

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione e ottimizzazione di un sistema di raffreddamento conformale per stampi in acciaio nell'industria dello stampaggio ad iniezione di materie plastiche



Relatore

Prof. Paolo Minetola

Candidato

Giuseppe Vignola

Tutor Aziendale

Ahmed Eldagani
CEO di QTool S.r.l.

Anno Accademico 2021-2022

INDICE

INDICE	3
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUZIONE.....	8
1.1. Sistema pressa-stampo	8
1.2. Processo di produzione.....	9
1.3. Ciclo di lavoro.....	11
2. ADDITIVE MANUFACTURING.....	12
2.1. Tecnologia LPBF	12
2.2. Acciaio per A.M.....	14
2.3. Costi della produzione additiva.....	16
3. CONDIZIONAMENTO DEGLI STAMPI	18
3.1. Obiettivi di un sistema di raffreddamento.....	20
3.2. Reynolds e viscosità.....	22
3.3. Tecniche e dispositivi di condizionamento degli stampi.....	24
3.4. Canali di raffreddamento convenzionali	25
3.5. Conformal Cooling Design	30
3.6. Criteri di progettazione.....	33
4. CASO DI STUDIO	35
4.1. Progetto applicativo.....	35
4.2. Stampo Techno.....	36
4.3. Materiali	39
4.4. Scheda stampaggio.....	43
4.5. Gate e canale di iniezione.....	45
4.6. Analisi degli spessori	47
4.7. Canali di raffreddamento originali	49
4.8. Portate di fluido refrigerante	51
4.9. Semplificazioni modello CAD	55
4.10. Stampo virtuale	58
5. ANALISI CON CANALI CONVENZIONALI.....	59
5.1. Simulazione in SolidWorks.....	59
5.1.1. Setup e ipotesi di lavoro	60
5.1.1. Riempimento e mantenimento.....	62
5.1.2. Pre-Analisi di raffreddamento	66
5.1.3. Raffreddamento di tipo1.....	68
5.1.4. Raffreddamento di tipo 2.....	72
5.1.5. Deformazioni.....	75

5.2.	Simulazione in Visi Flow	77
5.2.1.	Setup e ipotesi di lavoro	77
5.2.2.	Riempimento e mantenimento.....	80
5.2.3.	Pre-Analisi di raffreddamento	82
5.2.4.	Raffreddamento di tipo 1	84
5.2.1.	Raffreddamento di tipo 2.....	86
5.2.2.	Deformazioni.....	87
5.3.	Simulazione in Moldex3D.....	88
5.3.1.	Setup e ipotesi di lavoro	88
5.3.2.	Riempimento e mantenimento.....	93
5.3.3.	Pre-Analisi di raffreddamento	95
5.3.4.	Raffreddamento	95
5.3.1.	Deformazioni.....	100
6.	ANALISI CON CANALI CONFORMALI	101
6.1.	Design conformale 1.....	101
6.1.1.	Analisi di raffreddamento.....	104
6.1.2.	Deformazioni.....	110
6.2.	Design conformale 2.....	111
6.2.1.	Analisi di raffreddamento.....	112
7.	TEST CON INSERTI IN RAME-BERILLIO.....	114
7.1.	Analisi termica.....	115
8.	FATTORI DI COSTO PER GLI STAMPI A INIEZIONE.....	118
8.1.	Costi e B.E.P.....	120
9.	CONCLUSIONI.....	126
10.	Sviluppi futuri.....	127
10.1.	Design lattice e reticolare per alte prestazioni.....	127
10.2.	nTopology.....	131
10.3.	Modellazione a geometria implicita	132
10.4.	Field-Driven Design	134
10.5.	Prove di modellazione	136
	Indice delle Figure.....	141
	BIBLIOGRAFIA.....	144
	SITOGRAFIA	145
	Ringraziamenti	146

*La scienza [...] è fatta di errori, ma di errori che è bene commettere,
perché a poco a poco conducono alla verità.*

Jules Verne

ABSTRACT

La presente tesi nasce con l'obiettivo di studiare, riprogettare e ottimizzare un sistema di condizionamento per uno stampo tradizionale già impiegato in un reale processo di produzione a iniezione plastica.

Questo lavoro nasce in seno a una precedente attività di tirocinio formativo svolta presso l'azienda Start-up "QTool S.r.l." con sede in Valle d'Aosta. Il tutor aziendale Ahmed Eldagani, nonché CEO della società, è stato il principale punto di riferimento per lo sviluppo del progetto, che ha gestito la collaborazione formativa e la comunicazione con i partner aziendali.

A partire dagli approfondimenti di letteratura, sono state studiate le innovazioni tecniche e le metodologie fondamentali inerenti al raffreddamento di inserti stampo ottenuti sia da lavorazioni standard CNC di comune impiego, sia da processi di fabbricazione additiva di più recente diffusione.

Il caso di studio è stato commissionato dall'azienda 'Techno Plast S.r.l.', per indagare opzioni di miglioramento o perfezionamento in cooperazione con il tutor aziendale di QTool. Il componente in esame assegnato è una cover scatolare da produrre in poliammide: a partire dai parametri di processo forniti dalla scheda stampaggio, indispensabili per una corretta simulazione, è stato possibile effettuare prove di simulazioni al fine di individuare i punti deboli della fase di raffreddamento dello stampo e del pezzo.

La fase la simulazione del processo è avvenuta inizialmente tramite software CAD SolidWorks, con l'obiettivo di affrontare in autonomia il problema applicativo, ossia comprendere la qualità generale del processo mediante i dati a disposizione, valutare la bontà del raffreddamento convenzionale già presente e quindi cercare strade di miglioramento in termini di efficientamento del tempo ciclo globale, ottimizzando l'estrazione di calore dallo stampo. Dal momento che sono stati individuati dei limiti funzionali all'utilizzo del programma, è stato necessario fare ricorso ad altri software di simulazione, così da raggiungere un modello di calcolo sempre più completo, realistico e affidabile. Molteplici variabili chiave sono state tenute in considerazione per garantire correttezza, qualità e affidabilità del processo di produzione, tra cui distribuzione di temperatura sulla mappa termica del componente, hotspots e deformazioni risultanti.

Per questo scopo, sono state valutate le prestazioni di altri software di simulazione che meglio si prestano ad applicazioni industriali reali, quali 'Vero VISI' e 'Moldex3D'. Quest'ultimo in particolare si è rivelato essere il principale strumento di calcolo affidabile e efficace, grazie ai numerosi parametri da poter impostare e finestre di setup per accrescere la complessità delle simulazioni FEM.

Generalmente, le possibili soluzioni di ottimizzazioni degli stampi sono orientate alla opportunità di sostituire gli originali tasselli stampo, con nuovi e più efficienti inserti in acciaio con layout di raffreddamento conformale, realizzati con tecnologia di fabbricazione additiva LBPF, o DMLS la quali permettono il design di forme libere e comunque complesse senza difficoltà di produzione.

Dopo aver affrontato differenti scenari di simulazione sono state individuate soluzioni pratiche da poter implementare realmente sullo stampo Techno. A conclusione di questo studio applicativo, sono stati affrontati dei modelli di costo classici ed essenziali per stimare il costo di uno stampo finito a singola impronta, con distinzione fra i casi di stampo originale e modificato con i nuovi inserti prodotti per A.M. I benefici ottenibili dalle modifiche proposte sono state confermati dall'analisi dei costi che tramite l'implementazione su fogli 'Excel' ha restituito i risultati ricercati. Infine si propone come sviluppo futuro del lavoro di tesi, un interessante strumento di modellazione in grado di manipolare efficacemente

strutture lattice complesse come domini di raffreddamento avanzati, denominato 'nTopology'. Le potenzialità derivanti dall'ingegnerizzazione di strutture giroidi e non solo, rappresentano un'ottima promessa di miglioramento continuo per l'industria dello stampaggio a iniezione per applicazioni speciali, ma la ricerca da parte della QTool continua ad avanzare, divenendo un modello di riferimento sempre più affermato nel suo settore.

1. INTRODUZIONE

Nella vita quotidiana veniamo continuamente a contatto con oggetti o componenti tecnici realizzati in polimero termoplastico. Dalla sua nascita alla fine del 1800 fino ai giorni nostri, l'industria dello stampaggio a iniezione è cresciuta a un ritmo rapido e costante. A partire dalla produzione di piccoli oggetti come pettini e bottoni si è giunti allo stampaggio di prodotti per vari settori, tra cui automobilistico, medico, aerospaziale, di consumo, giocattoli, idraulico, imballaggio e costruzioni.

Lo stampaggio a iniezione è il metodo più comune sfruttato nella produzione di massa di manufatti in plastica ed è spesso preferito ad altri processi, data la sua capacità di realizzare parti complesse in modo abbastanza economico con tolleranze accettabili, anche relativamente strette. Prima che qualsiasi pezzo possa essere stampato, è necessario progettare, fabbricare e ottimizzare uno stampo a iniezione, in tutte le sue parti. Il design dello stampo decide direttamente la qualità del pezzo stampato e la produttività del processo stesso.

1.1. Sistema pressa-stampo

Lo stampo a iniezione fa parte di un sistema più grande che lo include, cioè la pressa, con una struttura di contenimento e supporto e un sistema di controllo elettronico integrato a bordo macchina; la Figura 1 mostra un esempio reale di questi dispositivi.

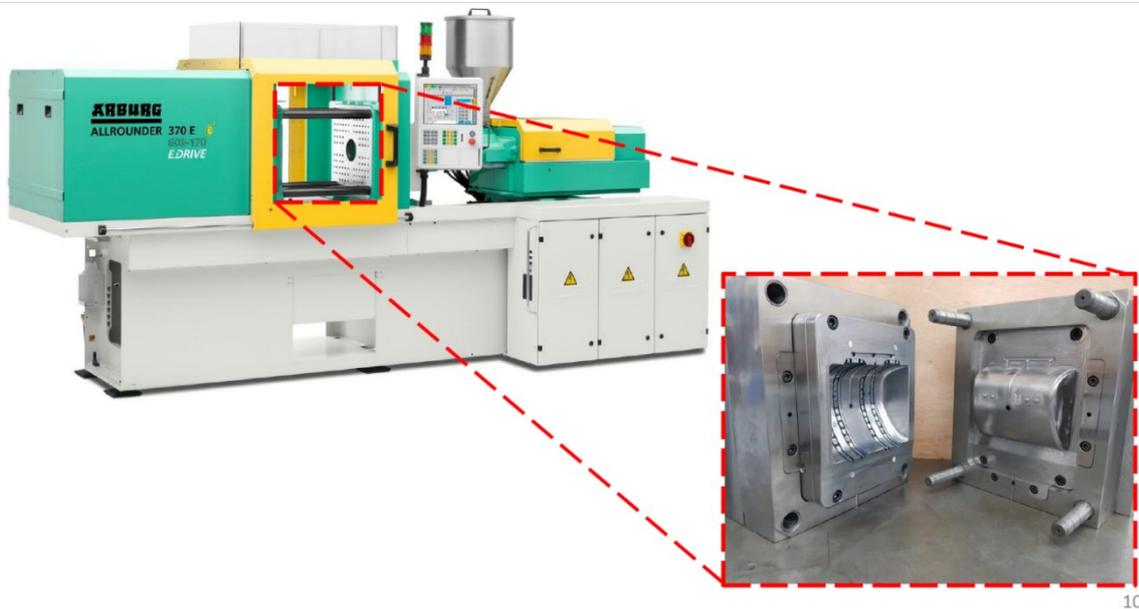


Figura 1 – Esempio di pressa a iniezione standard

[riadattamento da <https://www.arburg.com>]

Questi sistemi presentano dimensioni variabili in base alle applicazioni cui sono destinati; di base hanno tutti una struttura simile, composta essenzialmente da:

- Unità di serraggio
- Unità di plastificazione e iniezione
- Stampo

Si può comprendere come al giorno d'oggi le componenti meccaniche classiche siano sempre affiancate da sistemi di elettronici integrati, infatti è quasi sempre incluso un computer di bordo e uno schermo tramite i quali è possibile gestire i numerosi sensori e impostare i parametri desiderati per il ciclo di lavoro. L'unità di controllo è inglobata inferiormente nella struttura di sostegno della macchina e racchiude tutte le parti elettriche, i cavi, le schede, i dispositivi di sicurezza, i pannelli di intervento ecc.

La Figura 2 riporta una rappresentazione schematica delle parti costituenti appena elencate, oltre a accessori e parti di varia nomenclatura.

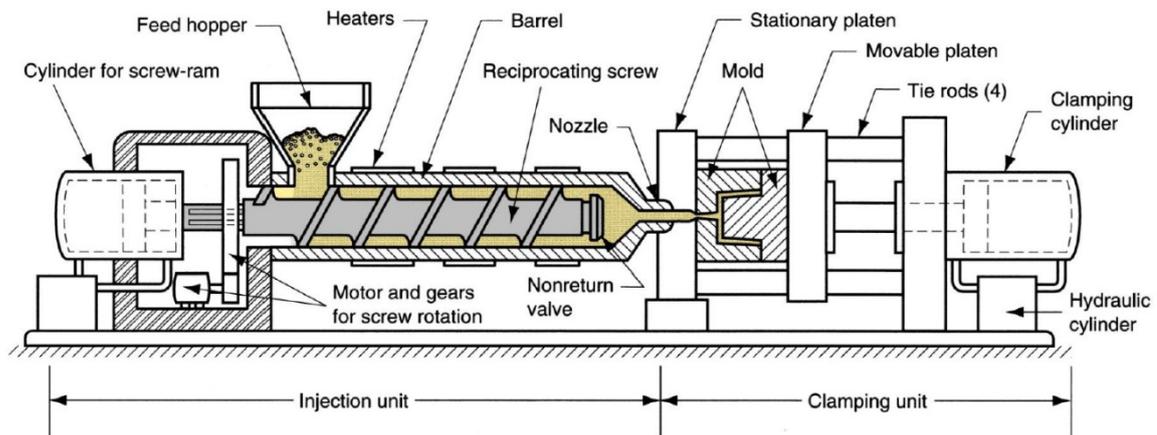


Figura 2 – Elementi base di una pressa a iniezione

L'unità di iniezione è costituita da una tramoggia che alimenta il materiale plastico grezzo (in granuli) nella macchina, un cilindro riscaldato da bande termiche esterne, una vite conica opportunamente sagomata e montata longitudinalmente nella canna riscaldata e un ugello che collega l'unità di iniezione allo stampo. Il calore necessario alla plastificazione del materiale viene fornito per

conduzione dai riscaldatori per circa il 30% e la restante parte la si ottiene per effetto meccanico dovuto alla compressione e all'attrito effettuata dal filo della vite in rotazione.

La vite allora accoglie il materiale, lo porta a fusione e lo rende omogeneo (eventualmente lo mescola anche con additivi); inietta il materiale fuso in cavità e lo pressurizza durante la fase di mantenimento per effettuare la compensazione dei ritiri.

L'unità di bloccaggio è costituita da un meccanismo di arresto meccanico o idraulico, (generalmente una ginocchiera azionata da pistoni idraulici) o entrambi e, in alcuni casi, è una versione completamente elettrica delle parti meccaniche. L'unità di bloccaggio serve per mantenere chiuso lo stampo durante la fase di iniezione e la quantità di forza di serraggio richiesta è determinata dall'area proiettata del prodotto da stampare.

1.2. Processo di produzione

Comprendere cosa accade nello stampo durante lo stampaggio a iniezione di polimeri termoplastici porta sicuramente a una migliore qualità del prodotto finito. Le proprietà di una parte in plastica dipendono fondamentalmente da come viene fabbricata. Ad esempio, due parti identiche stampate con parametri di processo diversi hanno valori di ritiro e sollecitazione interna diversi e finiscono per funzionare in modo

diverso Il modo in cui la plastica scorre nello stampo è molto importante per determinare la qualità del pezzo perché molteplici fenomeni fisico-chimici influenzano i risultati delle produzioni.

Ogni stampo contiene al suo interno una serie di altri accessori e componenti, che formano un sistema complesso soggetto a molti cicli di temperatura e stress. Ci sono spesso compromessi nella progettazione degli stampi, con stampi a basso costo che a volte si traducono in una qualità del prodotto inferiore o processi di stampaggio inefficienti.

Lo stampaggio ad iniezione si può descrivere fondamentalmente come il processo in cui viene riscaldato un materiale termoplastico solido (solitamente in granuli di media/piccola dimensione) fino a raggiungere uno stato di fluidità, simil-liquido viscoso, e viene quindi trasferito sotto pressione (iniettato) in uno spazio chiuso (cavità dello stampo), per poi essere raffreddato nello stampo fino a che ritorna nuovamente allo stato solido, assumendo la forma della cavità dello stampo stesso.

I pezzi ottenuti richiedono in certi casi operazioni accessorie come l'asportazione del materiale degli attacchi di iniezione (materozze), la sbavatura, l'esecuzione di fori o verniciature ma spesso sono perfettamente finiti.

Sebbene ci siano più di 200 parametri riconosciuti che influiscono sul processo di stampaggio a iniezione, quelli di primaria importanza possono essere classificati in quattro grandi divisioni: temperatura, pressione, tempo e distanza (spazio). Un adeguamento a uno qualsiasi di questi ha un'influenza diretta su alcuni o tutti gli altri parametri. Per una produzione di alta qualità e con il minimo difetto, è fondamentale controllare quanti più parametri possibili, nei limiti delle possibilità di ogni macchina a disposizione; ma solitamente la pressione è l'unico parametro che mostra una risposta immediata a una regolazione. Tutti gli altri richiedono diversi istanti di tempo per mostrare i risultati.

Le grandezze caratteristiche che governano il processo dello stampaggio a iniezione sono molteplici, ossia:

- Tempo di iniezione: solitamente di qualche secondo;
- Tempo di post-pressione (mantenimento): ordine di grandezza alcune decine di secondi;
- Tempo di raffreddamento: intervalli di circa 10-30-60 secondi in funzione dell'applicazione
- Temperatura della massa fusa nella vite di plastificazione
- Temperatura di iniezione: dipende dal tipo di polimero utilizzato;
- Temperatura dello stampo: più è alta tanto migliore è la qualità di manufatto ma tanto più lungo è il tempo di raffreddamento (valori usuali sono compresi tra i 40 e 70 °C);
- Pressione di iniezione: compresa tra i 500 e i 1800 bar;
- Forza di chiusura: in funzioni del manufatto è variabile tra le 30 e 5000 tonnellate, per casi di grossa taglia.

Ai fini di avere il miglior controllo possibile sui risultati di produzione, si rincorre il perfezionamento di più parametri contemporaneamente: il processo di iniezione così caratterizzato deriva quindi dall'ottimizzazione in base ai compromessi che gli stampisti vorranno ottenere; per questa fase è di forte aiuto la simulazione al computer che nei tempi moderni è un pre requisito indispensabile per evitare problemi di stampaggio e abbattere i costi.

1.3. Ciclo di lavoro

Durante il processo di stampaggio ad iniezione hanno luogo varie attività interne: alcune operazioni si verificano parallelamente ad altre, mentre diverse altre incominciano al termine di specifici momenti precedenti. Il ciclo di stampaggio consiste nelle fasi consecutive di chiusura dello stampo, iniezione/mantenimento (“Fill&Pack”), raffreddamento, apertura dello stampo e rimozione del prodotto. Questa sequenza viene ripetuta per ogni ciclo di processo, per tutto ciò, un processo di stampaggio a iniezione è adatto per la produzione di massa e si presta bene a un certo grado di automazione e preventivazione economica.

Dal punto di vista del componente da realizzare, il processo di produzione si articola in tre fasi principali, in sequenza:

- 1) fase di riempimento;
- 2) fase di pressurizzazione;
- 3) fase di compensazione

Equivalentemente, da un punto di vista esterno che racchiude l'intero sistema produttivo, le fasi del processo di iniezione sono:

- chiusura stampo e applicazione della forza di serraggio (fase di movimentazione);
- rotazione vite, prelievo, trasporto, plastificazione del materiale e riempimento della camera di iniezione;
- arresto rotazione vite, apertura ugello, traslazione dell'intero pistone e riempimento dello stampo;
- mantenimento della pressione sulla vite per compensare il ritiro del materiale allo stato plastificato;
- raffreddamento per solidificazione del materiale;
- La vite si ritrae e contemporaneamente gira, in modo da preparare del nuovo materiale per la stampata successiva (plastificazione); il fuso nella cavità continua a raffreddarsi;
- apertura stampo ed estrazione del pezzo. (manuale o automatico)

Il tempo ciclo complessivo fornisce una misura del tempo richiesto per tutte queste attività, considerate nel complesso d'insieme. Nella pratica abituale, si è soliti far riferimento al tempo ciclo gate-to-gate perché è comune iniziare a cronometrare l'intero ciclo non appena l'operatore chiude lo sportello di sicurezza a bordo macchina, nelle immediate vicinanze dello stampo centrale.

La temporizzazione così descritta continua fino a quando l'operatore chiude lo stesso cancello per avviare il ciclo successivo. L'intero intervallo di tempo trascorso tra queste due azioni è il gate-to-gate o il tempo di ciclo complessivo. Alternativamente, la temporizzazione dell'intero ciclo può effettivamente essere avviata in qualsiasi momento, purché il conteggio continui fino allo stesso punto del ciclo successivo.

Il tempo di ciclo fornisce l'unico modo per ottenere un'immagine precisa di quanto tempo ci vuole per modellare un prodotto solidificato e pronto all'estrazione. Questa grandezza viene quindi utilizzata per determinare il costo effettivo di un manufatto e quindi prezzo di vendita del prodotto finito.

La determinazione completa dei costi di stampaggio sarà discussa più avanti in questo lavoro di tesi.

2. ADDITIVE MANUFACTURING

L'avvento delle tecnologie di produzione additiva (A.M. - additive manufacturing) è stata una rivoluzione molto discussa e criticata, soprattutto negli anni iniziali di sperimentazione industriale: dagli anni duemila, a causa degli alti costi di investimento, le prime macchine di alto livello per metalli o plastiche hanno avuto lenta diffusione e solo poche aziende potevano permettersi di testare questi dispositivi e valutarne i possibili benefici.

Col passare del tempo, è stato osservato a un modesto incremento di fiducia da parte dei produttori industrializzati, con relativa diminuzione dei costi di acquisto dei macchinari di fabbricazione additiva; contemporaneamente l'evoluzione industriale ha raggiunto standard qualitativi sempre più promettenti in termini di precisione, tolleranze, processi e tempi di costruzione.

È stato sempre più forte l'orientamento verso una sorte di diversificazione produttiva, nella quale alcune società hanno sposato volentieri l'adozione di queste nuove soluzioni produttive. Nella maggior parte dei casi, le aziende produttrici di beni materiali affiancano le tecnologie tradizionali con le moderne tecniche di A.M., ove accettabile, ma principalmente si realizzano oggi prototipi di preserie, o piccole quantità altamente personalizzate, destinate a soddisfare specifici requisiti.

Tramite le tecniche A.M. è relativamente facile elaborare qualsiasi forma geometrica anche molto dettagliata, senza impattare sui costi di totali di lavorazione poiché l'intero processo di creazione di un inserto in acciaio è svolto dalla macchina, dopo l'inserimento in input del file CAD dell'oggetto. I vantaggi principali riguardano cioè la possibilità di produrre componenti con un consumo inferiore di materiale pur mantenendo le caratteristiche volute, per qualsiasi grado di complessità geometrica. In tal senso, le lavorazioni convenzionali nei centri CNC richiederebbero costi ben maggiori per particolari molto elaborati.

2.1. Tecnologia LPBF

La tecnologia di fabbricazione di riferimento per questo lavoro di tesi, è quella dei dispositivi LPBF (Laser Powder Bed Fusion); la tecnologia LPBF permette di produrre componenti anche molto sottili e quindi più leggeri, caratteristiche fondamentali per industrie come quella Aeronautica e Spaziale. Consente, inoltre, la realizzazione di componenti complessi, con concavità interne e canali impossibili da realizzare con metodi di fabbricazione tradizionali.

Il processo LPBF utilizza generalmente un raggio laser come sorgente di energia, per fondere le polveri grezze strato dopo strato secondo la forma desiderata, come illustrato dallo schema nella Figura 3. Il raggio laser controllato da un computer fornisce energia termica alla superficie del letto di polvere, fondendola nella forma desiderata, dopodiché la piattaforma di lavoro si abbassa di una quantità pari allo spessore di uno strato e ulteriore polvere viene quindi livellata sul substrato in modo tale che il processo possa essere ripetuto fino a formare un solido componente 3D.

Solitamente, le polveri impiegate nel processo LPBF vengono preriscaldate a temperature inferiori al loro punto di fusione per favorire l'incollaggio e ridurre al minimo la distorsione del pezzo finito. Inoltre, il preriscaldamento tende a ridurre la richiesta di potenza da parte del laser durante il processo.

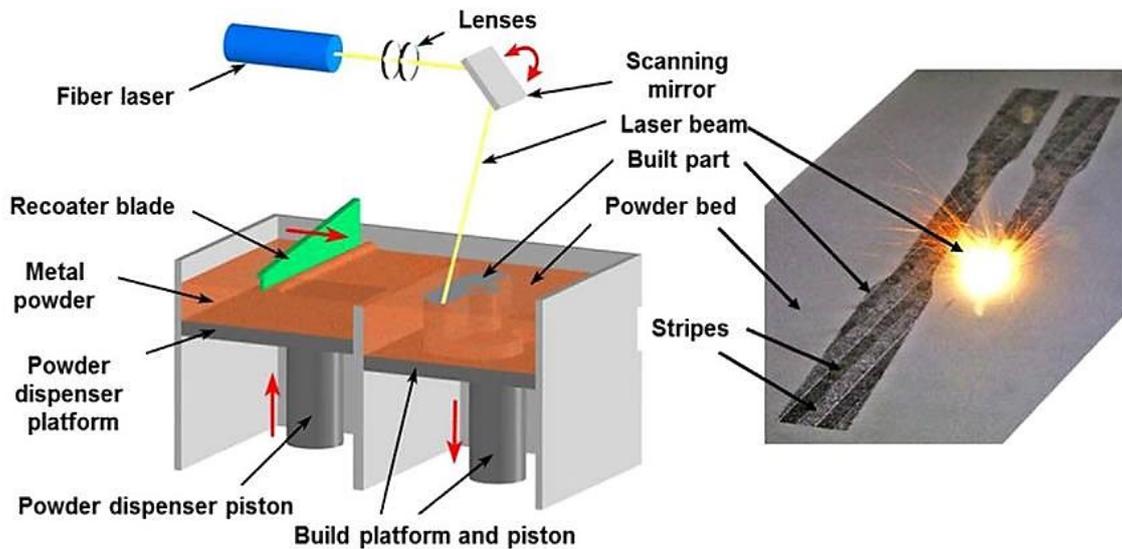


Figura 3 – Sistema di fabbricazione additiva con tecnologia Laser Bed Powder Fusion

L'ambiente in cui opera la macchina è fondamentale: pertanto, il processo LPBF viene solitamente eseguito in una camera chiusa riempita di gas Argon inerte, per ridurre al minimo la tendenza all'ossidazione delle polveri reattive.

Alcuni meriti della tecnologia LPBF includono:

- la capacità di formare geometrie complesse grazie alla libertà geometrica dei processi
- uso efficiente del materiale, flessibile
- elevati tassi di solidificazione dovuti al processo di fusione locale
- microstrutture più fini
- personalizzazione di massa
- capacità di produrre orifizi interni e dettagli ad alta risoluzione
- discreto controllo dimensionale.

D'altro canto, gli svantaggi di questa tecnica di fabbricazione sono anch'essi degni di nota, e sono rappresentati essenzialmente da:

- elevate sollecitazioni residue
- elevata rugosità superficiale a fine produzione
- costi di produzione relativamente alti
- sostanziali proprietà anisotrope dei manufatti solidificati
- assenza di qualità in linea il controllo
- incerta accuratezza della produzione rispetto alla durata di costruzione
- difficoltà di evacuazione della polvere da canali di piccole dimensioni

La potenza del laser impiegata nel processo LPBF è molto superiore a quella dei processi di sinterizzazione laser comuni. La tecnologia laser a letto di polvere è stata sviluppata come miglioramento della tecnologia di sinterizzazione laser selettiva (SLS) per ottenere densità elevate per prototipi, parti o strumenti metallici funzionali: difatti la sua densità energetica è maggiore rispetto a SLS per ottenere l'incollaggio delle polveri e la completa fusione assicurando che le parti quasi completamente dense non comportino poi la necessità di post-trattamenti.

La tecnologia LPBF rende possibile la fabbricazione di singole parti con geometrie complesse paragonabili o superiori alle proprietà meccaniche di parti convenzionalmente fabbricate in serie (come nella fusione e nel taglio). Eppure, in alcuni casi, è necessaria una fase di post-elaborazione (ad es. lavorazione convenzionale o rettifica) per ottenere un'elevata precisione dimensionale o una finitura superficiale di alta qualità delle particolari zone di interesse del pezzo, cioè quelle superfici destinate ad accoppiamenti meccanici con ad altri dispositivi, o simili.

La trasformazione delle polveri che avviene durante il processo LPBF di fusione-solidificazione è accompagnata da notevoli sollecitazioni accumulate nella parte, anche a lavorazione ultimata. Lo sviluppo di sollecitazioni residue dai processi di fusione e raffreddamento e gli elevati gradienti termici possono portare a cricche, distorsioni e cedimenti del prodotto finale; per affrontare questi inconvenienti, solitamente, il trattamento termico di ricottura può essere utilizzato per ridurre le sollecitazioni termiche residue e ottimizzare la microstruttura dei prodotti fabbricati.

Pertanto, l'ottimizzazione e l'attenta selezione dei parametri di processo per il deposito di polveri e laser è fondamentale per lavorare una finestra di processo adeguata, e assicurare un campo di temperatura moderato per evitare il surriscaldamento del sistema.

La macchina di fabbricazione additiva, su cui opera l'azienda QTool non è di pubblica informazione, ma le caratteristiche essenziali di questa tipologia di macchina sono pubblicate dall'azienda stessa sul sito web e sono qui riportate in Figura 4.

Technical Specification:

Maximum plastic part dimensions (mm)	850 (L) - 850 (W) - 850 (H)
Maximum insert dimensions (mm)	240 (L) - 240 (W) - 340 (H)
Insert Alloy Material	Maraging Steel 300
Density (g/cm ³)	8.1
Melting Point (°C)	1413
Coefficient of thermal expansion (K ⁻¹)	10.3 10 ⁻⁶

Figura 4– Specifiche di base della stampante di polveri metalliche con tecnologia LPBF

Il limite sostanziale della macchina disponibile presso l'azienda è dettato dalle sue dimensioni, cioè è possibile produrre inserti fino alle dimensioni massime virtuali di 240x240x340 mm con piccoli margini di sicurezza da approfondire. In relazione a questo aspetto, è stata riposta molta cura nelle dimensioni limite degli inserti in acciaio da realizzare durante le fasi di modellazione CAD nei moduli di lavoro.

2.2. Acciaio per A.M.

L'approfondimento di queste tecnologie innovative ha condotto anche alla ricerca dei possibili materiali adoperabili, i limiti costruttivi e di processo, prestazioni e convenienza nel realizzare le forme più svariate. In particolare, il materiale in polvere più diffuso e usato è l'Acciaio Maraging 300, anche denominato 1.2709 secondo la classificazione Europea, americana 18% Ni Maraging 300, e tedesca X3NiCoMoTi 18-9-5. Questo materiale è lo stesso adottato dall'azienda QTool nella sua macchina LPBF.

Il nichel è il principale elemento di lega, con cobalto, molibdeno e titanio come metalli di lega intermetallici secondari; la quantità relativa dei costituenti è visibile in Figura 5.

Powder chemical composition (wt.-%)		
Element	Min.	Max.
Fe	Balance	
Ni	17.00	19.00
Co	8.50	10.00
Mo	4.50	5.20
Ti	0.80	1.20
Powder particle size		
Generic particle size distribution	20-65 μm	

Figura 5 – Composizione dell'acciaio Maraging 1.2709

[EOS ToolSteel 1.2709 Ultra High Strength Tool Steel for Demanding Molding Applications]

Gli acciai Maraging formano una classe di leghe di ferro; hanno una struttura cristallina martensitica e vengono rafforzati tramite invecchiamento (aging) utilizzando i metodi propri sviluppati internamente. Queste leghe a bassissimo tenore di carbonio hanno proprietà di resistenza e durezza molto elevate derivate dalla precipitazione di composti intermetallici piuttosto che dal contenuto di carbonio, elevata resistenza alla fatica e buona lavorabilità. Da fonti reperibili online, è noto come sia possibile trovare valori anche molto interessanti di resistenza a trazione e carico di snervamento, rispettivamente di circa 1100 MPa e 1050 MPa. (Figura 6)

Questo tipo di acciaio si caratterizza quindi per avere ottime proprietà meccaniche e per essere facilmente termo-trattabile mediante processi di tempra termica per invecchiamento. Le parti realizzate in Maraging Steel sono facilmente lavorabili dopo il processo di costruzione e sia nello stato di costruzione base che in quello temprato per invecchiamento, le parti possono essere lavorate per elettroerosione, saldate, micro-pallinate, lucidate e rivestite se necessario.

Mechanical Properties			
	Test Method	As Built	Heat Treated
Tensile Strength	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	1100 \pm 100 MPa	Min. 1950 MPa
Yield Strength (Rp 0.2%)	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	1050 \pm 100 MPa	Min. 1875 MPa
Elongation at Break	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	10 \pm 4%	Min. 2%
Young's Modulus	-----	160 \pm 20 GPa	180 \pm 20 GPa
Hardness	DIN EN ISO 6508-1	33 - 37 HRC	50 - 55 HRC
Thermal Properties			
Max. Operating Temp.	ASTM E1461-13	Approx. 400 °C	
Specific heat capacity	ASTM E1461-13	450 \pm 20 J/Kg°C	450 \pm 20 J/Kg°C

Figura 6 – Proprietà meccaniche per l'acciaio maraging 1.2709

[www.zare.it / www.beam-it.eu]

2.3. Costi della produzione additiva

Le tecniche di A.M. hanno essenzialmente due componenti basilari che incidono sui costi reali, ossia il consumo di energia e i tempi di costruzione: il consumo di energia è funzione della potenza installata e velocità di costruzione, che è la velocità con cui opera il sistema di produzione; analogamente il tempo di costruzione è il periodo di tempo in cui le macchine devono funzionare per realizzare i lotti di produzione prestabiliti. Questi fattori paralleli confluiscono direttamente nel costo di funzionamento della macchina per singolo pezzo, e si vanno a sommare al costo del materiale per pezzo, come costo totale di produzione.

L'identificazione dell'uso delle risorse nelle varie fasi del processo di produzione additiva, è il punto di partenza per quantificare quando e come le risorse vengono consumate e se può esserci una vantaggiosa diminuzione nell'uso, enfatizzando i benefici sul piano del risparmio energetico e/o di materie prime.

Costo del materiale

Materiali metallici e plastici sono le materie prime maggiormente utilizzati nei processi di *Rapid Manufacturing*; in base al luogo di provenienza e agli accordi di acquisto per grandi forniture si avranno prezzi variabili, da caso a caso. Attualmente, il prezzo dei materiali per la produzione additiva può anche superare quelli dei sistemi di produzione tradizionali. I costi dei materiali per la produzione additiva sono significativi; tuttavia, le tecnologie possono spesso essere complementari, laddove due tecnologie vengono adottate l'una accanto all'altra e i vantaggi sono maggiori che se fossero adottate singolarmente.

La crescente adozione della produzione additiva può condurre, nel tempo, a una riduzione del costo delle materie prime attraverso le cosiddette economie di scala.

Costo della macchina

La macchina di produzione è il fattore preponderante che grava sulla spesa di un sistema A.M.; ad essa sono associati i costi di investimento della macchina, l'utilizzo di essa misurato come il numero di ore all'anno e il costo del materiale. Tra le altre cose, bisogna anche includere i costi energetici, l'acquisto di macchine accessorie e i costi di manodopera associati per far funzionare il sistema, manutenzione ecc...

Oltre ai costi dei materiali, il costo della macchina è uno dei costi più significativi coinvolti nella produzione additiva. Il prezzo medio di vendita di un sistema di produzione additiva industriale può variare fortemente in base al materiale lavorato, che sia esso un metallo o un polimero, ma tradizionalmente oscilla tra 30.000 e 70.000 euro circa. Sebbene le tendenze dei costi delle macchine siano sommariamente al ribasso, permangono grandi differenze tra i costi per i sistemi a base di polimeri e i sistemi a base di metallo, infatti durante l'ultimo decennio l'enorme crescita delle vendite di macchine a base di polimeri ha fortemente influenzato il prezzo medio di vendita di questi sistemi, soprattutto per piccole applicazioni.

Involuppo di costruzione e utilizzazione

Per una macchina di produzione additiva, la dimensione dell'involucro di costruzione e l'utilizzo di questo involucro hanno entrambi un impatto sul costo di un prodotto fabbricato.

La dimensione massima utilizzabile per i componenti ha un impatto bivalente sul sistema: limita da un lato le reali potenzialità delle macchine e quindi la dimensione degli oggetti che è in grado di realizzare;

dall'altro lato però considerando un fattore di sfruttamento dello spazio di costruzione disponibile, si può immaginare come si ottiene di conseguenza un'utilizzazione minore di energia per chilogrammo depositato, rispetto a una singola parte prodotta qualora si facesse massimo uso degli spazi a disposizione.

Il tempo di costruzione

Il tempo di costruzione è una componente significativa per quanto riguarda la stima del costo della produzione additiva e sono disponibili numerosi applicativi software per stimare il tempo di costruzione. Un'analisi dettagliata utilizza informazioni sul tempo di processo e caratteristiche come lo spessore dello strato. Chiaramente, le stime dei tempi di costruzione tendono ad essere specifiche del sistema e del materiale utilizzato, infatti i software di lancio delle stampe oppure quelli integrati a bordo macchina forniscono un'ottima stima.

Consumo di energia

Il consumo di energia, tuttavia, è un fattore importante nel considerare il costo della produzione additiva rispetto ad altri metodi di fabbricazione, soprattutto in termini di esame dei costi dall'avvio alla fine.

Gli studi sull'energia sulla produzione additiva, tuttavia, si basano essenzialmente sull'energia utilizzata nella raffinazione dei materiali e da quella del sistema di produzione additiva.

Nel caso di produzione di componenti in metallo, il consumo di energia è piuttosto importante e una sua stima è guidata dal rapporto volume solido-cavità. A bassi rapporti, il processo di produzione additiva di deposizione diretta di metallo riduce al minimo l'energia, mentre per rapporti elevati la fresatura a controllo numerico computerizzato riduce al minimo il consumo di energia.

Manodopera

Per gli aspetti che riguardano la fabbricazione additiva, la manodopera tende a rappresentare una piccola parte del costo di produzione. Il lavoro potrebbe includere la rimozione del prodotto finito o il riempimento della materia prima, preparazione polveri e pulizia tra le altre cose. L'influenza della manodopera sui costi totali si può ritenere all'incirca pari al 2-3%. È importante ricordare che la manodopera aggiuntiva è abitualmente incorporata negli altri costi come il costo del materiale e il costo della macchina, poiché anche questi articoli richiedono manodopera per la produzione.

3. CONDIZIONAMENTO DEGLI STAMPI

Nell'industria di produzione per iniezione plastica, è fondamentale conoscere i parametri di processo in fase di studio e progettazione, poiché in base a queste informazioni si giungerà a una stima generale dei costi da sostenere per fissate quantità di produzione.

Il tempo di ciclo dello stampo dipende dai parametri di processo: cioè principalmente dalla progettazione del raffreddamento dello stampo, dalla selezione del materiale dello stampo e da altri fattori come l'impostazione della velocità della macchina e il metodo di espulsione dallo stampo. Come riporta la Figura 7, nelle applicazioni pratiche, la fase di raffreddamento dello stampo occupa una parte sostanziale, generalmente maggiore del 50% del tempo del ciclo di stampaggio totale (dipende da caso a caso). Difatti, il raffreddamento di uno stampo può rappresentare anche più di due terzi del tempo ciclo totale nella produzione di parti termoplastiche stampate a iniezione.

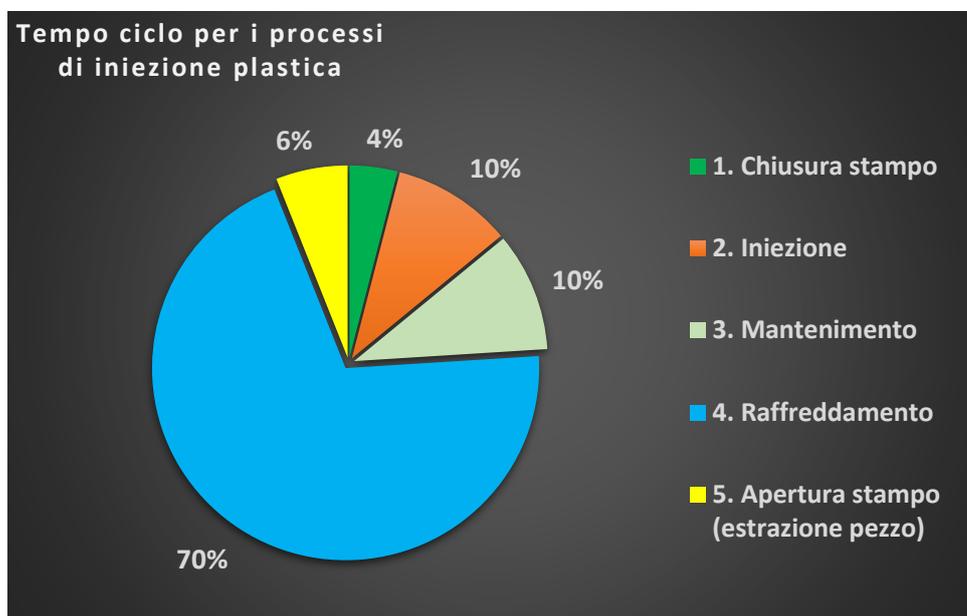


Figura 7 – Ripartizione delle fasi del processo di iniezione plastica rispetto al tempo ciclo totale

Il tempo di raffreddamento è probabilmente il momento più importante dell'intero processo di iniezione. È il tempo necessario affinché il materiale plastico si raffreddi fino al punto in cui si è solidificato e un tempo aggiuntivo per consentire alla parte in plastica di diventare sufficientemente rigida da resistere al processo di espulsione (in cui il prodotto stampato finito viene espulso dallo stampo al termine dell'intero ciclo). Anche se la plastica può raffreddarsi sufficientemente al punto da solidificarsi, potrebbe non essere abbastanza rigida per la fase di estrazione. Questo perché il processo di polimerizzazione è piuttosto lento e delicato, infatti possono trascorrere svariati giorni per la completa equilibratura chimico-fisica di un componente stampato dopo la sua realizzazione.

L'indurimento iniziale è rapido e circa il 95% dell'indurimento totale avviene nello stampo. Ma la restante porzione del 5% avviene fuori dagli schemi. Se la pelle esterna del manufatto plastico è solidificata a una profondità sufficiente, il raffreddamento residuo non avrà un effetto apprezzabile sulla parte stampata, grazie al 'frozen layer' che protegge esternamente il pezzo.

Ma se la pelle è troppo sottile, il raffreddamento rimanente causerà un restringimento a causa dello stress accumulatosi e la parte stampata potrebbe deformarsi, torcersi, presentare bolle, difetti estetici o rompersi. La chiave per ridurre al minimo questi problemi è mantenere la parte nello stampo per un

tempo sufficientemente lungo, ma non più del necessario perché il tempo incide fortemente sui costi e i cicli lunghi sono spesso inaccettabili. La maggior parte dei fornitori di materiali è più che felice di condividere i requisiti di tempo di raffreddamento per i propri materiali a spessori variabili (più spesso è la parte, maggiore è il tempo di raffreddamento richiesto), ma, in media, un 1/16 di pollice. Uno spessore importante impiega anche da 9 a 15 secondi o più per solidificarsi (a seconda del materiale) fino al punto in cui può essere espulso dallo stampo senza difficoltà.

Una delle caratteristiche più importanti del processo di stampaggio a iniezione è il layout stesso dei sistemi di raffreddamento ivi presenti. Per molti anni, i progettisti e i ricercatori di stampi hanno cercato di migliorare le prestazioni del sistema di raffreddamento, nonostante il fatto che la complessità del sistema sia fisicamente limitato dalla tecnica di fabbricazione, cioè dai metodi di perforazione rettilinea convenzionali.

Un design efficiente del circuito di raffreddamento riduce il tempo di raffreddamento, il che a sua volta aumenta la produttività complessiva. Inoltre, il raffreddamento uniforme migliora la qualità delle parti riducendo le sollecitazioni residue e mantenendo la precisione e la stabilità dimensionali.

Il sistema di raffreddamento è estremamente importante il corretto funzionamento dello stampo progettato, e per l'economia del processo, perché in tal senso contribuisce a una discreta parte del consumo energetico che può essere fonte di ottimizzazione se studiato accuratamente.

Gli ingegneri, e i tecnici addetti, dovrebbero sforzarsi di progettare stampi a iniezione su misura, il che significa che lo stampo dovrebbe produrre parti di qualità accettabile con un costo del ciclo di vita minimo, richiedendo al contempo una quantità minima di tempo, denaro e rischio intrapreso per lo sviluppo.

Prendendo in esame una certa produzione da realizzare, solitamente di milioni di pezzi, si può intuire come il contenimento dei tempi di raffreddamento sia un notevole beneficio che impatta positivamente sui costi di produzione; ciononostante, la tecnica di estrazione di calore dallo stampo rimane uno dei sistemi meno ingegnerizzati negli stampi a iniezione: infatti, è relativamente facile forare le piastre dello stampo per ricavare dei canali di raffreddamento dritti, ma ciò non significa che rappresenti sempre la strada migliore da intraprendere.

