

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**“Ottimizzazione di un sistema di condizionamento di
uno stampo ad iniezione con conformal cooling”**



Relatore:

Ch.mo Prof. Luca Settineri

Candidato:

Valerio Di Nardo

Matr.: S224665

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

Ringrazio

la Mista S.p.A. per l'opportunità concreta di crescita professionale
e la Moldex3D Italia per il supporto tecnico.

“L’unica maniera di prendere la decisione giusta è sapere quale sia quella sbagliata.”

Paulo Coelho

Ai miei genitori,

Luigi e Patrizia

Sommario

1. INTRODUZIONE	6
2. DESCRIZIONE DEL COMPONENTE.....	11
2.1. Analisi del componente	11
2.2. Materiale.....	12
2.3. Progetto stampo.....	13
2.4. Dimensione piastre	15
3. LA SIMULAZIONE	15
3.1. Scheda di stampaggio.....	15
3.2. Acciaio dello stampo	16
3.3. Numero di Reynolds.....	16
3.4. La materozza	18
3.5. Punto di iniezione e discretizzazione del modello.....	18
4. PRE-ANALISI DI RAFFREDDAMENTO	20
4.1. Mold base e canali di raffreddamento	20
4.2. Simulazione con canali di raffreddamento ininfluenti	21
4.3. Hot spots e zone a elevato flusso termico	22
5. ANALISI CON LAYOUT TRADIZIONALE.....	25
6. ANALISI CON INSERTO CU-BE.....	30
7. IL CONFORMAL COOLING	33
7.1. Conformal cooling design	36
7.2. Step 1.....	37
7.3. Step 1 con inserto in Ampcoloy 83	41
7.4. Step 2.....	43
7.5. Step 2 con inserto in Ampcoloy 83	46
7.6. Step 3.....	48
7.7. Step 3 con inserto in Ampcoloy 83	52
8. ANALISI COMPARATIVE	54
8.1. Volumetric Shrinkage.....	54
8.2. Sink marks.....	57
8.3. Deformazione termica	60
9. RIPROGETTAZIONE DELLO STAMPO	69
9.1. Riprogettazione materozza	69
9.2. Simulazione reologica	72
10. LA PRODUZIONE E COSTI	77

10.1.	Simulazione reologica layout finale	79
10.2.	Confronto tra stampo in produzione e stampo riprogettato	80
10.3.	Tasselli sinterizzati	83
10.4.	Analisi dei costi	84
11.	CONCLUSIONI.....	87
12.	BIBLIOGRAFIA.....	90

1. INTRODUZIONE

Tutte quelle sostanze organiche ottenute attraverso reazioni chimiche di prodotti naturali o di sintesi derivanti dalla scissione chimica del carbone, del petrolio e del gas naturale vengono classificate come materie plastiche. I polimeri sono sostanze composte da macromolecole, cioè molecole molto grandi formate dalla successione di un piccolo gruppo molecolare caratteristico del polimero stesso, che si ripete in modo uguale per centinaia o migliaia di volte.

L'unità ripetente è il monomero. Dal materiale grezzo (petrolio, carbone, ecc.) si ricavano i monomeri. Attraverso la reazione chimica di polimerizzazione si forma la catena polimerica, ovvero una molecola costituita da molte parti uguali che si ripetono in sequenza. Esistono molti tipi di polimerizzazione a seconda del tipo di monomero di partenza e del polimero che si vuole ottenere.

In generale le reazioni di polimerizzazione possono essere classificate secondo la stechiometria in: poliaddizione, in cui il polimero finale è dato dalla somma dei monomeri di partenza; e policondensazione, quando durante la polimerizzazione viene eliminata una molecola semplice, come ad esempio quella dell'acqua.

Nella maggioranza dei casi le reazioni di poliaddizione procedono con meccanismo a catena, mentre le policondensazioni hanno meccanismo a stadi. A seconda di come procede la polimerizzazione, la configurazione delle macromolecole può assumere diversi aspetti.

Nel polimero lineare le macromolecole sono costituite da lunghe catene con legami forti carbonio-carbonio. Tra le catene si instaurano legami deboli di tipo secondario. Basta un limitato aumento di temperatura per consentire lo scorrimento tra le catene e il passaggio allo stato fluido.

Nel polimero ramificato la crescita della catena non avviene più solo lungo il suo asse, ma si ha anche la formazione di catene laterali più o meno lunghe. Le catene, anche se ramificate, rimangono indipendenti ed interagiscono solo con legami secondari. La presenza delle ramificazioni porta comunque ad una maggiore difficoltà di scorrimento per semplici ragioni fisico-geometriche.

Il polimero reticolato è costituito da macromolecole che non sono più indipendenti tra loro, ma hanno tratti trasversali che costituiscono legami covalenti. Lo scorrimento tra le catene è impedito e le caratteristiche del materiale dipendono dalla lunghezza del tratto di catena principale tra due legami trasversali consecutivi. Se tale tratto è sufficientemente lungo il comportamento è gommoso o elastomerico. Se le reticolazioni sono molto strette il materiale è rigido e fragile. All'aumentare della temperatura il polimero arriva a quella di decomposizione prima di potersi trasformare in fluido.

Al polimero ottenuto possono essere aggiunti additivi per migliorare le proprietà meccaniche, termiche e chimiche. Un esempio sono: i coadiuvanti di processo, i rinforzanti, i pigmenti, i lubrificanti e i ritardanti di fiamma.

Alla fine del processo di creazione del polimero ne consegue un processo di trasformazione dal quale si ottiene il semilavorato o il prodotto finito.

La trasformazione dei polimeri riguarda operazioni simili a quelle utilizzate per la formatura dei metalli come: la fusione, lo stampaggio e l'estrusione. I polimeri plastificano ad una temperatura relativamente bassa (poche centinaia di gradi) e richiedono per la trasformazione meno energia dei materiali metallici.

I materiali termoplastici, a differenza dei metalli, non presentano una transizione netta tra il campo delle deformazioni puramente elastiche a quello delle deformazioni puramente plastiche. A differenza dei metalli, il fenomeno di rottura avviene soltanto dopo una deformazione plastica enormemente spinta rispetto a quella dei materiali metallici.

Di contro, presentano una rigidità di circa due ordini di grandezza inferiore rispetto ai metalli, mentre il carico di rottura è di un ordine di grandezza inferiore.

Il materiale di partenza per ottenere il componente finale può essere sotto forma di: polvere, granuli, fogli e fili. Le principali tecnologie di trasformazione dei materiali termoplastici sono: stampaggio ad iniezione, stampaggio a iniezione assistito da gas, estrusione, termoformatura, soffiatura di corpi cavi, stampaggio a rotazione, stampaggio a trasferimento.

Il processo di stampaggio a iniezione è utilizzato per la produzione di parti in plastica. La popolarità di tale processo è dovuta alla possibilità di produrre una varietà di componenti in plastica con una elevata produttività. [1]

Altri vantaggi di questa tecnologia consistono in: bassi costi di produzione, elevata automazione dei processi, possibilità di produrre pezzi di dimensioni molto piccole e stampi e presse possono essere utilizzati con materiali plastici diversi.

Di converso, i costi degli stampi e delle presse sono elevati e, inoltre, si ha una elevata concorrenza nel mercato. Per queste ragioni, prima di iniziare una produzione di un componente viene effettuata in via preliminare un'analisi dei costi, nonché un preventivo dello stampo per valutare il rientro degli utili. Sono proprio questi costi iniziali ad essere una discriminante dei guadagni produttivi. Oltre alla riduzione dei costi, un modo per ottenere dei margini sugli utili è quello di incrementare la produttività diminuendo il tempo ciclo che sarà determinante per la diminuzione del costo unitario di produzione.

Lo stampaggio ad iniezione dei materiali termoplastici è la tecnologia più comune per convertire plastica in granuli in oggetti di uso comune. Approssimativamente il 30% dei termoplastici viene stampato a iniezione. È un ramo in espansione nel settore della plastica, basti pensare che la prima macchina a iniezione fu brevettata nella seconda metà del XIX secolo.

Lo stampaggio a iniezione è un processo rapido, concepito per la produzione in un breve periodo di tempo di grandi quantità dello stesso prodotto di plastica.

L'operazione di stampaggio comporta la fusione della plastica sotto forma di granuli, quindi la plastica fusa viene forzata nella forma della cavità e si solidifica dopo un tempo sufficiente di raffreddamento [2]. A stampo aperto la parte viene espulsa dopodiché si chiude per ripetere nuovamente il ciclo. [3]

Il processo coinvolge varie fasi: riempimento, raffreddamento ed espulsione. Nell'arco di questo processo la fase di raffreddamento è fondamentale per ottenere parti in plastica di qualità. [1] Il materiale plastico viene portato a fusione e reso omogeneo da una vite di plastificazione. Successivamente viene iniettato in cavità e pressurizzato durante la fase di mantenimento per effettuare la compensazione dei ritiri. La fase di raffreddamento si divide quello con flusso o senza flusso. (Figura 1)

La fase di raffreddamento con flusso inizia con la compattazione. La vite di plastificazione avanza e ruota portando in testa il materiale da iniettare in cavità. Non appena terminato il riempimento viene inserita una percentuale di materiale per compensare le zone non ancora solidificate che si conclude alla fine del mantenimento.

Immediatamente dopo ha inizio la fase di raffreddamento senza flusso che termina con l'estrazione del pezzo. Contemporaneamente la vite di plastificazione ruotando ritorna alla posizione di partenza, preparandosi ad essere pronta per la stampata successiva. Durante la fase di estrazione lo stampo si apre per agevolare l'espulsione del pezzo, poi si richiude. Il pezzo può o cadere o essere condizionato dalla robotica che risulta essere parte integrante del sistema di produzione.

Le recenti tecnologie di Additive Manufacturing hanno permesso di poter realizzare canali di raffreddamento conformali, che consentissero di seguire le forme e i profili delle cavità degli stampi da cui ottenere un raffreddamento più uniforme e rapido per lo stampaggio a iniezione.

Con l'Additive Manufacturing è quindi possibile realizzare semplicemente le forme complesse dei canali conformali, con le tecniche di sinterizzazione di polveri di acciaio per stampi come DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Tali tecnologie risultano essere più costose rispetto alle tradizionali lavorazioni CAM, tuttavia si possono ottenere geometrie non realizzabili con le tecnologie convenzionali. Attualmente la tecnologia di fabbricazione additiva DMLS è utilizzata nel processo di fabbricazione di stampi per facilitare la costruzione di forme complesse, come parti in metallo, prototipi funzionali e inserti in metallo di alta qualità [5, 6]. La produzione di componenti attraverso la produzione additiva è completamente automatica, senza strumenti e basata su CAD 3D che vengono importati nella macchina. A tale scopo questa è dotata di un laser a fibra da 400 W che scioglie gli strati di polvere metallica fine e crea strati da 0,05 mm. Il monitoraggio costante del processo di fabbricazione garantisce che tutti i componenti siano realizzati con una qualità e riproducibilità eccellenti. [7] Altre tecniche di fabbricazione additiva di polveri utilizzate e che risultano avere una comprovata capacità di produrre canali estremamente complessi e in grado di ridurre il tempo di raffreddamento sono: Selective Laser Melting (SLM), Laser Cusing e Electron Beam Melting (EBM). [8]

Questo lavoro di tesi sperimentale ha come obiettivo l'ottimizzazione del sistema di raffreddamento di uno stampo ad iniezione con l'utilizzo di canali conformali. La progettazione dei canali conformali è una delle limitazioni nel processo di stampaggio. La fase di raffreddamento è uno degli stadi critici per ottenere una ottima qualità e una riduzione del tempo ciclo. [1] La quantità di calore assorbito dalla plastica iniettata e dallo stampo è un fattore importante per espellere la parte nel minimo tempo ciclo. [4] È richiesta, quindi, una progettazione del sistema di raffreddamento adattata alla geometria della cavità dello stampo per il trasferimento ottimale di calore tra materiale fuso e matrice [9]. Il sistema di raffreddamento deve essere in grado di asportare la maggior quantità di calore possibile in modo che la parte in plastica possa essere estratta senza distorsioni nel minor tempo.

Il sistema di condizionamento risulta essere molto importante per la qualità del pezzo e per la riduzione del tempo ciclo. Oltre al sistema di condizionamento, la qualità di parti in plastica stampate a iniezione dipende dai materiali, dal design dello stampo, dalle parti e dai parametri del processo di fabbricazione. In questo processo il ritiro e la deformazione sono due significativi difetti comuni. [10] Il warpage (deformazione), il ritiro volumetrico e le linee di giunzione rappresentano i maggiori difetti nel processo di stampaggio a iniezione e devono essere fortemente evitati nel rispetto delle dimensioni e dell'aspetto del componente. [11]

Il ritiro determina la produzione di segni di risucchio lungo la superficie del componente. La deformazione è fortemente influenzata da alcuni parametri di stampaggio quali: la temperatura del fuso, tempo di riempimento, velocità di iniezione. Anche il tipo di termoplastico stampato può influenzare l'orientamento delle fibre e quindi la deformazione. Altre cause della deformazione sono: la pressione di mantenimento non uniforme, spessori della parete non uniformi, geometria della parte iniettata, temperatura di stampaggio non uniforme. [12, 13] Vedremo in questo elaborato come ritiro volumetrico e deformazione subiscano un miglioramento con l'ottimizzazione del sistema di condizionamento. Tale miglioria non è particolarmente evidente in quanto il contributo del raffreddamento uniforme è percentualmente trascurabile.

In conclusione, possiamo dire che il vero vantaggio del conformal cooling è la riduzione del tempo ciclo che si traduce in un risparmio in termini di consumi energetici e di riduzione dei costi di produzione che compensano ampiamente i costi iniziali per determinati volumi produttivi.

2. DESCRIZIONE DEL COMPONENTE

Il componente è una cover per i comandi al volante stereo. La cover si accoppia - con un supporto - grazie a dei dentini e viene poi forzata lungo il bordo curvilineo inferiore. Una vite garantisce il completo fissaggio dei due componenti. I due elementi dell'assieme presentano le sedi per l'accoppiamenti di tasti e di una rotella per la gestione del sistema stereo da parte del conducente dell'autovettura. La cover può essere divisa in due zone, la parte estetica, con forme libere, e la parte necessaria ad una parte dell'accoppiamento, a forma di "z". Le nervature presenti in questa zona servono ad aumentare la resistenza del componente, in una zona dove lo spessore è di circa 2 mm. In Figura 2 sono rappresentate le viste in assonometria della cover dove è possibile osservare le sedi per i tasti, sui lati e di fronte alla figura, e la sede della rotellina dentata.

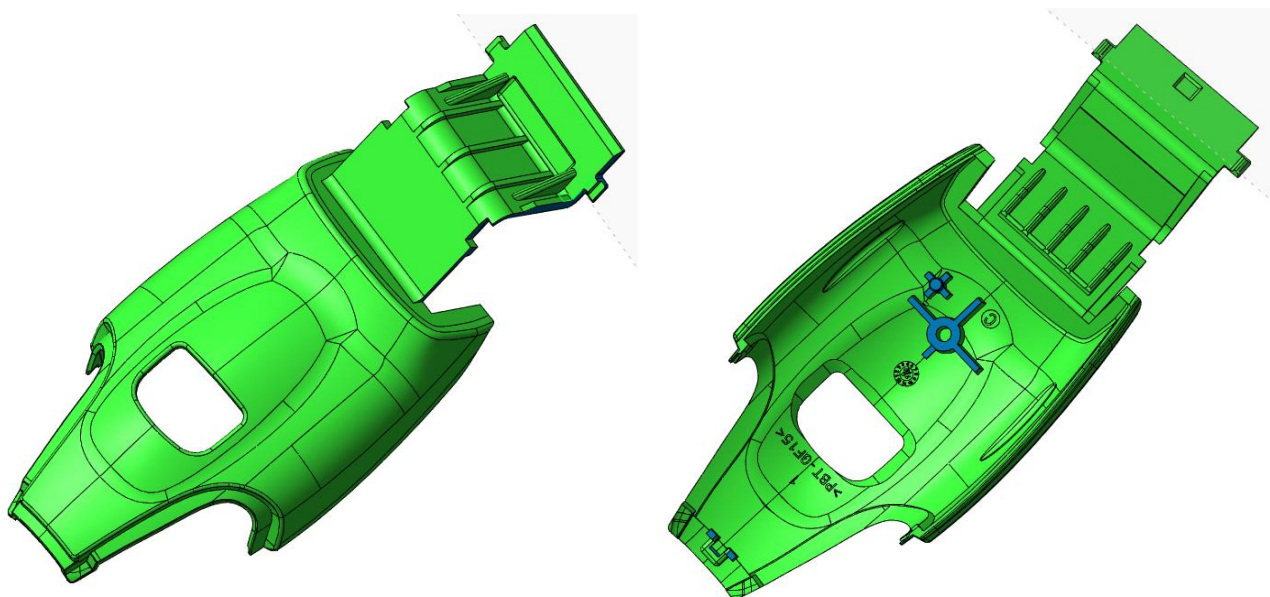


Figura 1 – Viste in assonometria Cover

Il pezzo risulta essere non simmetrico ma la geometria semplice non richiede la presenza di carrelli. Il piccolo sottosquadro presente in punta, nella parte inferiore del pezzo richiede la presenza di un tassello mobile. Un tassello mobile è un componente dello stampo normalmente collegato e azionato dal tavolino di estrazione e si muove di un certo angolo per liberare il sottosquadro interno. Nella sua semplicità si comprende come questo pezzo abbia bisogno di due requisiti fondamentali per garantire un certo standard di qualità e la sua fruibilità: estetica e rispetto delle tolleranze dimensionali.

La cover è infatti un pezzo estetico e deve sempre garantire perfetto accoppiamento con gli altri elementi dell'assemblato. In ultimo, ma non per ultimo, non deve subire distorsioni nel tempo che possano inficiare il corretto assemblaggio delle parti.

2.1. Analisi del componente

L'ingombro massimo del pezzo è: (31,89 x 49,05 x 113,31) mm. Lo spessore del pezzo è stato discretizzato con una mesh superficiale e rappresentato in Figura 3. Il componente è a spessore poco

variabile e per la progettazione dei canali si è supposto, per semplicità, con un margine di errore trascurabile, di 2 mm.

Il range della scala degli spessori è compreso tra 0.2 mm e 3 mm. La cavità è stata maggiorata dello 0,6 % considerando un ritiro uniforme del pezzo. Il volume è di 10,7064 cm³.

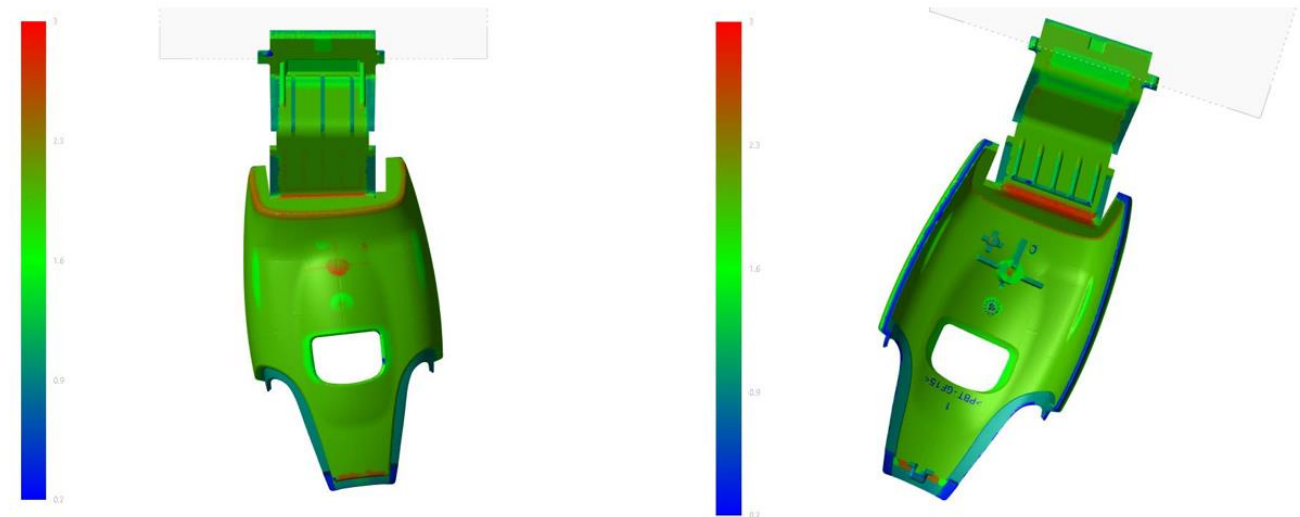


Figura 2- Spessori

2.2. Materiale

Il materiale utilizzato è il PBT FV15 (Q19) - POCAN KL 1-7265. Il polibutilentereftalato (PBT) è un polimero semicristallino, ha una grande rigidità e elevata stabilità dimensionale.

Il materiale in questione è caricato al 15 % con fibra di vetro. La presenza della fibra consente di aumentare le proprietà meccaniche del materiale ma aumenta lo shear stress durante l'iniezione del materiale e determina anche un ritiro differenziato importante.

In Tabella 1 sono riportati i valori forniti dal Software Moldex3D R15.0 per il suddetto materiale.

PBT FV15 (Q19) - POCAN KL 1-7265			
Densità [Kg/m ³]	1340	Temperatura dello stampo [°C]	80 ÷ 100
Carica [%]	15	Temperatura tipica del materiale [°C]	250 ÷ 270
Massimo sforzo di taglio [MPa]	4,08	Temperatura di non flusso [°C]	190
Ritiro longitudinale [%]	0,35	Temperatura di estrazione [°C]	170
Ritiro trasversale [%]	1,2	Temperatura di congelamento [°C]	210
Conducibilità termica [J/sec·m·°C]	20,1	Capacità termica [J/g·°C]	1,74

Tabella 1 - Scheda tecnica materiale

La Figura 4 riporta il grafico della viscosità in funzione dello shear rate al variare del melt temperature. L'aumento dello shear rate determina una diminuzione progressiva della viscosità. L'aumento della temperatura di melt provoca un aumento della viscosità del materiale.

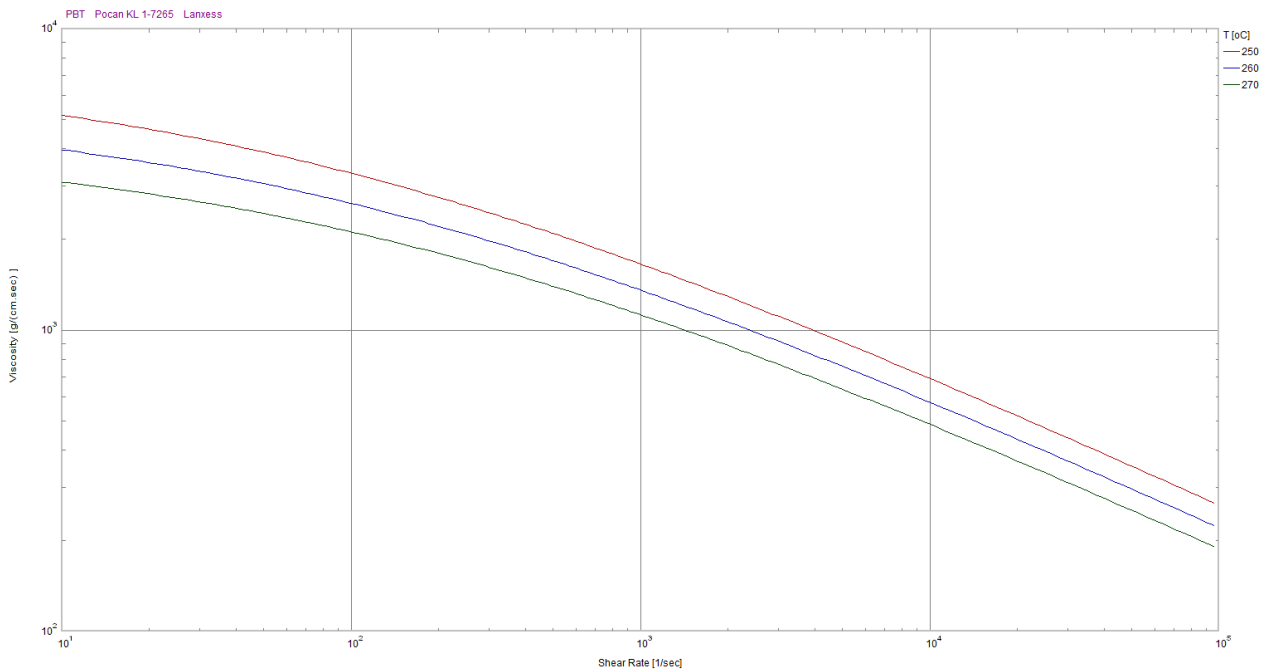


Figura 3 - Viscosity - shear rate

2.3. Progetto stampo

Lo stampo è un due piastre, multi-impronta con canale freddo. Lo stampo presenta due cavità alimentate dalla medesima materozza con iniezioni sottomarine.

La presenza di un canale di iniezione freddo rispetto ad uno caldo, comporta un aumento delle pressioni di iniezione, minor uniformità di temperatura in cavità e aumento del tempo di raffreddamento.

Il tempo di raffreddamento, e quindi il tempo ciclo, aumentano per due motivi: con i canali freddi il canale ha tipicamente una sezione trasversale maggiore e il volume totale di materiale iniettato è maggiore. La materozza presenta un pozzetto di raccolta allungato in quanto serve da guida per liberare, deformandolo, il dente di cinghiale dal sottosquadro per avere la separazione del pezzo dalla materozza senza utilizzare uno stampo a tre piastre. L'estrazione del pezzo è ottenuta con sette perni estrattori, un cannocchiale, al cui interno è alloggiato un tassello per ricavare un foro, e un tassello mobile (Figura 5).

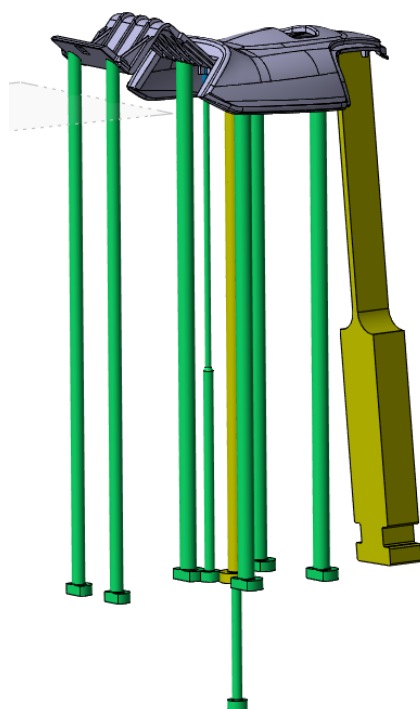


Figura 4 - Sistema di estrazione Cover

In Figura 6 sono state rese trasparenti la piastra mobile e quella fissa per poter osservare i tasselli maschi, posizionati in parte mobile, e i tasselli femmina, posizionati in parte fissa.

Inoltre è possibile vedere l'ingresso e l'uscita dei sistemi di raffreddamento delle due cavità sia per il tassello maschio, in piastra mobile, sia per quello femmina, in piastra fissa.

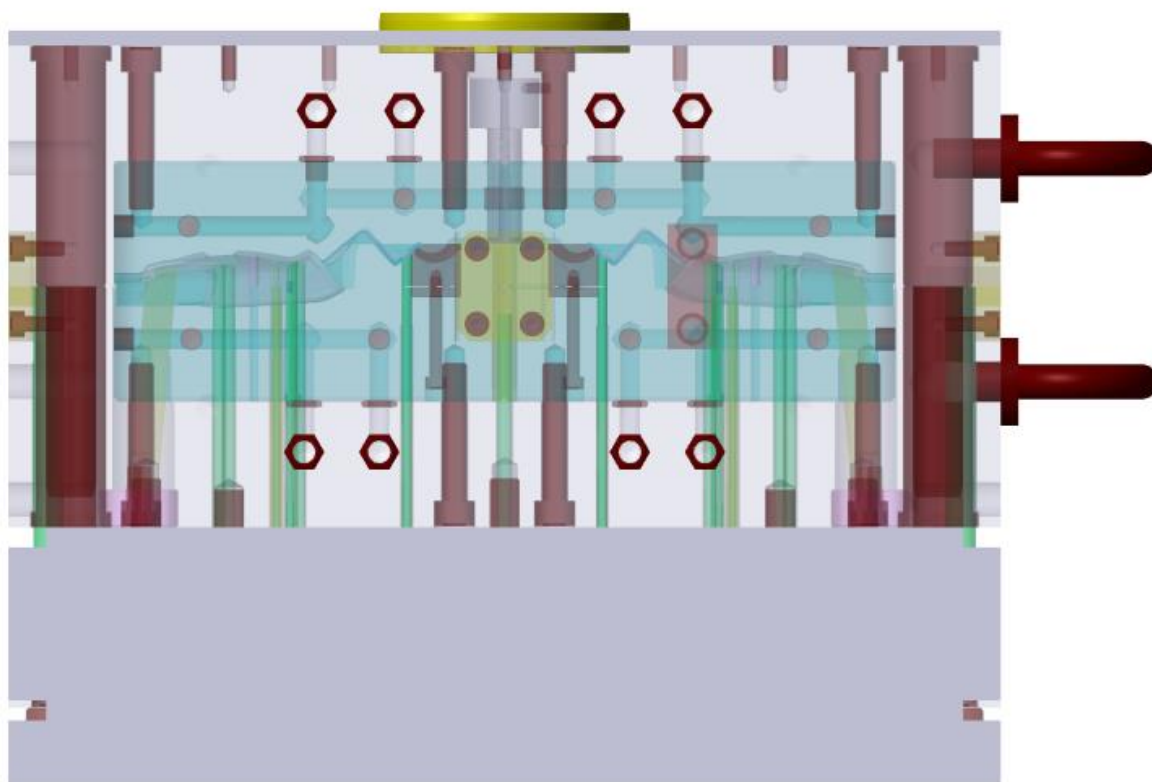


Figura 5- Vista laterale stampo completo

2.4. Dimensione piastre

Una volta ricavati gli ingombri massimi del pezzo e i suoi spessori, per una simulazione quanto più aderente alla realtà è stato necessario ricavare gli ingombri massimi delle piastre. Per completezza di dati, in Tabella 2, oltre alle dimensioni della piastra inferiore e piastra superiore, sono riportate quelle del tassello inferiore e superiore e gli ingombri massimi del pezzo.

Ingombri			
	Base Maggiore [mm]	Base minore [mm]	Altezza[mm]
Portamatrice fissa	396	246	96
Portamatrice mobile	396	246	96
Ingombro totale piastre	396	246	192
Matrice mobile	157	146	68
Matrice fissa	156	146	58
Ingombro totale tasselli	157	146	96
Ingombro cover	113,31	49,05	31,89

Tabella 2- Ingombri

3. LA SIMULAZIONE

La simulazione è uno strumento che ha avuto un'ampia diffusione nelle aziende produttive ed è diventato un elemento di uso comune e ormai quasi fondamentale. In passato era confinata nell'ambiente accademico dal momento che erano necessari hardware e software particolarmente potenti e sofisticati. La crescita delle prestazioni dei computer è associata alla diffusione della simulazione presso le aziende. La diffusione è stata inoltre agevolata dallo sviluppo delle reti di interconnessione dei calcolatori che hanno ulteriormente semplificato le operazioni inerenti alla simulazione.

Nella simulazione si implementa un modello del processo che si vuole realizzare. Si forniscono al programma degli input opportuni. L'uscita può essere un grafico o un tabulato numerico che deve essere opportunamente interpretato. In questo modo il progettista è in grado di analizzare diverse operazioni produttive senza la necessità di un settaggio fisico della macchina e del processo. Per validare il modello, si confrontano i valori in uscita con i dati sperimentali del processo reale.

3.1. Scheda di stampaggio

La scheda parametri è un documento che viene stilato dopo la realizzazione delle simulazioni reologiche sul software e la messa a punto sullo stampo. La simulazione è un riferimento importante. Dai parametri stabiliti in simulazione si passa al fenomeno reale e si impostano i parametri in macchina fino ad ottenere i valori finali che verranno utilizzati per l'intero processo produttivo. I parametri di stampaggio sono quelli utilizzati per la produzione con layout di raffreddamento tradizionale.

La Tabella 3 mostra i parametri necessari per replicare la simulazione sul software. Il tempo di apertura e chiusura stampo è il tempo che impiega la pressa per prepararsi alla stampata successiva e

per questa produzione sono necessari circa 6,50 secondi. Si può osservare che la temperatura di preriscaldamento dello stampo e del liquido refrigerante risultano essere di 40°C. Per il materiale considerato le temperature consigliate sono comprese tra gli 80°C e i 100°C (Tabella 1). Per tale motivo, per effettuare le simulazioni comparative tra le diverse configurazioni di raffreddamento questi valori sono stati modificati portando entro il range consigliato la temperatura stampo e quella del liquido refrigerante. Si evita così il rischio di congelare anticipatamente la struttura semicristallina del polimero, ottenendo una microstruttura non voluta. Inoltre per effettuare dei confronti fra le diverse tipologie di layout la portata è stata variata per ottenere il medesimo numero di Reynolds.

SCHEDA DI STAMPAGGIO	
Tempo di iniezione [s]	1,02
Tempo di mantenimento [s]	6,5
Tempo di raffreddamento [s]	20
Tempo apertura e chiusura stampo [s]	6,48
Tempo ciclo totale [s]	34
Temperatura cilindro [°C]	260
Temperatura stampo [°C]	40
Liquido refrigerante	acqua
Temperatura liquido refrigerante [°C]	40
Portata liquido refrigerante [cm ³ /s]	22

Tabella 3 - Scheda di stampaggio Cover

3.2. Acciaio dello stampo

L'acciaio di cui sono fatte le piastre e i tasselli è un tipico acciaio per stampi a caldo: Acciaio 1.2343. Si tratta di una tipologia di acciaio con elevate caratteristiche di resistenza all'usura a caldo, associate a insensibilità alla fatica termica. Le sue proprietà principali sono riportate in Tabella 4.

ACCIAIO 1.2343	
Densità [Kg/m ³]	7750
Conducibilità termica [W/m·K]	26
Calore specifico [J/Kg·K]	462

Tabella 4 - Proprietà acciaio 1.2343

3.3. Numero di Reynolds

Per il liquido refrigerante nel condotto di raffreddamento sarebbe dispendioso effettuare un'analisi fluidodinamica con software dedicati. La versione disponibile in azienda di Moldex3D 15.0 richiede in input la portata e il diametro della condotta. Noti tali valori calcola il numero di Reynold in ingresso. Il numero di Reynold è un numero adimensionale dato dalla seguente formula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

dove:

ρ : densità del liquido refrigerante [Kg/m³];

v : velocità di ingresso [m/s];

D : diametro condotta [m];

μ : viscosità dinamica [Kg/m·s].

Il numero di Reynolds è il rapporto tra le forze di inerzia e quelle viscosi. [14] Dal diagramma di Moody è possibile vedere il Numero di Reynolds critico che determina il passaggio tra la zona di transizione e il regime completamente turbolento (linea tratteggiata).

Il regime turbolento determina un aumento del coefficiente di scambio termico dell'acqua. [15] Tuttavia per valori eccessivamente elevanti del numero di Reynold si possono generare vortici che non sono da confonde con la turbolenza.

I vortici generano un flusso instazionario. Per la teoria della turbolenza di Kolmogorov i vortici hanno una grandezza pari alla dimensione del sistema che lo genera. I vortici di grande scala produrranno vortici via via sempre più piccoli dando origine al fenomeno della “cascata di energia”. L'energia cinetica del fluido non si trasformerà in energia termica ma alimenterà l'energia di vortici sempre più piccoli senza dissipare alcuna energia. Si suppone, per semplicità, un numero di Reynolds di circa 10⁴, ipotizzando che non si abbia generazione di vortici. In Figura 7, supponendo una rugosità di 0,025, e un diametro di 8 mm si ha una scabrezza relativa di 0,003 che per un Reynold di 10000 garantisce un regime turbolento [16]. La ϵ scelta riguarda il caso peggiore, cioè è riferita ad un acciaio forgiato. Considerando che i canali sono ottenuti per sinterizzazione di polvere, che può essere paragonato ad un processo di microfusione, sembra ragionevole considerare questo valore di rugosità superficiale.

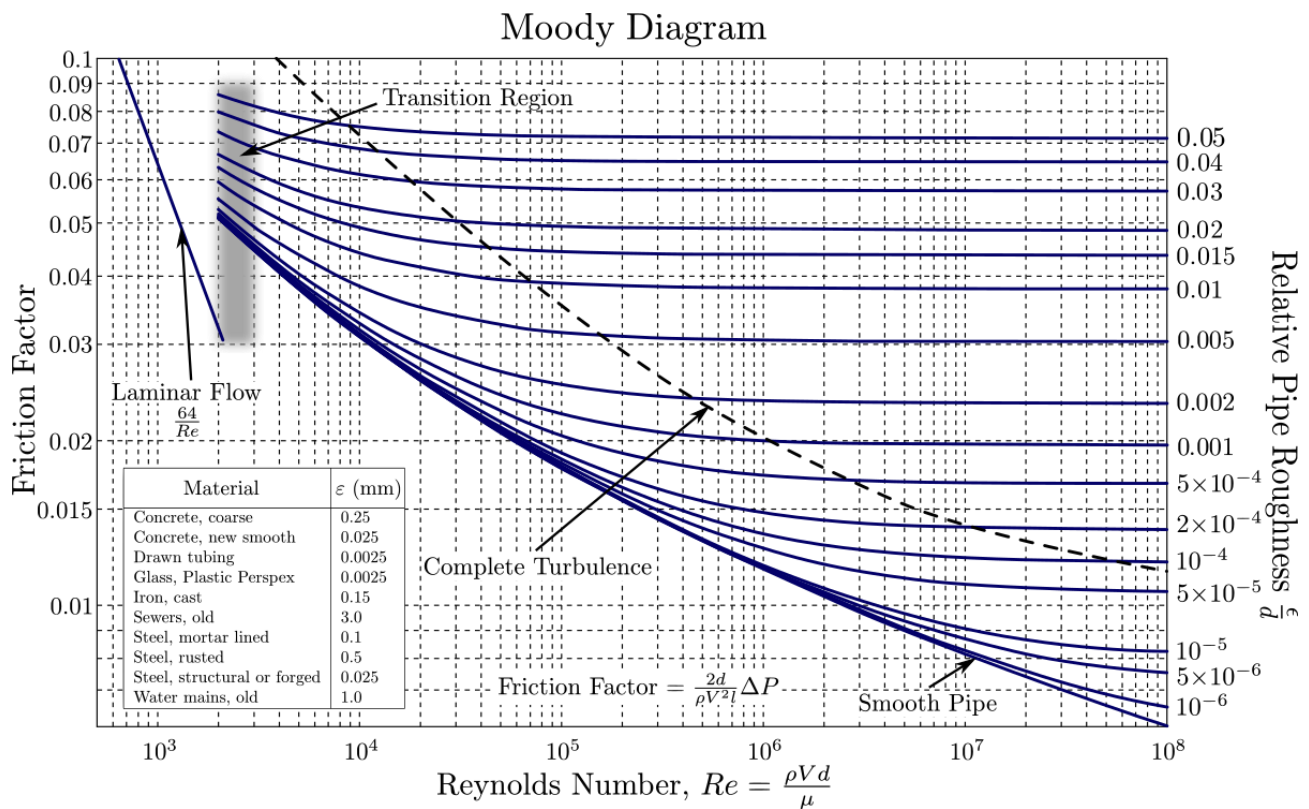


Figura 6- Diagramma di Moody

Moldex3D R15.0 permette di visualizzare l'andamento del numero di Reynold nella condotta. Le cadute di pressione generano una diminuzione di velocità e conseguentemente una diminuzione del Reynold. Per tale motivo i canali devono avere il minor numero di gomiti e cambi di direzione, per ridurre le perdite concentrate, e la minor lunghezza, per ridurre le perdite distribuite. Per ogni simulazione va controllato tale valore per avere la sicurezza che il regime sia completamente turbolento su tutta la lunghezza dei canali.

3.4. La materozza

La materozza del progetto stampo è per un canale freddo. Si è deciso di eseguire la simulazione per una impronta e per questo motivo è stata modificata con il Software CAD Visi 2016 R1.

Il tempo di riempimento resta il medesimo, ed è il CAE Moldex3D che, calcolando il volume totale da riempire (pezzo e materozza) stabilisce la portata.

La materozza è stata quindi modificata per simulare il riempimento di un'unica cavità. In Figura 8 si può vedere la carota che ha un diametro iniziale di 3 mm e finale di 6 mm e una lunghezza di 66,05 mm, il runner di diametro 5 mm e lunghezza 20,44 mm e il gate a dente di cinghiale inizia con un diametro di 5 mm e termina con uno di 0,85 mm. L'iniezione sottomarina consente, in fase di estrazione, la separazione della materozza dal pezzo.

