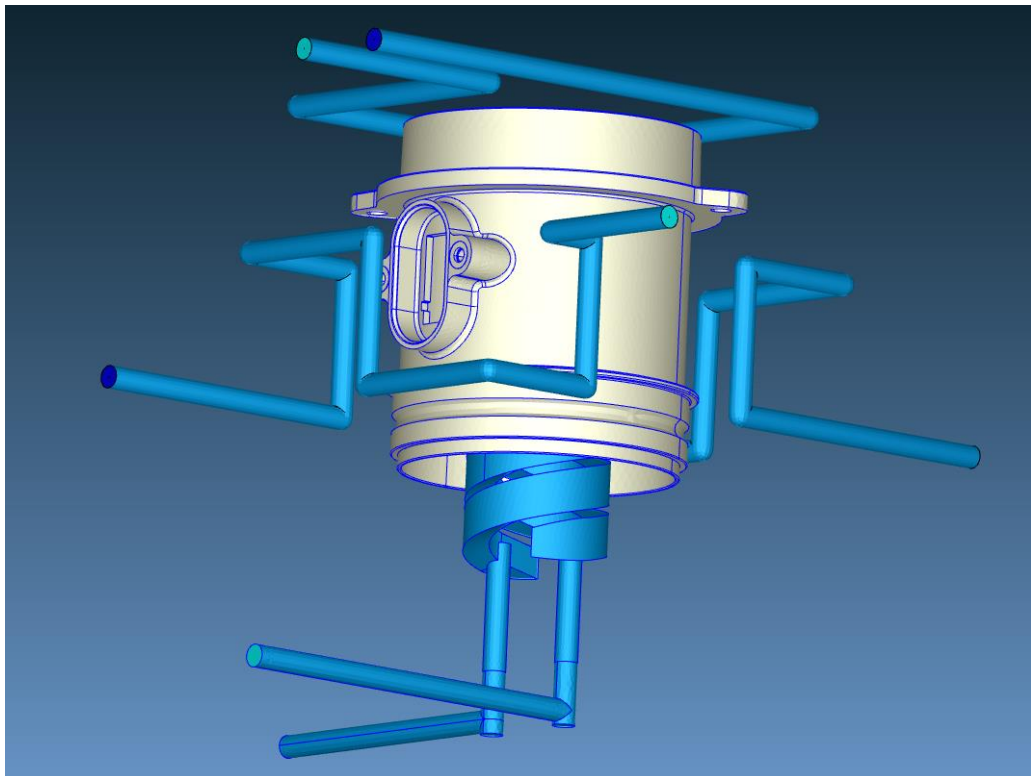
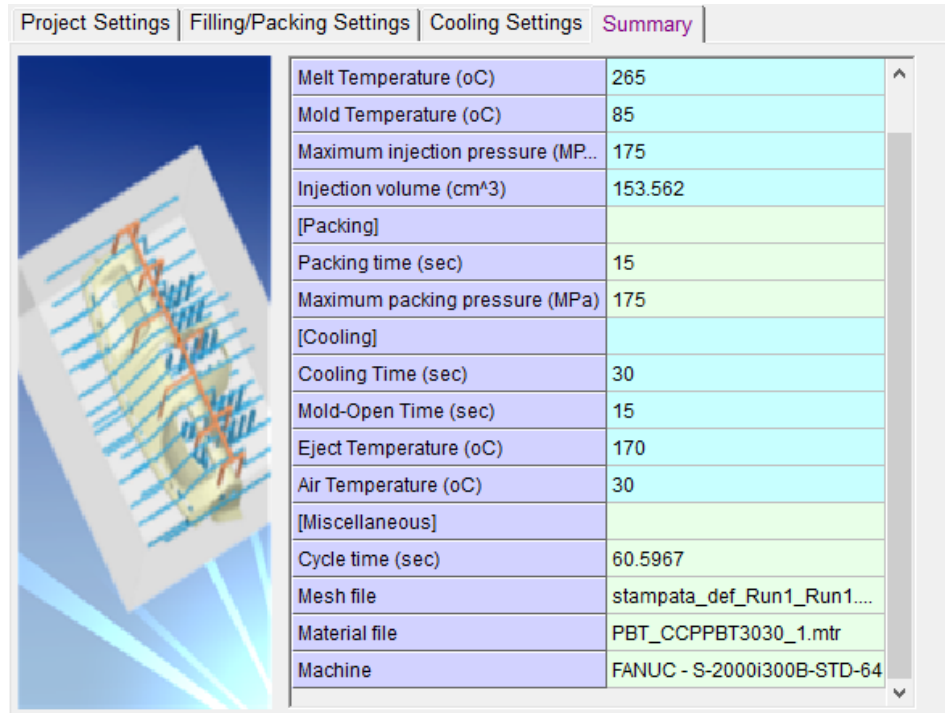


Figura 6. Modellazione 3D del sistema di raffreddamento per la sua simulazione in Moldex3D

Il fluido refrigerante scelto è l'acqua e la sua portata è stata impostata al massimo valore consentito dalla pressa. Le temperature scelte per lo stampo e per il

materiale fuso in ingresso nella cavità sono rispettivamente di 85 °C e 265 °C (figura 7). Questi valori hanno dato i migliori risultati in fase di definizione del processo.



Parameter	Value
Melt Temperature (oC)	265
Mold Temperature (oC)	85
Maximum injection pressure (MPa)	175
Injection volume (cm^3)	153.562
[Packing]	
Packing time (sec)	15
Maximum packing pressure (MPa)	175
[Cooling]	
Cooling Time (sec)	30
Mold-Open Time (sec)	15
Eject Temperature (oC)	170
Air Temperature (oC)	30
[Miscellaneous]	
Cycle time (sec)	60.5967
Mesh file	stampata_def_Run1_Run1....
Material file	PBT_CCPPBT3030_1.mtr
Machine	FANUC - S-2000i300B-STD-64

Figura 7. Parametri del processo standard riassunti nella schermata di Moldex3D

1.2 Deformata del prodotto

Una delle conseguenze della configurazione scelta per i runner è quella di generare una deformata trilobata del pezzo, visibile spostandosi lungo tutta l'asse del componente. L'entità delle deformazioni non è uguale ad entrambe le estremità. Infatti, in corrispondenza del lato che presenta la flangia di fissaggio del pezzo al resto del condotto di aspirazione, la geometria si discosta meno da quella ideale rispetto all'estremità opposta. Questo può essere facilmente valutato osservando la deformata ottenuta dalle simulazioni preliminari (effettuate mantenendo i valori dei parametri di processo utilizzati per la produzione) e verificando anche i valori di circolarità per due circonferenze interne, poste alle due estremità del condotto.

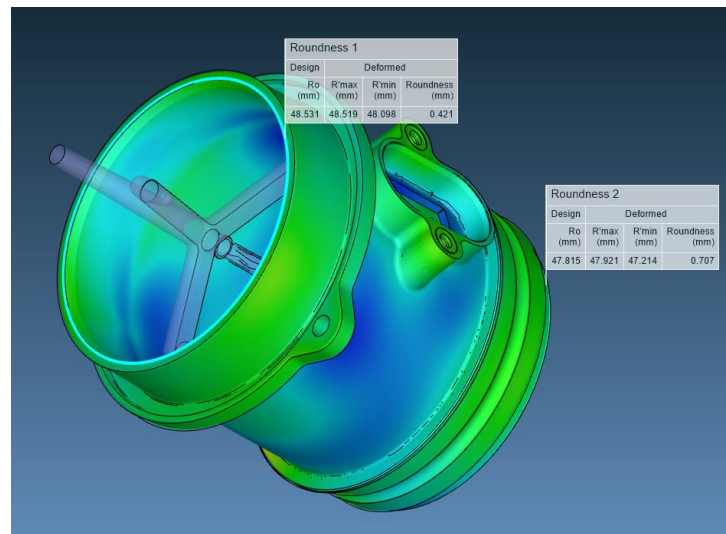


Figura 8. Valori della tolleranza di circolarità per due circonferenze agli estremi opposti del pezzo

Un altro aspetto importante della deformata è il maggiore spostamento dei punti diametralmente opposti rispetto alla sede per il montaggio del sensore di portata dell'aria, all'estremità opposta rispetto a quella della flangia. Visualizzando infatti il valore degli spostamenti totali con Moldex3D (con un'opportuna scala moltiplicativa), è possibile notare una zona caratterizzata dal colore rosso, che testimonia la presenza degli spostamenti di entità maggiore nella scala scelta.

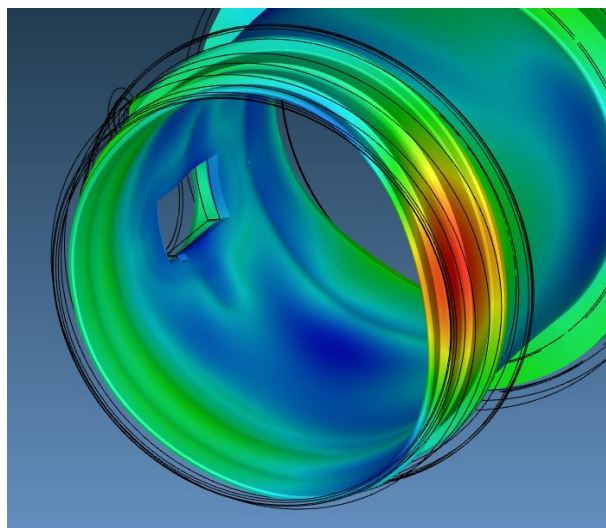


Figura 9. Rappresentazione degli spostamenti totali con Moldex3d dell'estremità soggetta alle deformazioni maggiori

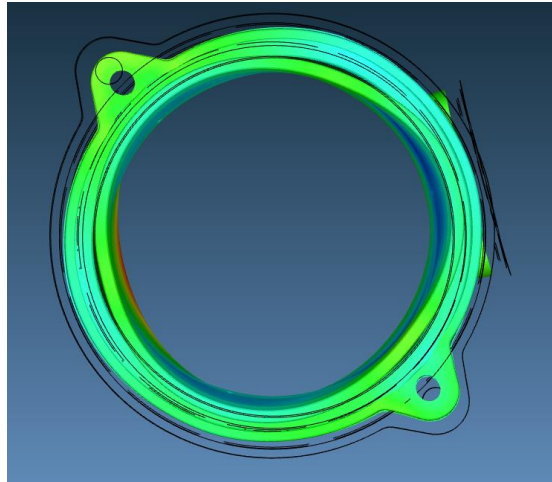


Figura 10. Forma trilobata dovuta al posizionamento dei gate

Questa configurazione del componente, con deformazioni più accentuate ad un'estremità rispetto all'altra, è associabile a diversi aspetti. Uno di questi è lo spessore della parte, che risulta essere maggiore nell'estremità che si trova più vicina alla flangia rispetto a quella opposta. Essendo questa la zona più vicina ai gate ed opponendo minore resistenza al riempimento (per via della minore entità degli effetti viscosi che si sviluppano con un maggiore spessore della cavità a disposizione), questa è la regione che per prima completa il riempimento e mantiene un molten core per tutta la durata della fase di mantenimento, garantendo la realizzazione di una fase di packing efficace, come mostrato nella seguente figura.

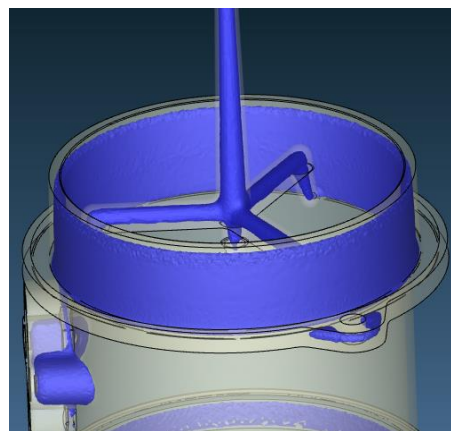


Figura 11. Molten core della parte al termine della fase di packing (EOP)

Visualizzando invece lo stato del molten core dopo 5 secondi dall'inizio della fase di mantenimento (dopo quindi circa un terzo della durata totale di questa fase), è evidente, invece, come la parte inferiore del componente presenti un volume non ancora solidificato, che risulta collegato alla parte alta del molten core solo nella zona sottostante all'alloggiamento del sensore. Quindi, già in una fase iniziale del mantenimento, le possibilità di apportare materiale a compensazione del ritiro termico risulta molto ridotta e il packing della cavità avviene in maniera poco efficace per quel che riguarda l'estremità opposta rispetto al lato flangia. Questa risulta una delle ragioni che spiegano il maggiore stato deformativo di tale estremità, rispetto a quella opposta.



Figura 12. Molten core dopo 5s dall'inizio della fase di mantenimento

Ma per giustificare lo stato degli spostamenti dell'estremità più distante dal runner è opportuno fare anche altre considerazioni. Come evidenziato in figura 8, la zona caratterizzata dai massimi valori dello spostamento totale (identificata dal colore rosso) non è dovuta solo ad una fase di mantenimento che avviene efficacemente solo per una frazione dell'effettiva durata di questa parte del processo. Ci sono altri due meccanismi che hanno un impatto rilevante sugli spostamenti di quest'area. Essi sono gli sforzi indotti dal flusso del materiale nella fase di mantenimento e le temperature più elevate della sede del sensore durante la medesima fase. Visualizzando infatti la sola componente degli spostamenti lungo l'asse del pezzo, risulta evidente come la regione sotto alla sede del sensore subisca uno spostamento verso il lato flangia del componente.

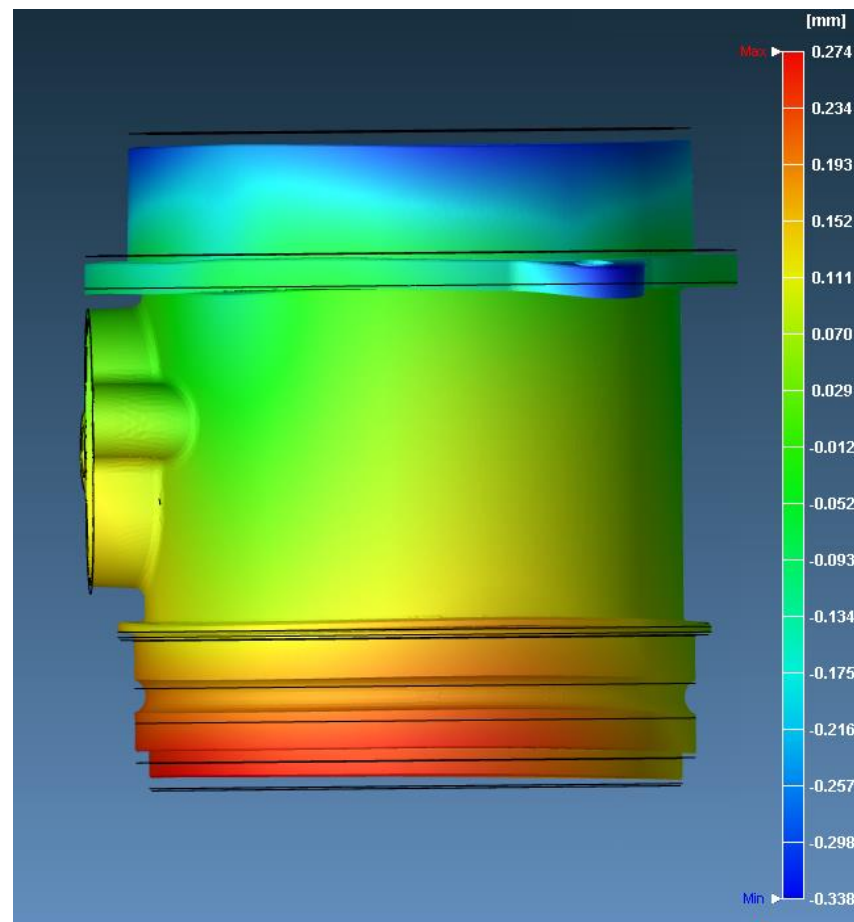


Figura 13. Valori della componente degli spostamenti lungo l'asse del pezzo (verso positivo dell'asse x del riferimento di Moldex3D)

Tale spostamento è in accordo con lo stato di sforzo della regione immediatamente sotto all'alloggiamento del debimetro. Infatti l'unica componente di sforzo ad essere rilevante è quella diretta come l'asse del pezzo e con valore positivo (quindi verso l'alto, cioè verso il lato flangia), dovuta agli effetti del flusso del materiale. Tale sollecitazione nasce durante la fase di mantenimento e influenza la geometria della parte anche per tutta la fase del raffreddamento. Le altre componenti dello stato di sforzo risultano di scarsa entità sia che siano legate agli effetti del flusso, sia che siano imputabili ad effetti termici.