Probabilmente il motivo della mancanza di ingegneria destinata all'estrazione di calore dallo stampo è dovuto alla difficoltà nell'ottenere una corretta distribuzione di temperatura che non è evidente durante lo stampaggio rispetto ai difetti legati al flusso. I sistemi di raffreddamento progettati in modo improprio spesso causano alcuni difetti indesiderati.

In primo luogo, i tempi di raffreddamento e quindi, i tempi ciclo sono molto più lunghi di quanto si sarebbe potuto ottenere con un design ben riuscito: non è agevolmente possibile raffreddare un pezzo in tutte le zone necessarie con sistemi di raffreddamento tradizionali; a tal proposito, al giorno d'oggi ci si orienta sempre più allo studio di un layout di raffreddamento conformale per ridurre i tempi di produzione, perché grazie alle tecnologie di fabbricazione rapida additiva vengono prodotti inserti stampo senza grandi difficoltà legate alla complessità geometrica che sono in grado di beneficiare di tempi ciclo molto ridotti.

In secondo luogo, si verificano significativi gradienti di temperatura attraverso lo stampo, causando un ritiro differenziale e una deformazione indesiderata dei profili. La qualità dei manufatti prodotti deve sempre rispettare determinati standard di processo, pertanto non si può rischiare di realizzare prodotti che devono essere rifiutati o riciclati; infatti su larga scala, dopo milioni di pezzi stampati si andrebbe in contro a uno spreco di materiale e tempo dovuto agli scarti.

3.1. Obiettivi di un sistema di raffreddamento

Per funzionare in modo efficace, i sistemi di raffreddamento devono essere progettati con cura per gestire il flusso di calore attraverso lo stampo senza incorrere in costi o complessità eccessivi. Per questo scopo è possibile studiare il processo di iniezione plastica su comuni software di simulazione, e progettare di conseguenza le eventuali soluzioni di raffreddamento.

Possiamo riassumere le caratteristiche obiettivo cui è destinato un sistema di raffreddamento, con una serie di considerazioni, raccolte in breve.

1. Massimizza le velocità di trasferimento del calore

Per la conduzione di calore in condizioni stazionarie, la velocità di trasferimento del calore, cioè la potenza termica trasmessa è proporzionale alla conduttività termica, k , e al gradiente di temperatura dello stampo, che per una sola direzione di riferimento (z) è:

$$\dot{Q} = \frac{dT}{dz}$$

La prima implicazione di questo modello termico vede le velocità di trasferimento del calore proporzionali alla conduttività termica, di conseguenza materiali specifici come il rame o l'alluminio hanno una conduttività termica parecchie volte superiore a quella di tutti gli acciai, e dovrebbero essere in grado di ridurre il tempo di raffreddamento negli stampi a iniezione. La seconda implicazione è che è necessario un gradiente di temperatura per trasferire il calore, il che significa anche che le velocità di trasferimento del calore possono essere aumentate avvicinando le linee di raffreddamento alla superficie della cavità dello stampo.

2. Mantenere una temperatura di parete uniforme

La temperatura delle parti stampate al momento dell'espulsione è una funzione complessa della progettazione della parte stampata, della progettazione della linea di raffreddamento, delle proprietà dei materiali e delle condizioni di trasformazione. Sebbene si desiderino elevate velocità di trasferimento del calore, un design del sistema di raffreddamento eccessivamente aggressivo può effettivamente causare problemi di qualità se non addirittura di stress termici per lo stampo stesso.

Quando le linee di raffreddamento si avvicinano alla superficie della cavità dello stampo, il percorso di trasferimento del calore diventa più diretto. Quando si verifica un ritiro differenziale e una deformazione nelle parti stampate a causa delle variazioni della temperatura, per forza di cose l'addetto stampa deve seguire tempi ciclo più lunghi utilizzando lo stampo come dispositivo di raffreddamento per i manufatti. In questo modo si riduce la velocità di trasferimento del calore (e la sua variazione) e quindi consente alla temperatura della plastica stampata di raggiungere una condizione di equilibrio. Il risultato è un ciclo molto più lungo di quanto si sarebbe potuto prevedere e che si sarebbe potuto prevenire con un migliore design del sistema di raffreddamento senza troppi costi aggiuntivi.

3. Minimizzare il costo dello stampo

È possibile raggiungere un alto tasso di trasferimento del calore passando a materiali a conducibilità più elevata e progettando un raffreddamento molto più vicino alla superficie interna degli inserti. Tuttavia, c'è un punto in cui ulteriori investimenti nel sistema di raffreddamento non ottengono frutti. Il motivo è che la velocità di trasferimento del calore diventa limitata non dalla conduzione del calore attraverso lo stampo, ma piuttosto dalla conduzione del calore attraverso la plastica e dalla convezione del calore verso il refrigerante dello stampo. Per questi motivi, gli stampi realizzati con materiali altamente

conduttivi possono avere una significativa riduzione del tempo ciclo migliorando la conduzione del calore attraverso lo stampo.

La chiave per progettare uno stampo conveniente è sapere dove investire. I materiali altamente conduttivi sono estremamente efficaci in alcune applicazioni e di solito sono più facili da lavorare, ma non sono universalmente i migliori. Allo stesso modo, i layout delle linee di raffreddamento possono variare da molto semplici a molto complessi. Progettazioni complesse di linee di raffreddamento spesso richiedono attenzioni particolari e specifiche, come per le operazioni di tappatura, sigillatura, montaggio e manutenzione. È importante che il progettista di stampi sappia quando e come valutare il costo aggiuntivo di una progettazione complessa per un sistema di raffreddamento su misura.

4. Ridurre al minimo volume e complessità

Un problema molto significativo nella progettazione dei sistemi di raffreddamento è che spesso entrano in conflitto con il posizionamento di altri componenti. Sebbene il posizionamento di molte linee di raffreddamento ravvicinate fornisca un raffreddamento rapido e uniforme, questo design si tradurrà anche in pochissimo spazio nello stampo per posizionare i sistemi di espulsione, le guide, i dispositivi di fissaggio e altri dispositivi vari componenti dello stampo. Per questo motivo, il progettista dello stampo dovrebbe cercare di instradare linee di raffreddamento parallele alla geometria delle cavità dello stampo. Un diametro dei circuiti di raffreddamento più piccolo, sebbene sia più difficile da lavorare e trasferisca meno calore, può avere un impatto minore sui componenti vicini e farsi strada nelle piastre con minori difficoltà, pur ottenendo un efficiente raffreddamento.

5. Massimizzare l'affidabilità

Dal momento che la massa fusa esercita una notevole pressione sulle superfici delle cavità dello stampo, si generano delle sollecitazioni significative all'interno delle piastre dello stampo e degli inserti. L'integrità strutturale dello stampo è indebolita da ogni canale del circuito di raffreddamento, ognuna delle quali richiede la rimozione del materiale di supporto dello stampo e instaura anche una zona di concentrazione di tensione. Sebbene l'impatto delle linee di raffreddamento sulla struttura dello stampo possa essere particolarmente acuto nelle applicazioni di stampaggio con elevate pressioni di fusione, il potenziale impatto rimane significativo nella maggior parte delle applicazioni poiché il carico e lo scarico ciclico della pressione del fuso dà luogo a rotture dello stampo dovute alla fatica. Peggio ancora, la corrosione del metallo da parte del refrigerante in circolazione tende ad esacerbare le concentrazioni di sollecitazioni. Le crepe possono formarsi, corrodersi e propagarsi attraverso lo stampo fino alla cavità e successivamente richiedere una riparazione.

6. Facilitare l'utilizzo dello stampo

Gli operatori delle macchine di stampaggio dovrebbero essere in grado di azionare lo stampo a iniezione con informazioni minime. Il numero di connessioni esterne deve essere ridotto al minimo, preferibilmente con due connessioni (una di ingresso e una di uscita) per stampo metà. Ciascuno dei collegamenti deve essere etichettato "in" e "out" per aiutare l'operatore a evitare la formazione di un circuito di raffreddamento permanente. Molti stampatori codificano a colori le linee di alimentazione (blu) e le linee di ritorno (rosse), quindi la configurazione dello stampo è facilitata dall'anodizzazione simile o dalla fornitura di etichette colorate per gli ingressi e le uscite dello stampo. Per evitare danni al sistema di raffreddamento, tutti i componenti esterni devono essere incassati per evitare il contatto diretto con tiranti, tavoli di lavoro o altri oggetti. Le abituali norme d'uso e manutenzione sono quindi demandate sia ai progettisti a monte sia agli operatori a bordo macchina a valle.

3.2. Reynolds e viscosità

Il numero di Reynolds (Re) è una quantità adimensionale utilizzata per prevedere i modelli di flusso del fluido all'interno dei canali di raffreddamento. Il modello teorico di Osborne Reynolds (1842-1912) rese popolare l'uso di questo metodo predittivo alla fine del 1800, per cui si intende il numero di Reynolds come il rapporto tra la quantità di moto e le forze viscosive in un fluido in movimento e quantifica l'influenza relativa di questi fattori per varie condizioni di flusso. A bassi numeri di Reynolds predominano le forze viscosive e il flusso è prevalentemente laminare, caratterizzato da un flusso regolare senza miscelazione interna. A numeri di Reynolds elevati la proprietà di inerzia del fluido diventa il fattore dominante e il flusso diventa turbolento, con flussi caotici, vorticità e significative mescolanze interne.

Per il flusso in un tubo l'espressione matematica semplificata per il numero di Reynolds è data dalla relazione:

$$Re = \frac{\text{Velocità} \times \text{Diametro}}{\text{Viscosità Cinematica}} = \frac{V * D}{\gamma}$$

La viscosità cinematica (γ) è una proprietà che quantifica il grado di resistenza al flusso, ad esempio il miele ha un valore di viscosità elevato e l'acqua un valore molto basso. È importante notare che la viscosità di una sostanza in genere diminuisce all'aumentare della sua temperatura.

La letteratura comune ha ormai consolidato il fatto che un raffreddamento superiore si ottiene quando il flusso è turbolento. La differenza sostanziale delle linee di flusso è mostrata nell'immagine di Figura 8, dove si può intuire il percorso delle particelle di fluido in funzione del tipo di moto stabilito.

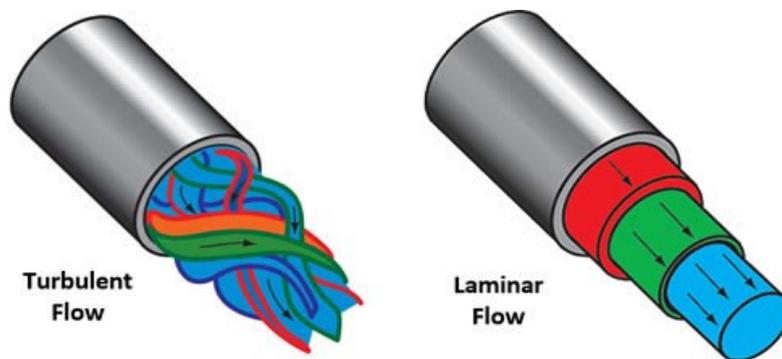


Figura 8 – Esempificazione grafica del tipo di flusso in un condotto

Così il numero di Reynolds è diventato uno strumento predittivo importante e ampiamente utilizzato per migliorare la qualità del raffreddamento degli stampi.

I manuali di ingegneria in genere indicano che è probabile che il flusso sia turbolento per numeri di Reynolds superiori a 4000. Ma va notato che il passaggio dal flusso laminare al flusso turbolento dipende anche da altri fattori come la geometria e la rugosità all'interno dei passaggi del flusso. È buona norma nel raffreddamento dello stampo applicare un fattore di sicurezza per garantire che la turbolenza sia ben stabilita.

Il flusso d'acqua turbolento in un sistema di raffreddamento stampo è molto più efficiente nel rimuovere il calore rispetto al flusso laminare. Dopo aver raggiunto il flusso turbolento, aumentando la portata si ottiene un ulteriore vantaggio di raffreddamento, ma a una velocità decrescente rispetto alla portata dell'acqua. Il grafico della temperatura dell'acciaio rispetto al flusso del refrigerante illustra questo punto, in Figura 9, così come indicato dalle ricerche della compagnia statunitense "Smartflow":

Online è quindi disponibile un semplice calcolatore del numero di Reynolds "Smartflow™", fornito come servizio alla comunità dello stampaggio a iniezione come risorsa online di facile utilizzo. Nello

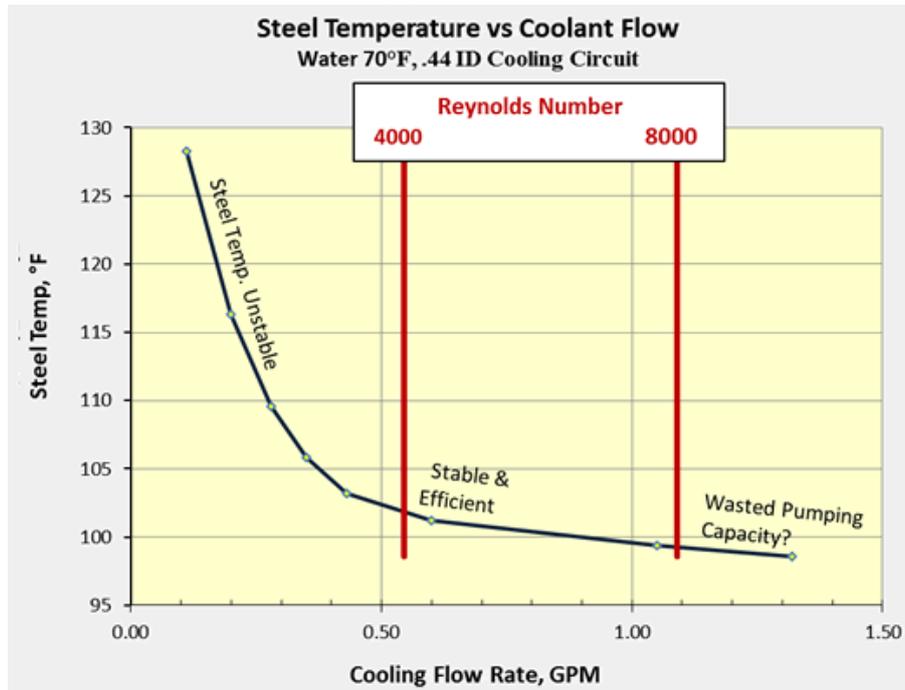


Figura 9 – Grafico temperatura stampo-portata di refrigerante, in base al numero di Reynolds

sviluppo di questo applicativo web è stata prestata particolare attenzione alla capacità di calcolare valori a temperature dell'acqua elevate. Questa funzionalità risulta essere molto utile per il nostro settore, dato l'uso in rapida crescita di regolatori di temperatura per stampi pressurizzati, che operano a temperature fino a 350°C.

È possibile anche selezionare un fluido refrigerante con glicole etilenico, un composto comunemente usato come additivo all'acqua in un sistema di raffreddamento per ridurre la temperatura di congelamento della soluzione e quindi consentire la circolazione di un refrigerante a temperatura inferiore: temperature più basse e concentrazioni di glicole etilenico più elevate richiedono una portata significativamente più elevata per ottenere un determinato numero di Reynolds. Ciò è dovuto alla proprietà fisica di questi liquidi di diventare più viscosi al diminuire della temperatura.

Le concentrazioni consigliate di glicole etilenico variano dal 25% al 60%. Concentrazioni inferiori al 25% possono rendere gli inibitori inefficaci. Al di sopra del 60% di concentrazione, la viscosità della soluzione di raffreddamento è così elevata da interferire con un efficiente trasferimento di calore. Al di sopra di 65°C l'uso di glicole etilenico con componenti di sistema in alluminio o zincati non è raccomandato a causa dei rischi di corrosione; inoltre il sistema deve essere chiuso per evitare una rapida ossidazione del glicole etilenico, l'esaurimento degli inibitori di corrosione e una maggiore corrosione dei componenti del sistema.

Spesso gli operatori di stampi cercano di massimizzare il flusso d'acqua attraverso i loro sistemi di raffreddamento per garantire un flusso turbolento: questa pratica aumenta i costi di pompaggio dell'acqua e può anche limitare la quantità di fluido disponibile per un impianto di pompaggio qualora sia collegato anche ad altri stampi.

In generale, il flusso turbolento è desiderabile in un progetto di sistema di raffreddamento grazie alle sue migliori prestazioni sul trasferimento di calore, rendendo l'effetto di raffreddamento più efficiente. I modelli di flusso sono caratterizzati dal numero di Reynolds. Ad esempio, nel design base del canale di raffreddamento di un cilindro rotondo, una turbolenza completamente sviluppata si verificherà quando il numero di Reynolds raggiunge 4000 o più. Il numero di Reynolds fornisce infatti una panoramica significativa agli utenti per comprendere i modelli di flusso all'interno dei canali di raffreddamento e funge anche da ottimo riferimento per valutare l'efficienza di raffreddamento. Una linea di raffreddamento con una portata maggiore si tradurrà in un numero di Reynolds più elevato, esibendo una migliore prestazione in termini di efficienza di raffreddamento.

Una pratica migliore consiste nell'assicurare un flusso turbolento e un raffreddamento sufficiente utilizzando misuratori di portata e strumenti di misura specifici per altri parametri caratteristici, con tecnologia FCI (Fluid Characteristic Indication). In questo modo è possibile realizzare un efficiente processo di raffreddamento utilizzando la minima capacità di pompaggio ed energia.

3.3. Tecniche e dispositivi di condizionamento degli stampi

La temperatura degli stampi si aggira molto spesso intorno a 40÷50°C; temperature più elevate possono essere desiderabili per migliorare l'aspetto estetico del pezzo, perché in tal modo si ottiene una maggiore lucentezza e cristallizzazione del polimero durante la solidificazione. Ogni ciclo di stampaggio segue un'oscillazione termica di rilevante entità, e la temperatura media della superficie della cavità è solitamente più alta della temperatura del liquido di raffreddamento, (comunemente fissata a 10°- 20°C in meno rispetto a quella dello stampo). Come è ben noto, il tempo di raffreddamento occupa circa metà o anche due terzi del tempo ciclo totale necessario per ogni pezzo prodotto; per questo motivo è indispensabile omogenizzare la distribuzione di temperatura lungo tutte le pareti della cavità per garantire un raffreddamento più veloce ed efficace, migliorando la qualità finale dei manufatti e riducendo gli scarti. Un raffreddamento non uniforme comporta dei difetti nel processo di stampaggio.

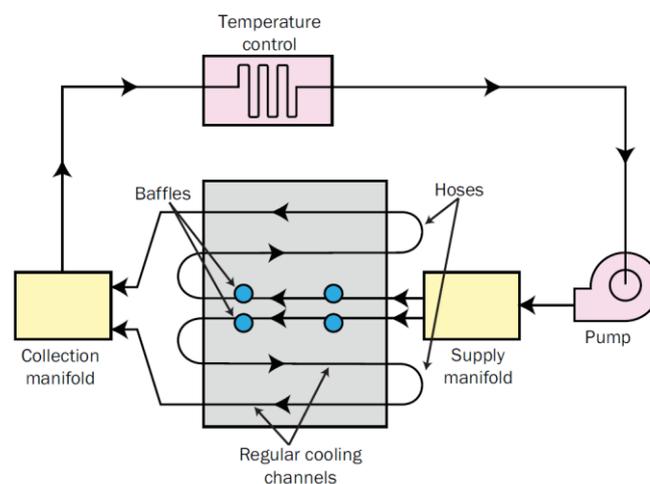


Figura 10 – Schema di un circuito completo di raffreddamento per uno stampo tradizionale

Uno stampo può essere visto come un unico grande scambiatore di calore, dove i flussi termici viaggiano dalla cavità, riempita di polimero fuso, fino al refrigerante in circolazione; gli elementi essenziali di un semplice circuito di condizionamento sono: una pompa di alimentazione, i collettori di mandata e ritorno del fluido, unità elettroniche di controllo della temperatura e gli stessi canali di raffreddamento interni allo stampo con gli elementi accessori e i connettori, Figura 10.

In caso di molteplici tubi connessi allo stampo (solitamente flessibili) è importante anche valutare l'orientazione nello spazio degli ingressi e delle uscite dei canali, in modo da creare il minor intralcio possibile alle azioni di operatori o macchina automatiche che lavorano sulla stessa pressa.

3.4. Canali di raffreddamento convenzionali

Il corretto condizionamento dello stampo prevede uno o più sistemi di canali di raffreddamento, che con un idoneo fluido refrigerante (o semplice acqua fredda depurata) hanno lo scopo di estrarre calore dalle zone critiche in prossimità del pezzo stampato per accelerare il naturale processo di raffreddamento ad ogni ciclo.

In genere la lavorazione di semplici fori è utilizzata nella maggior parte delle industrie per gli stampi quando il raffreddamento uniforme non è richiesto. Le dimensioni dello stampo e lo spazio a disposizione sono tali per cui è quasi sempre possibile inserire linee di raffreddamento esclusivamente nei tasselli che formeranno il pezzo, limitando le lavorazioni meccaniche alle dirette zone interessate e diminuendo così i costi di realizzazione, ma in altre applicazioni di maggiori dimensioni non è raro trovare in aggiunta piastre e inserti carrello raffreddati contemporaneamente.

Nelle tecniche tradizionali di condizionamento degli stampi, distinguiamo un layout dei canali in serie o parallelo, in base al flusso. La Figura 11 evidenzia questa differenza, con frecce rosse a indicare la direzione del liquido refrigerante.

I canali di raffreddamento paralleli sono perforati direttamente da un collettore di alimentazione a un

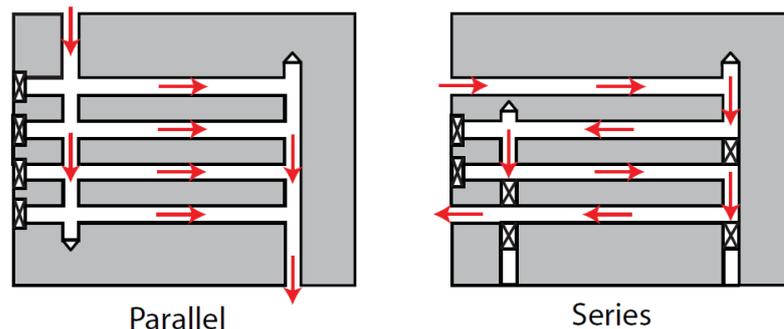


Figura 11 – Schema delle configurazioni dei layout di raffreddamento: parallelo e serie

collettore di raccolta. A causa delle caratteristiche del flusso in direzioni parallele, la portata lungo i vari canali di raffreddamento sarà diversa a causa delle differenze di resistenza del flusso di ogni singolo canale. Queste portate variabili a loro volta fanno sì che l'efficienza di trasferimento del calore dei canali di raffreddamento vari da uno all'altro; di conseguenza, il raffreddamento dello stampo non sarà omogeneo con questa tipologia di configurazione a canali paralleli. Un circuito in parallelo esibisce comunemente portate molto scarse e numeri di Reynolds inadeguati.

Tipicamente, i lati della cavità e del nucleo dello stampo hanno ciascuno il proprio sistema di canali di raffreddamento paralleli; il numero di canali varia in base alle dimensioni e alla complessità dello stampo.

I canali di raffreddamento in serie sono invece collegati in un unico circuito dall'ingresso del refrigerante fino alla sua uscita. Questo tipo di configurazione del canale di raffreddamento è la più comunemente consigliata e utilizzata.

In base alla progettazione, se i canali di raffreddamento sono di dimensioni uniformi, il liquido di raffreddamento può mantenersi in condizioni di moto turbolento per tutta la sua lunghezza: il flusso turbolento consente di trasferire calore in modo più efficace, grazie ai moti casuali e vorticosi che agiscono con maggiore capacità durante l'assorbimento di calore. Tuttavia, è necessario anche fare attenzione a ridurre al minimo l'aumento di temperatura del liquido di raffreddamento poiché il percorso da seguire sarà univoco, e quindi si avrà un aumento di temperatura del fluido fino alla sua uscita dallo stampo.

I canali di raffreddamento possono essere articolati in varie piastre del gruppo stampo, anche a vari livelli e posizioni, per consentire un raffreddamento quanto più possibile uniforme; nei casi di studi forniti, sono sempre derivati da lavorazioni tradizionali al trapano, realizzando fori sia dritti che inclinati; un esempio di questa tecnica è mostrata nella Figura 12.

In questo progetto applicativo, (assegnato e sviluppato durante il corso di Stampi con il prof. Minetola)

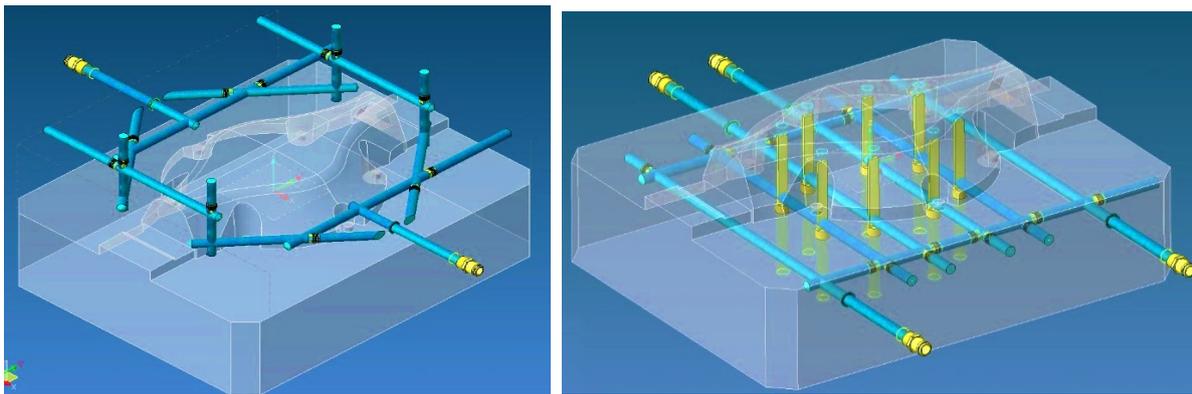


Figura 12 – A sinistra, esempio di circuito di raffreddamento articolato, lato matrice (piastra matrice nascosta invisibile);

A destra, esempio di circuito di raffreddamento piano, lato punzone (piastra punzone in trasparenza)

si può notare come la scelta del design del raffreddamento è stata guidata da scelte costruttive limitate, relative a tecnologie di lavorazione convenzionali: i canali da realizzare nella piastra matrice, immagine di sinistra, si articolano in modo relativamente semplice ma anche in maniera ‘conformata’ al pezzo, in prima approssimazione con una biforcazione del canale; a destra invece è mostrato il layout lato punzone (Core) che prevede due canali separati fra loro con piccoli tratti in serie.

Ebbene, la migliore opzione per valutare il raffreddamento stampo risiede nelle mani del progettista che spesso deve giungere a compromessi tra economicità, velocità di realizzazione stampi e/o qualità dei manufatti prodotti con un certo tipo di design di raffreddamento. In conclusione, il layout può essere più o meno complesso in base alle necessità, ma di solito, per scopi economici si tende a semplificare notevolmente lo studio e la costruzione di questi sistemi.

Elementi standard

Altri fori nelle piastre sono relativi a connessioni extra di canali, accessori o innesti rapidi, inevitabili per raggiungere i canali dall'esterno dello stampo. In commercio, è disponibile oramai una grande varietà di accessori che attraversati dal liquido refrigerante migliorano l'asportazione di calore dallo stampo, per certe zone critiche o difficili da raggiungere.

I deflettori e i gorgogliatori sono dispositivi che appartengono alle linee di raffreddamento che deviano il flusso del refrigerante in aree che normalmente non considerate. I canali di raffreddamento ordinari sono in genere perforati direttamente attraverso la cavità e il core dello stampo, ma spesso nello stampo si studiano metodi alternativi per raffreddare queste aree in modo uniforme con l'uso di deflettori, gorgogliatori o inserti termici altamente conduttivi, Figura 13.

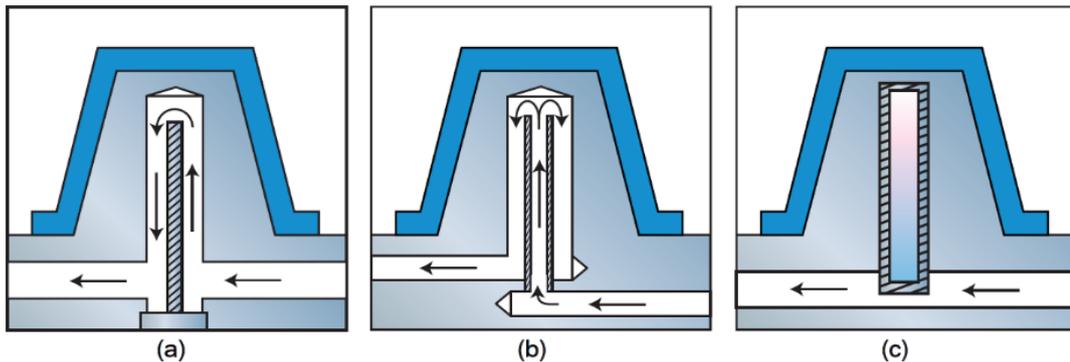


Figura 13 – a) Lama piatta (Baffle); b) Fontana circolare (Bubbler); c) Pin termico

Di comune utilizzo sono gli elementi deviatori di flusso del tipo semplice, piano, con ingresso e uscita all'interno del foro di collocazione stesso, che vengono inseriti e avvitati in alcune cavità dello stampo opportunamente collocate e sagomate; come da Figura 13 (a).

Un gorgogliatore invece è differente da un deflettore per il fatto che la lama viene sostituita con un tubicino dove il liquido di raffreddamento scorre nella parte inferiore del tubo e "sgorga" fuori dalla parte superiore, così come una fontana, Figura 13 (b). Il liquido di raffreddamento si muove poi lungo l'esterno del tubo per continuare il suo flusso attraverso i canali di raffreddamento. Il raffreddamento più efficace delle piastre punzoni con tasselli figura sottili e sporgenti, si ottiene con i gorgogliatori; il diametro di entrambi deve essere regolato in modo tale che la resistenza al flusso in entrambe le sezioni trasversali sia uguale. Questa condizione significa considerare una relazione del tipo:

$$\frac{\text{Diametro Int.}}{\text{Diametro est.}} = 0.707$$

Fino a un diametro di 4 mm, il tubo deve essere smussato all'estremità per allargare la sezione trasversale dell'uscita. I gorgogliatori possono essere utilizzati non solo per il raffreddamento del nucleo, ma anche per il raffreddamento di sezioni di stampo piatte, che non possono essere dotate di canali forati o fresati.

Un deflettore è dunque una specie di canale di raffreddamento perforato perpendicolarmente a una linea di raffreddamento principale con una lama che separa un passaggio di raffreddamento in due canali semicircolari. Il liquido di raffreddamento scorre in un lato della lama dalla linea di raffreddamento principale, gira intorno alla punta sull'altro lato del deflettore e quindi torna alla linea di raffreddamento principale, Figura 14.



Figura 14 – Lama deviatrice (Baffle) e schema di funzionamento

Altri ancora, sono del tipo a elica o spirale e qualitativamente inducono un percorso migliore per il fluido e quindi migliore scambio termico con le pareti dello stampo. Ad esempio, il deflettore dell'elica, come mostrato nella Figura 15 (a), convoglia il refrigerante alla punta e viceversa sotto forma di un'elica. È utile per diametri da 12 a 50 mm e consente una distribuzione della temperatura molto omogenea. Un altro sviluppo logico dei deflettori sono i nuclei a spirale a volo singolo o doppio, come mostrato nella Figura 15 (b).

I migliori modelli di deflettori hanno il diametro del deflettore maggiore del diametro del canale che lo alimenta. Ciò avviene per due ragioni: in primo luogo, per garantire che la lama che devia il flusso blocchi completamente il canale in modo che l'intero flusso risalga il deflettore; e, in secondo luogo, in modo che la sezione trasversale del flusso del deflettore sia simile a quella del canale di alimentazione e non inferiore alla metà delle dimensioni.

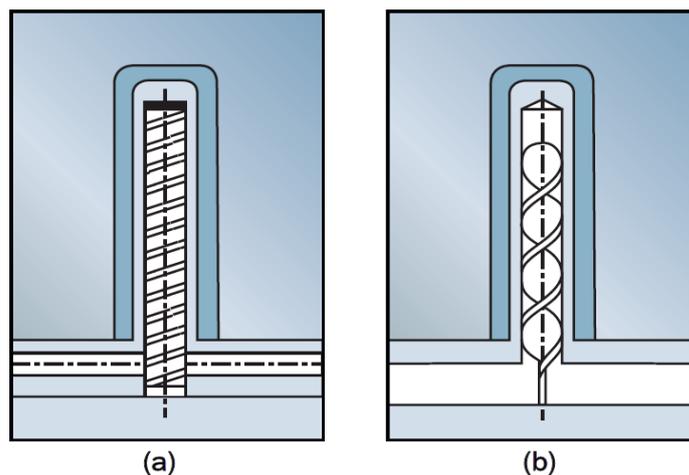


Figura 15 – a) Deflettore a elica (Helix baffle); b) Deflettore a spirale (Spiral baffle)

La distribuzione della temperatura su un lato della lama del deflettore può differire da quella sull'altro lato. Questa condizione può essere risolta se la lama di ottone (o qualche altro metallo non ferroso) che forma il deflettore è attorcigliata.

Un pin termico è un'alternativa ai deflettori e ai bubbler (schiumatori/gorgogliatori). È un elemento cilindrico sigillato riempito con un fluido. Il fluido vaporizza mentre assorbe calore dall'acciaio per utensili e condensa mentre rilascia il calore al refrigerante, come mostrato nella Figura 16. L'efficienza di trasferimento del calore di un pin termico è quasi 10 volte superiore a quella di un tubo di rame. Per una buona conduzione del calore, evitare uno spazio d'aria tra il perno termico e lo stampo o riempirlo con un sigillante altamente conduttivo.

Per diametri del core di grandi dimensioni (40 mm e oltre) è necessario garantire un trasporto interno

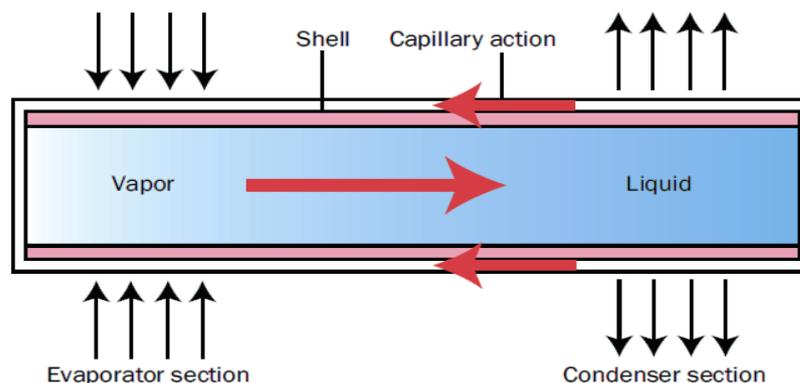


Figura 16 – Schema di funzionamento per un inserto termico

del liquido di raffreddamento. Questo viene fatto con inserti in cui il liquido di raffreddamento raggiunge la punta dell'anima attraverso un foro centrale ed è condotto attraverso una spirale alla sua circonferenza e tra l'anima e l'inserto stesso elicoidalmente all'uscita, come mostrato a sinistra, nella Figura 17.

Questo design però indebolisce significativamente il nucleo, pertanto è bene prestare attenzione alla resistenza del tassello.

Il raffreddamento delle anime di nuclei cilindrici e di altre parti rotonde deve essere attuato con dispositivi a doppia elica, come mostrato a destra, nella Figura 17.

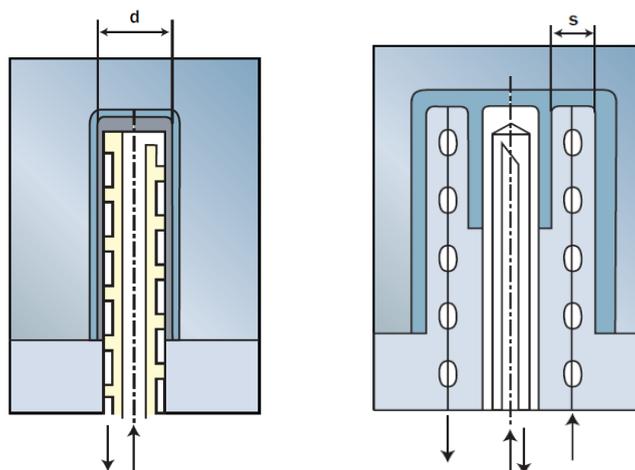


Figura 17 – A sinistra, deflettore a spirale inserito nel core (tassello maschio);
a destra gorgogliatore centrale e canali a doppia elica

Il refrigerante scorre alla punta del nucleo in un'elica e ritorna in un'altra elica. Per motivi di progettazione, in questo caso lo spessore della parete del nucleo dovrebbe essere di almeno 3 mm, al fine di evitare sollecitazioni eccessive e rischiose.

3.5. Conformal Cooling Design

Alcuni esempi in letteratura mostrano canali di raffreddamento conformi nello stampaggio a iniezione per diverse sezioni trasversali, forme, posizioni e diametro cercando quale configurazione di raffreddamento conforme offre i migliori risultati rispetto al raffreddamento con canali convenzionali.

La scelta di vari parametri come sezione, diametro e posizione ottimale dei canali di raffreddamento conforme riduce notevolmente il tempo ciclo e migliorano la qualità di parti in plastica prodotte dal processo di stampaggio ad iniezione. Questi canali di raffreddamento si adattano alla geometria del pezzo, possono assumere anche forme particolari e si integrano normalmente con gli *inlet* e *outlet* degli stampi tradizionali.

Inoltre, con la continua evoluzione dei calcolatori in tempi moderni è stato possibile lanciare simulazioni complete e verifiche sperimentali che erano impensabili fino a qualche decade fa': tramite molteplici software disponibili attualmente, è relativamente facile simulare l'intero processo di iniezione plastica, studiando in sequenza gli step consecutivi cioè iniezione, mantenimento, raffreddamento ed estrazione dallo stampo.

Il raffreddamento rapido migliora l'economia del processo, mentre il raffreddamento uniforme contribuisce alla qualità del prodotto prevenendo il restringimento differenziale, le sollecitazioni interne e i problemi di distacco dello stampo. Sia il raffreddamento rapido che uniforme è ottenuto da un numero sufficiente di canali di raffreddamento posizionati correttamente. I passaggi dei fluidi per un efficace raffreddamento di stampi e parti devono essere posizionati con cura in modo da coprire la maggior parte della superficie di stampaggio.

La forma dei canali di raffreddamento è anche uno dei fattori più significativi nel decidere l'efficacia dei sistemi: la pratica comune consiste nel modellare layout di canali a sezione circolare, ellittica, romboidale o simili. Nelle tecniche di stampaggio convenzionali, nel caso in cui la parte in plastica sia di grandi dimensioni o vi siano più anime da raffreddare contemporaneamente, i due sistemi di raffreddamento più comunemente utilizzati sono il raffreddamento in serie e il raffreddamento in parallelo.

La forma base, cioè parallela e in serie, di un sistema di raffreddamento tradizionale può essere applicata ad un canale di raffreddamento conforme dopo essere stata opportunamente modificata. In questo documento, presentiamo tre tipi di sistemi di raffreddamento conformi basati sui tipi convenzionali con modifiche per mantenere le proprietà conformi; questi includono il tipo a zigzag conforme, il tipo parallelo-parallelo e il tipo a spirale conforme, come mostrato in Figura 18.

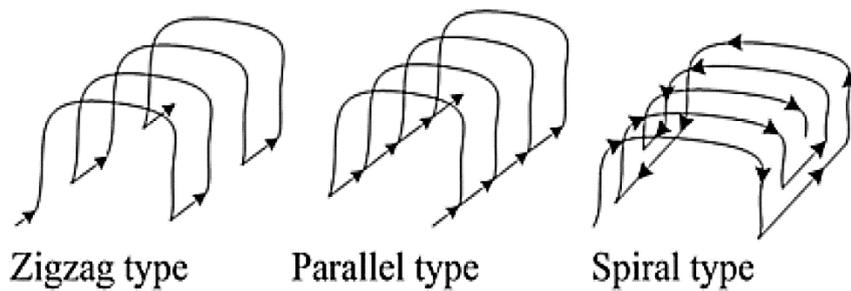


Figura 18 – Configurazione delle linee di flusso nei canali conformali

Con i tipi a zigzag conforme, le singole porzioni del componente stampato vengono raggiunte dal refrigerante una dopo l'altra. Poiché le differenze di temperatura tra lo stampaggio e il refrigerante diminuiscono con l'aumentare della lunghezza del flusso di liquido, non viene fornito un raffreddamento uniforme delle anime. Di conseguenza, questo tipo dovrebbe essere utilizzato solo se la parte in plastica non è troppo grande. Per evitare questa situazione, viene impiegato il raffreddamento parallelo: in tal modo, le singole anime vengono alimentate con il liquido di raffreddamento da un canale principale e un altro canale di raccolta rimuove il liquido di raffreddamento. Pertanto, ogni nucleo viene alimentato con refrigerante della stessa temperatura; ciò fornisce un raffreddamento uniforme, a discapito di un maggior volume di refrigerante.

Il modello di raffreddamento a spirale che può essere utilizzato per raffreddare le parti circolari può anche essere modificato per l'uso in un sistema di raffreddamento conforme. Il liquido di raffreddamento scorre dal bordo al centro nel modello a spirale. La temperatura del liquido di raffreddamento aumenta mentre scorre attraverso la spirale, mentre il fuso si è già raffreddato di qualche grado a causa della lunghezza del suo flusso. Altri esempi pratici tridimensionali di canali a spirale sono già noti in letteratura e reperibili online; l'immagine di destra in Figura 19 presenta un modello esemplificativo che è stato sviluppato per un componente a forma di 'cappello da stregone': l'attenta modellazione delle linee di flusso segue fedelmente le forme del pezzo per il raggiungimento della massima efficienza di omogeneità di asportazione di calore.

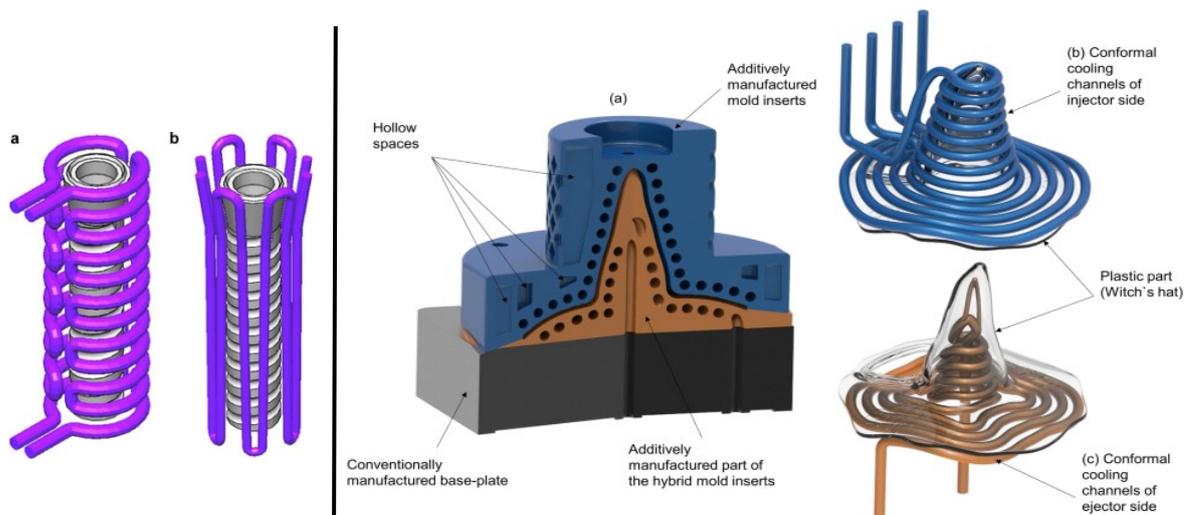


Figura 19 – Esempi di canali a spirale per il raffreddamento conforme

A sinistra, sempre in Figura 19 sono visibili due scelte progettuali a confronto in termini di layout, ancora per canali semplici circolari avvolti a simil-spirale o in modo longitudinale-parallelo rispetto al componente. La differenza sostanziale non è immediatamente intuibile, ma solitamente si ricorre a uno studio di termofluidodinamica per giudicare le differenze nell'asportazione di calore.

Nonostante la complessità degli schemi dei percorsi di fluido, quasi sempre non ci sono particolari difficoltà nella creazione di inserti con canali circolari, poiché assicurano una produzione senza difetti e problemi, dove è necessario ricordare che una certa attenzione è riservata alla possibilità di pulizia dei canali dalle polveri interne non solidificate

Sebbene la scelta abituale del design conformale ricade su canali circolari, piuttosto spesso è possibile trovare dei progetti di studio dove le sezioni trasversali del canale cambiano in base alla scelta dei progettisti per poter rispettare più vincoli contemporaneamente, come può essere garantire la resistenza delle pareti degli inserti (se molto sottili), aumentare la superficie di scambio termico o anche ridurre le perdite di carico nei canali.

La Figura 20 mostra alcuni casi di design piuttosto complessi e avanzati che, in base a quanto appena detto, infatti sono sempre accompagnati da studi aggiuntivi fluidodinamici per verificare il corretto passaggio di fluido, evitare zone morte o di ricircolo e garantire il raffreddamento come ideato.