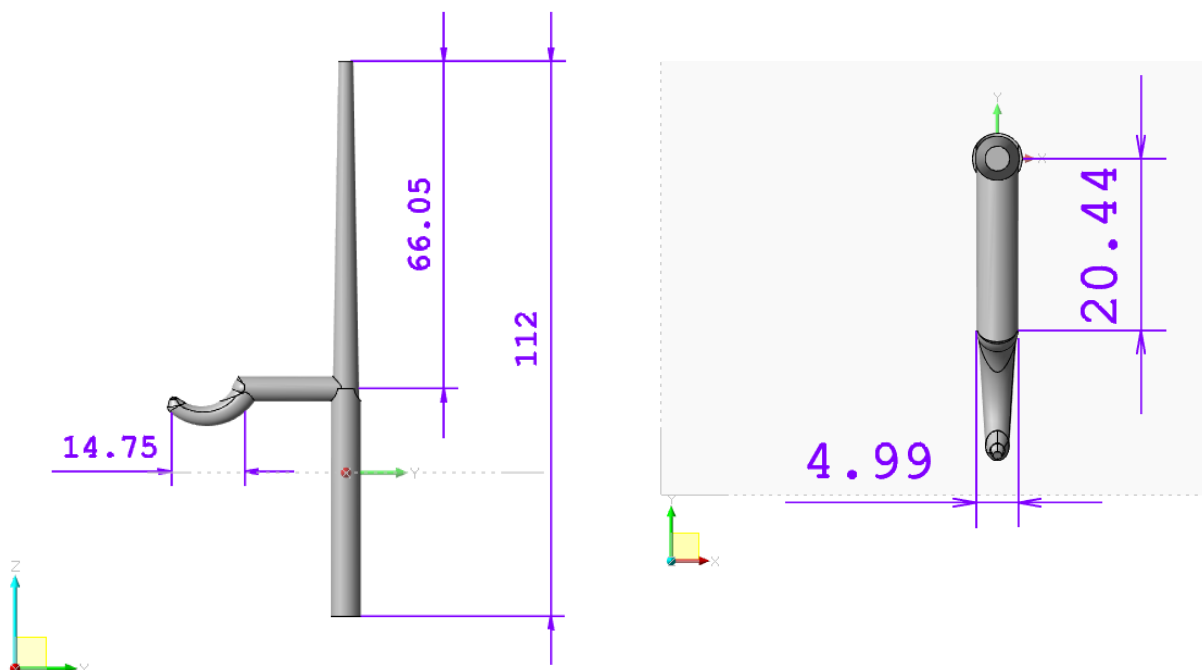


Figura 7 – Materozza

3.5. Punto di iniezione e discretizzazione del modello

Prima di eseguire la simulazione, si è discretizzato il modello con Moldex3D Designer. La mesh è una mesh solida, cioè discretizza l'intero volume del solido. Le mesh generate sono due: per il pezzo

e per la materozza. I file dei due elementi sono stati salvati da Visi in formato “step”. In Figura 9 si vede il posizionamento del punto di iniezione in rosso, cioè il punto in cui l’ugello si accoppia con la boccia di iniezione. L’anello di centraggio garantisce la perfetta coassialità tra ugello e materozza.

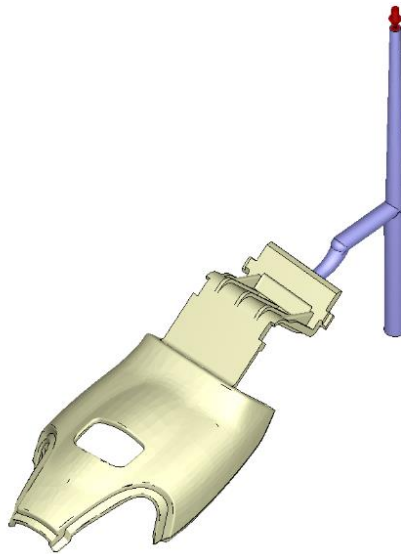


Figura 8 - Punto di iniezione

Si è scelto un livello di accuratezza della mesh di 4 su 5, che per le dimensioni del componente in esame è una buona qualità di mesh (Figura 10). Con questo livello, il programma genera mesh più elaborate ed esegue l’analisi CAE in modo accurato. Tuttavia è necessario notare che sono richieste più risorse hardware.

Questo è un livello avanzato per ottenere un’analisi completa di iniezione (riempimento, mantenimento, raffreddamento e deformazione) per parti sottili e complicate.

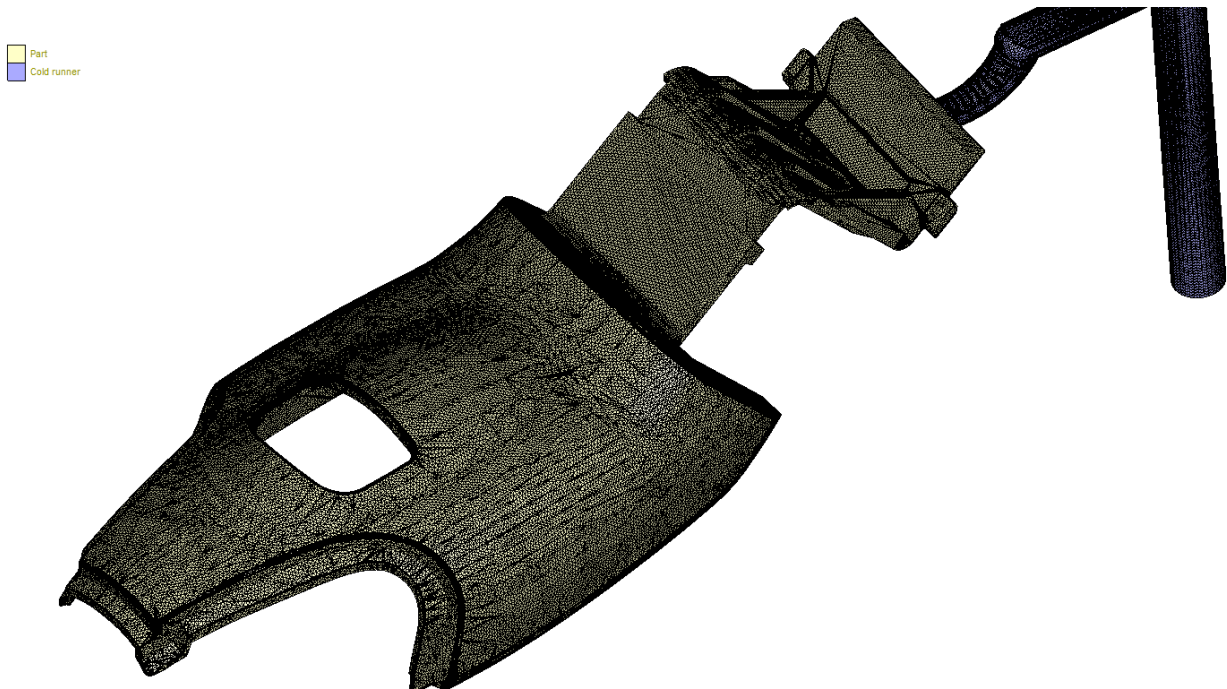


Figura 9 - Mesh della Cover

Ricordiamo che il modello del pezzo è sovradimensionato considerando un ritiro volumetrico uniforme dello 0,6 %. Nella Tabella 6 che segue sono riportati i valori della mesh.

MESH	
Meshing level	4
Part mesh node count	1478166
Part mesh element count	1744690
Runner mesh node count	272225
Runner mesh element count	285828
Part mesh volume [cm ³]	10,6685
Part volume [cm ³]	10,7064
Scostamento percentuale volume parte [%]	0,35
Runner mesh volume [cm ³]	2,75976
Runner volume [cm ³]	2,77705
Scostamento percentuale volume runner [%]	0,62

Tabella 6 – Mesh

4. PRE-ANALISI DI RAFFREDDAMENTO

Per la progettazione dei canali conformali è stata effettuata una simulazione con canali di raffreddamento opportunamente lontani in modo tale che il sistema di condizionamento non influenzasse il comportamento reologico del pezzo nello stampo. In questo modo è stato possibile individuare le zone soggette alle temperature maggiori presenti nella cavità durante la fase di raffreddamento. I parametri utilizzati per la simulazione sono quelli della scheda parametri, eccetto per la temperatura dello stampo e del liquido refrigerante di 90°C. È importante ricordare che il raffreddamento comincia all'inizio del mantenimento. Questo significa che la temperatura media della cavità raggiunge il suo massimo in questo intorno di tempo e poi decresce fino a quando si raggiunge una temperatura sufficiente per poter estrarre il pezzo. L'istante di tempo scelto per effettuare un'analisi comparativa delle temperature è, quindi, in fase di mantenimento e in particolare dopo il congelamento del gate.

Il congelamento del gate, infatti, è il momento in cui termina il passaggio di materiale e non si ha più una vena fluida che collega il pezzo alla materozza. È questo il momento in cui il materiale fuso proveniente dalla vite di plastificazione non fluisce più nel componente e quindi quest'ultimo è libero di poter raffreddarsi scambiando calore con lo stampo che risulta essere a temperatura inferiore.

4.1. Mold base e canali di raffreddamento

Il mold base ha un volume minore rispetto a quello delle piastre, l'ingombro è: (220 x 160 x 165) mm. I canali di raffreddamento sono stati disegnati direttamente dal Software CAE Moldex3D, sono quattro, rettilinei e con diametro di 5 mm, sufficientemente distanti per poter dire che non influenzano il comportamento reologico e la termodinamica del componente durante la fase di stampaggio. Le frecce in blu indicano gli ingressi, quelle in azzurro le uscite dell'acqua (Figura 11).

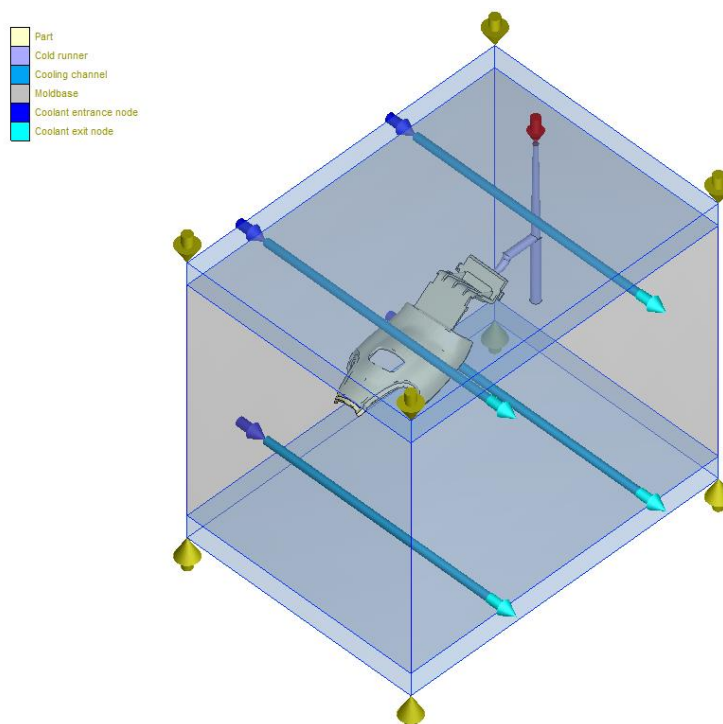


Figura 10 - Mold base e canali di raffreddamento ininfluenti

4.2. Simulazione con canali di raffreddamento ininfluenti

La simulazione con canali di raffreddamento sufficientemente distanti dal pezzo consente di individuare le zone del componente con temperatura maggiore. Tali zone sono quelle che raffreddano per ultime e quindi necessitano maggiormente di un sistema di condizionamento che consenta di ridurre la durata del ciclo produttivo.

I dati di stampaggio scelti sono quelli della scheda parametri con differente temperatura dello stampo, dei canali di raffreddamento e della portata di refrigerante. La portata d'acqua è stata modificata, in relazione al diametro, per avere un numero di Reynolds di circa 10000.

PARAMETRI DI SIMULAZIONE	
Tempo di iniezione [s]	1,02
Tempo di mantenimento [s]	6,5
Commutazione VP [%]	98
Tempo di raffreddamento [s]	20
Temperatura cilindro [°C]	260
Temperatura stampo [°C]	90
Liquido refrigerante	acqua
Temperatura liquido refrigerante [°C]	90
Diametro canali [mm]	5
Portata liquido refrigerante [cm ³ /s]	13
Temperatura aria [°C]	25

Tabella 5 - Parametri di simulazione senza raffreddamento

La commutazione al VP è del 98%, significa che in fase di riempimento viene iniettato il 98% del volume totale (13,428 cm³).

4.3. Hot spots e zone a elevato flusso termico

In fase di mantenimento inizia un graduale raffreddamento del pezzo. La pressa esercita una pressione per compensare i volumi dovuti al ritiro volumetrico del materiale. Il momento in cui la pressa termina questo trasferimento di pressione in cavità coincide con il congelamento del gate. In tale istante l'intero volume del pezzo è in cavità e inizia a raffreddarsi. Non è possibile individuare esattamente l'istante di congelamento del gate in quanto il Software, su richiesta dell'utente, registra intervalli di tempo per le singole fasi dell'analisi. Gli steps per il packing sono 8 e sono riportati in Tabella 6.

TIME STEPS PACKING [s]							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,732	1,573	2,356	3,002	3,668	4,354	5,060	5,788

Tabella 6 - Time steps packing

L'istante di tempo considerato per l'analisi delle temperature si individua nello step 6. In Figura 12 è rappresentata in blu la vena fluida.

Si osserva che in prossimità del gate non c'è vena fluida che trasferisce pressione alla cavità. Si può anche notare che nella cavità c'è una zona significativa che ancora non si è solidificata, cioè è ad una temperatura superiore a quella di congelamento. Questo significa che tale zona è quella che necessita di maggior raffreddamento. L'area in questione è in corrispondenza del foro di ingresso della vite per il collegamento tra il supporto e la cover.

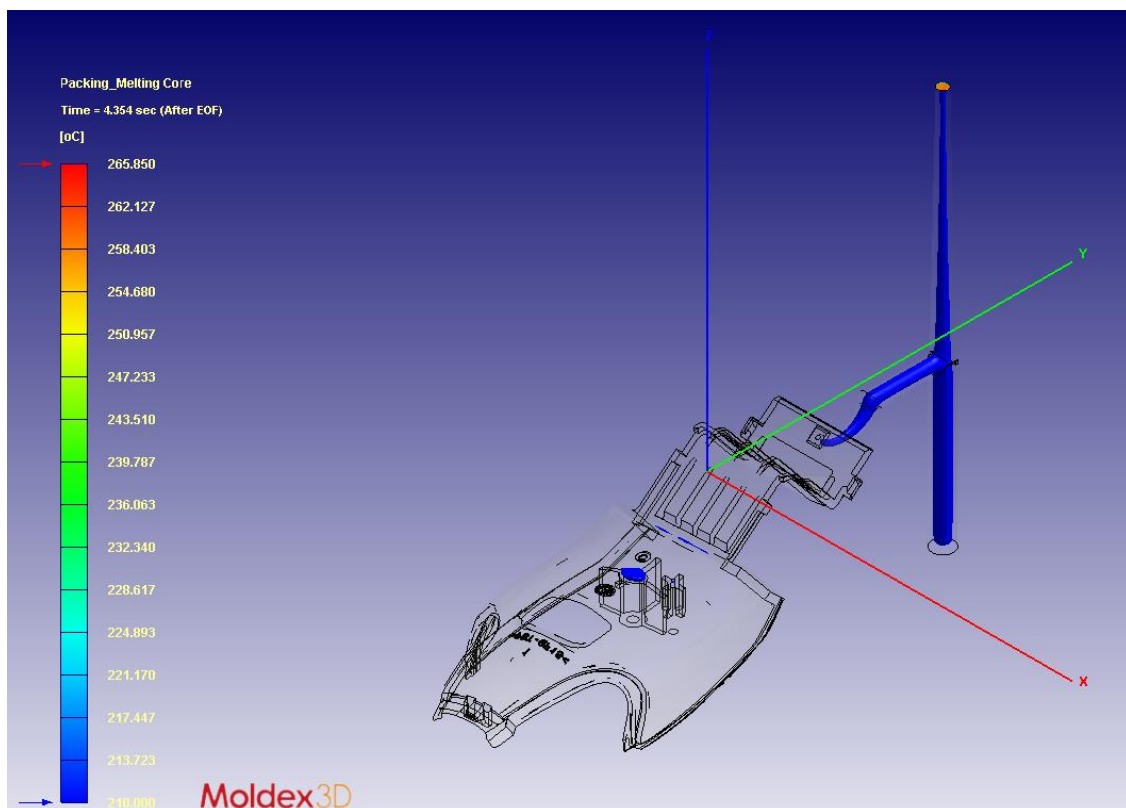


Figura 11 – Congelamento del gate

In Figura 13 e 14 sono riportate le massime temperature sul pezzo a 4,354 secondi di mantenimento che evidenziano i punti caldi, cioè le zone a temperatura maggiore.

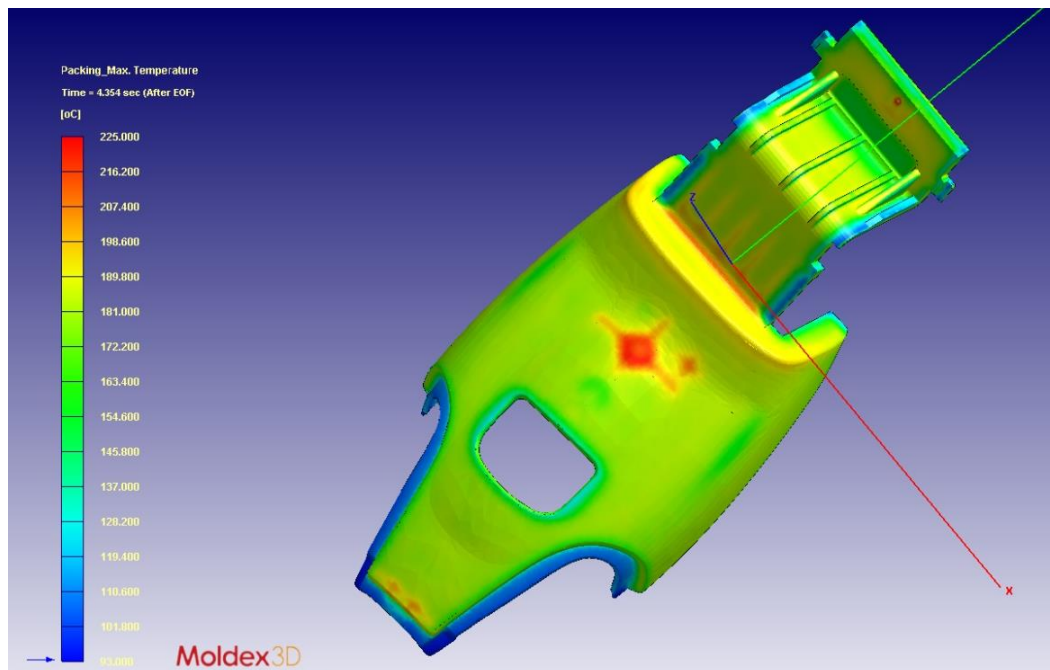


Figura 12 – Temperature massima vista dall'alto

Si può osservare che nella zona in corrispondenza del foro della vite e nella zona di raccordo tra la parte estetica e la parte a forma di “z” si hanno le temperature maggiori. In superficie si hanno temperature maggiori a quella di congelamento (210°C).

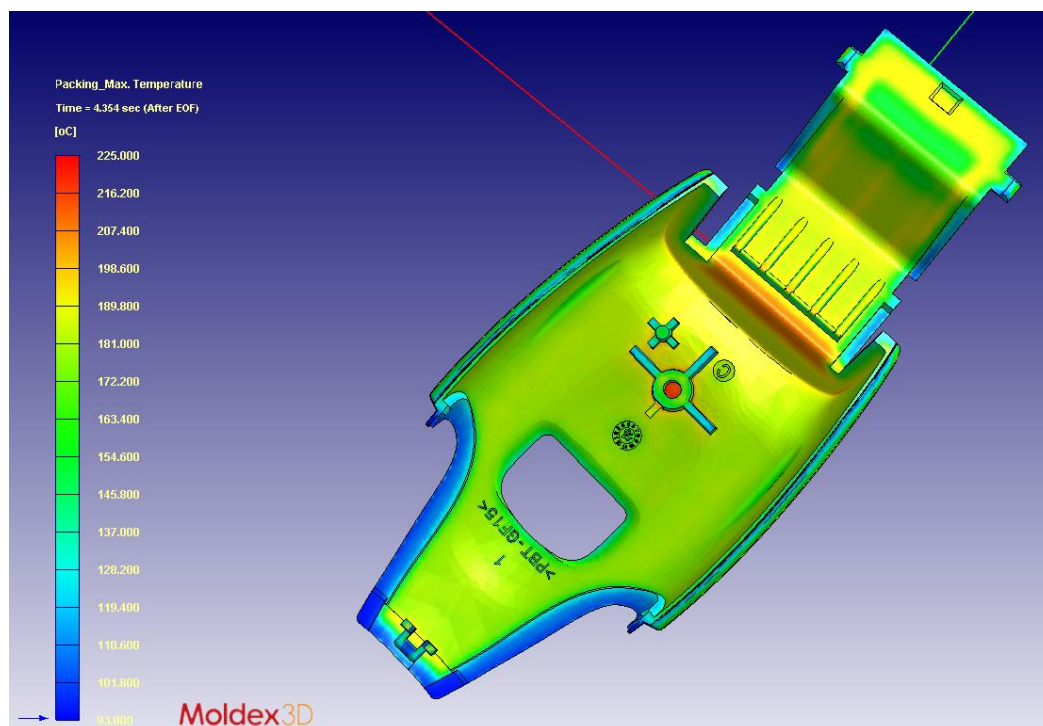


Figura 13 - Temperature massime vista dal basso

In Figura 15 è possibile vedere una sezione del pezzo a 9,338 secondi. Questo è il primo step della fase di cooling. Gli steps della fase di cooling sono 10 e sono riportati in Tabella 7.

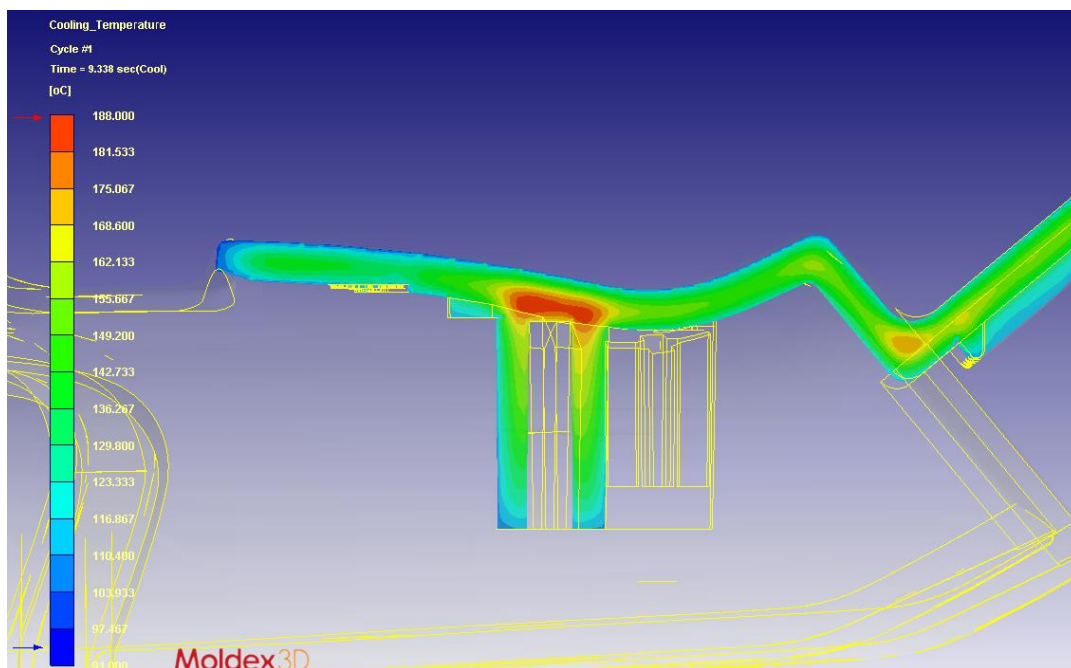


Figura 14 - Temperatura massima a 9,338 secondi senza raffreddamento

TIME STEPS COOLING [s]									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9,338	11,156	12,975	14,793	16,611	18,429	20,247	22,066	23,884	25,702

Tabella 7 - Time steps cooling

Il max cooling time sul pezzo è di 4,445 secondi. Significa che il pezzo può essere estratto ad un tempo uguale o superiore a quello indicato (Figura 16 e Figura 17).

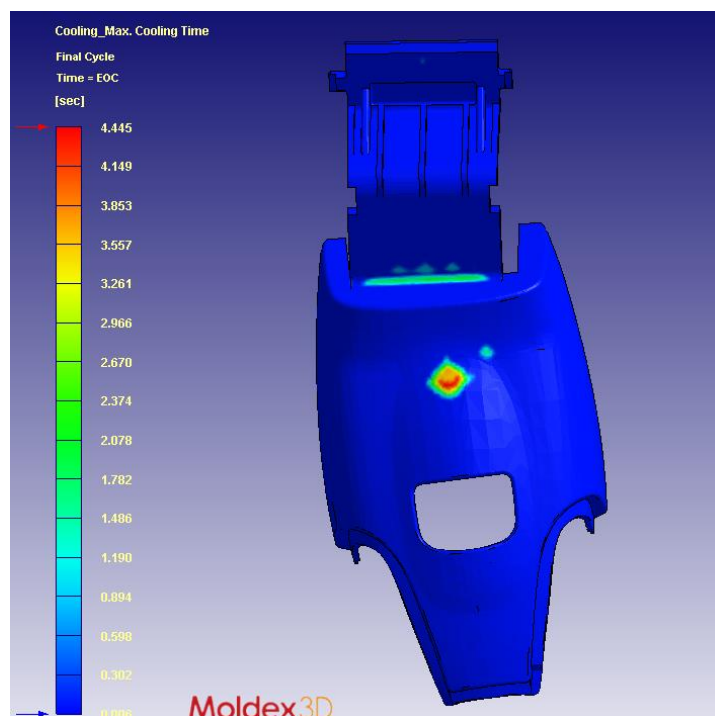


Figura 15 - Max cooling time vista superiore

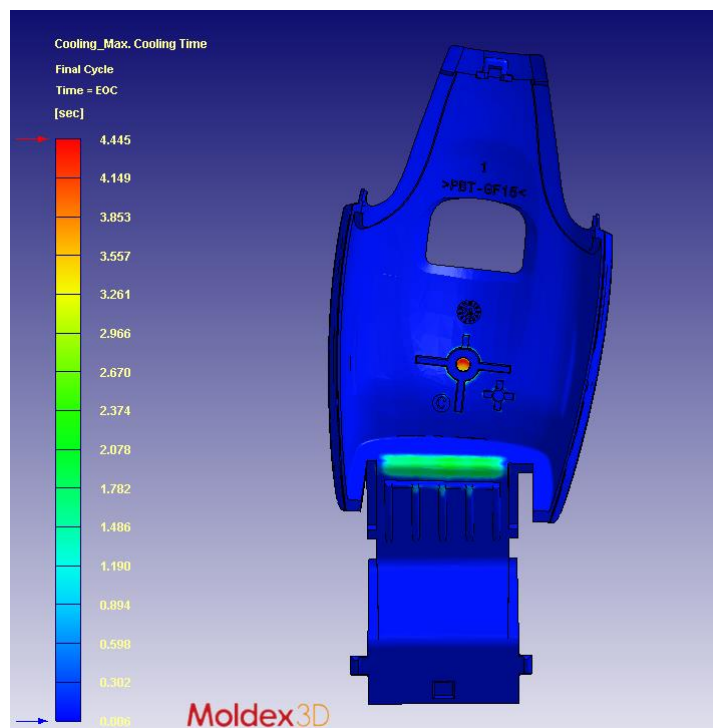


Figura 16 - Max cooling time vista inferiore

5. ANALISI CON LAYOUT TRADIZIONALE

La Figura 18 mostra i 4 plug (rossi) per l'ingresso e l'uscita del liquido refrigerante, gli o-ring per la tenuta tra matrice e piastra (viola) e i tappi per il circuito di condizionamento (verdi).

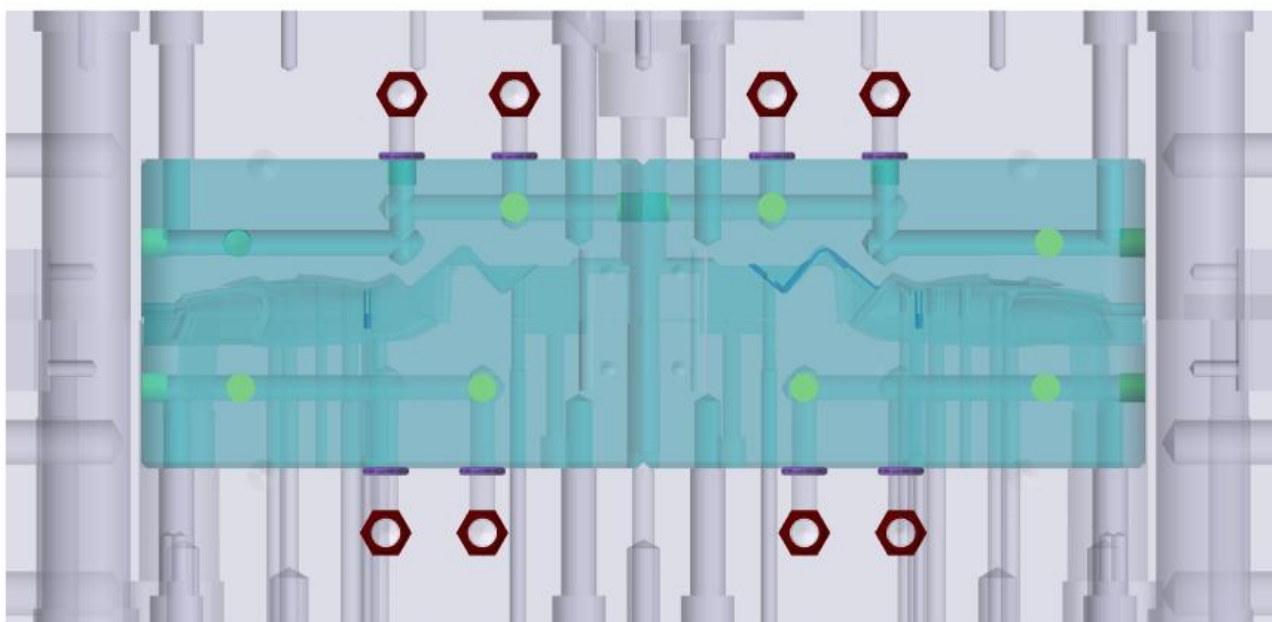


Figura 17 - Vista frontale normalizzata per canali di raffreddamento

Prima di entrare nelle piastre, l'acqua ricircola nei termoregolatori che gestiscono la pressione e la temperatura del liquido refrigerante. I termoregolatori utilizzati sono due: uno per la parte fissa e l'altro per la parte mobile.

La Figura 19 mostra il tassello superiore. Al suo interno sono visibili i canali tradizionali ottenuti con le convenzionali lavorazioni meccaniche. Le frecce indicano l'ingresso e l'uscita dell'acqua nel tassello.

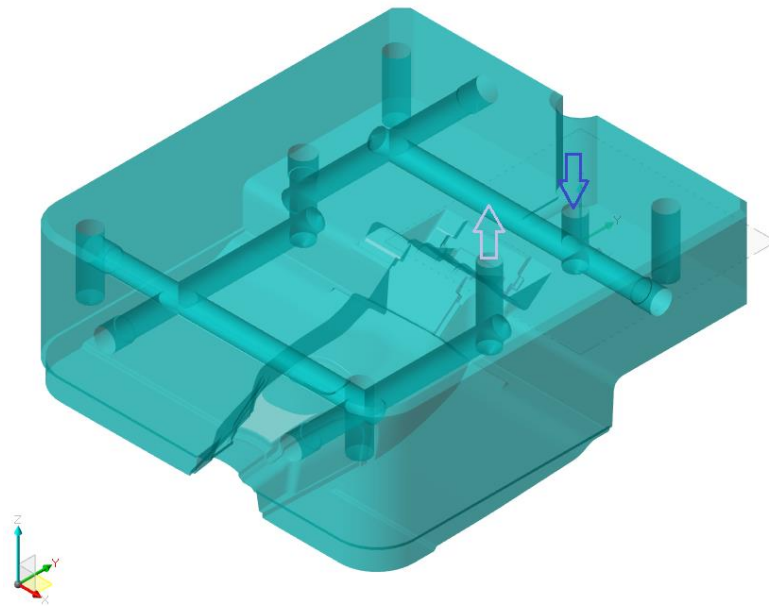


Figura 18 – Vista isometrica tassello superiore

La figura 20 mostra il tassello inferiore. Al suo interno sono ricavati i canali di raffreddamento realizzati nello stampo in produzione. L'acqua che circola all'interno del tassello proviene dalla piastra inferiore. Circola nel tassello, e fuoriesce rientrando nella piastra inferiore.

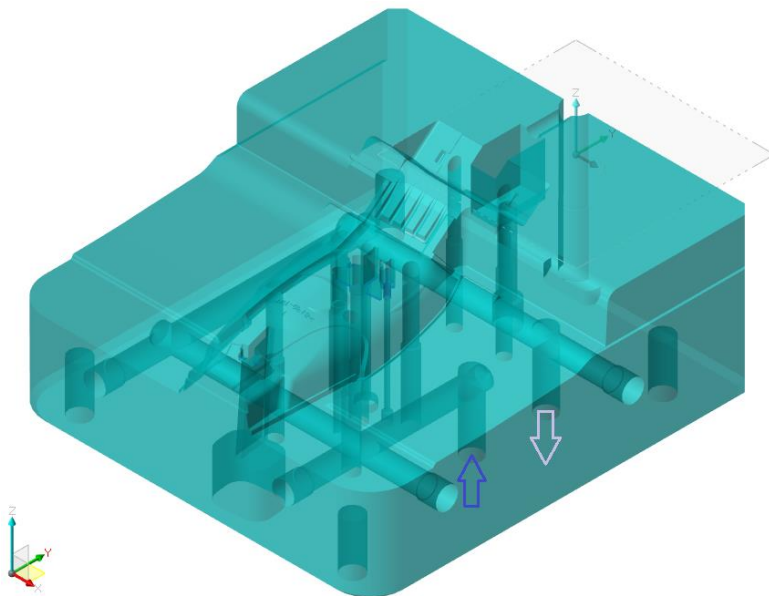


Figura 19 – Vista isometrica tassello inferiore

Per eseguire un confronto con l'analisi senza canali la mesh del pezzo e della materozza nonché il mold base sono i medesimi utilizzati della simulazione dell'analisi di pre-raffreddamento.

I canali sono stati ricavati dai tasselli e dalle piastre e sono stati salvati da Visi 2016 R1, dopodiché sono stati caricati su Moldex3D Designer, come rette in formato “iges”. I canali tradizionali sono ottenuti per foratura con trapano. La spezzata che rappresenta i canali è stata ottenuta in modo tale che si avesse un’unica condotta senza interruzione tra ingresso e uscita, tanto per la parte mobile quanto per la parte fissa (Figura 21). Il diametro dei canali è di 8 mm. In Tabella 8 sono riportati i parametri di stampaggio della simulazione.

PARAMETRI DI SIMULAZIONE	
Tempo di iniezione [s]	1,02
Tempo di mantenimento [s]	6,5
Commutazione VP [%]	98
Tempo di raffreddamento [s]	20
Tempo apertura stampo e movimentazione robot [s]	6,48
Temperatura cilindro [°C]	260
Temperatura stampo [°C]	90
Liquido refrigerante	Acqua
Temperatura liquido refrigerante [°C]	90
Diametro canali [mm]	8
Portata liquido refrigerante [cm ³ /s]	22
Temperatura aria [°C]	25

Tabella 8 - Parametri di simulazione con canali convenzionali

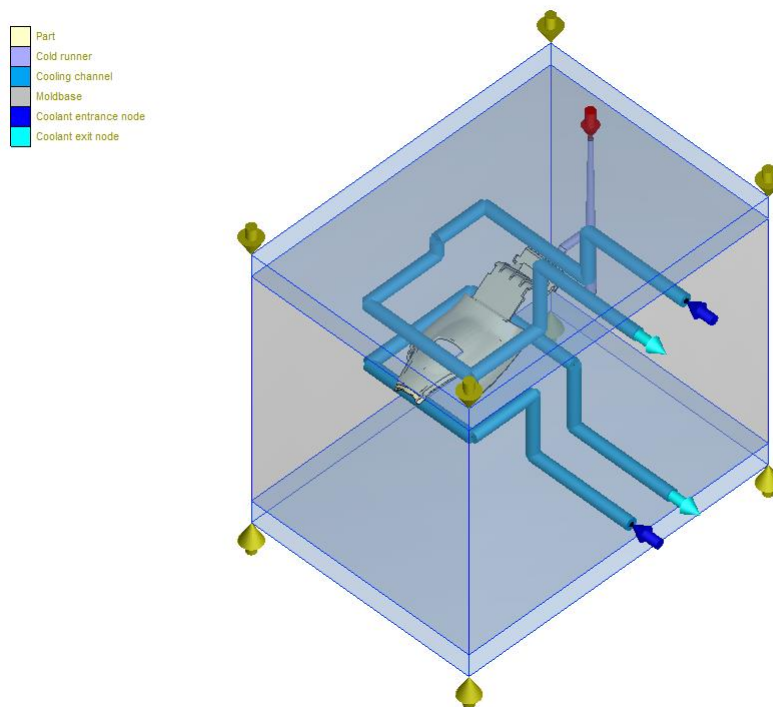


Figura 20 - Mold base e canali di raffreddamento convenzionali

I risultati ottenuti con tale simulazione dimostrano che il raffreddamento non influenza le zone a temperatura maggiore e quindi non incide sulla diminuzione del tempo ciclo sul pezzo. In altre parole, gli hot spots della cavità sono troppo distanti dai canali, questo denota come in fase di progetto non sia stato contemplato uno studio di un sistema di raffreddamento efficiente.

Si può osservare che la distribuzione delle temperature a 9,338 secondi per i canali tradizionali (Figura 22) è pressoché la stessa rappresentata in Figura 15.

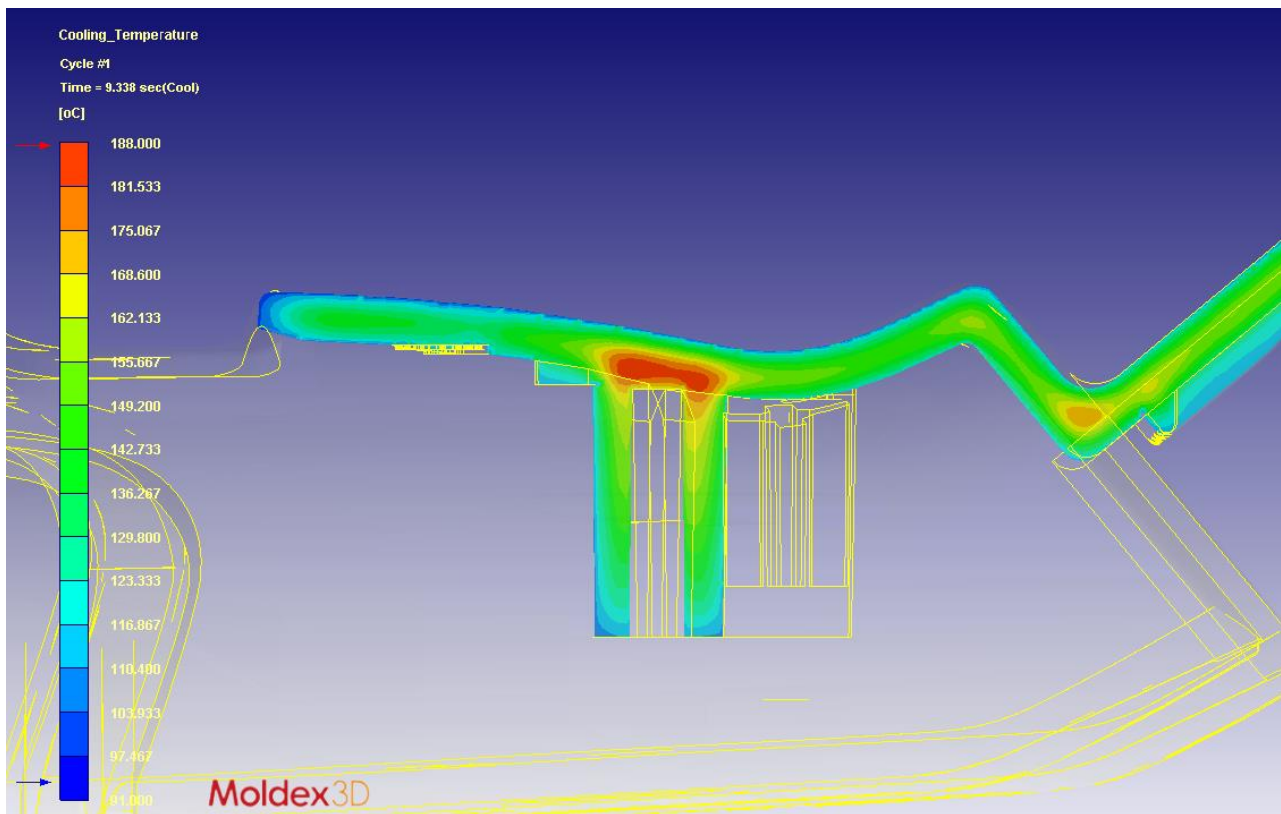


Figura 21- Temperatura massima a 9,338 secondi con canali tradizionali

In figura 23 e 24 è mostrato il massimo tempo di raffreddamento che da 4,445 secondi di raffreddamento della simulazione senza canali diventa di 4,355 secondi. Si ha quindi una diminuzione del 2% del tempo ciclo.