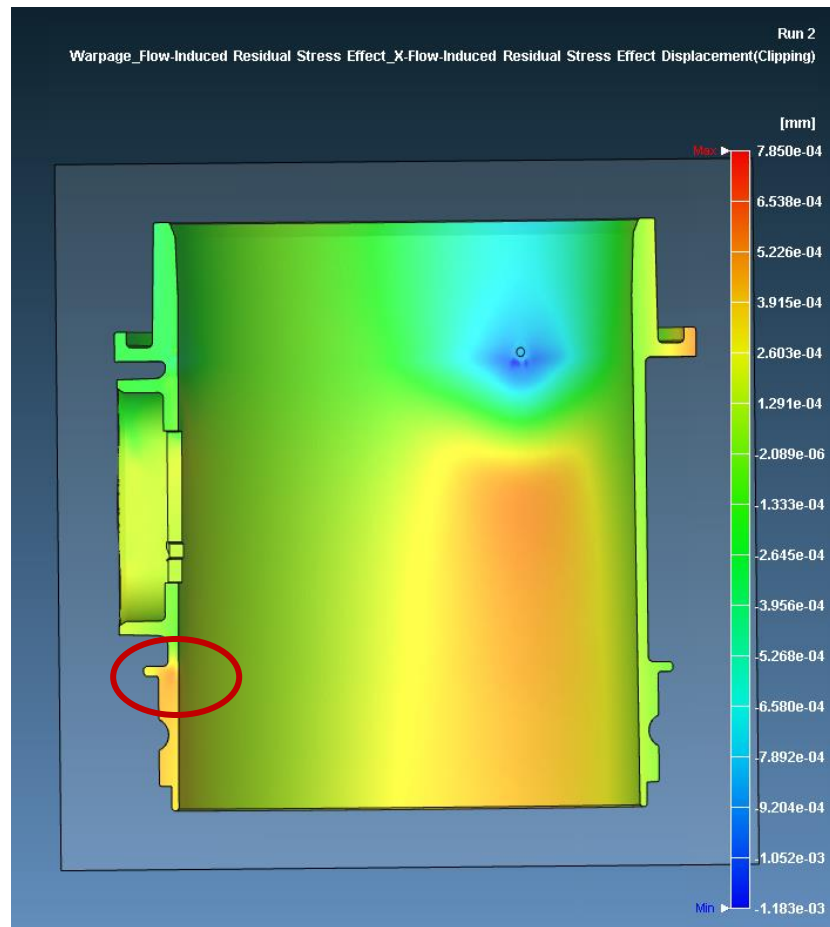


Figura 14. Spostamenti indotti dagli sforzi dovuti al flusso del materiale. Nella zona all'interno del cerchio si ha un valore positivo (spostamento verso l'alto) vicino ai massimi. Questo è in accordo con la deformazione della parte bassa del pezzo.

Per quanto riguarda la temperatura, è evidente dalla figura 10 come, sempre in questa zona, vi sia una porzione di materiale ancora non solidificato, che non è invece presente nella regione diametralmente opposta della parte. Questo è dovuto al maggiore volume di materiale presente per il riempimento della sede del sensore. Essendo ancora parte del molten core, il materiale si trova ad una temperatura più alta e genera quindi un ritiro diverso rispetto alla regione diametralmente opposta, accentuando lo stato deformativo già indotto dagli sforzi dovuti al flusso.

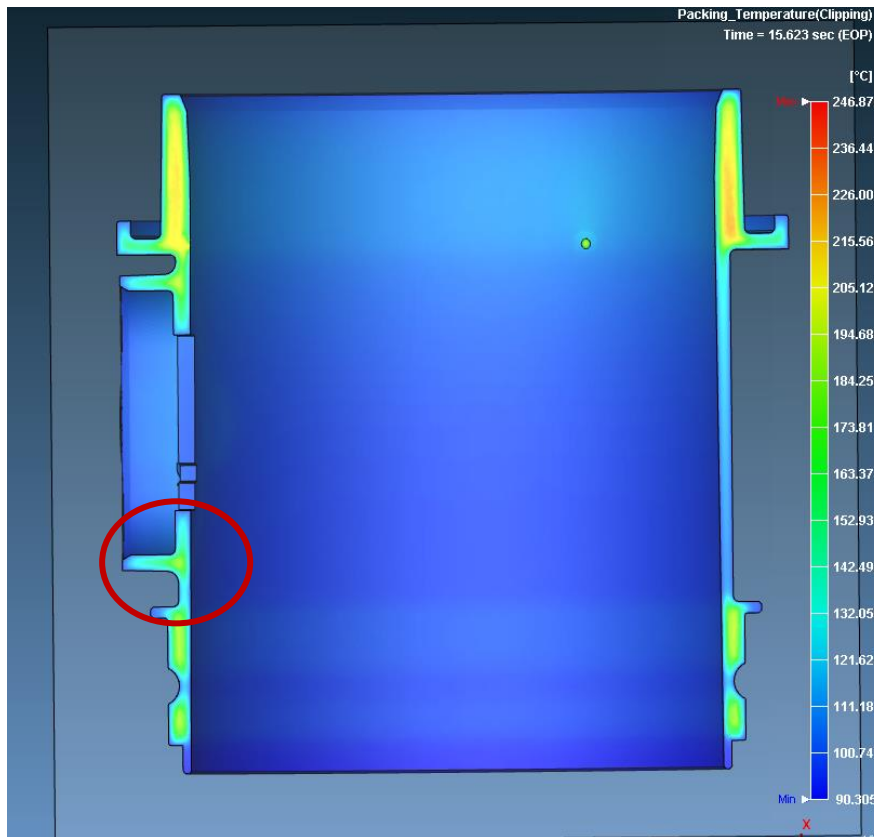


Figura 15. Distribuzione della temperatura al termine della fase di packing. Nel cerchio la zona che si trova a temperatura più elevata rispetto alla omologa zona diametralmente opposta e che crea un ritiro differenziato lungo l'asse del pezzo.

Dalla figura 13 è evidente come l'area presa in esame sia più calda alla fine della fase di mantenimento, rispetto alla parte del pezzo che presenta una geometria più semplice. L'ulteriore ritiro successivo all'istante raffigurato porta ad una contrazione differenziale tra le due zone opposte, determinando una maggiore componente degli spostamenti lungo l'asse del pezzo per i punti che si trovano sotto alla sede debimetro. Il maggiore carico termico di questa zona è anche visibile dall'analisi della cooling efficiency del sistema di raffreddamento.

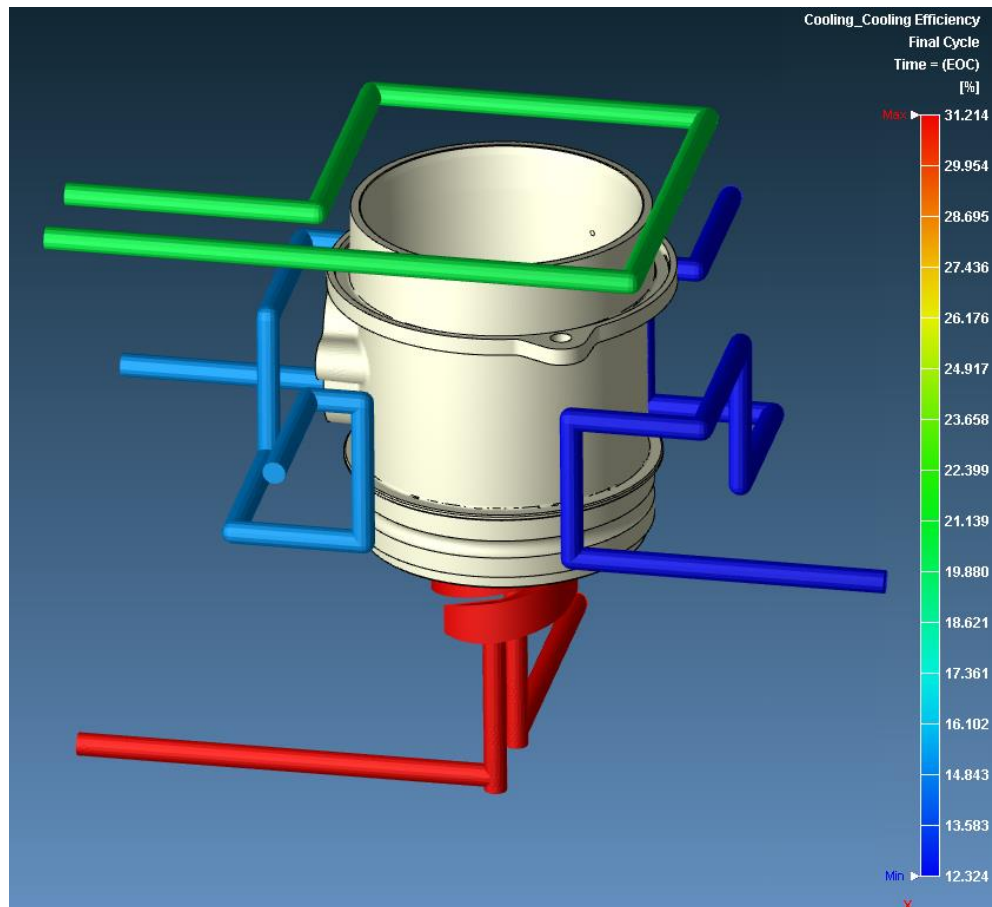


Figura 16. Cooling efficiency del sistema di raffreddamento. Rappresenta la percentuale di energia termica asportata da ogni elemento dell'impianto di raffreddamento

Il condotto adibito al raffreddamento della regione destinata ad ospitare il sensore ha un carico termico maggiore (per via del maggiore volume di materiale) evidenziato dal fatto che, tale ramo del raffreddamento, asporta una quantità percentuale di energia termica maggiore rispetto al condotto gemello, posto in maniera diametralmente opposta rispetto al pezzo.

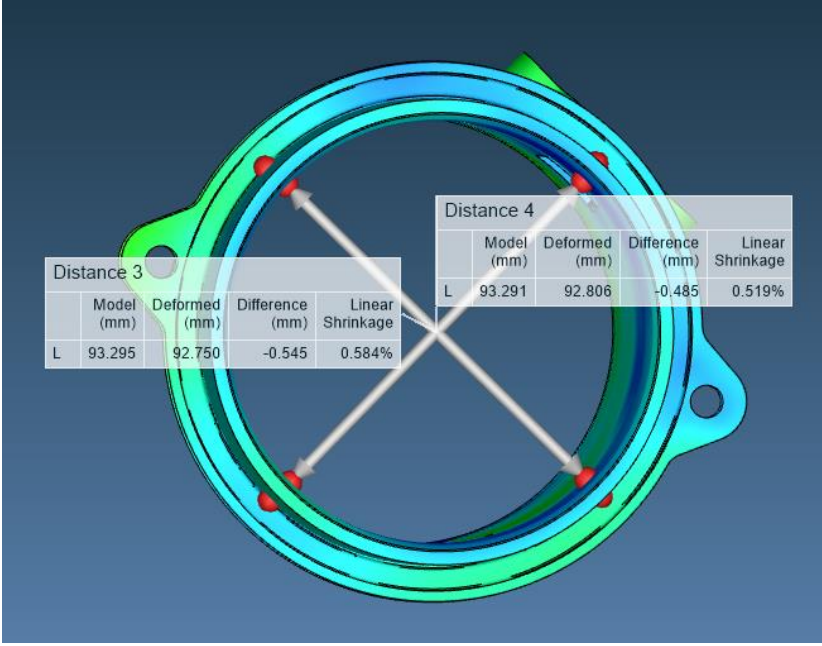
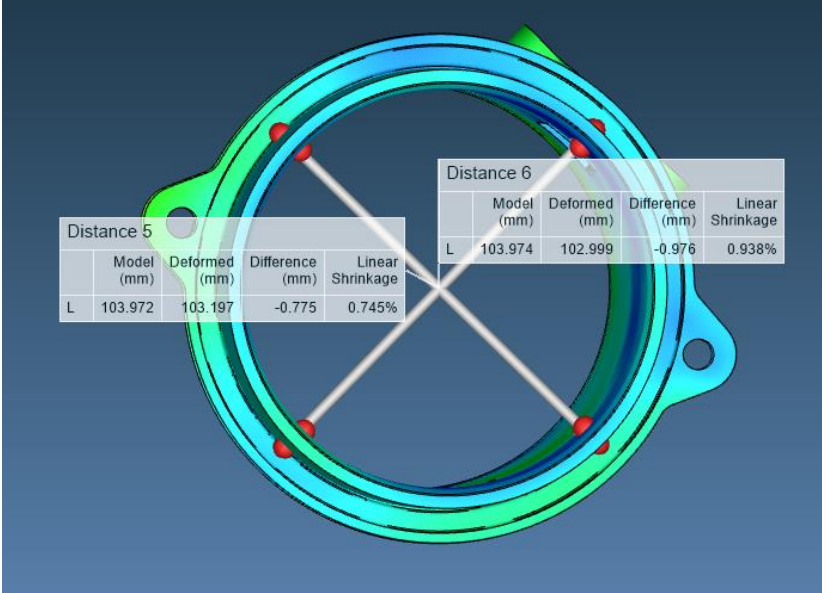
1.3 Validazione sperimentale del processo standard

I risultati del processo standard, ottenuti con l'attività di simulazione, mostrano una sostanziale conformità del prodotto alle richieste dimensionali di progetto. In particolare, eseguendo delle misurazioni sul modello per le tre circonferenze che presentano un'esplicita indicazione di tolleranza a disegno, si nota come quelle

posizionate dal lato flangia del pezzo siano assolutamente conformi, mentre la circonferenza presa nella parte bassa del pezzo risulta fuori tolleranza (tabella 1). Questo risultato ha suggerito si far avvenire la fase di raffreddamento del prodotto, una volta estratto dallo stampo, su di un'apposita maschera dalla forma atta a compensare l'eccessiva deformazione del pezzo durante il raffreddamento. I risultati ottenuti in sede di controllo qualità hanno confermato le buone prestazioni del processo e come l'accorgimento adottato per riportare in tolleranza anche l'estremità più critica del prodotto sia efficace. Infatti, con lo stampo in buone condizioni, i pezzi giudicati conformi sono una percentuale molto alta. Solo con un'elevata usura di quest'ultimo si sono verificati problemi con l'insorgere di piccole bave, che hanno richiesto un intervento successivo all'attività di stampaggio per la loro rimozione.

Anche i requisiti di finitura superficiale richiesti per la superficie di accoppiamento del lato flangia (superficie lucida) vengono raggiunti senza la necessità di lavorazioni successive. Questo grazie alle caratteristiche del materiale impiegato e all'efficacia con cui avviene la fase di mantenimento in questa estremità del pezzo.

Inoltre dalla tabella 1 si può osservare come i risultati restituiti dal modello siano in linea con quanto ottenuto con la realizzazione del processo.

MISURE MODELLO	MISURE PROGETTO (mm)	MISURE RILEVATE (mm)																				
 <p>Distance 3</p> <table border="1" data-bbox="323 645 679 757"> <thead> <tr> <th></th> <th>Model (mm)</th> <th>Deformed (mm)</th> <th>Difference (mm)</th> <th>Linear Shrinkage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>93.295</td> <td>92.750</td> <td>-0.545</td> <td>0.584%</td> </tr> </tbody> </table> <p>Distance 4</p> <table border="1" data-bbox="715 584 1070 696"> <thead> <tr> <th></th> <th>Model (mm)</th> <th>Deformed (mm)</th> <th>Difference (mm)</th> <th>Linear Shrinkage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>93.291</td> <td>92.806</td> <td>-0.485</td> <td>0.519%</td> </tr> </tbody> </table>		Model (mm)	Deformed (mm)	Difference (mm)	Linear Shrinkage	L	93.295	92.750	-0.545	0.584%		Model (mm)	Deformed (mm)	Difference (mm)	Linear Shrinkage	L	93.291	92.806	-0.485	0.519%	<p>92,5±0,5</p>	<p>Max 92,281</p> <p>Min 92,267</p>
	Model (mm)	Deformed (mm)	Difference (mm)	Linear Shrinkage																		
L	93.295	92.750	-0.545	0.584%																		
	Model (mm)	Deformed (mm)	Difference (mm)	Linear Shrinkage																		
L	93.291	92.806	-0.485	0.519%																		
 <p>Distance 5</p> <table border="1" data-bbox="336 1272 683 1384"> <thead> <tr> <th></th> <th>Model (mm)</th> <th>Deformed (mm)</th> <th>Difference (mm)</th> <th>Linear Shrinkage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>103.972</td> <td>103.197</td> <td>-0.775</td> <td>0.745%</td> </tr> </tbody> </table> <p>Distance 6</p> <table border="1" data-bbox="715 1211 1061 1323"> <thead> <tr> <th></th> <th>Model (mm)</th> <th>Deformed (mm)</th> <th>Difference (mm)</th> <th>Linear Shrinkage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>103.974</td> <td>102.999</td> <td>-0.976</td> <td>0.938%</td> </tr> </tbody> </table>		Model (mm)	Deformed (mm)	Difference (mm)	Linear Shrinkage	L	103.972	103.197	-0.775	0.745%		Model (mm)	Deformed (mm)	Difference (mm)	Linear Shrinkage	L	103.974	102.999	-0.976	0.938%	<p>103,5±0,5</p>	<p>Max 103,442</p> <p>Min 103,430</p>
	Model (mm)	Deformed (mm)	Difference (mm)	Linear Shrinkage																		
L	103.972	103.197	-0.775	0.745%																		
	Model (mm)	Deformed (mm)	Difference (mm)	Linear Shrinkage																		
L	103.974	102.999	-0.976	0.938%																		

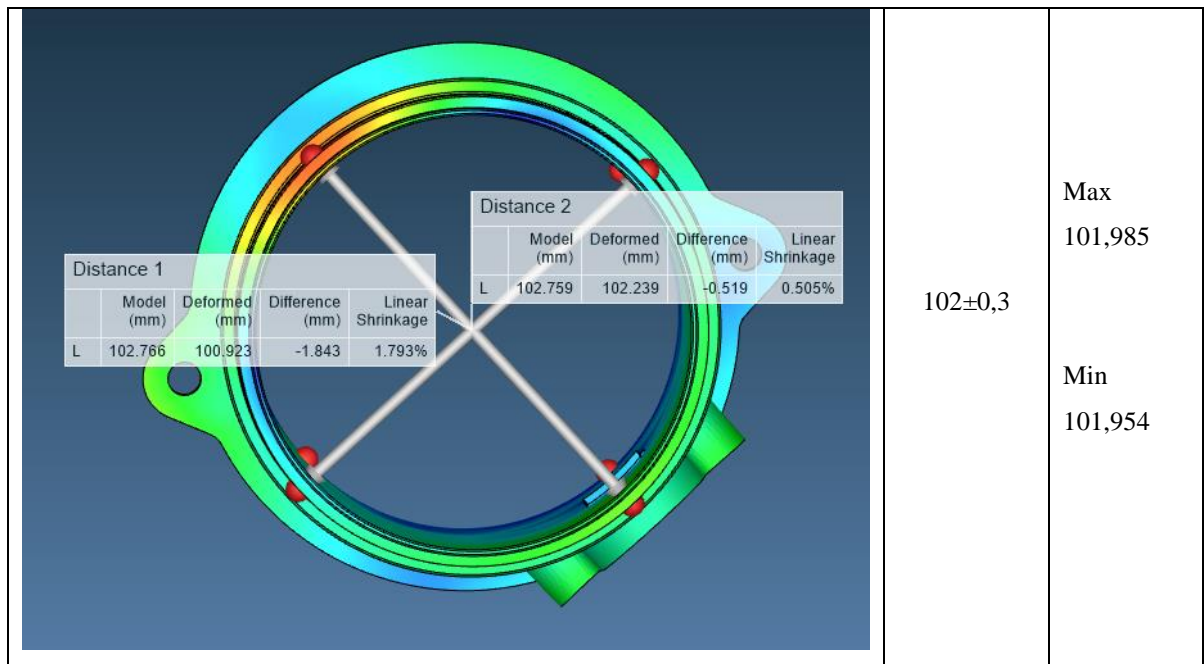


Tabella 1. Valori dei diametri funzionali del pezzo rilevati sul modello, da progetto e misurati in fase di controllo qualità del pezzo. Questi ultimi si riferiscono a un pezzo generico preso ad esempio

Capitolo 2: Metodo e strumenti

In questo capitolo si illustrano tutte le considerazioni e le metodologie impiegate per la realizzazione dell'indagine effettuata. Gli strumenti utilizzati sono stati il software Moldex3D per la discretizzazione del dominio di calcolo, la realizzazione delle simulazioni e l'analisi dei risultati ottenuti, oltre ai dati sperimentali disponibili dallo storico dell'azienda e alle rilevazioni dimensionali effettuate dal controllo qualità.