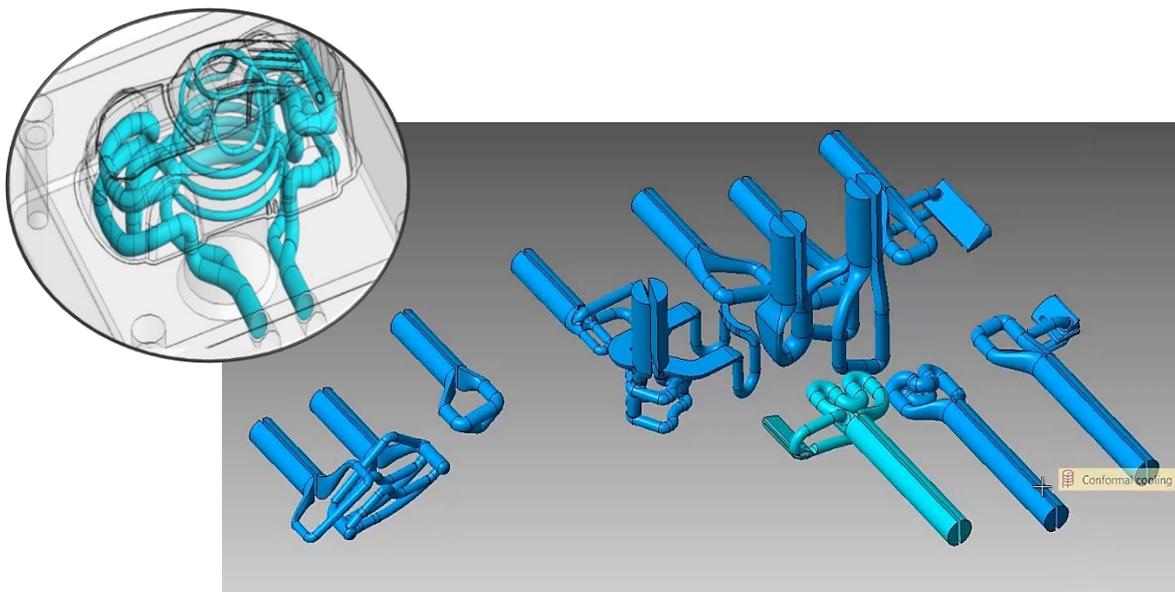


Figura 20 – Altri esempi di design per i canali conformali di tipo circolare e a sezione complessa variabile

Più di rado infatti si presentano soluzioni così sviluppate, anche perché la modellazione e la verifica di queste soluzioni richiedono spesso una grande quantità di tempo prima della produzione vera.

Per quanto possibile, si è soliti limitare le forme dei canali a geometrie semplici e regolari, così come verrà svolto in questo lavoro di tesi al fine di giungere a compromessi fra costi e rapidità delle soluzioni.

Complessivamente, le soluzioni di raffreddamento conformi restituiscono risultati migliori rispetto a quelli originali perché la distanza tra i canali di raffreddamento e le superfici dello stampo è sempre mantenuta circa costante, ottimizzando gli scambi termici dove maggiormente richiesto, il che si traduce in un raffreddamento più uniforme.

Ogni progetto di sistema di raffreddamento deve essere applicato in modo flessibile per diverse forme di parti in plastica e deve dipendere dal meccanismo di lavoro dello stampo per evitare interferenze tra componenti come perni di espulsione, linee idrauliche, sensori e altri.

Riassumendo, possiamo affermare con convinzione che l'approccio del raffreddamento conforme, nell'industria dello stampaggio a iniezione, restituisce dei vantaggi non indifferenti, cioè:

- Raffreddamento dell'inserito in modo più uniforme ed efficace
- Eliminazione degli Hot-spot (punti caldi difficili da raggiungere convenzionalmente)
- Riduzione del tempo ciclo anche del 50-75% per design ottimizzati

In sintesi, possiamo affermare che utilizzare canali conformali comporta una serie di vantaggi, tra cui:

- Riduzione dei tempi di realizzazione stampo
- Sostenibilità e ottimizzazione dei processi di produzione inserti
- Riduzione del consumo di energia e materiali
- Riduzione dei tempi di ciclo per le produzioni di manufatti a iniezione
- Miglioramento della qualità dei pezzi con possibile margine di riduzione della deformazione della parte in plastica
- Riduzione delle sollecitazioni e della deformazione globale nello stampo dovuta a asimmetrie termiche
- Controllo della deriva dei processi e limitazione di essi

3.6. Criteri di progettazione

Il design dei layout di raffreddamento con canali conformali variano in base a molteplici fattori, principalmente la geometria del componente; dunque non è possibile stabilire delle strategie di progettazione uniche e rigorose valide per ogni caso di studio. Alcuni punti chiave sono però imprescindibili e sempre validi, come banalmente il vincolo di dover garantire la realizzazione degli inserti e dei tasselli stampo attraverso le tecniche di fabbricazione additiva: questa prescrizione si traduce nella limitazione della sezione minima di un canale attraversato dal fluido (es. minimo diametro di canali circolari) o anche nell'evitare geometrie a sbalzo o in sottosquadra dei canali che possano causare problemi e difficoltà di realizzazione.

Per gli altri criteri di progettazione, si può immaginare come per ogni obiettivo desiderato ci sia una diversa situazione da considerare, essenzialmente le regole di progettazione più comuni sono del tipo:

- Progettazione per condizione di raffreddamento conforme e/o uniforme;
- Progettazione per limitazione di caduta di pressione del refrigerante;
- Progettazione per uniformità di temperatura del refrigerante;
- Progettazione per un raffreddamento di base sufficiente all'estrazione di un pezzo;
- Progettazione per la resistenza termo-meccanica e/o flessione dello stampo.

Per quanto riguarda le linee guida da rispettare per la realizzazione dei canali di raffreddamento, lo studio della letteratura indica dei principi base molto rilevanti: in primis, bisogna dimensionare i canali in base agli spessori della parte in plastica da produrre, quindi scegliere opportunamente diametro dei canali (se circolari) e la loro distanza dal pezzo, o l'interasse stesso rispetto ad altri canali. La Figura 21 riassume queste regole essenziali per un corretto design.

Progettare dei canali a diametro troppo piccolo potrebbe precludere la fattibilità della loro realizzazione, poiché non sarebbe più possibile ripulire la polvere residua interna al canale a causa di curvature o restringimenti che legherebbero la polvere fusa alle pareti creando ostruzioni.

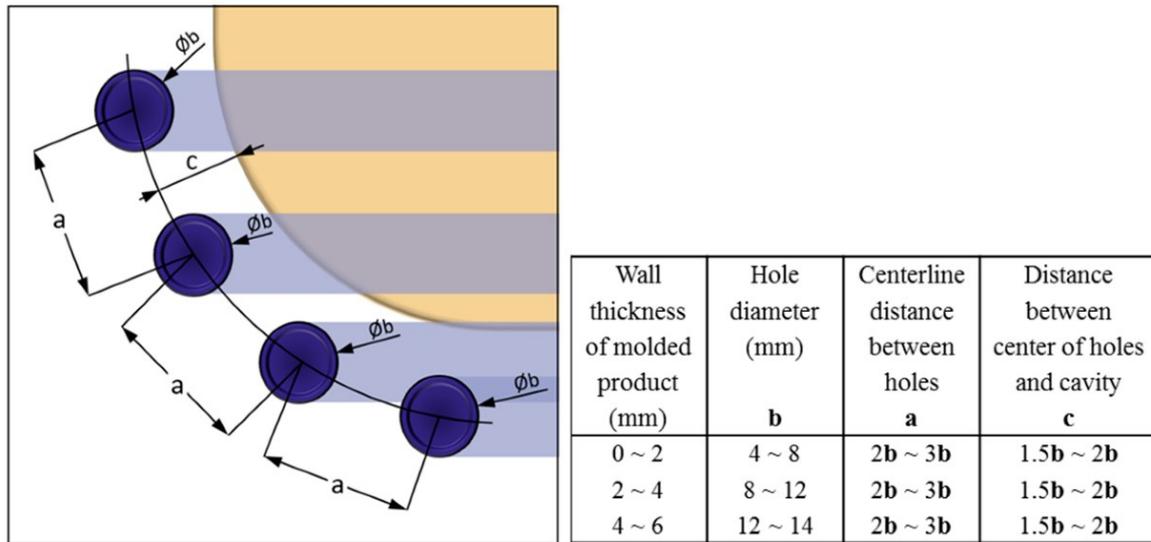


Figura 21 – Linee guida per le distanze nel design dei canali di raffreddamento conformati

Altri fattori dovrebbero anche essere considerati per un corretto dimensionamento, come ad esempio la pressione di iniezione cui sarà soggetto lo stampo e la resistenza del materiale di cui è composto, temperatura del liquido refrigerante e stress termomeccanico che ne deriva, uniformità dell'asportazione di calore tra piastra punzone e piastra matrice in modo da evitare prevedibili deformazioni di imbarcamento del pezzo, ecc...

Questi fattori fanno parte del bagaglio culturale di un progettista, che propone i modelli attraverso la sua esperienza e che valida grazie a simulazioni FEM strutturali, per una verifica di resistenza.

Questa parte aggiuntiva di analisi strutturale non è stata presa in considerazione in questo progetto di tesi poiché avrebbe richiesto una grande quantità di tempo supplementare; pertanto, sarà oggetto di altri studi o progetti di tesi.

4. CASO DI STUDIO

La società 'QTool S.r.l.' si occupa dello sviluppo integrale degli studi, in tutti i vari aspetti, relativi alle analisi di flusso plastico, al raffreddamento anche in campo CFD, all'analisi strutturale statica, a fatica, nonché stress termici ecc... in aggiunta, offre anche servizi completi di produzione, pulizia, controllo e spedizione degli inserti stampati in acciaio mediante A.M, in funzione delle richieste dei clienti.

Il caso di studio per questo lavoro di tesi, è stato commissionato dall'azienda "Techno Plast S.r.l.", con lo scopo di realizzare uno studio di fattibilità per interventi di miglioramento o perfezionamento di un manufatto realizzato per iniezione plastica su larga scala, per uno stampo già esistente e operativo. Il tutor aziendale ha guidato il percorso di studio mediante indicazioni ricorrenti e fondamentali, difatti, la stretta collaborazione con l'Ing. Ahmed Eldagani è stata fondamentale per determinare le strade migliori di indagine e ottimizzazione.

4.1. Progetto applicativo

Il componente assegnato è una cover scatolare in poliammide contenuta all'interno di uno stampo a singola impronta. La procedura di analisi inizia con una fase preliminare di raccolta del materiale come modelli cad, schede stampaggio, documenti di dettaglio per i raffreddamenti e informazioni varie; segue quindi la scelta dello strumento di calcolo e simulazione preferenziale in modo da ottenere due opzioni di confronto: da un lato il processo di iniezione tradizionale a canali convenzionali, così come in opera, da simulare nel modo più affidabile e realistico possibile, dall'altro una serie di simulazioni con i nuovi layout conformali e modifiche accessorie giustificate, a parità di parametri di processo iniziali.

La scheda stampaggio condivisa dall'azienda Techno presenta tutte le informazioni indispensabili da implementare nel software prescelto, per una corretta simulazione che possa rispecchiare al meglio i parametri di lavoro originali derivati da test e sperimentazioni da parte del cliente stesso.

La strategia di ricerca prevede l'utilizzo di vari applicativi software di calcolo con l'intento di valutare differenze e affidabilità dei risultati, tra questi, richiamiamo essenzialmente 'SolidWorks', 'VERO Visi Flow' e 'Moldex3D'.

A partire da 'SolidWorks' è stato possibile osservare e studiare il modello cad di stampo completo fornito dall'azienda Techno nonché avviare delle prime analisi elementari a parametri di default: questo già noto programma si presta bene alla parte di modellazione CAD manuale nonché alle fasi di simulazione di flusso plastico e raffreddamento, in particolare il modulo Plastics è stato lo strumento delle prime fasi di indagine che purtroppo non ha restituito risultati realistici coerenti.

A seguire, 'VERO Visi Flow' è stato un passo in avanti verso interpretazioni più complete e realistiche del processo di simulazione: il software si presenta come uno strumento orizzontale e di ampio uso, con discreto approccio alla simulazione e modellazione, regolare ed essenziale che ha condotto a risultati accettabili e interessanti.

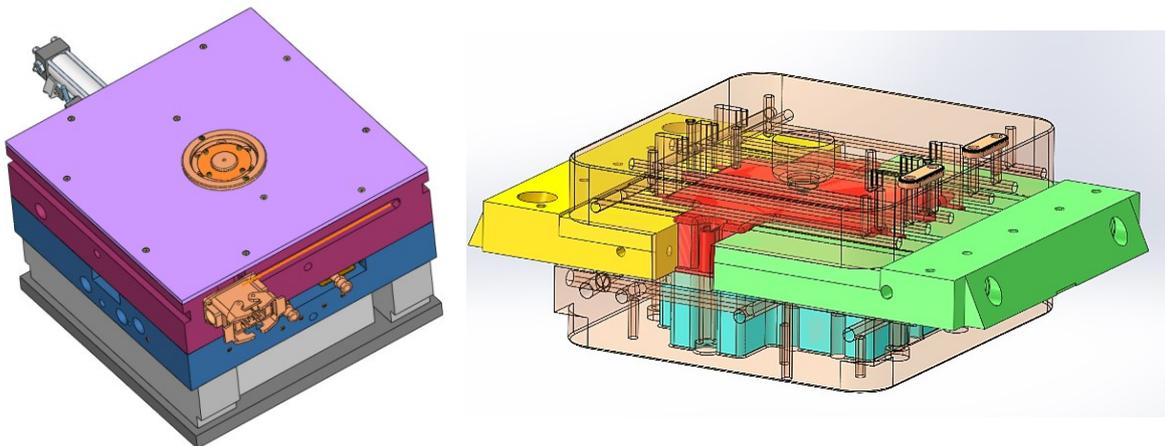
Infine, il programma 'Moldex3D' si è rivelato essere il migliore per questo tipo di applicazioni, non a caso è uno dei software più completi, solidi e affidabili dell'intero settore industriale per la stampa a iniezione. In particolare, si denotano la possibilità di adoperare interfacce CAE classiche o interfacce macchina con parametri preimpostati in base al modello di pressa a disposizione. La molteplicità delle

funzioni e dei comandi di input, insieme alla diversità dei risultati di output ha decretato il programma Moldex3D come attore guida indiscusso dello studio.

La sequenza delle operazioni svolte durante i lavori di tesi è volta a rispecchiare la prassi comune di un progetto di studio di simulazione, nel quale ci si spinge sempre oltre aumentando complessità generale e complementarità delle variabili in gioco. Ciò significa che le attività di ricerca e test sono iniziate da condizioni di simulazioni essenziali e semplificate fino al raggiungimento del miglior setup possibile che rispecchiasse al meglio i dati già noti dalla realtà pratica testimoniata e che potesse anche dare un contributo affidabile e verosimile per ogni modifica da apportare al progetto originale di stampo Techno.

4.2. Stampo Techno

Il file di partenza è rappresentato dal modello tridimensionale complessivo dello stampo di riferimento dove tutti i componenti effettivamente utilizzati nel modello reale sono replicati in questo file step concesso dall'azienda Techno. In Figura 22 è mostrato lo stampo nella sua totalità a sinistra, mentre si possono osservare più chiaramente alcune piastre in trasparenza relative ai tasselli centrali 'Core' e 'Cavity', il tassello punzone in azzurro e il manufatto in plastica in colore rosso.



*Figura 22 – Modello CAD complessivo dello stampo Techno, a sinistra;
principali piastre di interesse con vista in trasparenza, a destra,*

Sono altresì visibili alcune linee di raffreddamento già scavate e due inserti carrello che vanno a formare la geometria della nostra scatola in giallo e verde; si deduce quindi una certa complessità progettuale vincolata anche a questi sistemi carrello mobili, inevitabili.

Si tratta di uno stampo a singola impronta che contiene al suo interno un numero modesto di estrattori, viti, inserti stampo (Figura 23) e accessori vari, come un cilindretto pneumatico di movimentazione collegato a uno dei due carrelli, o anche il connettore elettrico collegato al canale caldo di alimentazione cavità.

I fori e le cavità in sottosquadro sono formati dai pin blu e da altri tasselli mobili in giallo come visibile dalla Figura 23.

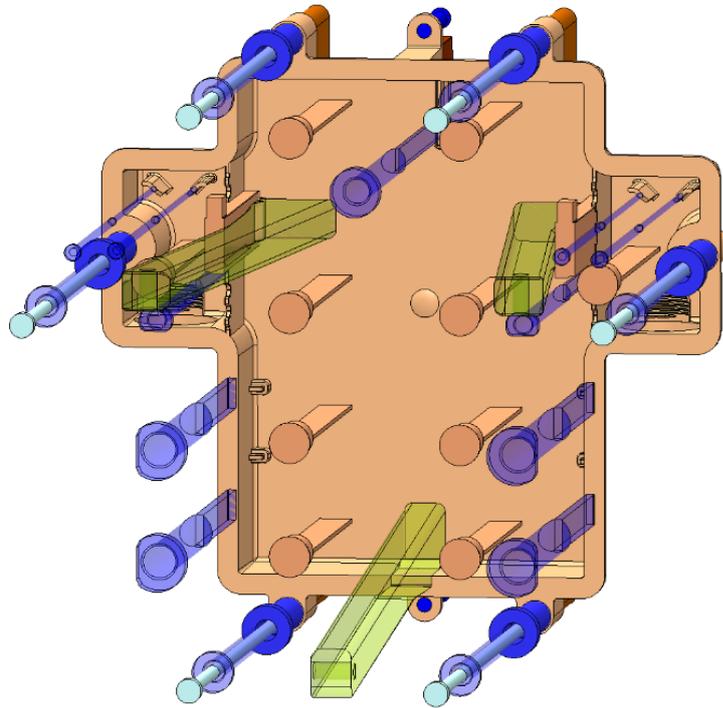


Figura 23 – Scatola con pin estrattori, baffles e inserti a vista

Il pezzo in rosso centrale rappresenta l'oggetto d'esame, ossia la scatola in plastica da simulare; la Figura 24 riporta varie viste del pezzo, così come è stato fornito insieme ai valori di volume, massa e dimensioni di ingombro come stimate dal programma SolidWorks.

Le caratteristiche geometriche di questo oggetto sono molteplici: 6 parti cave circolari lungo il contorno, due fori centrali nel piano di mezzeria longitudinale, 2 snap fit realizzati con l'aiuto di inserti, varie costole sporgenti, 2 pareti a spessore sottile uguali e infine due filettature in risalto ai lati opposti, probabilmente destinate all'accoppiamento con altri oggetti.

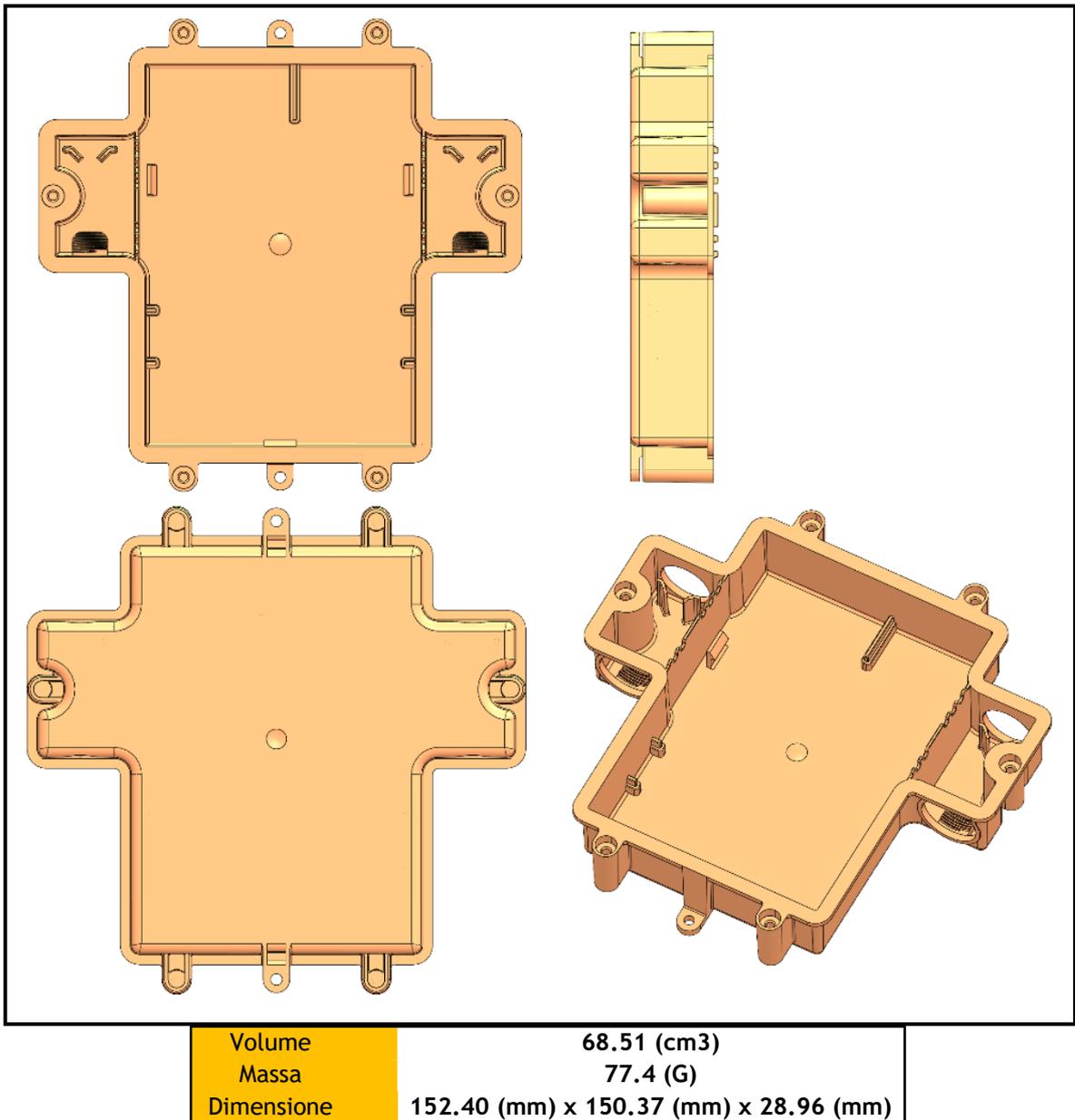


Figura 24 – Viste del modello CAD del pezzo 'Scatola' con informazioni sulle grandezze di base

4.3. Materiali

In questa sezione vengono presentati e descritti i materiali (metallici e plastici) che caratterizzano gli oggetti del nostro modello di simulazione.

➤ Stampo

Le piastre dello stampo sono generalmente in acciaio 1.1730, meglio noto anche più semplicemente come acciaio C45, ma non sono di nostro interesse ai fini della simulazione del processo di iniezione plastica.

Il materiale delle matrici (piastre 'core & cavity') è invece un acciaio 1.2083, con denominazione specifica M310-Stavax-Collex.

In Figura 25 è possibile leggere le corrispondenze di denominazione nelle diverse raccolte normative, poi la composizione chimica di questa lega metallica e infine una tabella che valuta qualitativamente alcune tra le più importanti caratteristiche, anche rispetto ad altre tipologie di acciaio non molto diverse.

Corrispondenze		Standards		Analisi chimica				
~1.2083	SEL	4957	EN ISO	C	Si	Mn	Cr	V
~SUS420J2	JIS	A681	ASTM	0,38	0,70	0,45	14,30	0,20
X40Cr13	EN	AFNOR Z40C14	Others					
X40Cr14								
~420	AISI							

Material characteristics

	Corrosion resistance	Machinability in as supplied condition	Polishability	Toughness	Wear resistance
BÖHLER M310 ISOPLAST®	★★★★	★★★★	★★	★★	★★
BÖHLER M333 ISOPLAST®	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★	★★
BÖHLER M340 ISOPLAST®	★★★	★★★	★★	★★	★★★
BÖHLER M368 MICROCLEAN®	★★★★	★★★	★★★★	★★★	★★★
BÖHLER M390 MICROCLEAN®	★★	★	★★★	★★	★★★★
BÖHLER M398 MICROCLEAN®	★★	★	★★★	★★	★★★★★

Figura 25 – Informazioni di base e valutazione qualitativa delle caratteristiche per l'acciaio 1.2083

Si tratta quindi di un acciaio inossidabile martensitico al cromo prodotto mediante processo di rifusione sotto elettroscoria, ulteriormente sviluppato per stampi in plastica, ideato per tempra a cuore a bassa corrosione, alto legato, con ridotte distorsioni e con ottime caratteristiche per la lucidatura a specchio così come buona fotoincisione, buona lavorabilità, elevata resistenza all'usura e stabilità dimensionale; generalmente impiegato per piastre di forma e inserti per la lavorazione di materie plastiche chimicamente aggressive.

La Figura 26 mostra il tipico diagramma caratteristico di rinvenimento di questo acciaio.

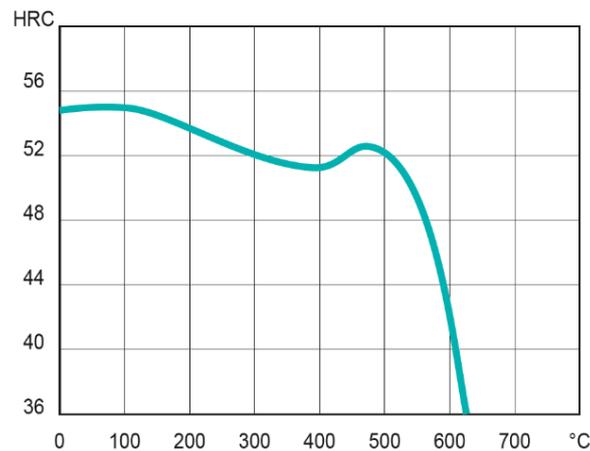


Figura 26 – Diagramma di rinvenimento per l'acciaio 1.2083

In aggiunta, in Figura 27 sono riportati i parametri tipici del materiale relativi alle proprietà fisiche e termiche

Physical Properties at 20°C / 68°F

Density	7,68	[kg/dm ³]
Thermal conductivity	19,5	[W/(m.K)]
Specific heat	460	[J/(kg.K)]
Spec. electrical resistance	<0,001	[Ohm.mm ² /m]
Modulus of elasticity	217	[10 ³ N/mm ²]

Thermal Expansions

Temperature (°C)	100	200	300	400	500
Thermal expansion (10 ⁻⁶ m/(m.K))	10,63	10,94	11,29	11,66	12

Figura 27 – Informazioni base dell'acciaio 1.2083

➤ Componente scatolare in plastica

Il componente da stampare invece è realizzato in Poliammide del tipo PA66, più nello specifico il materiale di riferimento è originario della Basf con denominazione PA66-GF35 A3WG7.

Trattasi di un materiale per lo stampaggio ad iniezione rinforzato con fibra di vetro al 34% e resistente all'invecchiamento termico per articoli industriali, alloggiamenti, attacchi per cavi, distributori di carburante per autoveicoli e componenti vari generici. L'Ultramid® A' (Figura 28 e 29) è il materiale con la maggiore durezza nella linea di prodotti BASF PA66, rigidità, resistenza all'abrasione e termostabilità.

Ultramid®	Poliammide Struttura chimica		Punto di fusione [°C]
Ultramid® A	66	base esametilendiammina, acido adipico	260
Ultramid® B	6	policaprolattame – NH(CH ₂) ₅ CO	220
Equilibrio Ultramid® S	6/10	base esametilendiammina, acido sebacico	222
Ultramid® T	6T/6	copolimero di caprolattame esametilendiammina e acido tereftalico	295

Figura 28 – Gradi dei materiali Ultramid

È uno dei materiali preferiti per parti soggette a sollecitazioni meccaniche e termiche nell'ingegneria elettrica, meccanica e automobilistica. Questi materiali rinforzati con fibra di vetro, inoltre, si distinguono per elevata resistenza meccanica, durezza, rigidità, termostabilità e resistenza ai lubrificanti caldi e all'acqua calda. Le parti realizzate con essi hanno stabilità dimensionale e resistenza allo scorrimento particolarmente elevate. La fibra di vetro rinforzato Ultramid® T è inoltre eccezionale per la sua straordinaria resistenza al calore (fino a 280°C).

Le simulazioni di riempimento in una fase iniziale possono essere importanti contributo alla progettazione, in particolare per quanto riguarda le parti stampate hanno geometrie complesse.

Le parti stampate in Ultramid® sono facili da smontare. L'angolo di sforno sugli stampi a iniezione per Ultramid® è generalmente indicato tra 1 e 2 gradi. Con angoli inferiore, le forze di sfornamento aumentare notevolmente, il che significa che è necessaria maggiore attenzione pagato al sistema di espulsione. In linea di principio, Ultramid® è adatto a tutti i comuni tipi di gate (attacchi di iniezione). Quando si utilizzano ugelli a canale caldo, dovrebbe essere possibile regolarli individualmente. I componenti riscaldati devono avere un livello di temperatura omogeneo.

Per questo materiale, sono consigliati gate di dimensioni sufficientemente grandi. Sezioni trasversali di passaggio troppo piccole possono causare una vasta gamma di problemi, tra cui danni materiali derivanti da sollecitazioni di taglio eccessivamente elevate o parti stampate non sufficientemente riempite a causa di perdite di pressione. Il congelamento prematuro della massa fusa prima della fine del tempo di pressione di mantenimento può causare vuoti e segni di sprofondamento. Nel caso delle qualità rinforzate con fibre, si verifica una maggiore usura nell'area del gate a velocità di uscita relativamente elevate; questo può essere contrastato selezionando idonee tipologie di acciaio e utilizzando inserti per stampi intercambiabili. Gli acciai alto-legati resistenti alla corrosione (ad esempio X42Cr13, DIN 1.2083) si sono dimostrati adatti alla lavorazione di prodotti ignifughi.

La qualità delle procedure di stampaggio dipende fortemente dalle condizioni di temperatura nello stampo: un controllo della temperatura dello stampo preciso ed efficace è possibile solo con un sistema ben progettato di canali di controllo della temperatura nello stampo insieme a dispositivi di controllo della temperatura di potenza adeguata. Le temperature dello stampo richieste per Ultramid® possono essere raggiunte con dispositivi di controllo della temperatura che utilizzano acqua, con la pressione del sistema sovradimensionata e attentamente controllata, se necessario.

Come regola di base, le poliammidi non rinforzate si restringono in misura maggiore rispetto ai gradi rinforzati. I prodotti stampati in materiale con fibra di vetro mostrano una marcata differenza nel ritiro perpendicolare e parallelo alla direzione del flusso (anisotropia da ritiro). Questo è il risultato del tipico orientamento delle fibre di vetro longitudinalmente alla direzione del flusso

La deformazione è determinata principalmente da differenze di ritiro nella direzione del flusso del fuso e nella direzione trasversale ad essa. Ecco perché gli stampi realizzati con materiali rinforzati in fibra di

vetro tendono più a deformarsi rispetto a quelli realizzati con prodotti non rinforzati. Inoltre dipende dalla forma degli oggetti, dalla distribuzione degli spessori delle pareti e dalle condizioni di lavorazione

Ultramid® A3WG7



We create chemistry

Product Information

Typical values for uncoloured product at 23 °C ¹⁾	Test method	Unit	Values ²⁾
Properties			
Polymer abbreviation	-	-	PA66-GF35
Density	ISO 1183	kg/m ³	1410
Viscosity number (0.5% in 96 % H ₂ SO ₄)	ISO 307, 1157, 1628	cm ² /g	145
Moisture absorption, equilibrium 23°C/50% r.h.	similar to ISO 62	%	1.4 - 1.8
Water absorption, saturation in water at 23°C	similar to ISO 62	%	4.7 - 5.3
Processing			
Melting temperature, DSC	ISO 11357-1/-3	°C	260
MVR 275 °C/5 kg	ISO 1133	cm ³ /10min	20
Melt temperature, injection moulding/extrusion	-	°C	280 - 300
Mould temperature, injection moulding	-	°C	80 - 90
Moulding shrinkage, constrained ³⁾	-	%	0.5
Moulding shrinkage (parallel)	ISO 294-4	%	0.37
Moulding shrinkage (normal)	ISO 294-4	%	1.04
injection molding, Melt temperature, recommended	-	°C	290
injection molding, Mold temperature, recommended	-	°C	80
Flammability			
UL 94 rating at 1,6 mm thickness	IEC 60695-11-10	class	HB
Automotive materials (Thickness >= 1mm) ⁴⁾	ISO 3795, FMVSS 302	-	+
Oxygen index	ISO 4589-1/-2	%	24
UL 94 rating at 3.05 mm thickness	UL-94, IEC 60695	class	HB
UL 94 (2)	UL-94, IEC 60695	-	UL
Mechanical properties dry / cond.			
Tensile modulus	ISO 527-1/-2	MPa	11500 / 8500
Stress at break	ISO 527-1/-2	MPa	210 / 150
Strain at break	ISO 527-1/-2	%	3 / 5
Tensile creep modulus, 1000 h, strain <= 0.5%, 23°C	ISO 899-1	MPa	* / 6600
Flexural modulus	ISO 178	MPa	10000 / 8000
Flexural strength	ISO 178	MPa	300 / 240
Charpy unnotched impact strength (23°C)	ISO 179/1eU	kJ/m ²	95 / 105
Charpy unnotched impact strength (-30°C)	ISO 179/1eU	kJ/m ²	75 / -
Charpy notched impact strength (23°C)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	14 / 22
Charpy notched impact strength (-30°C)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	12 / -
Izod notched impact strength (23°C)	ISO 180/A	kJ/m ²	14 / 18
Thermal properties			
HDT A (1.80 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	250
Max. service temperature (short cycle operation) ⁵⁾	-	°C	240
Temperature index at 50% loss of tensile strength after 5000 h	IEC 60216	°C	175
Temperature index at 50% loss of tensile strength after 20000 h	IEC 60216	°C	145
Coefficient of linear thermal expansion, longitudinal (23-55)°C	ISO 11359-1/-2	E-6/K	23
Coefficient of linear thermal expansion, transverse (23-55)°C	ISO 11359-1/-2	E-6/K	93
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W/(m K)	0.35
Specific heat capacity	-	J/(kg*K)	1500
Electrical properties dry / cond.			
Relative permittivity (1 MHz)	IEC 62631-2-1	-	3.5 / 5.7
Dissipation factor (1 MHz)	IEC 62631-2-1	E-4	200 / 3000
Volume resistivity	IEC 62631-3-1	Ohm*m	1E13 / 1E10
Surface resistivity	IEC 62631-3-2	Ohm	1E12 / 1E10
Comparative tracking index, CTI, test liquid A	IEC 60112	-	- / 450
Electric strength K20/P50, d = 0.6 - 0.8 mm	IEC 60243-1	kV/mm	90 / 75
Electric strength K20/K20, (60*60*1 mm ³)	IEC 60243-1	kV/mm	40 / 34

Figura 29 – Dati tecnici del materiale del componente in PA66 [dati cataloghi BASF]

4.4. Scheda stampaggio

Un estratto riassuntivo della scheda stampaggio è qui riportata nella sua interezza, in Figura 30.

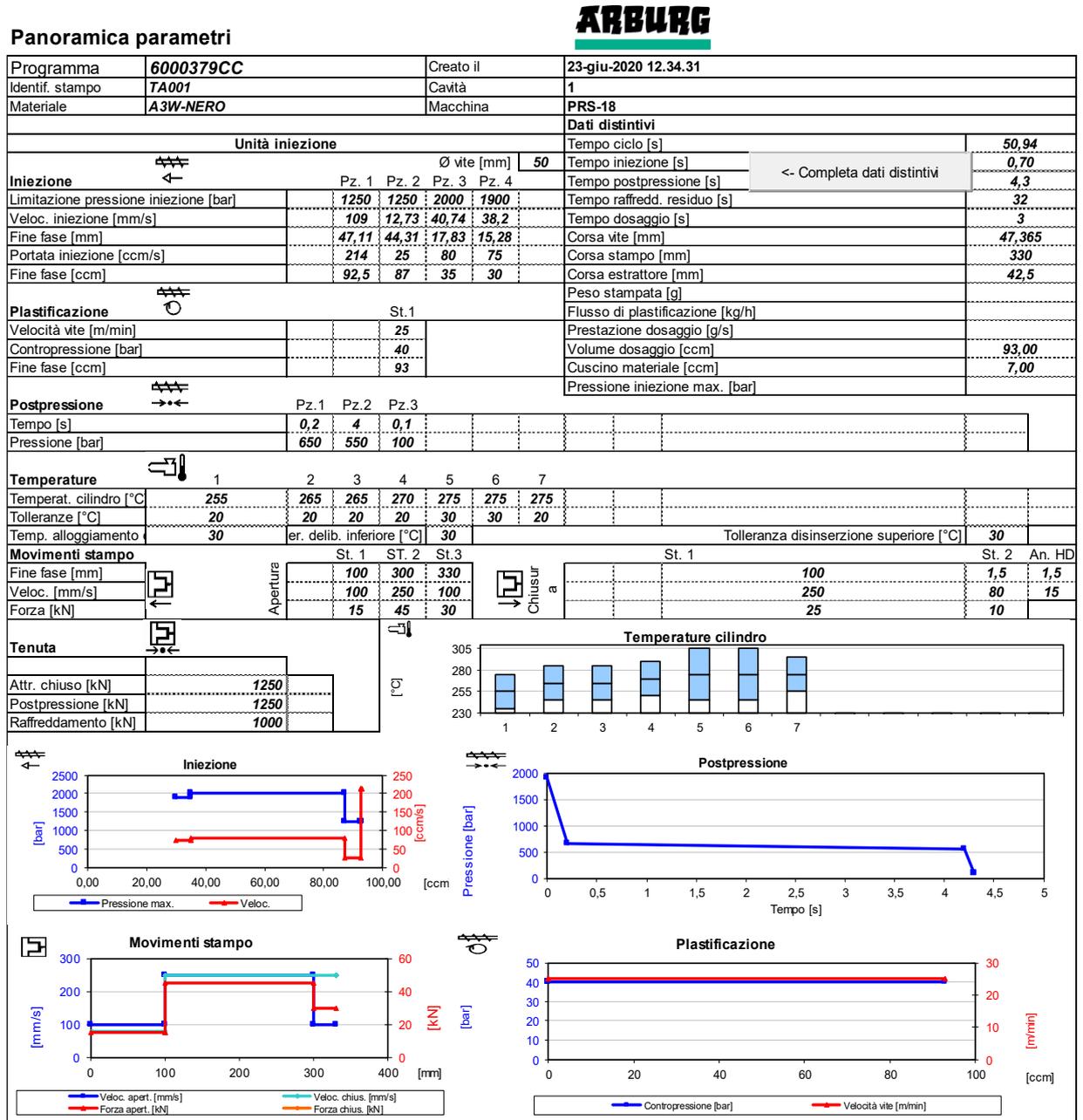


Figura 30 – Immagine riassuntiva della scheda stampaggio per lo stampo Techno
[dati originali di produzione]

I principali dati di processo sono raccolti nell'estratto del file Excel relativo alla scheda stampaggio reale del pezzo; non tutti i parametri sono stati impiegati nelle analisi poiché relativi a grandezze della macchina di produzione non di nostro interesse, cioè la pressa. I dati di movimento stampo, corsa della vite e plastificazione sono stati trascurati poiché inutilizzabili nei modelli CAE di simulazione. I dati utili relativi alla scheda stampaggio sono stati implementati secondo le migliori interpretazioni possibili;

un esempio è inerente al profilo di pressione (Pack Profile), come da figura seguente il tempo totale di mantenimento e decadimento della pressione segue il grafico a punti fornito.

Mentre, di notevole rilevanza sono le altre informazioni essenziali ai fini delle simulazioni di stampaggio, ossia:

- Profilo di pressione di iniezione (65-55-10 MPa rispettivamente a 0.2 - 4.2 - 4.3s) e relativa limitazione a 2000bar (200 MPa)
- Portata media approssimata per l'iniezione di circa 90 cm³/s (escluso lo spike finale a 214 cm³/s)
- Tempi delle varie fasi: riempimento, mantenimento e raffreddamento (FILL+PACK+COOL)
- Profili di portata del polimero (grafico ' Iniezione')
- Profilo di pressione per il mantenimento (grafico 'Postpressione')

Relativamente al componente da simulare, riassumiamo come segue un tempo ciclo di 42s, Figura 31.

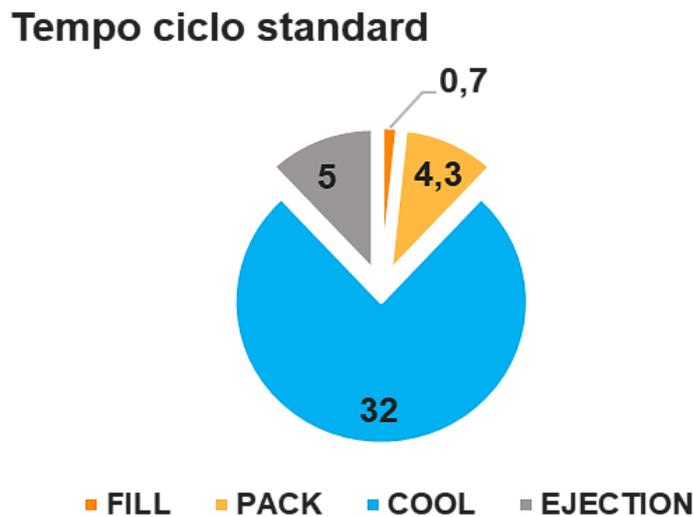


Figura 31 – Diagramma a torta del tempo ciclo di riferimento

Altri dati sono raccolti nella tabella di Figura 32, dove, si deduce come il tempo di dosaggio pari a 3s è stato trascurato nelle simulazioni poiché trascende i nostri obiettivi di ricerca; pertanto il tempo ciclo di riferimento sarà di 42s.

Item name	Item data
Filling Time	0.70 (sec)
Melt Temperature	295.0 (oC)
Mold Temperature	80.0 (°C)
Maximum Injection Pressure	200.00 (MPa)
Injection Volume	68.5759 (cc)
Packing Time	4.30 (sec)
Maximum Packing Pressure	190.00 (MPa)
VP Switch by volume(%) filled (Exclude runner)	93.00 (%)
Mold Opening Time	5.00 (sec)
Ejection temperature	190.0 (°C)
Air Temperature	25.0 (°C)
Cooling Time	32.00 (sec)
Cycle Time	42.00 (sec)

Figura 32 – Tabella riassuntiva dei dati di processo

4.5. Gate e canale di iniezione

La cavità dello stampo viene riempita tramite un canale caldo bizona, tra 290°C e 295°C, così come indicato in alcuni pdf riepilogativi dello stampo, forniti insieme al cad. per le difficoltà nell'indicare con precisione quali zone fossero a certe temperature, per semplicità è stato scelto di usare un valore di riferimento univoco di 295°C per tutta la lunghezza del canale, compreso lo spot di iniezione.

Altre informazioni geometriche relative al progetto Techno sono state difficili da comunicare o reperire a causa dell'impossibilità di contatto diretto con l'azienda, ciononostante è stato fatto il possibile per dedurre tutte le grandezze necessarie alla creazione del nostro modello di simulazione. Le prime incertezze relative al modello di simulazione, sono derivate infatti, dalle dimensioni effettive del gate di iniezione e dal canale di alimentazione: l'analisi del modello 3D unitamente alla ricerca attraverso le schede tecniche ha permesso di stabilire

Il riempimento della cavità avviene, come già anticipato, mediante un canale caldo centrale di lunghezza approssimativa di 90mm (Figura 33), come identificato dal modello cad a disposizione, nonché tramite scheda tecnica di riferimento.

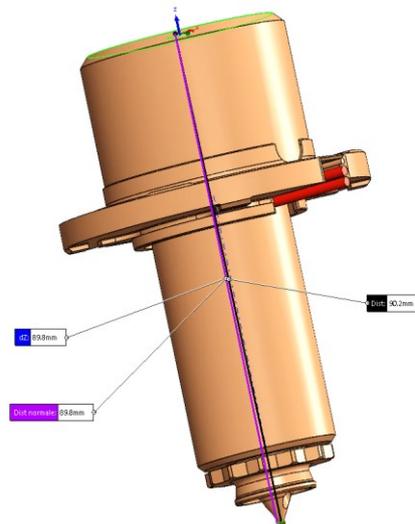


Figura 33 – Canale caldo 3D e misura annessa

Per una migliore interpretazione del contatto tra Hot Runner e pezzo, è stata inserita qui un'immagine che mostra anche l'interno dell'oggetto di riscaldamento del materiale plastico, Figura 34.

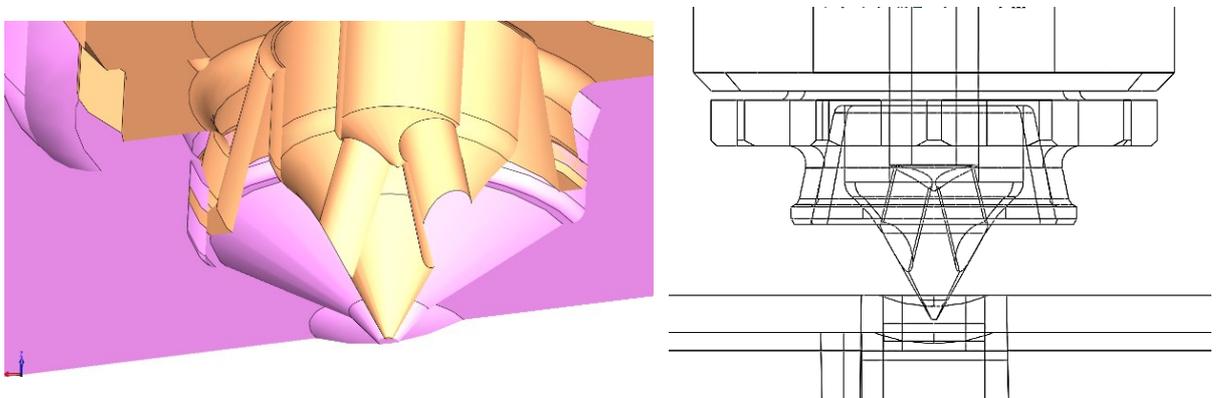


Figura 34 – Canale caldo e punto di attacco sul pezzo, vista 3D (in sezione) a sinistra, vista in piano (wireframe) a destra

La piastra matrice mostrata in viola, contiene questo sistema di alimentazione e la sua traslazione in direzione di chiusura/apertura stampo permette l'inserimento di materiale direttamente in cavità attraverso un piccolo spot di iniezione, per il quale è stato accertato un diametro equivalente di passaggio materiale, di circa 1,4mm.