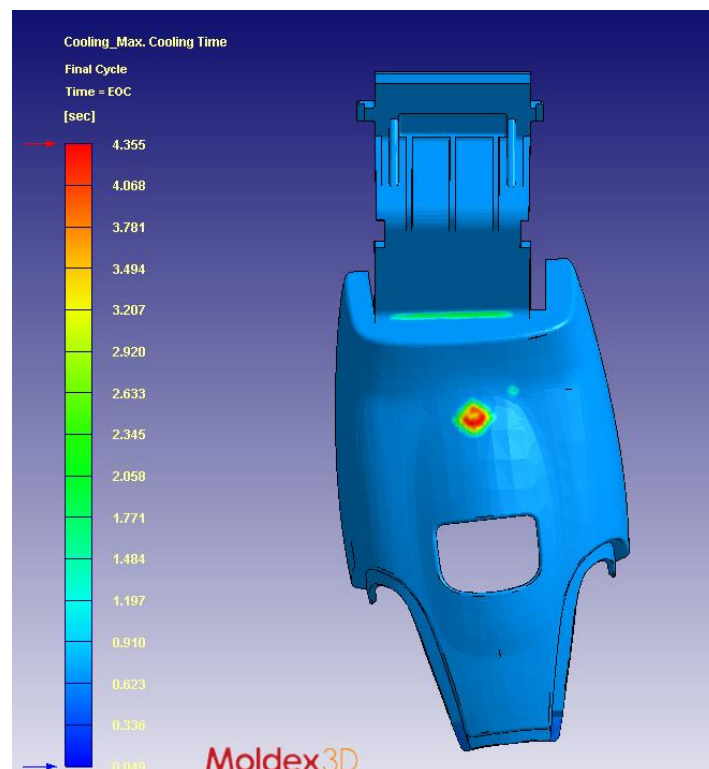


Figura 22 - Max cooling time vista dall'alto

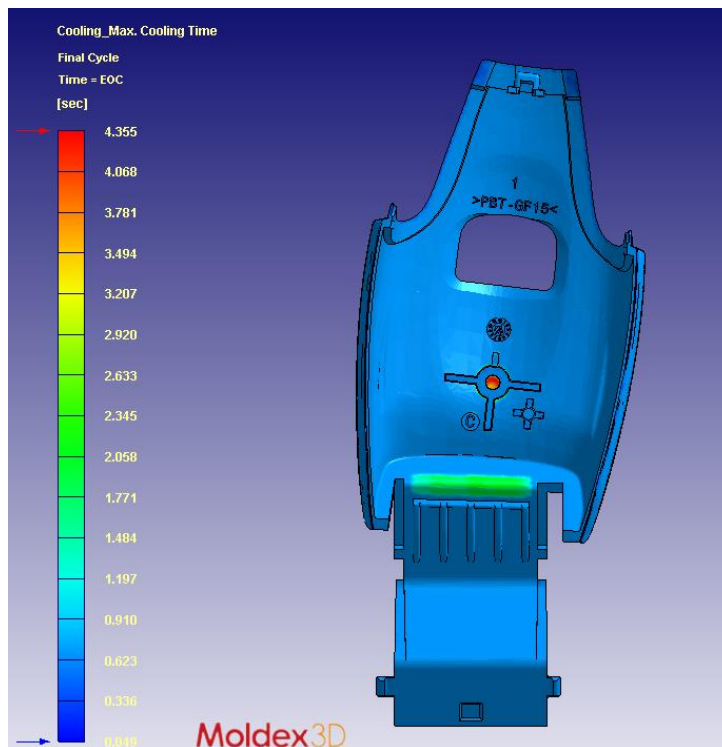


Figura 23 - Max cooling time vista dal basso

Il Diagramma 1 mostra l'andamento della temperatura media della cavità in funzione del flow rate. La temperatura aumenta durante la fase di riempimento per poi iniziare a diminuire dall'inizio della fase di mantenimento.

La temperatura media aumenta dalla prima stampata alla seconda poiché il processo sta raggiungendo le condizioni di regime. La temperatura media della cavità è minore con la simulazione utilizzando i canali tradizionali rispetto alla simulazione senza i canali.

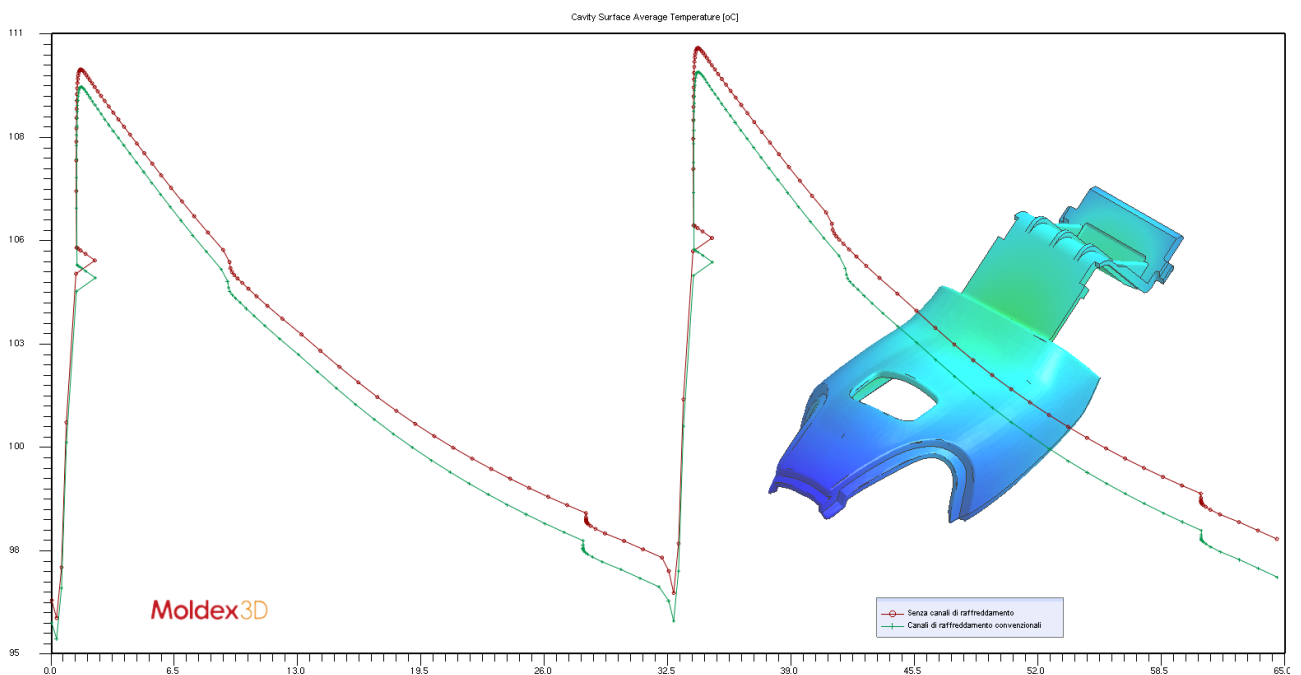


Diagramma 1 - Cavity Average Temperature

6. ANALISI CON INSERTO CU-BE

Prima di progettare un raffreddamento di tipo conforme, come conseguenza della pre-analisi di raffreddamento, si è pensato di effettuare una simulazione senza il contributo del sistema di raffreddamento e con il tassello presente nell'estrattore a cannocchiale costituito da una lega in rame-berillio (Figura 25). Il foro presente nella cover ha una profondità di 1 cm e il calore può essere asportato in questa zona utilizzando degli elementi con una conducibilità termica maggiore di quella dell'acciaio.

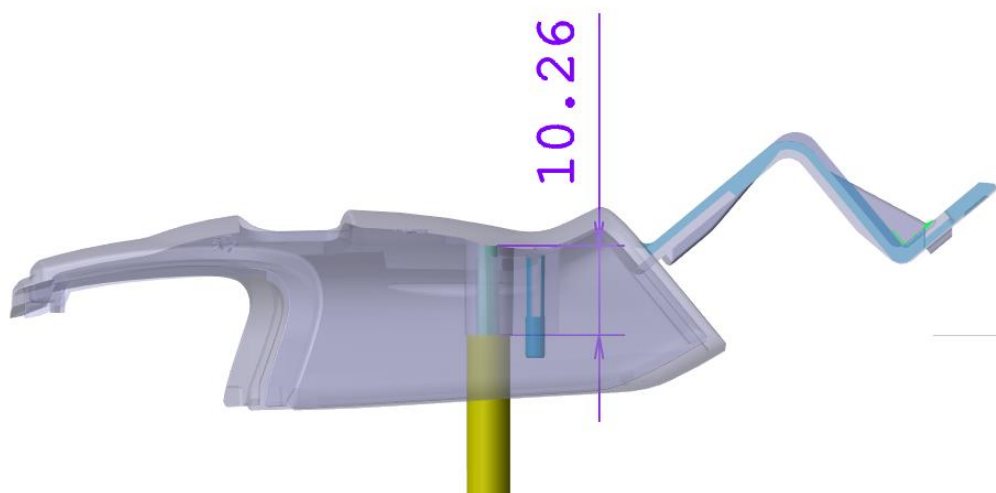


Figura 24 – Bussola di estrazione

In Figura 26 è rappresentato il mold base, i canali di raffreddamento, pezzo e materozza e il punzone in rame-berillio (in giallo). La lunghezza del tassello è stata ridotta per poter farlo entrare nel volume del mold base.

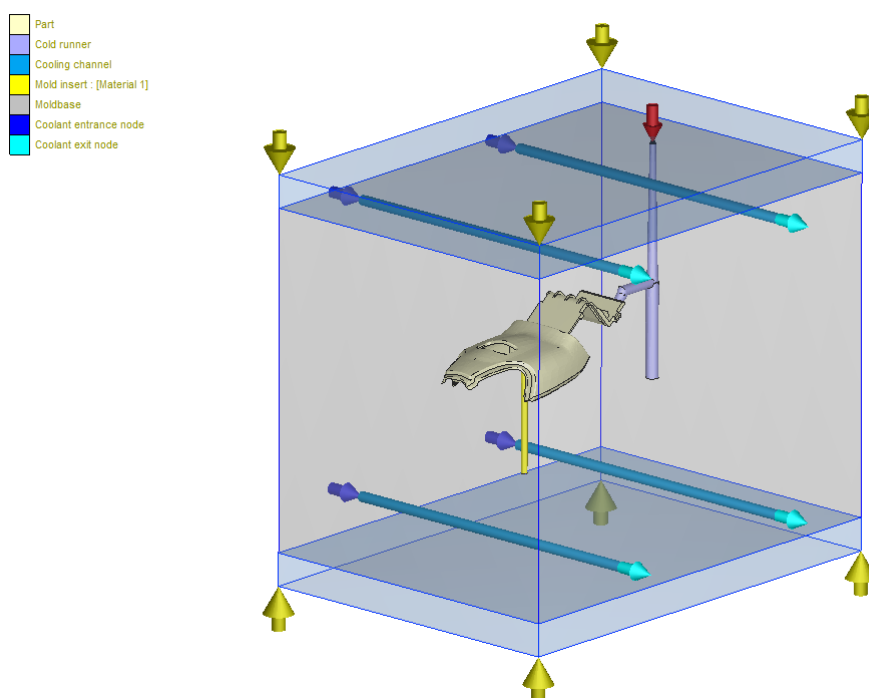


Figura 25 - Mold base senza raffreddamento con punzone in Cu-Be

I dati di stampaggio sono gli stessi della simulazione di pre-raffreddamento (Tabella 6).

La lega in rame-berillio scelta per la simulazione è l'Ampcoloy® 83. L' Ampcoloy® 83 è una lega di rame al 1,9 % di Berillio che mostra alte proprietà meccaniche e con buona conducibilità elettrica e termica. In Tabella 9 è riportata la composizione nominale della lega.

COMPOSIZIONE NOMINALE		
Cobalto + Nickel	(Co + Ni)	0,5 %
Berillio	(Be)	1,9 %
Altri	-	Max, 0,5 %
Rame	(Cu)	Balance

Tabella 9 - Composizione nominale

Alcune proprietà fisiche sono riportate in Tabella 10. La conducibilità termica della lega è quattro volte quella dell'acciaio utilizzato per la realizzazione dello stampo.

AMPCOLOY® 83	
Densità [Kg/m ³]	8260
Conducibilità termica [W/m·K]	106
Calore specifico [J/Kg·K]	380

Tabella 10 - Composizione nominale

La temperatura del tassello è di 90°C, uguale alla temperatura stampo. Con l'utilizzo del tassello in rame-berillio si riesce ad asportare una considerevole quantità di calore in fase di raffreddamento.

La Figura 27 mostra la diminuzione della temperatura massima a 9,338 secondi rispetto alla simulazione con i canali tradizionali (Figura 22).

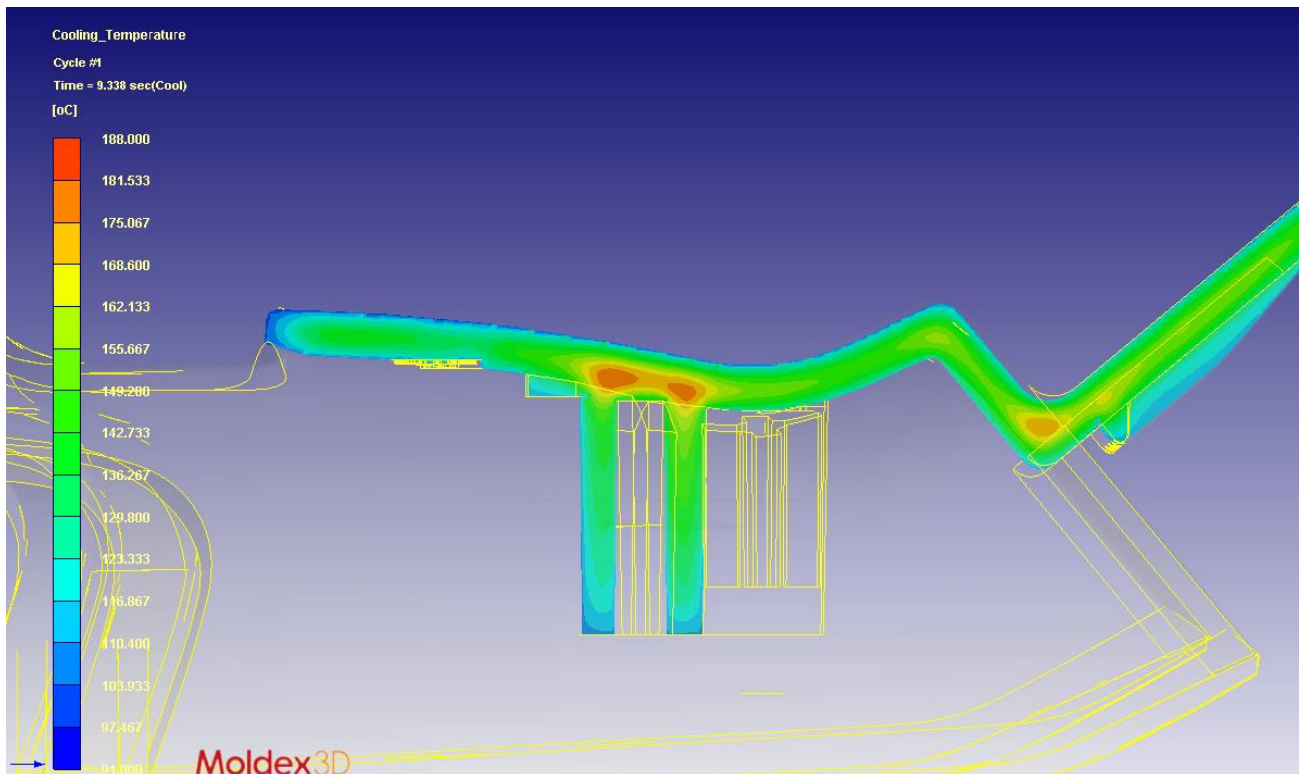


Figura 26 - Temperatura massima a 9,338 secondi con inserto Cu-Be

Il massimo tempo di raffreddamento sul pezzo si riduce da 4,335 secondi con il raffreddamento tradizionali a 2,555 secondi, quindi si ha una riduzione del 41,33 % del tempo ciclo sul pezzo (Figura 28 e Figura 29).

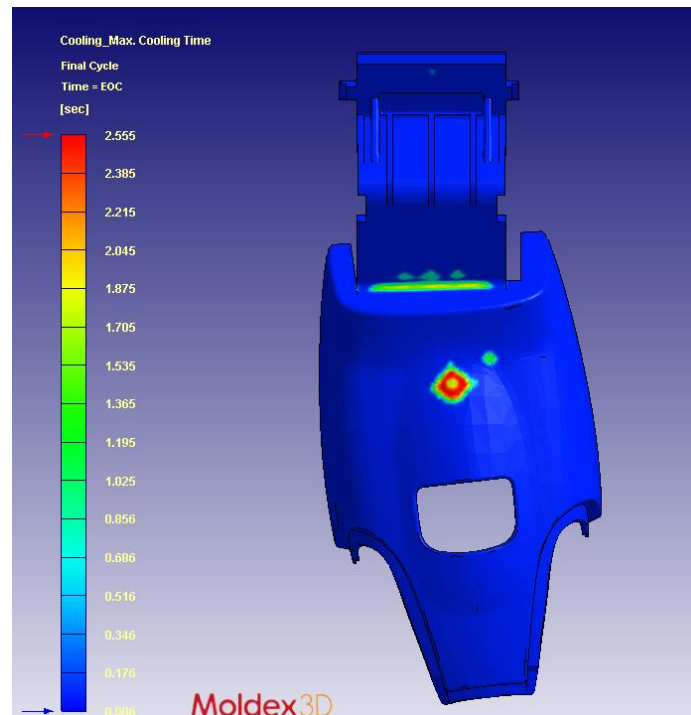


Figura 27 - Max cooling time vista dall'alto

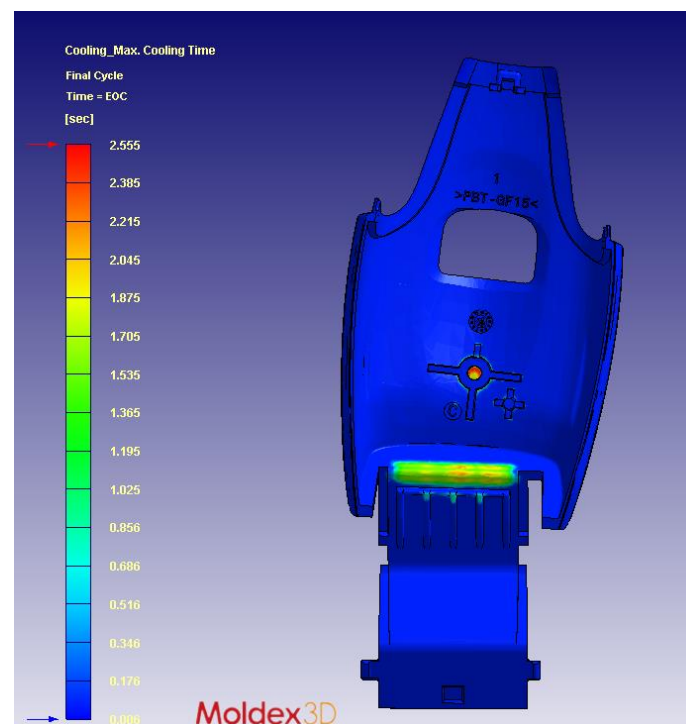


Figura 28 - Max cooling time vista dal basso

Si comprende come intervenendo localmente sulla zona a spessore maggiore si può ridurre il tempo ciclo sul pezzo ma la temperatura media della superficie della cavità non varia (Diagramma 2).

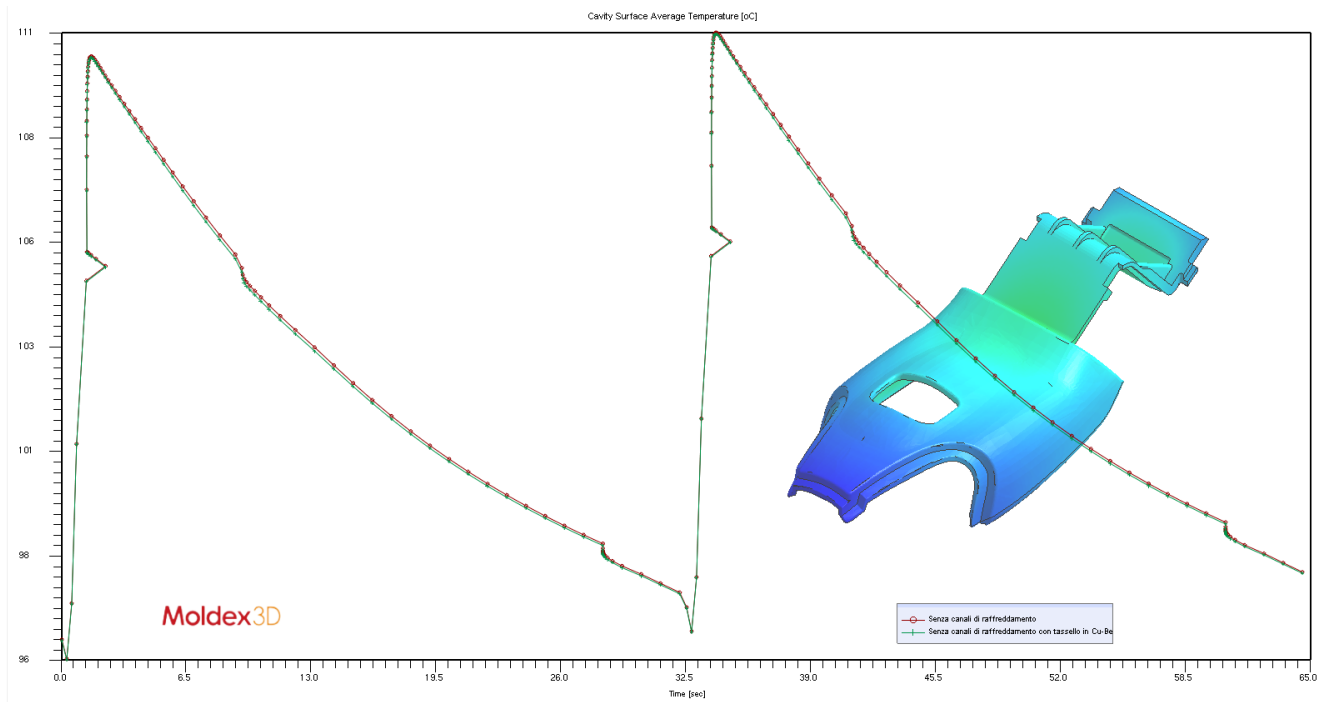


Diagramma 2 - Cavity Surface Average Temperature

7. IL CONFORMAL COOLING

L'industria dello stampaggio a iniezione, come tutte le industrie, ha l'esigenza di ridurre i costi di produzione per essere competitiva sul mercato. Questo bisogno è stato affrontato utilizzando software di progettazione fino a effettuare lavorazioni con macchine a controllo numerico. Il passo successivo, dettato dalla necessità di mercato, è quello di ridurre il tempo ciclo dello stampo.

Il tempo è dettato dalla capacità del sistema di condizionamento di asportare calore dalla massa di polimero fuso. I canali di raffreddamento devono rimuovere il calore il più rapidamente possibile e contemporaneamente consentire al polimero fuso di riempire completamente la cavità dello stampo.

Fino a pochi decenni fa i canali di raffreddamento erano ottenuti per foratura. Questa presenta la limitazione di poter produrre canali rettilinei. Il passaggio successivo è stato quello di realizzare canali che potessero essere conformi alla forma della parte e che cambiassero la loro sezione trasversale dove si richiedeva una maggiore o minore area di scambio termico.

Il raffreddamento è la fase più incidente a livello temporale sulla durata del ciclo, infatti occupa il 70%-80% dell'intero ciclo produttivo. Un buon sistema di raffreddamento può ridurre il tempo di stampaggio e quindi ridurre il tempo dell'intera produzione. I canali conformali ottenuti con Additive Manufacturing sono attualmente utilizzati per particolari applicazioni per ridurre il tempo ciclo.

Prima di arrivare ai canali ottenuti con sinterizzazione laser si possono realizzare dei canali conformali ottenuti con le tradizionali lavorazioni meccaniche. Si possono ottenere layout più complessi ma le forme sono limitate al tipo di lavorazione effettuata. I cambi di direzione del fluido localizzati nei raccordi generano perdite di carico localizzate.

Queste perdite di carico sono dovute alla presenza, sul circuito idraulico, di organi meccanici e/o di pezzi speciali che fanno variare la direzione ovvero la sezione di passaggio del fluido e vengono a crearsi per le turbolenze che si manifestano in vicinanza di tali pezzi (raccordi, misuratori, valvole). [15] Con il metodo diretto, che utilizza i coefficienti di attrito che dipendono dalla forma e dalla geometria dei pezzi speciali, è possibile calcolare le perdite di carico localizzate:

$$\Delta H = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

dove:

k = coefficiente di resistenza localizzata;

v = velocità media [m/s];

g = accelerazione di gravità [m/s²].

Il coefficiente k dipende essenzialmente dalla configurazione geometrica e dal numero di Reynolds. Spesso, però, la dipendenza dal numero di Reynolds è trascurabile.

Per i canali tradizionali, le perdite concentrate si hanno all'ingresso, all'uscita e nei raccordi a T a spigolo vivo. La semplificazione di rappresentare i canali come rette spezzate comporta una facilitazione del calcolo ma nella realtà la fluidodinamica è diversa in quanto si ha una diramazione a T del fluido. Il coefficiente di resistenza localizzata è maggiore nella realtà e quindi le perdite di carico sono superiori rispetto a quelle della simulazione.

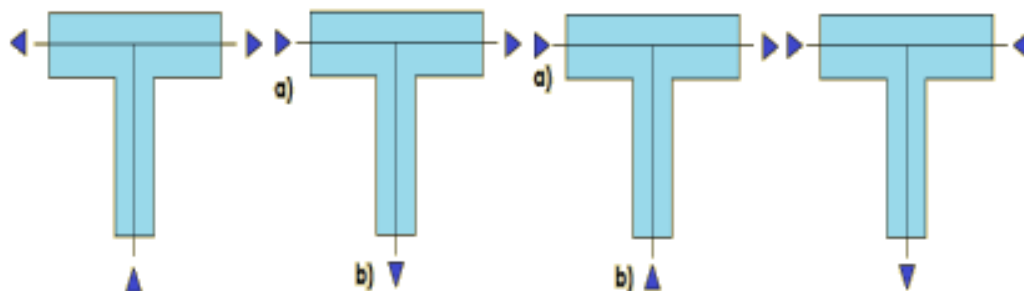


Figura 29 - Raccordi a T a spigolo vivo

I valori del coefficiente di resistenza localizzata per raccordi a T a spigolo vivo sono:

k = 2,00 diramazione doppia con T a squadra (90°);

k = 0,50 diramazione semplice con T a squadra, in direzione a);

k = 1,50 diramazione semplice con T a squadra in direzione b);

k = 0,50 confluenza a squadro in direzione a);

k = 1,00 confluenza a squadro in direzione b);

k = 2,00 confluenza doppia con T a squadra;

k = 0,50 confluenza semplice ovvero diramazione semplice con angolo inclinato (45° ÷ 60°).

Per il conformal cooling, le perdite concentrate si hanno all'ingresso, all'uscita e nei gomiti. Considerando che le perdite all'ingresso e all'uscita sono le medesime dei canali tradizionali, analizziamo le perdite nei gomiti.

Nei gomiti il coefficiente k varia in dipendenza dell'angolo di deviazione del canale e del rapporto r/D (Figura 31).

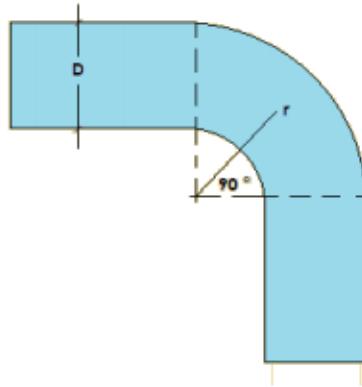


Figura 30 - Raccordo curvilineo a gomito

Coefficiente di resistenza localizzata		
k	Curva [°]	r/D
0,13	45	1,5
0,14	45	2,0
0,18	60	1,0
0,17	60	1,5
0,17	60	2,0
0,29	90	1,0
0,24	90	1,5
0,24	90	2,0

Tabella 10 - Coefficiente di resistenza localizzata per raccordo curvilineo a gomito

Il coefficiente k è sempre più basso rispetto a quelli per i raccordi a T. Anche con uno spigolo vivo di 90° (quello simulato con i canali tradizionali), il coefficiente sarebbe maggiore rispetto ad un canale raccordato. Si può concludere che le perdite di carico sono minori nel caso di canali conformali e questo comporta una maggiore efficienza del sistema di raffreddamento.

Per l'ottimizzazione del sistema di condizionamento non si è analizzato il caso di canali conformali ottenuti con le tradizionali lavorazioni, ma si sono analizzate configurazioni che potessero essere realizzate con le ultime tecnologie di sinterizzazione di polveri metalliche.

L'Additive Manufacturing ha permesso di poter realizzare delle geometrie migliori, con forme libere.

Un'ottimizzazione del sistema di raffreddamento dello stampo permette di ottenere una qualità dei prodotti superiore in quanto migliorano:

- il tempo ciclo;
- il ritiro volumetrico;
- i sink mark;
- il warpage.

Un raffreddamento dello stampo opportuno permette di diminuire le temperature della cavità del componente (o dei componenti) e avere una temperatura uniforme che complessivamente permettono di avere una migliore qualità.

7.1. Conformal cooling design

Il raffreddamento è ottenuto da canali correttamente localizzati. I canali devono essere proporzionati con cura per coprire la maggior parte della superficie di stampaggio.

La forma dei canali di stampaggio è uno dei fattori che incidono in maniera decisiva sull'efficacia del sistema di raffreddamento.

Nel raffreddamento conforme degli stampi, le forme più comuni utilizzate sono in serie e in parallelo. In alcuni casi, quando si hanno forme circolari, possono essere utilizzati dei canali circolari in serie.

Possono essere distinte tre strategie di layout per i canali conformali e sono schematizzate in Figura 32.

Con i conformal a zig-zag le parti del pezzo sono raffreddate una dopo l'altra. Con l'aumento del flusso di raffreddamento, non può essere garantito un raffreddamento uniforme della cavità. Quindi questo tipo è utilizzato per parti con un ingombro contenuto.

Per risolvere questo problema possono essere realizzati canali in parallelo. In questo modo le singole zone della cavità possono essere alimentate da un canale più grande e un altro canale di dimensione maggiore riceve il liquido refrigerante in uscita. Questo consente di avere un raffreddamento uniforme, ma necessita di una portata d'acqua maggiore.

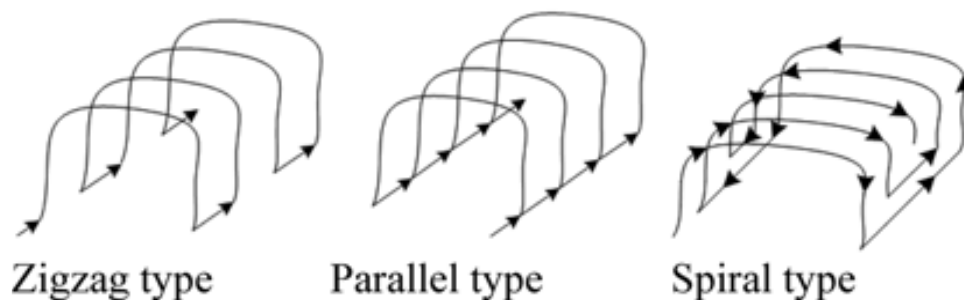


Figura 31 - Tipi di forme dei canali conformali [17]

Il raffreddamento a spirale consente di raffreddare parti che presentano curvature o elementi sferici. [18] Il flusso parte dal contorno e arriva al centro con un layout a spirale. Anche in questo caso la temperatura del refrigerante aumenta allo scorrere del flusso nei canali.

Questi tipi di layout consentono di avere un raffreddamento uniforme in quanto è possibile avere un passo costante dei canali e la loro distanza è mantenuta costante rispetto al pezzo.

Questi tipi di sistemi di canali sono molto flessibili e possono essere utilizzati a seconda delle esigenze. Questo dipende anche dallo stampo per non avere interferenze con gli organi mobili (carrelli, estrattori), sensori e altro.

In Tabella 11 sono riportati dei valori guida per la progettazione dei canali conformali. Il diametro dei canali, in generale, è compreso tra i 4 e i 14 mm. Altre limitazioni alla progettazione sono gli ingombri massimi dei sinterizzati, che dipendono dalla macchina con cui si produce.

In Figura 33 è riportata un'immagine semplificativa dei valori presenti in Tabella 11.

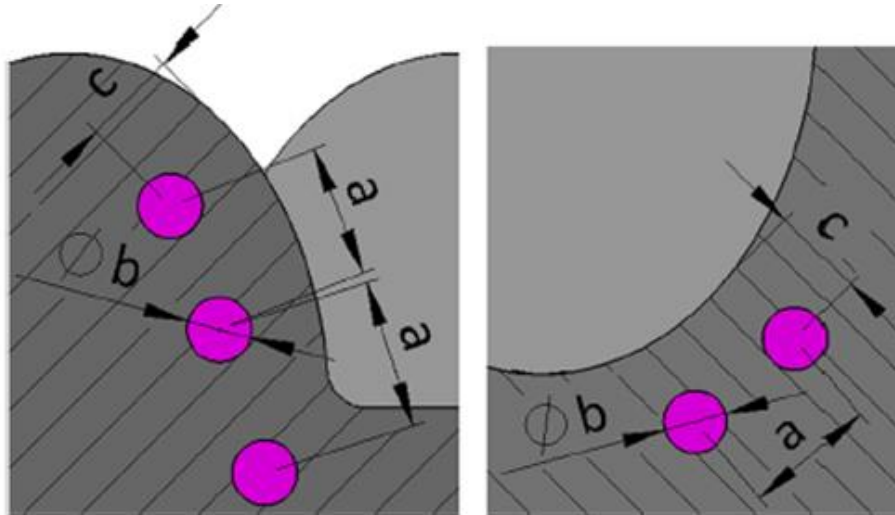


Figura 32 - Conformal cooling design

Spessore del componente [mm]	Diametro foro, b [mm]	Distanza tra i centri dei fori, a [mm]	Distanza tra centro dei fori e cavità, c [mm]
0 – 2	4 - 8	2 – 3 x b	1,5 – 2 x b
2 – 4	8 – 12	2 – 3 x b	1,5 – 2 x b
4 – 6	12 – 14	2 – 3 x b	1,5 – 2 x b

Tabella 11 - Design migliore per sistemi di raffreddamento tridimensionali [19]

7.2. Step 1

La prima ottimizzazione dei canali conformali tiene conto dei risultati ottenuti dall'analisi preliminare. L'analisi preliminare evidenziava una zona critica che determinava un tempo ciclo sul pezzo maggiore.

Considerando che si devono realizzare i tasselli con sinterizzazione laser, la complessità del circuito non determina un aumento delle ore di lavorazione o dei costi.

Quindi si è pensato di creare un prototipo di sistema di raffreddamento che uniformasse le temperature della cavità e che comunque intervenisse anche sugli hot spots. Il pezzo può essere diviso in due zone, la parte estetica e quella a forma di “z”, per le quali sono stati pensati due sistemi di raffreddamento distinti. Tali canali sono stati realizzati in serie e con lo stesso passo. Gli unici vincoli imposti in fase di realizzazione sono stati due: canali realizzati nel volume dei tasselli e gli ingressi nonché le uscite fossero situati sulle piastre (per effettuare un confronto con quelli tradizionali, realizzati in modo analogo).

I gruppi di raffreddamento della piastra superiore e inferiore sono rappresentati rispettivamente in Figura 34 e Figura 35.

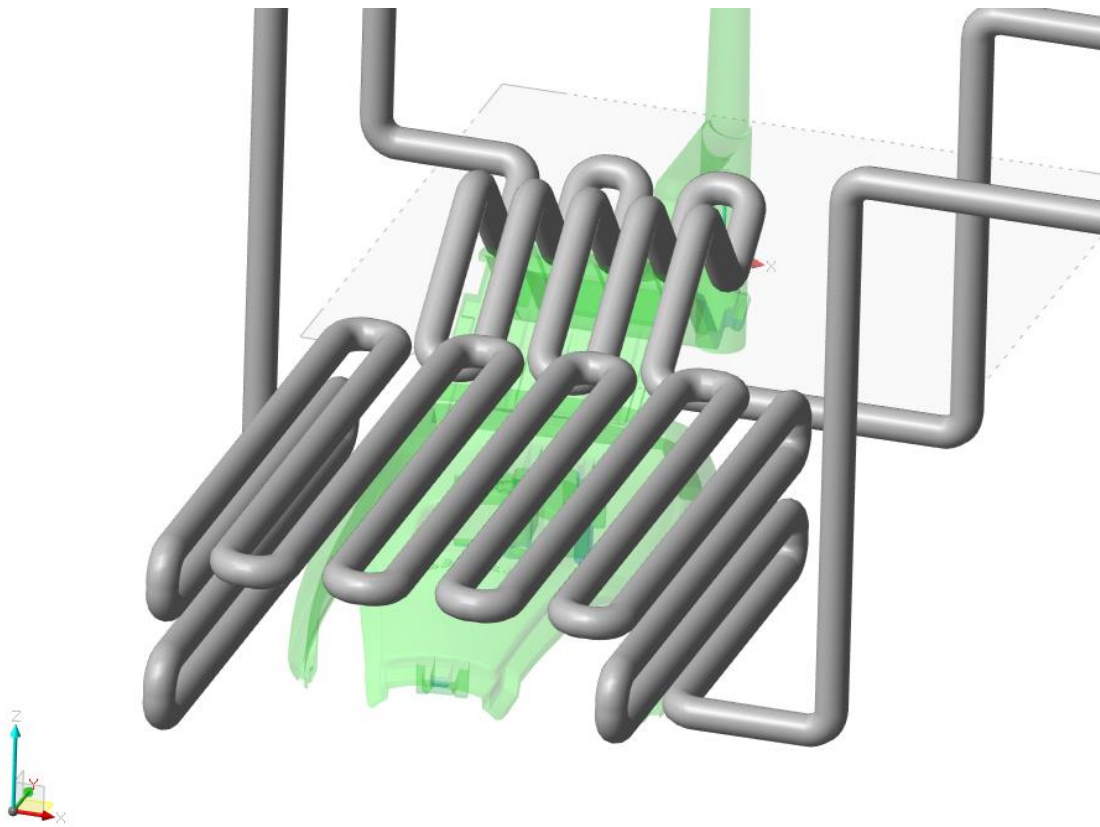


Figura 33 – Layout Step 1 tassello superiore

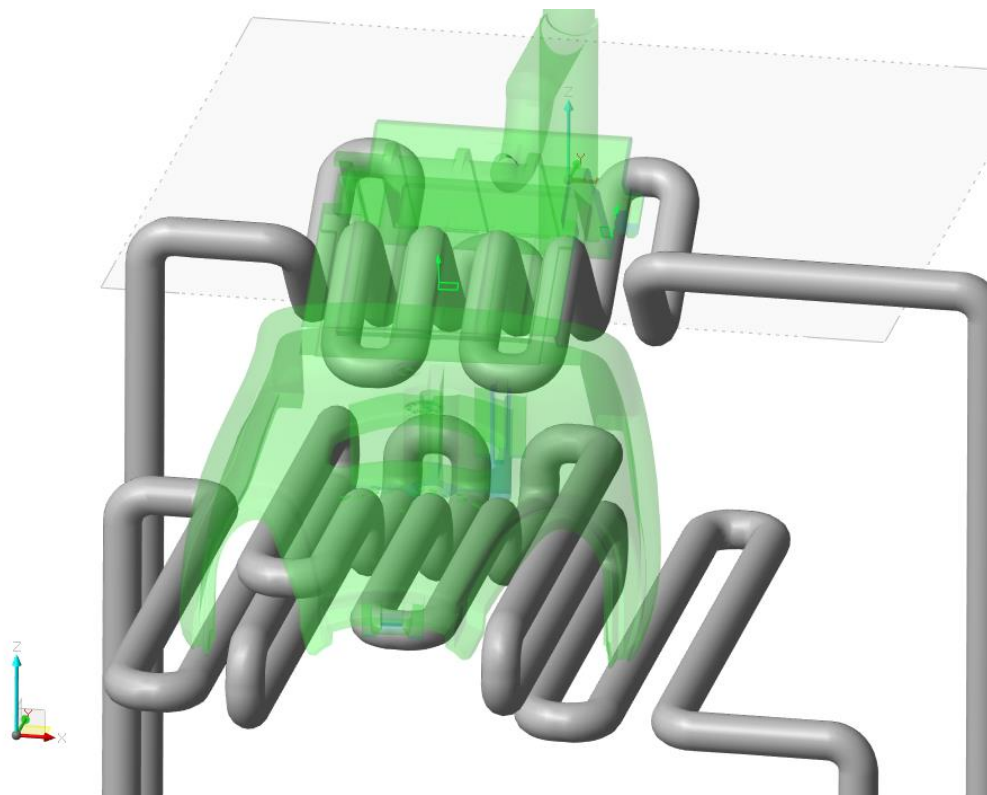


Figura 34 - Layout Step 1 tassello inferiore

Il diametro dei canali è di 4 mm, la portata è di 13 cm³/s.

I parametri di simulazione non cambiano e sono riportati in Tabella 12. Il mold base ha lo stesso ingombro delle simulazioni precedenti.

PARAMETRI DI SIMULAZIONE	
Tempo di iniezione [s]	1,02
Tempo di mantenimento [s]	6,5
Commutazione VP [%]	98
Tempo di raffreddamento [s]	20
Tempo apertura stampo [s]	5
Temperatura cilindro [°C]	260
Temperatura stampo [°C]	90
Liquido refrigerante	Acqua
Temperatura liquido refrigerante [°C]	90
Diametro canali [mm]	4
Portata liquido refrigerante [cm ³ /s]	13
Temperatura aria [°C]	25

Tabella 12 - Parametri di simulazione Step 1

A 9,338 secondi di tempo di iniezione la temperatura massima non varia rispetto alla simulazione con canali di raffreddamento tradizionali (Figura 22).