Il lavoro di simulazione è stato impostato con una fase preliminare in cui sono state fatte delle considerazioni sulla discretizzazione del dominio, alla ricerca di una mesh che potesse evidenziare anche variazioni della deformata piccole rispetto alle esigenze realizzative del progetto. Si è voluto infatti valutare l'influenza dei parametri di processo indipendentemente dai requisiti dimensionali e geometrici del componente. Dalle valutazioni dei risultati è stata scelta la mesh sulla quale basare il resto dello studio. L'esperienza aziendale e la validazione sperimentale hanno evidenziato come la discretizzazione selezionata risulti più "fine" rispetto a quelle che sarebbero le esigenze per uno studio della realizzazione del componente in conformità ai requisiti progettuali. Tuttavia tale mesh ha consentito di eliminare l'influenza della discretizzazione dai risultati di deformazione, permettendo una valutazione oggettiva della correlazione con i parametri di processo sottoposti a variazione. Queste valutazioni sono state fatte tenendo in debita considerazione la potenza di calcolo a disposizione.

Si è quindi proceduto all'analisi della variazione della deformazione del componente in funzione dei parametri di velocità di iniezione e pressione della fase di mantenimento, seguendo un approccio di tipo Design Of Experiments. Sono state realizzate due serie di simulazioni per gli stessi valori dei due parametri scelti, ma variando il fattore di qualità con cui è stata valutata la deformata ottenuta.

Dall'analisi dei risultati si è deciso di realizzare ulteriori simulazioni volte a valutare l'evoluzione del componente aumentando solo la pressione della fase di mantenimento fino ai limiti della pressa a disposizione.

Parallelamente allo studio principale, si è sfruttata la possibilità di fare alcune valutazioni riguardo l'impatto sui risultati di discretizzazioni diverse del sistema di

raffreddamento, oltre che di effettuare un confronto delle sue prestazioni ottenute con una modellazione semplificata e una fedele alla realtà della fontana centrale allo stampo.

2.1 Defeaturing della parte

Prima di procedere con la realizzazione della mesh, sono state analizzate le caratteristiche del pezzo alla ricerca di feature che potessero avere un'influenza negativa sulla qualità della discretizzazione e che non fossero rilevanti ai fini dei risultati che si vogliono ottenere. A tale scopo sono state quindi eliminate tutte le scritte e le indicazioni sulla direzione di montaggio del pezzo, poiché queste sono in rilievo sul componente e con uno spessore molto ridotto rispetto alla superficie cilindrica del pezzo. Non essendo interessati ad un'analisi dell'effettivo riempimento anche di queste feature, e non avendo alcun effetto rilevante sulla rigidità del pezzo, la loro eliminazione è stata considerata utile ai fini del miglioramento della qualità della mesh. Infatti la loro presenza avrebbe costretto il meshatore a posizionare in queste zone degli elementi molto piccoli, portando ad un aumento del numero degli elementi stessi, in zone in cui non si prevedono effetti rilevanti sulla deformazione del pezzo.

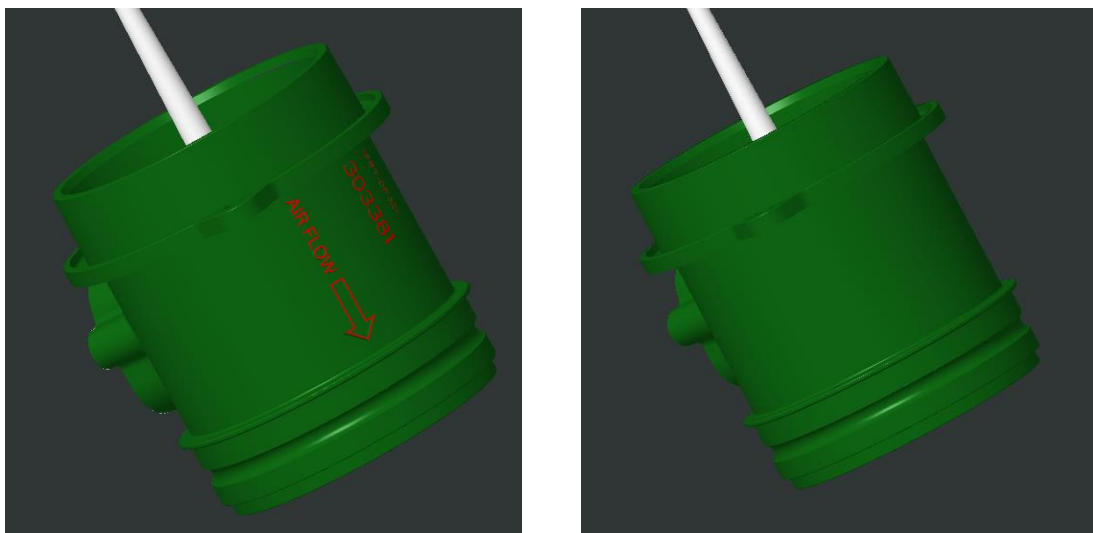


Figura 17. La parte prima e dopo il defeaturing

L'analisi è stata poi spostata sulle caratteristiche formali del componente, come smussi e raccordi. Per queste feature non è stato possibile procedere con una semplificazione rilevante. Infatti l'esperienza interna all'azienda ha evidenziato come anche raccordi con raggio molto ridotto (fino a 0,2 mm) possano avere un effetto significativo sulla deformazione del pezzo, specie se si tratta di raccordi interni ad elementi cavi come quello in questione. Questo avviene perché la presenza di questi raccordi varia l'entità della sezione resistente alle sollecitazioni deformative, e la distribuzione del materiale su tali sezioni, determinando una diversa rigidità con rilevanti ripercussioni sullo stato deformativo. Si è quindi optato per il mantenimento di tutti i raccordi che fossero sopra la soglia degli 0,2 mm, in modo da influire il meno possibile sulla deformazione del pezzo.

Per la realizzazione della sede del debimetro lo stampo sfrutta un apposito elemento, montato su slitte che consentono lo scorrimento di tale componente in fase di apertura della stampo (elemento di colore verde nella figura 18). Questo è necessario per garantire la corretta estraibilità del pezzo al termine del processo di stampaggio. Lo stesso accorgimento viene utilizzato per la realizzazione della parte diametralmente opposta, essendo presenti diverse indicazioni in rilievo sulla superficie del pezzo, come la direzione di montaggio. Tali elementi costituiscono una zona dello stampo che presenta delle dimensioni inferiori rispetto a quelle del resto dello stampo. Sono quindi state fatte alcune valutazioni per capire quali fossero le dimensioni più opportune e il volume con cui realizzare il modello dello stampo all'interno del software.

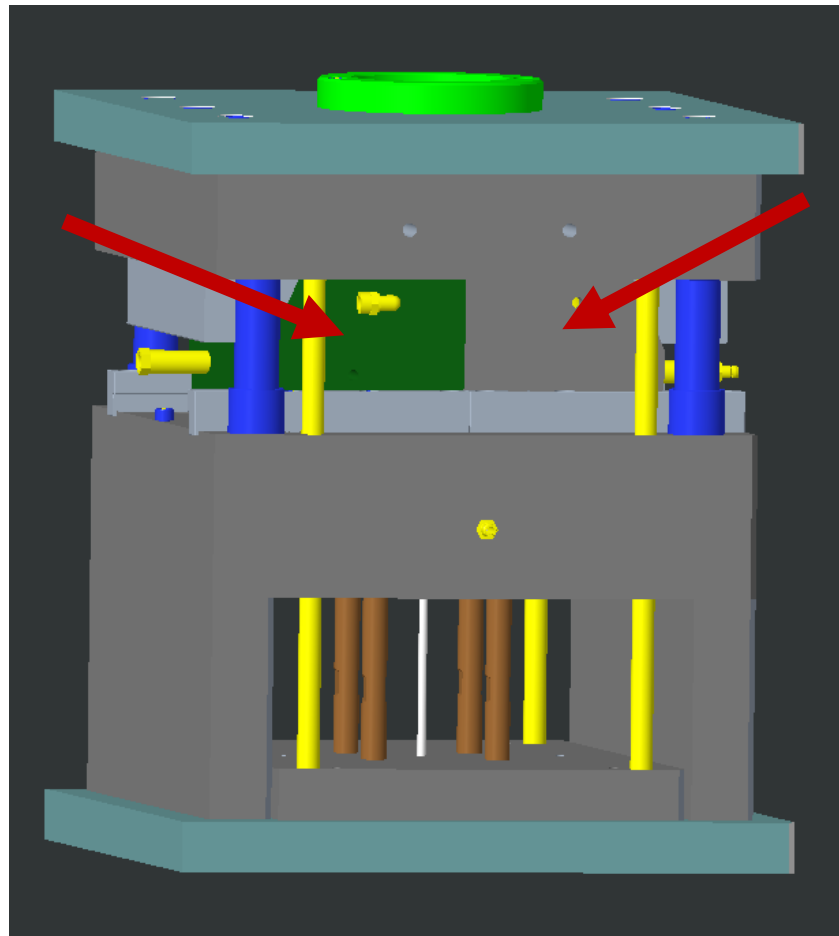


Figura 18. Modello CAD dello stampo. Le frecce indicano gli elementi montati su slitte nominate nel testo

Dall'esperienza aziendale maturata con l'uso del software Moldex3D, si è visto che non c'è una differenza apprezzabile nel riprodurre fedelmente le dimensioni e la sagoma esterne dello stampo, ma come la sua modellazione con un semplice prisma restituisca risultati assolutamente paragonabili (la valutazione è stata fatta modellando le zone più strette tramite degli inserti e attribuendo a questi aria come materiale). Quindi si è deciso di considerare lo stampo secondo tale configurazione semplificata. Le sue dimensioni sono dettate dalle sezioni di ingresso e uscita del sistema di raffreddamento come richiesto dal software, che vuole tali superfici sul bordo dello stampo.

2.2 Considerazioni sulla dimensione degli elementi

Il meshatore utilizzato è il solid mesher di Moldex3D. Questo richiede solo di gestire il numero dei nodi della mesh, o la loro distanza, in corrispondenza di quegli spigoli del modello in corrispondenza dei quali si voglia un certo numero di punti di discretizzazione, più alcuni parametri della mesh, come la dimensione degli elementi o la loro crescita lungo una certa direzione. Si è quindi proceduto a generare una mesh di superficie per la cavità, per il runner e per il sistema di raffreddamento. Da questa discretizzazione superficiale viene generata la mesh di volume e quella dello stampo. Il controllo dell'azione di meshatura è stato realizzato tramite la scelta del numero dei punti di discretizzazione di alcune feature edge della parte. In particolare si è posta molta attenzione nel fare in modo che i raccordi di piccole dimensioni del pezzo venissero discretizzati con almeno due elementi di superficie, per fare in modo che mantenessero delle caratteristiche più vicine a quelle di un raccordo che a quelle di uno smusso. Questo si è reso necessario per l'elevata importanza che anche raccordi di piccole dimensioni hanno sulla deformata del pezzo, di cui si è parlato nel paragrafo precedente. Si è così ottenuta una mesh molto "fine" in prossimità dei diversi raccordi che il pezzo presenta. Per evitare di avere una discretizzazione con un numero di elementi eccessivo, si è semplicemente controllato il numero dei punti di insemminazione delle curve generatrici delle superfici cilindriche del pezzo, ricorrendo ad una crescita lineare o quadratica della distanza tra i punti di discretizzazioni lungo tali segmenti. Va sottolineato che anche agendo in questo modo il numero degli elementi della mesh cresce molto rapidamente.

Per la fase preliminare dello studio, volta ad individuare la discretizzazione più adatta al raggiungimento degli obiettivi, sono state realizzate quattro mesh differenti, andando sempre a raddoppiare (indicativamente) il numero degli elementi di volume totali. Per contenere il numero degli elementi nelle prime due discretizzazioni (quelle più grossolane) non è sempre stato possibile mantenere il criterio di meshatura appena descritto per i raccordi più piccoli. Per questi modelli ci si aspetta quindi un'influenza maggiore della mesh sulla deformata finale, essendo i raccordi più piccoli modellati come smussi (viene utilizzato un solo elemento di superficie). Per quanto riguarda il

numero dei layer di elementi prismatici in prossimità della superficie della cavità e del runner sono stati mantenuti sempre i valori di default proposti dal software.

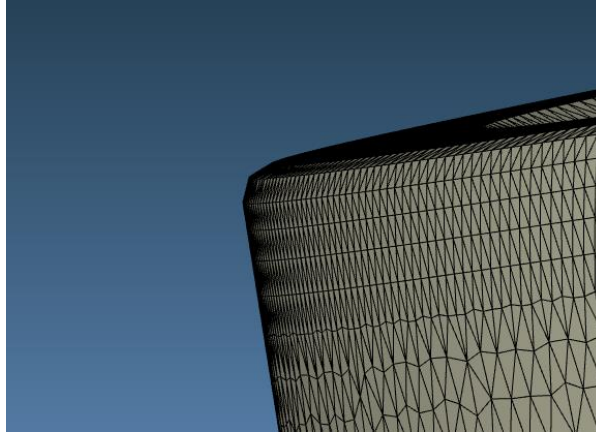


Figura 19. Discretizzazione per raccordi di piccolo raggio

Un altro aspetto al quale si è posta particolare attenzione è la mesh del sistema di raffreddamento. Si è voluto cercare di capire se la discretizzazione dello strato limite del fluido refrigerante, all'interno dei condotti di raffreddamento, con un numero più o meno elevato di elementi, avesse un'influenza rilevante sulle prestazioni del raffreddamento. Si è quindi partiti dalla meshatura proposta di base dal software per le parti considerate come cooling channel, che prevede la discretizzazione dello strato limite con tre layer di elementi prismatici e quattro elementi per il volume interno del condotto.

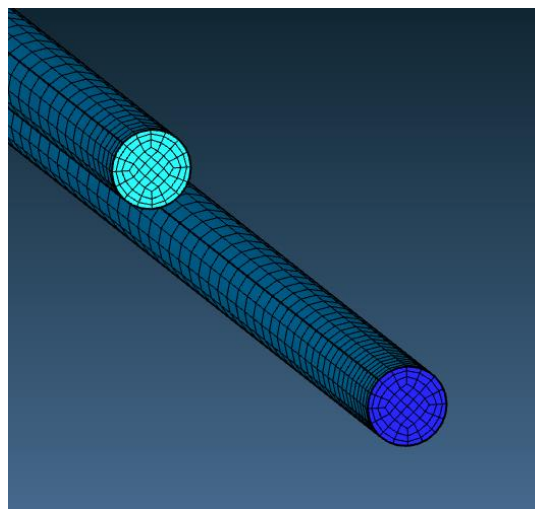


Figura 20. Discretizzazione di default di Moldex3D per i volumi identificati come cooling channel

Questa discretizzazione è stata mantenuta per entrambe le simulazioni con un numero intermedio di elementi, mentre per la mesh più “fine” e per quella più “grossolana” si è provato rispettivamente ad aumentare a quattro e a ridurre a due il numero degli elementi destinati alla rappresentazione dello strato limite.

Per la fontana centrale si è utilizzato un valore crescente del numero degli elementi della discretizzazione nelle varie mesh realizzate, controllando il numero dei seeding point sugli spigoli della fontana. Essa infatti non è stata modellata tramite l'apposito strumento presente in Moldex3D, ma copiando esattamente la sua geometria presente nello stampo. Questo è stato fatto per poter confrontare i risultati delle prestazioni del sistema di raffreddamento accuratamente modellato, con quelle precedentemente ottenute dall'azienda con la modellazione proposta dal software. Per quanto riguarda la discretizzazione dello strato limite, si sono mantenuti gli elementi prismatici impostati di base dal solid mesher di Moldex3D.

2.3 Scelta della mesh

Come detto in precedenza, sono state quindi realizzate quattro mesh, secondo i criteri illustrati, ottenendo le discretizzazioni caratterizzate dai seguenti numeri di elementi per (l'insieme di parte, runner, raffreddamento e stampo):

- Mesh 1: 829140 elementi
- Mesh 2: 1590440 elementi
- Mesh 3: 4049484 elementi
- Mesh 4: 9552816 elementi

Con ognuna di queste discretizzazioni è stata realizzata una simulazione con i medesimi parametri di processo abitualmente utilizzati per la realizzazione del pezzo.