Il risultato visivo di queste informazioni si traduce nell'equivalente modello cad di Figura 35, dove la semplificazione dell'iniezione presume una semplice geometria di canale caldo circolare, con ammissione in gate troncoconico di dimensioni 1,4mm-5mm

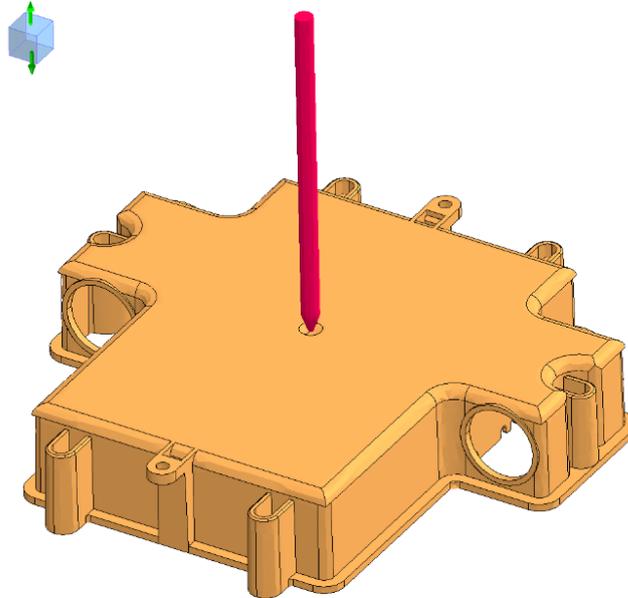


Figura 35 – Oggetto di simulazione con gate e hot runner

4.6. Analisi degli spessori

Inizialmente, un'analisi degli spessori è stata condotta in SolidWorks, per valutare le parti sottili o più spesse. L'osservazione degli spessori permette anticipatamente di stimare le zone dove possono presentarsi problemi di stampate o difficoltà di solidificazione. La mappa dimensionale è visibile in Figura 36.

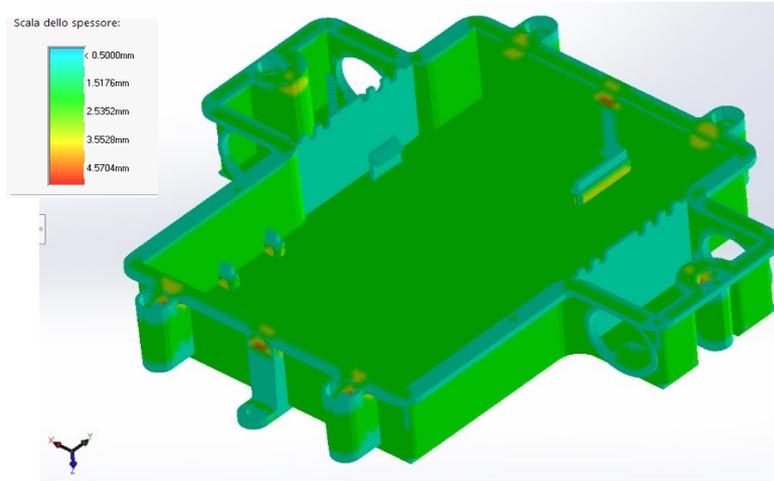


Figura 36 – Mappa degli spessori in base all'analisi Solidworks

Le aree parzialmente evidenziate in rosso-giallo-arancio, portano con sé gli spessori maggiori e la marcata concentrazione di materiale fuso, che richiederà solitamente più tempo per il congelamento.

Il report dell'analisi è stato esportato e raccolto in Figura 37 seguente.

Parametro	Valore		
Tipo di analisi	Analisi spessa	Area di superficie totale analizzata	69892,78mm ²
Destinazione spessore	0,50mm	Volume analizzato	68614,50mm ³
Spessore limite area	6,00mm	Deviazione massima dallo spessore di destinazione	5,09mm
Range a colori completo	Attivo	Spessore medio ponderato sull'area critica	1,92mm
Corpo per analisi	Scatola	Spessore medio ponderato sull'area analizzata	1,91mm
Facce per analisi locale	Modello completo	Spessore massimo sull'area analizzata	5,59mm
Risoluzione	Alta		

Range di spessore	Numero di facce	Area di superficie	% dell'area analizzata
da 0,50mm a 1,77mm	352	15489,15mm ²	22,16%
da 1,77mm a 3,04mm	230	53024,56mm ²	75,87%
da 3,04mm a 4,32mm	52	616,54mm ²	0,88%
da 4,32mm a 5,59mm	37	340,61mm ²	0,49%

Figura 37 – Risultati tabellati dell'analisi degli spessori

Così come da modello cad, si può notare la maggior parte del pezzo ha geometria a spessore sottile contenuta nell'intervallo tra 1,77 mm e 3,04 mm, oltre a minori zone con deviazione maggiore per il 22% circa. Lo spessore calcolato nelle varie direzioni porta alla luce perfino a piccole zone con spessore variabile tra circa 4mm e 5,59mm. Si tratta però di aree molto contenute nell'ordine dell'1% circa del componente.

Come ulteriore conferma, è stato possibile confrontare i valori dello spessore con un altro programma di simulazione, in particolare Visi Flow. Dopo aver impostato una grandezza di mesh accettabile in risoluzione massima, il software provvede al calcolo dello spessore come fase preliminare a quella di iniezione plastica vera e propria. La Figura 38 mostra la mappa degli spessori sulla mesh della scatola Techno in modo graficamente più chiaro rispetto al contorno stesso; equivalentemente al caso precedente si dimostra che il file cad usato è stato correttamente interpretato e riscontriamo quindi gli stessi punti a maggiore/minore spessore.

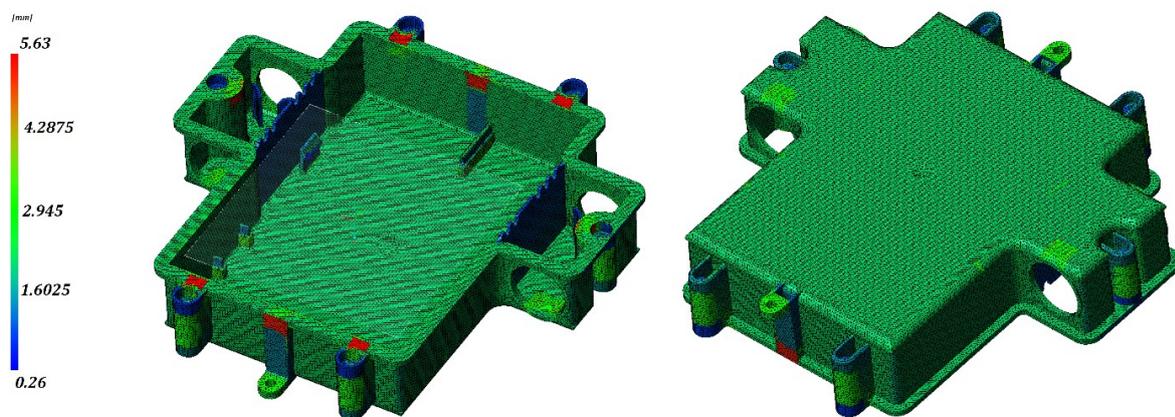


Figura 38 – Mappa degli spessori su vista mesh del pezzo in base al calcolo VISI Flow

In particolare, le aree delimitate in rosso rappresentano zone di concentrazione del calore a causa del maggior materiale plastico ivi presente, e quindi maggior tempo di solidificazione. Infine, anche se difficilmente visibili esistono piccoli punti a grande spessore anche all'interno dei cilindretti di contorno formati da inserti stampo. Complessivamente questa procedura di pre-simulazione aiuta già notevolmente nell'individuare i possibili hotspots del pezzo che dovranno essere risolti o mediati nei limiti applicativi dello stampo già esistente ossia con il minor numero di modifiche nelle piastre e relative modifiche necessarie ai percorsi di fluido refrigerante.

Questi problemi relativi al raffreddamento rappresentano il nucleo portante del lavoro di tesi e sono stati indagati a lungo insieme al tutor Ahmed attraverso le potenzialità degli strumenti di simulazione a disposizione. La notevole varietà di combinazione delle variabili e di opzioni di calcolo, hanno restituito numerosi casi di soluzione alternativi che d'altronde hanno assorbito la maggiore quantità di tempo proprio al fine di produrre dati di simulazione coerenti e incentivanti.

Infine, come ultima proposta software, si vuole adesso presentare il risultato del calcolo di spessore tramite il programma Moldex3D. In questo caso si ottengono valori anche più alti di 5,6mm, ma come si può osservare dalle immagini di Figura 39, si tratta di spessori trascurabili nella loro estensione rispetto alla totalità dell'oggetto. La distribuzione statistica degli spessori sul pezzo chiarisce quanto appena detto, limitando gli spessori massimi rilevanti a circa 5,4mm, valore in linea con le precedenti analisi.

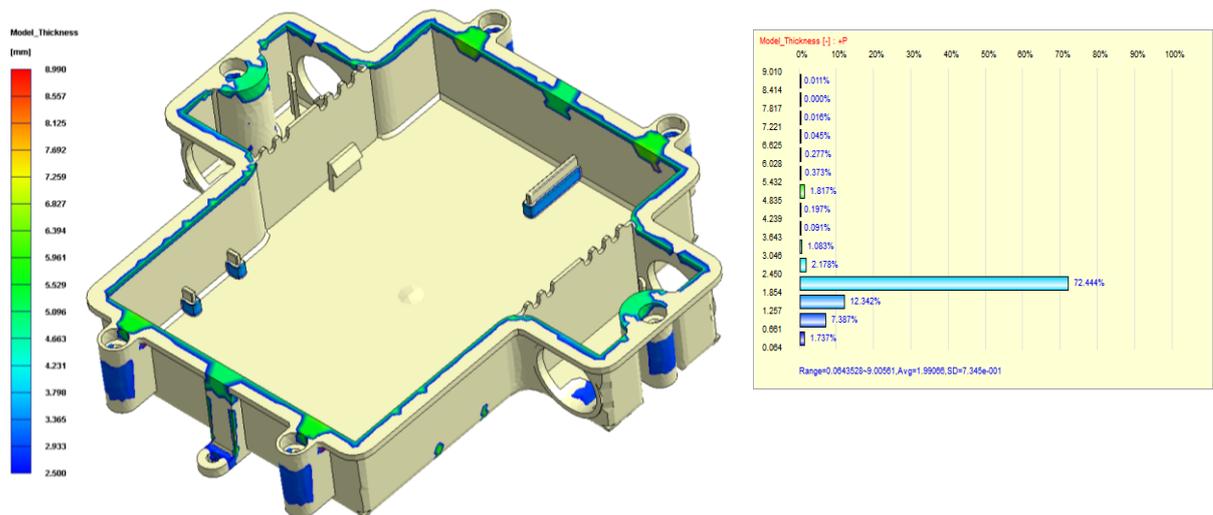


Figura 39 – Mappa degli spessori sul pezzo in base al calcolo Moldex3D, nel range tra 2,5mm e il max di 8,99mm, a sinistra; distribuzione statistica dei valori numerici in diagramma a barre, a destra

4.7. Canali di raffreddamento originali

Lo stampo Techno è provvisto di canali di raffreddamento convenzionali realizzati mediante lavorazioni tradizionali al trapano, pertanto presenta solo tratti di canale dritti rettilinei che incrociandosi tra di loro originano il layout di raffreddamento.

In totale sono presenti 6 canali, dove 1 di essi si trova a distanza maggiore rispetto alla cavità e al pezzo, ma per completezza verranno considerati e utilizzati tutti i canali di cui è stata comunicata l'esistenza e il funzionamento.

Più in dettaglio, la Figura 40 indica le collocazioni nello spazio di questi canali, e la loro complessità. È anche possibile inoltre distinguere le entrate dalle uscite nei canali, e quindi la direzione di flusso, grazie alle numerazioni impresse sulle superfici esterne dei connettori: numeri dispari indicano gli ingressi, mentre quelli pari rappresentano le uscite.

Come visibile dall'immagine stessa dei canali, per poter realizzare questo layout bisogna far convergere delle linee di foratura in punti specifici: di fatto, sono rappresentate anche quelle porzioni di canale superflue, che delimitano le forature dall'esterno delle piastre ma che nella realtà sono occlusi da tappi di isolamento specifici per tubazioni e canali di questo genere.

Il primo passo di approccio alla simulazione consiste nella definizione dei domini di interesse: generalmente per i nostri scopi saranno necessari il componente da produrre, i canali di raffreddamento e un volume fittizio rappresentativo dello stampo virtuale; per quest'ultimo si preferisce sostituire le molteplici piastre componenti a contatto col pezzo, con un unico grande volume elementare dello stesso materiale delle piastre e che contiene interamente gli altri oggetti.

Tale operazione è stata eseguita in tutti e tre i programmi sperimentati per la simulazione di processo, (SolidWorks, Visi Flow, Moldex3D) ma sotto l'aspetto tecnico questa operazione è stata indispensabile per non allungare eccessivamente i tempi di calcolo richiesti.

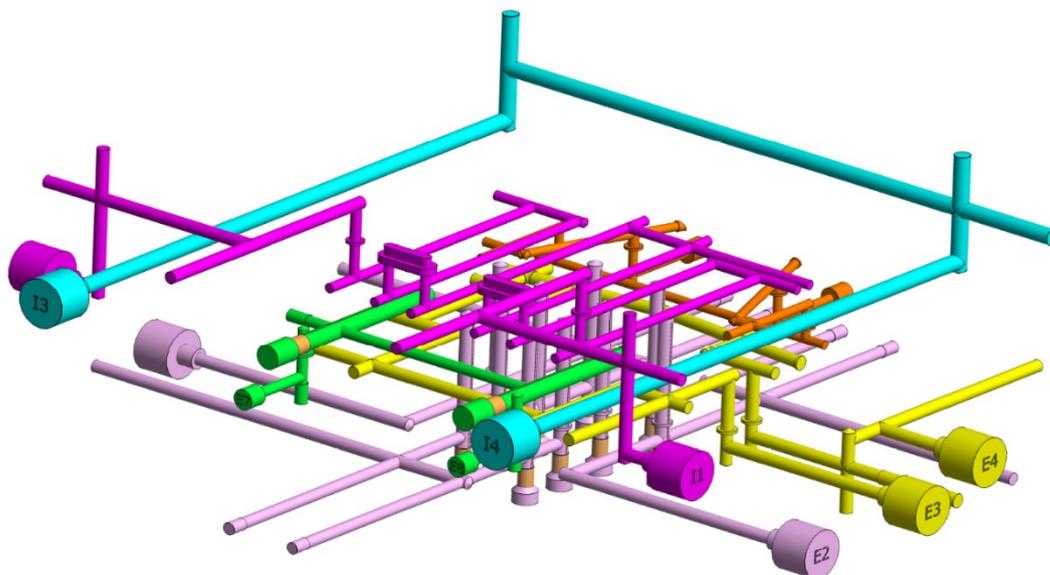


Figura 40 – Layout originale del sistema di canali di raffreddamento convenzionali nello stampo Techno: numeri dispari indicano gli ingressi del fluido refrigerante, numeri pari le uscite

Ri-denominazione dei canali

Per evitare incomprensioni e difficoltà di riconoscimento, i canali di raffreddamento sono stati denominati secondo un semplice elenco numerato, da 1 a 6, come evidenziato dalla Figura 41 seguente.

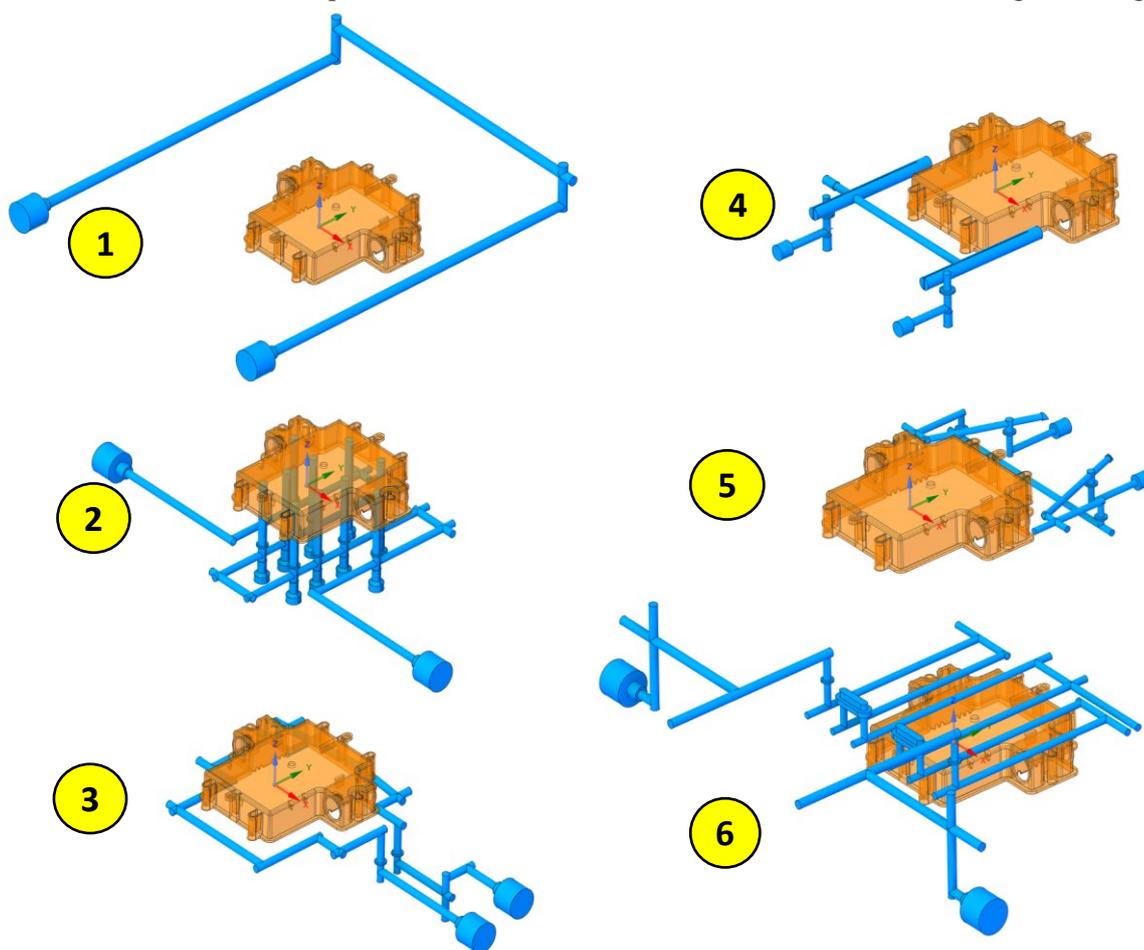


Figura 41 – Distinzione numerica dei canali di raffreddamento originali, da 1 a 6

4.8. Portate di fluido refrigerante

In merito ai canali di raffreddamento, sono note le pressioni di ammissione in ogni singolo canale, pari a 3 bar (dati comunicati dal tecnico stampista Techno). La condizione di pressione come parametro di inlet è piuttosto comune nel settore degli stampi a iniezione, dal momento che i moderni strumenti di misura delle portate sono più che sufficienti per un calcolo reale diretto. Ciononostante, è possibile stimare le perdite di carico in modelli 3D e calcolare approssimativamente le portate d'acqua che attraversano i singoli canali separatamente. Il modulo 'Flow Simulation' di SolidWorks si presta bene a questo scopo ed è piuttosto intuitivo e semplice da usare.

Ricordiamo innanzitutto che in un progetto di raffreddamento per stampi si ricerca sempre la massima efficienza di scambio termico, seppur con il solo ausilio di canali convenzionali: per questo scopo assumiamo che il dato di 3 bar fornito all'ingresso di ogni canale sia sufficiente per instaurare un campo di moto turbolento nella maggior parte del modello di calcolo.

Per una simulazione di flusso interno è necessario eseguire una serie di operazioni fondamentali, tra cui:

- Definire il tipo di problema: nel nostro caso flusso interno stazionario
- importare la geometria step dei canali e definire il dominio computazionale di riferimento
- creare tramite tool apposito dei tappi di chiusura per ogni canale ('Lids')
- Inserire il fluido di interesse: fluido incomprimibile, acqua
- Impostare una rugosità superficiale delle pareti bagnate dal fluido
- Impostare le condizioni al contorno del problema, per ogni canale: inlet 3 bar, outlet pressione atmosferica
- Scegliere un grado di precisione e risoluzione della mesh di calcolo
- Definire manualmente quali grandezze usare contemporaneamente per la convergenza della simulazione (generalmente portate, velocità max/min/medie ecc)
- Selezionare il tipo e il numero di risultati di output da graficare o tabulare

Uno studio di portata in SolidWorks prevede dei calcoli automatici relativi al tipo di flusso impostato, cioè laminare o turbolento, e durante il processo di calcolo si assiste alle iterazioni consecutive del programma, con la generazione di grafici di convergenza normalizzati a testimonianza dell'operazione, Figura 42.

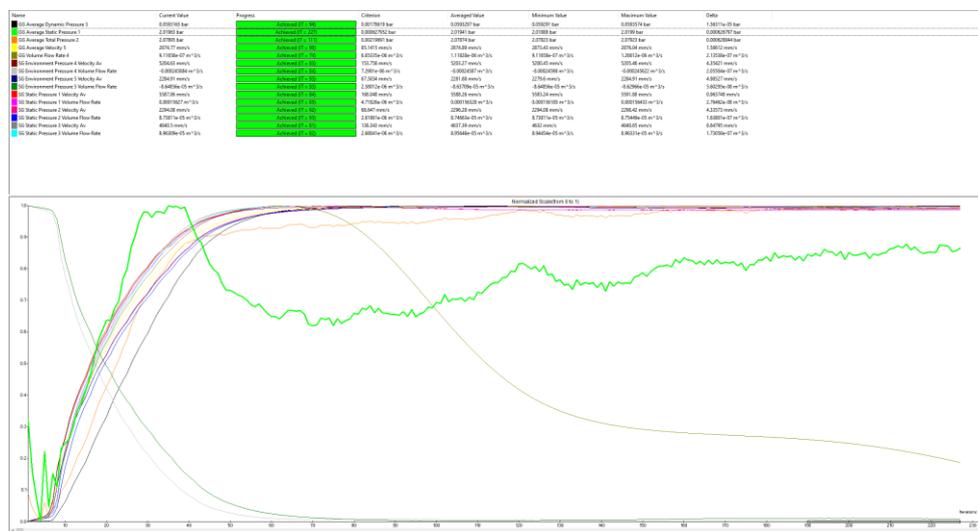


Figura 42 – Grafici di convergenza normalizzati dei parametri obiettivo durante la simulazione di flusso

Il primo risultato di simulazione di flusso è stato essenzialmente la distribuzione di pressione lungo i canali, nonché la pressione relativa visibile in Figura 43.

Si può osservare come i valori di pressione siano più alti in corrispondenza degli inlet settati a 3 bar,

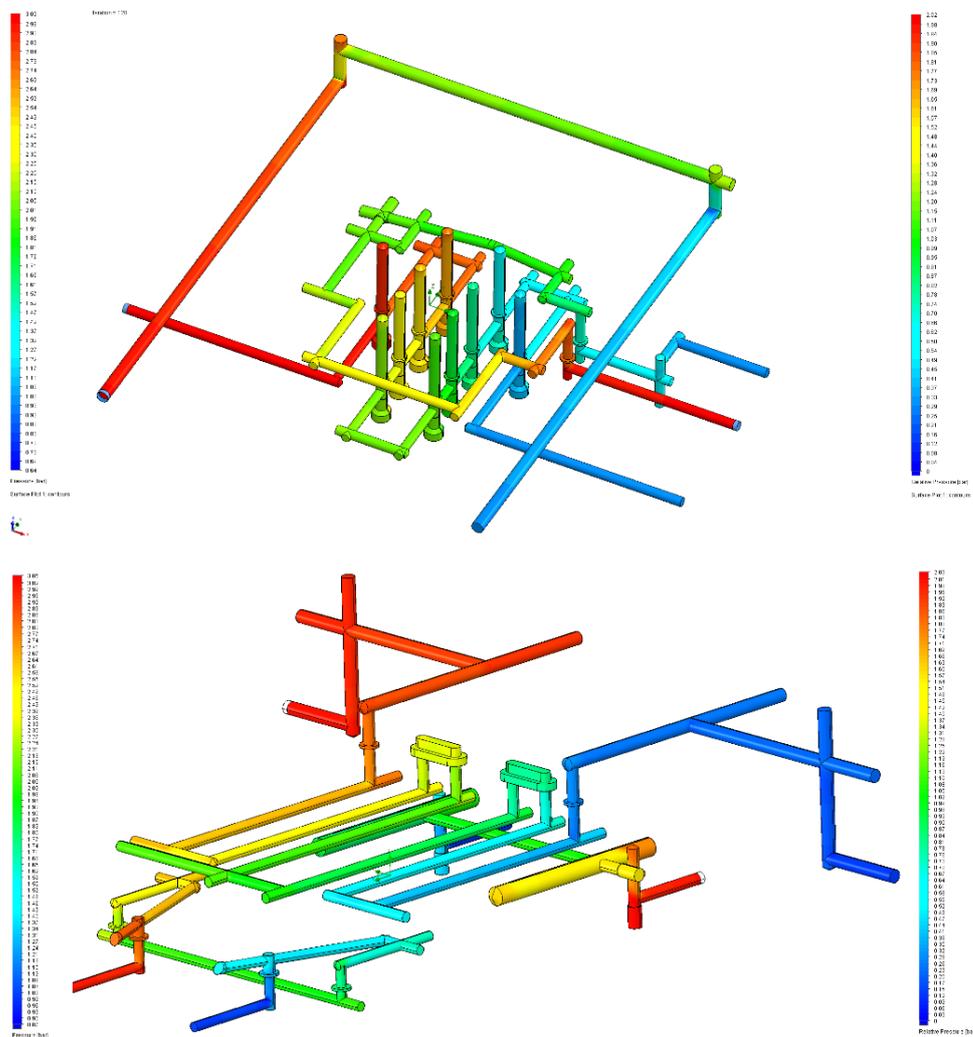


Figura 43 – Grafico delle pressioni generali e pressioni relative per i due set di canali separati, canali 1,2,3 in alto, canali 4,5,6 in basso

(colori rosso e arancio), mentre si assiste al decadimento della pressione di ingresso man mano che ci si allontana; l'uscita dei canali raggiunge la pressione atmosferica ed è quindi mostrata in colore azzurro/blu. Tra i risultati di simulazione più importanti, che è possibile mostrare, riportiamo la mappa di velocità associata alle particelle delle linee di flusso; Figura 44.

L'analisi puntuale delle sezioni di uscita, tramite funzioni di ispezione, permette di ricavare immediatamente i valori di velocità dell'acqua agli outlet; generalmente la massima velocità si riscontro al centro dei canali, ma a causa di reflussi, vorticità e deviazioni le linee di flusso a maggior velocità si troveranno nelle zone di sezione a minor resistenza.

Il canale n° 1 è senza dubbio quello a flusso più veloce visto che presenta tratti lunghi e lineari, eccetto quattro transizioni direzionali; la pressione di uscita infatti risulta essere anche lievemente superiore a quella atmosferica, in prima approssimazione. A seguire, il canale n°3 presenta le velocità più alte a testimonianza di un percorso di flusso non troppo ostacolato da perdite di carico eccessive.

Questo tipo di considerazioni si estendono similmente agli altri canali oggetti di studio, in particolare si osserva come per il canale 2 si evidenziano cadute di pressione in serie a causa dei numerosi baffles deviatori inseriti ed è il componente a portata minore. Ciononostante, per tutti i canali la pressione di ingresso risulta essere più che sufficiente per un flusso adeguato nei canali.

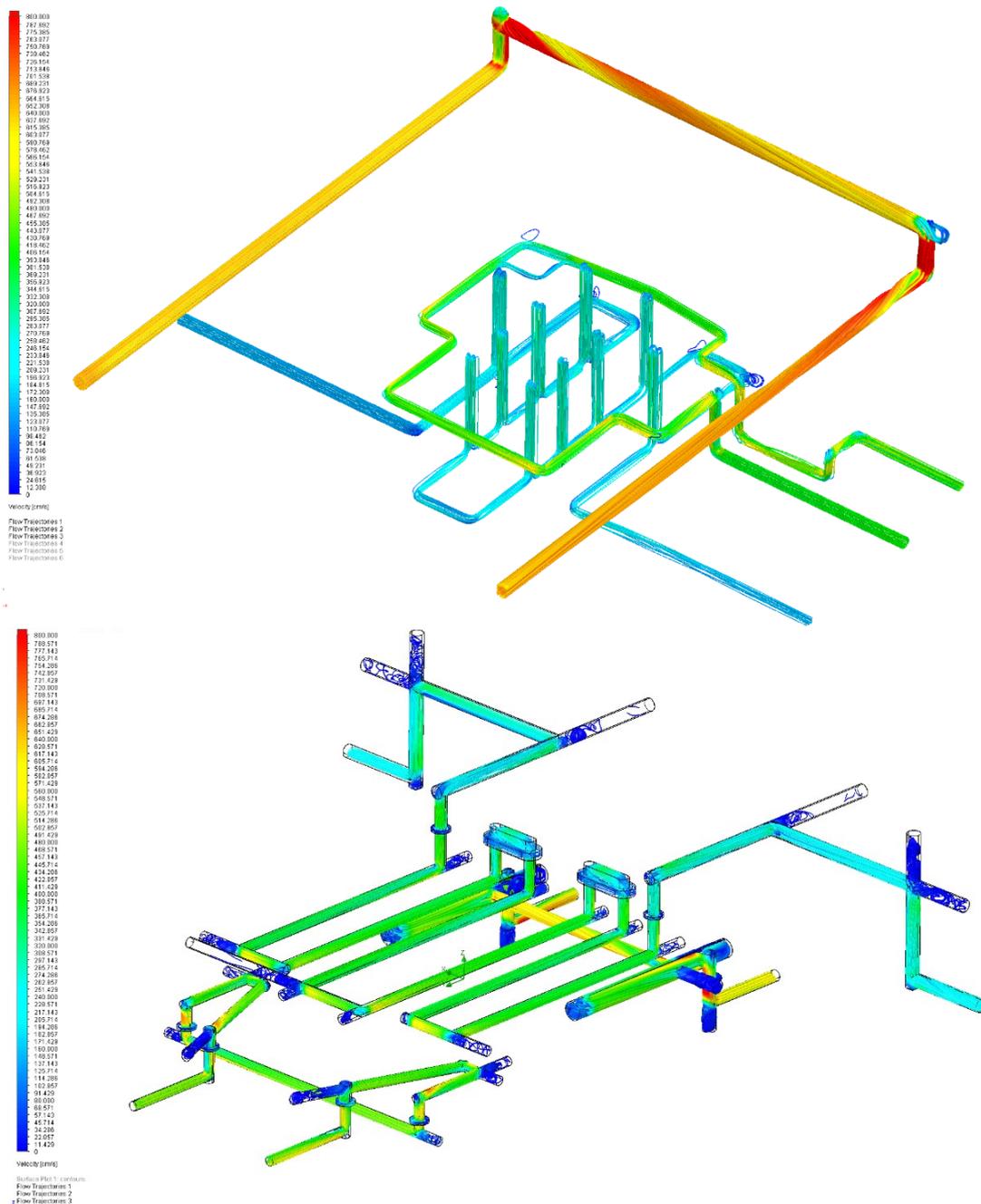


Figura 44 – Grafico delle velocità nei canali 1,2,3 in alto, canali 4,5,6 in basso

Una volta ricavati i valori di velocità dall'osservazione visiva e funzione di ispezione (Probe), si procede al calcolo delle portate, svolto qui in Excel per comodità: in base ai diametri dei canali all'uscita, è necessario unire le informazioni di velocità e area della sezione per ottenere la portata approssimata per ogni tubo di flusso. I dati sono mostrati in Figura 45.

CANALI CONVENZIONALI originali						
Diametri uscita canali			Velocità di uscita con 3 bar			
CH1	9	mm	680	cm/s		
CH2	7	mm	160	cm/s		
CH3	7	mm	440	cm/s		
CH4	6	mm	610	cm/s		
CH5	5	mm	525	cm/s		
CH6	7	mm	250	cm/s		
Area sezioni di uscita			CALCOLO portate max (approx)			
	0,63585	cm ²	432	cm ³ /s	25,9	dm ³ /min
	0,38465	cm ²	62	cm ³ /s	3,7	dm ³ /min
	0,38465	cm ²	169	cm ³ /s	10,2	dm ³ /min
	0,2826	cm ²	172	cm ³ /s	10,3	dm ³ /min
	0,19625	cm ²	103	cm ³ /s	6,2	dm ³ /min
	0,38465	cm ²	96	cm ³ /s	5,8	dm ³ /min

Figura 45 – Tabelle dei diametri e delle aree dei canali, insieme alle velocità e alle portate ottenute dalla simulazione di flusso in SolidWorks

Questi valori di portata rappresentano solo un'indicazione di massima per la comprensione delle grandezze in gioco, dal momento che una pressione di ingresso non è di comoda interpretazione, ma sono altrettanto utili per prove di simulazione.

A causa della diversità dei programmi di simulazione testati in questo lavoro di tesi, per quanto riguarda Solidworks e Moldex3D è stato possibile usare direttamente la pressione di ingresso nei canali durante il setup delle varie simulazioni; ma nel caso di VISI Flow ciò non è stato possibile.

Piuttosto, in questo caso il programma Visi Flow suggerisce in automatico delle portate minime da poter studiare nel nostro modello di canali, e questi valori sono stati usati per altri set di simulazioni di prova con risultati a sé stanti.

La Figura 46 riporta la finestra di setup dove il software permette il calcolo approssimato di portata d'acqua per un certo periodo di tempo fissato per il raffreddamento; nella stessa immagine, a lato, sono stati raccolti i valori di portata per tutti i canali restanti, in base al calcolo automatico per un tempo di raffreddamento di 32 secondi.

Questi valori di portate sono stati studiati come approccio preliminare e successivamente trascurati dal momento che i valori stessi sono troppo lontani da quelli effettivi di riferimento, se non che un'ulteriore conferma della loro lontananza rispetto ai dati di progetto Techno, deriva dall'osservazione del numero di Reynolds risultante sui canali; questa fase qui omessa mostra essenzialmente portate troppo basse per alcuni canali che non possono corrispondere alle portate reali. Pertanto si farà fede ai soli risultati di portata volumetrica ricavata

Nome circuito	Ch2
Portata fluido	3.11
Temperatura fluido	60
Codice fluido	WATER
Nome circuito	Ch3
Portata fluido	1.74
Temperatura fluido	60
Codice fluido	WATER
Nome circuito	Ch4
Portata fluido	0.53
Temperatura fluido	60
Codice fluido	WATER
Nome circuito	Ch5
Portata fluido	0.34
Temperatura fluido	60
Codice fluido	WATER
Nome circuito	Ch6
Portata fluido	1.89
Temperatura fluido	60
Codice fluido	WATER

Figura 46 – Portate di acqua suggerite da Visi Flow durante il Setup delle simulazioni di raffreddamento

Per gli altri programmi di calcolo invece, si opererà con le pressioni di ingresso.

4.9. Semplificazioni modello CAD

L'intero modello di simulazione composto da scatola in plastica e canali di raffreddamento originali è stato inizialmente sottoposto a controllo solido/geometrico e verifiche di integrità, mostrando numerosi errori gravi dovuti spesso alla manipolazione cad e presunti eventi di conversione o esportazione files. A volte, le operazioni di pre e post processing eseguite sui file da software di modellazione differenti (parametrici o non), possono generare errori di ricostruzione, superfici infinitesime, bordi disconnessi e altri difetti.

Il pezzo da produrre presenta notevoli 'features' parecchio ostili ai classici software di modellazione, soprattutto nei casi in cui alcune geometrie sono corrotte o non connesse. Non è raro infatti imbattersi in corpi unici che in realtà non sono effettivamente dei solidi connessi, oppure raccordi mal sagomati di ardua manipolazione.

Al fine di evitare interferenze nel processo di calcolo sono state apportate delle lievi modifiche alla parte scatolare e ai canali di raffreddamento. Lo strumento sperimentato per queste operazioni è stato Ansys Space Claim, ovvero il modellatore cad parametrico a oggetti che è dotato di molte funzioni semiautomatiche per la correzione e la riparazione di file cad (nonché stl per altre applicazioni). In particolare alcuni raccordi, anche quelli nascosti, sono stati riempiti e le filettature laterali sono state eliminate, Figura 47.

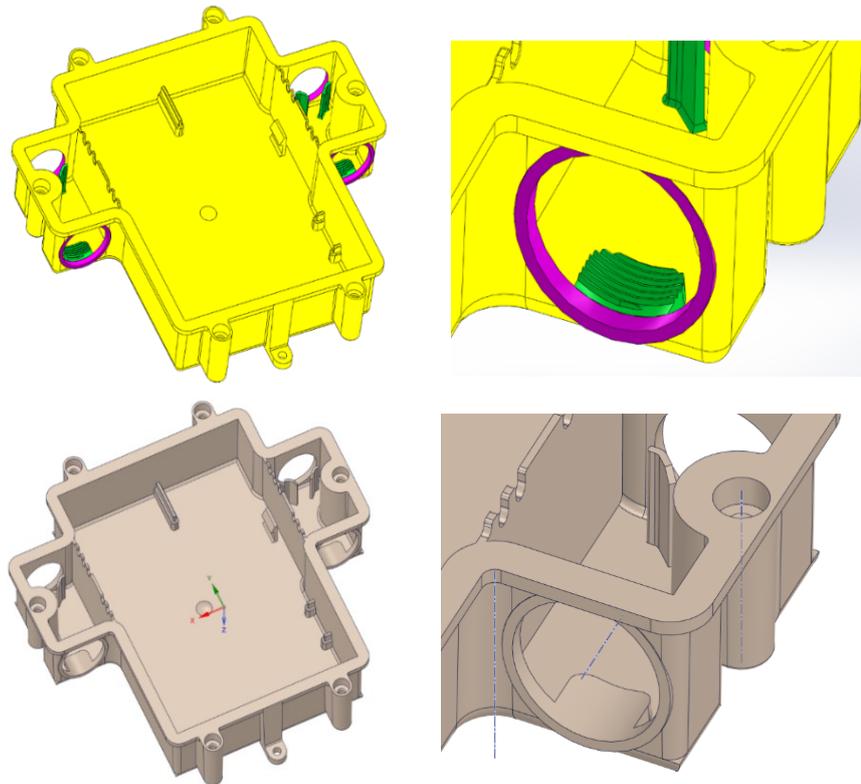


Figura 47 – Modifiche al pezzo Scatola, confronto prima e dopo

Agli stessi canali di raffreddamento è stato necessario apportare delle correzioni automatiche per alcuni bordi, e eliminare le incisioni di testo nelle zone esterne dei connettori semplificando la superficie di riferimento per ingressi e uscite del fluido. (a tal scopo è stato possibile utilizzare il file cad dei canali senza riferimenti direzionali per il fluido refrigerante)

I baffles deviatori di flusso, a geometria solida, inseriti nel layout di raffreddamento sono stati realizzati via CAD per taglio estruso all'interno della geometria fornita, così da rendere più verosimile il percorso del fluido refrigerante (assunto pura acqua).

La parte di solido mancante al centro di questi oggetti rappresenta effettivamente la lama inserita nel foro cilindrico atta a deviare la traiettoria del fluido refrigerante. L'esempio di Figura 48 mostra gli effetti di questa modellazione a taglio per uno dei canali, mentre la Figura 49 presenta i due canali con tutti i baffles ivi inseriti.

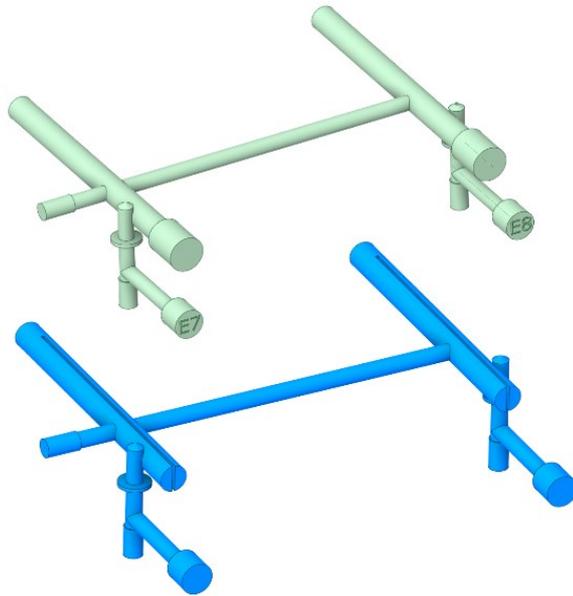


Figura 48 – Baffles a confronto, prima e dopo il taglio

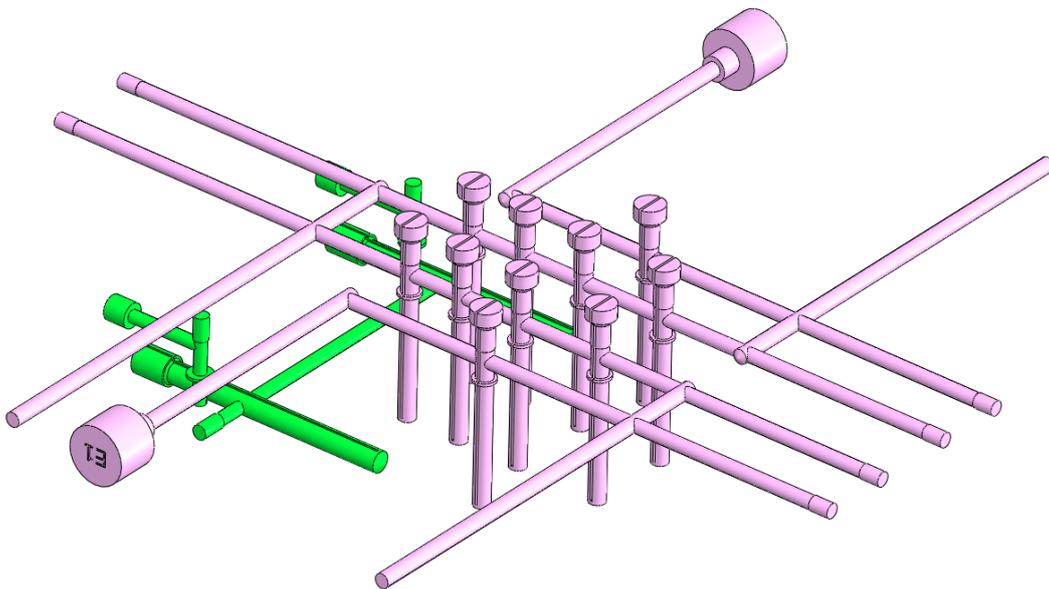


Figura 49 – Vista di tutti i baffles intagliati nella mezzeria per definire il percorso di flusso

4.10. Stampo virtuale

Così come sono state ricavate le dimensioni reali dello stampo, da file CAD step, equivalentemente sono state impostate tali dimensioni globali per uno stampo virtuale di massima, Figura 50.

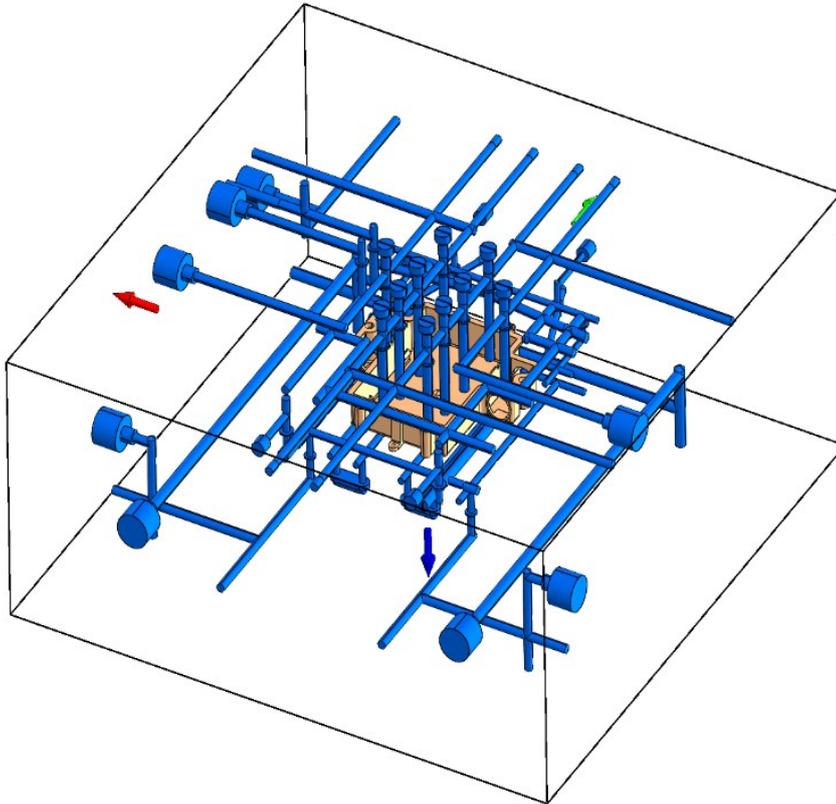


Figura 50 – Modello di stampo virtuale adoperato nelle simulazioni, dimensioni 500x500x220 mm

Le dimensioni limite di questo stampo devono essere sufficienti a contenere tutte i corpi solidi interni, in sicurezza; per questo motivo l'estensione nelle tre direzioni dello stampo virtuale sono state scelte pari a 500x500x220mm.