Ciò significa che localmente il sistema di raffreddamento non riesce ad asportare la quantità di calore necessaria (Figura 36). Si ha un delta di temperature rispetto alle zone adiacenti di circa 40 °C.

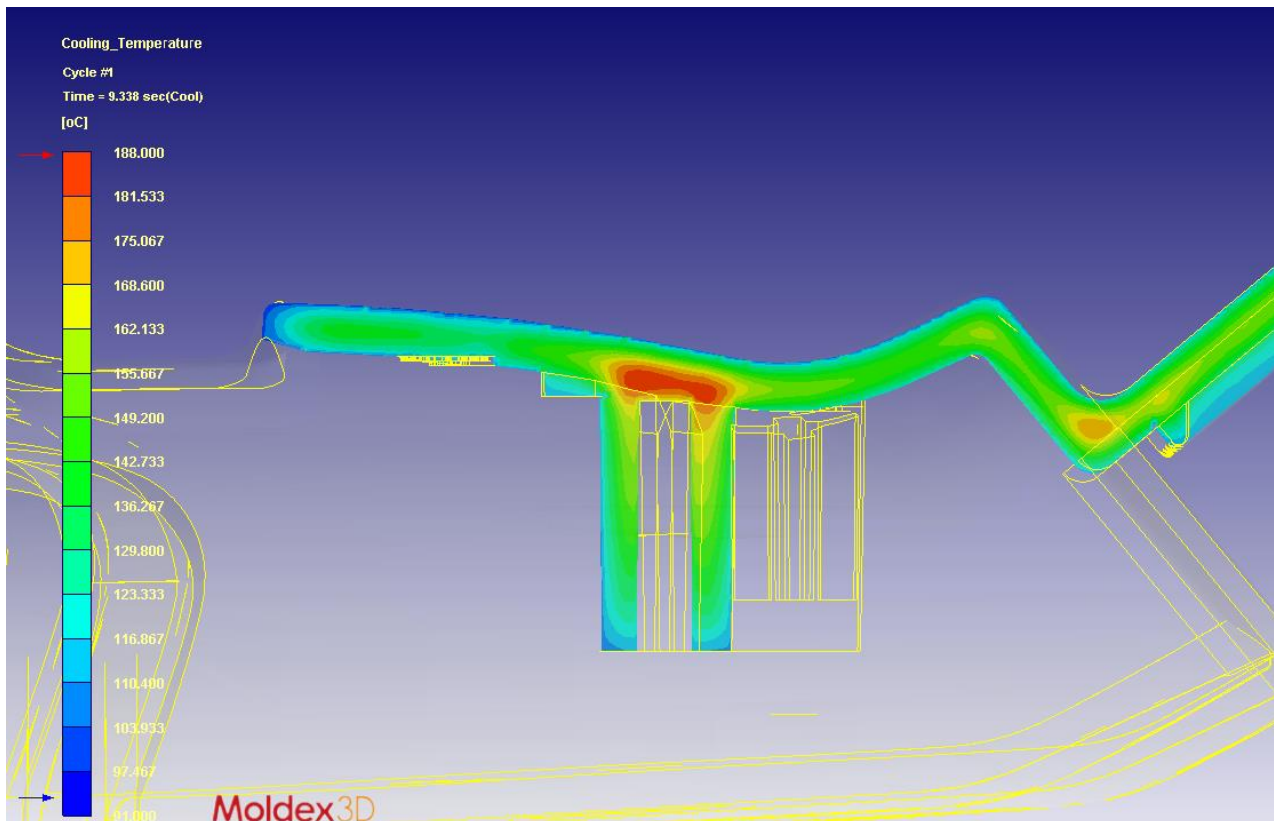


Figura 35 - Temperatura massima a 9,338 secondi Step 1

Il massimo tempo di raffreddamento sul pezzo è di 3,084 secondi e diminuisce rispetto alla simulazione con i canali tradizionali del 29,18 % (Figura 37 e Figura 38).

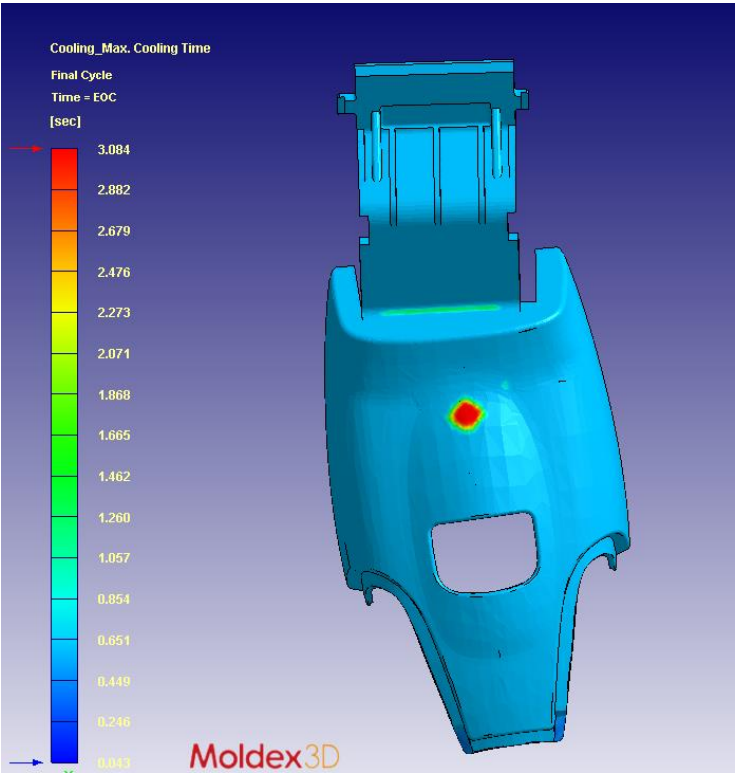


Figura 36 - Max cooling time vista dall'alto

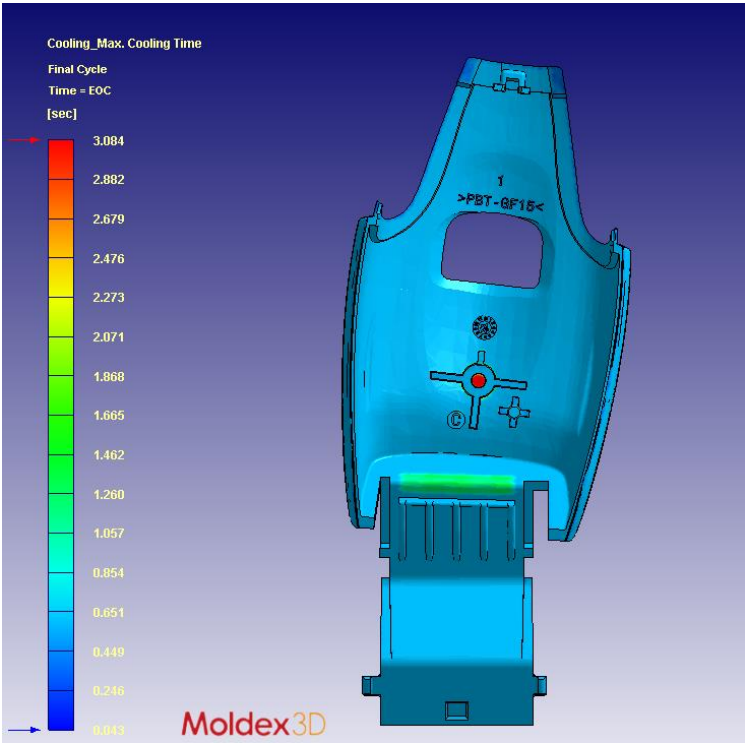


Figura 37 - Max cooling time vista dal basso

7.3. Step 1 con inserto in Ampcoloy 83

Per la simulazione con l'inserto del cannocchiale in rame-berillio è stato modificato il layout dei canali per poter inserire il punzone nel foro. La Figura 39 mostra la modifica del canale che andava in interferenza con l'inserto.

La modifica si è resa minima per poter effettuare un'analisi comparativa con quella dello Step 1 (i parametri di simulazione non cambiano).

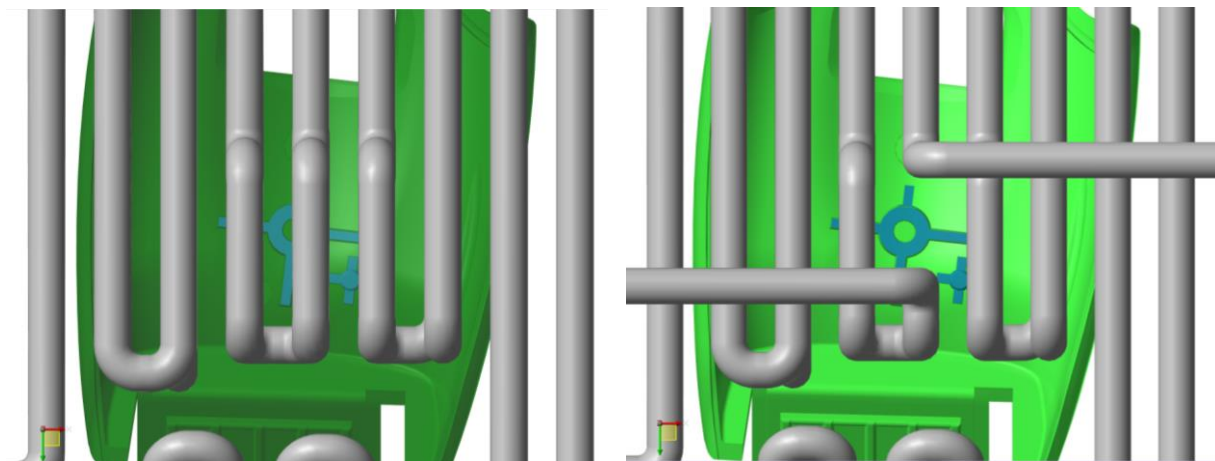


Figura 38 - Modifica del layout Step 1

In Figura 40 si può vedere che rispetto al caso senza inserto (Figura 35), la temperatura massima a 9,338 secondi è diminuita.

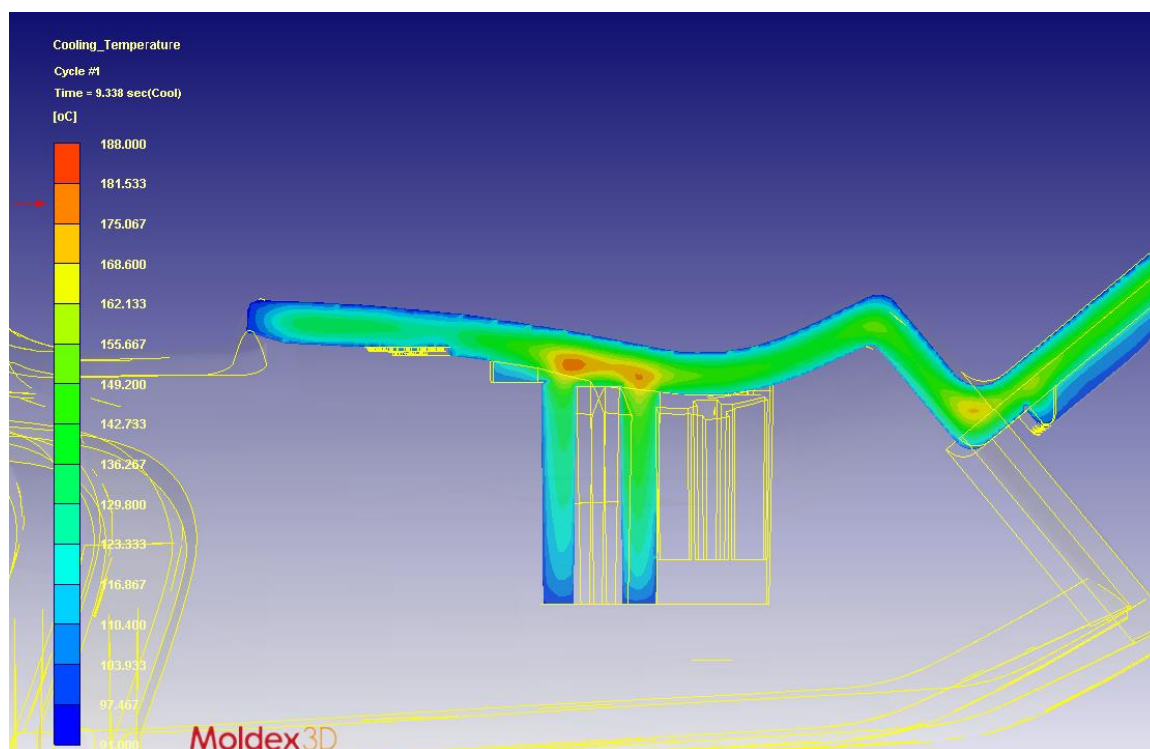


Figura 39 - Temperatura massima a 9,338 secondi Step 1 con Ampcoloy 83

Il tempo massimo di raffreddamento sul pezzo diminuisce del 49,69 % rispetto alla simulazione con i canali tradizionali. Le Figure 41 e 42 mostrano il massimo tempo di raffreddamento necessario per il pezzo con canali conformali dello Step 1 e l'inserto in Ampcoloy 83.

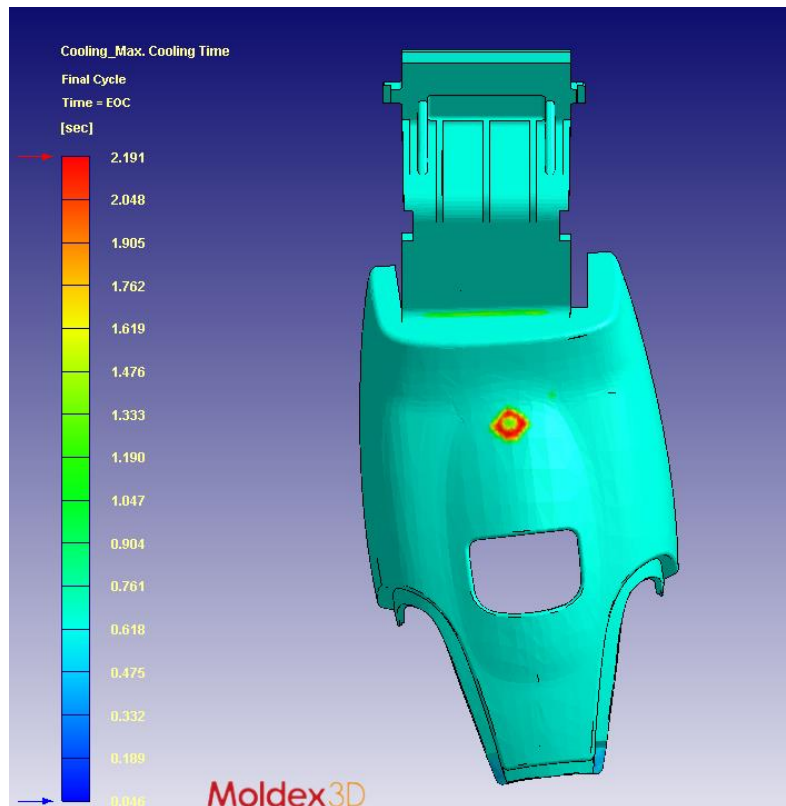


Figura 40 - Max cooling time vista dall'alto

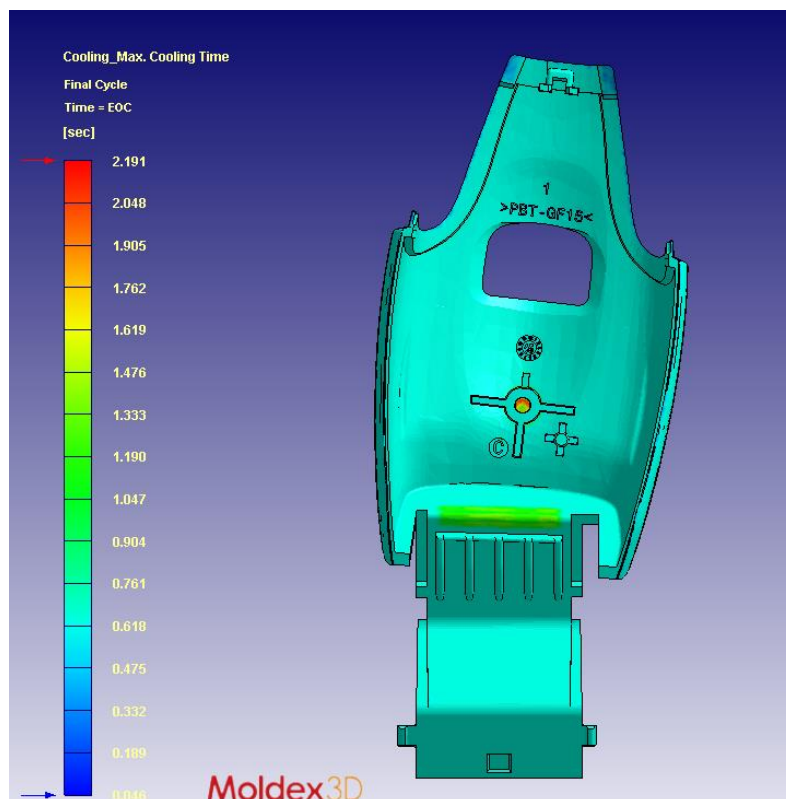


Figura 41 - Max cooling time vista dal basso

7.4. Step 2

Lo step 2 è una ottimizzazione dello Step 1. I canali, in questo caso, seguono le forme del pezzo. Essenzialmente, come si può vedere nelle Figure 43 e 44, i canali nella parte a “z” non cambiano mentre nella parte estetica, inferiormente e superiormente hanno subito un’importante modifica.

I canali sono stati costruiti seguendo le linee guida della Tabella 11. I canali sono in serie. I canali sono collocati nei rispettivi tasselli e hanno gli ingressi e le uscite sulle piastre ma non sono stati considerati gli ingombri degli estrattori.

La loro geometria complessa ha richiesto di importarli sul Software Moldex3D R15.0 in formato “stl”. In questo modo il Software ha già il diametro della condotta e costruisce la mesh noto il volume dei canali.

In questo modo Moldex3D non esegue il calcolo del numero di Reynolds in quanto il diametro non è un parametro di ingresso. Non sarà quindi possibile avere come dati di output l’efficienza del sistema di raffreddamento e il numero di Reynolds.

In altre parole il Software esegue un’analisi fluidodinamica ma per fruire dei dati bisogna acquistare dallo sviluppatore del software moduli specifici.

I parametri di stampaggio, portata e diametro dei canali sono gli stessi dello Step 2 (Tabella 12).

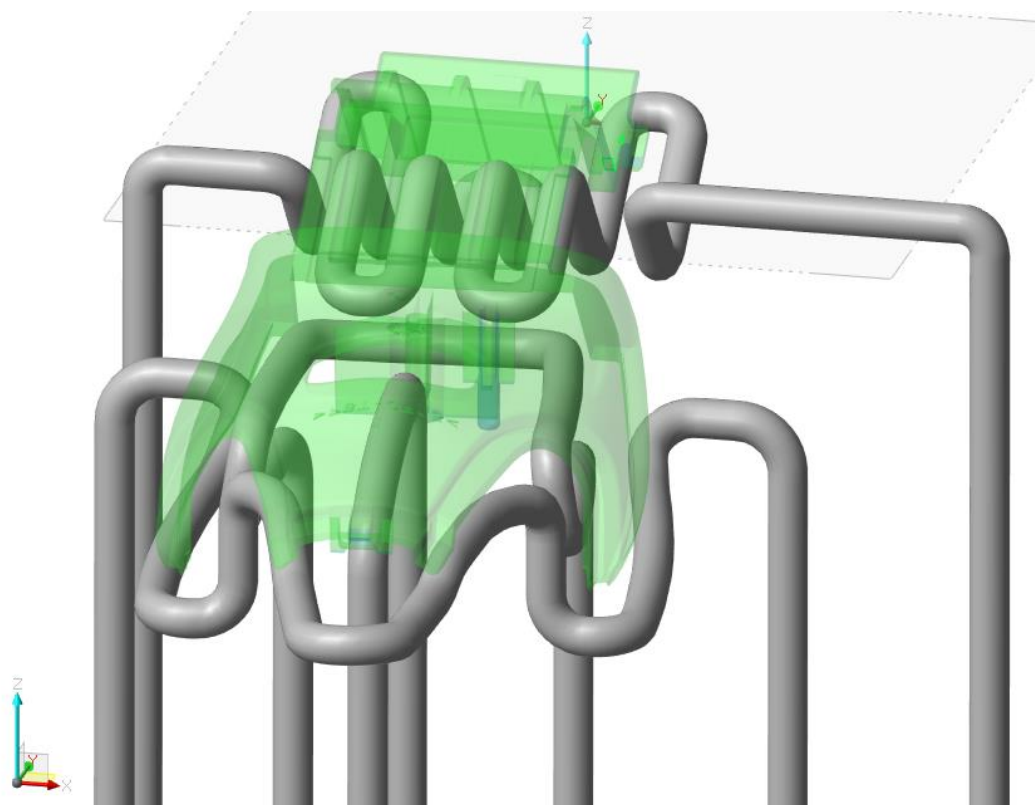


Figura 42 - Layout Step 2 tassello inferiore

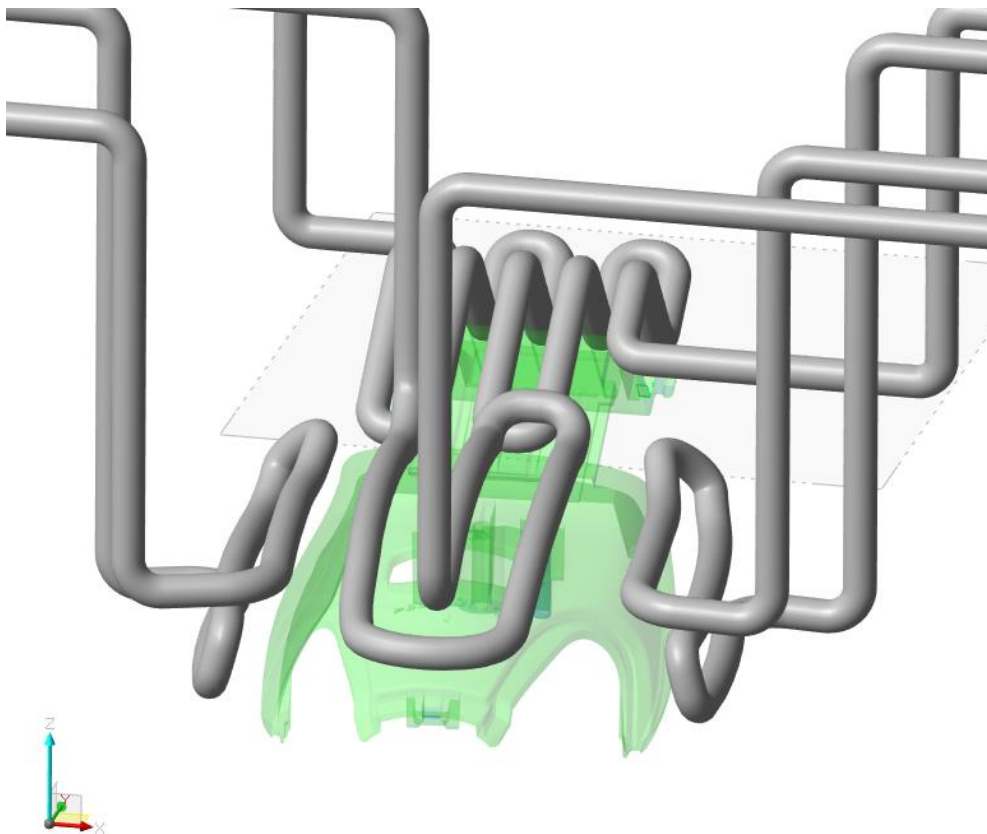


Figura 43 - Layout Step 2 tassello superiore

La Figura 45 mostra: il mold base (210 x 220 x 170) mm, la materozza, la cover e i canali con i rispettivi ingressi e uscite.

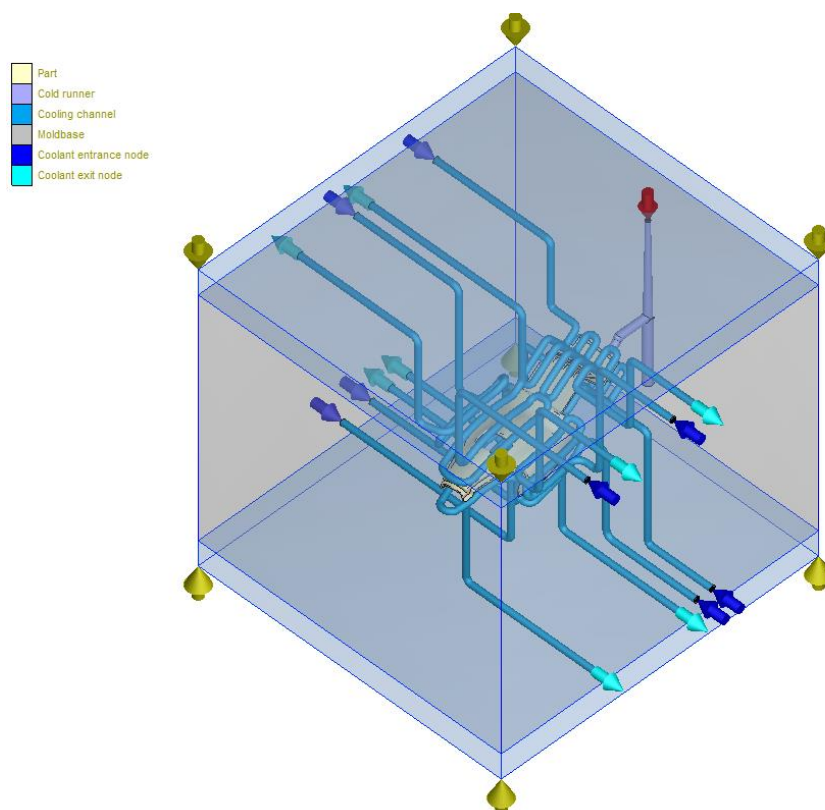


Figura 44 - Mold base e layout Step 2

In Figura 46 è possibile vedere la temperatura massima al primo step della fase di cooling per la sezione della cover a temperatura maggiore. Anche in questo caso la zona calda ha una temperatura media inferiore.

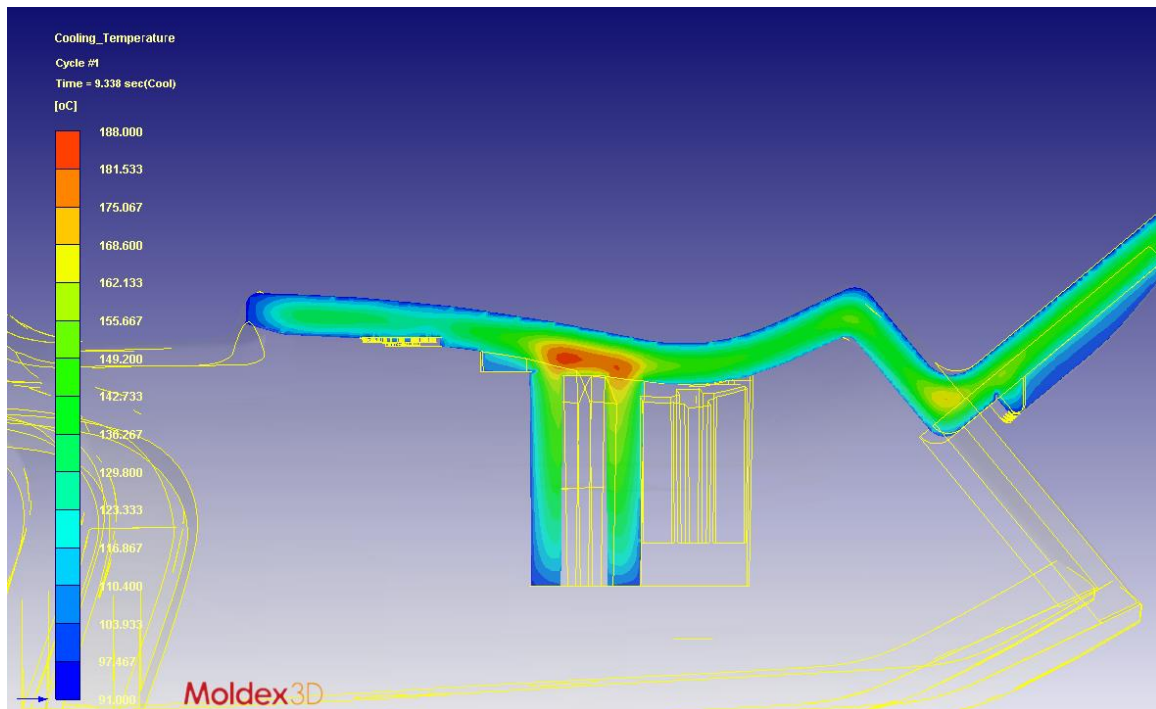


Figura 45 - Temperatura massima a 9,338 secondi Step 2

Il max cooling time è di 3,525 secondi (Figura 47 e Figura 48).

Si ha una riduzione del tempo ciclo del 19,06 %.

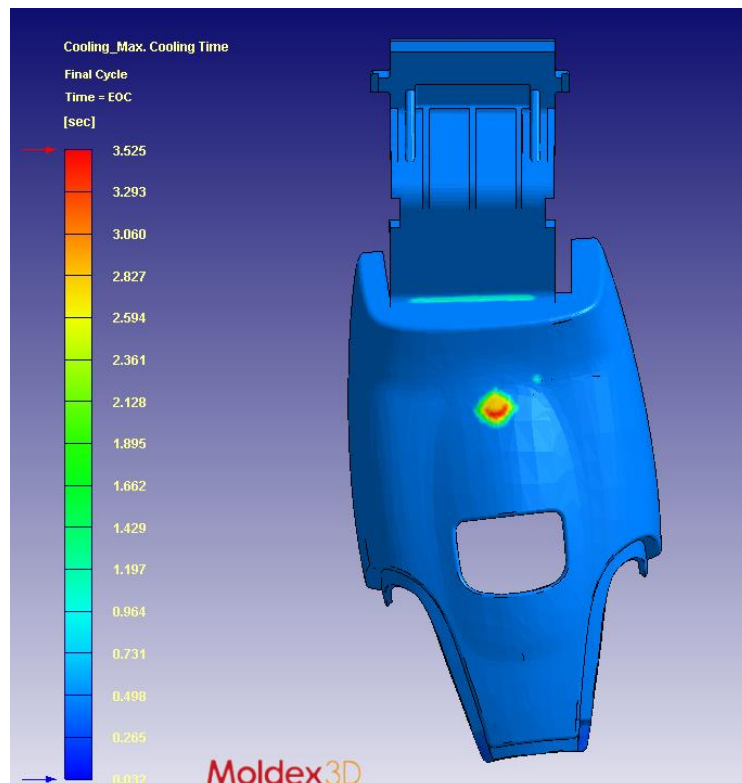


Figura 46 - Max cooling time vista superiore

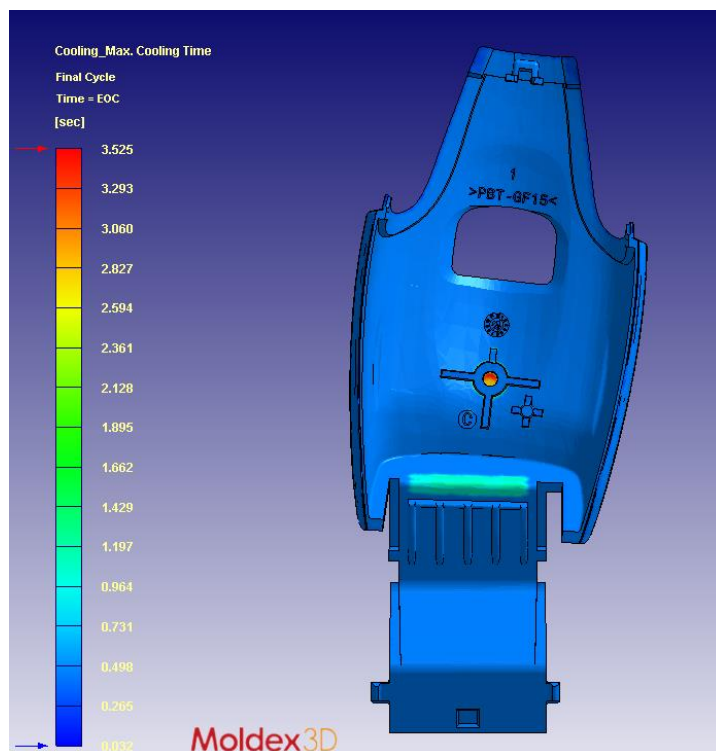


Figura 47 - Max cooling time vista inferiore

7.5. Step 2 con inserto in Ampcoloy 83

Per ridurre ulteriormente il tempo ciclo si è effettuata una simulazione con i medesimi parametri aggiungendo l'inserto in Ampcoloy 83. La temperatura media locale al primo step del cooling diminuisce rispetto alla simulazione senza inserto (Figura 49).

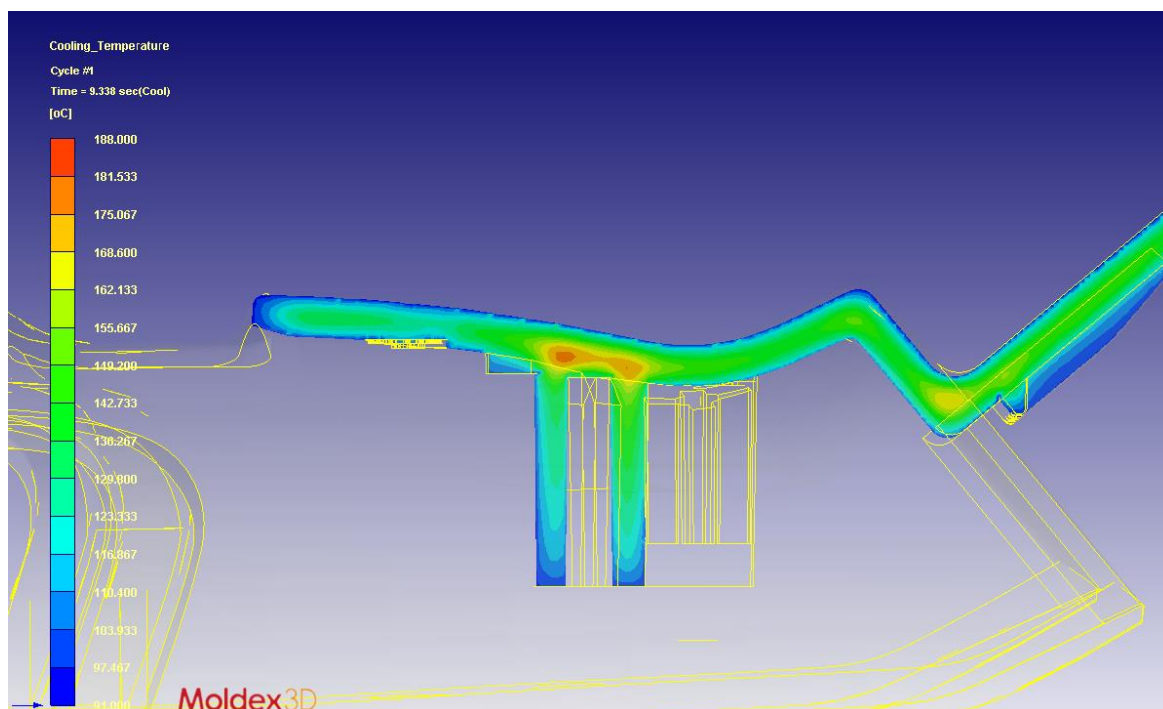


Figura 48 - Temperatura massima a 9,338 secondi Step 2 con Ampcoloy 83

Il tempo di raffreddamento necessario per il pezzo diminuisce del 49,28 % ed è di 2,209 secondi (Figura 50 e Figura 51).

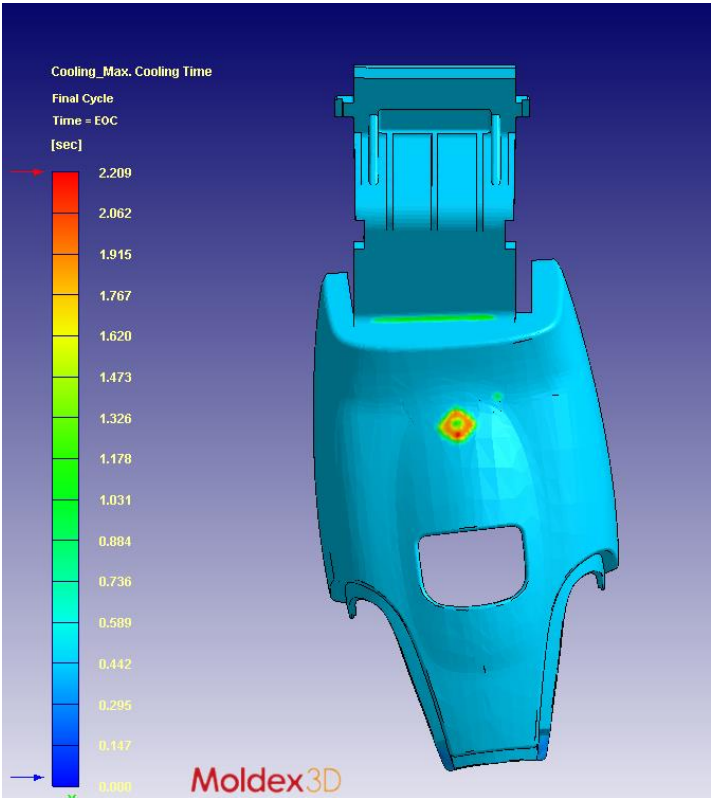


Figura 49- Max cooling time vista dall'alto

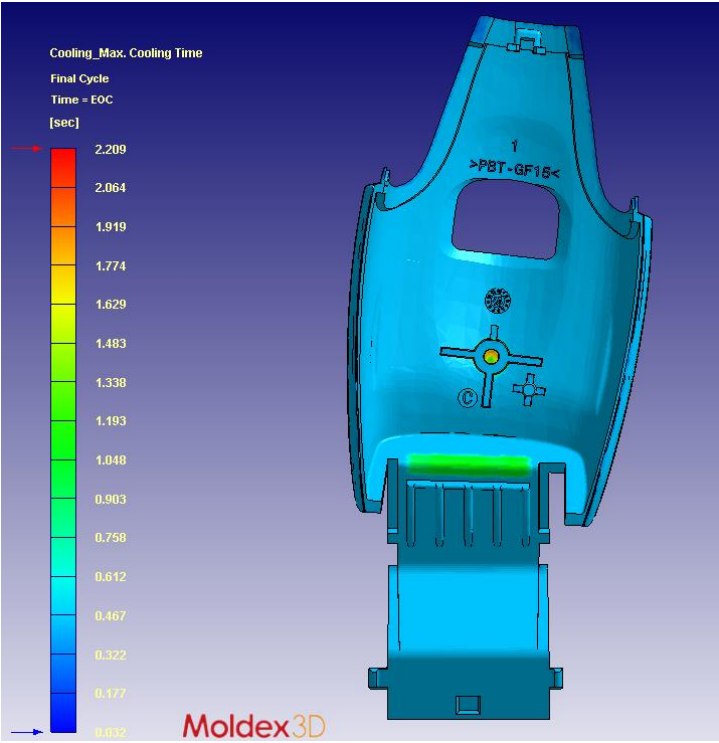


Figura 50 - Max cooling time vista dal basso

Il risultato ottenuto con tale simulazione risulta essere soddisfacente in quanto si è dimezzato il tempo necessario al raffreddamento del pezzo.

7.6. Step 3

Il passaggio successivo consiste nel modificare i canali per evitare l'interferenza con gli organi mobili. I canali di raffreddamento possono anche circolare attorno agli estrattori e ai sistemi di alimentazione e quindi fornire il raffreddamento dell'intero stampo. [20]

Non essendoci carrelli, i canali in parte fissa sono gli stessi dello Step 2 mentre i canali in parte mobile prevedono la presenza degli estrattori.

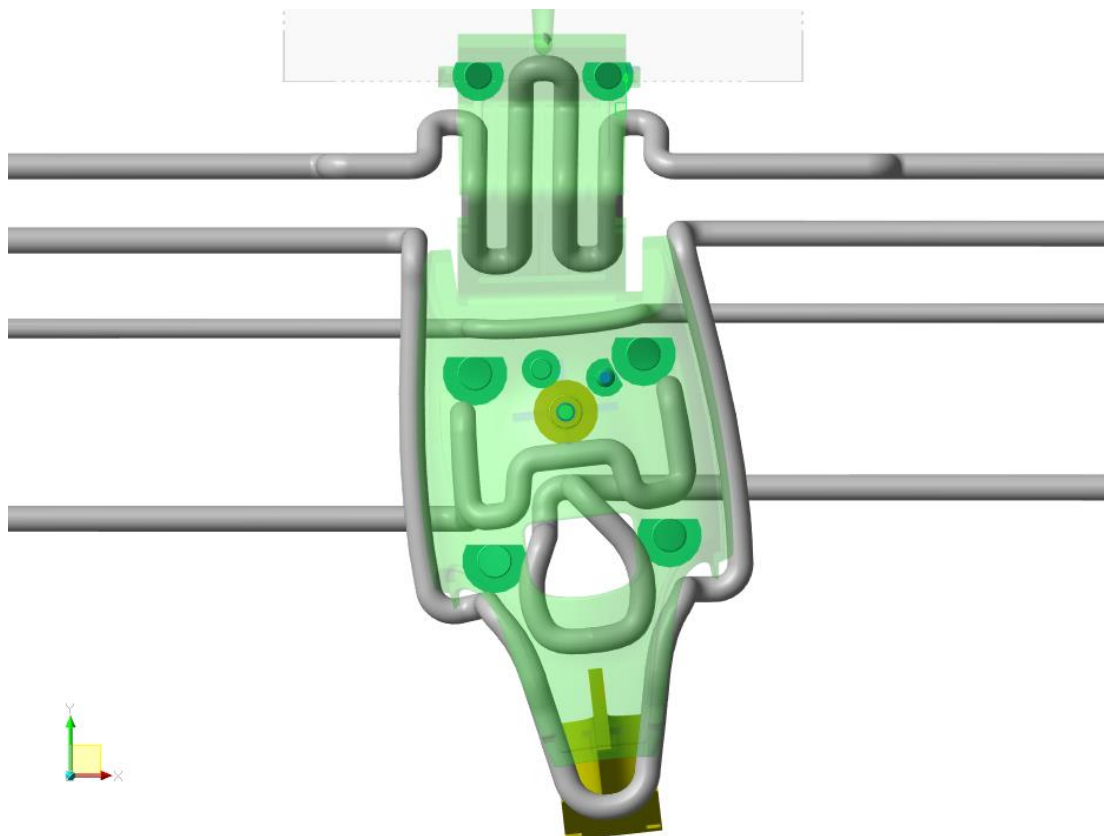


Figura 51 - Layout Step 3 parte mobile con estrattori vista dall'alto

In Figura 52 è rappresentata una vista dall'alto dei canali di raffreddamento per lo step 3 (Figura 44) e degli estrattori.