Per confrontare i risultati ottenuti, è stato necessario scegliere un parametro rappresentativo della deformazione del componente. Si è optato per quattro valori della tolleranza di circolarità, presi in corrispondenza di altrettante circonferenze. E' stata utilizzata questa caratteristica dimensionale perché risulta essere quella più agevole nella misurazione, per la strumentazione disponibile in azienda, e che quindi consentiva

un facile confronto dei risultati con lo storico dei dati del controllo qualità, per una validazione di ciò che si è calcolato in fase di simulazione.

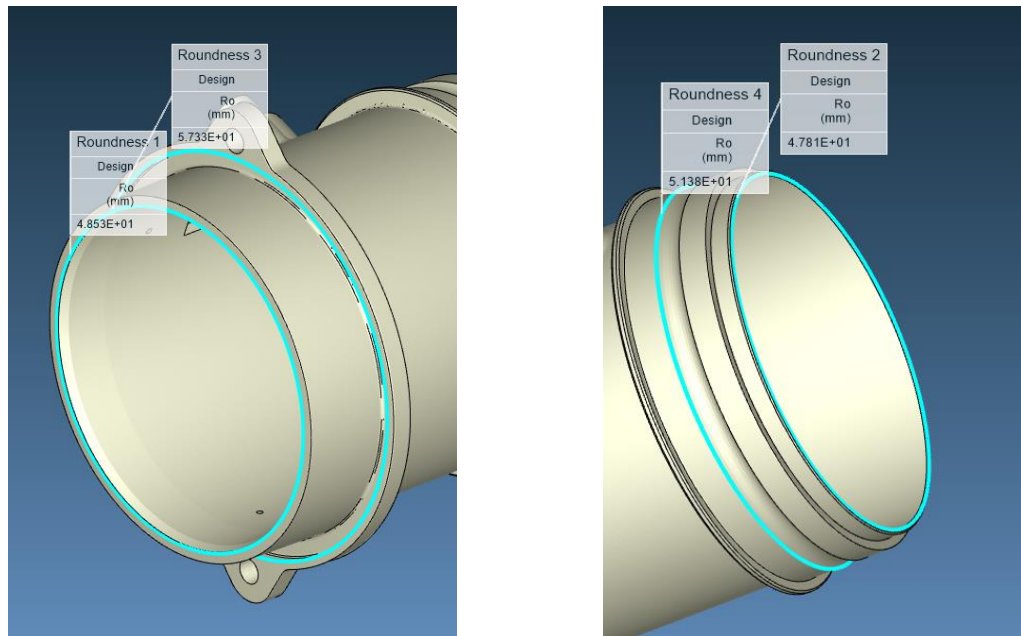


Figura 21. Circonferenze scelte per il confronto

Si vuole individuare quale sia la mesh (tra quelle realizzate) con il numero più basso di elementi che evidenzi un raggiungimento della condizione di convergenza sui valori di tolleranza calcolati, segno che la deformata del componente risulta non essere più sensibile ad un aumento del numero degli elementi della discretizzazione e che la deformata risulta funzione solo dei parametri del processo. I valori di circolarità ottenuti su ciascuna delle quattro circonferenze illustrate in figura 19, al variare della mesh secondo un numero crescente di elementi, sono riassunti nei seguenti grafici.

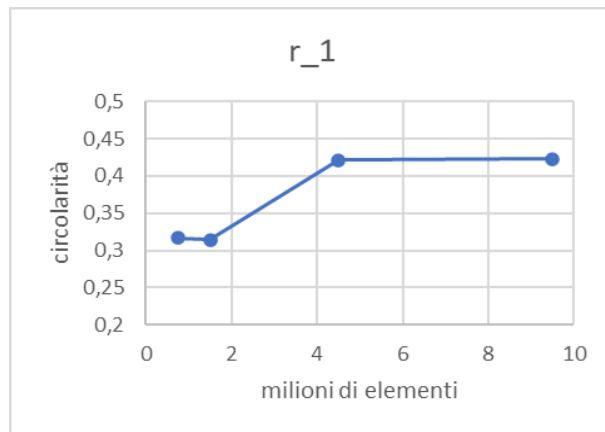


Figura 22. Andamento della roundness della circonferenza 1 nel passaggio dalla mesh 1 alla mesh 4

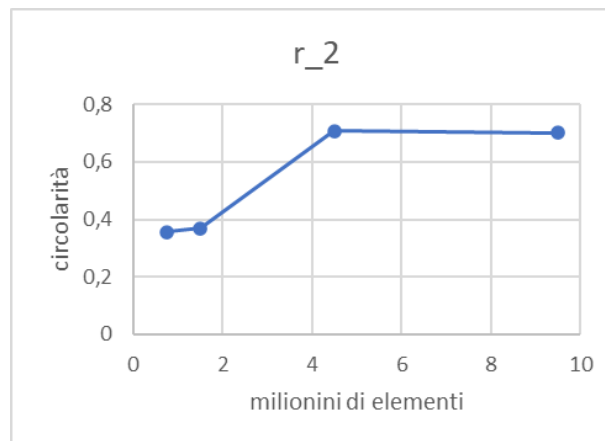


Figura 23. Andamento della roundness della circonferenza 2 nel passaggio dalla mesh 1 alla mesh 4

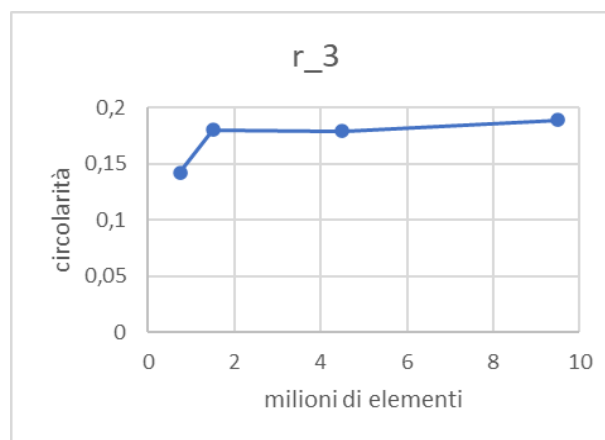


Figura 24. Andamento della roundness della circonferenza 3 nel passaggio dalla mesh 1 alla mesh 4

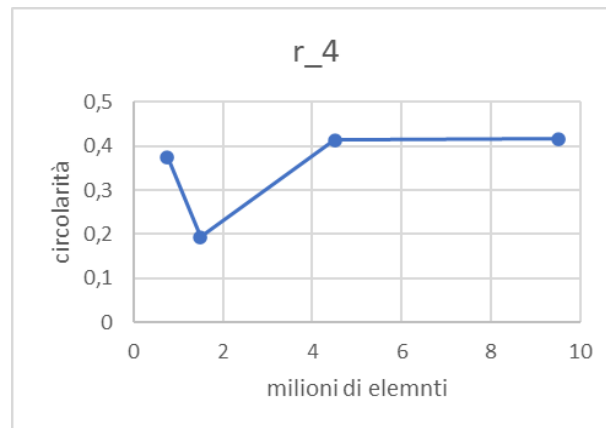


Figura 25. Andamento della roundness della circonferenza 4 nel passaggio dalla mesh 1 alla mesh 4

Dai risultati ottenuti si può notare come l'ampiezza del campo di tolleranza cresca al crescere del numero degli elementi della mesh. Inoltre si è notato come, all'aumentare del numero degli elementi di discretizzazione, sia possibile cogliere differenze significative (ai fini della deformazione del pezzo) nei valori della temperatura all'interno della cavità. In particolare proprio questa variazione nella distribuzione di tale parametro è la causa del punto di minimo del grafico riguardante la circolarità, in corrispondenza della circonferenza 4. Utilizzando la mesh 2 si ha infatti una variazione della distribuzione della temperatura, lungo tale circonferenza, che in alcuni punti è nell'ordine di qualche grado. L'esperienza maturata dall'azienda ha evidenziato come anche variazioni così piccole di questo parametro possano influire significativamente sulla deformazione del pezzo. Ciò che comunque è evidente dai grafici riportati è il trend in crescita del valore della roundness in corrispondenza di ciascuna delle circonferenze considerate. Questo andamento va ad assestarsi, generando delle differenze non significative tra i risultati ottenuti con le mesh 3 e 4. Inoltre i valori della tolleranza risultano in linea con quelli riscontrati dal controllo qualità effettuato sul pezzo. È stata quindi scelta la mesh numero 3 come discretizzazione per la realizzazione del processo di DOE, tenendo sempre in considerazione che tale discretizzazione risulta assolutamente abbondante per l'individuazione della deformata del pezzo e della correlazione della simulazione con la realtà qualora il fine fosse l'analisi della realizzazione del prodotto finito, ma è utile per lo studio in questione.

2.4 Design Of Experiments

Scelta la mesh più appropriata tra quelle realizzate, sono stati variati i parametri di processo scelti alla ricerca della loro influenza sullo stato di deformazione del prodotto. Come precedentemente accennato, le variabili che sono state prese in esame sono la velocità di iniezione del materiale e la pressione della fase di mantenimento. Nell'agire su tali parametri sono state seguite delle considerazioni volte al raggiungimento dell'obiettivo di riduzione della deformazione e di uniformità del ritiro. In particolare la pressione di packing è stata modificata sia aumentando sia riducendo il valore normalmente usato nel processo. Questa scelta è stata fatta per valutare l'efficacia con cui si possa influire sul ritiro volumetrico del materiale, variando l'apporto del materiale compensativo durante la fase di packing, per garantire una minore distorsione della geometria finale rispetto a quella della cavità. Infatti, il ritiro del materiale è una delle principali cause della deformazione del pezzo nella sua parte opposta alla flangia.

Per la velocità di iniezione si è notato di avere a disposizione la possibilità di realizzare un aumento consistente, poiché il grafico della sprue pressure mostra come, nel processo abitualmente realizzato, non venga mai raggiunta la pressione limite durante la fase di iniezione.

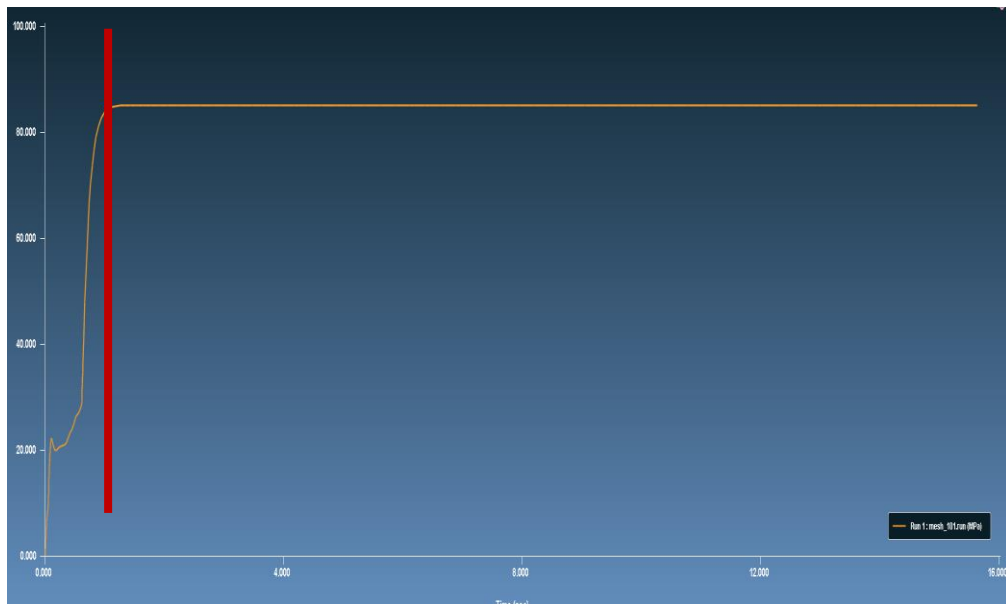


Figura 26. Curva della sprue pressione in funzione del tempo. L'istate finale rappresentato è il termine della fase di mantenimento. La linea rossa indica la fine della fase di iniezione. I valori di pressione durante tale fase si mantengono notevolmente più bassi rispetto al valore della pressione di packing

Anzi, la pressione più alta si raggiunge durante la fase di mantenimento. Quindi questo parametro non viene mai limitato durante il riempimento e rimane distante da valori critici. Sarebbe quindi possibile realizzare un'iniezione molto più rapida che risulterebbe teoricamente vantaggiosa, poiché consentirebbe un riempimento della cavità più rapido e un tempo di raffreddamento effettivo più uniforme in tutti i punti della cavità. Si è quindi scelto di procedere all'aumento progressivo anche di questo parametro. I valori impostati per le due variabili sono riassunti nella seguente tabella.

	Standard	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4
Velocità Iniezione (mm/s)	80	100	120	140	160
Pressione Mantenimento (MPa)	85	42,5	63,75	106,25	127,5

Tabella 2. Valori dei parametri in esame per il processo standard e per ciascuno dei quattro livelli utilizzati per l'impostazione dell'analisi DOE.

In particolare sono stati utilizzati quattro valori per ciascuna delle variabili scelte e lo studio è stato svolto tramite un approccio Design Of Experiments, sfruttando il

modulo DOE messo a disposizione da Moldex3D. Si è quindi realizzata un'analisi su quattro livelli per due parametri, sfruttando il volumetric shrinkage uniforme (calcolato secondo gli effetti termici in ogni punto della discretizzazione) come parametro per la valutazione della qualità dei risultati.

#	Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
1	Max. Flow Rate Profile Value [%]	30.3	36.36	42.42	48.48	
2	Max. Packing Pressure Profile Value [%]	24.28	36.43	60.71	72.86	

#	Quality Factor	Goal	Weighting	%	Delete
1	Packing_Volumetric Shrinkage [%]	Uniform	1	100.0%	
2	Add Quality Factor				

Figura 27. Finestra per l'impostazione dei parametri del DOE di Moldex3D. Come valori dei parametri sono richiesti i loro percentuali rispetto al massimale della pressa, non quelli assoluti riportati in Tabella 1

Il software ha quindi realizzato sedici simulazioni, rappresentative di tutte le possibili combinazioni dei parametri variati. Esso segnala inoltre quale sia la combinazione che ha dato i risultati migliori, che è poi stata presa in considerazione per effettuare i confronti con la soluzione del processo standard. È stato inoltre possibile valutare le curve che legano ogni singolo parametro considerato con il parametro di qualità scelto, per individuare delle tendenze di interesse.

Analizzando i risultati ottenuti, e valutando quale fosse la migliore combinazione ottenuta, si è deciso di procedere con tre simulazioni ulteriori, volte ad approfondire l'effetto dell'aumento della pressione nella fase di mantenimento. È stato infatti evidenziato come sia svantaggioso aumentare la velocità di iniezione, mentre come si abbiano dei benefici da un incremento della pressione di packing (i risultati verranno dettagliatamente descritti nel capitolo successivo). Questa variabile è stata quindi ulteriormente aumentata in tre simulazioni distinte, passando all'82%, al 91% e

infine al 100% della pressione di mantenimento massima della pressa, pari a 175 MPa. Per la velocità si è invece tornati al valore del processo standard di 80 mm/s.

	Pressione Mantenimento (Mpa)
Simulazione 1	143,33
Simulazione 2	159,17
Simulazione 3	175

Tabella 3. Valori assoluti della pressione di mantenimento per le ultime tre simulazioni usate come approfondimento dei risultati di tale parametro

L'aumento dei valori di pressione è stato dettato anche dal fatto che la curva ottenuta dall'analisi con il modulo DOE, che pone in relazione il parametro di qualità scelto con il parametro considerato, evidenzia un andamento decrescente (minore ritiro uniforme dei punti, quindi riduzione degli effetti termici sulla deformazione) senza però arrivare ad un punto di minimo. Questo sarebbe infatti di particolare interesse per capire oltre quali valori di pressione non sia più conveniente spingersi. Si è cercato quindi di verificare se tale punto di minima deformazione fosse raggiunto prima del raggiungimento del limite massimo di pressione consentito dalla pressa. Per non eccedere con i tempi di calcolo richiesti si sono scelti tre valori crescenti fino al massimo valore ammissibile.

Sempre dall'analisi dei risultati si è deciso di procedere anche ad un'analisi dell'uniformità della deformazione, per verificare se la compensazione del ritiro ottenuta agendo sulla pressione di mantenimento avesse generato fenomeni di overpacking tali da compromettere l'uniformità degli spostamenti totali nei vari punti della discretizzazione. Si è quindi impostato un secondo calcolo DOE sugli stessi parametri del precedente, ma impostando come parametro di qualità per la deformata del pezzo la deformazione uniforme. Si otterrà quindi la configurazione delle variabili che restituisce la differenza minore tra gli spostamenti di entità massima e quelli minimi. I risultati ottenuti hanno consentito un'analisi critica dei vantaggi effettivi di una modifica del parametro di mantenimento rispetto al suo valore abituale.

DOE Method

Levels: 4 (2-5 or mixed level)

Control Factors: 2 (2-5)

Taguchi Array: L16(4⁵) - 16 Runs, 5 Factors with 4 Levels

Factors

#	Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
1	Max. Flow Rate Profile Value [%]	30.3	36.36	42.42	48.48	
2	Max. Packing Pressure Profile Value [%]	24.28	36.43	60.71	72.86	

#	Quality Factor	Goal	Weighting	%	Delete
1	Warpage_Total Displacement [mm]	Uniform	1	100.0%	
2	Add Quality Factor				

Figura 28. Finestra per il settaggio del secondo DOE con il nuovo fattore di qualità del risultato scelto

Capitolo 3: Risultati

In questo capitolo si vogliono illustrare i risultati ottenuti per tutti gli aspetti analizzati. Il primo paragrafo riguarda gli effetti della mesh sulle prestazioni calcolate del sistema di raffreddamento; il secondo paragrafo realizza un confronto tra una modellazione semplificata del sistema di raffreddamento e una maggiormente accurata, realizzata tramite la copia esatta delle superfici dello stampo per la fontana centrale; infine l'ultimo paragrafo illustra i risultati di una serie di simulazioni eseguite secondo un approccio Design Of Experiments e gli ulteriori approfondimenti che sono stati fatti sull'aumento della pressione di mantenimento.