Generalmente non si è fortemente interessati ad avere misure precise dello stampo virtuale poiché quasi sempre solo una modesta porzione centrale di esso influisce direttamente sulle prestazioni di un ciclo di stampaggio; per questa applicazione a singola impronta, la realtà dei fatti prevede una serie di piastre e inserti con superfici di separazione all'interfaccia le quali rallentano la conduzione di calore negli oggetti adiacenti, seppur in piccola parte. Dunque, è bene ricordare che a causa di questa condizione, uno stampo unico semplificato darà sempre risultati di simulazione migliori rispetto al modello di riferimento reale.

5. ANALISI CON CANALI CONVENZIONALI

La ricerca svolta per questo progetto vede coinvolti essenzialmente 3 software di simulazione che a confronto tra loro hanno guidato l'attenzione verso i risultati più attendibili e verosimili. È bene ricordare che l'obiettivo del lavoro di tesi non è ottimizzare o studiare i parametri di processo riguardanti iniezione e mantenimento, quanto piuttosto quelli di raffreddamento, tramite l'esplorazione dei programmi di simulazione, mettendone quindi in luce pregi e difetti, con particolare attenzione ai limiti affrontati. Le fasi di simulazioni di riempimento e mantenimento sono state ugualmente sviluppate poiché necessarie per ottenere le condizioni di partenza per l'analisi di raffreddamento; seppur saranno mostrate in sintesi esse sono fondamentali per una corretta stima dei flussi termici e delle temperature in gioco.

Bisogna inoltre ricordare che i tre software sperimentati presentano interfacce differenti, nonché parametri di input / output diversi con le relative limitazioni del caso; ciononostante il lungo percorso di studio e test è stato necessario per comprendere gli scenari possibili. In questo capitolo saranno presentati i principali risultati delle varie simulazioni, nel modo più sintetico e completo possibile, ommettendo perciò i molteplici test errati o incompleti che lentamente hanno portato alla definizione del modello di simulazione finale

5.1. Simulazione in SolidWorks

A partire dalla precedente esperienza di tirocinio maturata con il tutor Ahmed, il programma SolidWorks, con in particolare il modulo Plastics, si è rivelato essere un ottimo strumento di analisi preliminare per vari motivi tra cui citiamo:

- Semplicità di utilizzo e pulizia delle interfacce grafiche;
- Risultati di simulazione abbastanza ampi e completi per un primo approccio al problema, soprattutto per individuazione delle zone calde, dei canali di raffreddamento ecc
- Integrazione con cad di base (SolidWorks stesso) con cui è agevole cambiare oggetti e layout di canali nello stesso part file tramite configurazioni opportune e la possibilità di testare solidi di raffreddamento anche complessi conformati;
- Simulazioni di raffreddamento robuste e relativamente coerenti rispetto alle grandezze termiche in gioco con comoda distinzione e separazione fra le simulazioni a tempo di raffreddamento fisso e in base alla temperatura di estrazione.

Di contro però, ci si imbatte in alcuni limiti insormontabili, quali:

- Alterazione del tempo di riempimento quando si utilizzano profili di riempimento e quindi il tempo aggiornato non risulta sufficiente a riempire la cavità, pertanto viene automaticamente esteso a priori;
- Assenza grafica dei dati di output relativi al numero di Reynolds nei canali;
- Impossibilità di specificare la percentuale del pezzo che raggiunge la temperatura di estrazione, o meglio, il tempo di raffreddamento previsto è determinato quando il 90% della temperatura della parte è inferiore alla temperatura di espulsione del materiale; ciò significa che non è possibile avere un tempo di raffreddamento che riguarda il 100% della distribuzione di temperatura della parte

che giunge alla temperatura di estrazione prestabilita. Seppur questa condizione rappresenti in teoria una pratica comune accettabile, spesso come in questo caso le prove sperimentali comunicano necessità diverse per questo materiale e questo pezzo.

5.1.1. Setup e ipotesi di lavoro

Come da Figura 51, l'interfaccia di lavoro mostra in sequenza varie voci a partire dal tipo di simulazione che si vuole avviare, quella completa comprende in sequenza le fasi COOL+Riempimento-Mantenimento+WARP. In prima battuta devono essere definite le proprietà dei vari domini cad presenti, cioè Cavità, sistema di runner, canali di raffreddamento e stampo virtuale.

Si procede poi con le condizioni al contorno, ossia punto di iniezione, temperatura del runner caldo

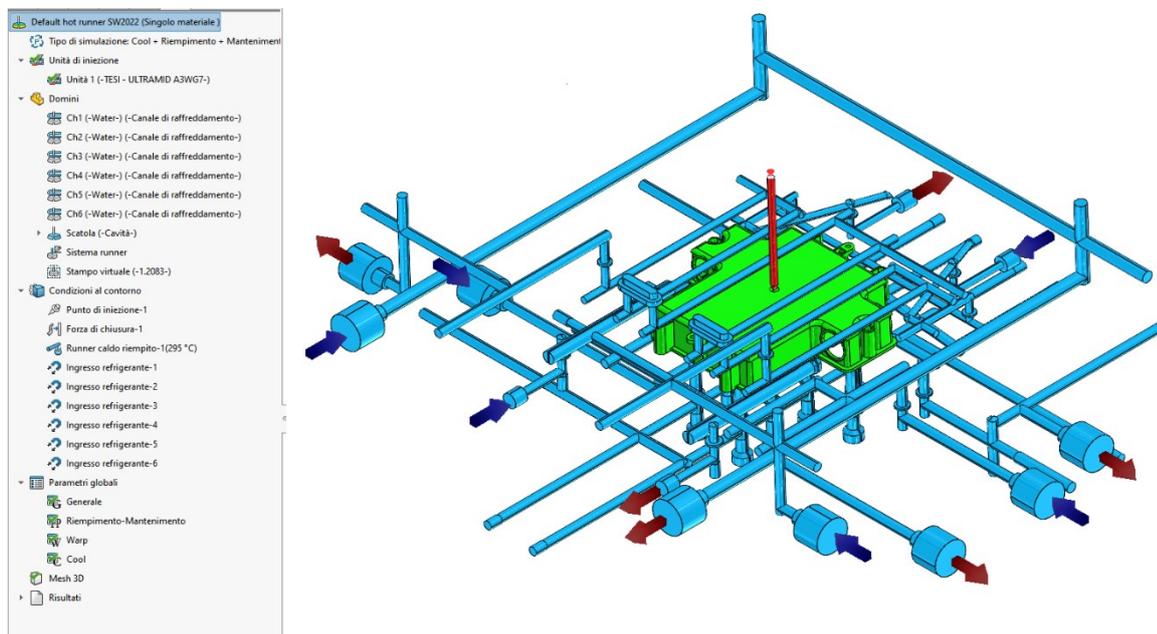


Figura 51 – Finestra di lavoro per il modulo SolidWorks Plastics 2022

riempito, direzione della forza di chiusura e valori di ingresso per il fluido refrigerante: per quest'ultima operazione in particolare è possibile specificare una pressione di ingresso piuttosto che le portate, pertanto il programma calcolerà un volume di liquido che attraversa i canali per un certo valore di pressione di input e i vettori velocità. Saltando la presentazione della finestra di setup per ogni singolo condotto, si rammenta che i dati da specificare sono:

- 1) Superfici di ingresso e uscita del fluido
- 2) Pressione di alimentazione canale
- 3) Temperatura di ammissione del fluido refrigerante, definita a 60°C (differenza di 20 gradi rispetto allo stampo ad 80°C)

Le fasi del setup relative ai parametri di riempimento e mantenimento sono state riportate in Figura 52.

Il tempo di riempimento può avere un effetto significativo sulla maggior parte dei risultati generati da una simulazione. Ad esempio, un tempo più lungo può ridurre le pressioni di iniezione, le velocità e le sollecitazioni di taglio, mentre un tempo più breve può aumentarle.

incremento di 0,2s su un'iniezione rapida di 0,7s, ma questo tempo molto ristretto rende difficile l'interpretazione corretta del profilo di portata.

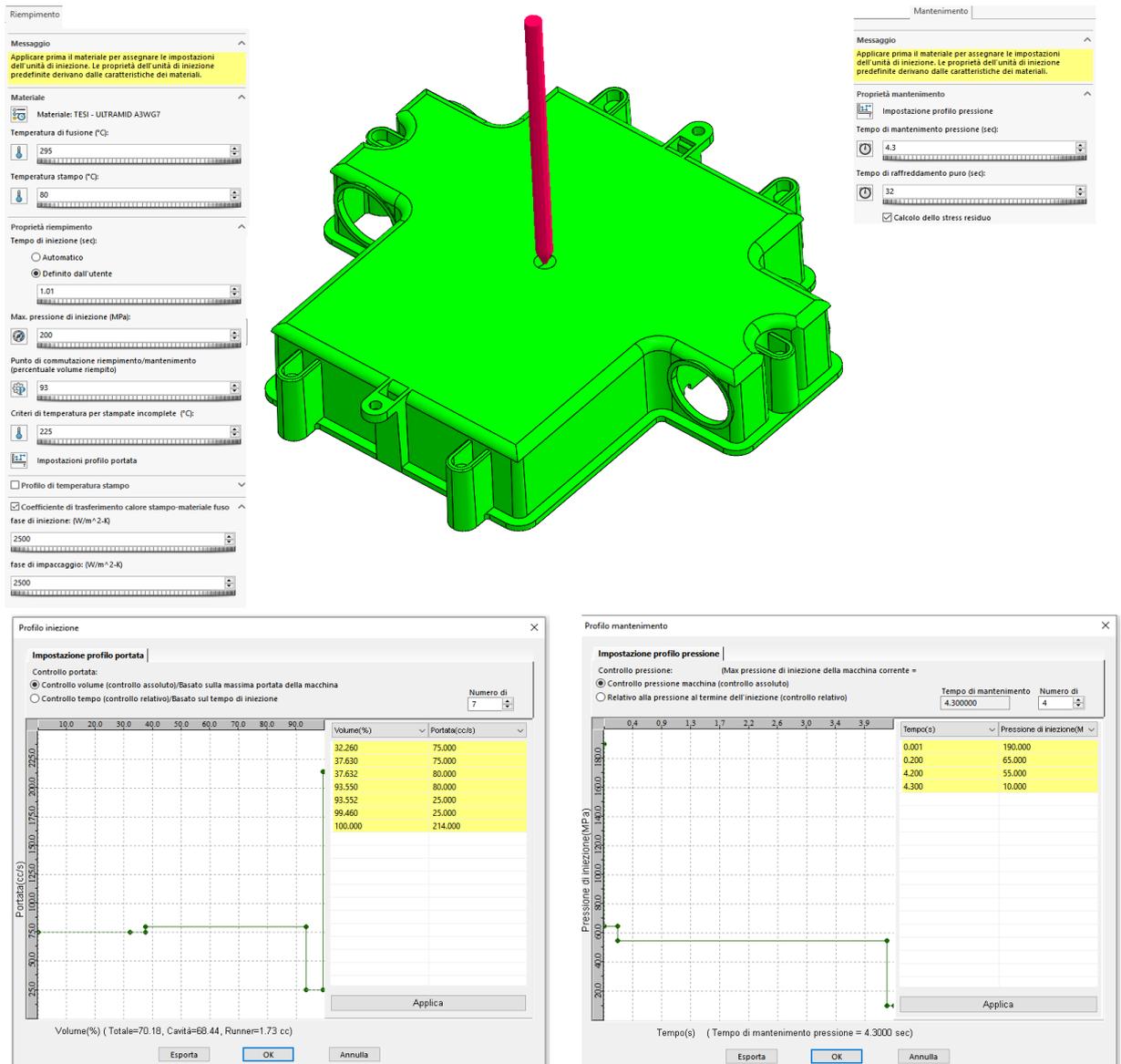


Figura 52 – Setup per la fase di riempimento e mantenimento, in alto, con rispettivi profili come da scheda stampaggio

In aggiunta, riguardo al tempo di riempimento, le simulazioni che hanno restituito valori superiori all'unità sono state omessi in questa trattazione.

Mentre, per le prove più corrette, il software in automatico riporta un lieve incremento fino a 0.9s: questa discrepanza può essere dovuta a molti fattori come le approssimazioni di mesh, i parametri di input di pressione macchina o temperatura della massa fusa, ecc... In ogni caso si tratta di un intervallo di tempo troppo piccolo per essere correttamente apprezzato; pertanto non consideriamo tale aspetto come rilevante non essendo interessati all'ottimizzazione dei parametri di processo.

Infine, sono noti i dati del materiale utilizzato da Solidworks, dove la Figura 53 riporta il grafico della viscosità e il volume specifico del polimero.

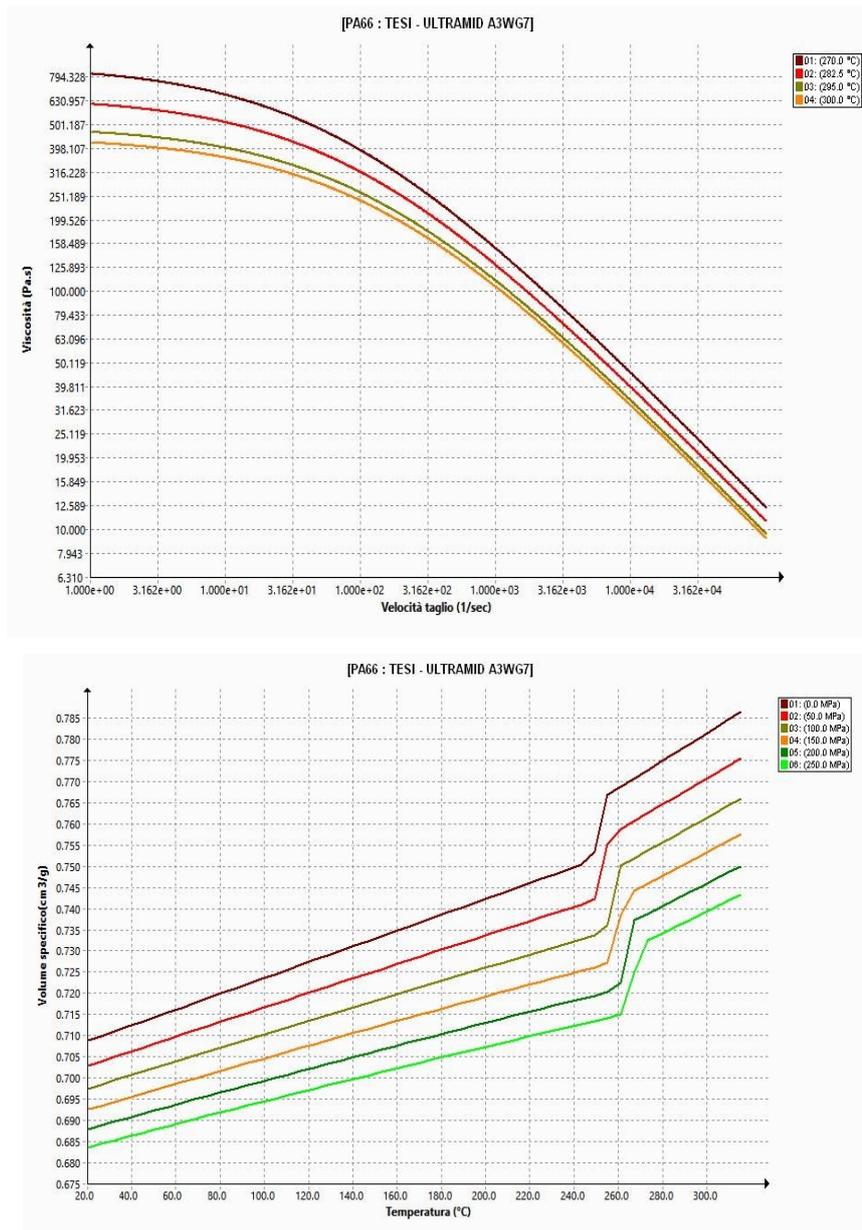


Figura 53 – Curva del materiale PA66 A3WG7: grafico della viscosità, in alto, volume specifico, in basso

5.1.1. Riempimento e mantenimento

Il grafico del tempo di riempimento in Figura 54 mostra il profilo della plastica fusa che scorre attraverso la cavità della parte dello stampo durante la fase di riempimento del processo di stampaggio a iniezione. Le aree blu indicano l'avvio o l'inizio del fronte di flusso. Le aree rosse invece indicano solitamente la posizione del fronte di flusso in un determinato intervallo di tempo durante un'animazione della fase di riempimento. Per errate simulazioni ci si può anche aspettare una stampata incompleta dove appunto in

questa situazione le aree rosse rappresentano la fine del riempimento all'arrestarsi del flusso in seguito a un'iniezione corta. Il massimo tempo di riempimento raggiunge dunque 0,9s, come anticipato.

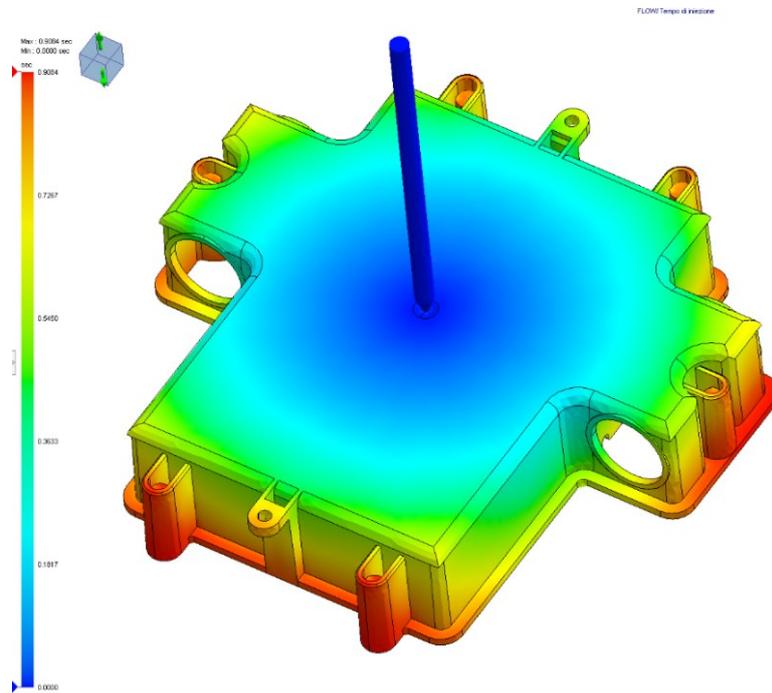


Figura 54 – Tempo di iniezione

È possibile riempire questa parte con una pressione di iniezione di 65.0 MPa (Figura 55). La pressione di iniezione richiesta per l'iniezione è inferiore del 66% al limite di pressione massima specificato per questa analisi, a significare che si è molto al di sotto del limite specificato (max 200 MPa).

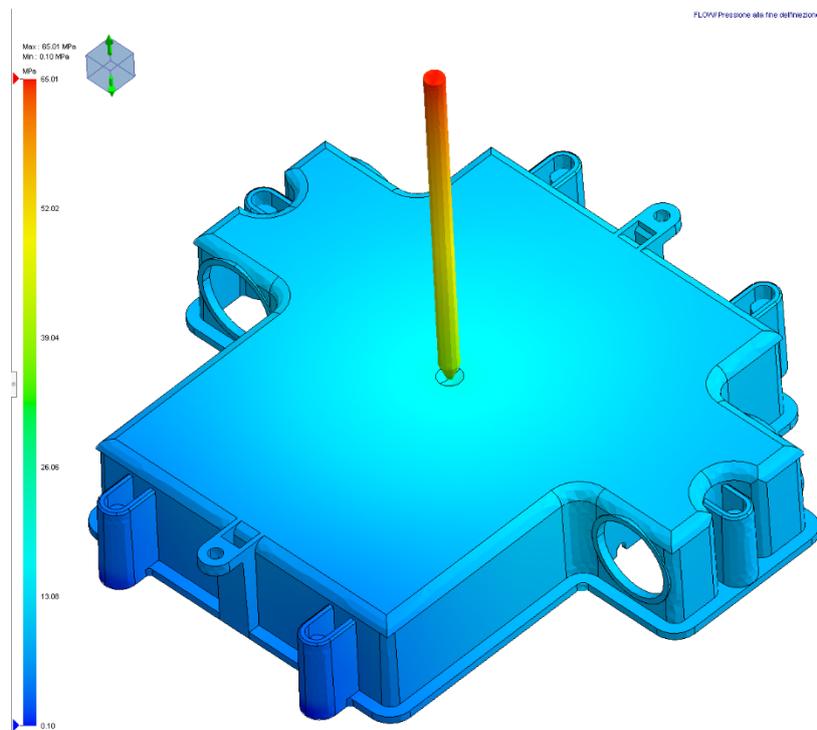


Figura 55 – Pressione alla fine dell'iniezione

140 MPa è il limite di pressione di iniezione massimo per la maggior parte delle macchine di stampaggio a iniezione in commercio; è opportuno ricordare che lungo l'intera macchina di stampaggio a iniezione si verificano delle perdite di pressione, ad esempio attraverso ugello, materozza, runner e gate, che provocano un aumento dei requisiti complessivi di pressione di iniezione.

Poiché il limite di pressione di iniezione massimo è maggiore di 20.000 psi (~ 140 MPa), questo viene in genere considerato un processo di stampaggio ad alta pressione che può richiedere una combinazione speciale di vite e barile o una macchina per lo stampaggio a iniezione ad alta pressione.

La massa fusa scorre all'interno di un canale caldo, attraversa un gate a 1,4mm e infine scorre in cavità: il percorso di flusso genera attriti e sforzi di taglio con conseguente aumento di temperatura; la Figura 56 riporta la mappa di temperatura relativa al fronte di flusso, per la fase di riempimento. Temperatura massima raggiunta di circa 302°C.

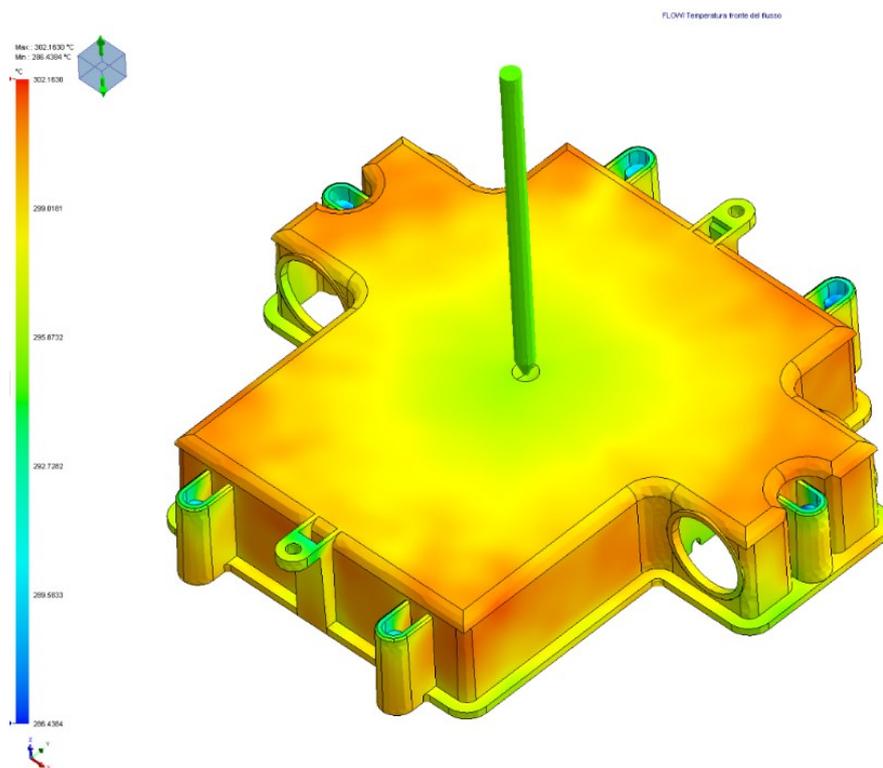


Figura 56 – Temperatura del fronte di flusso

La temperatura minima del fronte di iniezione è inferiore alla temperatura di fusione iniziale di oltre 10° C. Un effetto di raffreddamento può provocare problemi di iniezione e impaccaggio, può far aumentare i requisiti di pressione dell'iniezione, provocare una scarsa integrità e un aspetto insoddisfacente della linea di saldatura e avere un effetto negativo sulle proprietà complessive della parte stampata.

La temperatura di fusione del fronte di iniezione è compresa nell'intervallo di +/- 10° C accettabile rispetto alla temperatura di fusione iniziale. Questo aiuta a ottenere iniezione e impaccaggio di buona qualità, a ridurre al minimo i requisiti di pressione dell'iniezione, a ottenere integrità e aspetto della linea di saldatura di buon livello e a ottimizzare le proprietà della parte prodotta.

Il tempo di mantenimento stabilito per questa parte è di 4,3s; il profilo di pressione caricato nel programma di calcolo rispecchia i punti noti così come da scheda stampaggio. La Figura 57 mostra la temperatura alla fine dell'impaccaggio, dove il componente ha repentinamente abbassato la sua

temperatura superficiale esterna, ma ci si aspetta che al di sotto della 'pelle' vi sia ancora la massa fusa ad alta temperatura.

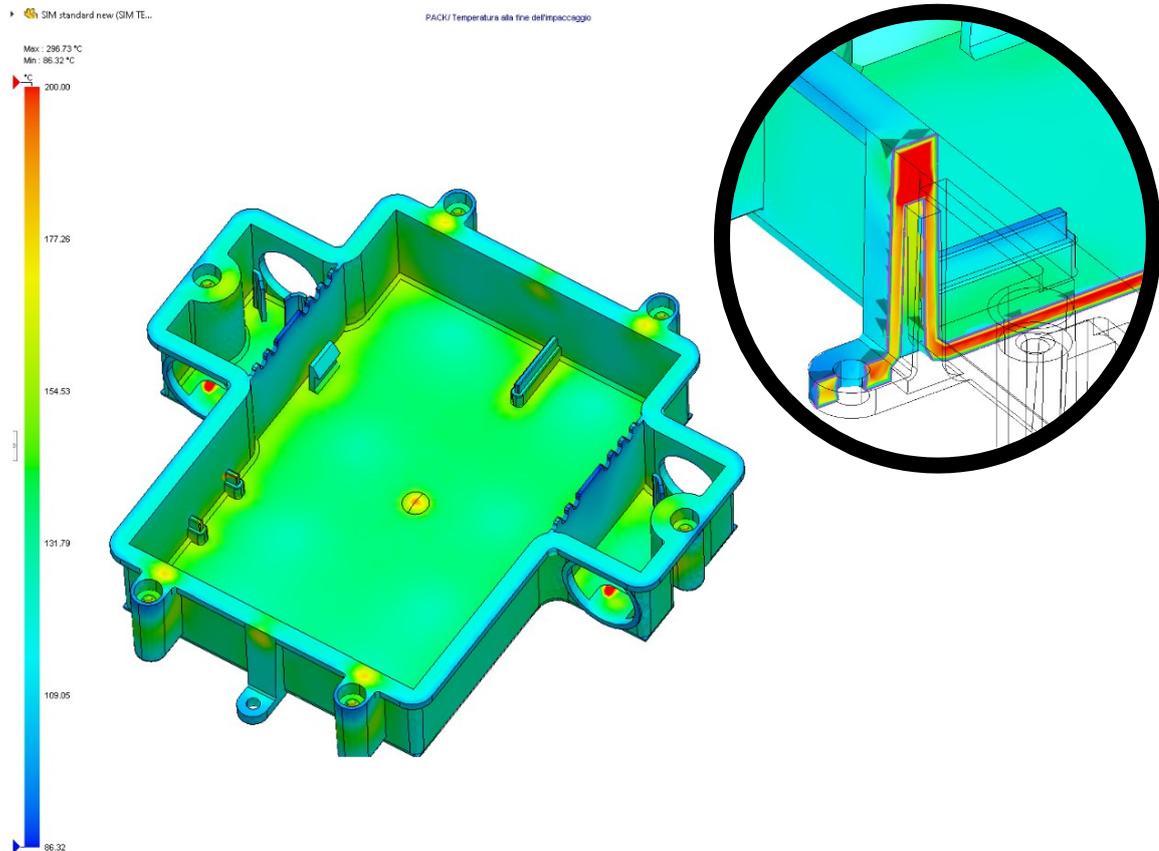


Figura 57 – Temperatura alla fine dell'impaccaggio, a sinistra con vista ritagliata dell'effetto pelle, a destra

Il volume del nucleo risulta però ancora fuso, in prossimità della temperatura di transizione vetrosa del materiale o della temperatura di fusione. Nelle aree che presentano elevate temperature interne alla fine dell'impaccaggio si possono generare avvallamenti superficiali o vuoti interni.

Il ritiro volumetrico è generalmente stimato nell'ordine del 2-3% massimo, ma i valori estremi toccano anche il 75 negli hotspot nascosti dei fori lungo il contorno del pezzo, Figura 58.

Le pressioni di impaccaggio comprese tra il 50 e l'80% della pressione di iniezione massima generalmente sono richieste per ridurre i difetti di post-stampaggio della parte. Considerando la massima pressione di iniezione di, 125 MPa, come picco finale del riempimento, si vuole ricordare come il profilo di pressione per il mantenimento si aggira correttamente intorno ai 65-55 MPa per la maggior parte del tempo.

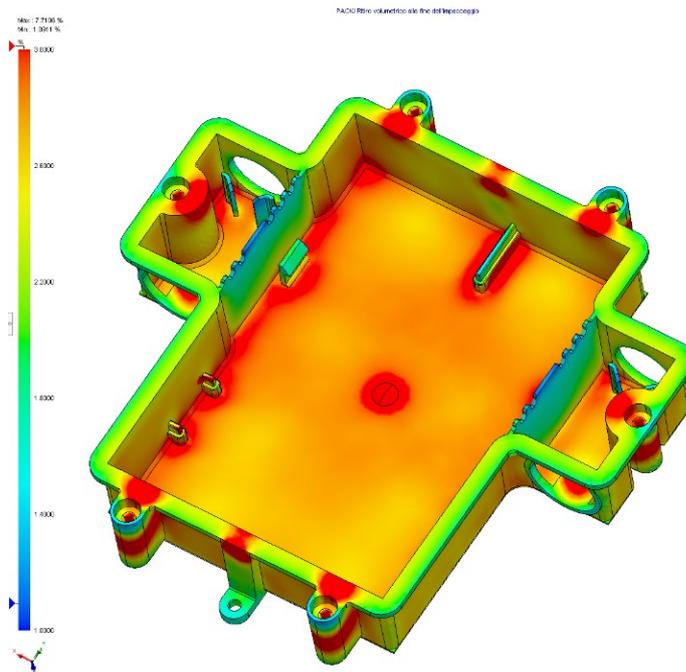


Figura 58 – Ritiro volumetrico percentuale

5.1.2. Pre-Analisi di raffreddamento

In generale, durante le analisi del raffreddamento, è necessario prendere in considerazione 2 fattori principali:

- Il mantenimento di un tempo di raffreddamento uniforme su tutta la superficie della geometria della parte in plastica.
- Il mantenimento di una temperatura uniforme attraverso il nucleo e le superfici delle cavità dello stampo.

Per quanto riguarda la geometria della parte di plastica, tempi di raffreddamento uniformi su tutta la superficie della parte determinano una distribuzione più regolare della sollecitazione dello stampo e del ritiro volumetrico. Tutti questi fattori insieme determinano una parte stampata che si deformerà meno facilmente a causa del raffreddamento, della sollecitazione di taglio o del ritiro irregolare. Per quanto riguarda lo stampo stesso, generalmente è consigliabile ottenere distribuzioni di temperatura uniformi sulle superfici dei nuclei e delle cavità dello stampo. Poiché si presuppone che la parte stampata abbia uno spessore uniforme delle pareti, temperature uniformi delle superfici dello stampo favoriscono tempi di raffreddamento uniformi sulla superficie della parte, generando una parte che si deformerà meno facilmente.

I due fattori che influiscono sul tempo di raffreddamento sono la temperatura di fusione e la temperatura dello stampo. Aumentando una delle due temperature, generalmente si determina un aumento del tempo di raffreddamento. Le plastiche richiedono tempi di raffreddamento lunghi perché sono buoni isolanti con bassa conduttività termica. Il tempo di raffreddamento è proporzionale al quadrato dello spessore della parete della parte; raddoppiando lo spessore si quadruplica il tempo di raffreddamento. Per ridurre

i tempi di raffreddamento, è necessario uno spessore uniforme delle pareti della parte e il più sottile possibile.

L'analisi stessa di riempimento restituisce in anticipo una stima relativa al raffreddamento della parte, con valori cromatici descrittivi sia del tempo di raffreddamento, sia della temperatura alla fine del raffreddamento, Figura 59.

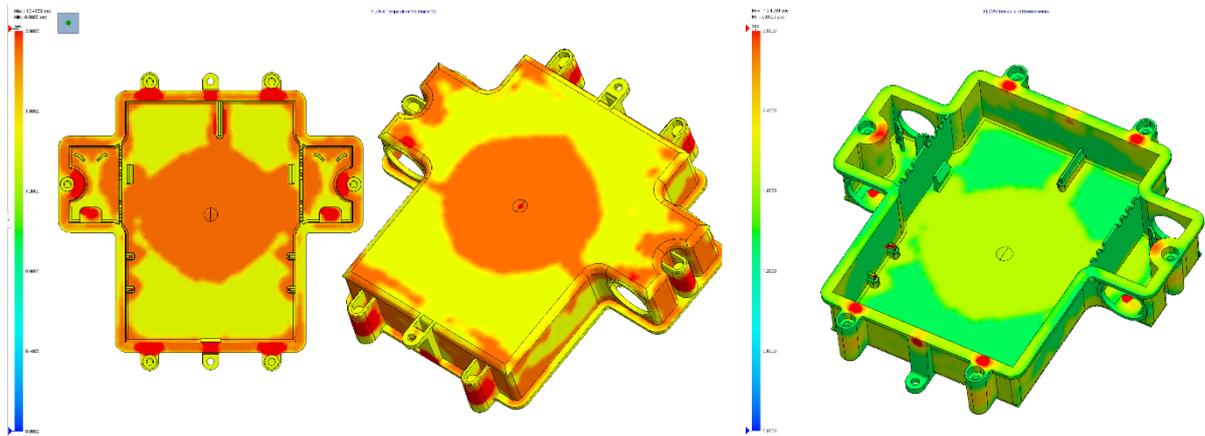


Figura 59 – Stima preliminare del tempo di raffreddamento dall'analisi di riempimento

Considerando la temperatura di estrazione del pezzo per cui il 90% minimo rispetta la soglia limite di 190°C, in Figura 59 a sinistra si vede come la maggior parte del pezzo ha un tempo di raffreddamento di circa 2-3 secondi, mentre la porzione restante necessita di periodi più lunghi a causa delle zone calde di materiale nelle aree a spessore maggiore; infatti sulla destra sono state messe in risalto le aree calde visibili (hotspot) con una scala temporale di massimo 3 secondi, pertanto le zone rosse necessitano di un tempo maggiore di 3s fino a un massimo di circa 13,4s stimato in via preliminare dall'analisi di riempimento.

I valori di temperatura massima e minima alla fine del raffreddamento sono contenuti nel range 80-261 °C, ma come si evince dalla Figura 60, solo le zone calde, di limitata estensione, restano a temperatura superiore a 190°C, richiesta per l'estrazione.

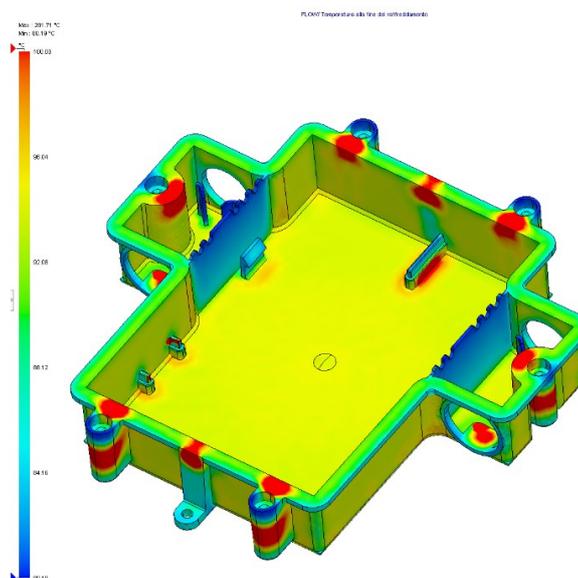


Figura 60 – Stima della temperatura alla fine del raffreddamento (dall'analisi di riempimento)

La fase di COOL lanciata per il modello di simulazione è un raffreddamento preliminare eseguito a monte delle fasi di iniezione e mantenimento; questa prassi è di uso comune affinché il riempimento possa tenere in considerazione il trasferimento di calore variabile del materiale dello stampo. Difatti eseguire una simulazione di COOL dovrebbe in teoria consentire di ottenere risultati più accurati

Inoltre, le strategie di calcolo del raffreddamento per il programma SolidWorks sono di due tipologie: valutare le proprietà del modello di raffreddamento per un certo intervallo di tempo fissato, oppure calcolare il tempo necessario per l'estrazione del pezzo in base alla sua temperatura di riferimento raggiunta nel 90% del pezzo.

Di seguito, saranno presentati in breve i resoconti delle due simulazioni e alcuni confronti.

5.1.3. Raffreddamento di tipo1

I risultati di simulazione relativi a un tempo di 32s saranno inseriti in questo paragrafo. Il calcolo di raffreddamento in SolidWorks si svolge, di base come un processo dove l'apporto termico per ogni canale viene calcolato separatamente per poi avviare un ciclo completo con tutti i domini di raffreddamento, contemporaneamente con le opportune iterazioni di calcolo numerico. Il tipo di simulazione previsto dal programma di calcolo FEM è definita iniezione plastica a fluido non-isotermo non-Newtoniano tridimensionale e il processo di raffreddamento è di tipo solido basato su un approccio transiente.

Dal momento che la simulazione di partenza prevede un tempo di raffreddamento fisso, ne consegue che la mappa temporale graficata sul componente non ha più significato, difatti dalla Figura 61, si osserva come il pezzo sia associato interamente a un unico valore temporale, che comprende 32s più l'aggiunta del tempo di apertura stampo, lasciato a 5s come da valori di default.

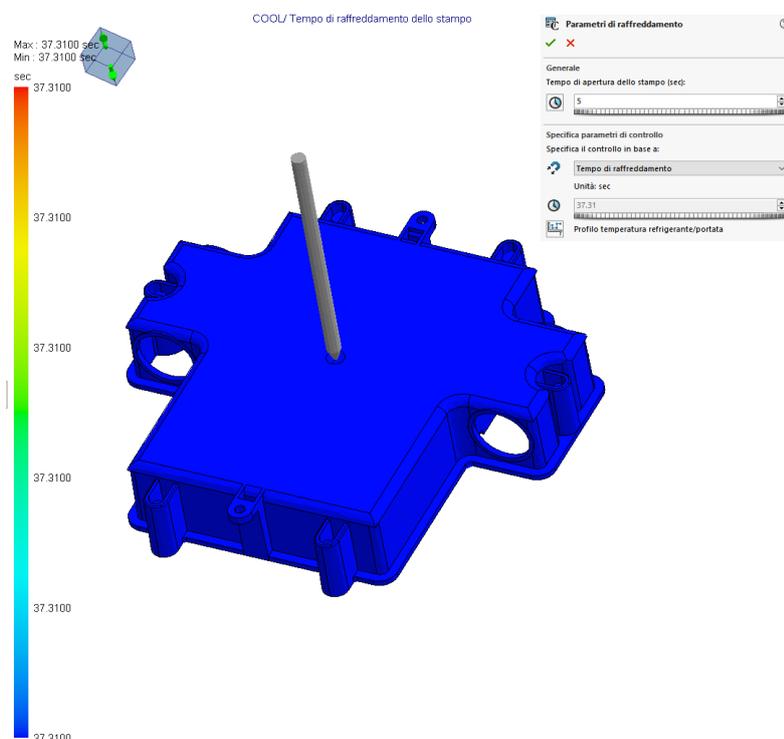


Figura 61 – Tempo di raffreddamento per la simulazione di base a 32s, mappa unica

Uno dei risultati interessanti riguarda la temperatura della parte alla fine del raffreddamento, Figura 62. Nonostante il valore massimo riportato di circa 294°C, l'immagine è stata impostata su un range di valutazione 43-80 °C per mettere in risalto le zone del pezzo a relativa bassa temperatura ed esaltare gli effetti dei canali di raffreddamento: dalla vista superiore di questa immagine si nota l'effetto dei baffles che deviano il fluido refrigerante e creano delle zone ovali/circolari iso-temperatura; similmente sul retro del pezzo, dalla vista posteriore si osservano le strisce longitudinali di mappatura termica dovute ai canali dritti che percorrono la superficie del pezzo.

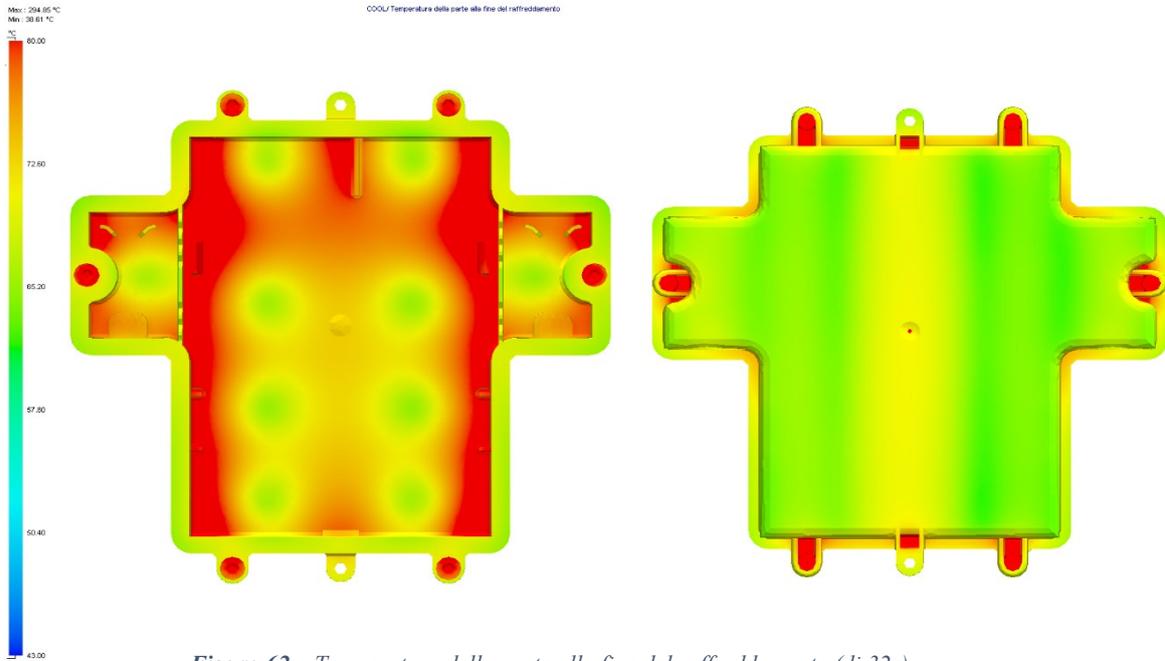


Figura 62 – Temperatura della parte alla fine del raffreddamento (di 32s)

D'altra parte, la mappa termica relativa ai valori superiori alla nostra temperatura di estrazione per la poliammide (190°C) è mostrata in Figura 63, dove sono stati evidenziati su alcune sezioni in colore

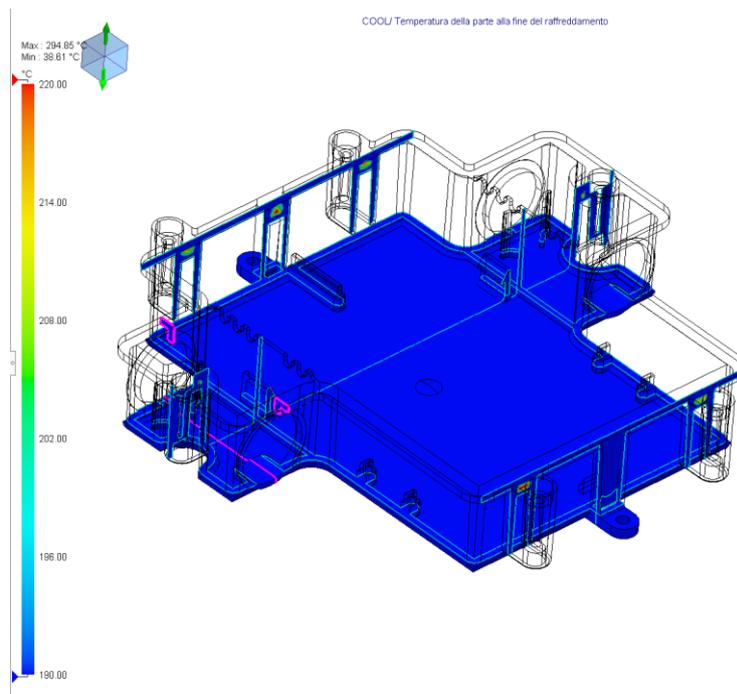


Figura 63 – Temperatura della parte alla fine del raffreddamento: vista in sezione per le zone calde nel range 190-230°C

rosso/arancio quelle parti ancora calde che rappresentano realmente gli hotspot problematici di questa applicazione. Dal momento che le temperature sembrano essere sufficientemente basse a livello globale, per la corretta estrazione del pezzo, si reputa corretto il valore prefissato di 32s.