I canali seguono un percorso tale che consente di avvicinarsi al pezzo il più possibile mantenendo una distanza quanto più uniforme possibile sia dalla cover che dal sistema di estrazione senza mai scendere al di sotto dei limiti consentiti (Figura 53).

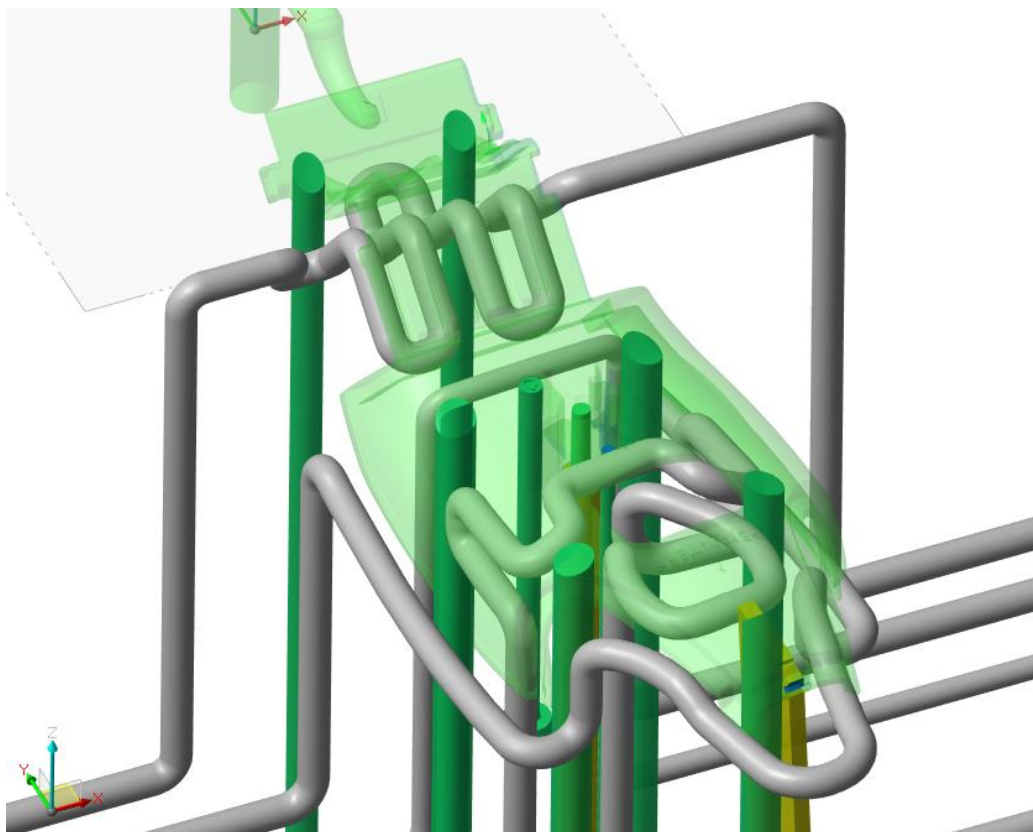


Figura 52 - Vista in assonometria dei canali e degli estrattori

Per rispettare le linee guida di Tabella 11, il canale rosso di Figura 54 è di 3 mm mentre tutti gli altri continuano ad avere un diametro di 4 mm.

Lo spessore della cover nella parte superiore del canale raggiunge anche spessori di 3 mm per i quali è consigliato un sistema di raffreddamento di 4 mm. Il canale risulta essere leggermente sottodimensionato.

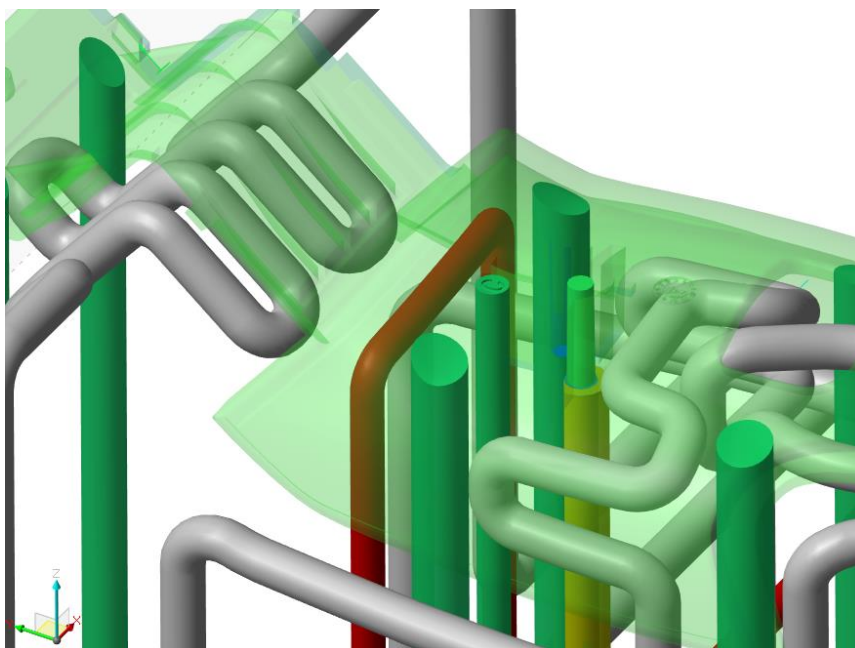


Figura 53 - Canale di 3 mm

La presenza dei tre estrattori allineati in Figura 54 riduce il volume per poter realizzare dei canali di raffreddamento più grandi che potessero servire opportunamente la zona di interesse.

La Figura 55 mostra il mold base (202 x 220 x 170) mm e il layout dello Step 3. Si può notare che gli ingressi e le uscite dell'acqua non sono cambiati rispetto allo Step 2 (Figura 44). Quindi oltre ai parametri di simulazione identici anche i canali presentano lo stesso percorso del fluido refrigerante (ugual ingressi ed uscite).

Mentre la geometria dei canali precedenti non poteva essere realizzata perché non considerava l'ingombro degli estrattori, questa è realizzabile in quanto:

- i canali di raffreddamento sono nei rispettivi tasselli;
- sono opportunamente distanziati dalla cavità;
- considerano gli ingombri degli organi mobili.

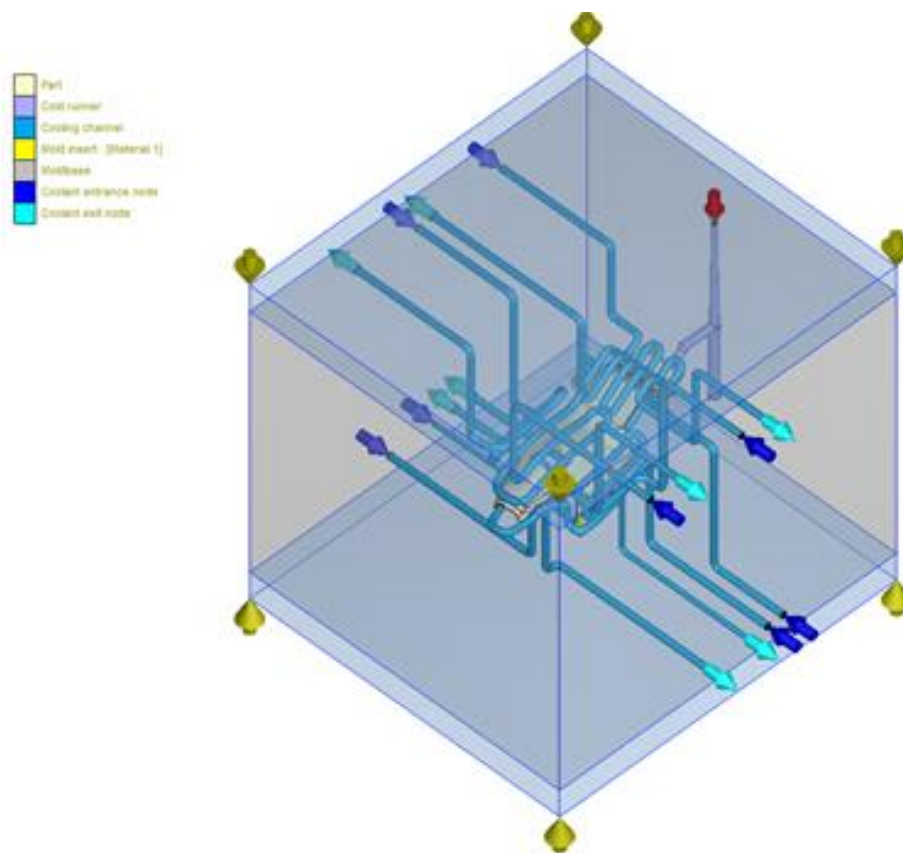


Figura 54 - Mold base e layout Step 3

In Figura 56 è possibile vedere la temperatura massima al primo step (9,338 secondi) della fase di cooling per una sezione del pezzo.

La zona calda ha una temperatura media inferiore rispetto alla simulazione con i canali tradizionali (Figura 22).

Il massimo tempo di raffreddamento sul pezzo è di 3,478 secondi e diminuisce rispetto alla simulazione con i canali convenzionali del 20,14 % (Figura 57 e Figura 58). Quindi rispetto allo Step 2 per il quale il max cooling time era di 3,525 secondi, il limite dovuto alla presenza degli estrattori non ha inficiato l'efficienza del sistema di raffreddamento.

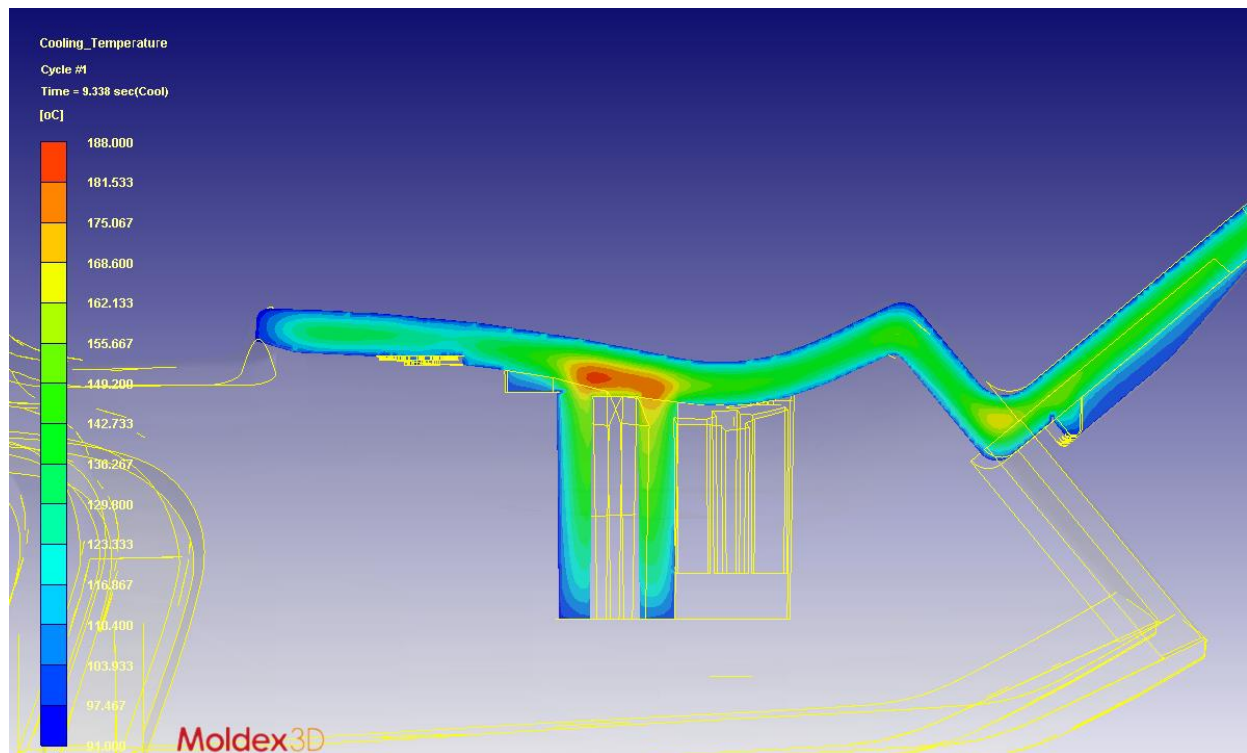


Figura 55 - Temperatura massima a 9,338 secondi Step 3

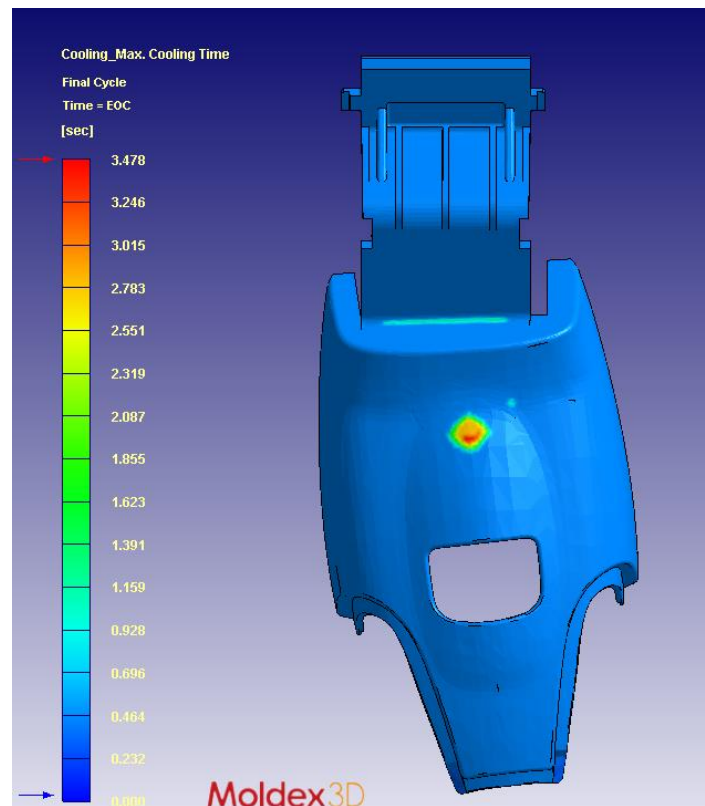


Figura 56 - Max cooling time vista superiore

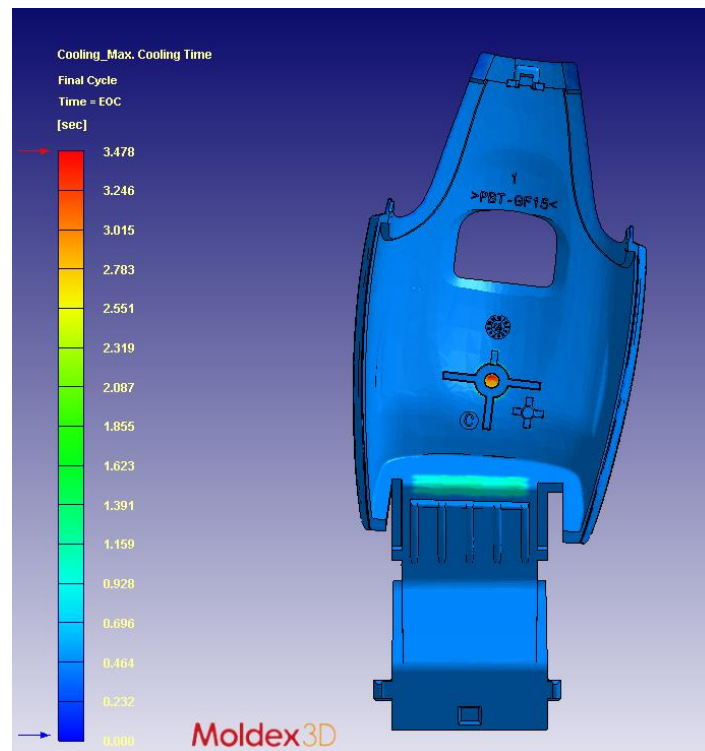


Figura 57 - Max cooling time vista inferiore

7.7. Step 3 con inserto in Ampcoloy 83

La Figura 59 mostra come con la medesima simulazione, con l'inserto in rame-berillio, si riducano ulteriormente le temperature rispetto alla simulazione dello Step 3.

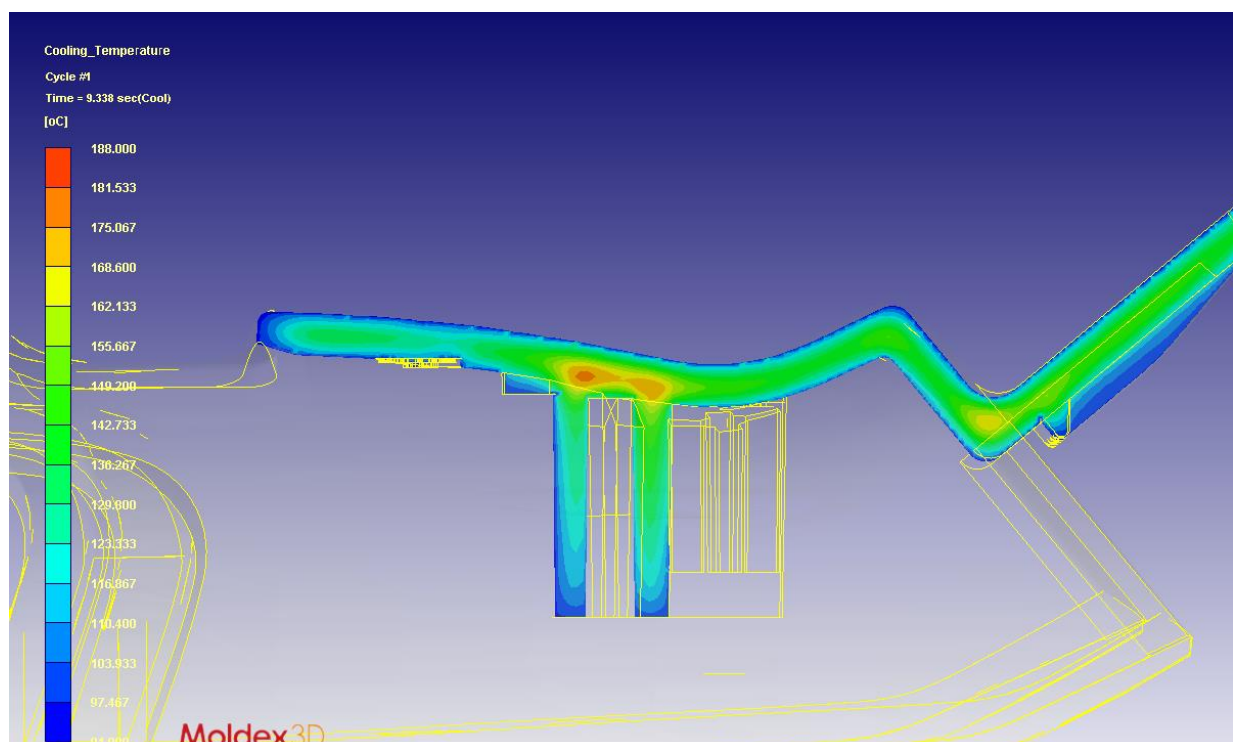


Figura 58 - Temperatura massima a 9,338 secondi Step 3 con Ampcoloy 83

Non è possibile ridurre le temperature della massa fusa in quanto il limite è legato alla differenza di spessore, che in questa zona è maggiore rispetto alle altre. Una soluzione potrebbe essere quella di modificare il CAD della cover e uniformare gli spessori in questa zona per evitare questo problema.

Il massimo tempo di raffreddamento sul pezzo è di 2,312 secondi e diminuisce rispetto alla simulazione con i canali tradizionali del 46,91 % (Figura 60 e Figura 61). Rispetto allo Step 3 si ha una diminuzione del 33,53 %.

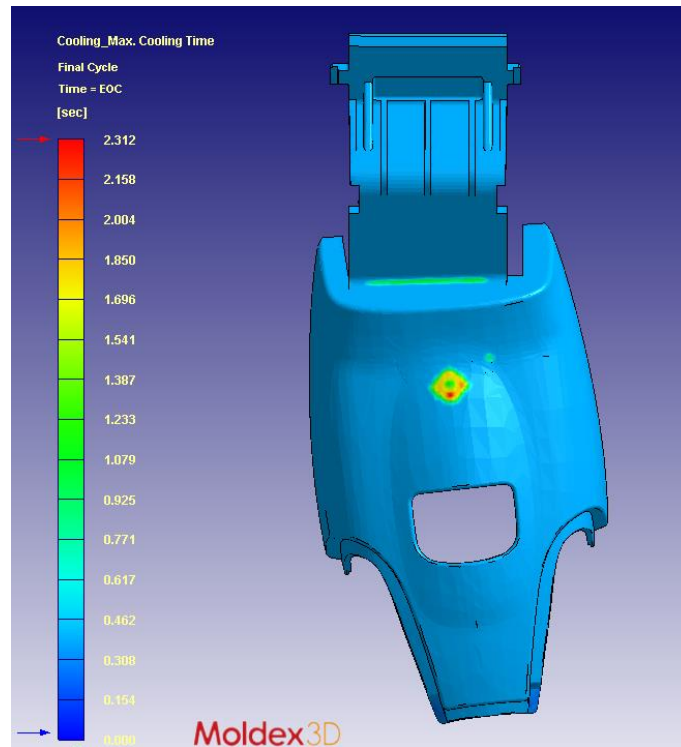


Figura 59 - Max cooling time vista dall'alto

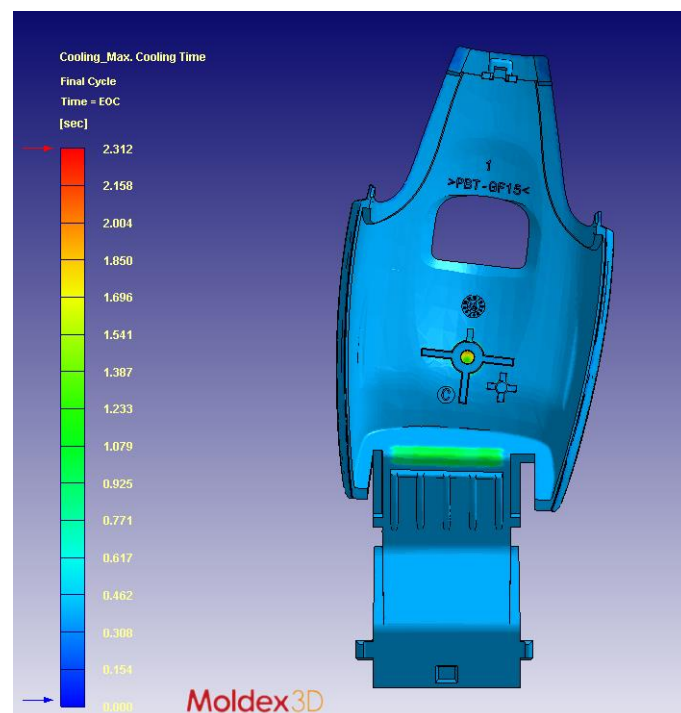


Figura 60 - Max cooling time vista dal basso

8. ANALISI COMPARATIVE

L'analisi svolta ha evidenziato come la simulazione con il layout conformale dello Step 3 e l'inserto in Ampcoloy 83 riduca il max cooling time su pezzo del 47 %.

Tale risultato è uno dei tanti vantaggi del conformal cooling. In questo capitolo verrà effettuato un confronto tra i risultati ottenuti attraverso i canali tradizionali e quelli ricavati mediante i canali conformali ottenuti con il layout dello Step 3 e l'inserto in Ampcoloy 83.

Tra le due simulazione è possibile notare un abbassamento della temperatura superficiale della cavità.

Nel diagramma 2 è possibile vedere la differenza di temperatura media, per due stampate, tra la simulazione con i canali tradizionali e i canali convenzionali dello Step 3 con l'inserto. A parità di parametri di stampaggio si ha una differenza di temperatura considerevole. La differenza di temperatura all'inizio dell'iniezione per i due Run è di 5°C. L'ingresso istantaneo di materiale in cavità determina uno shock termico che provoca un repentino aumento della temperatura. Con i canali conformali si registra un aumento della temperatura costante in fase di riempimento.

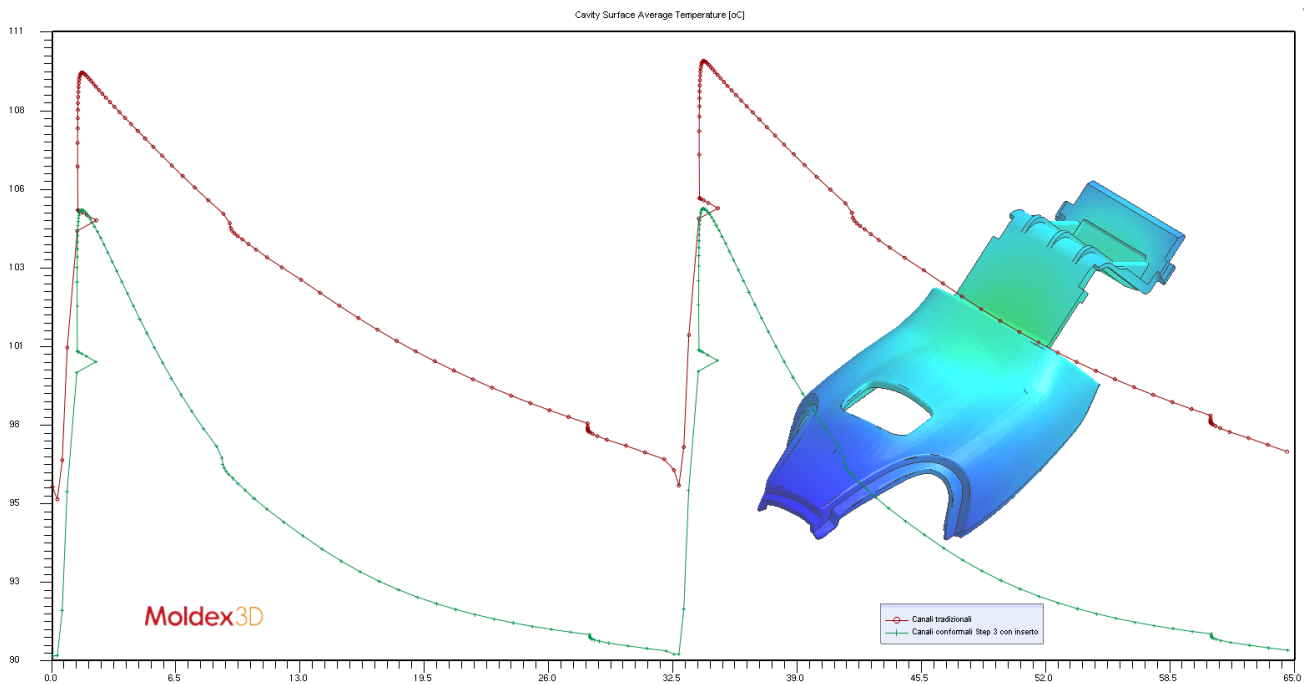


Diagramma 2 – Cavity Surface Average Temperature

8.1. Volumetric Shrinkage

Il ritiro volumetrico, che si trova nelle schede di prodotto, è definito tra il primo fuso del polimero e il solido, entrambi alla pressione atmosferica (Figura 62).

La formula per calcolare il ritiro volumetrico teorico è riportata qui di seguito.

$$\text{Volumetric Shrinkage [\%]} = \frac{(v_{melt} - v_{solid})}{v_{melt}}$$

dove:

v_{melt} è il volume specifico medio del fronte di flusso al primo step del riempimento;

v_{solid} è il volume specifico del materiale (Tabella 1).

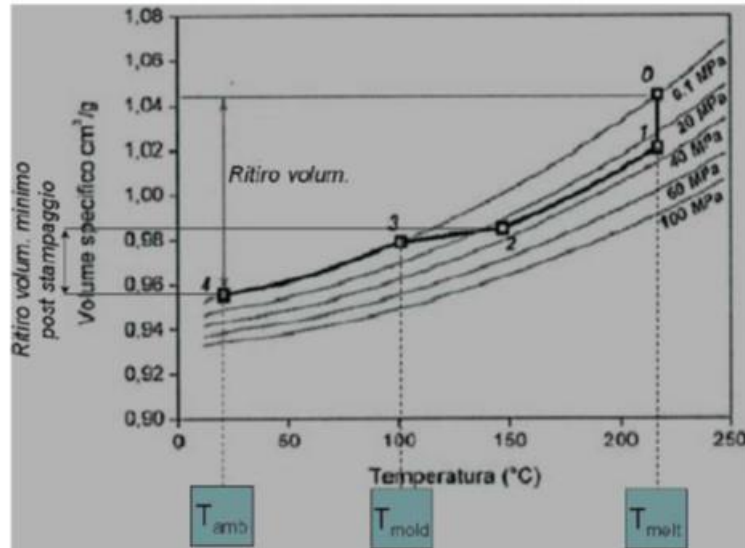


Figura 61 - Ritiro volumetrico

La densità media del fronte di flusso è stata calcolata da Moldex3D prendendo il primo step di Filling disponibile per la simulazione senza sistema di raffreddamento (Figura 63).

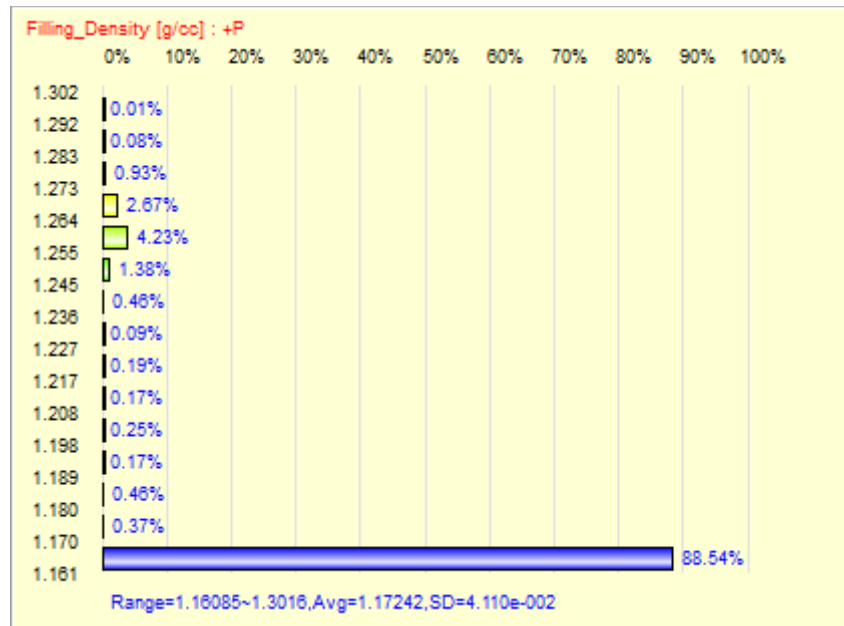


Figura 62 - Distribuzione di densità a 0,256 secondi

Sapendo che il volume specifico è l'inverso della densità, il ritiro volumetrico è del 13 %.

Osservando le Figure 64 e 65 è possibile vedere la zona che presenta il ritiro volumetrico maggiore rispettivamente per la simulazione con canali tradizionali e per lo Step 3 con inserto. I risultati mostrano che il ritiro volumetrico massimo non supera il ritiro volumetrico calcolato.

Con i canali conformali e l'inserto si riduce il valore massimo e l'area interessata. Tale risultato non è eclatante in quanto il ritiro volumetrico dipende prevalentemente dalla pressione di mantenimento. Aumentando la pressione di mantenimento si riduce il ritiro volumetrico del componente.

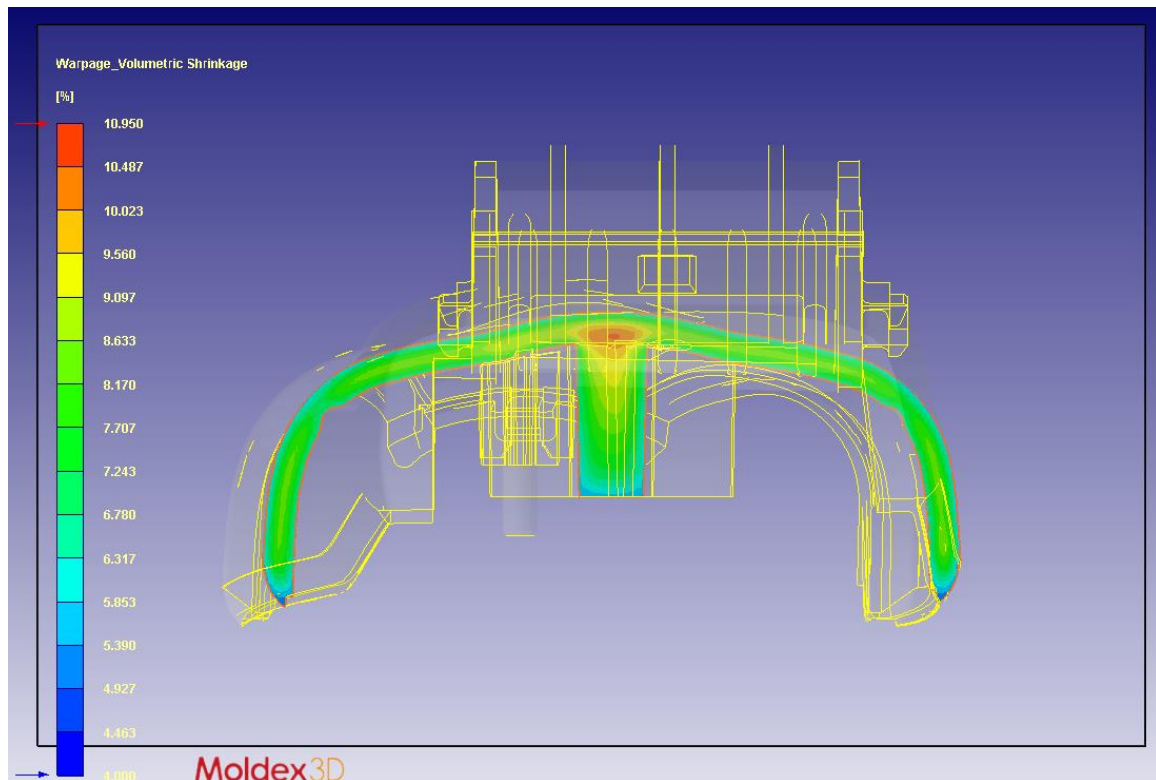


Figura 63 - Massimo ritiro volumetrico con canali tradizionali

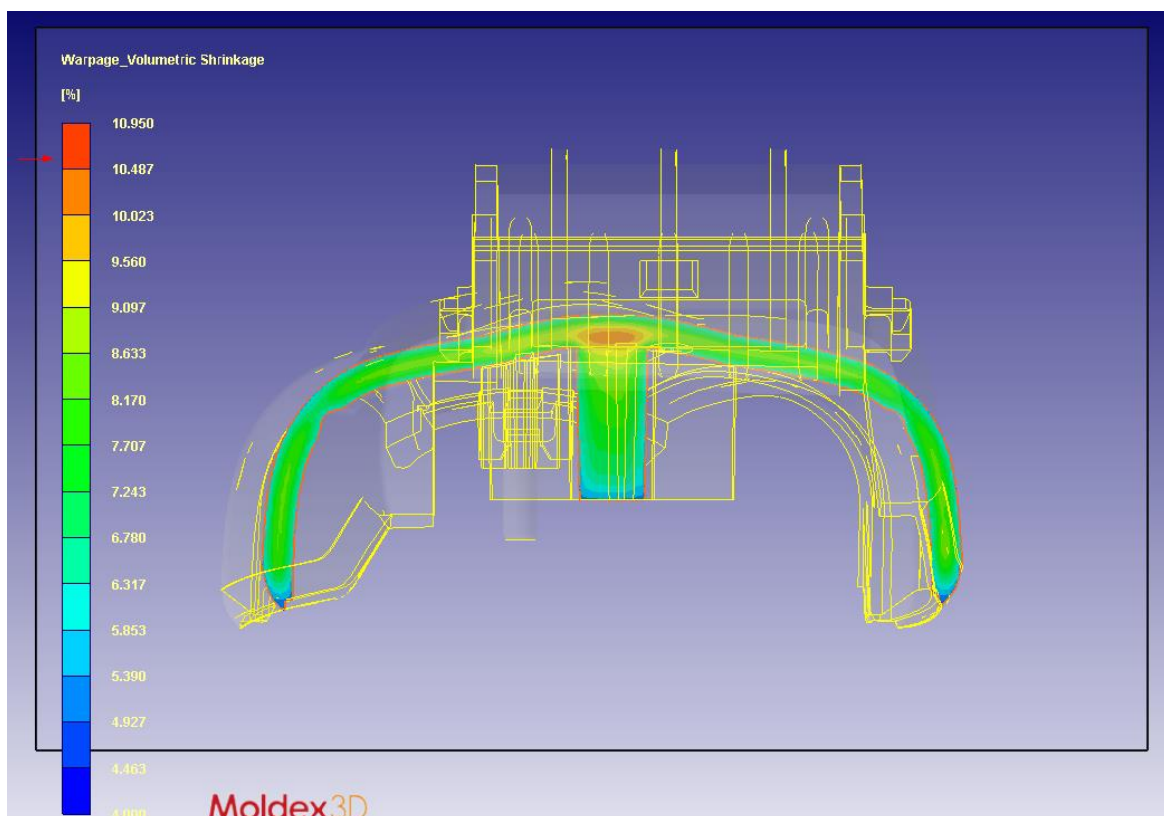


Figura 64 - Massimo ritiro volumetrico per Step 3 con inserto

La Figura 66 mostra la differenza di distribuzione tra le due simulazioni. A sinistra quella con i canali naturali e a destra quella con i canali conformali. Fino al 7,243 % si hanno percentuali minori per i canali conformali. Questo mostra un piccolissimo miglioramento con l'ultima configurazione.

Trascurando gli estremi della gaussiana, il ritiro volumetrico è contenuto tra 4,5% e il 9%. La distribuzione complessiva si può ritenere contenuta.

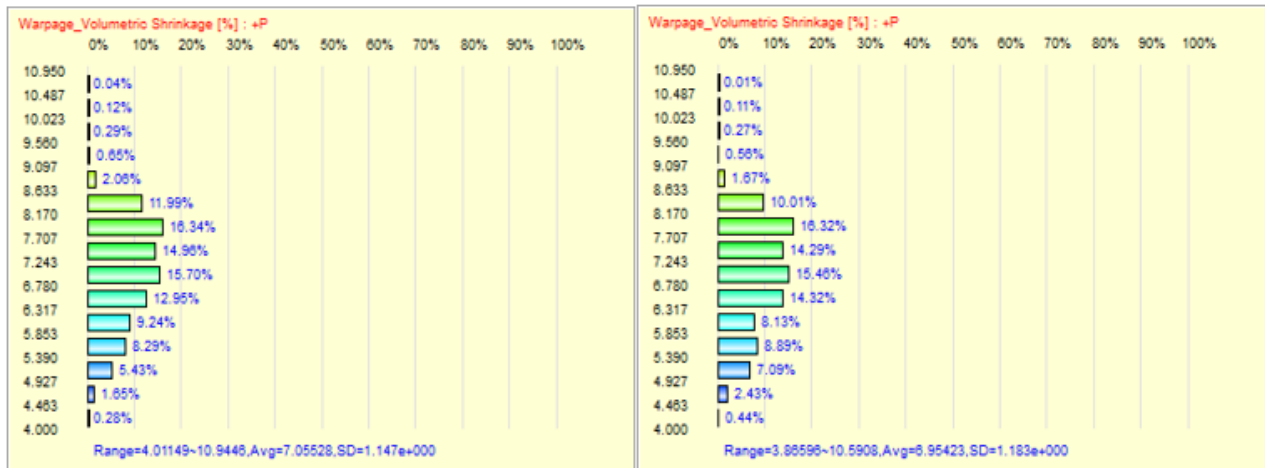


Figura 65 - Volumetric Shrinkage

8.2. Sink marks

I sink marks sono dei difetti estetici. Sono dovuti essenzialmente alla pressione di mantenimento. È necessario impostare un profilo di pressioni in modo tale da evitare una serie di difetti in fase di mantenimento (Figura 67).