3.1 Effetti della mesh sul raffreddamento

Si vuole procedere ad un confronto dei risultati per il solo sistema di raffreddamento, al variare delle quattro mesh considerate nella fase preliminare dello studio. Come già accennato, in fase di meshatura il software propone di discretizzare la zona riservata allo strato limite del fluido refrigerante, all'interno dei cooling channel, con un numero di elementi consigliato (tre layer di elementi prismatici). Inoltre, in fase di modellazione, Moldex3D mette a disposizione la possibilità di realizzare rapidamente componenti del sistema di raffreddamento, come fontane o diaframmi, tramite il controllo di pochi parametri. In questa analisi però si è riprodotta la fontana centrale in modo fedele a come essa è stata realizzata nello stampo. Quindi la sua geometria risulta più complessa ed è ragionevole pensare che questo possa avere un impatto sul campo di moto del fluido refrigerante. Il confronto tra una modellazione accurata delle caratteristiche del sistema di raffreddamento, con una semplificata, verrà realizzato nel paragrafo successivo. Si vuole qui valutare se vi sia un reale vantaggio nel discostarsi dal numero di elementi consigliati dal software per la risoluzione dello strato limite dei cooling channel, oltre che nell'aumentare il numero degli elementi di discretizzazione della fontana, vista la maggiore complessità della geometria utilizzata. Qualora una discretizzazione più fine della mesh consentisse di cogliere strutture diverse del campo di moto del fluido, questo potrebbe avere delle ripercussioni sul valore del coefficiente

di scambio termico e quindi sul valore del flusso termico scambiato con il refrigerante. Se queste differenze fossero in grado di comportare una diversa distribuzione della temperatura, sarebbero causa di una diversa deformata del pezzo, dovuta però alle condizioni della mesh e non a fenomeni legati al processo. Quindi questa analisi risulta di interesse per la valutazione del raggiungimento degli obiettivi dell'indagine in oggetto.

I risultati delle quattro simulazioni sulle varie mesh hanno mostrato come un incremento del numero di elementi di discretizzazione dello strato limite (si sono impiegati da 2 a 4 elementi, con le mesh 2 e 3 mantenute al valore di default del software pari a 3) non porti ad una differenza consistente del numero di Reynolds lungo i cooling channel. Mentre una mesh sempre più "fine" per la fontana centrale ha evidenziato differenze del numero di Reynolds, soprattutto in quelle regioni in cui il flusso del refrigerante risulta essere fortemente perturbato dalla geometria. In particolare le zone più critiche sono quelle in cui si verificano fenomeni di ristagno dell'acqua refrigerante (nella parte superiore e in corrispondenza delle zone di ingresso e uscita della fontana) o lungo gli spigoli dei condotti a spirale. In queste zone il numero di Reynolds varia anche di ordini di grandezza al variare della mesh. Inoltre, all'aumentare del numero degli elementi, le zone a bassissimo numero di Reynolds, che si creano in corrispondenza dei quattro lati della fontana, diventano sempre più ristrette, transendo ad un valore più alto del parametro considerato più rapidamente. Quindi un aumento della "finezza" della discretizzazione del sistema di raffreddamento ha un impatto su quelli che sono i valori minimi calcolati del numero di Reynolds e sull'estensione delle zone soggette ad un basso valore di tale parametro per la fontana centrale, mentre l'impiego di un numero differente di elementi per lo strato limite dei cooling channel non ha un'influenza rilevante sui valori del numero di Reynolds. I valori massimi si registrano in corrispondenza delle curve a gomito, quindi non subiscono variazioni significative di valore e posizione con una variazione della mesh, poiché la configurazione dei condotti è sempre la medesima.

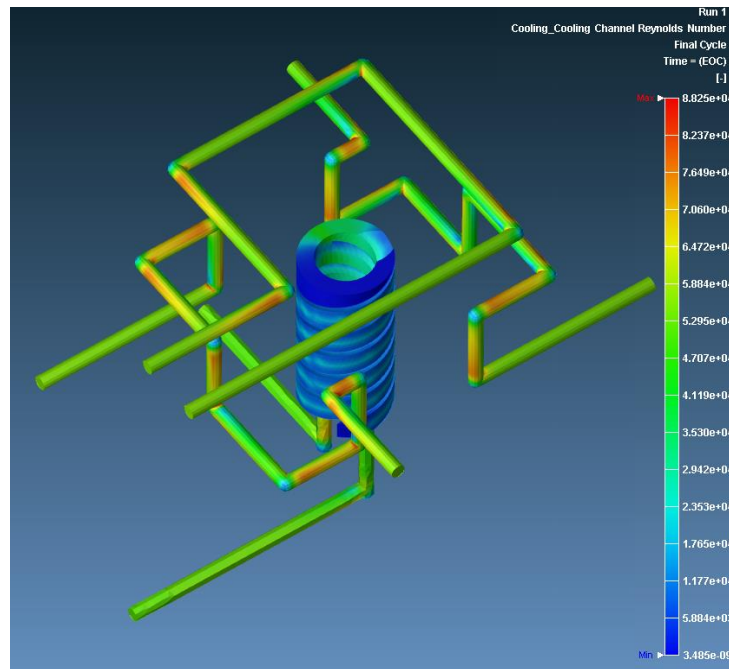


Figura 29. Numero di Reynolds per la mesh 1

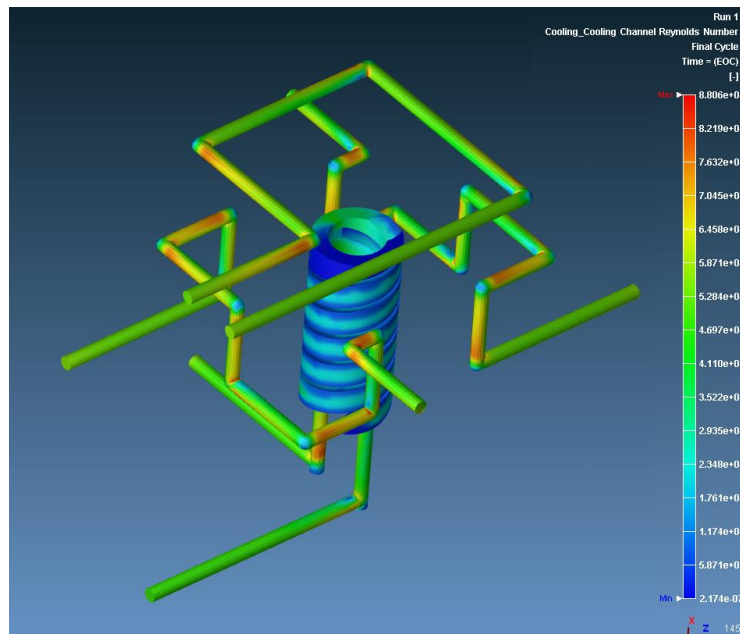


Figura 30. Numero di Reynolds per la mesh 2

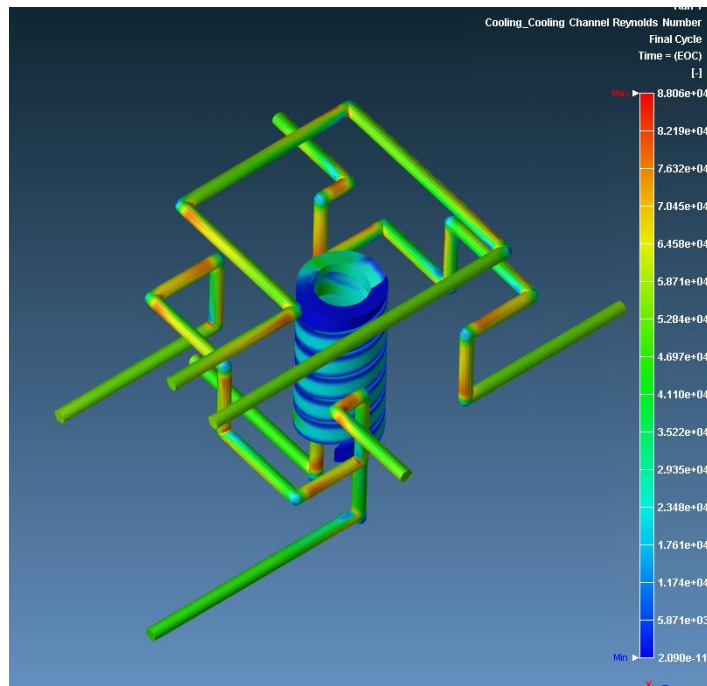


Figura 31. Numero di Reynolds per la mesh 3

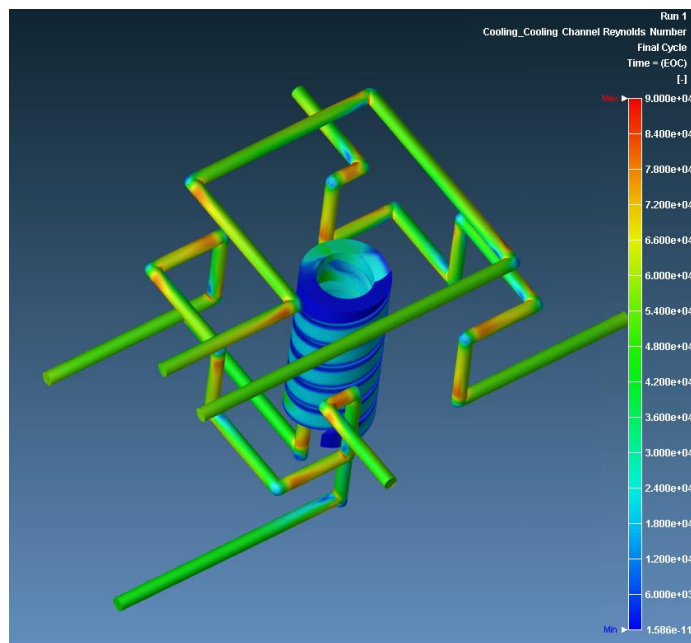


Figura 32. Numero di Reynolds per la mesh 4

Osservando la cooling efficiency delle varie parti del raffreddamento (parametro che stabilisce la percentuale di energia termica scambiata da ogni componente dell'impianto di raffreddamento) è evidente come sia la fontana centrale a compiere il ruolo più importante nel raffreddamento del materiale all'interno della cavità.

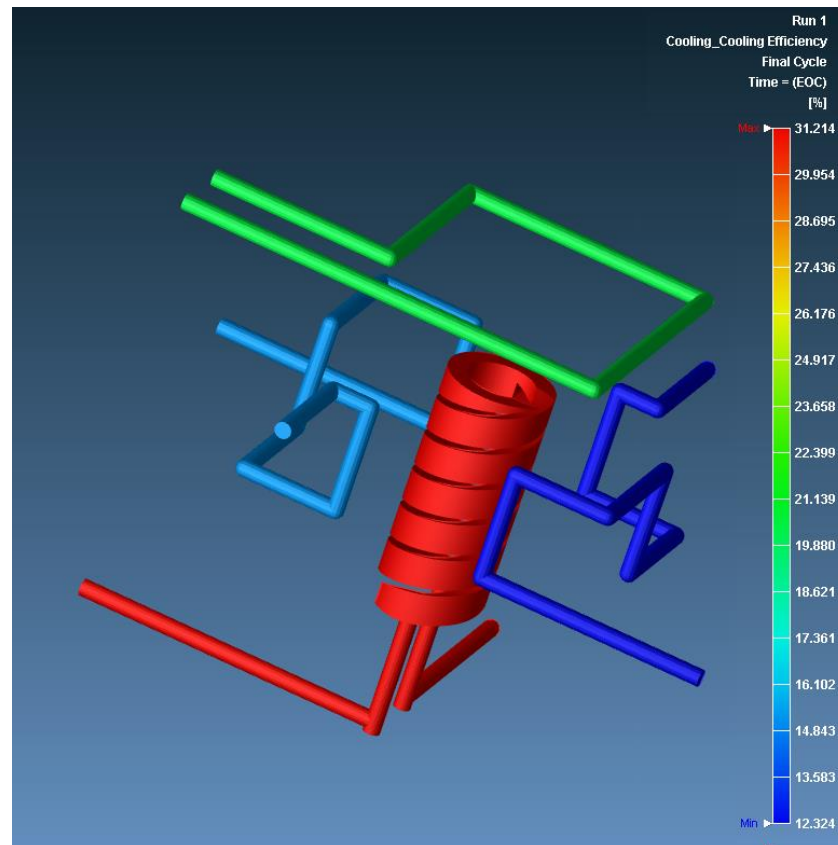


Figura 33. Cooling Efficiency delle varie parti del sistema di raffreddamento

Si è voluto quindi verificare se le differenze riscontrate al variare della mesh a livello di numero di Reynolds, avessero una ripercussione significativa sul flusso termico scambiato dalla fontana. Non ci si attendono invece grandi differenze per quel che riguarda i cooling channel, vista la ridotta sensibilità che questi hanno mostrato alla variazione della mesh per quel che riguarda le caratteristiche del loro flusso. Essi inoltre hanno un impatto molto meno significativo sul raffreddamento, come mostra la distribuzione della cooling efficiency. Visualizzando il flusso termico, scambiato dalla parte e dal sistema di raffreddamento, e scegliendo per ciascuna simulazione lo stesso

valore massimo e minimo, è stato possibile realizzare un confronto tra i risultati ottenuti con le varie mesh.

Le differenze, in termini di flusso termico scambiato, tra le varie simulazioni sono molto ridotte e si concentrano nella zona alta della fontana, dove il flusso ristagna. In queste zone la bassa velocità dell'acqua fa sì che il refrigerante raggiunga un'elevata temperatura e vada addirittura a scaldare la cavità (flusso termico di segno negativo). Quindi queste zone sono poco significative per lo studio del raffreddamento e risultano anche essere di ridotta estensione. In tutte le altre regioni i risultati delle quattro simulazioni sono assolutamente paragonabili in termini di flusso termico scambiato. Non sembra quindi esserci alcun vantaggio nel raffinare la discretizzazione della fontana centrale rispetto a quella usata per la mesh 1, così come non c'è vantaggio nell'utilizzare un numero di elementi per lo strato limite dei cooling channel diverso da quello consigliato dal software.