La mappa termica relativa ai canali di raffreddamento (Figura 64), mostra un valore massimo intorno ai 64°C, valore più che accettabile per il passaggio dell'acqua durante il raffreddamento; la stessa figura è stata però impostata sul range 60-62°C per far risaltare in rosso le zone di maggior incremento di temperatura

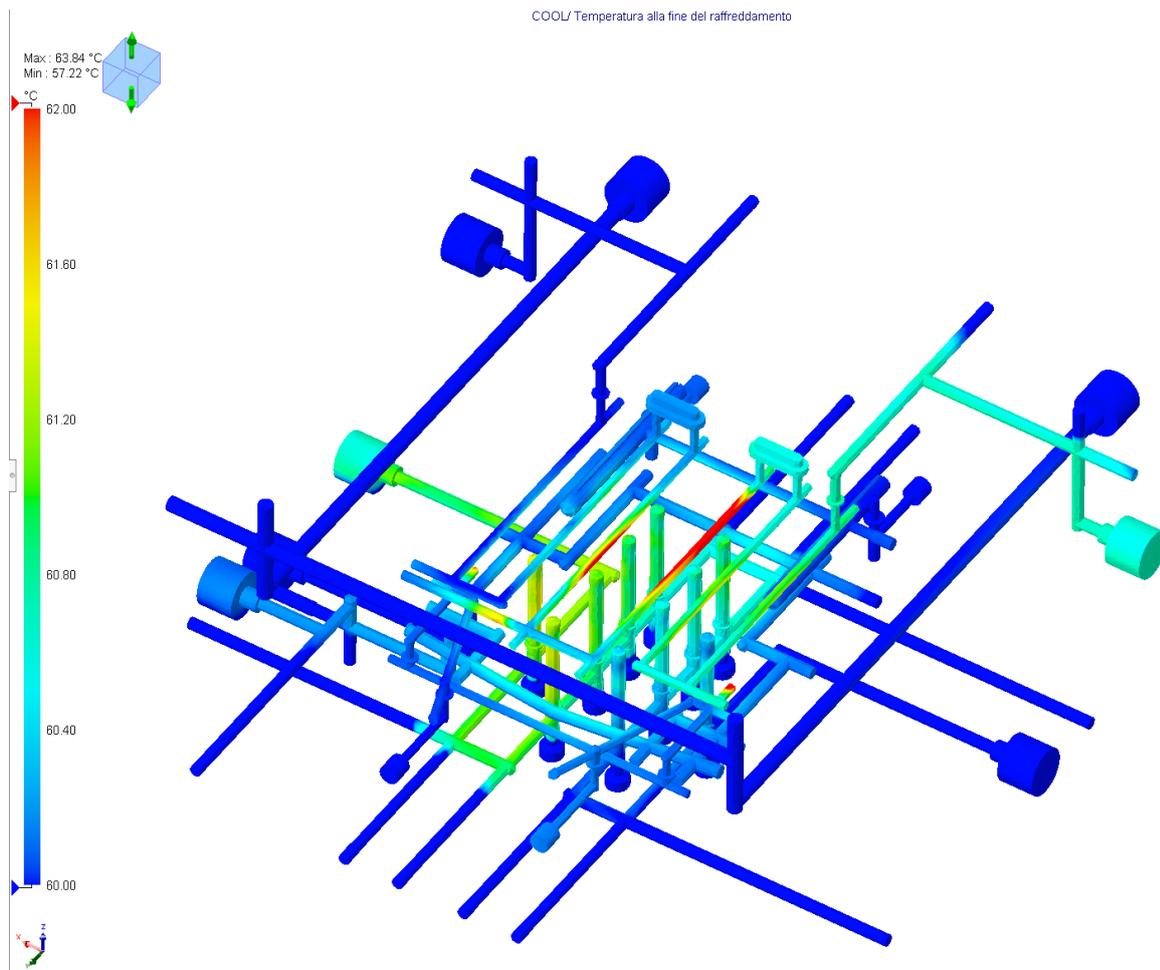


Figura 64 – Temperatura dei canali d'acqua per il raffreddamento di 32s

Infine, la simulazione di raffreddamento presenta come output anche i grafici in merito alle pressioni e alle velocità del fluido refrigerante, pertanto, è possibile confermare adesso quanto è stato ottenuto nella precedente analisi di flusso condotta nel modulo Flow Simulation.

La Figura 65 raccoglie quindi la mappa di pressione nei canali, e i vettori velocità. In questo test iniziale sono stati mantenuti i connettori di estremità dei canali, anche se non necessari, dal momento che SolidWorks riesce ad interpretare abbastanza bene le condizioni di flusso, senza errori particolari.

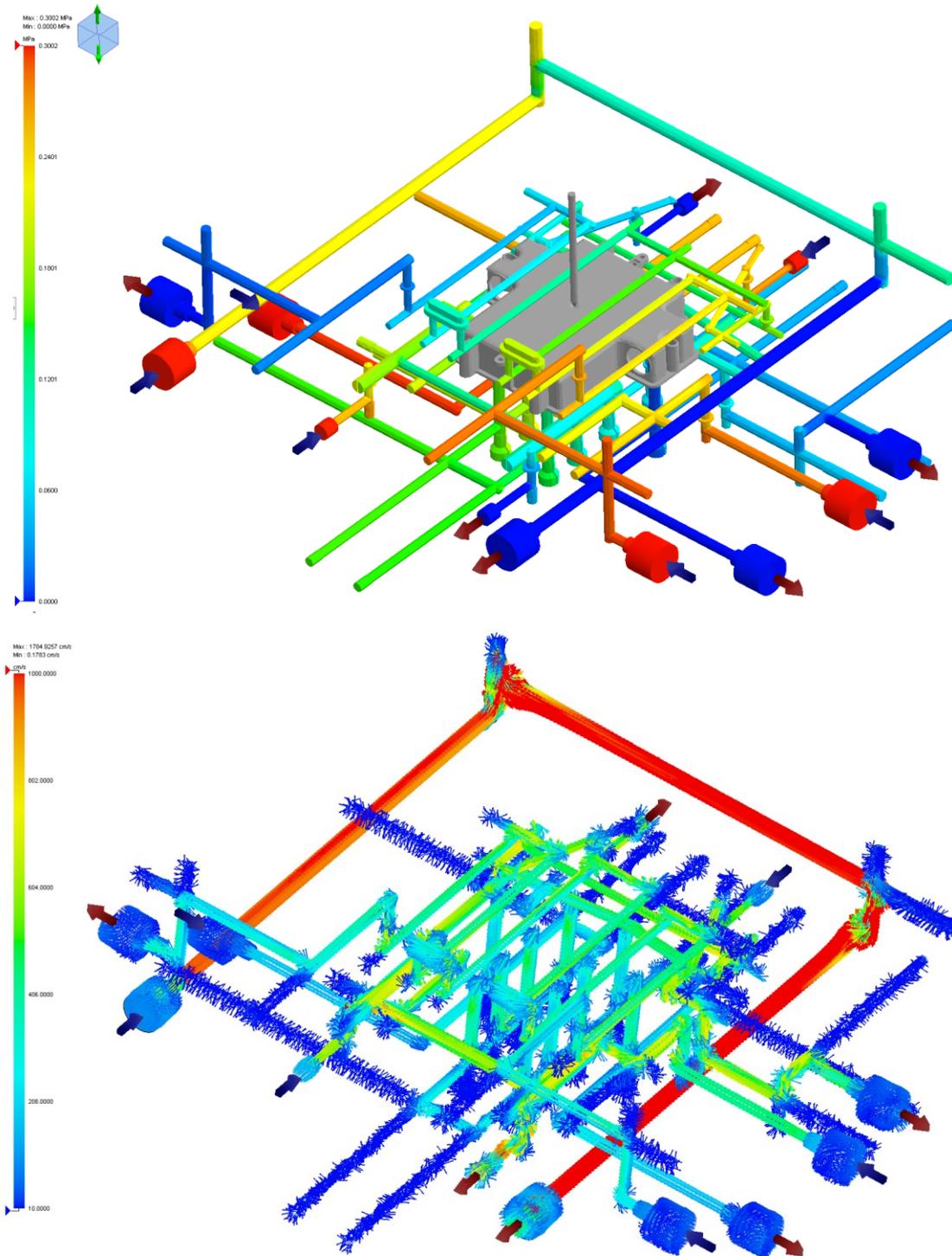


Figura 65 – Pressione (in alto) e vettori velocità (in basso) del fluido del sistema refrigerante

5.1.4. Raffreddamento di tipo 2

Come già anticipato, il processo di raffreddamento in SolidWorks segue una regola di base immutabile: il tempo di raffreddamento previsto è determinato quando il 90% della temperatura della parte è inferiore alla temperatura di espulsione del materiale. Con questo principio si ottiene la stima automatica del tempo di raffreddamento in base alla temperatura di estrazione, pari a 190°C.

Le analisi di raffreddamento propongono 10,5 secondi come tempo tecnico destinato all'abbassamento di temperatura per il 90% della parte. Gli hotspot nel pezzo sono limitati nell'intorno approssimato del 10-15% del pezzo, per questo motivo non si otterrà mai un raffreddamento uniforme e omogeneo dal momento che questo componente deve asportare molto più calore nelle zone calde, evidenziate nella sezione di Figura 66.

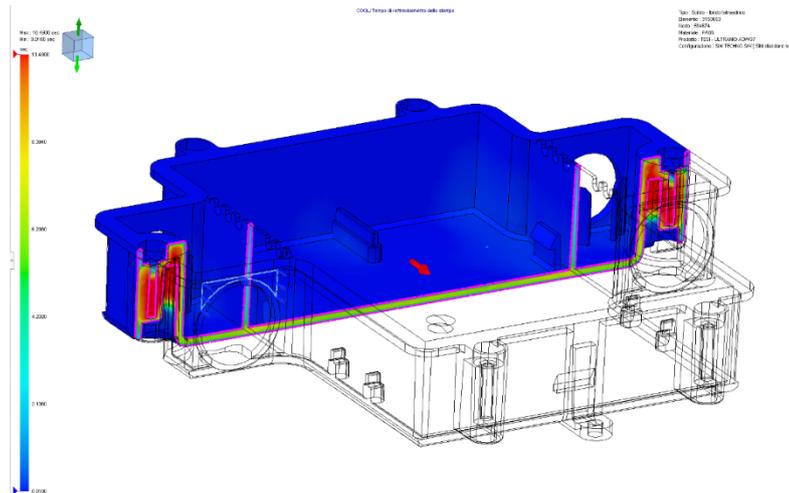


Figura 66 – Tempo di raffreddamento dello auto-determinato in base al raggiungimento della temperatura di estrazione di 190°C nel 90% della parte

Sebbene la maggior parte degli spessori è comunque contenuta intorno a 2mm, l'esistenza di zone ad alto accumulo di materiale testimoniano l'estrema variabilità delle porzioni a spessore maggiore, congiuntamente ai problemi di tempo che ne derivano per il consolidamento. Il grafico delle iso-linee connesse al tempo di raffreddamento in Figura 67, permette di osservare i famosi hotspot nella parte, ormai ampiamente confermati.

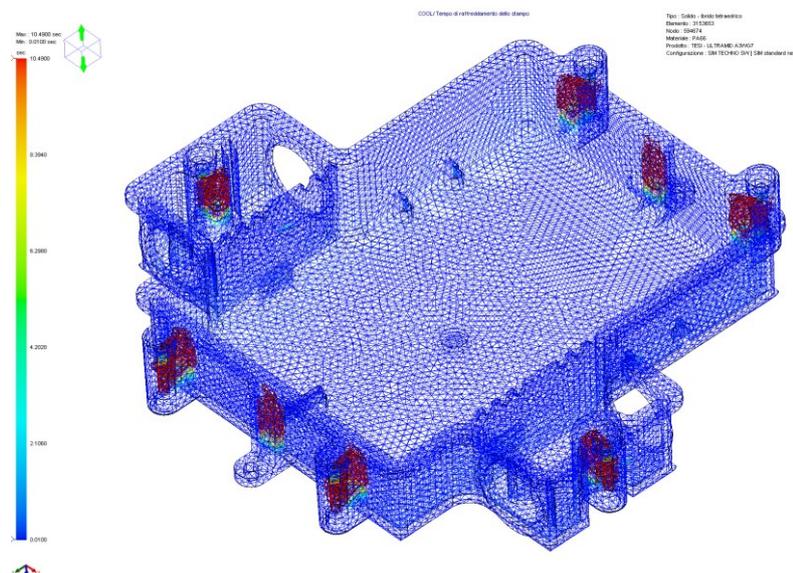


Figura 67 – Grafico isoline del tempo di raffreddamento

La Figura 68 e 69 riporta la distribuzione di temperatura sul pezzo, in seguito al raffreddamento auto determinato; si evidenziano ad ogni modo valori massimi di 294°C, per cui non è stato possibile abbattere la temperatura in seguito al raffreddamento di soli 10,5s

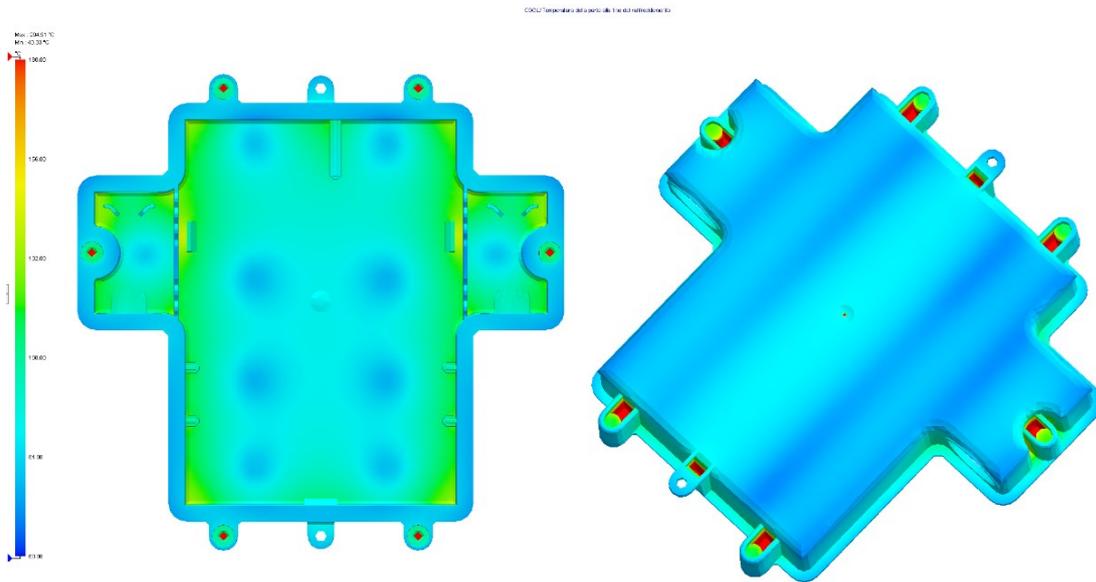


Figura 68 – Temperatura della parte alla fine del raffreddamento

Le zone calde, nuovamente, sono ben visibili dalla vista posteriore del pezzo proprio nei punti in cui una serie di inserti stampo danno la forma alla cavità, lungo il suo contorno perimetrale. La vista in sezione chiara meglio la distribuzione di temperatura nelle parti critiche del pezzo.

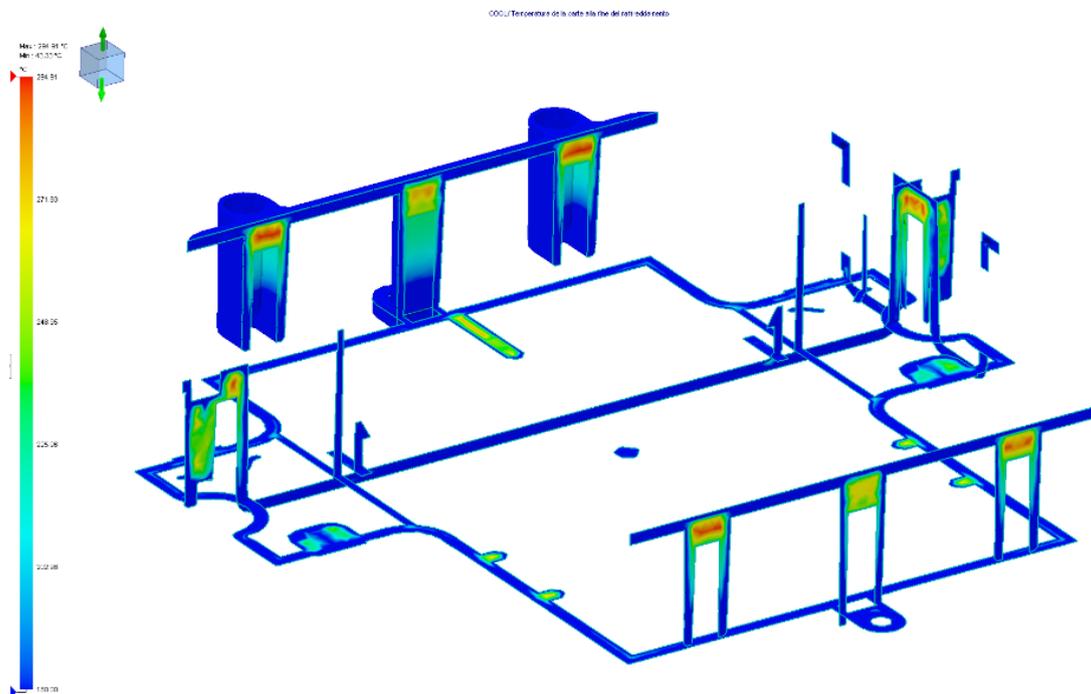


Figura 69 – Sezione con distribuzione di temperatura della parte alla fine del raffreddamento

Dai dati di raffreddamento, ancora, è possibile osservare anche la temperatura dei domini di acqua refrigerante; le immagini di Figura 70, mostrano un delta di temperatura di circa 10-12°C, soprattutto concentrato nelle porzioni centrali dei canali, più vicini al componente. Più precisamente, si nota come da canale n° 2, che la temperatura aumenta man mano che ci si sposta lungo il percorso del canale.

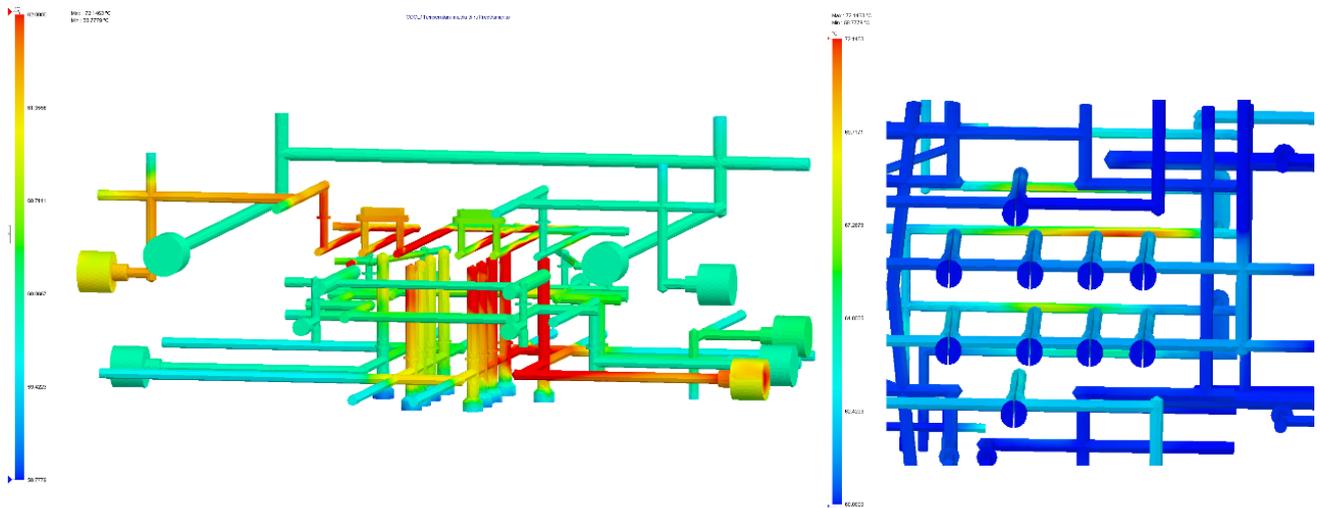


Figura 70 – Temperatura dei canali d'acqua

Equivalentemente in Figura 71 sono stati localizzati gli spot di maggiore concentrazione di calore estratto; i canali n°2, n°6 e n°3 si prestano abbastanza bene al raffreddamento.

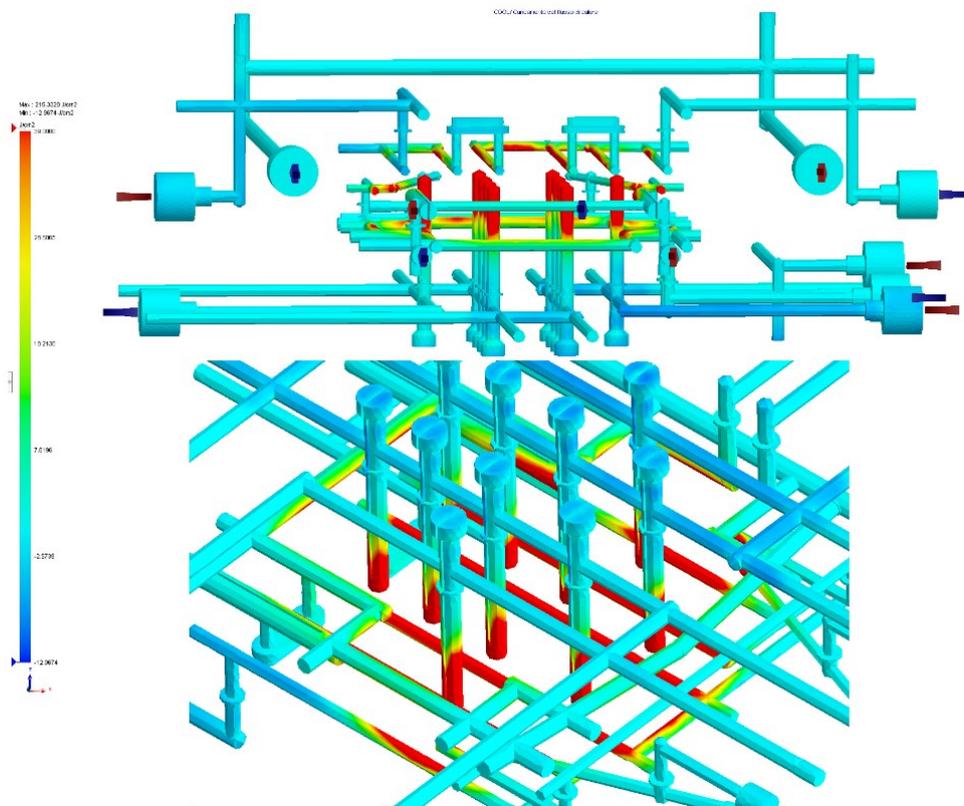


Figura 71 – Caricamento del flusso di calore

La Figura 72 confronta i risultati di temperatura per il raffreddamento di tipo 1, fissato a 32s, contro il raffreddamento automatico definito in base alla temperatura di estrazione, cioè la strategia di autoset del tempo di raffreddamento.

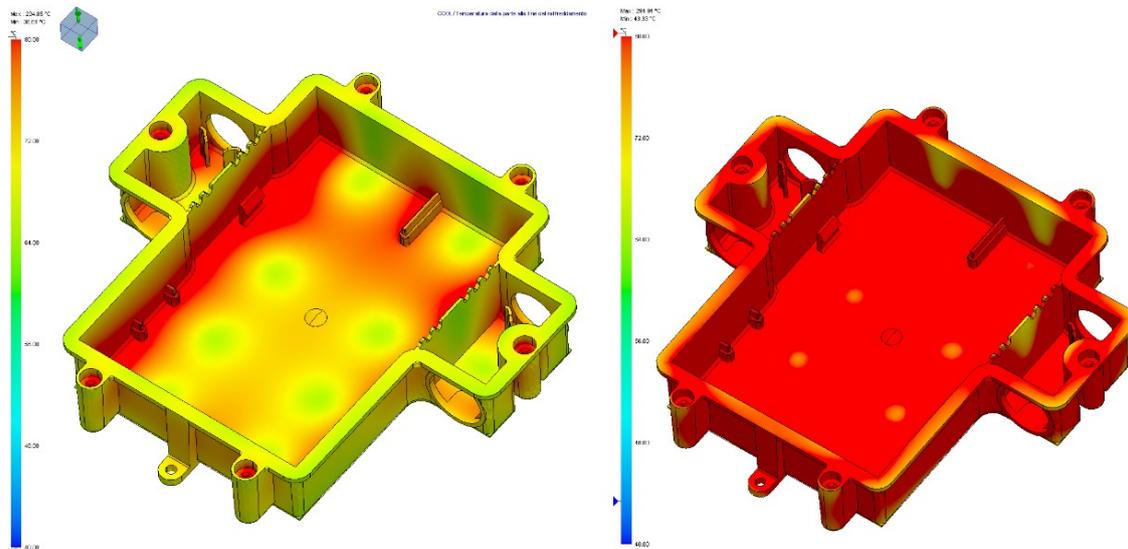


Figura 72 – Temperatura della parte alla fine del raffreddamento, per un tempo di 32s a sinistra, tempo di autoset di 10,49s a destra, stimato in base alla temperatura di estrazione; range di confronto 40-80°C

Anche se di difficile lettura a causa di risoluzione stessa dell'immagine riportata, si evidenziano notevoli differenze di temperatura di circa 20-30° poiché da sinistra a destra nel confronto il tempo di raffreddamento passa da 32s a 10,5s, praticamente ridotto di 2/3. Questa stima automatica del software conduce a risultati teoricamente corretti considerando il 90% della temperatura del pezzo, ma non è possibile estrapolare informazioni rispetto al 100% della parte.

5.1.5. Deformazioni

La deformazione della parte stampata è un fenomeno complesso che può verificarsi a causa di un certo numero di cause, tra cui, ma non esclusivamente:

- Ritiro irregolare: causato da temperature non uniformi dello stampo, velocità di raffreddamento differenziali tra sezioni sottili e spesse di una parte, variazioni di ritiro tra la direzione del flusso fuso e la direzione trasversale al flusso di fusione e, in generale, distribuzioni non uniformi di pressione, temperatura e sollecitazione di taglio sulla superficie o nel volume di una parte stampata.
- Sollecitazione differenziale dello stampo: le molecole di polimero possono essere considerate come molle a spirale. A mano a mano che la plastica fusa fluisce durante il processo di stampaggio a iniezione, le molecole di polimero vengono distese e allineate (o orientate) nella direzione del flusso. Mentre la parte stampata si raffredda, alcune delle molecole ritornano allo stato rilassato ma altre rimangono distese e congelate in posizione mentre la parte si raffredda, sottoponendole a una sollecitazione che viene definita sollecitazione dello stampo. La sollecitazione dello stampo è normale per le parti stampate a iniezione e non necessariamente genera problemi particolari. Tuttavia, quando la sollecitazione dello stampo varia notevolmente da un'area della parte rispetto a un'altra, la deformazione della parte stampata è spesso la conseguenza di livelli di sollecitazione diversi.

- Velocità di raffreddamento irregolari: il raffreddamento non uniforme può verificarsi a causa del diverso spessore delle pareti della parte plastica, ossia le sezioni di parete più sottili impiegano meno tempo per raffreddarsi rispetto a quelle più spesse. Tuttavia, anche per parti progettate correttamente con spessore parete uniforme, in presenza di variazioni di temperatura nel nucleo e nelle superfici delle cavità dello stampo si può verificare un raffreddamento non uniforme. Il raffreddamento non uniforme in genere determina ritiro e sollecitazione dello stampo irregolari con conseguente deformazione della parte.
- Orientamento molecolare e delle fibre: in generale, il ritiro della parte stampata è maggiore trasversalmente alla direzione del flusso del polimero fuso e alla direzione dell'orientamento delle fibre nei materiali fibrosi. Di conseguenza, la direzione del flusso fuso e dell'orientamento delle fibre può avere un effetto notevole sulle distribuzioni del ritiro in una parte stampata, determinando la possibile deformazione della parte stampata.
- Impaccaggio variabile: nella fase di impaccaggio del processo di stampaggio a iniezione la pressione viene mantenuta costante su materozza, canali di colata, gate e cavità fino a quando i gate non si congelano e non viene più trasmessa pressione alle cavità dello stampo. Tuttavia, se la distribuzione del riempimento nella parte stampata non è uniforme per iniziare, alcune aree di una parte potrebbero avviare la fase di impaccaggio mentre altre potrebbero essere ancora in fase di riempimento. Quando ciò si verifica, è molto più probabile che si verifichi la deformazione della parte stampata poiché l'impaccaggio non uniforme determina il ritiro e sollecitazioni irregolari, fattori che incidono sull'eventuale deformazione della parte.

Infine, si riportano brevemente i risultati di simulazione per il calcolo delle deformazioni, così come ottenute in base alle impostazioni di default del software, dove non è possibile specificare limiti e vincoli da tenere in considerazione, a differenza di altri ambienti di simulazione come Moldex3D, che sarà ampiamente sviluppato più avanti.

Il calcolo delle deformazioni mostra valori di spostamento da stress totale di circa 0,69mm, che è una quantità abbastanza coerente con la dimensione del pezzo stesso. La Figura 73 mostra la distribuzione degli spostamenti totali con scala accentuata per carpire la forma deformata.

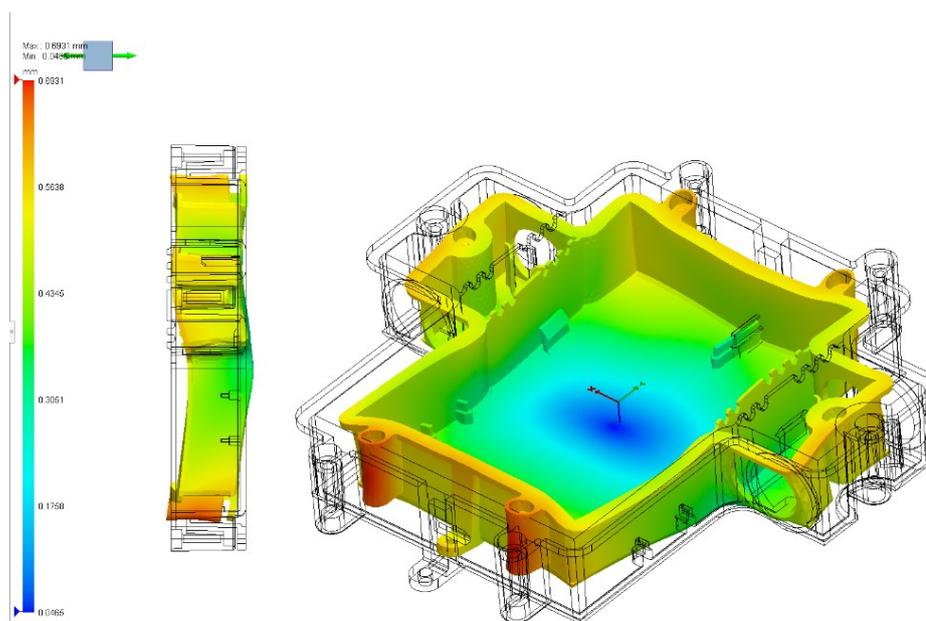


Figura 73 – Analisi di deformazione: spostamento da stress totale

5.2. Simulazione in Visi Flow

I test elaborati con VISI Flow rappresentano il primo step di arricchimento della simulazione di base precedente, ossia il modello di calcolo avanza in completezza e complessità, verso la migliore rappresentazione numerica del processo reale.

5.2.1. Setup e ipotesi di lavoro

Il setup del modello di simulazione in Visi Flow inizia con l'importazione del file step del pezzo con i canali di raffreddamento, per poi avviare il processo di mesh, definizione materiale, punto di iniezione e punto di riferimento per il ritiro (shrinkage). A tal proposito specifichiamo che per questo stampo reale e già operante, la cavità è stata anticipatamente sovradimensionata per compensare il ritiro volumetrico del componente, di circa 1,6% del modello originale, quindi il file cad a nostra disposizione è già comprensivo del ritiro percentuale e sarà l'oggetto effettivo di calcolo. Mentre in SolidWorks non era possibile discernere tra modello con o senza shrinkage, adesso in Visi flow è possibile creare la mesh direttamente sul pezzo, oppure generare in automatico un modello solido auto espanso che possa tenere in considerazione del ritiro volumetrico, in base anche al punto di riferimento desiderato.

Ricordiamo inoltre che per quanto riguarda VISI Flow saranno considerati e osservati due casi di raffreddamento, sempre limitatamente al layout di canali convenzionali:

- 1) il primo caso di test, in cui il modello cad solido dei canali di raffreddamento è inserito integralmente in VISI Flow e considerato come una serie di canali conformali, anche se in realtà non lo sono: questo test è stato inizialmente intrapreso come espediente tecnico inevitabile a causa di una forte limitazione del programma di calcolo: cioè l'impossibilità di lanciare simulazioni di raffreddamento quando nel modello sono presenti lame deviatrici o fontane; quindi si è ritenuto interessante esplorare preliminarmente questa strada al fine di esaminare il comportamento del software all'importazione di geometria solida di raffreddamento;
- 2) il secondo caso invece prevede simulazioni di raffreddamento in cui i canali di sono stati sintetizzati con linee di sketch e successivamente importati nel programma di simulazione, in modo da poter essere consolidati con gli strumenti interni del modulo VISI Flow e ottenere risultati di raffreddamento più completi.

A partire dal canale caldo e dal gate di iniezione, i parametri caratteristici sono stati inseriti nel programma VISI come mostra la Figura 74.

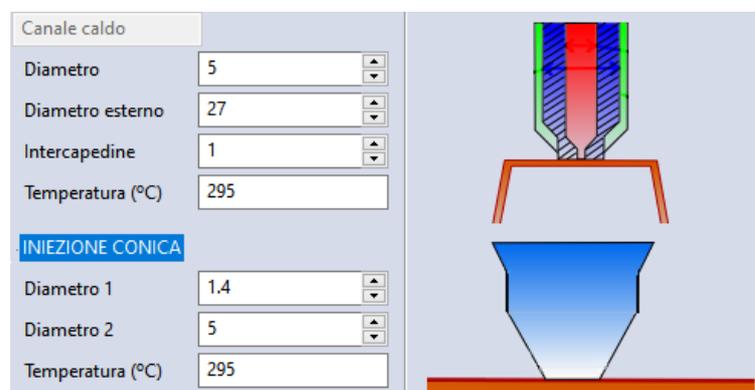


Figura 74 – Setup del gate e del canale caldo durante la preparazione del modello in Visi Flow

Riassumendo, (come da setup di Figura 75) i dati di riempimento sono impostati con una temperatura del materiale a 295°C nel canale caldo e uno stampo a 80°C; punto di commutazione stabilito a 93% del riempimento, pressione di fine riempimento pari a 65 MPa e limitazione della massima pressione a 200 MPa. Il tempo di riempimento è settato a 0.7s ma il programma estende leggermente questa grandezza in base alle necessità intrinseche relative alla cavità.

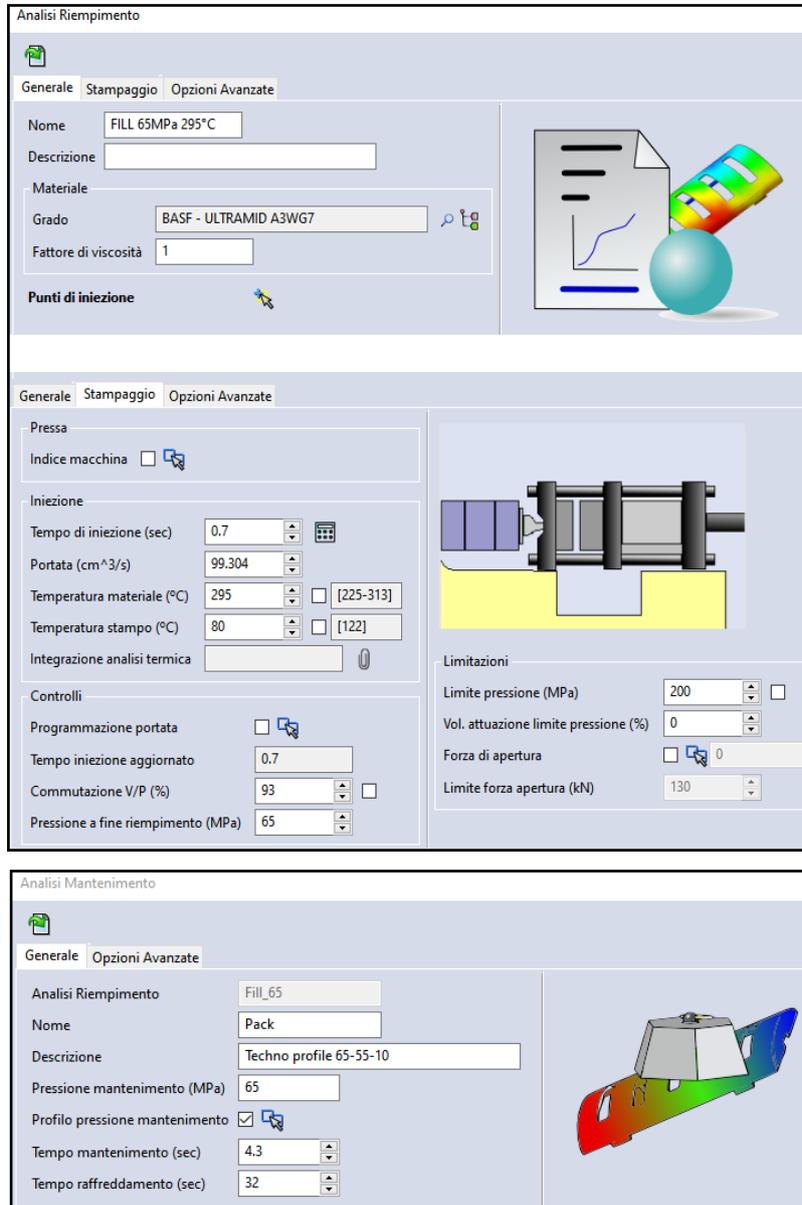


Figura 75 – Setup per la fase di riempimento (in alto) e mantenimento (in basso) in Visi Flow

In aggiunta, è possibile inserire il profilo di iniezione nella fase di setup di riempimento, a discapito del tempo stesso, che viene aggiustato automaticamente in base al profilo; dal momento che non è possibile rispettare il tempo di riempimento di 0,7s di conseguenza non è stato implementato il profilo di portata nelle simulazioni lasciando di default il valore di portata base fissa. Data la brevità dell'iniezione, si accettano di trascurare il profilo di portata perché altera il tempo di riempimento.

Sebbene i dati della scheda stampaggio indicano che sono presenti due spike di pressione, sia alla fine del riempimento (125MPa) che all'inizio del mantenimento (190MPa), il nostro modello di calcolo trascura questi innalzamenti di pressione, come ipotesi semplificativa, dal momento si tratta

probabilmente di operazioni di sicurezza relativa alla pressa di azionamento per evitare decadimento di pressioni o fuoriuscite di materiale inaspettate.

Il materiale Poliammide di riferimento. Come strutturato nel software, è mostrato nella sintesi di Figura 76.

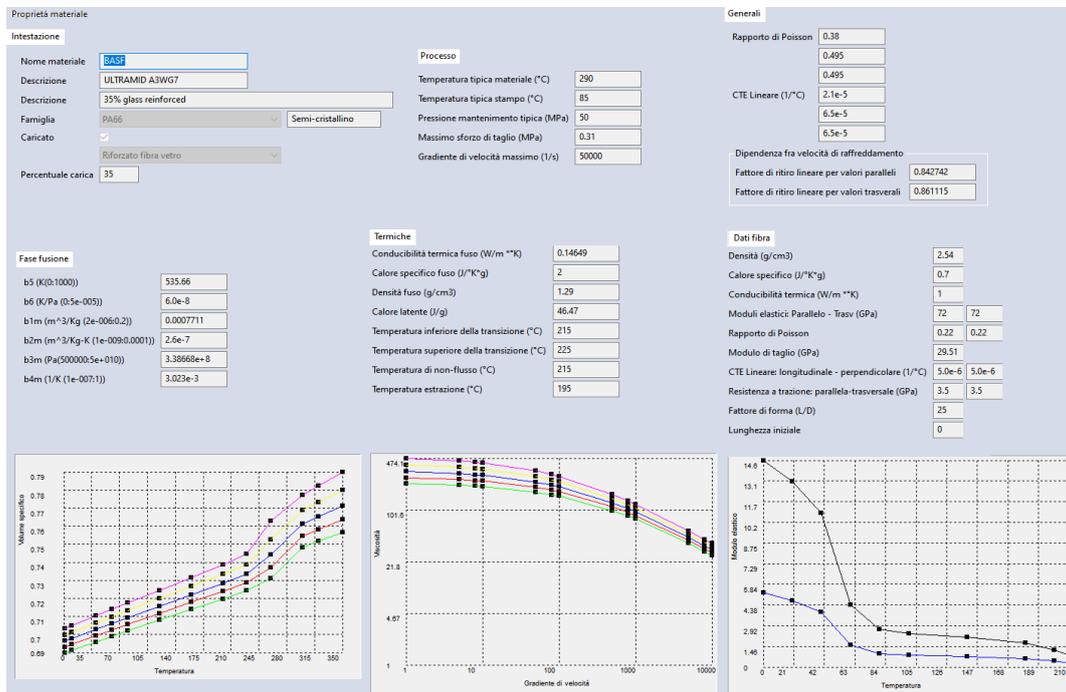


Figura 76 – Parametri del materiale PA66 A3WG7 in VSI, con relative curve caratteristiche

Il modello di riferimento per la simulazione è infine mostrato interamente in Figura 77.

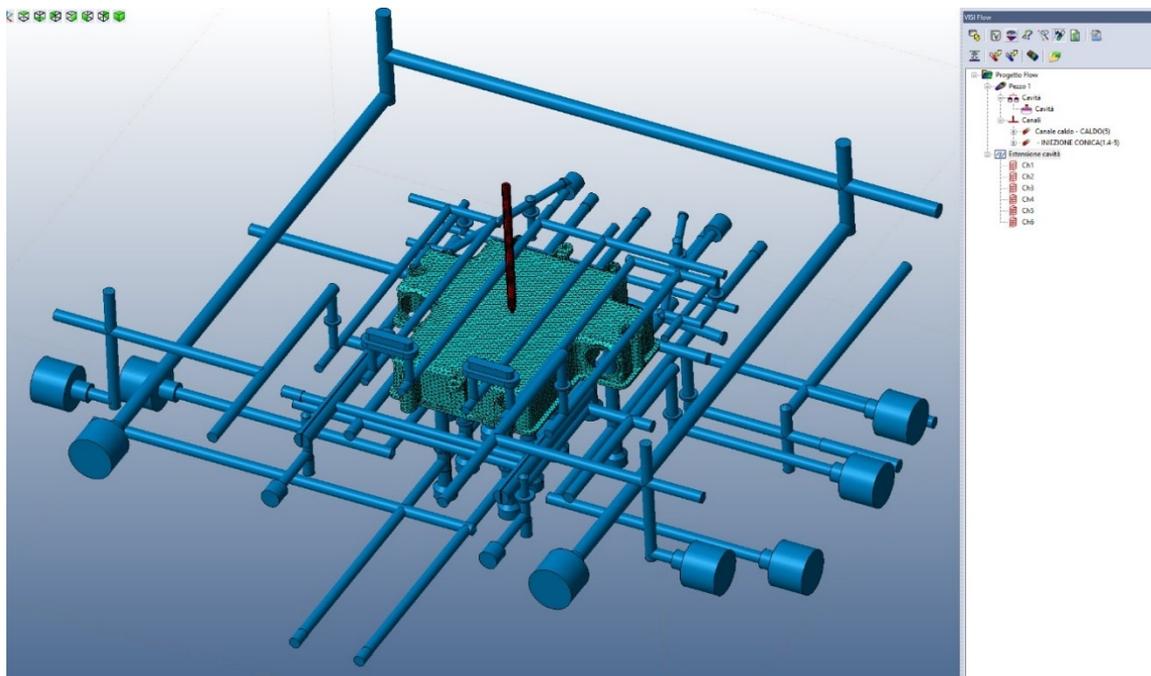


Figura 77 – Modello di simulazione completo di gate, canale di alimentazione e canali di raffreddamento

5.2.2. Riempimento e mantenimento

La prima simulazione in VISI Flow prevedeva l'utilizzo del profilo di riempimento, secondo scheda stampaggio, ma data la difficoltà di interpretazione da parte del programma questa impostazione conduce a un tempo di riempimento di oltre 1 secondo, pertanto è stato deciso di trascurare il profilo di portata nei test successivi.

Per le nuove simulazioni, come da attese, gli output per il riempimento e il mantenimento sono simili e associabili a quelli ottenuti dal precedente strumento di calcolo SolidWorks, ma con piccoli miglioramenti numerici.

Il primo dato che osserviamo è il tempo di riempimento in Figura 78, automaticamente allungato fino a circa 0,773s quindi, valore piuttosto fedele data l'estrema dinamica del processo.