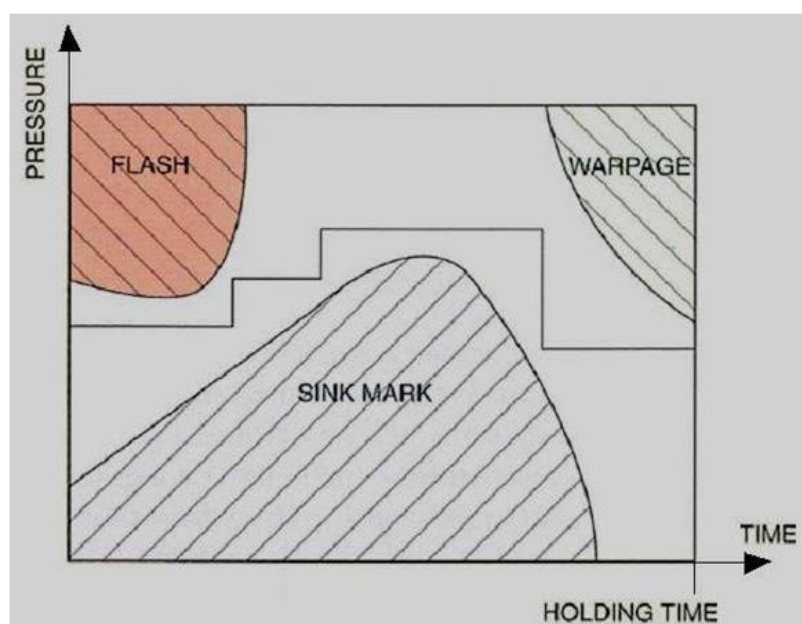


Figura 66 - Profilo di pressione mantenimento

I segni di risucchio dipendono da diverse condizioni:

- tempo/pressione di mantenimento;
- temperatura del fuso;
- velocità/pressione di iniezione;
- velocità di raffreddamento;
- scelta del materiale.

La velocità di raffreddamento dipende dall'efficienza del sistema di raffreddamento.

Per la cover l'ottimizzazione del sistema di raffreddamento non riduce i segni di risucchio sulla parte estetica, mentre il valor massimo, interno al pezzo, diminuisce da 0,132 mm a 0,123 mm.

Moldex3D non permette di effettuare una sezione dinamica per lo spostamento dovuto ai risucchi in quanto questi non sono considerati difetti estetici.

I valori massimi sulla parte estetica, cinque centesimi di millimetro, non creano problemi in quanto l'occhio umano non riesce a vedere al di sotto di mezzo millimetro.

La figura 68 mostra il possibile spostamento in mm dovuto alla presenza dei segni di risucchio. Alti valori significano seri difetti di risucchio.

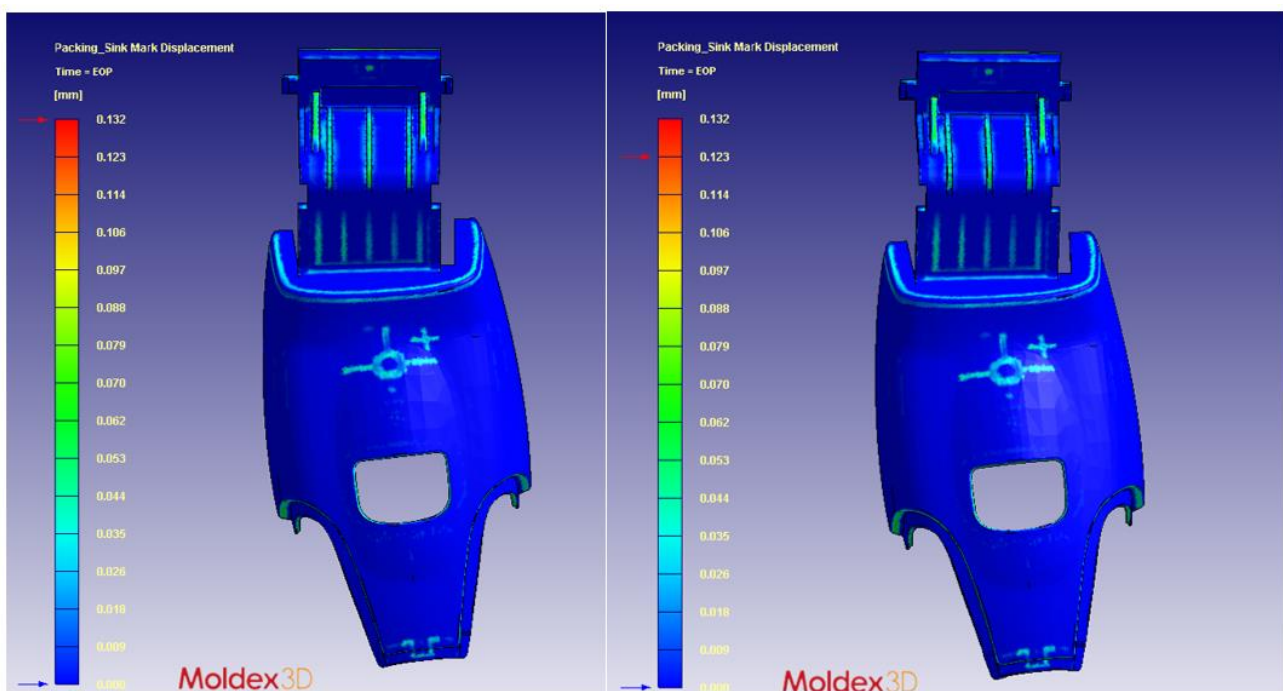


Figura 67 - Sink Mark displacement

Il Sink mark indicator è un indice per valutare l'effetto del mantenimento. Se l'indicatore è positivo, significa che il mantenimento non è sufficiente e può portare a segni di risucchio.

La Figura 69 mostra il Sink mark indicator della simulazione con i canali tradizionali realizzati per lo stampo attualmente in produzione.

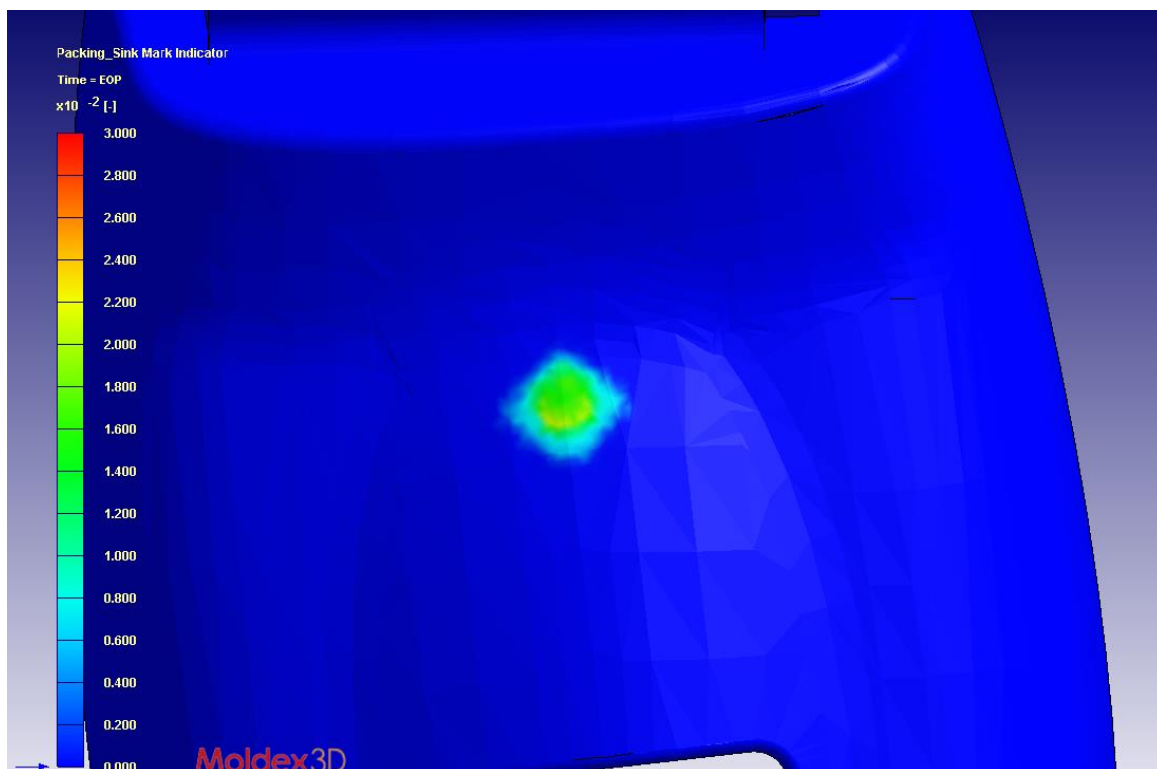


Figura 68 - Sink mark indicator canali tradizionali

La Figura 70 mostra il sink mark indicator della simulazione con il layout dello Step 3 con l'inserto. Confrontando la Figura 69 con la Figura 70 è possibile vedere come il mantenimento sia migliorato per la simulazione finale.

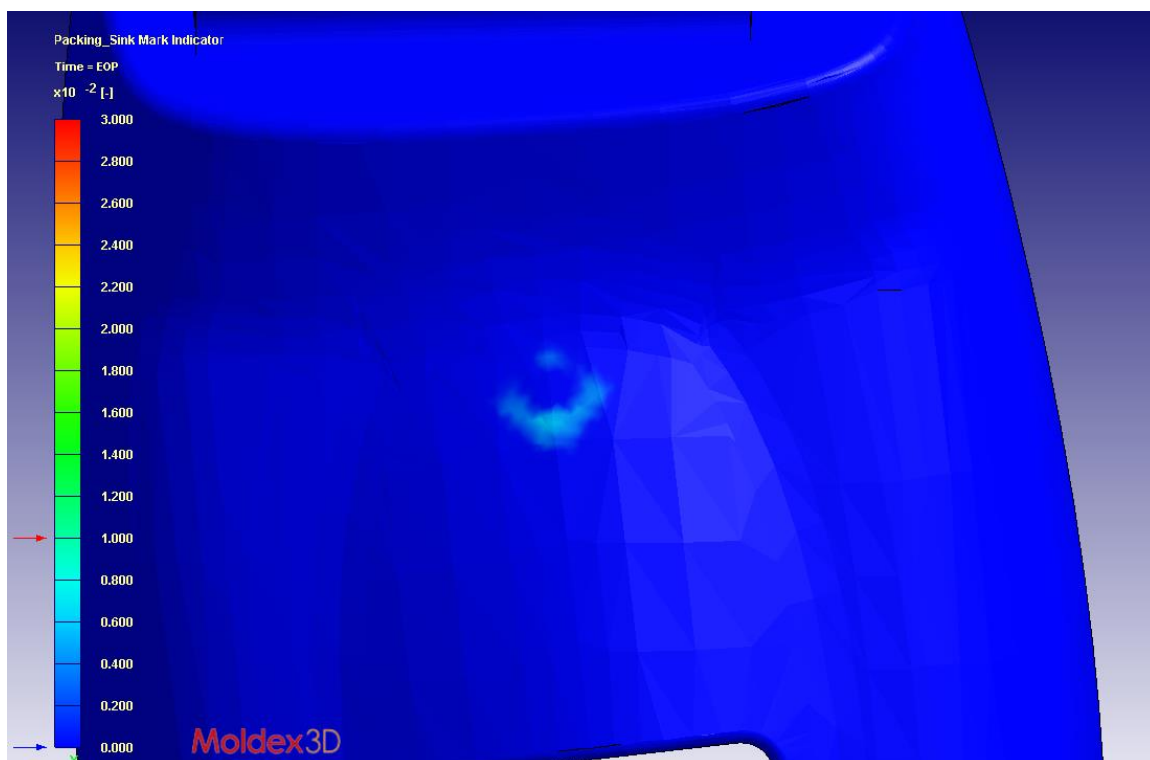


Figura 69 - Sink mark indicator Step 3 con inserto

8.3. Deformazione termica

Un altro aspetto da considerare è la deformazione del pezzo. La cover è realizzata con un materiale caricato con fibra. La fibra influenza la deformazione del pezzo. La deformazione totale tiene conto di tutti gli elementi che contribuiscono a provocarla, come: orientamento della fibra, temperatura e ritiro.

Lo spostamento dovuto alla deformazione totale con i canali tradizionali è rappresentata in Figura 71.

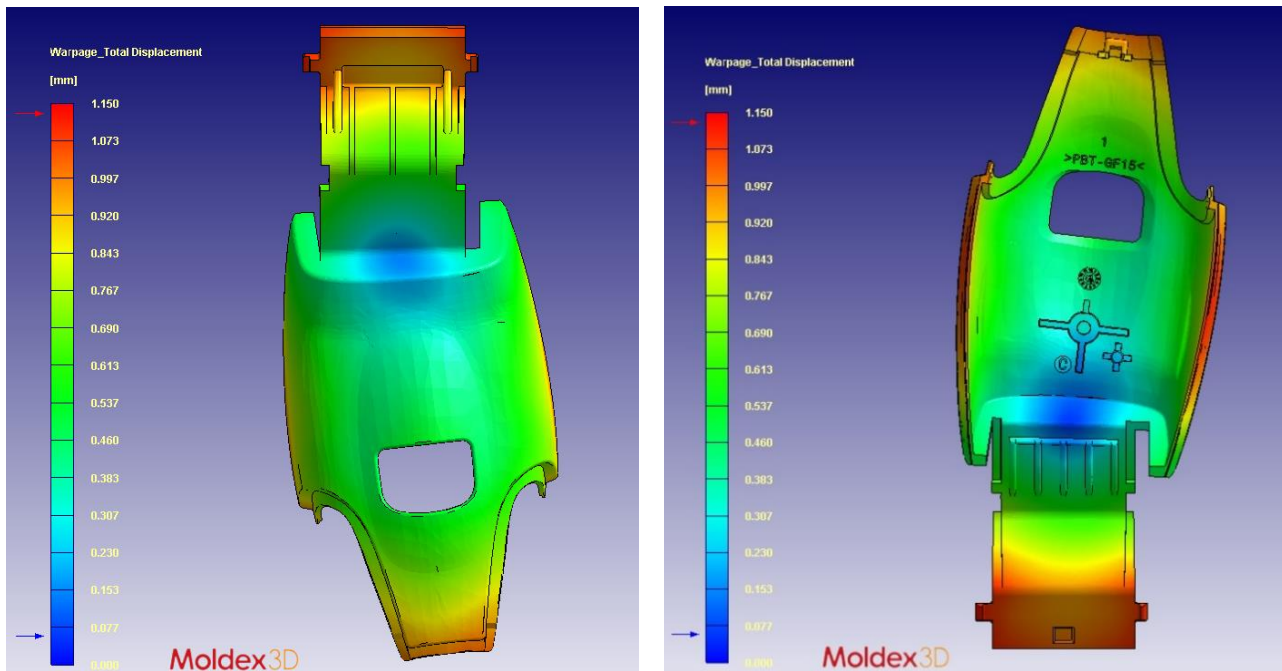


Figura 70 – Spostamento dovuto alla deformazione totale

La deformazione termica globale si riduce tra le due simulazioni.

Il valor massimo si riduce del 21,6 %.

Ciò che non piace in questo risultato di deformazione totale è l'eccessiva deformazione nella zona di iniezione.

Tendenzialmente si preferisce avere una zona di iniezione che subisca la minore deformazione possibile. Tale risultato probabilmente è dovuto alla particolare geometria del componente.

Tra le Figure 72 e 73 è possibile effettuare un confronto dei valori sulla parte superiore della cover.

Nella zona di iniezione si ha una riduzione della deformazione termica massima di un decimo di millimetro. Si può pensare di ridurre ulteriormente la deformazione totale effettuando delle modifiche alle cavità dei tasselli.

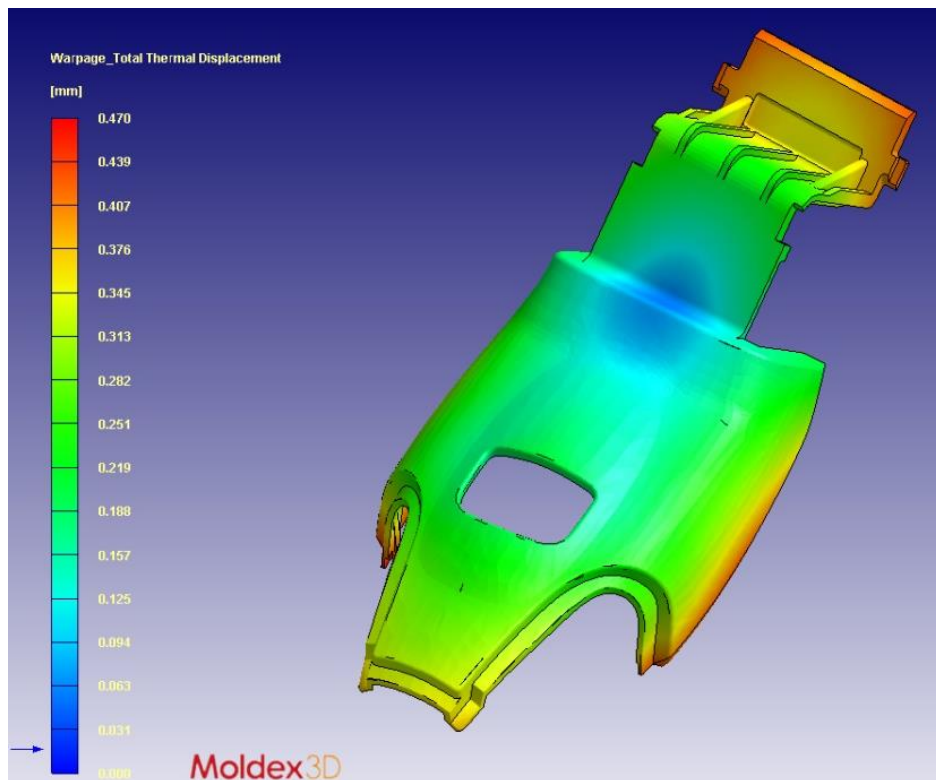


Figura 71 - Spostamento deformazione termica con canali tradizionali (parte superiore)

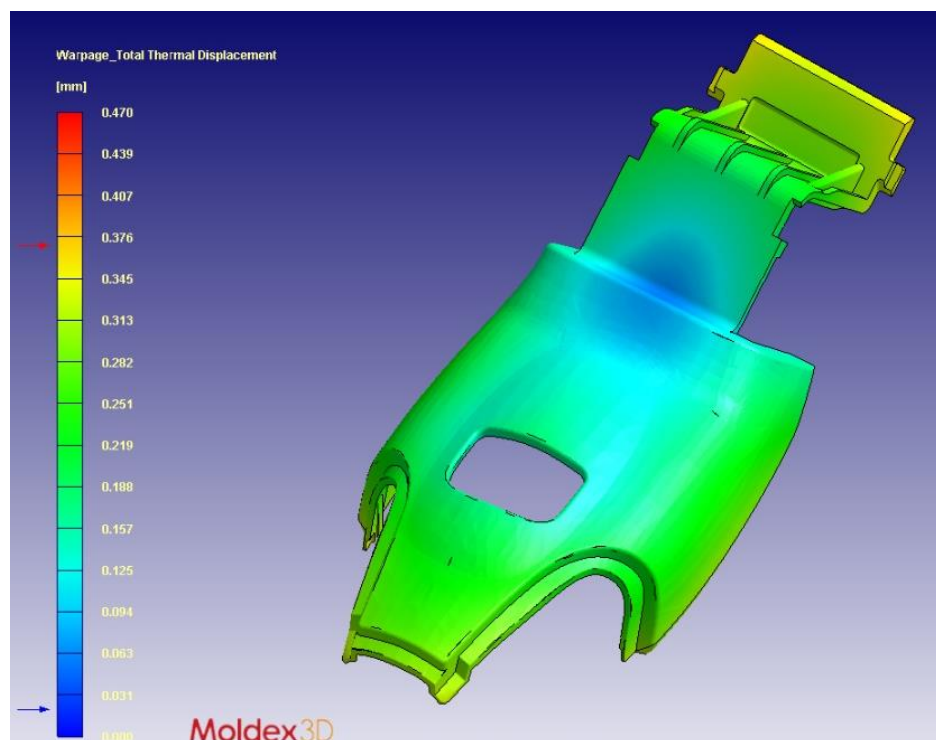


Figura 72 - Spostamento deformazione termica per Step 3 con inserto (parte superiore)

Tra le Figure 74 e 75 è possibile effettuare un confronto dei valori di deformazione termica sulla parte inferiore della cover.

Anche nella zona ricurva, dove si ha l'accoppiamento con il supporto, si ha un miglioramento della deformazione termica.

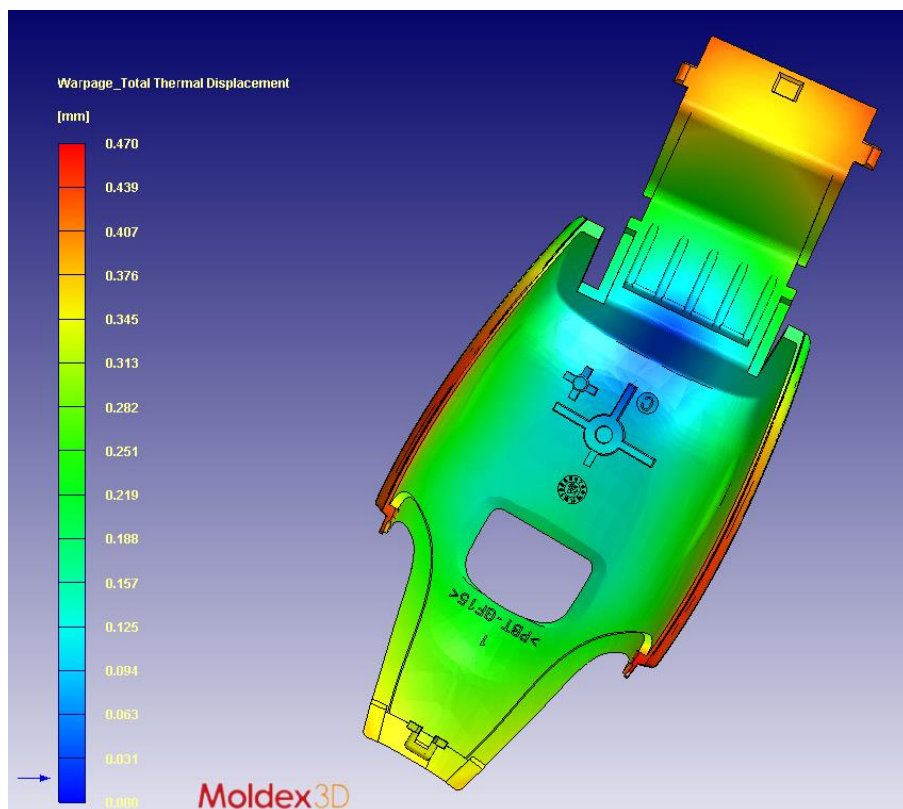


Figura 73 - Spostamento deformazione termica con canali tradizionali (parte inferiore)

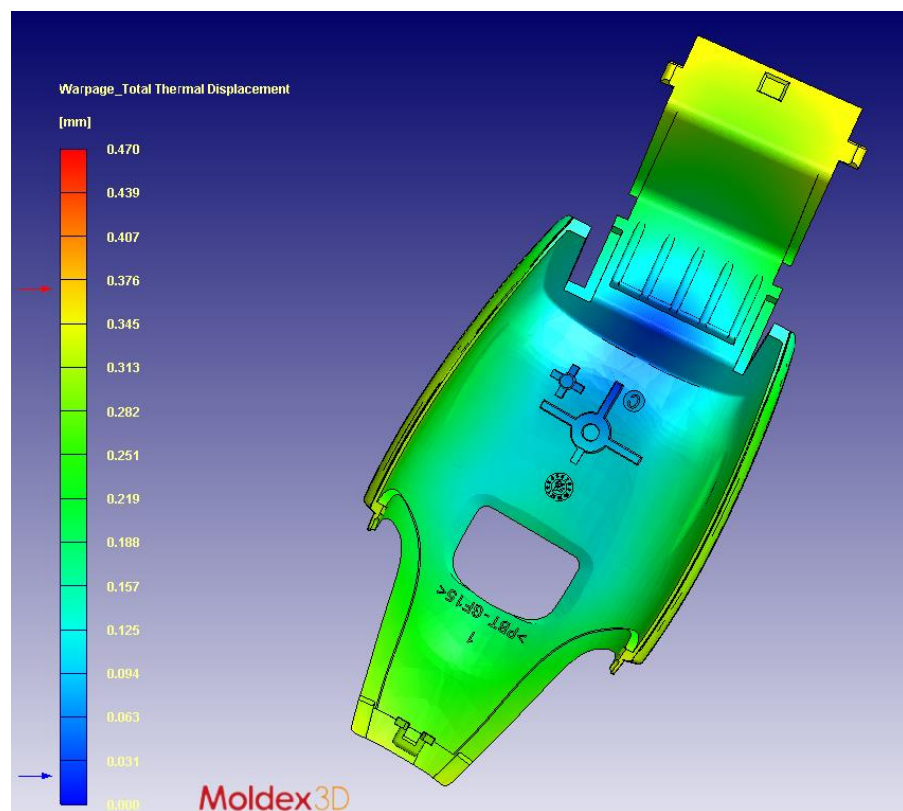


Figura 74 - Spostamento deformazione termica per Step 3 con inserto (parte inferiore)

Nelle figure precedenti è possibile vedere le zone dove si ha un miglioramento della deformazione. Per quantificare il miglioramento sono state misurate delle quote ed è stato effettuato un confronto tra la deformazione ottenuta con i canali tradizionali e quella ottenuta con i canali conformali.

La Figura 76 mostra la prima quota presa in considerazione ottenuta con una sezione dinamica su un sistema di riferimento locale, con asse x di simmetria per il pezzo.

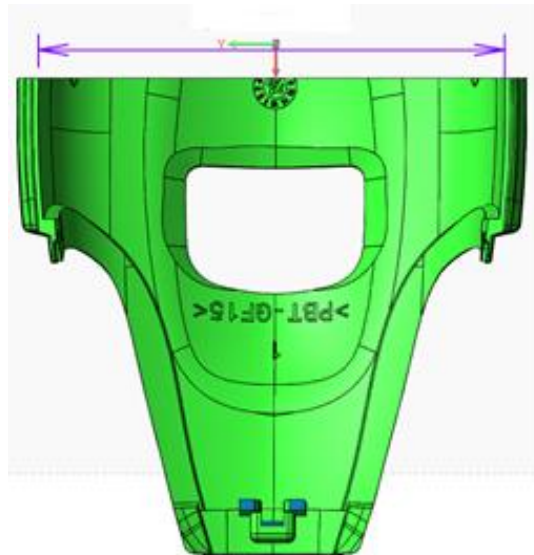


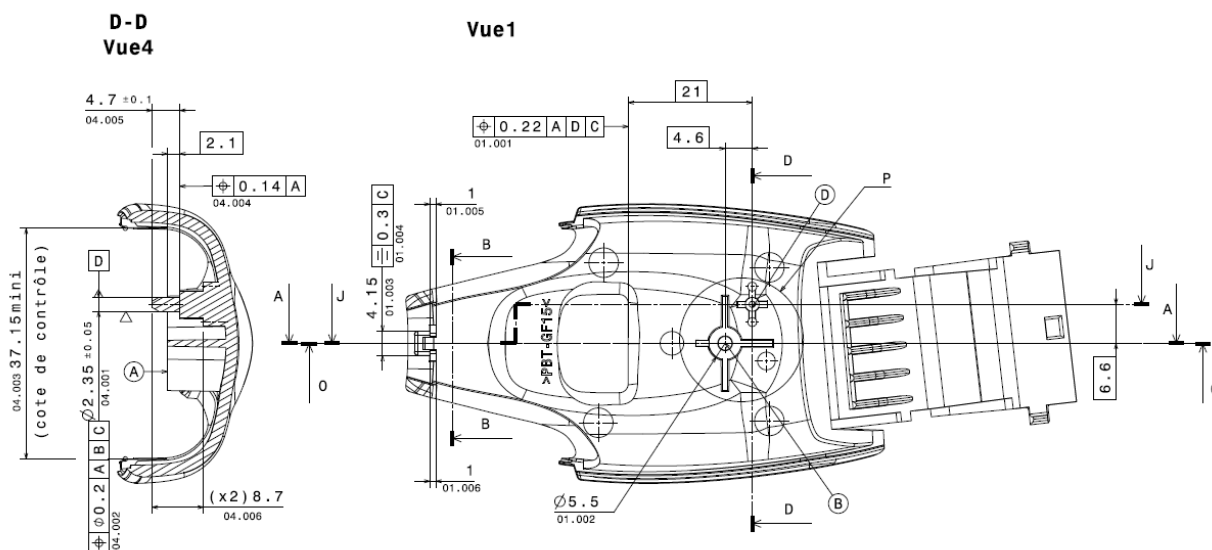
Figura 75 - Prima quota

Nella zona ricurva, che si accoppia per forzamento con il supporto grazie alla presenza di una scanalatura, è importante che entrambi i componenti rispettino le tolleranze. Con il raffreddamento conforme (blu) si ha una riduzione di 0,28 mm rispetto alla deformazione con il raffreddamento tradizionale (rosso) (Figura 77). Per la forma della cover, questa tende a chiudersi su se stessa. Ridurre di tre decimi di millimetro la deformazione può significare rientrare nelle tolleranze dimensionali del pezzo.



Figura 76 - Confronto prima quota

Da disegno la sezione D-D mostra una quota di controllo. Questa quota non è quella scelta per il confronto ma mostra il valore minimo oltre il quale non è più garantito l'accoppiamento.



La quota di controllo è stata misurata anche sugli stl. Il risultato è che non si scende al di sotto del valore limite in entrambi i casi ma con il conformal cooling la cover per quella quota considerata guadagna 0,25 mm (Figura 79). Gli stl rappresentano la deformazione totale ottenuti con il Software CAE, Moldex3D R15.0. In altre parole rappresentano il risultato finale del processo di plastificazione.



La Figura 80 mostra alcune quote della parte a forma di “z”. La quota analizzata è quella all’estremità sinistra della figura ed è di 31 mm. Questa quota è importante perché i denti scanalati visibili in Figura 81 entrano nelle sedi del supporto e garantiscono l’accoppiamento delle parti nell’area inferiore, non estetica.

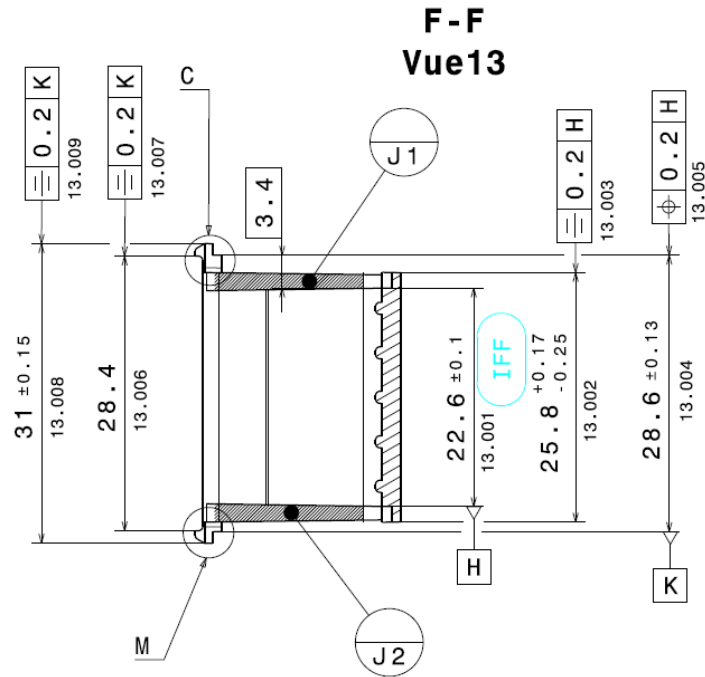


Figura 79 - Quota per accoppiamento

Le deformazioni del pezzo per entrambi i layout non rientrano nella tolleranza del disegno 2D (Figura 81). Si ha un miglioramento di due centesimi di millimetro tra le due simulazioni ma questo non è sufficiente in quanto lo scostamento inferiore è di 30,85 mm.

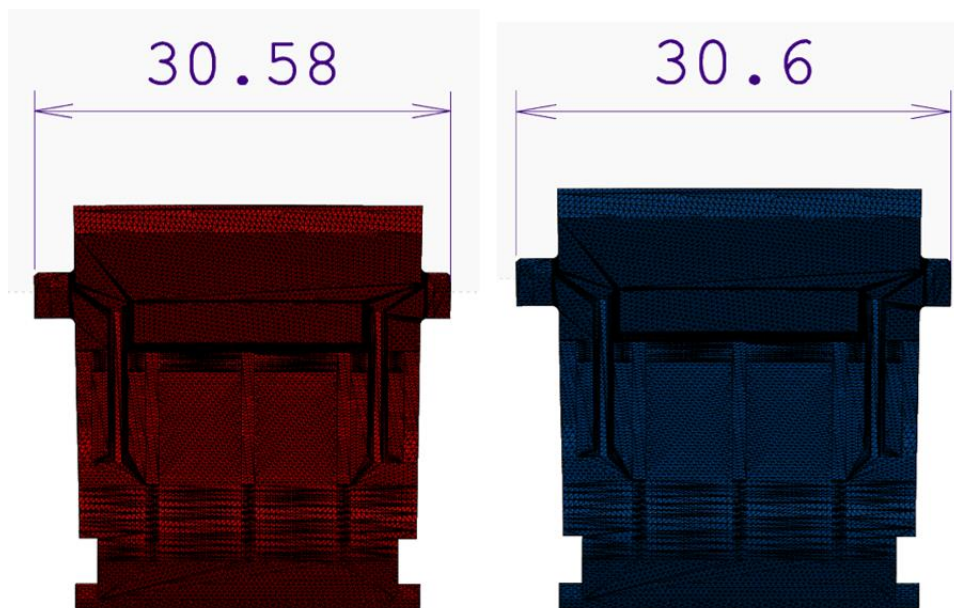


Figura 80 – Confronto terza quota

Nel disegno 2D c'è una lista delle quote critiche (Figura 82).

In Figura 83 è possibile vedere le quote critiche 11.001 e 11.002 nella vista 11.

La Figura 85 mostra la quota 11.002 per la cover ottenuta con il layout tradizionale con i parametri di stampaggio (Tabella 8). La quota con i canali conformali diminuisce di sei decimi di mm ed entrambe non rientrano, di circa un decimo di millimetro, nella tolleranza dimensionale.

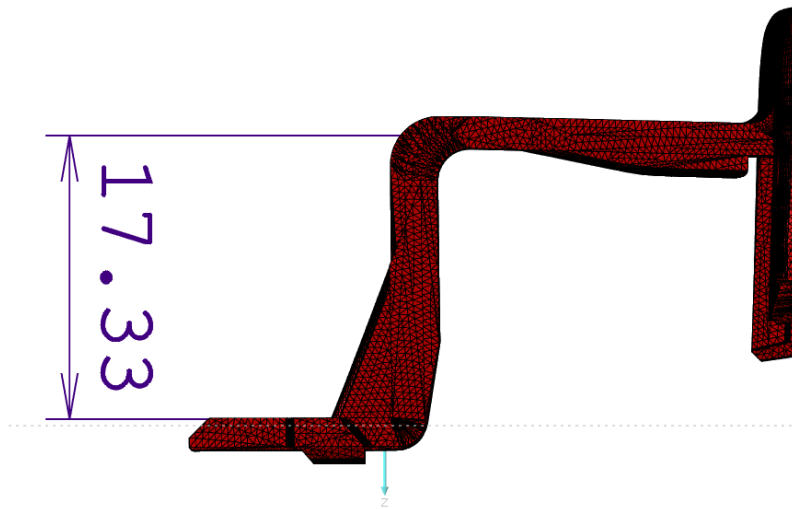


Figura 84 - Quota 11.002

La terza quota critica è riportata nella vista 13 di Figura 86.

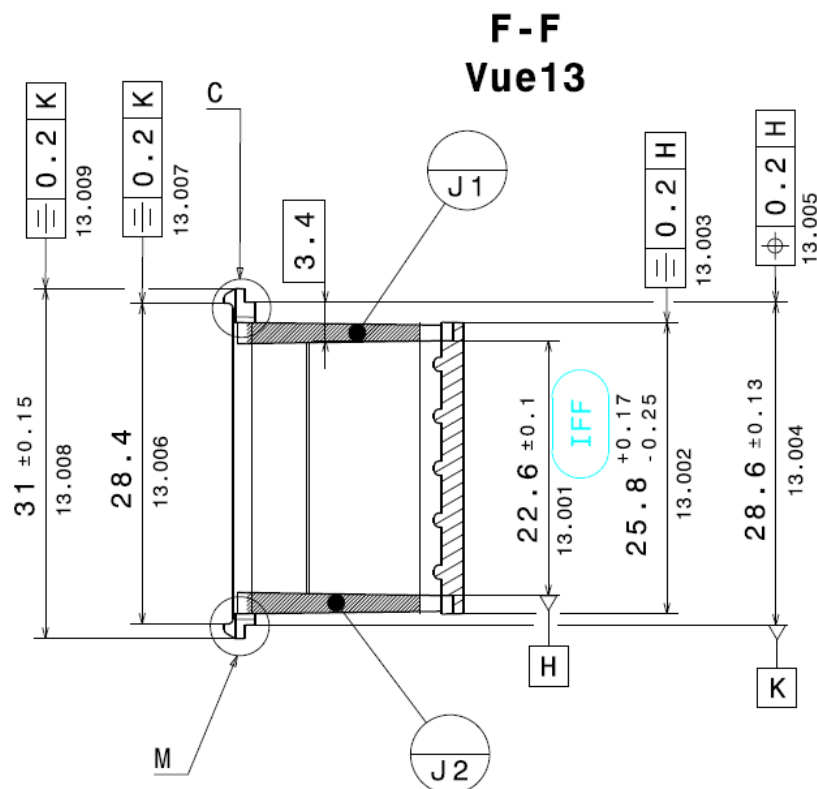


Figura 85 - Vista 13 (Sezione F-F)

Anche in questo caso si esce fuori tolleranza di tre decimi di millimetro per entrambe le simulazioni. La Figura 87 mostra il valore per il layout tradizionale che risulta non variare per il layout conforme. Questo significa che in questa zona del pezzo la geometria e l'orientamento della fibra determinano

la deformazione del pezzo. Per la progettazione futura dello stampo si dovranno modificare le cavità in considerazione della prevedibile tendenza alla deformazione della cover nell'area a forma di "z".

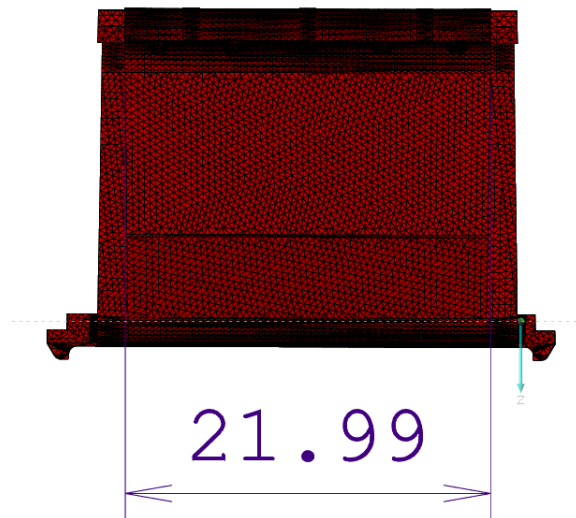


Figura 86 - Quota 13.001

In conclusione, si può dire che il conformal cooling riduce il numero di messe a punto nella parte ricurva, mentre nella zona del punto di iniezione non basta e non si hanno benefici apprezzabili con in nuovo layout di condizionamento.

9. RIPROGETTAZIONE DELLO STAMPO

Lo studio di un sistema di raffreddamento conforme è nato dall'esigenza di riprogettare lo stampo presente in produzione. Dopo un certo tempo, per varie ragioni (usura, obsolescenza, durata commerciale), gli stampi vengono sostituiti con dei nuovi. Possono essere in alcuni casi modificate: le cavità, le piastre, il sistema di estrazione e altro a seconda delle nuove esigenze. Nel nuovo contesto concorrenziale si è reso necessario ridurre il tempo ciclo per poter ridurre il costo unitario del prodotto. Con la nuova tecnologia dell'Additive Manufacturing si sono potuti realizzare, già dal '95, inserti per stampi in acciaio.

9.1. Riprogettazione materozza

Analizzando le simulazioni precedenti si nota come il raffreddamento conforme diminuisce il tempo ciclo del pezzo ma chi comanda il raffreddamento è la materozza che presenta uno spessore che è più del doppio di quello del pezzo (Figura 88).