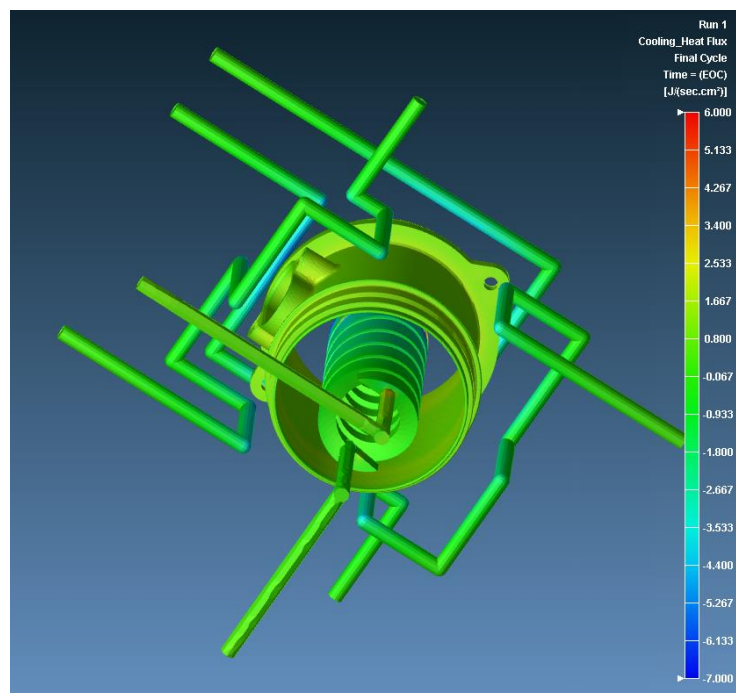


Figura 34. Flusso termico per la mesh 1

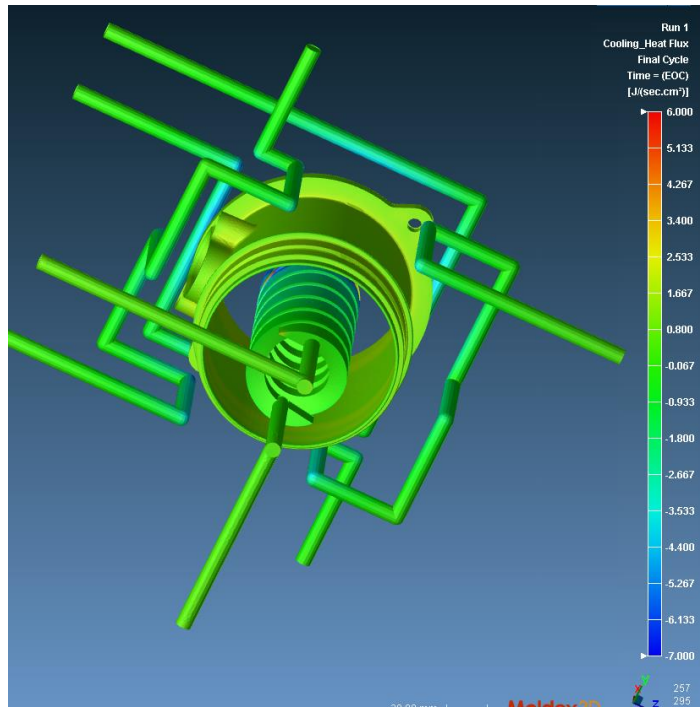


Figura 35. Flusso termico per la mesh 2

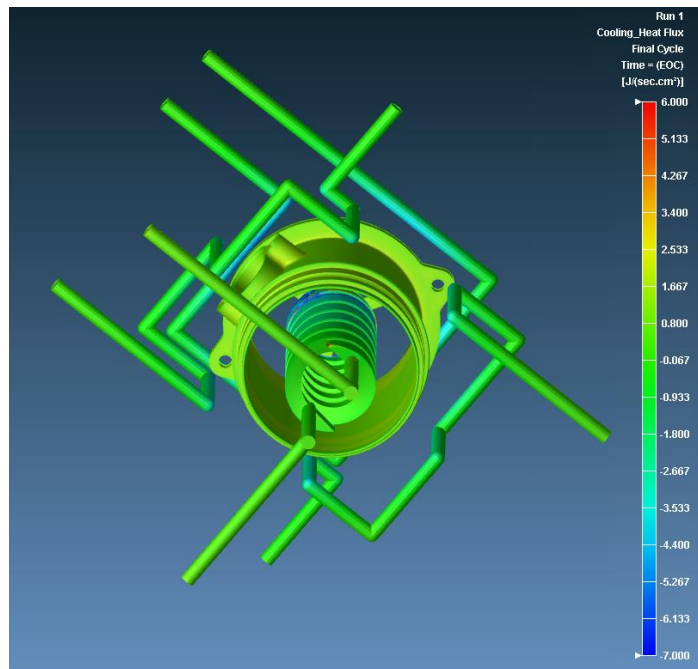


Figura 36. Flusso termico per la mesh 3

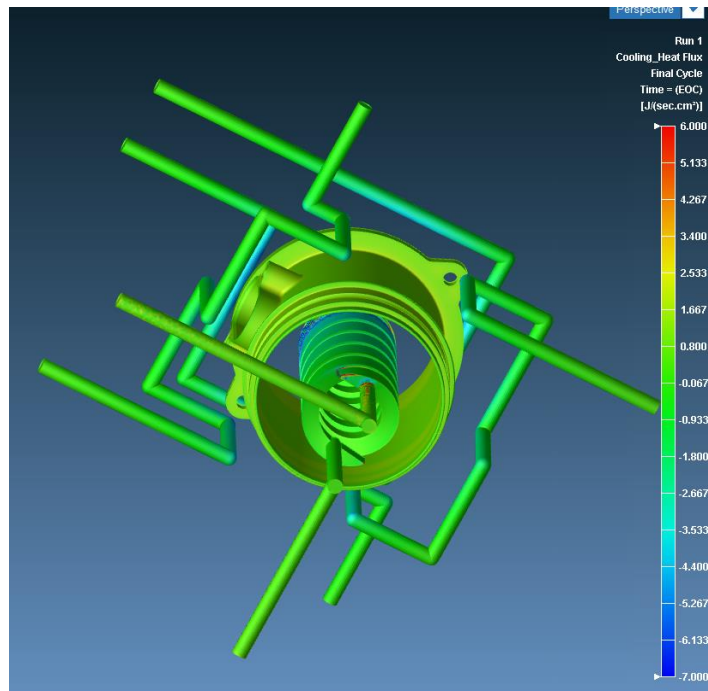


Figura 37. Flusso termico per la mesh 4

Dall'analisi appena illustrata si può quindi concludere che, pur realizzando una modellazione geometricamente più complessa della fontana centrale, non sia necessario realizzare una discretizzazione del raffreddamento particolarmente raffinata di tale elemento, poiché non si ottengono differenze significative per il calore scambiato. Inoltre il fatto che non siano state trovate differenze conferma che le differenze in termini di deformata, che sono state analizzate nei paragrafi precedenti, sono imputabili unicamente alla diversa discretizzazione della cavità stessa e non a diverse prestazioni delle discretizzazioni del raffreddamento.

3.2 Confronto tra modellazioni diverse del raffreddamento

Si è approfittato dell'opportunità di realizzare un modello che prevedesse una rappresentazione del sistema di raffreddamento fedele a quella realmente presente all'interno dello stampo, anche per realizzare un confronto con un modello semplificato dello stesso. Nelle simulazioni precedentemente realizzate in azienda, per gli studi necessari alla definizione delle caratteristiche del processo standard, si era fatto ricorso

ad una modellazione semplificata della fontana centrale. Moldex3D mette infatti a disposizione la possibilità di modellare parti complesse del raffreddamento in forma semplificata, tramite la gestione di pochi parametri. Tale modellazione semplificata restituisce dei risultati comunque attendibili per quanto riguarda la deformazione del pezzo, come dimostrato dalla validazione sperimentale del modello effettuata, tramite i rilievi del controllo qualità. Si vuole quindi verificare se, per uno studio più approfondito degli aspetti che portano ad una variazione della deformazione, una rappresentazione più fedele alla realtà del raffreddamento possa avere delle conseguenze significative. I risultati che vengono ora illustrati hanno delle limitazioni, che riguardano altre differenze tra il modello realizzato in azienda e quello preso in considerazione per questa indagine, oltre a quelle dell'impianto di raffreddamento. In particolare le dimensioni scelte per lo stampo sono diverse, generando superfici differenti coinvolte nello scambio termico con l'ambiente. Inoltre le due mesh realizzate presentano un numero di elementi molto distante. La discretizzazione utilizzata per lo studio del processo ha un numero di elementi che è circa la metà di quello utilizzato in questo studio e, con circa 2 milioni di elementi totali, si pone ancora in una situazione di influenza della mesh sui valori della deformata (si vedano i grafici riportati nel capitolo 2). Quindi non sarebbe attendibile un confronto diretto tra le deformate per cercare una relazione con le differenze del sistema di raffreddamento, poiché i modelli hanno differenze sostanziali in diversi aspetti rilevanti per un'analisi di questo tipo.

La deformata ottenuta dal modello preesistente a questo studio è comunque stata considerata per validare quella ottenuta con il nuovo modello realizzato, che si è dimostrato coerente con ciò che era stato precedentemente calcolato.

Quello che si può notare dalla differente ricostruzione dell'impianto di raffreddamento è il differente peso, in termini di percentuale di energia termica sottratta alla cavità, che una fontana realizzata fedelmente ha rispetto a quella modellata in modo semplificato.

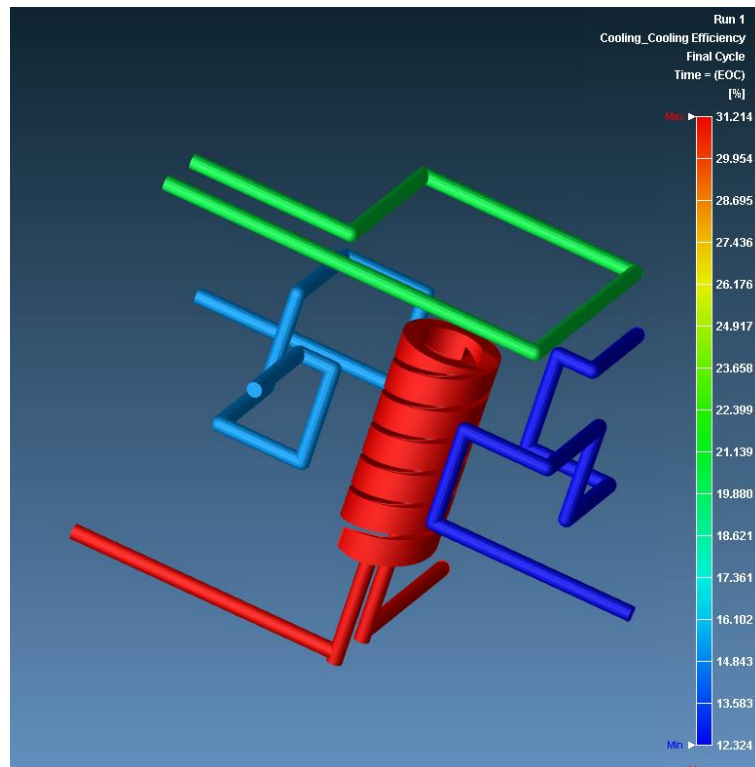


Figura 38. Cooling Efficiency per il sistema di raffreddamento modellato secondo la sua geometria all'interno dello stampo

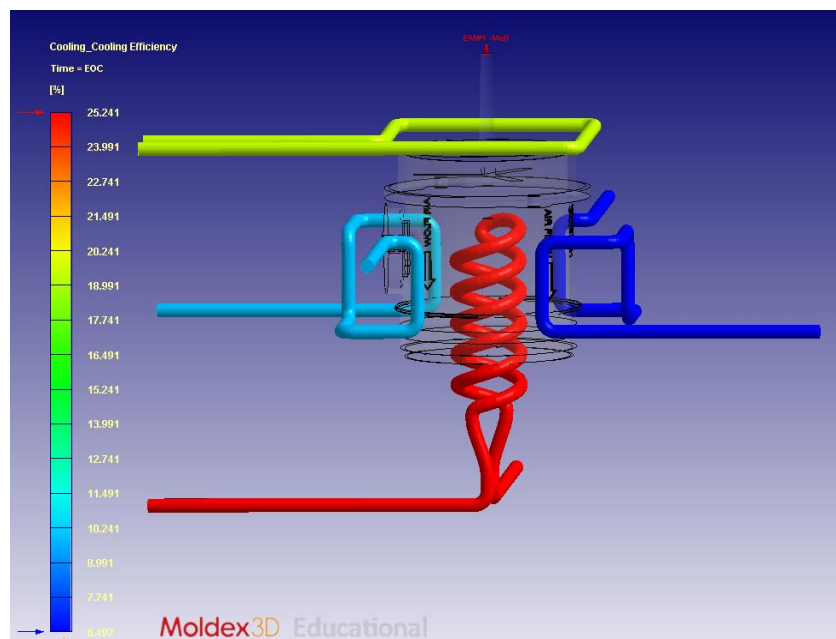


Figura 39. Cooling Efficiency restituita da una modellazione semplificata del sistema di raffreddamento, utilizzando direttamente Moldex3D

Le seguenti tabelle riassumono i valori percentuali di energia termica asportata da ciascuno dei rami del raffreddamento per i due modelli considerati. La differenza nella percentuale totale di energia, asportata dalla totalità dei sistemi di raffreddamento, è diversa per via delle citate differenti dimensioni dello stampo, che contribuisce quindi in percentuali diverse allo smaltimento del calore della cavità. In particolare il modello realizzato per questo studio ha una percentuale totale a carico del sistema di raffreddamento maggiore, perché le dimensioni utilizzate per lo stampo sono minori, comportando una minore superficie dello stesso coinvolta nello scambio termico convettivo con l'ambiente circostante e quindi una minore quantità di energia sottratta alla cavità. Il raffreddamento è quindi in misura maggiore realizzata dal fluido di raffreddamento.

RAMO SUPERIORE	20%
RAMO LATO SEDE SENSORE	16%
RAMO LATO CILINDRICO	12%
FONTANA	31%
TOTALE	79%

Tabella 4. Percentuali di calore scambiato dalle singole parti e in totale dal sistema di raffreddamento del modello utilizzato per questo studio (vedi figura 36)

RAMO SUPERIORE	20%
RAMO LATO SEDE SENSORE	10%
RAMO LATO CILINDRICO	7%
FONTANA	25%
TOTALE	79%

Tabella 5. Percentuali di calore scambiato dalle singole parti e in totale dal sistema di raffreddamento del modello realizzato dall'azienda (vedi figura 37)

La fontana centrale modellata accuratamente smaltisce il 31% del calore totale sottratto alla cavità. Nel modello studiato, il sistema di raffreddamento è responsabile complessivamente dello smaltimento del 79% del calore totale, il resto è a carico dello stampo. Quindi il peso della fontana, che si trova effettivamente nello stampo, sull'energia complessivamente scambiata dal refrigerante è del 39%.

Nella modellazione semplificata, invece, la fontana centrale sottrae il 25% del calore totale, a fronte di un 62% di calore complessivamente scambiato dall'impianto refrigerante (lo stampo più grande smaltisce più calore rispetto al modello precedente). Quindi la fontana centrale è responsabile ancora del 40% del calore complessivamente scambiato dal refrigerante.

Nel caso in esame, non c'è quindi un sostanziale vantaggio nella modellazione accurata del sistema di raffreddamento, poiché la sua realizzazione con i mezzi messi a disposizione dal software restituiscono un livello di approssimazione assolutamente paragonabile. Questo è dovuto al fatto che, con la geometria reale della fontana, si ottengono zone di ristagno del fluido refrigerante. Esse si scaldano durante le prime fase del processo, andando poi a scaldare la cavità nella fase di raffreddamento (come spiegato nel paragrafo precedente). Questo riduce quindi la quantità netta del flusso termico realizzato dalla fontana. Le zone di ristagno non sono invece presenti nel modello semplificato, che quindi non presenta zone in cui il refrigerante si trova a temperature tali da cedere calore alla cavità. Per la configurazione considerata, gli effetti si compensano e non c'è quindi un reale vantaggio in una modellazione accurata della fontana. L'indagine andrebbe estesa anche ad altri dispositivi, per una valutazione indipendente dai fenomeni legati alla specifica geometria considerata.

3.3 Influenza dei parametri di processo variati

Come descritto nel capitolo precedente, l'indagine ha preso in esame i parametri di velocità di iniezione e pressione di mantenimento, per capire quale fosse la loro influenza sulla deformazione del pezzo. L'obiettivo è quello di individuare una coppia di valori di tali variabili che minimizzi la deformazione, per valutare se sia possibile migliorare le prestazioni del processo standard, senza agire sulle caratteristiche dello stampo e sul materiale.

3.3.1 Studio del ritiro volumetrico uniforme

Per valutare l'evoluzione della deformata in funzione delle condizioni del processo, si è fatto ricorso al modulo DOE di Moldex3D, impostando il calcolo secondo

i valori delle variabili descritti in precedenza. Come fattore di qualità si è scelto di utilizzare il ritiro volumetrico uniforme. Si vuole infatti indagare quale sia l'influenza dei parametri di processo scelti sui fenomeni di ritiro termico che, come descritto nel capitolo 1, sono uno dei fattori responsabili della deformata della zona sottostante la sede del sensore. Si otterrà quindi la combinazione dei valori scelti, per i parametri considerati, che rende il ritiro volumetrico il più uniforme possibile. Questo consentirà di limitare il ritiro differenziale tra i lati opposti del pezzo e quindi la sua deformazione. In generale, la pressione del mantenimento varia la quantità di materiale apportato a compensazione del ritiro, riducendone gli effetti. Variare la velocità di iniezione, invece, significa influenzare la temperatura del materiale al termine del riempimento, oltre che determinare l'istante effettivo in cui ogni punto della cavità inizia la fase di packing e quindi il suo ritiro. Perciò le due variabili su cui si è agito hanno un effetto diretto sul ritiro del materiale.

Si è potuto ottenere una correlazione tra il fattore di qualità scelto e i parametri variati. Il risultato ottenuto è mostrato nella seguente figura. Si nota come l'influenza sul ritiro della velocità sia limitata, mentre la pressione di packing ha un effetto molto più marcato sul parametro di qualità del pezzo.

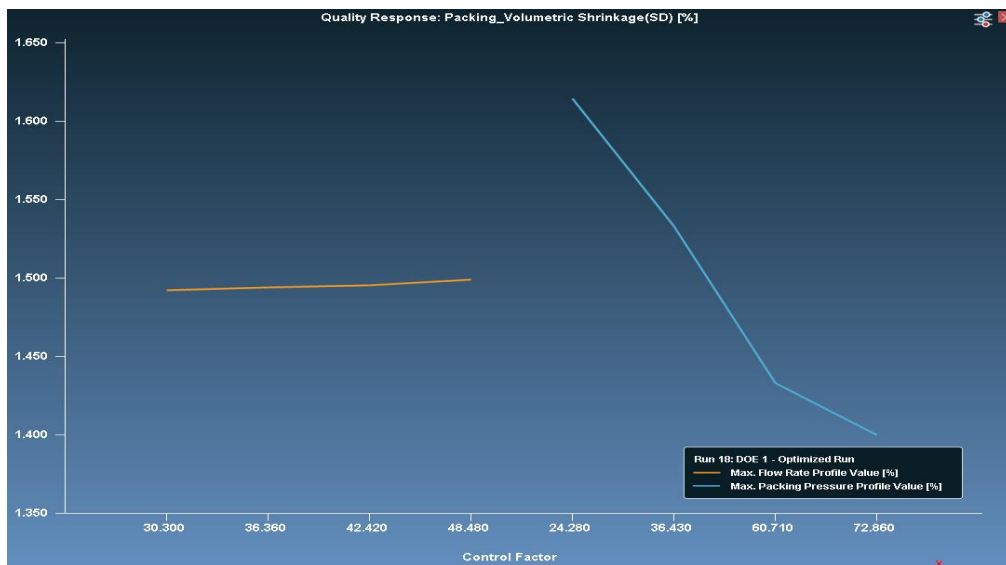


Figura 40. Grafico restituito da Moldex3D per l'analisi dei risultati del modulo DOE. La curva di sinistra esprime il legame tra la velocità di iniezione e il parametro di qualità scelto (ritiro volumetrico uniforme), mentre la curva di destra riguarda la relazione tra la pressione di mantenimento e il medesimo parametro. Valori minori del parametro indicano un minore ritiro uniforme, quindi la condizione desiderata.

Dal grafico ricavato risulta evidente come la condizione di minore ritiro volumetrico uniforme (che corrisponde alla condizione in cui si ha l'influenza minima sulla deformazione dei fenomeni termici) si ottiene per il valore minore della velocità di iniezione e per il valore massimo della pressione di mantenimento selezionati. Essendo però interessati alla minimizzazione della deformazione del prodotto, si è proceduto con un'analisi della deformata, confrontandola con quella ottenuta dal processo standard. Quello che emerge da questa fase è un sostanziale miglioramento delle condizioni geometriche del pezzo all'estremità opposta rispetto alla flangia, con una notevole riduzione degli spostamenti in fase di raffreddamento. Questo è dovuto alla migliore compensazione del ritiro della zona sottostante l'alloggiamento del sensore, con una conseguente diminuzione della differenza tra gli spostamenti con i punti diametralmente opposti. Si ottiene quindi una minore deviazione tra l'asse reale del pezzo e quella della sua geometria nominale.