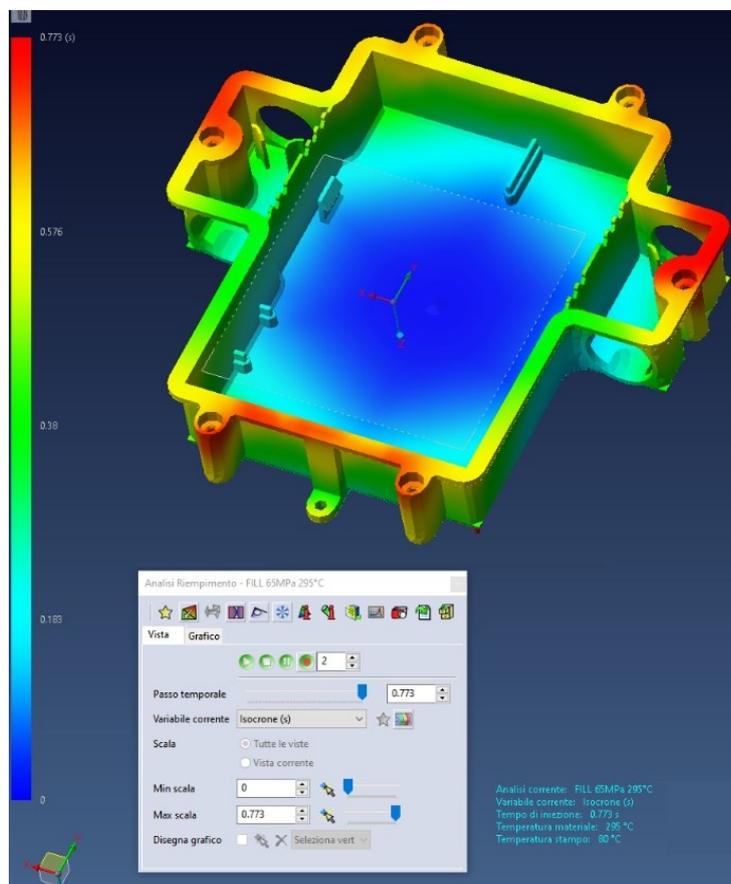


Figura 78 – Grafico delle isocrone del tempo di riempimento

Le porzioni del componente a maggior distanza dal punto di iniezione sono le ultime a riempirsi, proprio in prossimità degli hotspot di contorno.

La pressione di riempimento si avvicina al limite di 65 MPa come da valore terminale impostato da setup, generalmente però la pressione sul pezzo si aggira sui 31-45 MPa per poi convergere al massimo valore all'interno del canale caldo (Figura 79). come da immagine, si osserva una buona uniformità della pressione che a simmetria circolare intorno al gate segna delle aree iso-pressione a valore maggiore rispetto al resto della cavità.

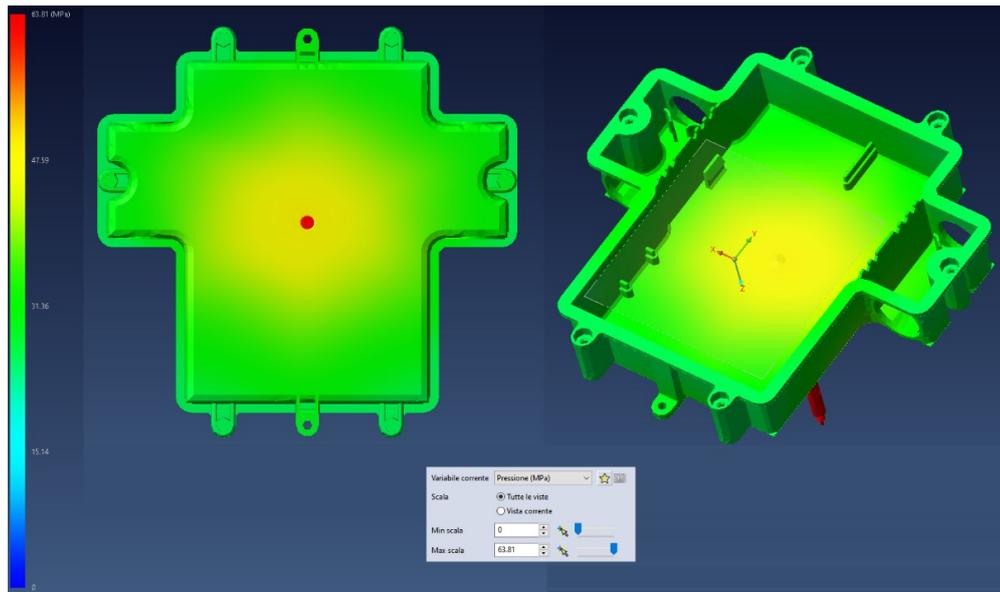


Figura 79 – Pressione durante il riempimento

Il diagramma di Figura 80 conferma i livelli di pressione raggiunti al termine del riempimento, e si osserva la tipica forma delle curve, con il decadimento repentino di portata e di pressione.

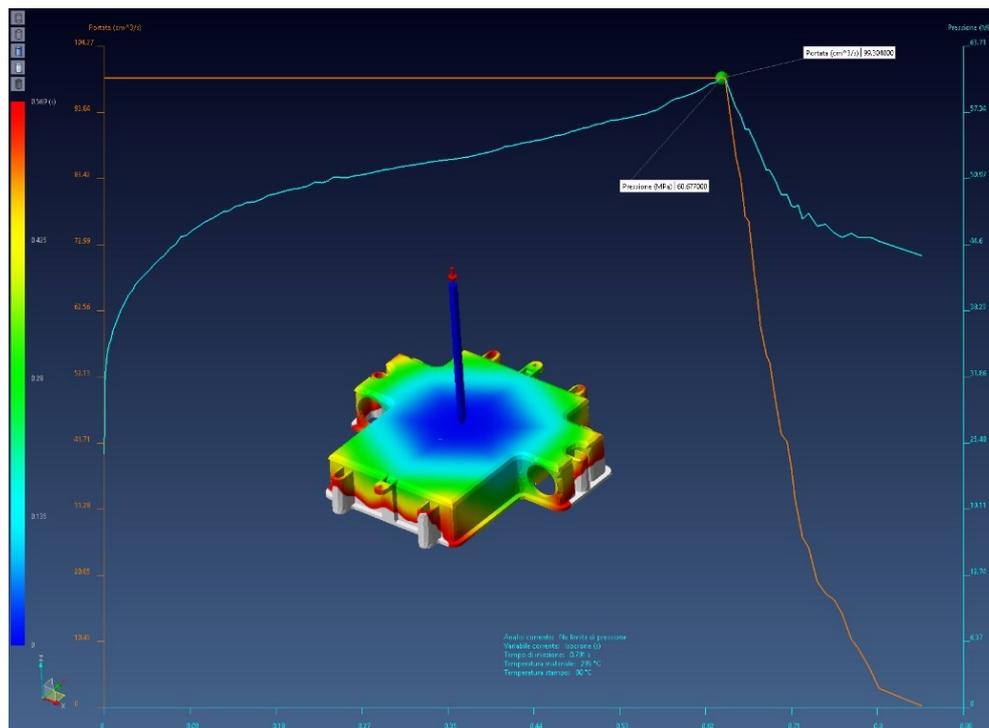


Figura 80 – Diagramma pressione-portata-tempo durante il riempimento

I grafici di mantenimento riportano essenzialmente gli stessi dati a cui siamo abituati, per brevità mostriamo solamente la Figura 81 con le curve di processo compressive dell'impaccaggio.

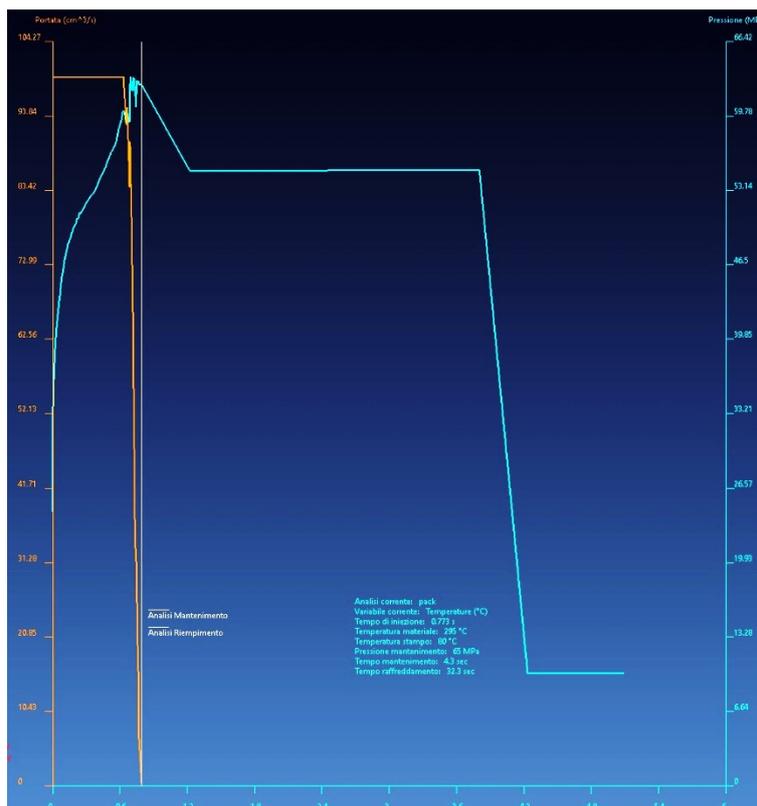


Figura 81 – Diagramma pressione-portata-tempo comprensivo del mantenimento

5.2.3. Pre-Analisi di raffreddamento

Nella sezione di pre-analisi di raffreddamento si intende il risultato stimato dal programma e già a disposizione nella simulazione di riempimento stessa. Così come in SolidWorks, è possibile osservare delle informazioni senza l'effettivo calcolo dei canali. Il tempo di raffreddamento individuato è pari a 32,3s valore cioè sorprendentemente simile a quello di default prescelto dalla società Techno, di 32s (Figura 82).

Nuovamente, le zone calde sono state correttamente evidenziate dalla simulazione, in corrispondenza degli spessori maggiori.

Essenzialmente, si vuole mettere in luce come i valori estrapolati siano del giusto ordine di grandezza rispetto ai dati ufficiali di scheda stampaggio, e rispetto a SolidWorks, non ci si limita più al solo 90% del pezzo, ma si può studiare il raffreddamento per la totalità del pezzo.

Il tempo di solidificazione, invece, rappresenta il tempo necessario al centro dell'elemento per raggiungere la temperatura di solidificazione del polimero (specificata nel database) a partire dalla fine del riempimento del componente (Figura 83). Dal punto di vista pratico, la variabile identifica il tempo massimo di raffreddamento dal momento che alcune parti possono essere espulse con un nucleo parzialmente caldo.

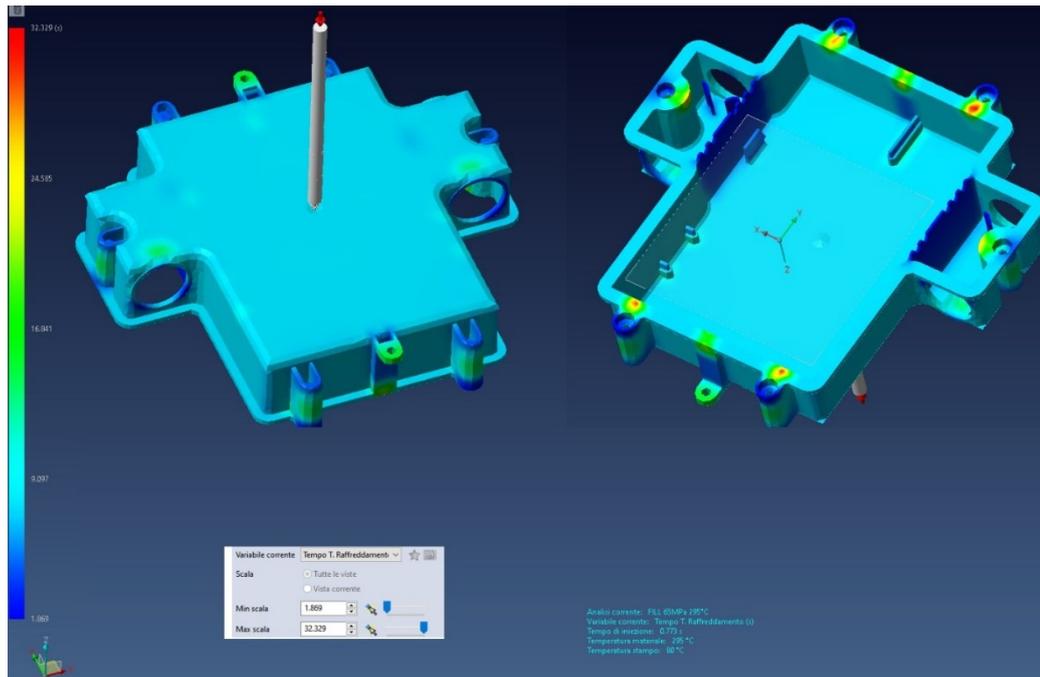


Figura 82 – Tempo tecnico di raffreddamento, secondo stima del riempimento

Questo parametro è quindi il limite estremo per cui si potrebbe in teoria allungare il tempo di raffreddamento in base alle necessità. I picchi mostrano anche dei tempi di solidificazione di 54 secondi, ma per questo caso di studio il limite di raffreddamento è già stato stabilito e fa parte del set di informazioni a disposizione.

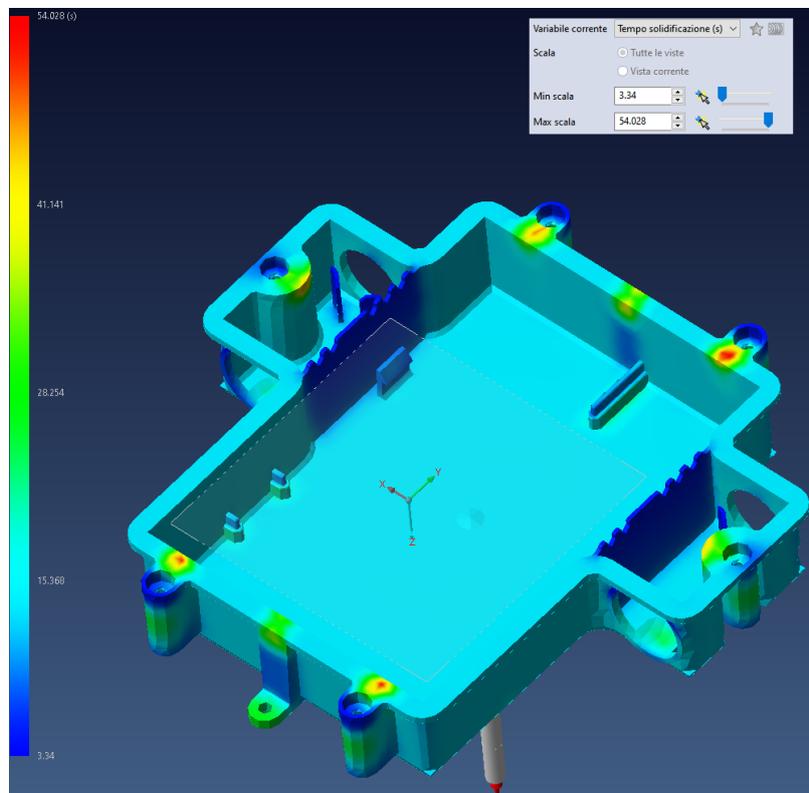


Figura 83 – Tempo di solidificazione

5.2.4. Raffreddamento di tipo 1

Le portate usate nella simulazione corretta del raffreddamento contemplanò i valori elaborati tramite SolidWorks Flow Simulation, dove la pressione di 3 bar agli Inlets è stata valutata in termini di portate per completare i test in VISI Flow.

Il tempo di raffreddamento settato per la simulazione è di 32s, come prevede la scheda stampaggio, ma in VISI, l'analisi termica considera effettivamente lo stesso tempo di raffreddamento estratto dalla simulazione di riempimento. L'incomprensione per questa fase genera non pochi dubbi sul funzionamento del programma, ma dall'analisi delle temperature invece è visibile l'effetto di asportazione di calore, come dovrebbe essere.

La temperatura valutata in seguito all'analisi termica è riportata in Figura 84, e testimonia correttamente una temperatura massima ben al di sotto della soglia limite per l'estrazione, di circa 152 °C.

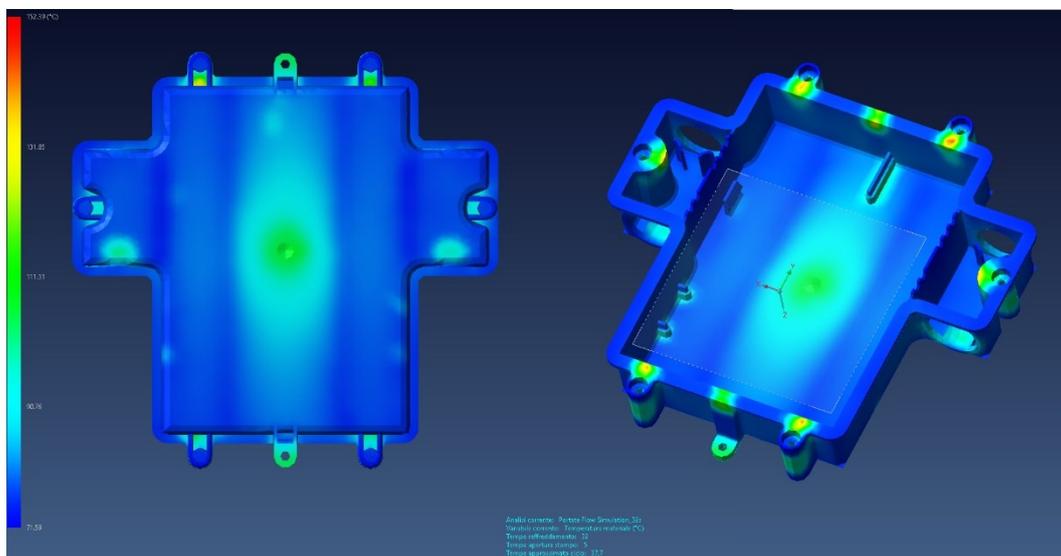


Figura 84 – Temperatura del materiale relativa ai soli valori cavità

In termini di output a disposizione il software VISI Flow risulta un po' limitato, difatti per l'analisi termica non è possibile valutare le sezioni del pezzo, solo quelle relative all'intero modello di simulazione, mostrando la temperatura.

Parallelamente, si è ritenuto interessante valutare il tempo di raffreddamento in base al calcolo da parte del programma rispetto al raggiungimento della temperatura di estrazione, nella totalità del pezzo, come mostrato nella scheda di setup di Figura 85.

La finestra mostra la frazione di riferimento per la simulazione nonché la temperatura di estrazione. Per lanciare questa analisi il software chiede un punto di riferimento per la stima del nuovo tempo di raffreddamento; la logica impone di selezionare un punto che si avvicina il più possibile al valore di massimo spessore sul pezzo, in modo da avere un tempo limite massimo legato agli hotspot.

La freccetta blu visibile in basso a sinistra sul componente sarà il riferimento prescelto, con uno spessore associato di circa 4.4mm.

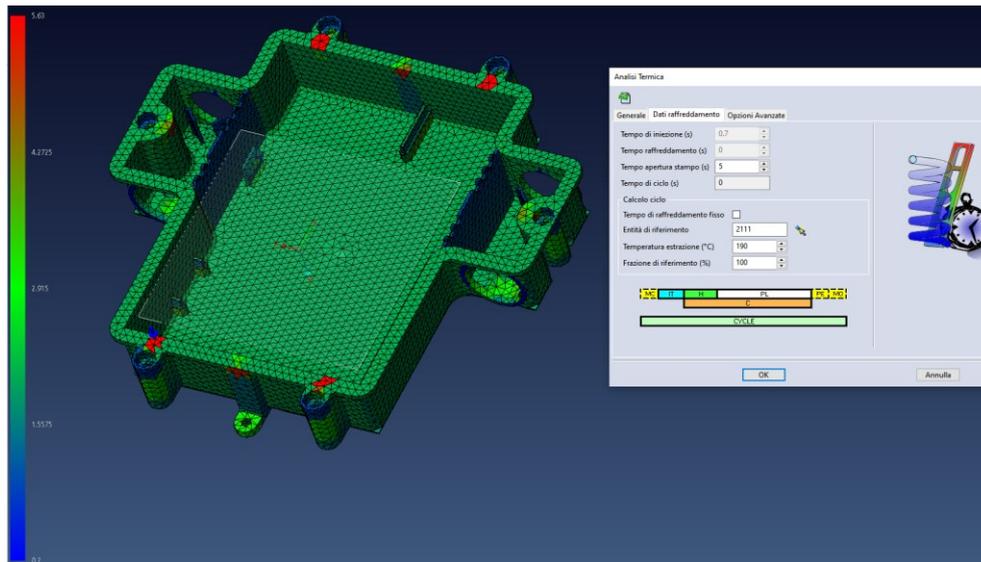


Figura 85 – Setup dell’analisi termica per il calcolo automatico del tempo di raffreddamento, con indicazione con freccia blu del punto di riferimento

Sebbene esista la possibilità di stimare il tempo necessario per l’estrazione del componente, questa operazione non è immediata e semplice perché non è facile identificare con esattezza i punti di massima spessore; i risultati quindi cambiano in base al riferimento scelto con variazioni anche troppo modeste. Pertanto, non si può ritenere comprensibile e affidabile il calcolo automatico del tempo di raffreddamento, e come suggerito in seguito, ci si affiderà all’ultimo software di simulazione.

Il risultato di temperatura alla fine del raffreddamento con un tempo autoimposto di circa 8.11 secondi, mostra temperatura ancora troppo alte per l’estrazione del pezzo, anche fino a 220°C (Figura 86), come volevasi dimostrare: i molteplici hotspot sono un problema reale che creano un tempo ciclo lungo per l’intero processo.

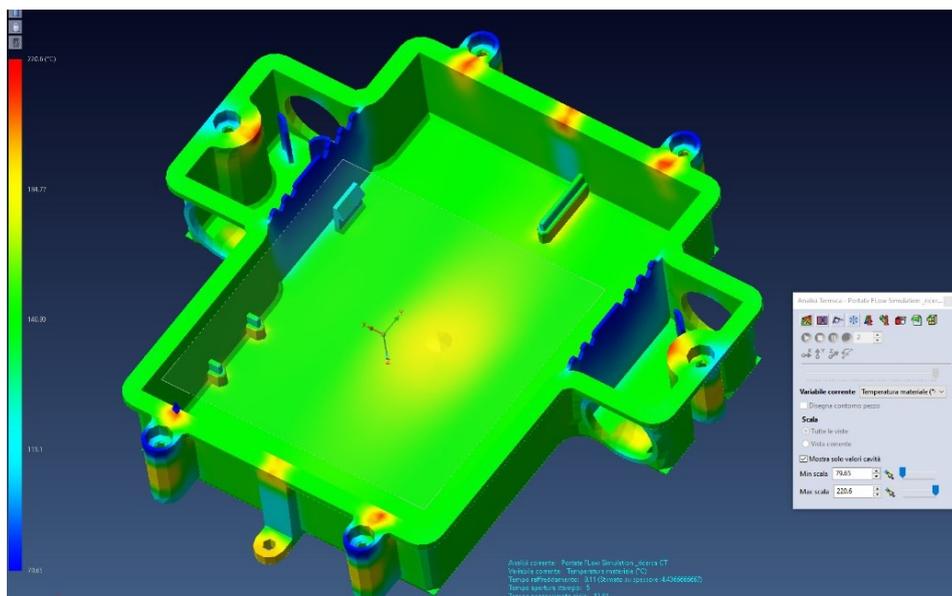


Figura 86 – Temperature nel pezzo in seguito al calcolo del tempo di raffreddamento

5.2.1. Raffreddamento di tipo 2

Per il raffreddamento di tipo 2 si intende la simulazione del processo con lo sketch di linee a rappresentare i canali di raffreddamento. Per questo test sono stati ottenuti sostanzialmente gli stessi risultati dei casi precedenti, ma questa distinzione adesso è stata utile per l'esportazione di due grafici in particolare, ossia il numero di Reynolds per i canali in Figura 87 e la variazione di temperatura per il fluido refrigerante, Figura 88.

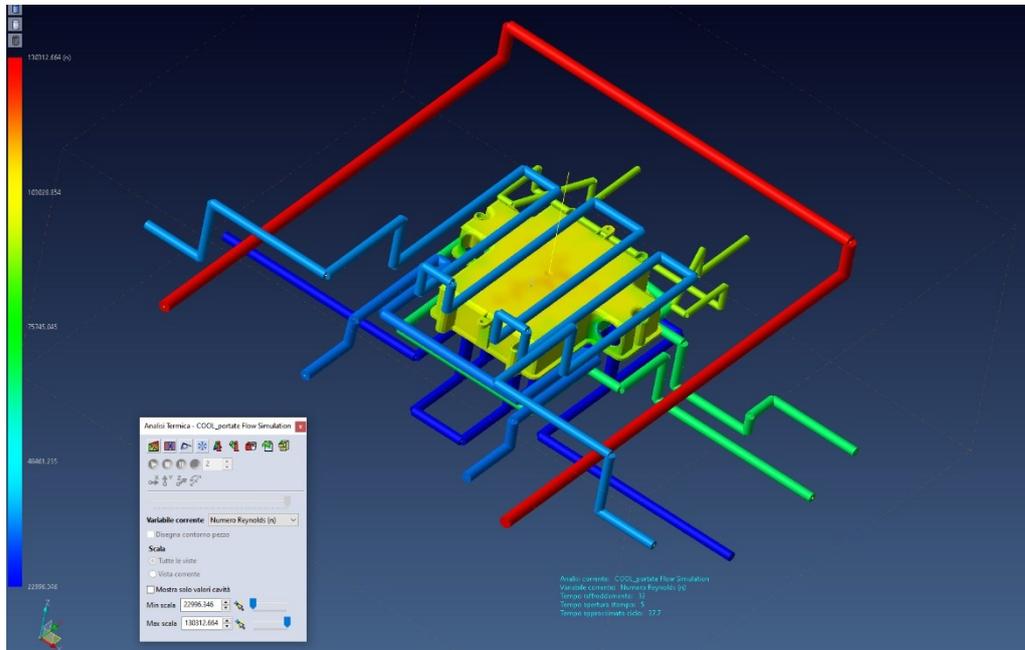


Figura 87 – Numero di Reynolds per il layout di canali di raffreddamento

Infine, i valori di temperatura relativi al solo fluido refrigerante (Acqua) mostrano incrementi lievi e circoscritti nell'ordine di 1-2°C massimo, Figura 88. Se confrontati con le simulazioni precedenti in

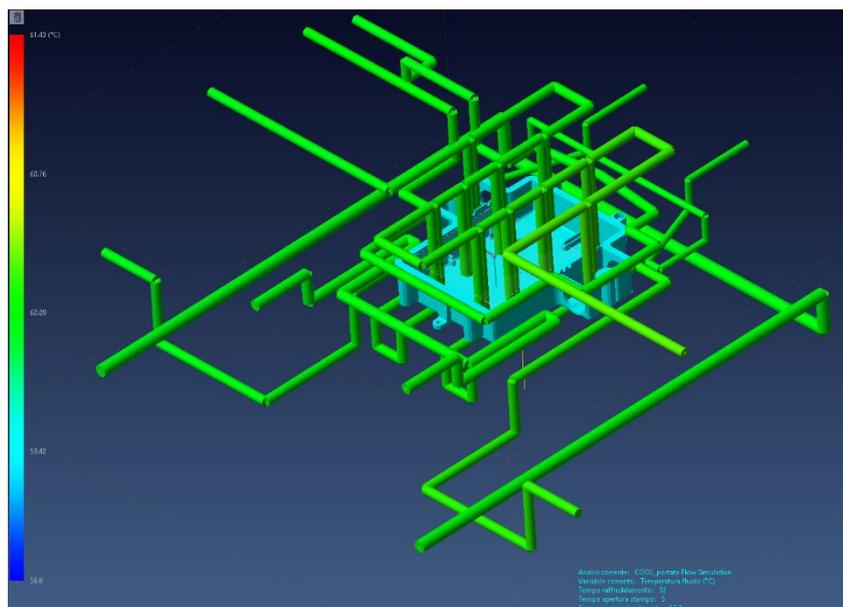


Figura 88 – Incremento di temperatura per il fluido refrigerante

Solidworks, si evince la notevole differenza anche inverosimile, dal momento che non si apprezzano variazioni importanti di temperatura nel liquido.

5.2.2. Deformazioni

Il calcolo delle deformazioni in VISI Flow, che tiene in conto di tutti gli effetti possibili, mostra l'andamento cromatico di Figura 89 seguente.

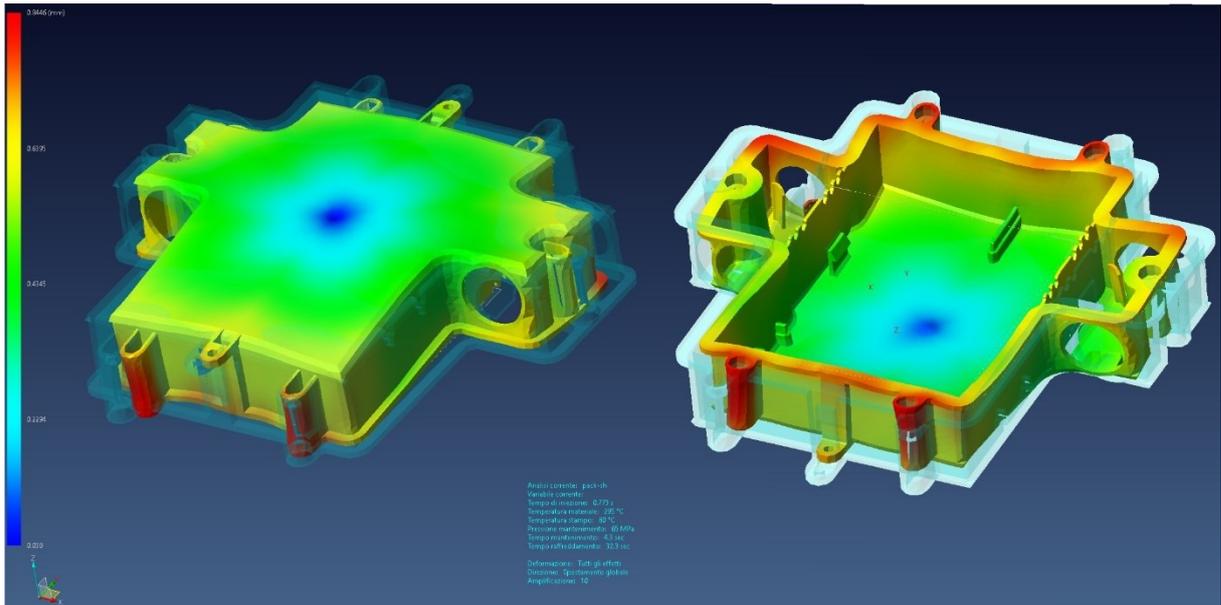


Figura 89 – Deformazione totale del componente

Il pezzo subisce un imbarcamento centrale, con deviazione massima alle estremità, per le quali si raggiunge anche un massimo spostamento di 0.84mm; valore in linea con la precedente analisi SolidWorks.

5.3. Simulazione in Moldex3D

Dal momento che questa tesi rappresenta un caso applicativo industriale, è stato richiesto di trovare quante più conferme possibili per validare le prove di simulazione e dunque le modifiche successive da apportare a questo stampo. L'ultimo strumento di simulazione che verrà testato è il programma Moldex3D, di cui è disponibile solo una versione relativamente datata, ma ugualmente utile e rivelatasi piuttosto completa e affidabile. Questo ambiente di simulazione comprende solitamente tre programmi collegati fra loro, cioè il CAD-Doctor, il Designer e infine Moldex3D vero e proprio: si parte dalle operazioni di importazioni dei file nel CAD-Doctor per poi controllare errori dei solidi e delle geometrie, e infine si crea un file che sarà l'input per la definizione del modello nell'ambiente Designer, dal quale si estrae infine il file da caricare nel programma di simulazione, come se fosse un progetto già pronto. Queste separazioni procedurali si sono rivelate di buona utilità e comodità per la creazione senza errori di file facilmente utilizzabili per una simulazione robusta.

Particolarità interessante di Moldex è quella relativa al setup di processo come classica simulazione CAE, o come macchina di riferimento (pressa); in questo studio ci si è limitati alla simulazione classica di default per 2 motivi principali:

- l'incertezza sui numerosi dati operativi della pressa nonché sulla macchina stessa;
- i lunghi tempi di calcolo richiesti con la simulazione macchina portano con se la necessità di una notevole potenza computazionale non a disposizione.

5.3.1. Setup e ipotesi di lavoro

Le impostazioni e i parametri di riferimento per il modello di calcolo restano le stesse come per gli studi già svolti. Tra tutte le varie fasi si riporta in Figura 90 la finestra di setup per la definizione del canale di iniezione caldo e relativo gate.

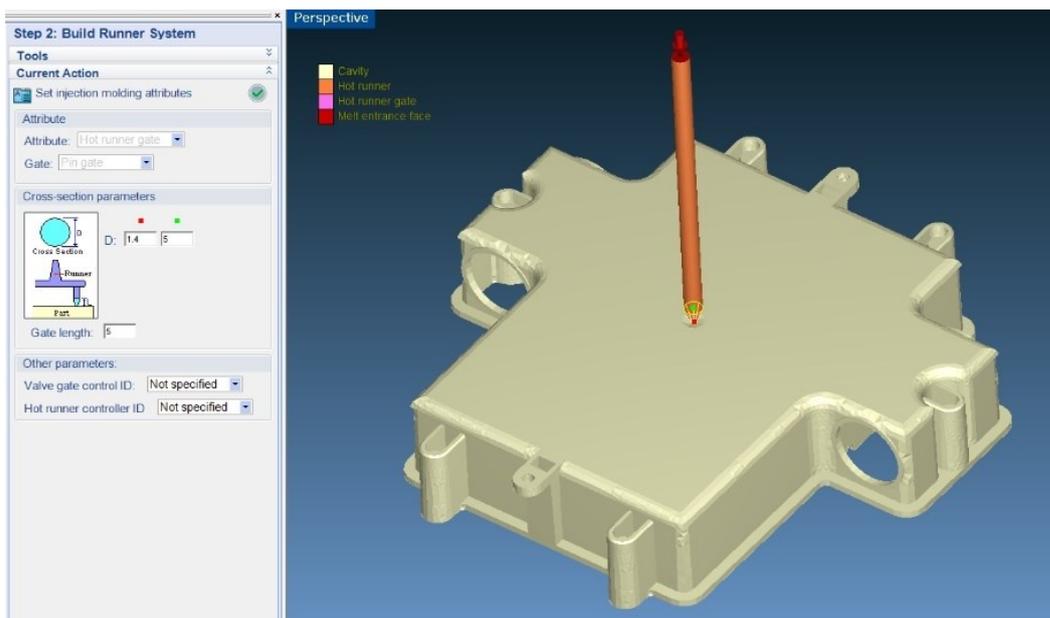


Figura 90 – Setup del canale di iniezione caldo in Moldex3D

Il file di output generato da Moldex Designer è un file mesh comprensivo di tutti i domini, compreso lo stampo che li racchiude; la mesh completa mostrata in Figura 91 rende visibile dall'esterno solo lo stampo virtuale, ma contiene tutti gli altri componenti modellizzati.

Anche il database di Moldex3D contiene molti materiali plastici possibili, tra cui lo stesso tipo di Poliammide impiegati negli altri casi di simulazione; i parametri principali del materiale sono raccolti in Figura 92.

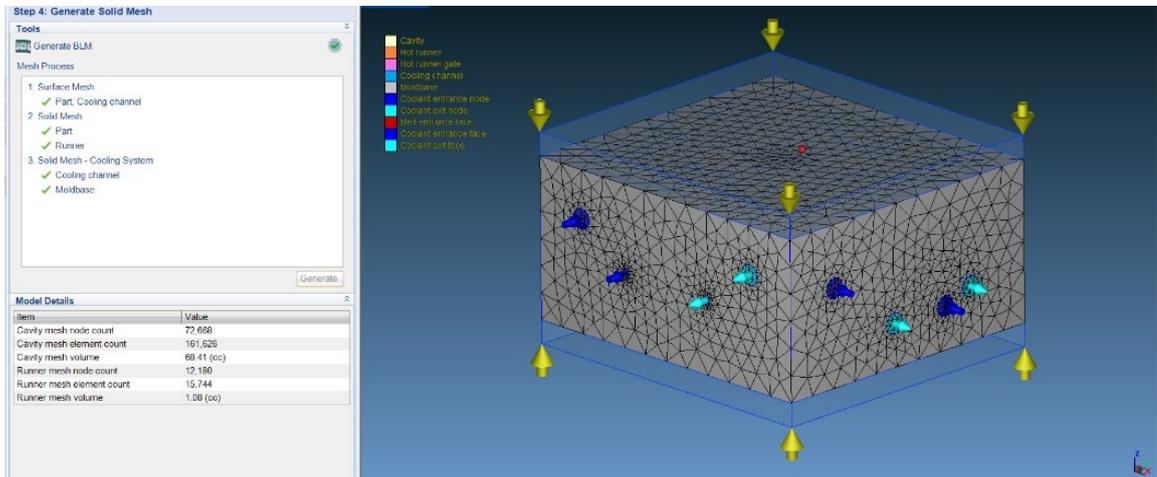


Figura 91 – Modello mesh in Moldex3D con vista stampo

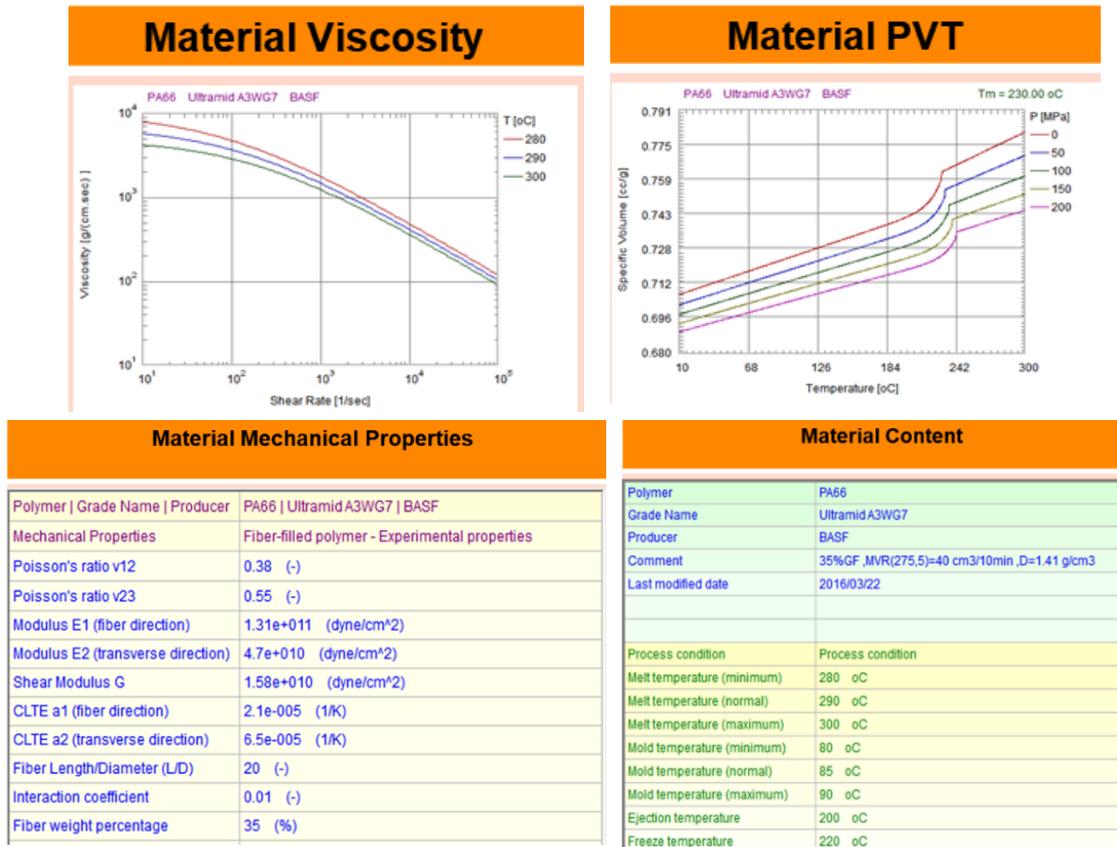


Figura 92 – Informazioni principali sul materiale usato in Moldex3D

Per quanto concerne il materiale delle piastre stampo, in questo caso è stato possibile scegliere un materiale di riferimento più fedele all'assegnazione reale, del tipo M310 ISOPLAST (Figura 93).

Cooling Channel/Heating Rod		Mold Metal Material	Estimate Cooling Time
Mold metal ID	Material		
Mold Metal [Moldbase material]	M310 ISOPLAST(User bank)		
Material properties :			
Mold metal ID	Mold Metal [Moldbase material]	-	
Density	7.68	g/cm ³	
Heat Capacity	4.6e+006	erg/g.K	
Thermal conductivity	1.95e+006	erg/sec.cm.K	
Elastic modulus	2.2e+012	dyne/cm ²	
Poisson ratio	0.285	-	
CLTE	1.06e-005	1/K	

Figura 93 – Modello mesh in Moldex3D con vista stampo

Ricordiamo nuovamente i dati di processo settati nelle impostazioni di partenza, come da Figura 94.

Item name	Item data
Filling Time	0.70 (sec)
Melt Temperature	295.0 (oC)
Mold Temperature	80.0 (°C)
Maximum Injection Pressure	200.00 (MPa)
Injection Volume	68.5759 (cc)
Packing Time	4.30 (sec)
Maximum Packing Pressure	190.00 (MPa)
VP Switch by volume(%) filled (Exclude runner)	93.00 (%)
Mold Opening Time	5.00 (sec)
Ejection temperature	190.0 (°C)
Air Temperature	25.0 (°C)
Cooling Time	32.00 (sec)
Cycle Time	42.00 (sec)

Figura 94 – Riassunto dei parametri di iniezione per le simulazioni in Moldex3D

Uno dei vantaggi di questo software consiste nella vasta scelta disponibile per il tipo di processo di simulazione da lanciare, ciò significa che in base alle necessità è possibile impostare manualmente la sequenza delle fasi da studiare: da analisi base di riempimento, mantenimento raffreddamento e deformazione, fino alle meno note analisi di preriscaldamento stampo, studio delle condizioni stazionarie del canale caldo, analisi ottiche del materiale e analisi di tensioni.

Limitatamente alla nostra ricerca, l'impostazione della fase di raffreddamento è stata scelta del tipo 'GENERAL', ossia un processo standard che non considera il transitorio termico, poiché non ritenuto necessario in base ai nostri obiettivi di valutare l'efficacia di un nuovo sistema di raffreddamento rispetto a quello originale in esame. Questo tipo di procedimento è sintetizzato nella dicitura 'Full Analysis' come in Figura 95, e prevede in sequenza la successione delle fasi di COOL, FILL, PACK, COOL e WARP.

Nessuno degli altri software è così versatile e personalizzabile, pertanto l'orientamento generale del progetto di tesi volgerà principalmente a favore di questo programma di simulazione.

È bene ricordare che anche in questo caso lo studio del processo di iniezione si estende fra le temperature di 295°C per l'iniezione, e 190°C come riferimento per l'estrazione del pezzo; ciò significa che se nel

caso reale il processo si svolge con i valori rispettivamente di 290°C e 195°C, ogni risultato futuro che sarà raggiunto, in tal caso avrà ancora maggior valenza numerica.

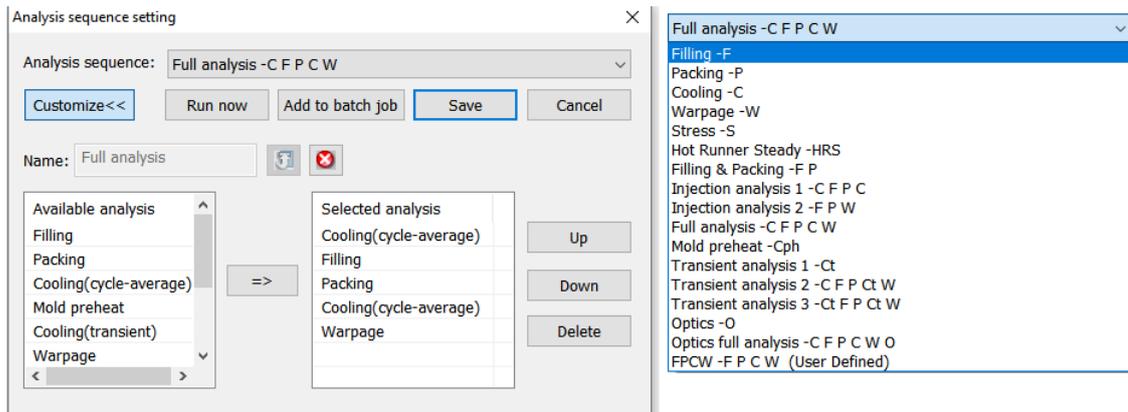


Figura 95 – Setup delle fasi di simulazione da eseguire in successione

A differenza dei precedenti software di simulazione, adesso siamo di fronte a un programma di calcolo molto più tecnico e incentrato sull'industria dello stampaggio a iniezione; per questo test infatti è stato possibile inserire agevolmente tutti i dati puntuali dei profili di iniezione (sia per la portata che la pressione) nonché del profilo di mantenimento, come riportato dalle finestre estratte in Figura 96.