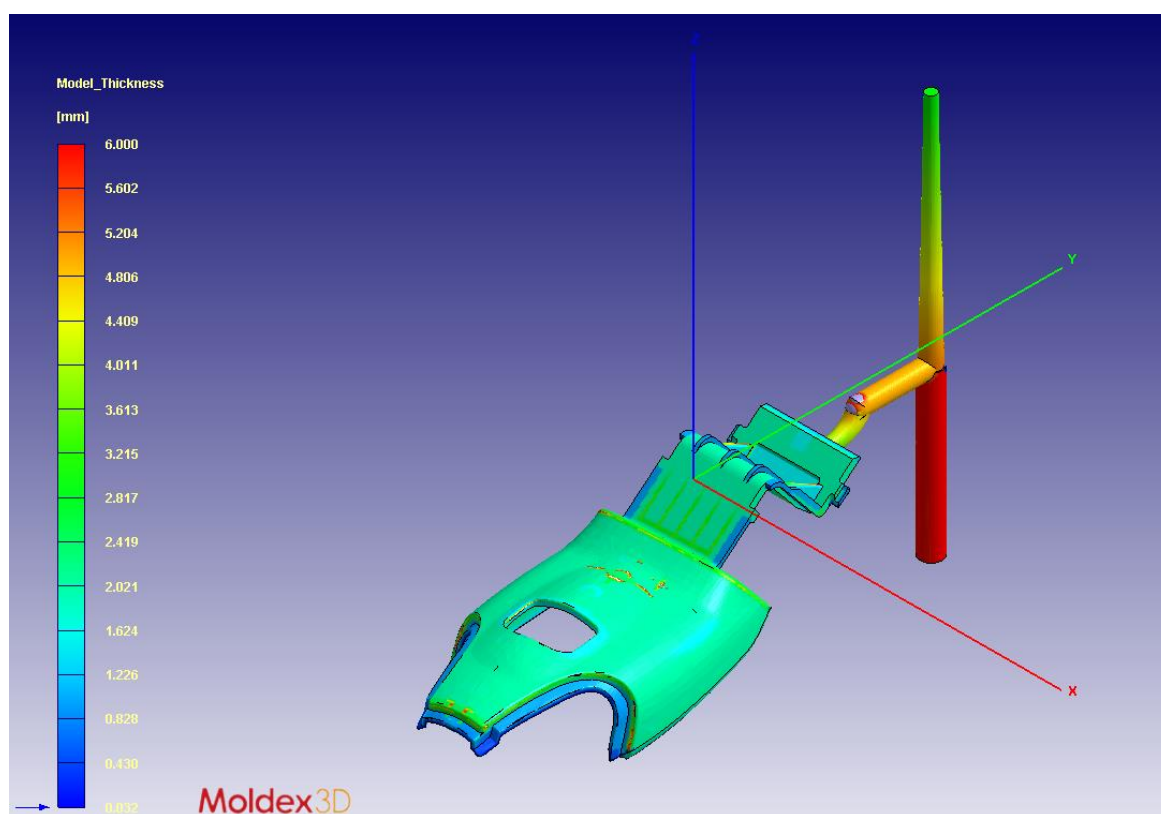


Figura 87 - Spessore materozza

Dalla teoria è ormai noto che ciò che determina un aumento del tempo di raffreddamento di un componente è il suo spessore. Per tale motivo, è inutile realizzare un sistema di raffreddamento conforme del componente se si ha una materozza sovradimensionata.

In Figura 89 è possibile vedere il massimo tempo di raffreddamento della materozza per la simulazione con layout tradizionale.

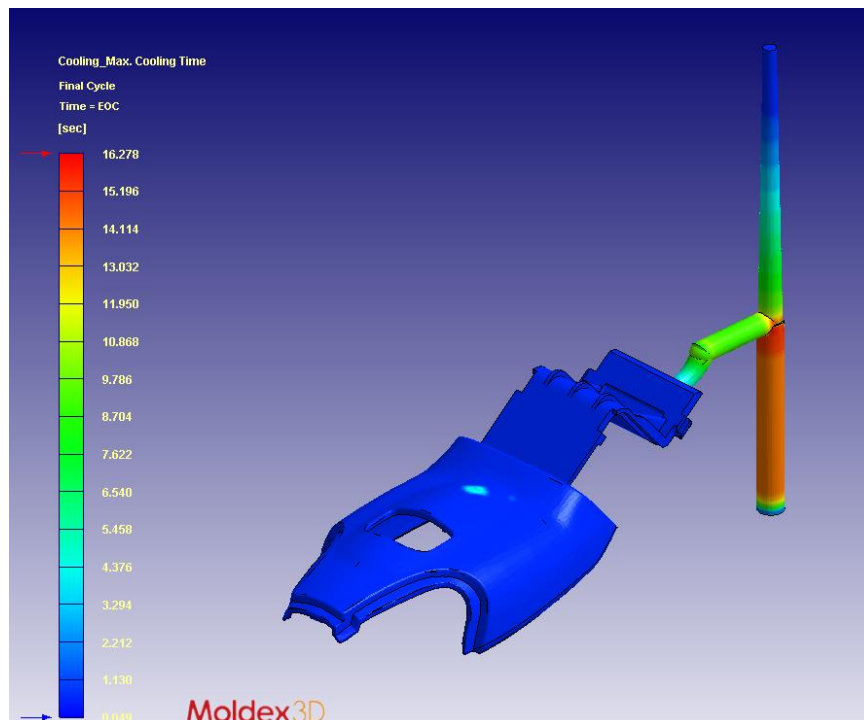


Figura 88 - Max cooling time sulla materozza con canali tradizionali

La figura mostra che per l'estrazione bisogna aspettare 16 secondi. Sul pezzo invece basterebbero all'incirca 5 secondi. Con il conformal cooling dedicato sul pezzo si ha una riduzione del tempo di raffreddamento ma questo non è sufficiente a far comandare l'estrazione al massimo tempo di raffreddamento del pezzo (Figura 90).

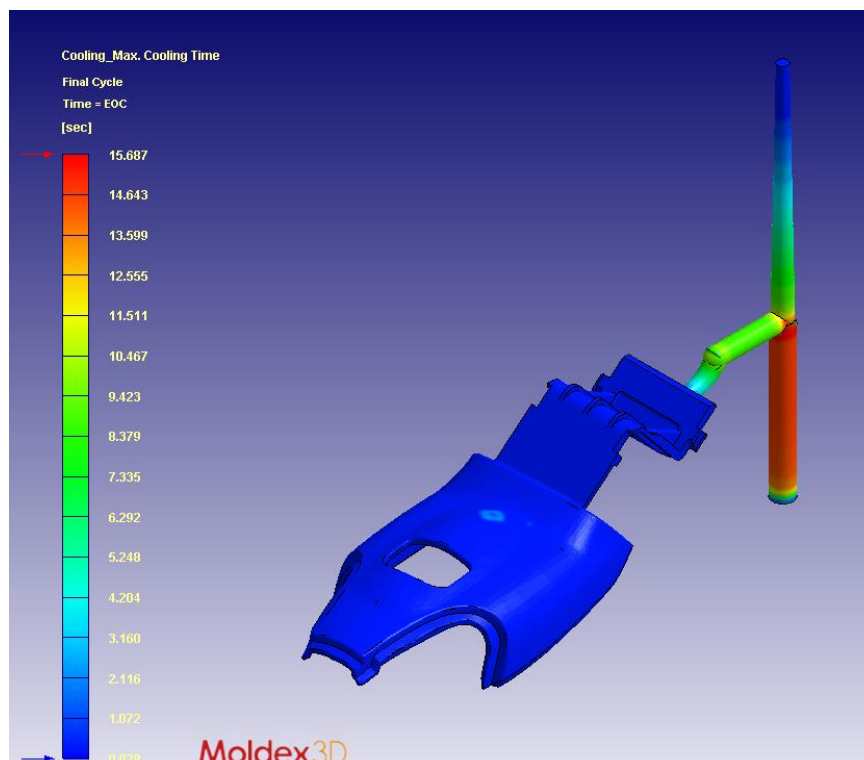


Figura 89 - Max cooling time sulla materozza con conformal cooling

Per la riprogettazione dello stampo si poteva pensare ad un raffreddamento dedicato per la materozza. Questo è stato escluso a priori in quanto la soluzione migliore è quella di ridurre il pozzetto di raccolta, smagrendolo, e utilizzare un hot runner.

La Figura 91 mostra la soluzione offerta dal produttore di normalizzati Meusburger. Le dimensioni non sono in scala ma la multinazionale ha proposto la fattibilità di una soluzione che permettesse di ridurre lo spessore massimo sulla carota. Si tratta di utilizzare un estrattore della materozza non convenzionale chiamato “centring pin”. Con questa forma l’estrattore accompagna la materozza, in fase di estrazione, e la mantiene in asse per consentire lo sfilamento della sottomarina.

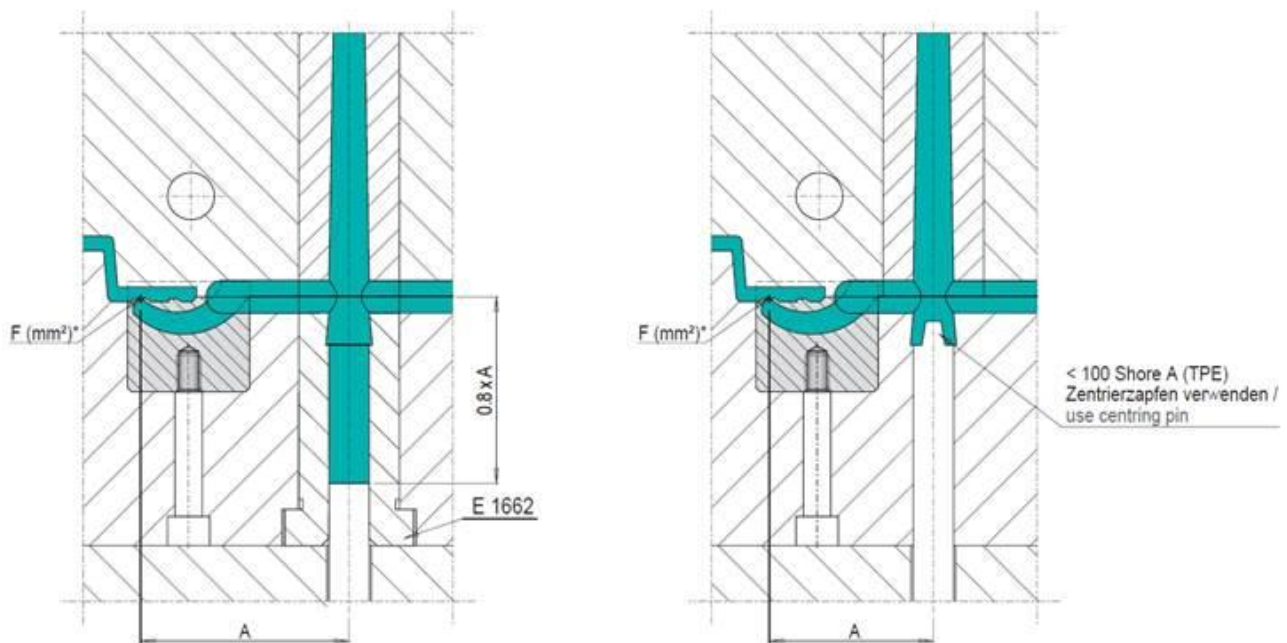


Figura 90 - Soluzione per il runner proposta da Meusburger

Per un’analisi preliminare della soluzione proposta si è modificata la materozza riducendone la lunghezza del pozzetto e lo spessore. In Figura 92 è possibile vedere una sezione della materozza dove è possibile apprezzarne lo smagrimo. Inoltre la figura mostra la scomparsa della carota, sostituita dall’iniettore.

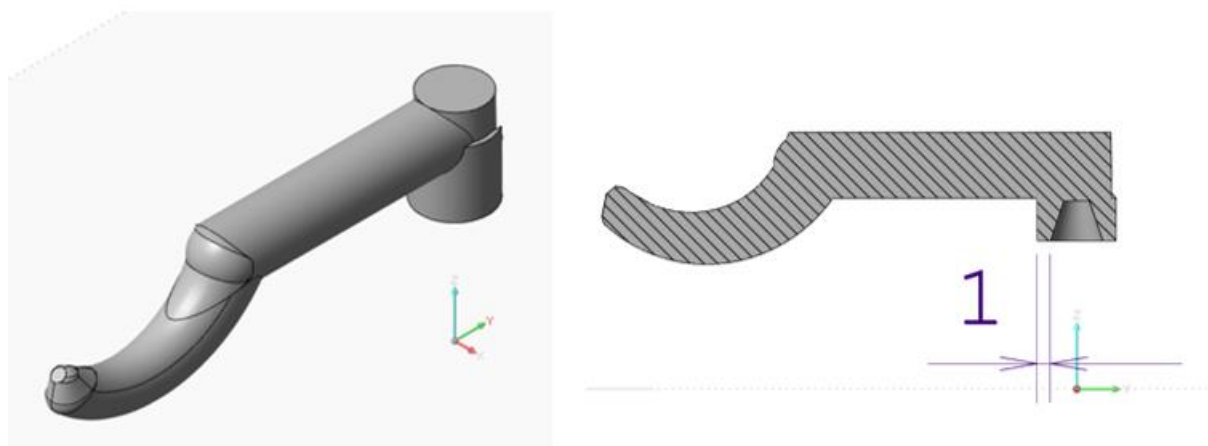


Figura 91 - Materozza riprogettata

9.2. Simulazione reologica

La Figura 93 mostra il mold base con: i canali di raffreddamento, l’inserto in Ampcoloy 83, pezzo e hot runner. Gli ingressi e le uscite sono i medesimi della simulazione del Paragrafo 7.7.

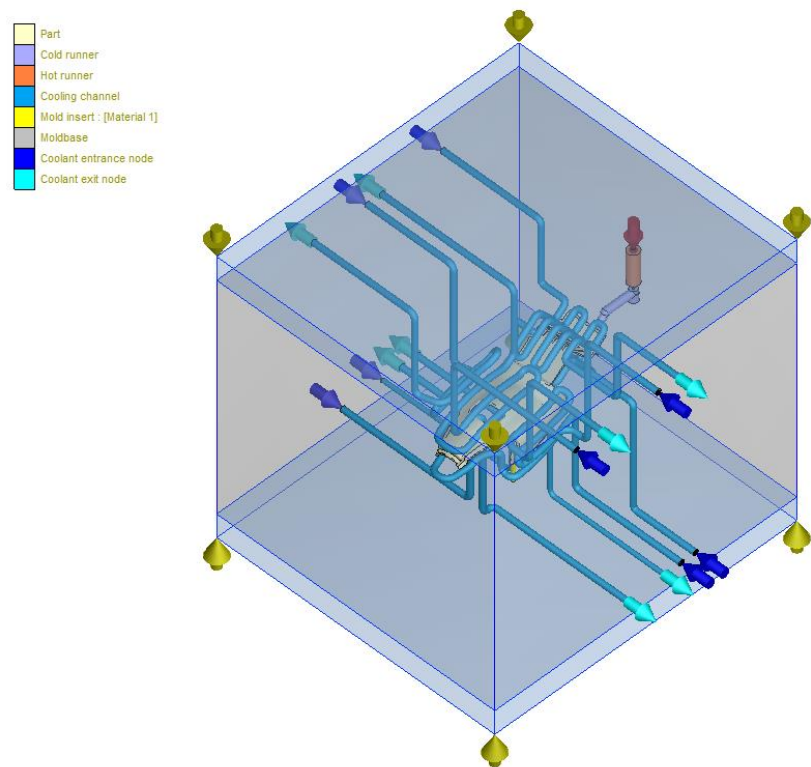
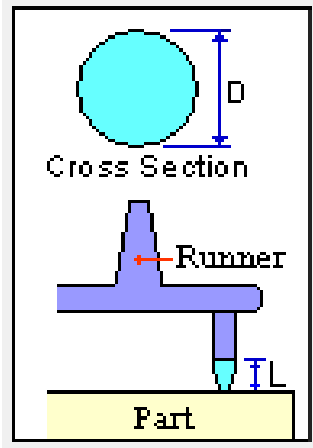


Figura 92 - Mold base con hot runner

In Tabella 13 sono riportate le dimensioni dell’hot runner per un’analisi preliminare.



Diametro minore [mm]	1,5
Diametro maggiore [mm]	8
Lunghezza [mm]	5

Tabella 13 - Dimensioni hot runner

In Tabella 14 sono riportati i nuovi parametri di processo. La temperatura dello stampo, del liquido refrigerante e del tassello del cannocchiale è ora di 80°C, ovvero 10°C in meno rispetto alle simulazioni precedenti.

PARAMETRI DI SIMULAZIONE	
Tempo di iniezione [s]	1,02
Tempo di mantenimento [s]	6,5
Commutazione VP [%]	98
Tempo di raffreddamento [s]	20
Temperatura cilindro [°C]	260
Temperatura stampo [°C]	80
Liquido refrigerante	Acqua
Temperatura liquido refrigerante [°C]	80
Diametro canali [mm]	4
Portata liquido refrigerante [cm ³ /s]	13
Temperatura aria [°C]	25
Temperatura cannocchiale [°C]	80

Tabella 14 - Parametri di simulazione ottimizzati

La Figura 94 mostra la temperatura media della superficie della cavità.

Abbassando le temperature dello stampo e dei canali, queste diminuiscono anche in cavità. Avere temperature più basse rendere più complicato il riempimento. Di converso si ha il vantaggio del miglioramento del raffreddamento dello stampo.

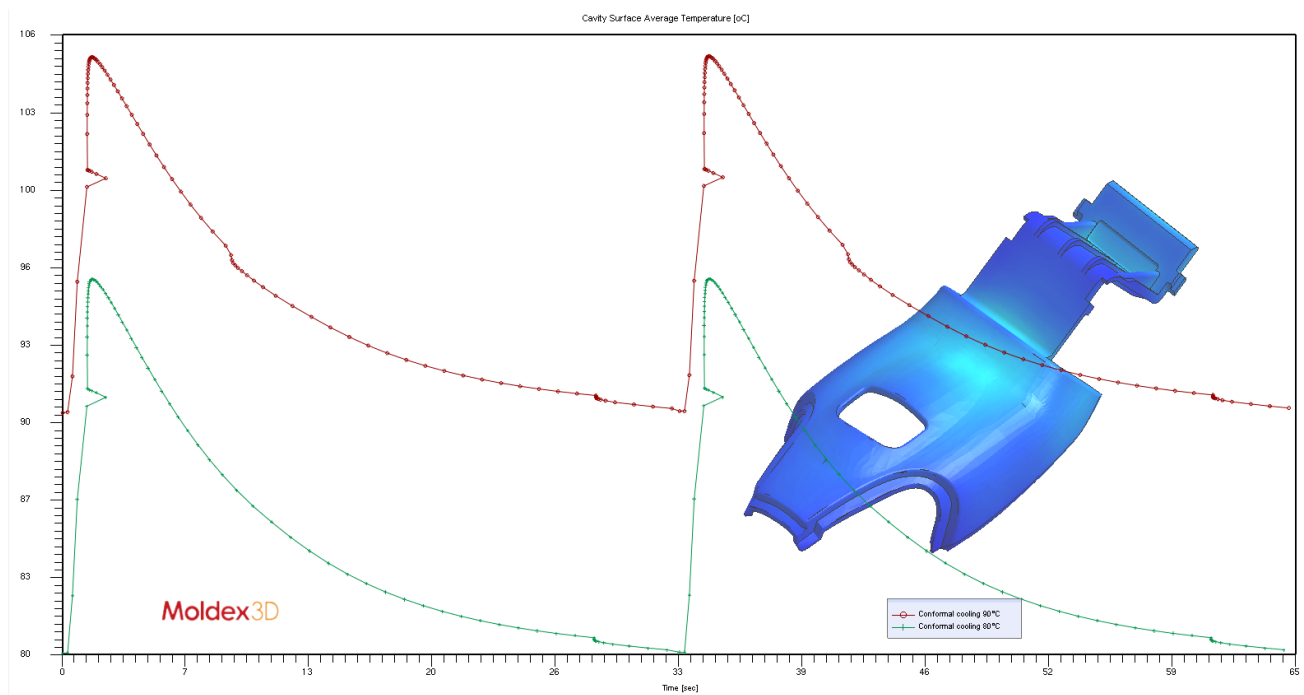


Figura 93 - Cavity Surface Temperature

I risultati della simulazione mostrano che il Time to Reach Ejection Temperature è massimo nell' hot runner (Figura 95).

Questo è il tempo stimato per l'estrazione, che va dalla fine del mantenimento fino a quando la parte in plastica è sufficientemente congelata. Trattasi di un indicatore degli hot spot e del tempo ciclo, riferibile limitatamente alla materozza.

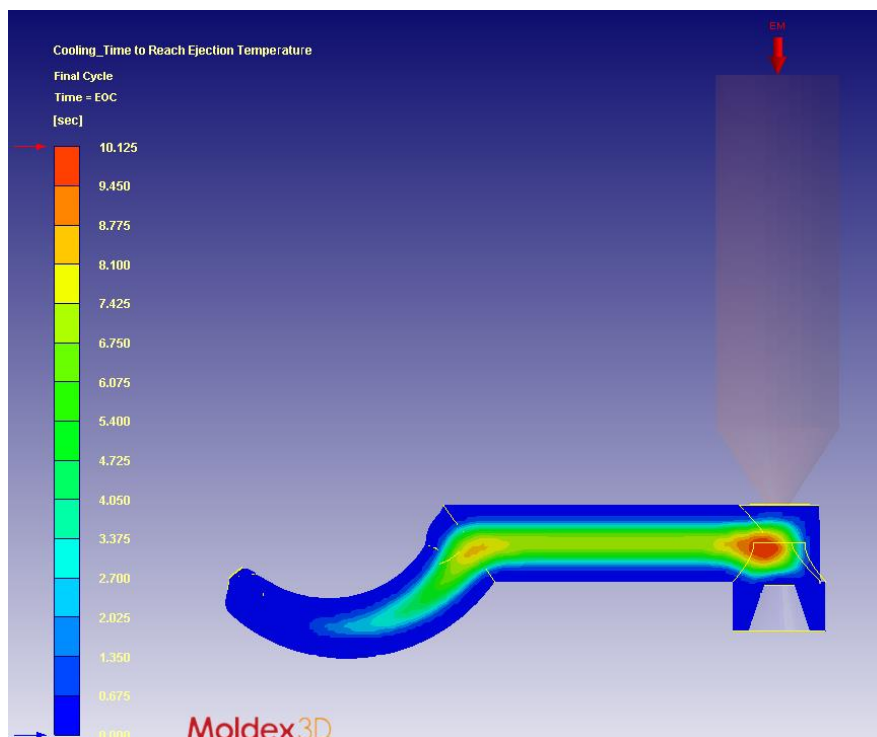


Figura 94 - Max Time to Reach Ejection Temperature

La Figura 96 mostra il massimo tempo di raffreddamento della materozza.

Il pozzetto smagrito non da problemi sul tempo ciclo, mentre gli hot spots in prossimità dell'iniettore determinano un aumento considerevole del max cooling time (Figura 96).

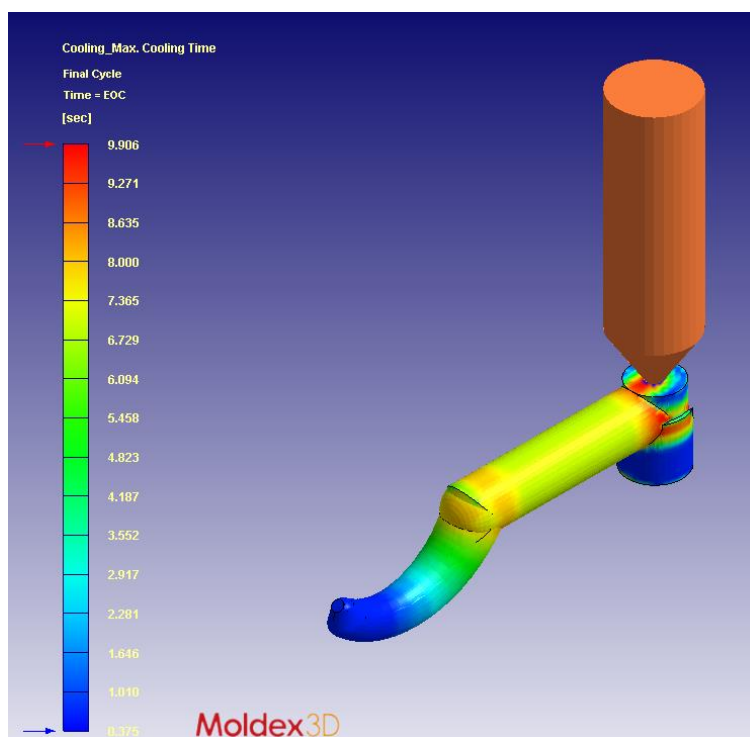


Figura 95 - Max Time to Reach Ejection Temperature

La Figura 97 mostra la cover con l'iniettore.

Con la stessa scala della figura precedente è possibile vedere come, nonostante l'ottimizzazione della materozza e l'utilizzo di un canale caldo, il tempo di estrazione per la materozza è di circa cinque volte superiore a quella della cover.

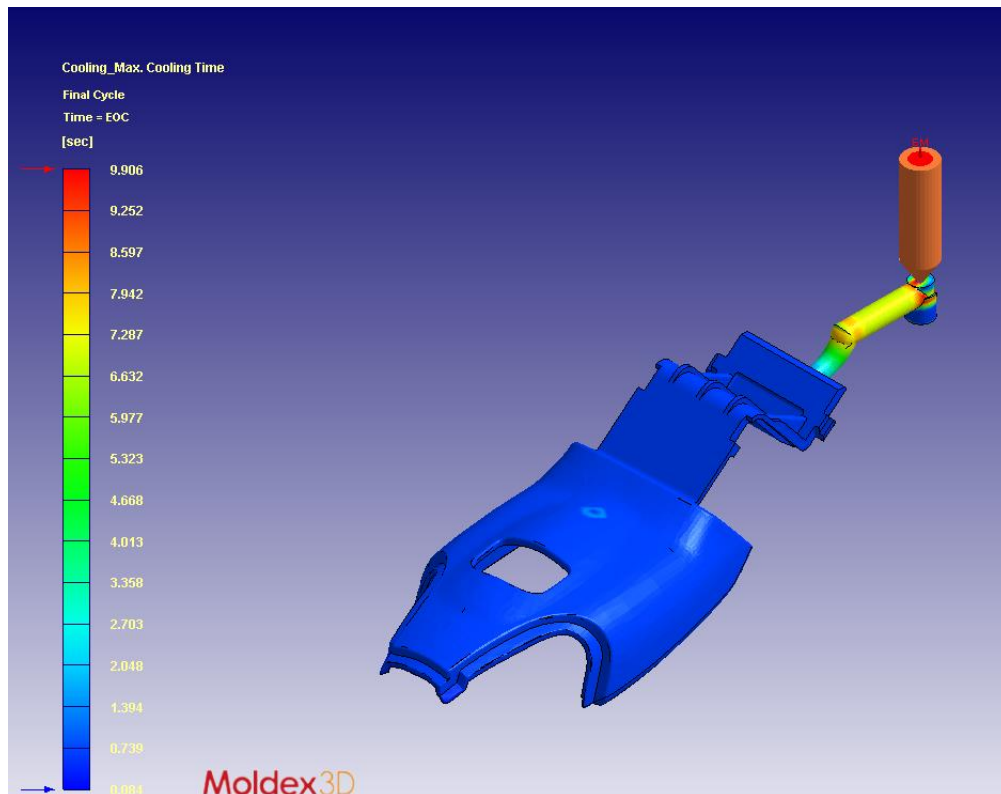


Figura 96 - Max cooling time

Analizzando il melting core nei primi due steps di raffreddamento (Tabella 7) è possibile vedere la plastica fusa presente nella materozza a 9,338 e 11,156 secondi. (Figura 98).

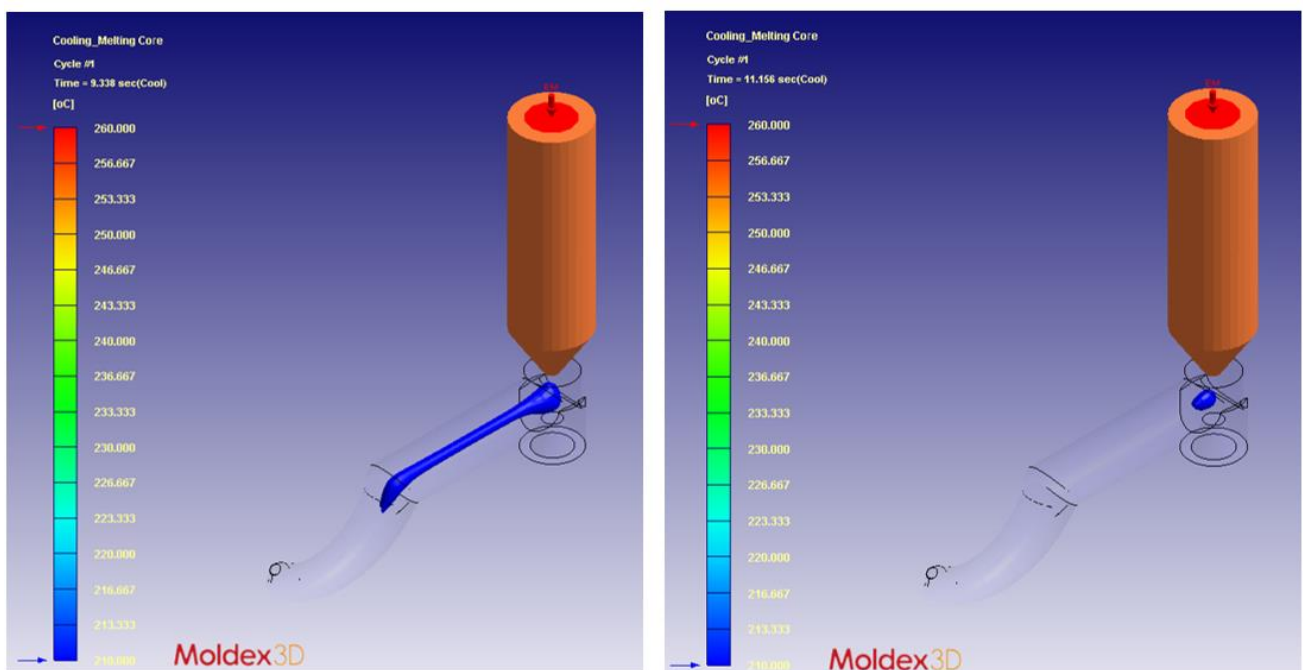


Figura 97 - Melting core hot runner

Si può pensare di effettuare l'estrazione della cover a 11,5 secondi, anticipando l'estrazione della materozza. La materozza è prevalentemente congelata e per tale motivo non viene inficiata la meccanica dell'hot runner. Sicuramente subirà una deformazione maggiore e verrà estratta a temperature superiori ma essendo per definizione uno scarto, gli eventuali difetti estetici non preoccupano più di tanto. Tuttavia la deformazione non deve essere tale da impedire lo sfilamento del gate a sottomarina dal normalizzato.

E dunque per la materozza sono necessari 4 secondi per poter essere estratta.

Le Figura 99 e 100 mostrano il max cooling time per la cover, rispettivamente per la parte superiore e inferiore.

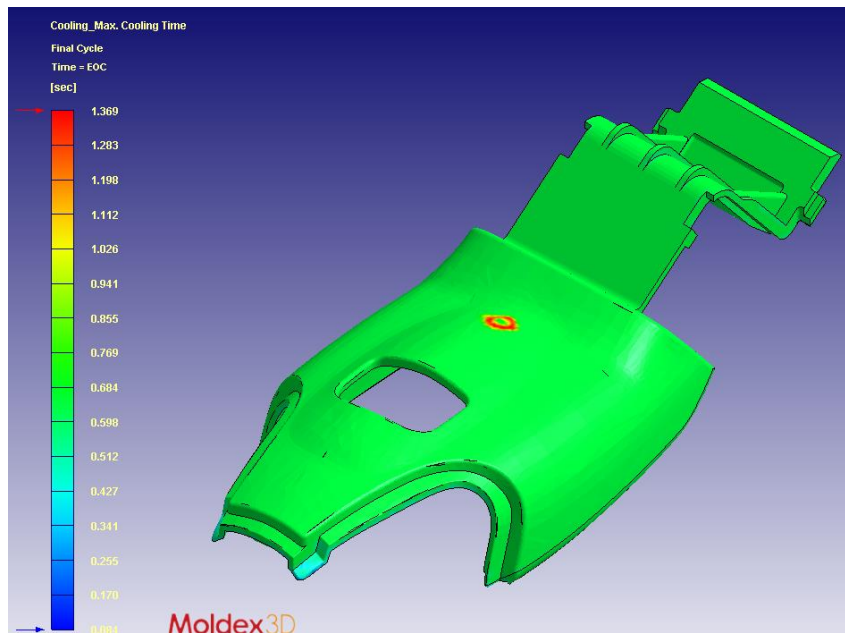


Figura 98 - Max cooling time parte superiore

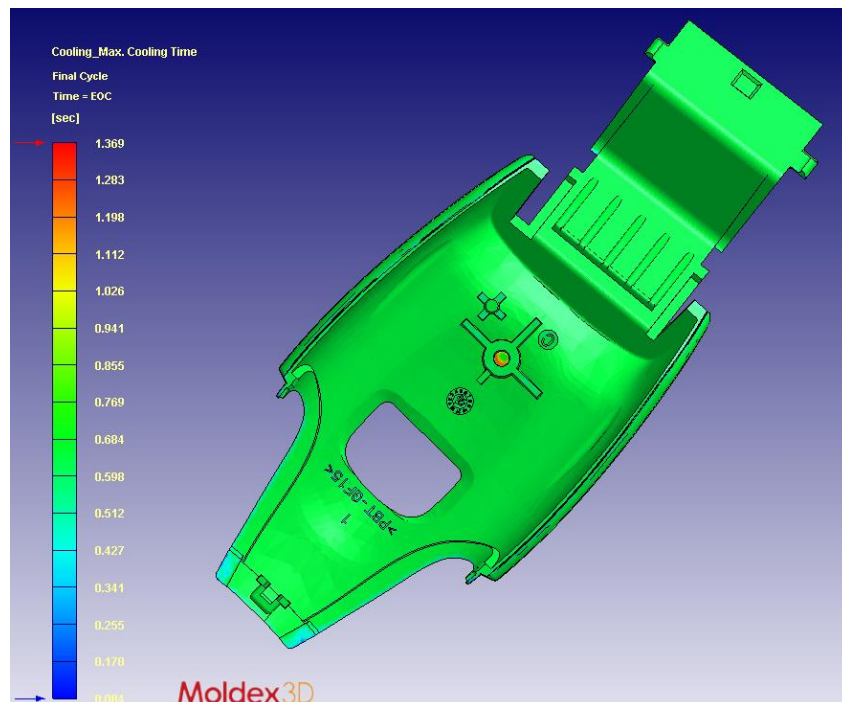


Figura 99 - Max cooling time parte inferiore

Il pezzo potrebbe essere estratto a 1,5 secondi ma è l'hot runner che ne comanda il tempo di estrazione. Il risultato finale comunque è più che soddisfacente. Con la riprogettazione, da un tempo ciclo di 34 secondi si arriva a 18 secondi. Si ha così una riduzione del 47,06 %.

10. LA PRODUZIONE E COSTI

Per la fattibilità del progetto avere un numero elevato di ingressi e uscite può essere un problema. I canali sinterizzati hanno diametri generalmente più piccoli rispetto ai tradizionali.

Quindi l'acqua che si utilizza, oltre a essere demineralizzata, deve essere cambiata periodicamente e devono essere utilizzati dei particolari filtri a monte e a valle. Inoltre necessitano di una manutenzione maggiore e devono essere protetti da rivestimenti speciali anticorrosivi.

Gestire una quantità così elevata di ingressi e di uscite diventa problematico, per questo motivo i canali sono stati raccordati per avere nelle singole piastre, superiore e inferiore, un unico ingresso e un'unica uscita.

La Figura 101 mostra i canali in serie, con un'unica entrata e uscita, per la parte fissa.

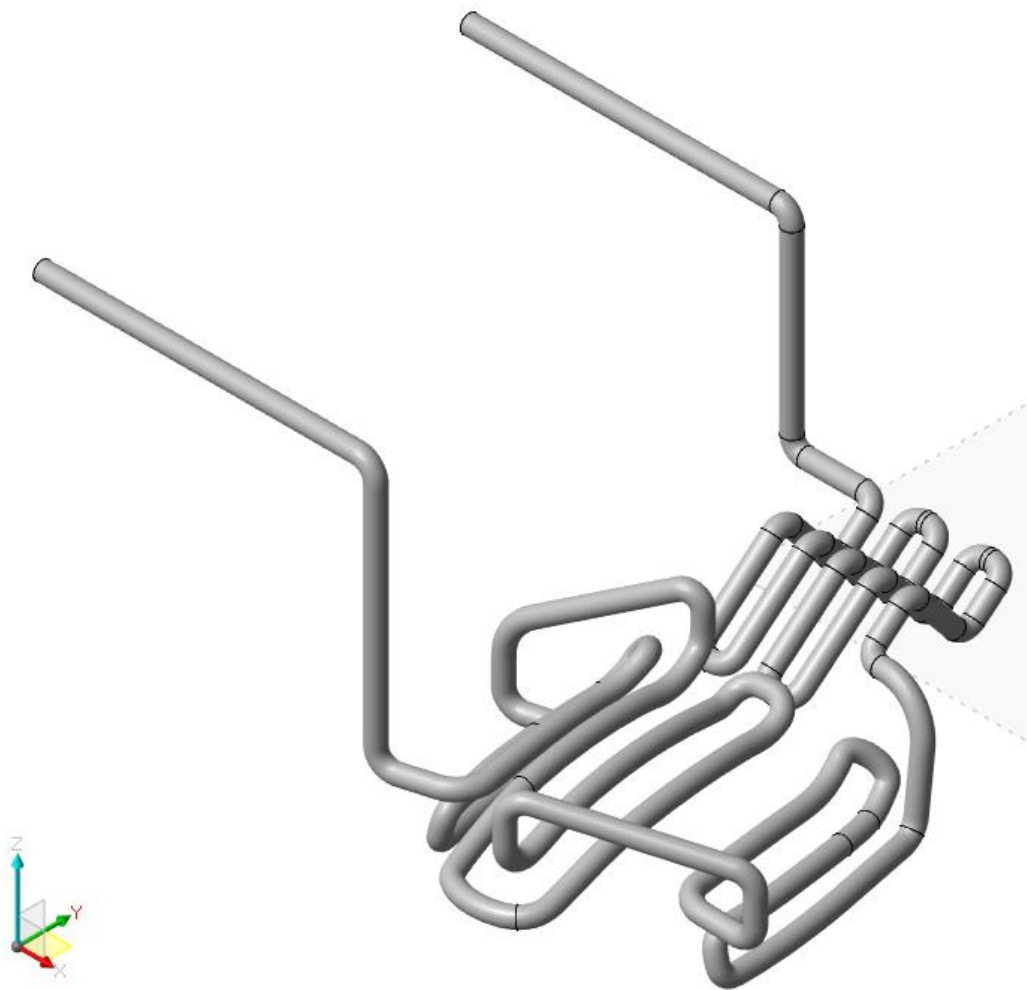


Figura 100 - Conformal cooling parte fissa

Le Figure 102 e 103 mostrano i canali in serie, con un'unica entrata e un'uscita, per la parte mobile. Si veda come il canale di 3 mm è stato raccordato sullo spigolo per ridurre le perdite di carico dovute ad una diminuzione della sezione di passaggio. Il fluido subsonico entra in una sezione convergente che ne fa aumentare la velocità. Poi attraversa la sezione ridotta ed esce da un condotto divergente dove la sua velocità torna a diminuire.

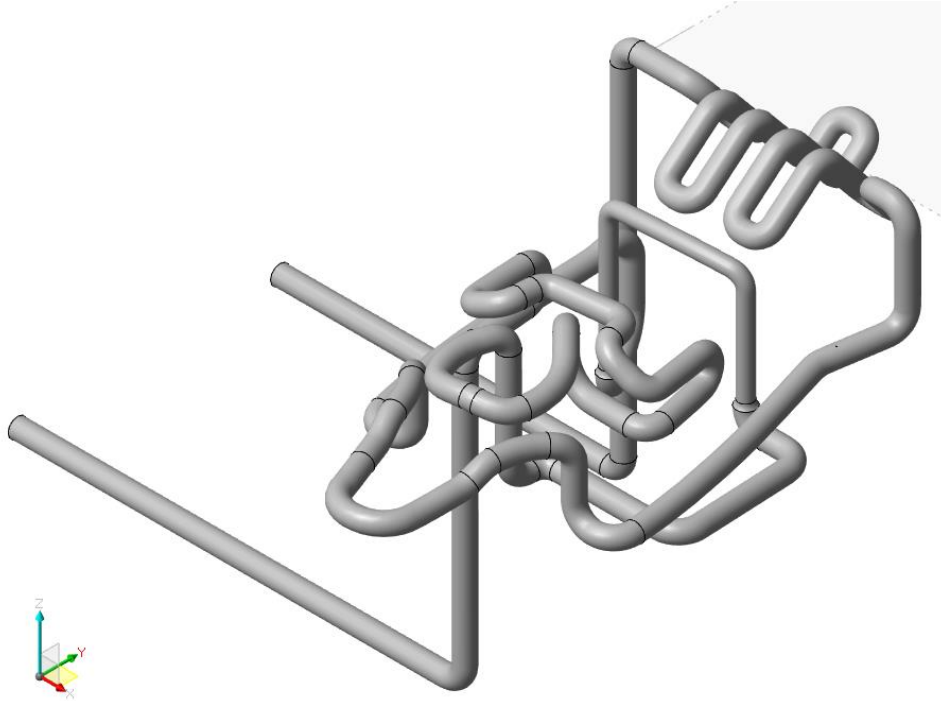


Figura 101 - Conformal cooling parte mobile vista in assonometria

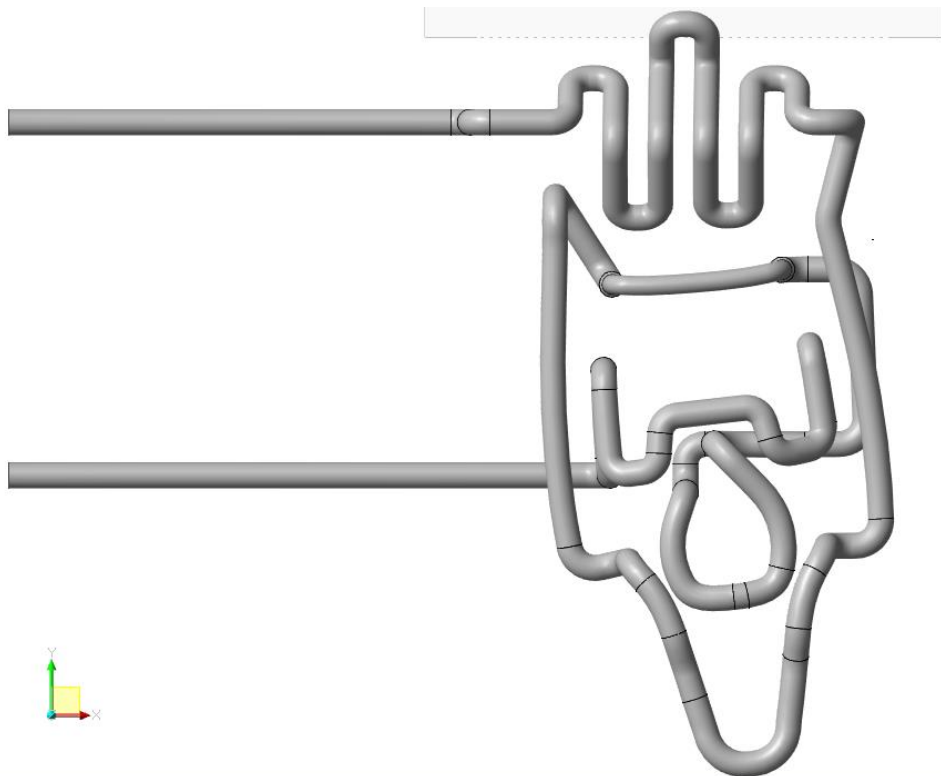


Figura 102 - Conformal cooling parte mobile vista dall'alto

10.1. Simulazione reologica layout finale

I parametri di simulazione sono gli stessi di Tabella 14. In Figura 104 è visibile il mold base con il nuovo layout dei canali conformali.