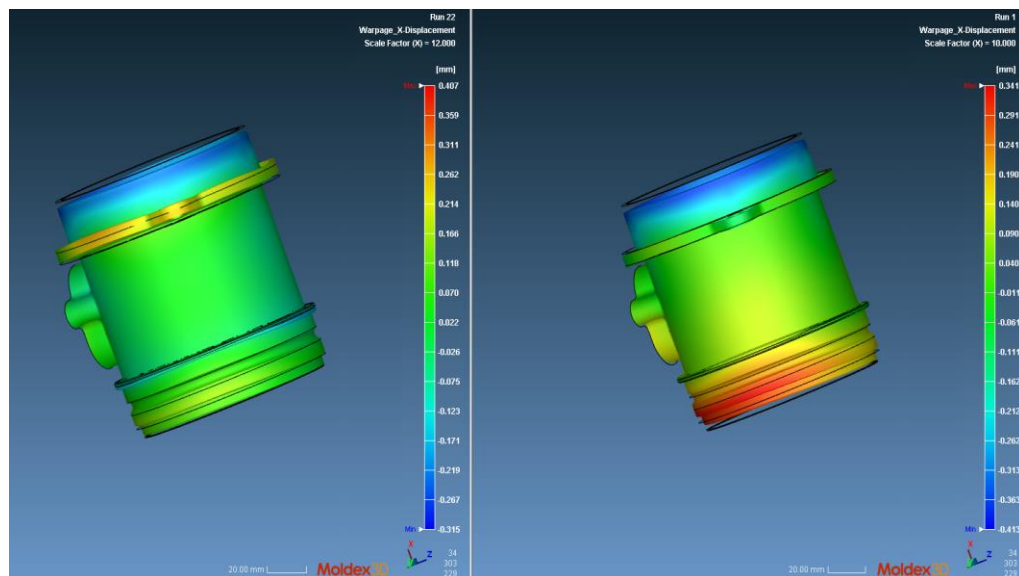


Figura 41. Spostamenti lungo la direzione X (asse del pezzo) del sistema di riferimento del software. A sinistra i risultati con la pressione di mantenimento al 72,9% del massimale della pressa, mentre a destra si riporta l'immagine relativa al processo standard. Si ha circa un dimezzamento dei valori di spostamento della regione più critica, accompagnata però da un aumento nella zona della flangia. Le deformate sono prese con lo stesso fattore moltiplicativo.

Il valore degli spostamenti nella direzione X del software (parallela all'asse del pezzo) risultano essere significativamente inferiori rispetto alle condizioni standard del

processo, confermando la riduzione degli effetti termici. Resta tuttavia l'effetto deformativo legato al flusso del materiale sotto alla sede debimetro, sul quale i parametri studiati non hanno avuto alcun effetto rilevante. Il miglioramento è sostanziale anche in termini di circolarità e tolleranze dimensionali sul diametro più critico (tra quelli sottoposti a specifica tolleranza di progetto), come visibile dalle misure evidenziate nella figura seguente.

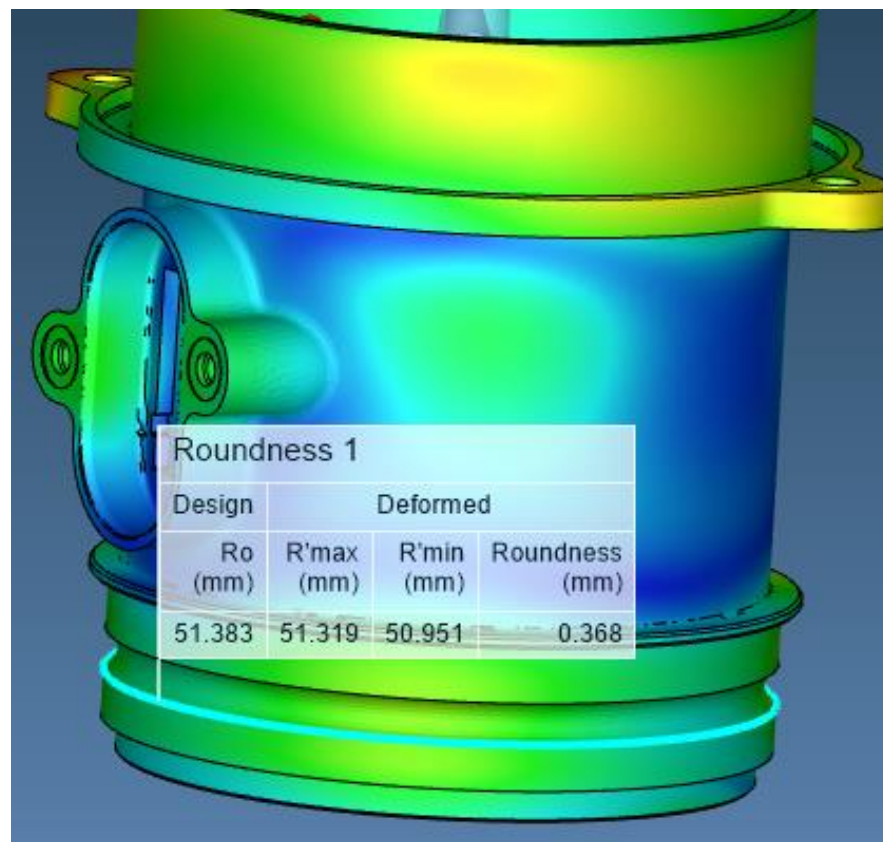


Figura 42. Misurazioni fatte sul modello della circonferenza più critica in termini di tolleranze per i risultati del processo standard

Si nota però come ci sia un aumento del valore degli spostamenti totali e un peggioramento della deformazione dalla flangia, che risulta molto più distante dalla condizione di planarità che si ottiene con l'impostazione dei valori di base. Questa maggiore deformazione è dovuto al fenomeno di overpacking che, per la pressione che restituisce il minor ritiro volumetrico (il più alto tra i valori scelti), diventa molto più

rilevante rispetto alla condizione standard del processo, come si può vedere dai valori del volumetric shrinkage di questa zona, evidenziati nella figura seguente.

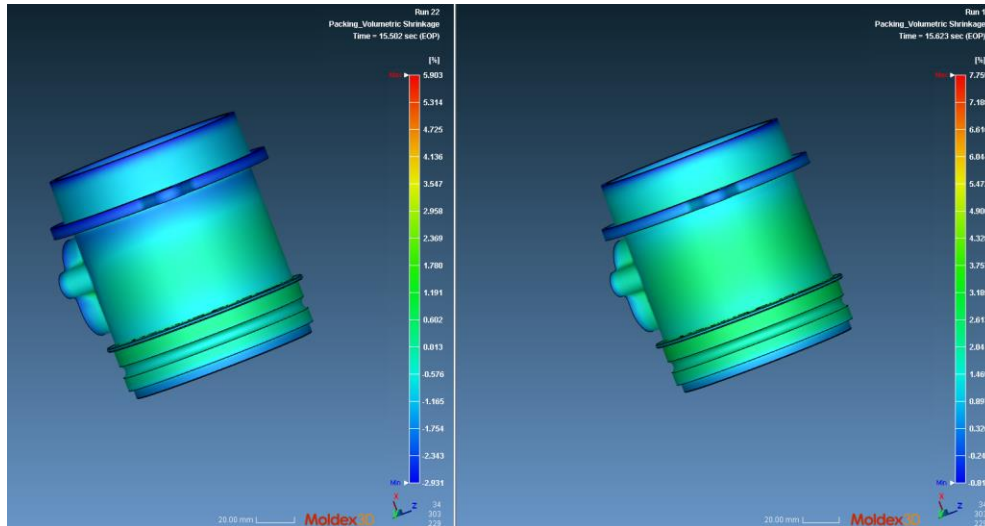


Figura 43. Ritiro volumetrico per la pressione di mantenimento più alta (a sx) e per il processo standard (a dx). I valori negativi sono quasi triplicati rispetto alla fase di mantenimento di partenza, segno di un notevole aumento dei problemi di overpacking che rendono meno uniforme la distribuzione degli spostamenti del pezzo e peggiorano così la deformazione.

L'aumento in modulo dei valori negativi del volumetric shrinkage, indica una maggiore dilatazione del volume al termine della fase di packing, effetto dovuto ad un'eccessiva pressione di mantenimento, e una conseguente dilatazione in fase di raffreddamento, che spiega l'aumento degli spostamenti per i punti della flangia e della sede del sensore. Questo aspetto crea dei dubbi sulla possibilità che la condizione migliore per ottenere un ritiro uniforme possa anche restituire un miglioramento in termini di uniformità degli spostamenti. Tale risultato sarebbe infatti auspicabile, poiché porterebbe ad una deformata che risulterebbe scalata rispetto alle dimensioni nominali del pezzo e il più vicina possibile alla sua geometria nominale. Il peggioramento della deformazione della flangia suggerisce che la compensazione degli effetti deformativi del ritiro, nella parte bassa del pezzo, possa avvenire a scapito della condizione deformativa globale. Si è quindi deciso di verificare tale aspetto con un secondo calcolo DOE, utilizzando la deformazione uniforme come parametro di qualità del pezzo. Questo per verificare se i parametri del processo che uniformizzano il ritiro consentano

anche di ottenere un pezzo che sia il più possibile scalato rispetto alla sua geometria nominale.

Invece l'effetto negativo, sulle condizioni di ritiro del pezzo, al crescere della velocità sono imputabili all'aumento degli effetti viscosi in corrispondenza dei gate, che rimangono invariati per dimensioni e geometria. Questo porta ad avere una temperatura del materiale al termine del riempimento di circa 3 °C superiore rispetto a quella ottenuta per il processo standard. Inoltre si nota anche un aumento dei valori massimali degli sforzi viscosi, logica conseguenza dell'aumento della velocità.

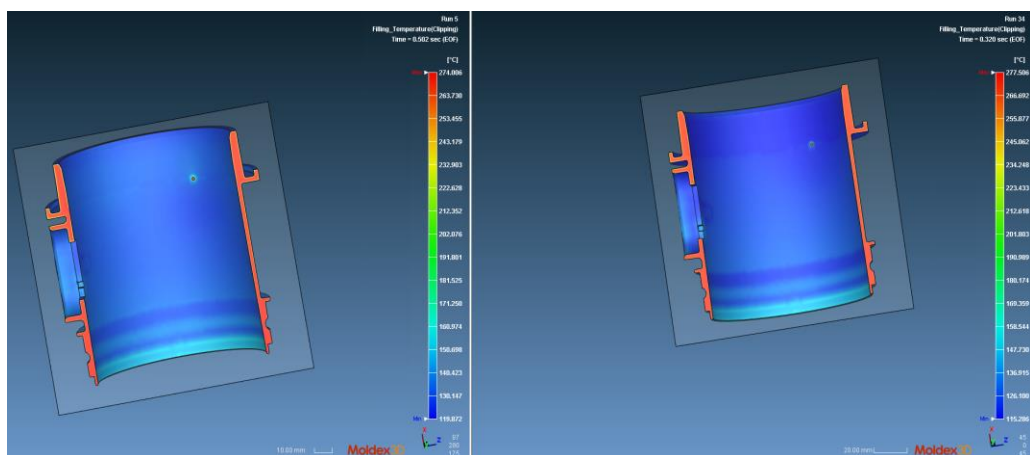


Figura 44. Distribuzione di temperatura per la combinazione massima pressione di mantenimento-minima velocità di iniezione a sx e minima pressione di mantenimento-massima velocità di iniezione a dx, tra i valori scelti per il DOE. Con la velocità la temperatura alla fine del riempimento risulta maggiore di circa 3 °C

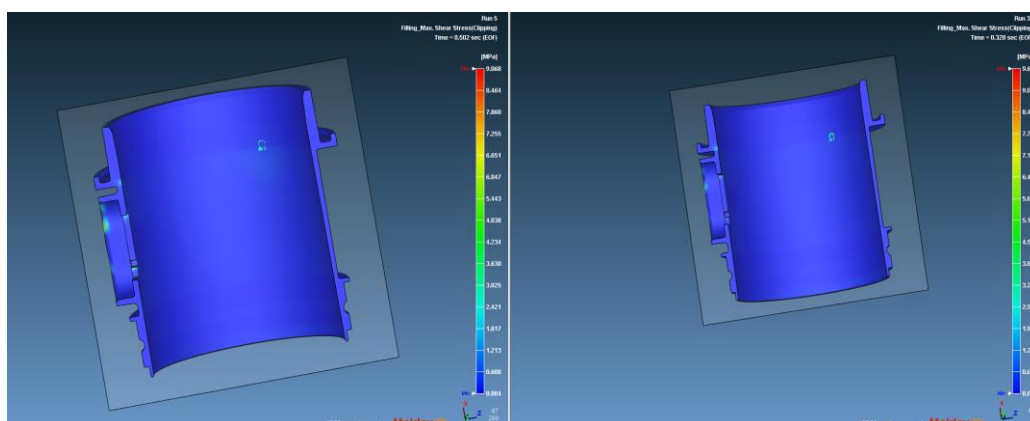


Figura 45. Sforzi viscosi per le medesime condizioni descritte in figura 39. Con l'aumentare della velocità si ha una crescita degli sforzi viscosi che fa aumentare la temperatura del materiale in fase di iniezione

Questi aspetti influiscono negativamente sul ritiro uniforme del pezzo, anche se con un peso assolutamente non paragonabile a quello che si ha agendo sulla pressione di mantenimento. Tale peggioramento si ripercuote anche sulla deformazione, che arriva ad avere valori degli spostamenti superiori a quelli del processo standard, scegliendo il valore di pressione più basso e quello di velocità più alto tra quelli presi in considerazione per lo studio con il modulo DOE.

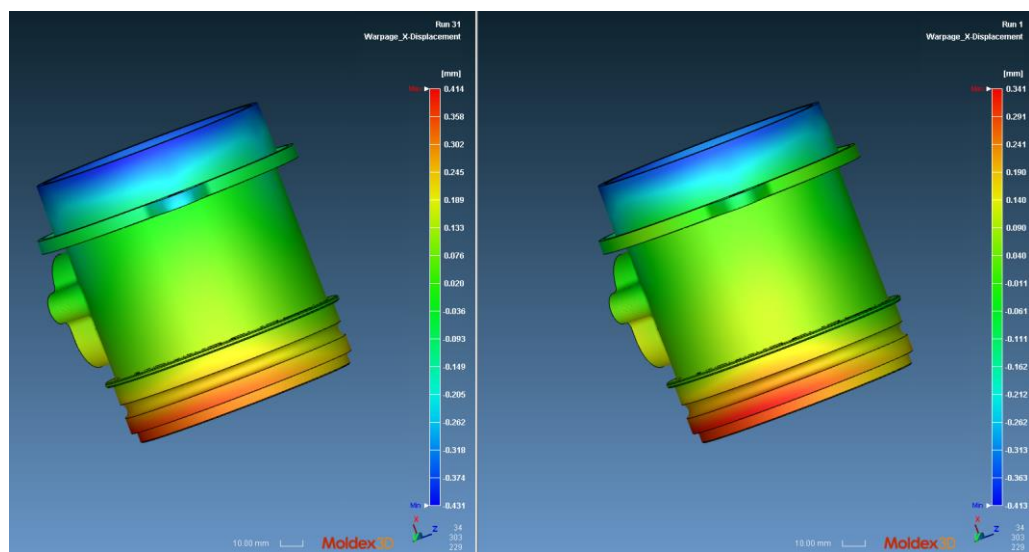


Figura 46. Spostamenti lungo la direzione X per il processo con velocità di iniezione aumentata a sx e per il processo standard a dx. Il valore massimo degli spostamenti (colore rosso) aumenta rispetto allo standard, segno di un peggioramento della deformata

3.3.2 Approfondimento sull'aumento della pressione di packing

Come precedentemente accennato, per verificare l'ulteriore evoluzione della deformazione all'aumentare della pressione di mantenimento e per controllare l'influenza dei fenomeni di overpacking della flangia sugli spostamenti, si è approfondito lo studio con tre ulteriori simulazioni, impostando i parametri di velocità e pressione come descritto nel capitolo precedente.

I risultati che si ottengono sono in linea con quanto visto finora. L'aumento della pressione di mantenimento consente di ridurre il massimo valore del ritiro volumetrico, mentre fa crescere il modulo del valore minimo. Come ci si attende continuano quindi a ridursi gli effetti dei fenomeni di ritiro termico, ma vengono esaltati i problemi di

dilatazione di alcune parti del pezzo in fase di raffreddamento, come conseguenza dell'elevata pressione di mantenimento. L'aspetto più importante è la scarsa efficacia che si ha sulla deformazione dell'estremità opposta rispetto alla flangia. Il miglioramento in termini di spostamenti e di tolleranza di circolarità, rispetto a quello che si ottiene con il miglior risultato restituito dai calcoli DOE (considerando il ritiro volumetrico come fattore di qualità del pezzo), è molto ridotto. Questo perché le conseguenze degli effetti termici, in questa parte del pezzo, sono già stati in buona parte recuperati con gli aumenti precedenti della pressione. Infatti, il volumetric shrinkage continua a ridursi significativamente solo all'interno del volume della sede debimetro. Qui infatti il molten core si conserva per tutta la fase di mantenimento. Quindi aumentando la pressione oltre il valore massimo utilizzato in precedenza, vuol dire andare a migliorare il ritiro termico in una zona che è di scarso interesse per la deformazione, poiché prevede anche l'utilizzo di inserti filettati per il montaggio del sensore che incidono a loro volta sulla deformata. Nella zona della flangia invece si hanno valori del ritiro negativi e sempre più grandi in modulo, segno di un peggioramento dei problemi di overpacking già riscontrati anche con pressioni più basse. Il peggioramento della deformazione di questa zona è visibile anche dall'aumento del valore degli spostamenti. La flangia infatti tende sempre di più a peggiorare la sua planarità. Una conseguenza importante è che l'entità di questi movimenti diventa tale da avere anche delle influenze significative sul valore di tolleranza del diametro interno che si trova circa alla stessa quota della flangia, sottoposto ad una tolleranza di progetto specifica. L'ampiezza del campo di tolleranza di questa quota cresce con l'aumento della pressione, segno che vi è un aumento della deformazione non più localizzato sulla sola flangia, ma che arriva ad interessare anche il corpo cilindrico del pezzo. In aggiunta si ha una crescita generalizzata anche dello spostamento medio dei punti della regione cilindrica, che costituisce il corpo dell'oggetto. Le figure seguenti evidenziano come le variazioni della circolarità nella parte inferiore del pezzo siano di modesta entità (nell'ordine di centesimi di millimetro), mentre le variazioni dimensionali nella zona flangia, per una circonferenza presa ad esempio, siano più significative (nell'ordine del decimo di millimetro per l'ampiezza del campo di tolleranza sul diametro).