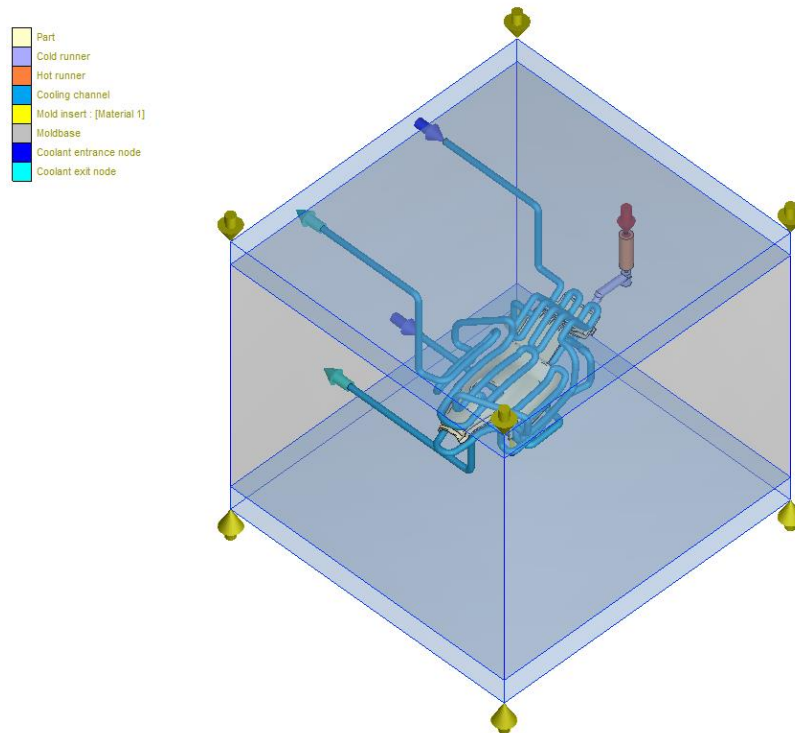


Figura 103 - Mold base con layout finale e hot runner

Il risultato del massimo tempo di raffreddamento mostra un incremento dei tempi rispetto ai canali conformali con più ingressi (Figura 99 e Figura 100), di 0,523 secondi (Figura 105).

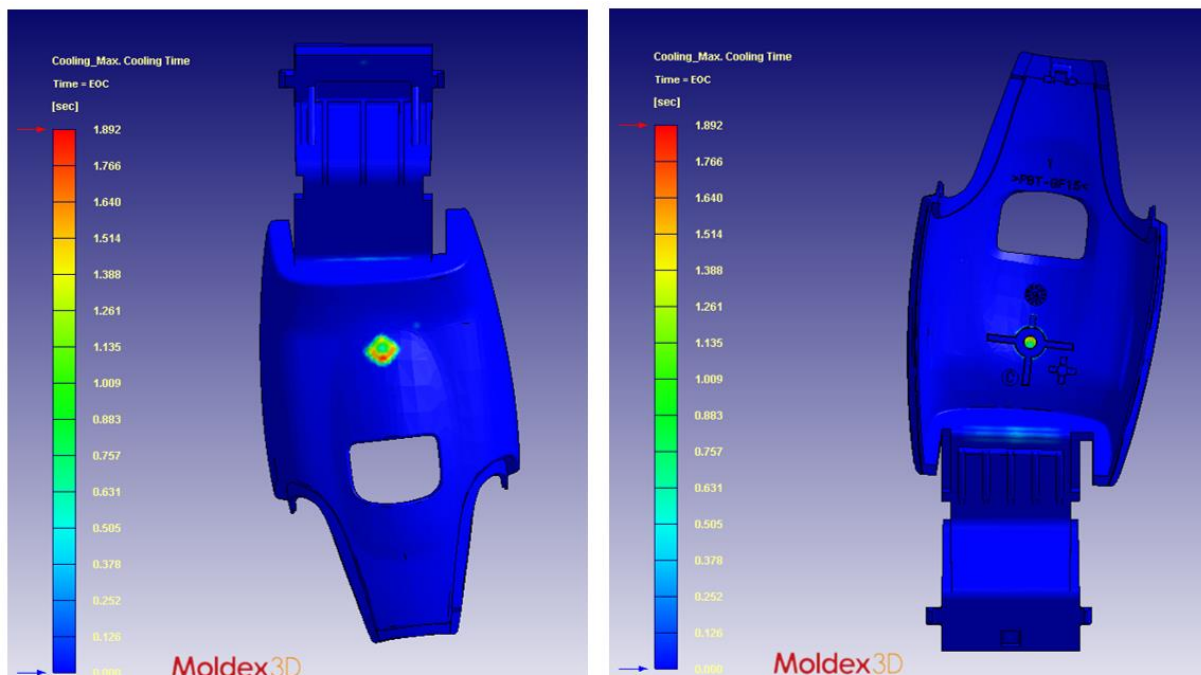


Figura 104 - Max cooling time conformal cooling finale

La Figura 106 mostra il tempo necessario per l'estrazione del pezzo. Confrontando questo valore con quello del runner (Figura 95), si comprende che bisogna aspettare il raffreddamento della materozza prima di eseguire l'estrazione.

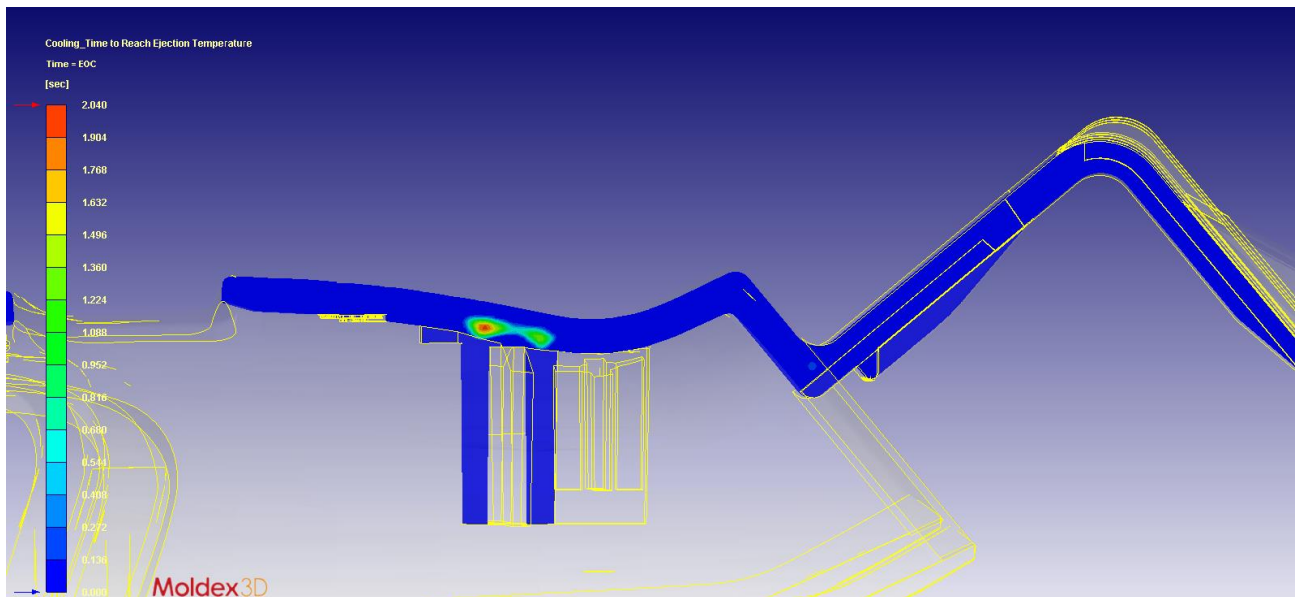


Figura 105 - Time to Reach Ejection Temperature hot runner

Di fatto non si aspetteranno 10 secondi ma bastano appena 4 secondi per eseguire l'estrazione.

La materozza non è il risultato del processo di plastificazione, ma è uno scarto che deve assolvere a due funzioni:

- alimentazione della cavità,
- liberare dal sottosquadro l'iniezione sottomarina.

Per questo, a 4 secondi ha già uno strato esterno congelato. E quindi non ci sarebbero residui di materiale che resterebbero nel normalizzato dell'iniezione e nelle cavità realizzate nei tasselli.

10.2. Confronto tra stampo in produzione e stampo riprogettato

Il risultato finale mostra una riduzione del tempo ciclo dovuto alla capacità dei canali conformali di asportare una quantità maggiore di calore rispetto a quelli tradizionali. Un ulteriore aiuto proviene dall'utilizzo del tassello in rame-berillio e dall'utilizzo dell'hot runner.

Confrontando la Figura 107 con la Figura 106 è possibile vedere come, utilizzando il cold runner, si ha un aumento del tempo di estrazione di 0,8 secondi.

L'utilizzo del cold runner determina un aumento delle pressioni perché aumenta la lunghezza del flusso di 66 mm (lunghezza nominale della carota). Come conseguenza, aumenta lo shear stress e quindi la temperatura della massa fusa. Lo stress residuo è causa frequente di deformazione e cedimenti del pezzo che riducono il ciclo di vita del prodotto. Nei casi peggiori lo shear stress può provocare la rottura del materiale.

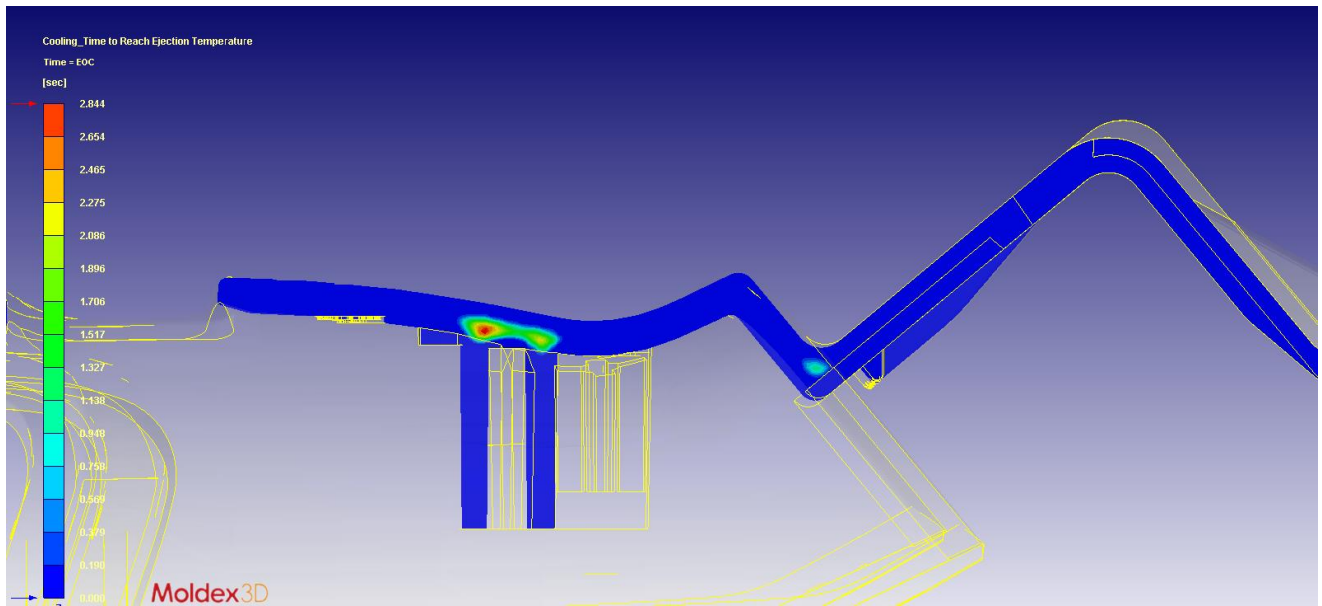


Figura 106 - Time to Reach Ejection Temperature cold runner

La Figura 108 mostra la distribuzione delle temperature e l'efficienza dei canali tradizionali per la simulazione del Capitolo 5. La temperatura dei canali aumenta di 0,5°C per la parte superiore e di 0,3°C per la parte inferiore.

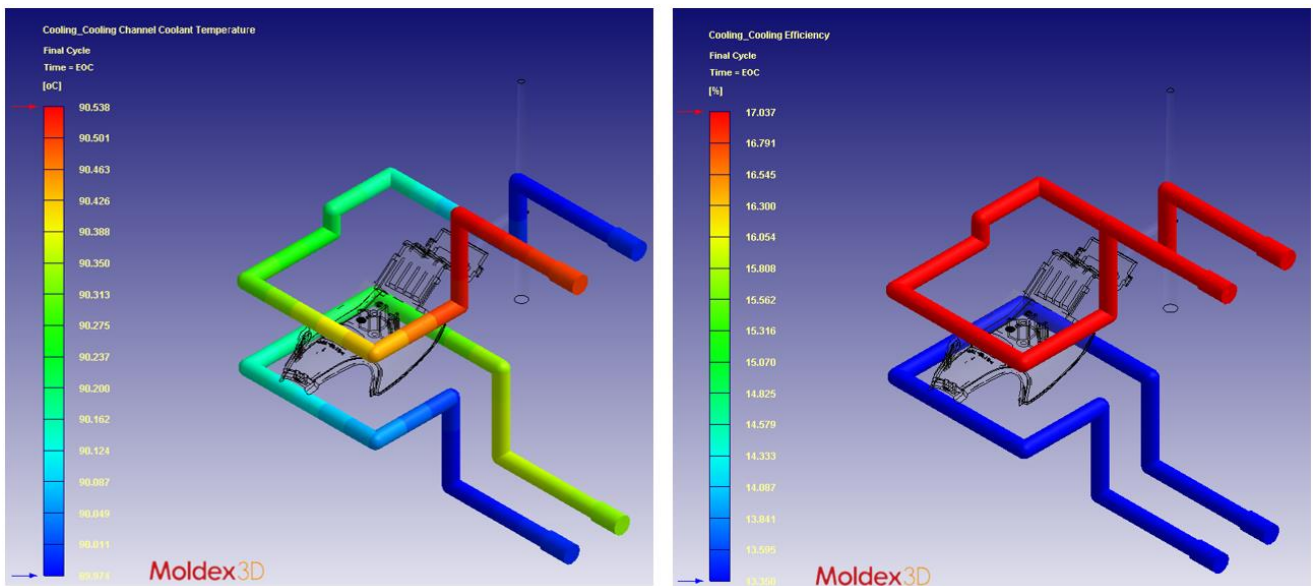


Figura 107 - Temperatura e efficienza canali tradizionali

Il canale superiore risulta avere un'efficienza maggiore dal momento che asporta una quantità superiore di calore dallo stampo rispetto a quello inferiore, evidenziato dalla differenza di temperatura tra l'acqua in ingresso e quella in uscita.

La figura 109 mostra la temperatura dei canali e la loro efficienza per la simulazione con il layout finale, parametri di stampaggio ottimizzati e hot runner.

La differenza di temperatura massima del liquido refrigerante è di 10°C. I canali in questo caso lavorano molto di più in asportazione di calore dallo stampo. Si veda come per il canale inferiore si ha una efficienza del 40 % mentre per quello superiore del 9 %.

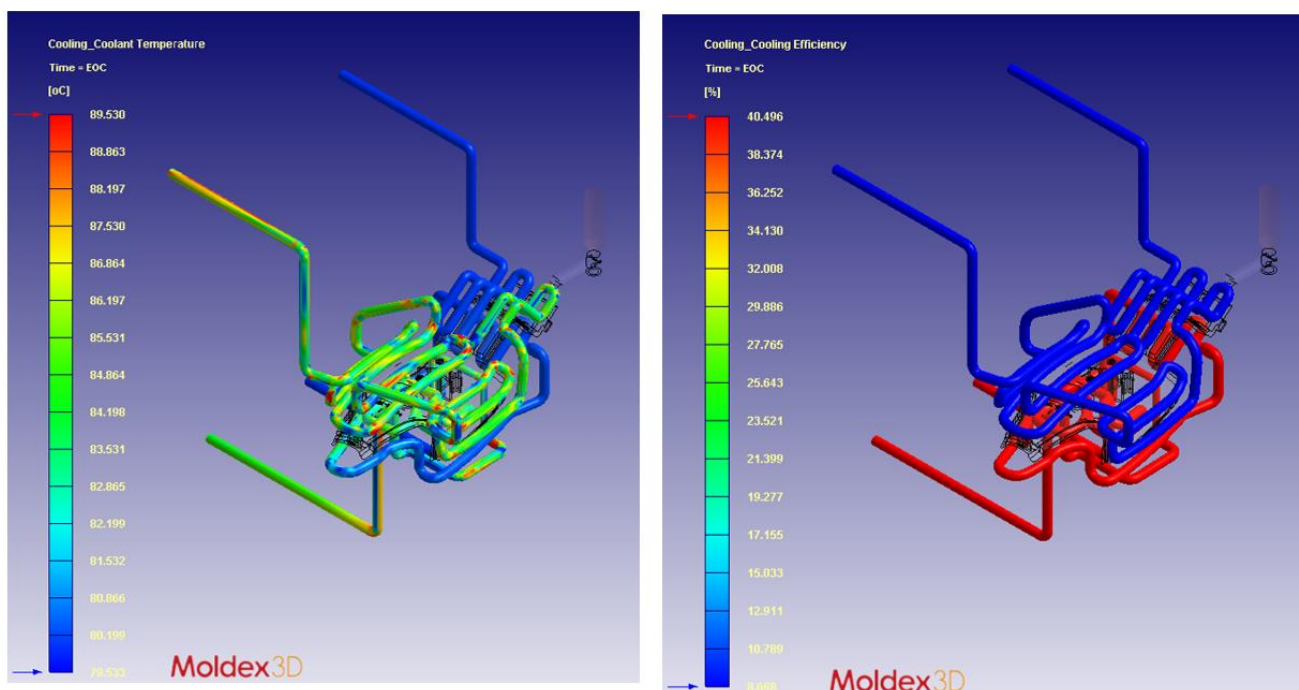


Figura 108 - Temperatura e efficienza canali conformali

L'efficienza ridotta per la parte fissa è dovuta al fatto che il canale subisce uno shock termico da parte della materozza e quindi inizia a circolare già da subito acqua a temperatura maggiore (circa 5°C). La Figura 110 mostra il punto in cui il canale subisce lo shock termico e si vede come le temperature del fluido refrigerante iniziano ad aumentare.

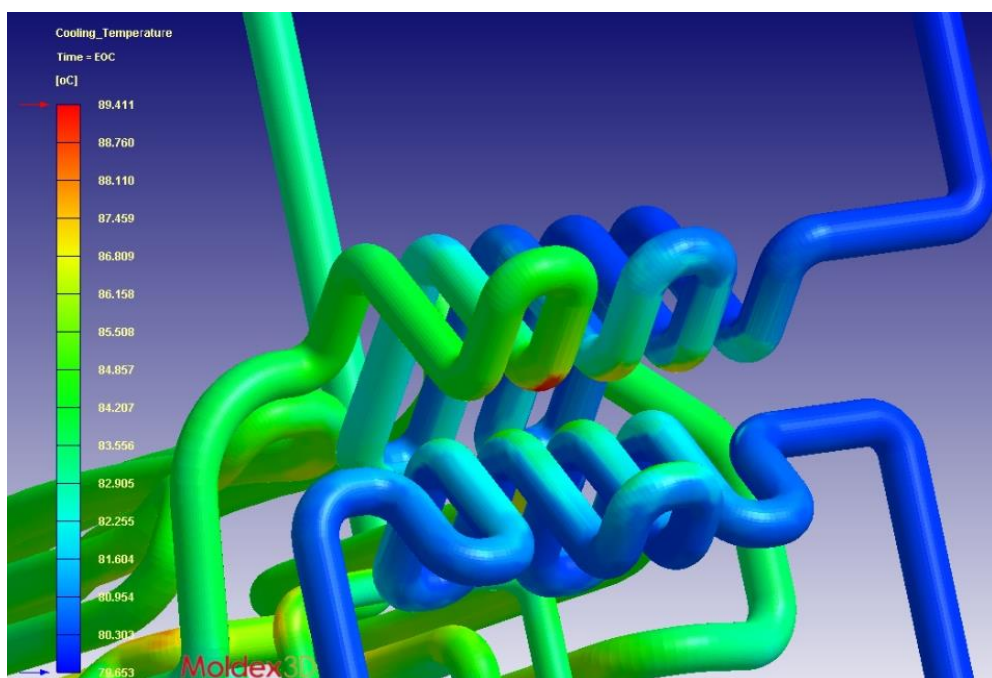


Figura 109 - Shock termico

Il colpo termico subito dal canale determina una diminuzione complessiva della sua efficienza. Una soluzione potrebbe essere quella di avere un canale specifico per il raffreddamento di quest'area di cover, come nello Step 3 (Figura 44). L'acqua subirebbe un innalzamento repentino della sua temperatura ma verrebbe subito portata al termoregolatore.

10.3. Tasselli sinterizzati

I tasselli con i fori per i canali tradizionali e il cold runner (Figure 19 e 20) sono stati modificati e le variazioni sono visibili nelle Figure 111 e Figura 112. Per il tassello superiore è possibile vedere la sede del contenitore dell'iniettore.

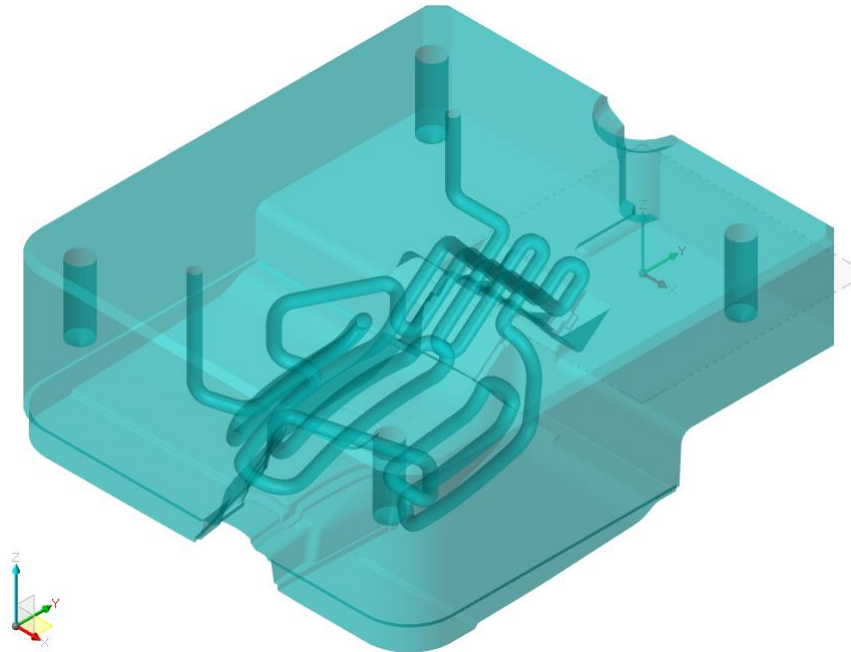


Figura 110 - Tassello superiore riprogettato

Il tassello inferiore mostra la sede del nuovo estrattore della materozza e la cavità della nuova materozza.

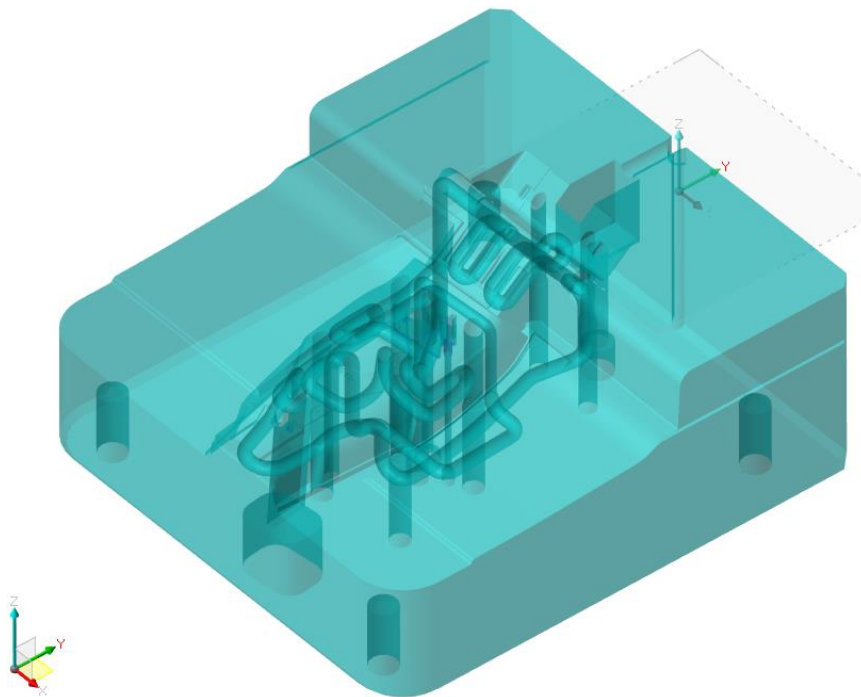


Figura 111 - Tassello inferiore riprogettato

10.4. Analisi dei costi

Come da preventivo i due tasselli da realizzare per SLM-DMLS in Maraging Steel hanno un costo di € 9.650 + IVA. Si consideri che per il nuovo stampo si realizzeranno 4 impronte, il costo complessivo sarà di € 38.600 + IVA. Quindi, per questa tecnologia e per questo materiale, quantitativamente si pagano 4,6 € per ogni cm^3 di sinterizzato.

Là dove si consideri che un buon 60 % - 70 % di materiale non necessita della tecnologia additiva, ottimizzando i volumi è possibile ridurre i costi dei singoli tasselli a € 23.000 circa, con un considerevole risparmio sui costi produttivi. A questi vanno aggiunti i costi legati alla realizzazione dell'impianto di ricircolo dell'acqua dedicato e alla manutenzione dei tasselli. In prima approssimazione questi costi li trascuriamo perché, al momento, è difficile farne una stima.

Il volume della materozza da cold runner a hot runner diminuisce di $1,51 cm^3$. In Tabella 15 sono riportati i dati per il calcolo del risparmio ottenuto con la riduzione del volume della materozza.

Volume cold runner [cm^3]	2,268	Volume hot runner [cm^3]	0,76
Costo materiale in Tunisia [€/Kg]	3,2	Totale materozze	$2 \cdot 10^6$
Peso cold runner [g]	3,039	Peso hot runner [g]	1,019
Costo materiale cold runner [€]	19450,37	Costo materiale hot runner [€]	6521,32
Risparmio sul costo totale di materiale [€]		12929,05	

Tabella 15 - Risparmio di materiale con hot runner

Il numero di materozze considerate è di due milioni in quanto il numero di pezzi da realizzare, con il nuovo progetto stampo è di quattro milioni e il nuovo stampo sarà un quattro impronte con due iniettori che alimenteranno due cavità a testa.

Inoltre, si deve fare attenzione ai valori relativi ai volumi totali perché questi sono riferiti alle materozze utilizzate per le simulazioni che sono state modificate per alimentare una sola cavità. Il volume è ridotto per entrambe le materozze della stessa quantità, quindi, entrambi aumenterebbero della stessa aliquota senza cambiare il risultato finale.

Per il costo del materiale (Tabella 1) è stato considerato quello relativo al prezzo in Tunisia, in quanto l'azienda produce i pezzi dell'assemblato nello stabilimento di quel paese.

Adesso è possibile analizzare il risparmio economico in termini di riduzione di tempo ciclo. In Tabella 16 è possibile vedere i dati necessari per l'analisi dei costi per quanto riguarda il tempo ciclo.

Numero di pezzi	Numero di impronte	Stabilimento	Pressa [t]	Prezzo pressa [€/h]	Prezzo operatore [€/h]	Prezzo pressa + 20 % operatore [€/h]	OEE [%]
4000000	4	Tunisia	100	16	8	17,60	85

Tabella 16 – Dati per la riduzione del tempo ciclo

Il prezzo orario considerato è il prezzo della pressa con l'aggiunta del costo della manodopera di un 20 %. Si considera l'intervento dell'operatore che può gestire una o più postazioni.

L'Overall Equipment Effectiveness (OEE) è la misura di efficacia totale di un impianto.

Il tempo ciclo delle simulazioni comparative considerate sono riportati in Tabella 17. In questi tempi cicli è considerato il tempo tra apertura e chiusura stampo e il tempo di manipolazione del robot (6,48 secondi). In altre parole, è il tempo effettivo di realizzazione di una stampata.

La diminuzione del tempo ciclo di 1,5 secondi dalle simulazioni dalla 3 alla 5 non è dovuta tanto al contributo dei canali conformali quanto alla diminuzione della temperatura stampo.

Simulazione	Canali	Runner	Inserto in Ampcoloy 83	Tempo ciclo [s]
1	Tradizionali a 90°C	Cold	no	24
2	Tradizionali a 90°C	Hot	no	19,5
3	Tradizionali a 90°C	Hot	si	19,5
4	Conformali a 90°C	Hot	no	19
5	Conformali a 80°C	Hot	si	18

Tabella 17 - Tempo ciclo

La Tabella 18 riporta il costo totale di produzione e il risparmio che si ottiene con le modifiche dello stampo. Il tempo ciclo della prima simulazione è quello del Paragrafo 5, ridotto di 3,52 secondi. L'estrazione infatti si sarebbe potuta anticipare effettuando delle analisi reologiche del processo (Figura 88).

La produzione per ora si calcola come:

$$\text{Produzione ora} = 3600 \cdot \text{Numero impronte} \cdot \text{OEE} / \text{Tempo ciclo [p/h]}$$

La produzione è spalmata in 5 anni, quindi si stima una produzione di 800000 pezzi l'anno. Le ore di lavoro per un anno sono:

$$\text{Produzione annua} = \text{Numero di pezzi anno} / \text{Produzione ora [h/y]}$$

Il costo di produzione annuo è dato da:

$$\text{Costo produzione annuo} = \text{Prezzo pressa} + 20 \% \text{ operat.} \cdot \text{Numero di pezzi totali} / \text{Produzione ora [€]}$$

Simulazione	Produzione ora [p/h]	Ore per anno [h/y]	Costo produzione anno [€]	Risparmio [€]
1	510	1569	138039	-
2	628	1275	112157	25882
3	628	1275	112157	25882
4	644	1242	109281	28758
5	742	1275	94902	34.510

Tabella 18 - Risparmio sul tempo ciclo

In conclusione si afferma che per la simulazione 5 si ha un risparmio di € 34.510 a cui vanno sommati i € 12.929 di materiale per un totale di € 47.439 circa.

Con un costo delle matrici sinterizzate di € 23000, resterebbero altri € 24.439 per acquistare il tassello in lega, le due camere calde (12.000€ - 13.000€) e i costi di manutenzione addizionali nei 5 anni. Si comprende come l'ipotesi dei canali conformali vada scartata in quanto i costi di gestione e manutenzione verosimilmente superano il risparmio ottenuto. Resterebbero infatti € 11439 a disposizione per i costi legati alla gestione dei tasselli conformali e dei tasselli di lega.

Probabilmente con una produzione di pezzi più elevata si sarebbe superato il break even point, volume produttivo dopo il quale conviene utilizzare la tecnologia additiva.

Si può, a questo punto, adottare come soluzione alternativa la simulazione numero 2. Acquistando due iniettori e una camera calda, si otterrebbero i vantaggi di utilizzare un hot runner con un risparmio sui costi di € 25800 circa. Tale contenimento dei costi è superiore rispetto a quanto si otterrebbe con l'investimento necessario per realizzare la simulazione numero 5.

11. CONCLUSIONI

In questo elaborato viene mostrato come con un raffreddamento conformato possa essere ridotto il tempo ciclo di un componente termoplastico stampato.

Nel caso in esame, nonostante la cover fosse ben progettata (spessore costante, piccole dimensioni) e il materiale iniettato fosse caricato con fibra di vetro, i risultati sono stati soddisfacenti.

La Tabella 19 mostra il miglioramento del massimo tempo ciclo sul pezzo con i vari layout analizzati.

CANALI	RUNNER	D [mm]	Temperatura Acqua [°C]	Temperatura Stampo [°C]	Portata Acqua [cm ³ /s]	Max Cooling Time sul pezzo [s]
No	cold	-	-	40	-	4,445
Layout Convenzionale	cold	8	40	40	22	4,355
Conformali Step 1	cold	5	90	90	13	3,084
Conformali Step 1 + Ampcoloy 83	cold	5	90	90	13	2,191
Conformali Step 2	cold	5	90	90	13	3,525
Conformali Step 2 + Ampcoloy 83	cold	5	90	90	13	2,209
Conformali Step 3	cold	~ 5	90	90	13	3,478
Conformali Step 3 + Ampcoloy 83	cold	~ 5	90	90	13	2,312
Layout Finale	hot	~ 5	80	80	13	1,892

Tabella 19 - Risultati

Con l'utilizzo del conformal cooling e l'inserto in rame-berillio il massimo tempo di raffreddamento sul pezzo diminuisce di due secondi, cioè quasi del 50%. Si apprezza come, rispetto al caso convenzionale di partenza, nonostante venga diminuita la portata di acqua e aumentata la temperatura dello stampo e del liquido refrigerante si ottiene un miglioramento del tempo ciclo in tutte le simulazioni con i canali conformali. L'utilizzo dell'inserto in Ampcoloy 83 per ogni Step permette un'ulteriore diminuzione del tempo ciclo. Anche se i risultati ottenuti con lo Step 1 e lo Step 2 con l'inserto risultano essere migliori, è lo Step 3 l'unico realizzabile in quanto considera i vincoli degli estrattori. Infatti è possibile osservare che, rispetto ai casi precedenti, la sezione dei canali varia, e in particolare in un tratto diminuisce fino a diventare di 3 mm (Figura 54). In realtà lo Step 3, come del resto gli altri Step, presentava un numero eccessivo di ingressi ed uscite. Si è così proceduto con l'ottenere un unico ingresso e un'unica uscita per le rispettive piastre nel Layout Finale.

In Tabella 20 è possibile confrontare la scheda di stampaggio del Layout convenzionale di partenza e quella del Layout conforme finale.

SCHEMA DI STAMPAGGIO LAYOUT CONVENZIONALE	
Tempo di iniezione [s]	1,02
Tempo di mantenimento [s]	6,5
Tempo di raffreddamento [s]	20
Tempo apertura e chiusura stampo [s]	6,48
Tempo ciclo totale [s]	34
Temperatura cilindro [°C]	260
Temperatura stampo [°C]	40
Liquido refrigerante	Acqua
Temperatura liquido refrigerante [°C]	40
Portata liquido refrigerante [cm ³ /s]	22
SCHEMA DI STAMPAGGIO LAYOUT FINALE	
Tempo di iniezione [s]	1,02
Tempo di mantenimento [s]	6,5
Tempo di raffreddamento [s]	4
Tempo apertura e chiusura stampo [s]	6,48
Tempo ciclo totale [s]	18
Temperatura cilindro [°C]	260
Temperatura stampo [°C]	80
Liquido refrigerante	acqua
Temperatura liquido refrigerante [°C]	80
Portata liquido refrigerante [cm ³ /s]	13

Tabella 20 - Confronto schede di stampaggio

Si è osservato che quei 34 secondi di tempo ciclo del Layout convenzionale, senza modifiche lo stampo e il processo, possono essere portati a 24 secondi. Il tempo di raffreddamento necessario è di 10 secondi. Ciò è dovuto al fatto che questa produzione - in passato - non è stata simulata perché si tratta di una produzione lontana di circa 10 anni fa. Infatti, per il passato, quando non c'era il supporto dei software, i parametri di stampaggio venivano scelti, in modo empirico, mediante reiterate prove sulle presse. Questo comportava una sovrastima del tempo ciclo totale. In questo contesto, anche la nuova temperatura è stata suggerita dal software Moldex 3D.

Il vero problema di questa produzione si è scoperto essere la materozza, che risultava avere uno spessore di 6 mm, il doppio dello spessore massimo del pezzo. Per tale motivo si è ridotto il suo spessore massimo e si è utilizzato un canale caldo piuttosto che uno freddo. Inoltre, nel Layout Finale si è diminuita la temperatura di 10°C rispetto alle simulazioni degli steps precedenti. Il risultato è un'ulteriore diminuzione del tempo ciclo sul pezzo ma anche del tempo ciclo totale.

Tuttavia, per la realtà produttiva, non conviene realizzare i canali in quanto i risparmi ottenuti non compensano i costi di realizzazione. Modificando la materozza, ovvero riducendone il volume, e lavorando ad una temperatura stampo a 80°C si può arrivare ad un tempo ciclo leggermente minore di quello ottenuto con l'aggiunta del tassello e i canali conformali. In questo stampo sarà sempre la materozza, pure se smagrita, a comandare l'estrazione del pezzo.

Si può tuttavia consigliare di modificare il layout dei canali tradizionali utilizzando una fontana per uniformare le temperature nella zona critica. L'utilizzo dell'inserito in Ampcoloy 83 darebbe vantaggi

estetici. Con queste due modifiche, se da un lato si ha una diminuzione sul risparmio, dall'altro si ha un miglioramento della meccanica e della qualità del componente. Maggiori costi a vantaggio della qualità.

In conclusione, si può sostenere che i canali conformali apportano benefici in termini di: tempo ciclo, deformazione, sink marks e ritiro volumetrico. Pur tuttavia, in considerazione dei ridotti volumi produttivi, della prevedibile produzione nella sede tunisina, dove i costi di trasformazione sono più bassi, si è deciso di rinunciare a questo investimento.

12. BIBLIOGRAFIA

- [1] Venkatesh, G.; Ravi Kumar, Y., (2017), Thermal analysis for Conformal Cooling Channel
- [2] J.C. Ferreira, A. Mateus, (2003), Journal of Materials Processing Technology
- [3] Castro, C. E., Rios, M. C., (2005), Journal of Polymer Engineering
- [4] Tuncay Erzurumlu, (2006), Materials and Design
- [5] Xiao Chen, Ping Zhou, Ren-ke Kang, Zhi-gang Dong, Xiao-chen Ai, Applied Thermal Engineering 81 (2015)
- [6] Waseem Siddique, Naveed Ahmed Khan, Inamul Haq, (2015) , Applied Thermal Engineering
- [7] Eva Vojnová, The benefits of a conforming cooling systems the molds in injection moulding process, International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM 2016, 6-10 June 2016, Nový Smokovec, Slovakia
- [8] Hadley Brooks*, Kevin Brigden Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling
- [9] S. Kamaruddin, Zahid A. Khan, Journal of Engineering and Technology, (2010) 1793-8236
- [10] A. B. M. Saifullah & S. H. Masood & I. Sbarski, International journal of advanced manufacturing technology (2012) 62:123–133
- [11] S. Kitayama & H. Miyakawa & M. Takano & S. Aiba, (2016), Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel.
- [12] R. Ramanarayanan, C. Hari Venkateswara Rao, C. Venkateshwara Reddy International journal of Advanced Materials Manufacturing & Characterization (IJAMMC) Vol3 Issue 1 (2013)
- [13] Vincent Sobotka, Applied Thermal Engineering 52 (2013) 170-178
- [14] S. Kakac, H. Liu, (2002), “Heat Exchangers: selection, rating, and thermal design”, CRC Press, Second Edition.
- [15] Y.A. Cengel, (1998), “Termodinamica e Trasmissione del Calore”, Mc Graw-Hill.
- [16] Suchana A. Jahan^{1*} and Hazim El-Mounayri¹, (2016), Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding
- [17] H. S. Park and N. H. Pham, (2008), Design of conformal channel for an automotive part. *Int. J. Automotive Technology*.
- [18] Yu Wang, Kai-Min Yu, Charlie C.L. Wang, (2015), Spiral and conformal cooling in plastic injection molding. *Computer-Aided Design*.
- [19] S. Marques, A. Fagali de Souza, J. Miranda and I. Yadroitsau. Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation.
- [20] Zheng Zhong, Zhang Hai-ou, Wang Gui-lan, Qian Ying-ping, (2011), Finite Element Analysis on the Injection Molding and Productivity of Conformal Cooling Channel