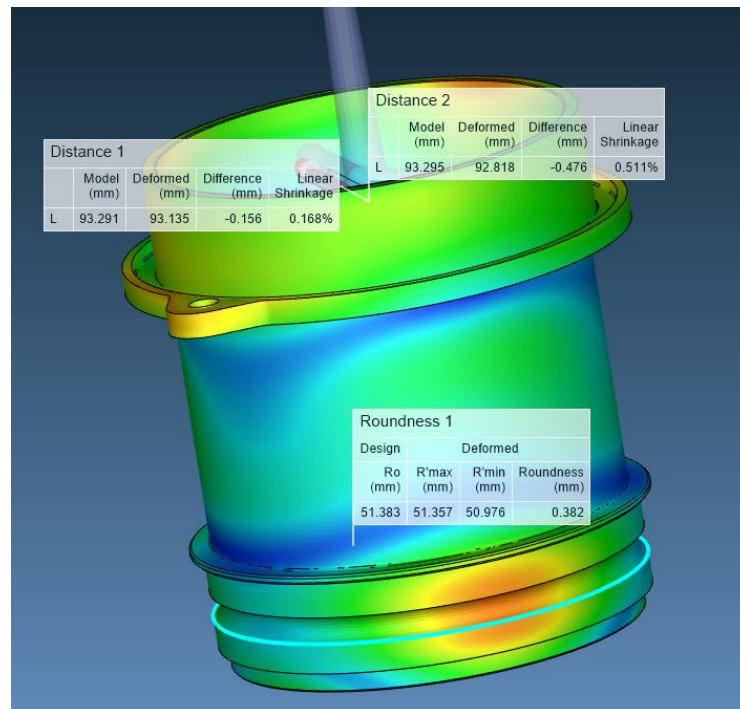


Figura 47. Alcune tolleranze significative rilevate sul modello per una pressione di mantenimento pari all'82% del massimale della pressa

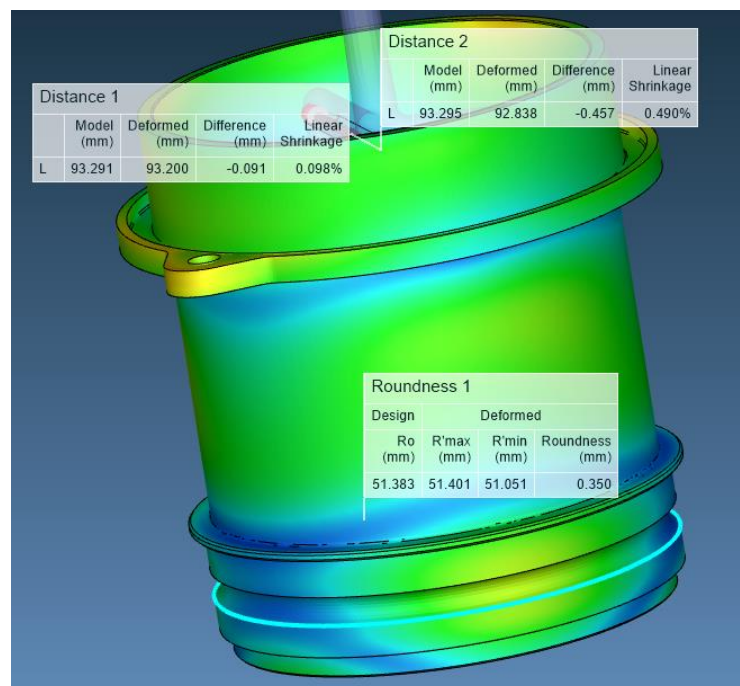


Figura 48. Alcune tolleranze significative rilevate sul modello per una pressione di mantenimento pari all'91% del massimale della pressa

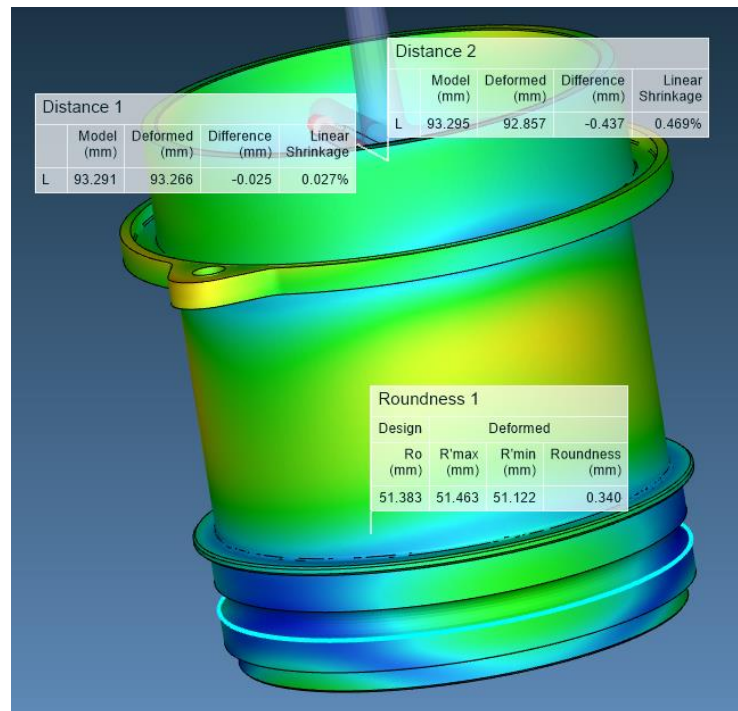


Figura 49. Alcune tolleranze significative rilevate sul modello per una pressione di mantenimento pari all'100% del massimale della pressa

Non c'è quindi un reale vantaggio nell'andare oltre i valori di pressione massima che sono stati impostati nella serie di simulazioni precedenti, anche se persiste un miglioramento dell'uniformità del ritiro volumetrico (la differenza tra massimi e minimi si riduce sempre di più) e un leggero miglioramento delle condizioni deformative nella parte più critica del pezzo. I progressi si concentrano in zone poco significative per la funzionalità del componente e in cui i risultati ottenuti sono solo indicativi per via della mancanza degli inserti filettati. Inoltre la conferma dell'entità e del peso dei problemi di overpacking richiede un'ulteriore analisi sulla relazione tra i parametri variati e l'uniformità della deformazione.

3.3.3 Studio sulla deformazione uniforme

Si vuole ora approfondire con un secondo calcolo DOE se effettivamente le condizioni di ritiro uniforme sono ottenibili a scapito dell'uniformità della deformazione. Come osservato descrivendo i risultati del primo calcolo DOE, si è infatti osservato come, all'ottenimento di una deformata caratterizzata dal ritiro il più uniforme

possibile, non corrisponda necessariamente una condizione di uniformità della deformazione, utile a ridurre la deviazione della geometria da quella nominale. Si è quindi realizzata una seconda serie di calcoli, utilizzando gli stessi parametri del primo DOE, ma impostando come fattore di qualità del pezzo la minima deformazione uniforme (si prende quindi in considerazione lo spostamento totale dei punti e non il ritiro volumetrico). Si vuole valutare se i problemi di overpacking, riscontrati nella zona della flangia, possano avere un effetto superiore rispetto a quello di un ritiro il più uniforme possibile.

I risultati mostrano come qualsiasi combinazione dei parametri scelti, restituisca un peggioramento della condizione di deformazione uniforme, riportando al processo standard, che risulta il miglior risultato in termini di minimizzazione della differenza tra il valore massimo e quello minimo degli spostamenti totali. Quindi, i vantaggi che si hanno in termini di ritiro uniforme con un aumento della pressione di mantenimento, sono ampiamente compensati dall'aumento degli spostamenti soprattutto dei punti della flangia stessa, determinando un maggiore disparità nella distribuzione degli spostamenti nei vari punti del dominio. Si ha quindi, globalmente, un allontanamento maggiore dalla geometria nominale del pezzo. Andando però ad effettuare delle misure sui valori dei diametri del lato flangia, sottoposti a tolleranza di progetto, si nota come non ci si discosti molto dai valori ottenuti sia con le simulazioni del processo di partenza, sia con i rilievi sperimentali effettuati dal controllo qualità. Come visto nel paragrafo precedente, è necessario aumentare ulteriormente la pressione di mantenimento per cominciare ad avere degli effetti negativi anche su tali dimensioni. Il peggioramento rilevante degli spostamenti con l'aumento della pressione sembra quindi circoscritto alla zona della flangia per i valori utilizzati anche in questo DOE, senza interessare parti del pezzo fondamentali per la sua conformità alle specifiche progettuali. Si potrebbe quindi pensare di realizzare il processo secondo il nuovo valore di pressione di mantenimento che genera il miglior ritiro uniforme, poiché si ha un miglioramento della deformazione in zone sottoposte a tolleranza, mentre il peggioramento è localizzato in zone meno importanti. Questo potrebbe permettere di non ricorrere a maschere opportune per il condizionamento della fase di raffreddamento dell'estremità opposta alla flangia, con una semplificazione del processo.

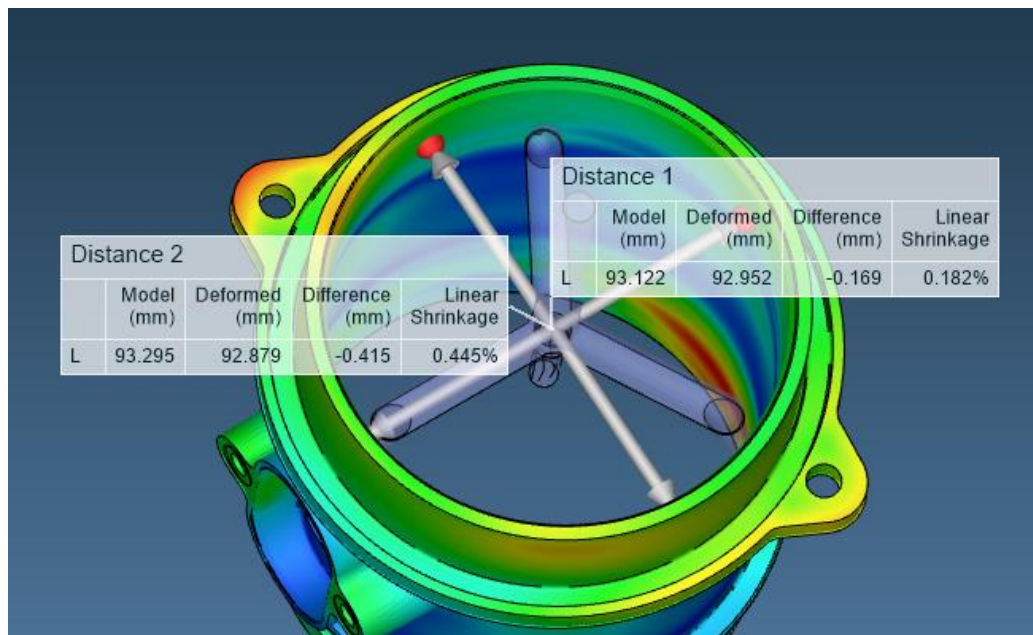


Figura 50. Valori dei raggi misurati sul modello per uno dei diametri sottoposti a specifica tolleranza dimensionale a disegno

Tuttavia, per l'effettiva realizzazione secondo i nuovi parametri, sarebbero necessarie ulteriori indagini riguardo la formazione di bave sul pezzo (molto probabili secondo l'esperienza maturata dall'azienda sulla base del valore della pressione impostata) e sulla resistenza dello stampo alle maggiori sollecitazioni.

Conclusioni

In conclusione, l'indagine effettuata ha consentito di valutare se fosse possibile ottenere un miglioramento del processo produttivo esistente, agendo unicamente su due parametri del processo. La variazione della velocità di iniezione (in particolare il suo innalzamento) non ha restituito buoni risultati, sia dal punto di vista del ritiro, sia da quello della deformazione. Per ottenere dei risultati positivi agendo su tale parametro sarebbero necessarie delle modifiche allo stampo, atte a mitigare l'aumento degli effetti viscosi. La pressione di mantenimento si è invece rivelata molto efficace nella riduzione degli effetti del ritiro volumetrico legato agli effetti termici. In particolare aumentando la pressione fino al 73% circa del massimale della pressa, si è riscontrato un peggioramento della deformazione complessiva del prodotto, ma un consistente miglioramento del rispetto delle tolleranze di tutte le parti del pezzo soggette a effetti termici rilevanti. In particolare in tutte le zone sottoposte a tolleranze di progetto, l'ampiezza del campo di tolleranza misurato risulta ridotto rispetto al processo standard. Il peggioramento della deformazione si concentra in zone meno rilevanti dal punto di vista dimensionale, come la flangia. Quindi, benché il software sottolinei come ci sia un peggioramento globale della deformazione del pezzo, si ha un miglioramento della conformità in tutte quelle zone che sono significative per il corretto funzionamento del componente. I risultati hanno mostrato come sarebbe possibile evitare l'impiego di una maschera durante la fase di raffreddamento per ridurre gli spostamenti dell'estremità opposta al lato flangia. Il pezzo risulta già conforme alle tolleranze all'estrazione dallo stampo.

Con un ulteriore aumento della pressione di packing, dal valore maggiore utilizzato nei calcoli DOE fino al massimale della pressa, non si sono riscontrati vantaggi significativi. Il miglioramento del ritiro volumetrico continua ad esserci ma mostra dei progressi rilevanti rispetto a quelli del DOE solo nella zona della sede di montaggio del debimetro. Questa non è una parte soggetta a particolari vincoli progettuali e quindi l'ulteriore aumento del parametro di mantenimento non restituisce dei vantaggi apprezzabili sulla qualità del prodotto. Al contrario, gli effetti

dell'overpacking diventano talmente significativi nella zona della flangia da aumentare l'ampiezza del campo di tolleranza dei diametri nella parte alta del pezzo, peggiorando complessivamente la qualità del processo anche in zone di interesse per la conformità del prodotto.

Inoltre è molto importante sottolineare come una validazione sperimentale del valore maggiorato della pressione sia necessario per verificare la formazione di bave. L'esperienza maturata dall'azienda evidenzia come questo possa essere un fenomeno molto probabile e che potrebbe costringere a discostarsi dal valore del parametro di mantenimento, che ha restituito i risultati migliori. Inoltre la resistenza dello stampo potrebbe porre un limite invalicabile all'indagine dei valori di pressione più elevati. Proprio per questo motivo non si è proceduto ad una validazione sperimentale dei valori di pressione di mantenimento più elevati.

Si vuole anche sottolineare come l'utilizzo di un passo di incremento più piccolo della pressione di packing avrebbe potuto dare risultati globali migliori (medi tra la condizione che ha mostrato il minor ritiro uniforme e quella che ha portato alla minor deformazione uniforme). Sarebbe quindi possibile approfondire lo studio andando alla ricerca di una condizione di ottimo tra questi due fattori qualitativi del pezzo.

Infine si vuole ribadire come non siano mai state prese in considerazione modifiche per lo stampo. Agendo anche su di esso, si potrebbe cambiare il peso e l'influenza della velocità di iniezione sui risultati ottenuti, agendo ad esempio sulla dimensione dei gate e quindi sugli effetti viscosi nella fase di riempimento. Un'ulteriore aspetto interessante sarebbe la possibilità di differenziare le portate del sistema di raffreddamento sui due lati dello stampo, per far sì che le temperature del materiale, nella zona diametralmente opposta a quella dell'alloggiamento del debimetro, siano più alta all'inizio della fase di raffreddamento. Questo potrebbe comportare un minor ritiro differenziale tra i due lati del pezzo, contenendo uno dei principali meccanismi deformativi, senza agire sui parametri di processo in modo sostanziale. Infatti l'aumento della pressione di mantenimento si è rivelata efficace per la riduzione della deformazione, ma essa non può essere portata sopra a certi valori senza peggiorare le parti del prodotto che non sono soggette a problematiche legate al ritiro.

Ringraziamenti

Un ringraziamento al mio relatore, il Dott. Ing. Francesco Gherardini, per il supporto, la disponibilità e l'esperienza messa a disposizione durante tutto il lavoro che ha portato alla realizzazione di questo studio.

Un ringraziamento anche al mio correlatore e tutor aziendale, il Dott. Ing. Simone Malagola, per la competenza e le conoscenze messe a mia disposizione e per la disponibilità mostrata durante i mesi di lavoro insieme.

Un ringraziamento anche al Laboratorio di Progettazione Integrata e Simulazione - La.P.I.S. del dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari dell'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, per aver messo a mia disposizione le licenze software necessarie per il lavoro di simulazione.

Infine, un ringraziamento all'azienda Cattini Engineering Plastics s.r.l. per aver avviato questa collaborazione accademica e avermi fatto assistere alle fasi di realizzazione del processo e misurazione del pezzo, oltre che per aver messo a disposizione la potenza di calcolo richiesta per tutta la parte di simulazione.