Figura 96 – Profili di iniezione e mantenimento adoperati nella simulazione Moldex3D

Ancora una volta, è possibile scegliere il livello di pressione all'entrata dei canali (o la portata se necessario), come mostrano le finestre di setup di Figura 97, la quantità di 3 bar è definita come ingresso di ogni singolo canale, come suggerito dalle indicazioni fornite dalla società Techno.

Cooling Settings

Item	Value	Unit
Cooling method	General	-
Initial Mold Temperature	80	oC
Air Temperature	25	oC
Eject Temperature	190	oC
Cooling Time	32	sec
Mold-Open Time	5	sec
Mold preheat	Setting	

Cooling channel
Setting : By pressure

Channel ID	T (oC)	P (Bar)	Coolant	D (mm)
EC1 (Group 1)	60	3	Water	-
EC2 (Group 2)	60	3	Water	-
EC3 (Group 3)	60	3	Water	-
EC4 (Group 4)	60	3	Water	-
EC5 (Group 5)	60	3	Water	-
EC6 (Group 6)	60	3	Water	-

Figura 97 – Setup del raffreddamento in Moldex3D

Poi, per quanto riguarda le opzioni possibili sul canale caldo, esistono in Moldex diverse approcci di calcolo, dove il programma stesso suggerisce tre impostazioni differenti: la Figura 98 evidenzia la distribuzione di temperatura nel canale caldo, in base alle casistiche prescelte, da sinistra a destra

Per il nostro caso idealizzato, è stato scelto l'approccio di tipo 1, sia per semplicità sia per allinearsi alle simulazioni precedenti: con questa impostazione di tipo 1, si sceglie di adottare una temperatura iniziale del canale caldo pari alla temperatura di iniezione della massa fusa.

Approach 1 Approach 2 Approach 3

Filling_Temperature [°C]

240.000
226.667
213.333
200.000
186.667
173.333
160.000
146.667
133.333
120.000
106.667
93.333
80.000
66.667
53.333
40.000

Ideal Hot Runner Model(Approach 1): adopt hot runner initial temperature same as melt entrance temperature
Detailed Hot Runner Model(Approach 2): adopt detailed and non-uniform hot runner initial temperature
Generalized Hot Runner Model(Approach 3): adopt initial temperature different to inlet temperature

Criteria for short shot
Maximum filling time : 0.9 sec (Filling time : 0.7 sec)

VP switch-over option
 VP switch-over follow packing pressure profile

Hot runner initial temperature
Hot runner initial temperature = Melt temperature - 0 = 295 oC
(Melt Temperature : 295 oC)

Figura 98 – Setup del canale caldo con diversi scenari

5.3.2. Riempimento e mantenimento

Il programma Moldex presenta numerose variabili in output da poter osservare, ma ai fini di questa trattazione saranno considerate solo le più importanti e di comune impiego.

I risultati di riempimento si allineano alle previsioni precedenti, con incremento di temperatura fino a circa 303°C. come è lecito aspettarsi il decadimento di temperatura è molto veloce per la superficie del pezzo in seguito al primo contatto con lo stampo a 80°C; dalla Figura 99 si osserva la mappa di temperatura e la distribuzione statistica.

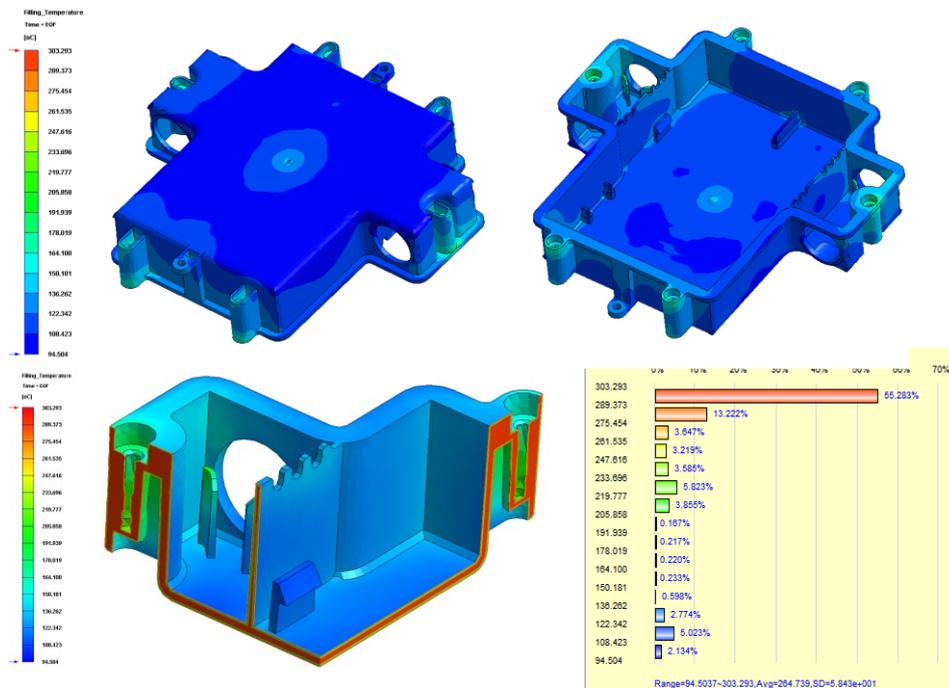


Figura 99 – Temperature alla fine del riempimento, con vista in sezione e diagramma statistico

Questa volta il tempo di riempimento è stato correttamente interpretato, probabilmente grazie alle informazioni complementari del profilo di portata e di pressione; difatti in Figura 100 si vede come il riempimento della cavità avviene nel tempo limite massimo di 0,729s

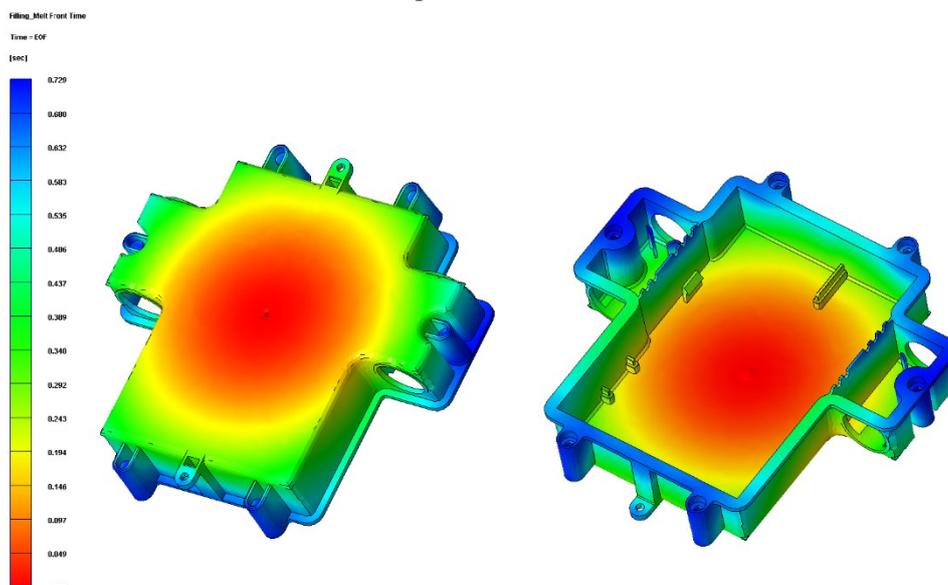


Figura 100 – Tempo di riempimento

I valori di densità stimati in seguito alla fase di impaccamento, si aggirano tra 1,33 e 1,38 g/cc (Figura 101). Si nota come la densità sia maggiore nell'intorno del punto di iniezione a seguito dell'inserimento di materiale aggiuntivo durante il mantenimento; è proprio in queste zone che si riesce a compensare il ritiro del materiale che avviene in tutta la cavità tramite una adeguata pressione.

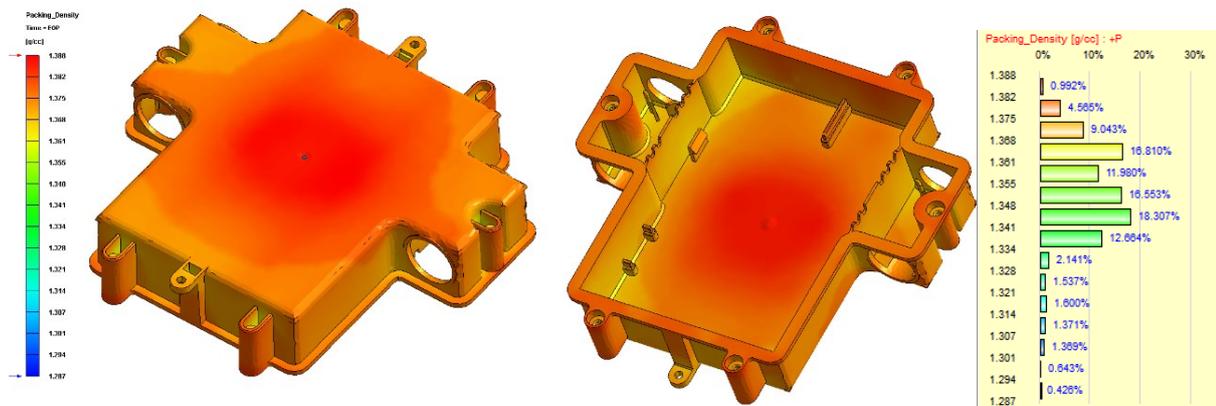


Figura 101 – Densità alla fine dell'impaccaggio

Un grafico interessante è quello relativo al cosiddetto 'Melting core' (Figura 102) ossia, l'iso-superficie della temperatura di congelamento della plastica fusa dove la regione racchiusa dalle iso-superfici ha una temperatura superiore a quella di congelamento specificata nella condizione di processo; in altre parole, la regione visibile è la porzione di materiale che non si è solidificata.

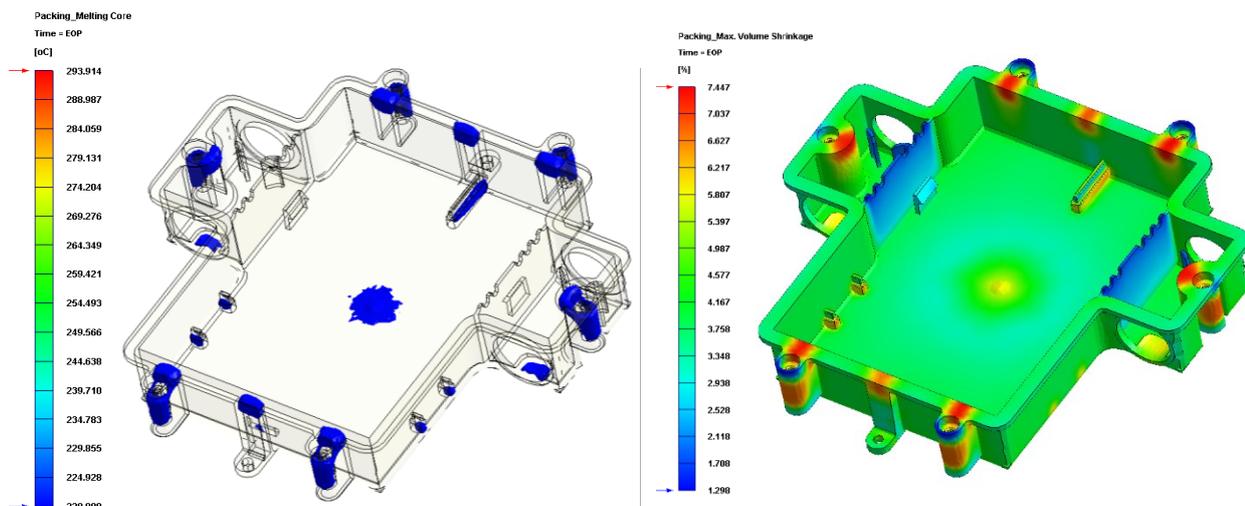


Figura 102 – Melting core, a sinistra; massimo ritiro volumetrico, a destra

Le aree contrassegnate sembrano corrispondere effettivamente alle zone critiche del componente precedentemente individuate, eccetto per la zona in prossimità dello spot di iniezione, trascurabile. Il risultato del restringimento volumetrico mostra la distribuzione della percentuale di variazione del volume della parte quando la parte viene raffreddata dall'alta temperatura e dall'alta pressione al momento attuale alla temperatura ambiente e alla pressione ambiente. Questo calcolo si basa sulla relazione PVT del materiale plastico. Il valore positivo rappresenta la contrazione del volume mentre il valore negativo rappresenta l'espansione del volume dovuta all'eccessivo impaccaggio. Il ritiro volumetrico non uniforme è causato da distribuzione di temperatura o pressione non uniforme.

Generalmente, è ben noto come un ritiro volumetrico non uniforme può portare a deformazione dopo l'espulsione della parte e sforzo residuo termo-indotto se lo sforzo non si trasforma in deformazione.

5.3.3. Pre-Analisi di raffreddamento

L'unica indicazione di massima per il raffreddamento derivata dalla fase di riempimento, è il calcolo approssimato del tempo stesso di raffreddamento: il valore limite calcolato corrisponde a circa 16,4 secondi. (Figura 103) Questo è il tempo stimato dai risultati dell'analisi di riempimento per la temperatura calcolata della superficie della cavità dello stampo e la temperatura centrale stimata della parte in plastica per essere sufficientemente raffreddata per essere espulsa. Questo valore può essere utilizzato come indicatore degli hot spot e fattori di contrazione utili al tempo ciclo.

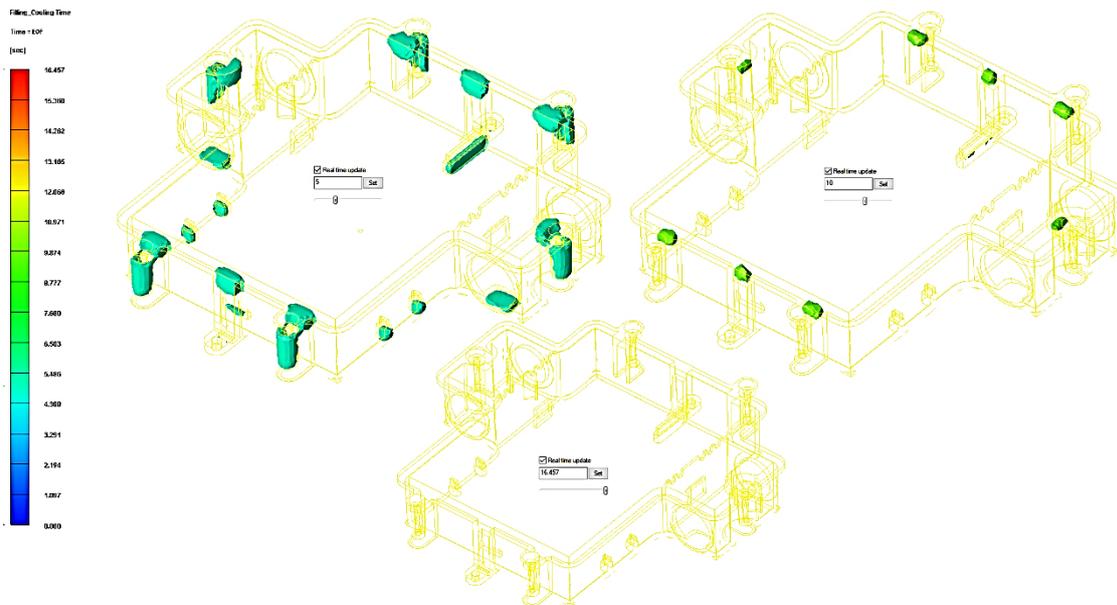


Figura 103 – Tempo di raffreddamento stimato durante la fase di riempimento, vista dei 3 casi in iso-superfici per 5,10 e 16,457s

Osservando i grafici iso-superfici emerge che un tempo di soli 10 secondi sembra essere già sufficiente per il raffreddamento del componente, esclusi i rimanenti hotspot; ancora, proseguendo fino a 12-13s sono stati osservati risultati migliori praticamente come già sperimentato nelle prime simulazioni con SolidWorks. Questo confronto sembra essere quindi una conferma approssimata anche dei calcoli iniziali elaborati da SolidWorks a conferma del tempo necessario all'estrazione del pezzo se ci si limitasse al 90% del consolidamento della massa fusa.

5.3.4. Raffreddamento

Le analisi di raffreddamento non discernono alcun caso di confronto, se non in base alla risoluzione della mesh di calcolo, per la quale è stato riscontrato qualche miglioramento in termini di precisione. È risaputo come aumentano il numero di nodi ed elementi in una simulazione FEM sia possibile aumentare i gradi di libertà del problema e avvicinarsi sempre più a risultati reali e corretti, a netto svantaggio però dei tempi di calcolo. Il test di confronto prevedeva essenzialmente una mesh grossolana di default nell'intorno di 4mm contro un nuovo setup di mesh di lunghezza massima degli elementi di 2,3mm. Questa distinzione può essere utile a volte nel riempire meglio le curvature di un pezzo solido, e quindi anche aiutare la mesh ad adattarsi al meglio alle zone critiche.

Per evitare di riportare immagini ripetitive, si vuole mettere in evidenza sostanzialmente la qualità del calcolo ottenuta nei due casi, limitatamente al tempo e alla temperatura alla fine del raffreddamento.

Nell'analisi del raffreddamento, la mesh grezza riporta un tempo di raffreddamento più lungo del solito di 41.3 secondi, Figura 104. In verità osservando il grafico iso-superficie si nota come già solo per 32s il risultato sembra essere più che valido, pertanto è stato stabilito che alcuni errori di simulazione hanno eccessivamente influenzato questo primo test.

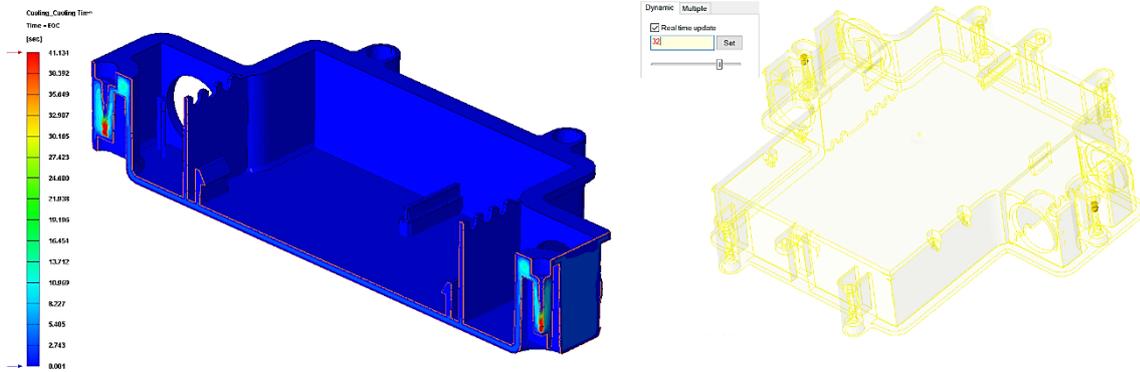


Figura 104 – Tempo di raffreddamento con vista in sezione, a sinistra, e con vista iso-superficie a destra, per la mesh grezza di partenza

Il nuovo test ha chiarito la realtà dei fatti, per cui osservando il tempo di raffreddamento calcolato per la mesh più fine di 2,3mm: otteniamo stavolta un tempo di raffreddamento più coerente e in linea con i parametri di scheda stampaggio di 34,6 secondi, Figura 105.

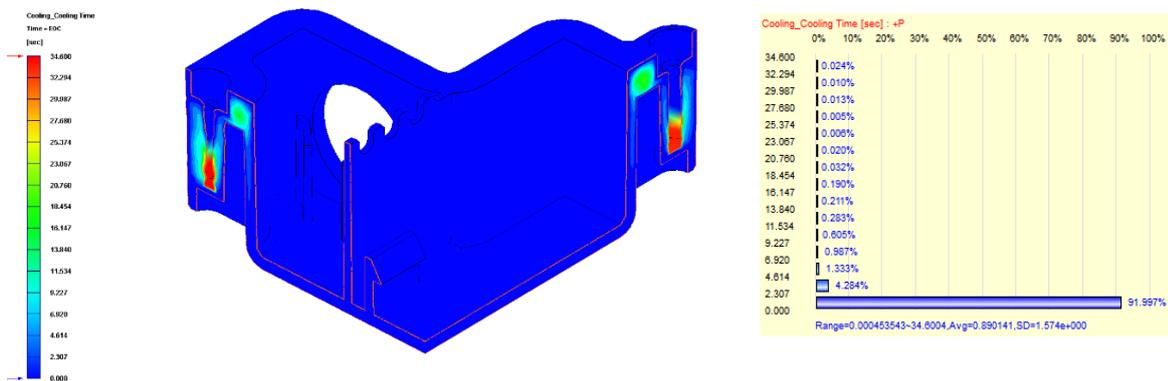


Figura 105 – Tempo di raffreddamento con vista in sezione per il pezzo con mesh a 2,3mm e relativo diagramma statistico

Anche in questo caso il grafico iso-superficie impostato a 32s concentra le ultime zone da raffreddare all'interno degli hotspot perimetrali del pezzo, Figura 106.

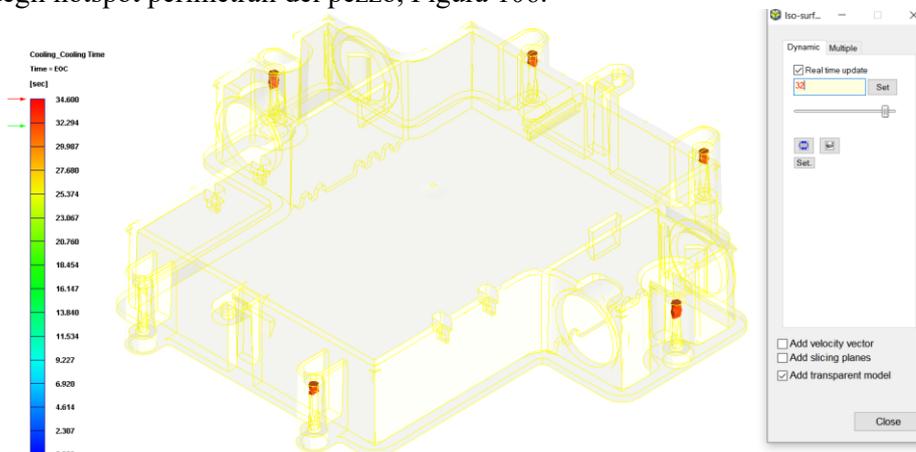


Figura 106 – Tempo di raffreddamento iso-superficie a 32s

Relativamente al solo caso di simulazione corretto, saranno mostrati gli altri risultati di output, a partire dalla temperatura alla fine del raffreddamento; la Figura 107 mostra solamente le superfici esterne del pezzo, ma da un'idea generale dei livelli di temperatura.

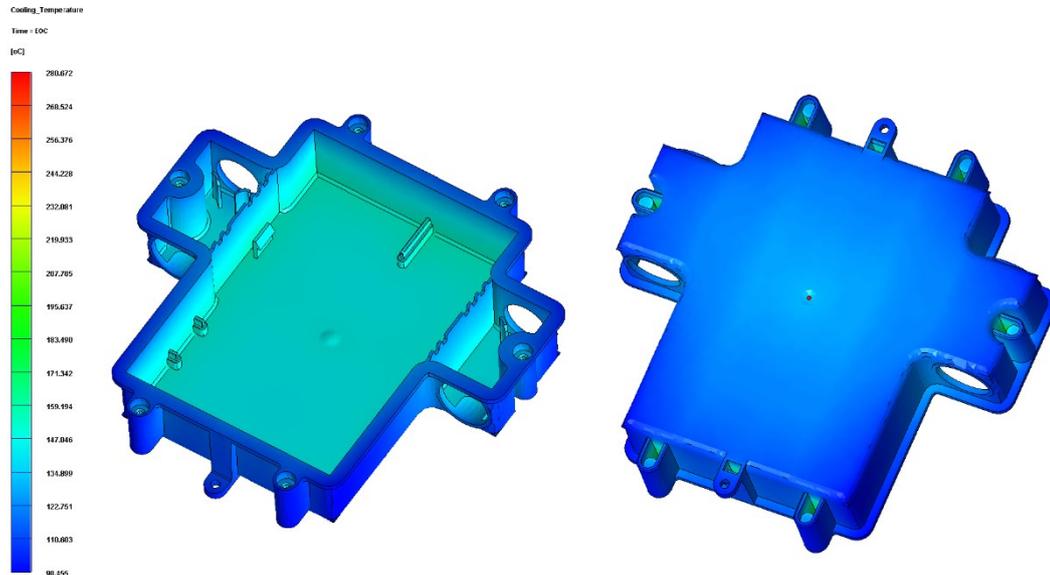


Figura 107 – Temperatura alla fine del raffreddamento

Per individuare i picchi di temperatura è necessario far riferimento all'immagine di Figura 108.

Si nota come le parti ad alta temperatura sono poche e concentrate in prossimità degli incavi e dei fori perimetrali, dove si hanno gli spessori maggiori. In teoria quindi queste zone calde terminali potrebbero essere trascurate per l'estrazione del pezzo, dal momento che circa il 99% dell'oggetto di stampa è già al di sotto della corretta temperatura di estrazione.

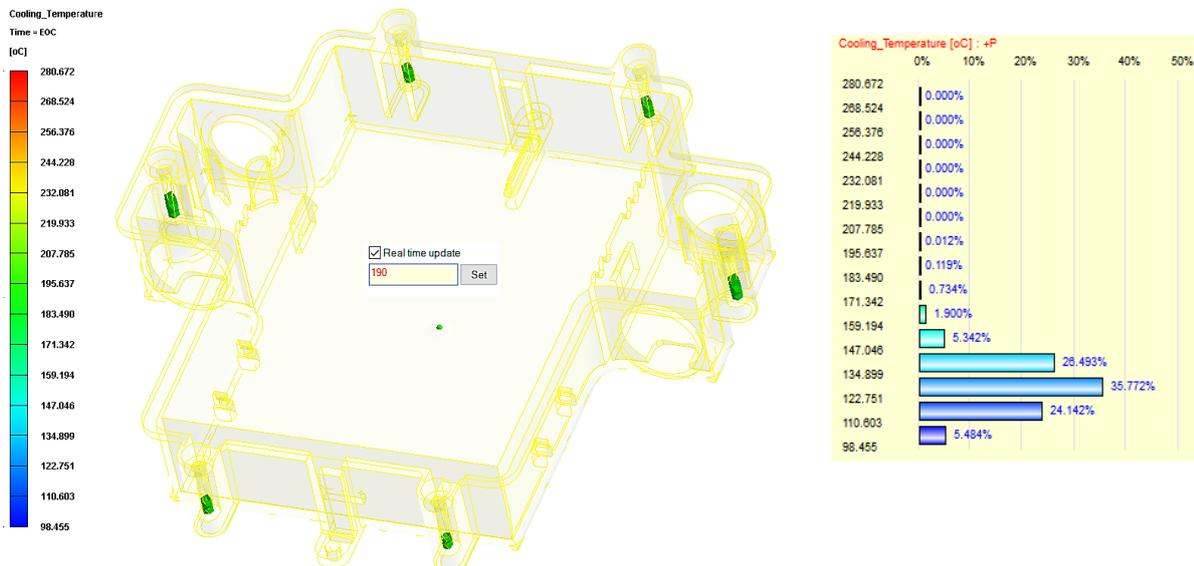


Figura 108 – Iso-superficie a 190 °C per la Temperatura alla fine del raffreddamento con diagramma statistico

I risultati ottenuti in termini di asportazione di calore, si riflettono nell'aumento di temperatura del liquido refrigerante: come da Figura 109, è stato ottenuto un incremento massimo di circa 17°C, per la simulazione a canali convenzionali, per cui il massimo si ritrova nel canale n° 6 e in altri punti del canale n°2 con dei delta_T di circa 10°C.

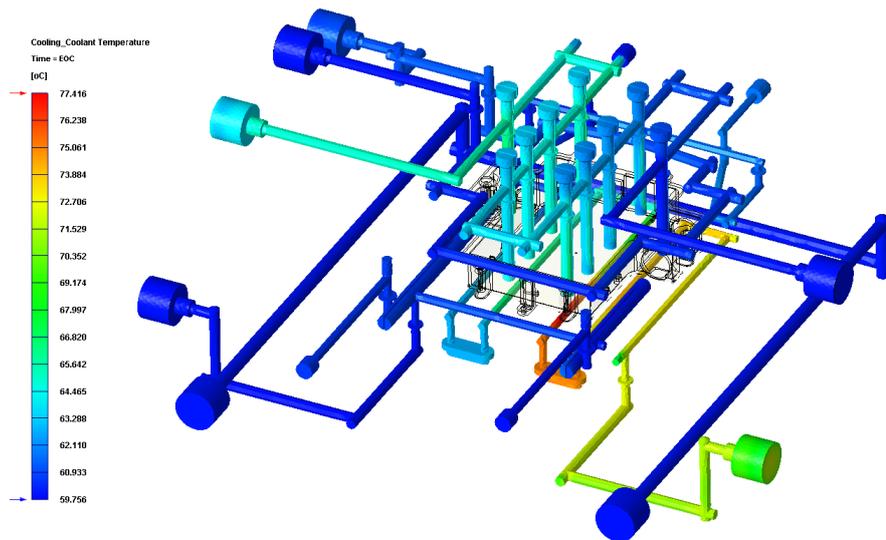


Figura 109 – Incremento di temperatura del liquido refrigerante

Ancora, la qualità del layout del sistema refrigerante evidenzia per ogni canale un'efficienza variabile fino al massimo di 33,7% per il canale n°2 che contiene i numerosi baffles deviatori di flusso, Figura 110. il canale a peggior efficienza risulta essere quello innestato in uno dei due carrelli, e visibile in colore blu.

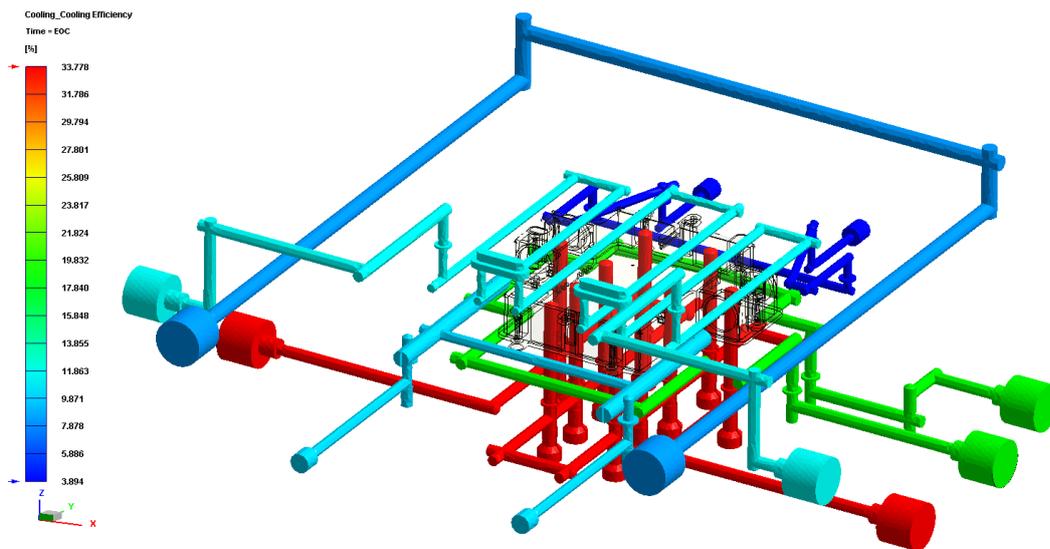


Figura 110 – Efficienza dei canali di raffreddamento

Questo risultato mostra l'efficienza di raffreddamento di ciascun canale di raffreddamento. Mostra la percentuale di calore prelevata dal canale di raffreddamento.

Se Q_i è il calore totale che fluisce nella superficie del canale di raffreddamento i -esimo. Quando Q_i è positivo, significa che il calore totale viene assorbito dalla sua superficie e l'efficienza di raffreddamento è definita dalla seguente equazione:

$$Efficienza\% = \frac{Q_i}{Q_a + Q_{ma}} 100$$

dove Q_a è il calore totale assorbito attraverso la superficie del canale di raffreddamento e Q_{ma} è il calore totale assorbito attraverso la superficie dello stampo attraverso l'ambiente circostante.

Quando Q_i è negativo, significa che il calore totale viene rilasciato dalla sua superficie e l'efficienza di raffreddamento è definita come la seguente equazione

$$Efficienza\% = \frac{Q_i}{Q_r + Q_{mr}} 100$$

dove Q_r è il calore totale rilasciato attraverso la superficie del canale di raffreddamento e Q_{mr} è il calore totale rilasciato attraverso la superficie dello stampo attraverso l'ambiente circostante. Il valore positivo rappresenta l'efficienza di raffreddamento, mentre il valore negativo rappresenta l'efficienza di riscaldamento.

Infine, è possibile valutare i risultati grafici di temperatura centrale e temperatura mediata, con picchi di 180°C e 187°C , Figura 111.

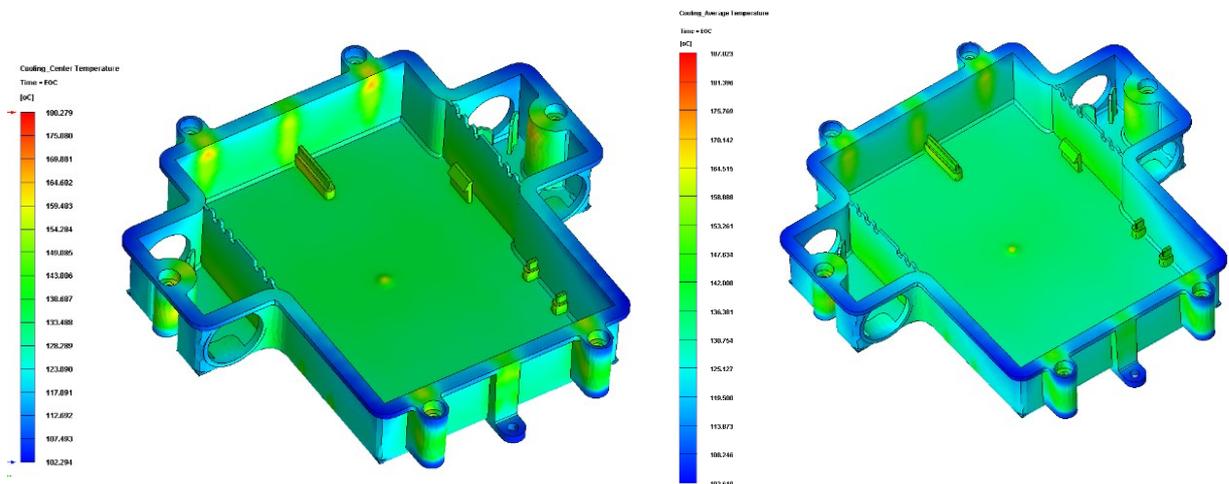


Figura 111 – Temperatura centrale, a sinistra, e temperatura media, a destra

La temperatura centrale è la temperatura di fusione dello strato intermedio (linea parziale) nella direzione dello spessore nell'istante corrente. La temperatura centrale è un indicatore della fornitura di energia termica della massa fusa. In generale, la temperatura centrale è un indicatore di riempimento incompleto (short shot). Se la temperatura centrale è troppo bassa, si verifica un'esitazione del flusso e si verificherà un problema di riempimento.

La temperatura media invece è la temperatura mediata attraverso lo spessore della parte nell'istante corrente. Considera l'effetto del raffreddamento dello stampo e del riscaldamento viscoso del fuso, ed è rappresentativa della temperatura del pezzo. Questi dati possono essere utilizzati per verificare l'effetto combinato del riscaldamento viscoso del polimero fuso e del raffreddamento dello stampo.

È utile per esaminare se esiste un punto caldo che causerà problemi di bruciature e la possibilità di short shots a causa dell'esitazione del flusso e dell'eccessivo raffreddamento dello stampo. Per questa applicazione i risultati sono di buona qualità, soprattutto se consideriamo che i parametri di processo in uso sono frutto di prove sperimentali reali sulla pressa dedicata.

5.3.1. Deformazioni

Per completezza, anche se non di primaria importanza per i nostri scopi, si riporta adesso il risultato dell'analisi delle deformazioni sintetizzato nel grafico di spostamento totale. La Figura 112 esibisce la mappa a colori relativa alla distribuzione delle deformazioni.

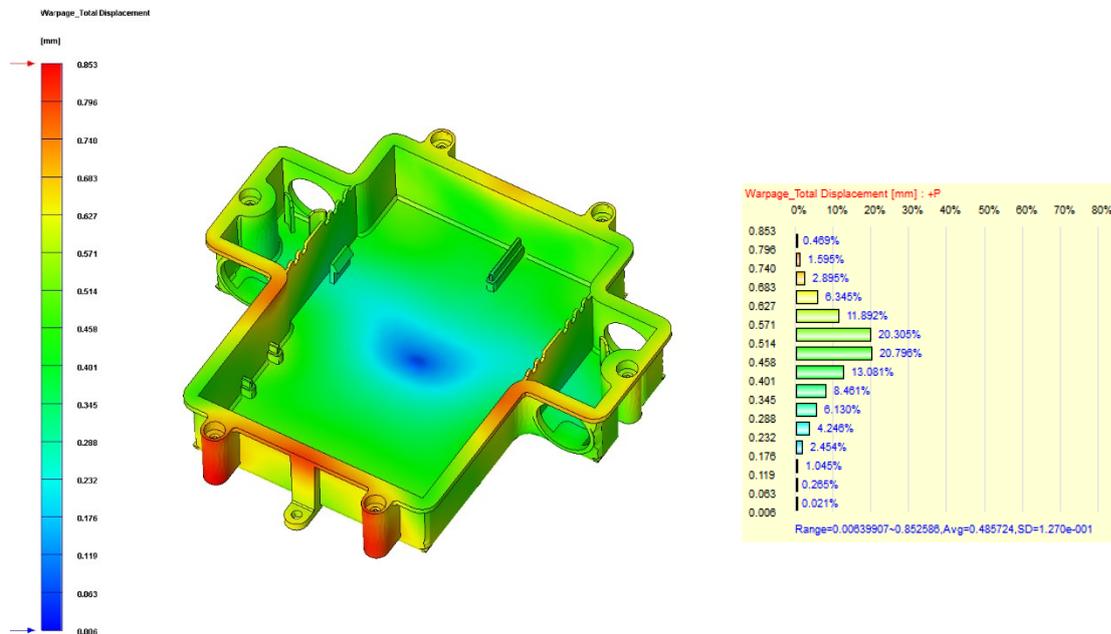


Figura 112 – Deformazione totale

Ciò che risalta da questa analisi è un valore massimo di spostamento di 0,85mm, limitato a piccole percentuali dell'intera scatola, ma per la maggior parte percentuale gli spostamenti totali oscillano tra 0,34mm e 0,68mm; valori in linea con i risultati di calcolo in SolidWorks.

C'è da considerare però che questo calcolo in Moldex contempla molteplici fattori, in base a quanto è stato scelto durante il setup. Più in dettaglio, come visibile dalla Figura 113, rammentiamo che le opzioni prese in carico riguardano gli effetti di vincolo 'In-mold', effetti di tensione residua indotti dal flusso plastico, effetto termico e simili.

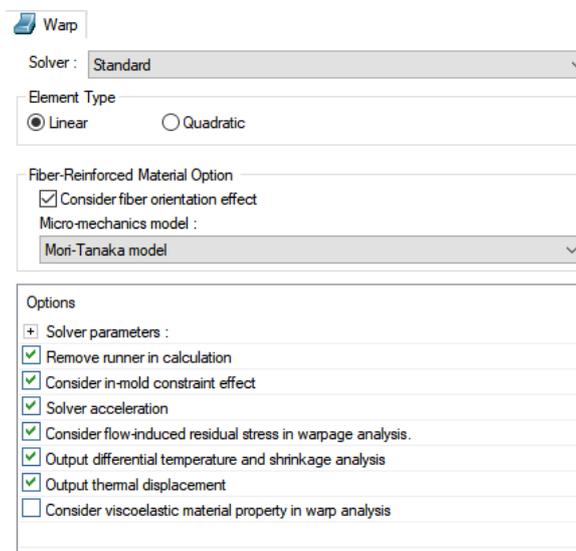


Figura 113 – Impostazioni dell'analisi delle deformazioni

6. ANALISI CON CANALI CONFORMALI

La parte centrale di questo lavoro si è focalizzata sulle opzioni possibili per migliorare un sistema di raffreddamento già esistente; a tal fine è stato progettato un nuovo design di canali, relativamente semplice, che si concentra sull'eliminazione degli hotspot del pezzo.

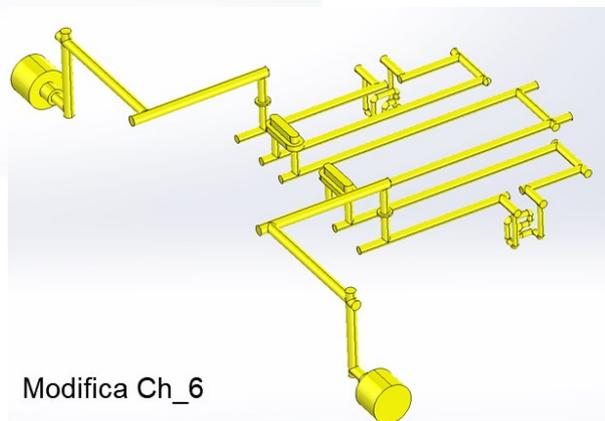
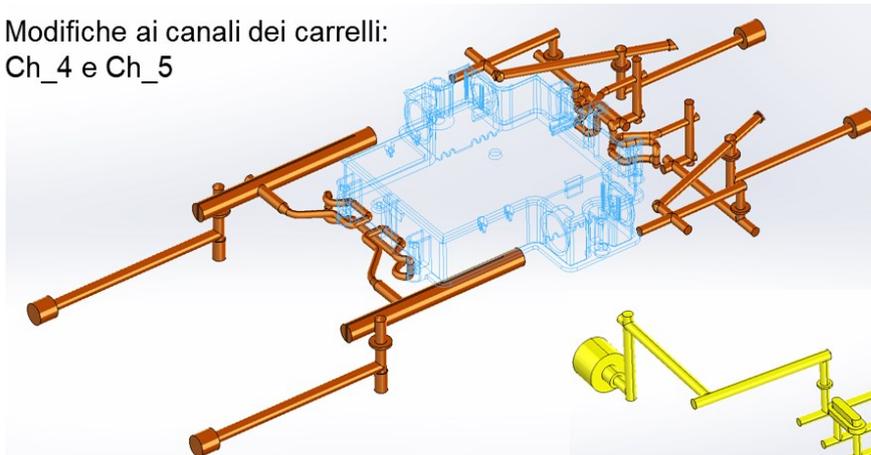
Successivamente, l'evoluzione del design ha portato alla sperimentazione di nuovi modelli di raffreddamento con piccole aggiunte e variazioni: numerose prove sono state condotte relativamente al processo di raffreddamento per ogni layout di canali conformali, ma per motivi di sintesi saranno trascritti e commentati solo i progetti di design migliori che si propongono come soluzione reale ai problemi di raffreddamento.

Ricordiamo che la richiesta implicita dell'azienda Techno consiste nel ricavare un nuovo design di raffreddamento che abbia performance migliori di quello tradizionale, ma con minime variazioni da apportare; si può comprendere infatti come la necessità di introdurre variazioni sostanziali su uno stampo già esistente sia piuttosto pesante e onerosa, specialmente se si parla di piccole produzioni industriali.

6.1. Design conformale 1

I nuovi canali conformali sono stati progettati per adagiarsi comodamente in alcune porzioni di stampo libere, ma già esistenti, per questo scopo la prima idea fondamentale è nata con l'obiettivo di migliorare l'asportazione di calore in prossimità degli hotspot, senza stravolgere il progetto di stampo originale. Pertanto, il primo design meno invasivo vede coinvolti solamente i canali n° 4, 5 e 6, perché è possibile inserirli in alcuni blocchi stampo già presenti, con minime modifiche. La Figura 114 mostra il nuovo percorso dei canali interessati dalle modifiche.

Modifiche ai canali dei carrelli:
Ch_4 e Ch_5



Modifica Ch_6

Figura 114 – Nuovi canali di raffreddamento n°4 e n°5 (in alto), e n°6 (in basso) con porzioni personalizzate

Le operazioni di modellazione del nuovo layout sono state interamente condotte in SolidWorks, poiché le funzioni di 'sweep' basate su schizzi 3D sono molto utili ed efficaci alla definizione di semplici canali circolari. Solitamente per nuove applicazioni è preferibile testare un layout di raffreddamento completamente diverso, che possa sfruttare al massimo gli ingombri delle piastre, note la distanza di sicurezza; un'operazione di questo tipo può essere svolta agevolmente con dei tool semi automatici messi a disposizione da software come 'Cimatron', con alte potenzialità, ma che in questa sede non sono stati sfruttati viste le molteplici limitazioni del caso.

Difatti, se l'obiettivo è apportare piccole modifiche personalizzate, i comuni programmi di ausilio alla modellazione sono più che sufficienti per lo scopo.

Le porzioni di stampo interessate da queste modifiche sono state isolate e mostrate in Figura 115. I blocchi considerati fanno parte degli inserti carrello e della piastra matrice contenente il canale caldo. Sorprendentemente, lo spazio materiale a disposizione si è rivelato sufficiente per la modellazione di piccoli canali conformali di diametro di 4mm.

Questo design di raffreddamento è possibile solo in virtù della tecnologia che sarà impiegato per la loro realizzazione; tramite le tecniche di fabbricazione additiva è molto agevole produrre inserti personalizzati con geometrie complesse anche all'interno stesso del pezzo di acciaio, e in merito al nostro problema, la pratica prevede il taglio di questi alcune porzioni di piastre per potervi costruire sopra direttamente mediante tecnologie A.M. ibride.

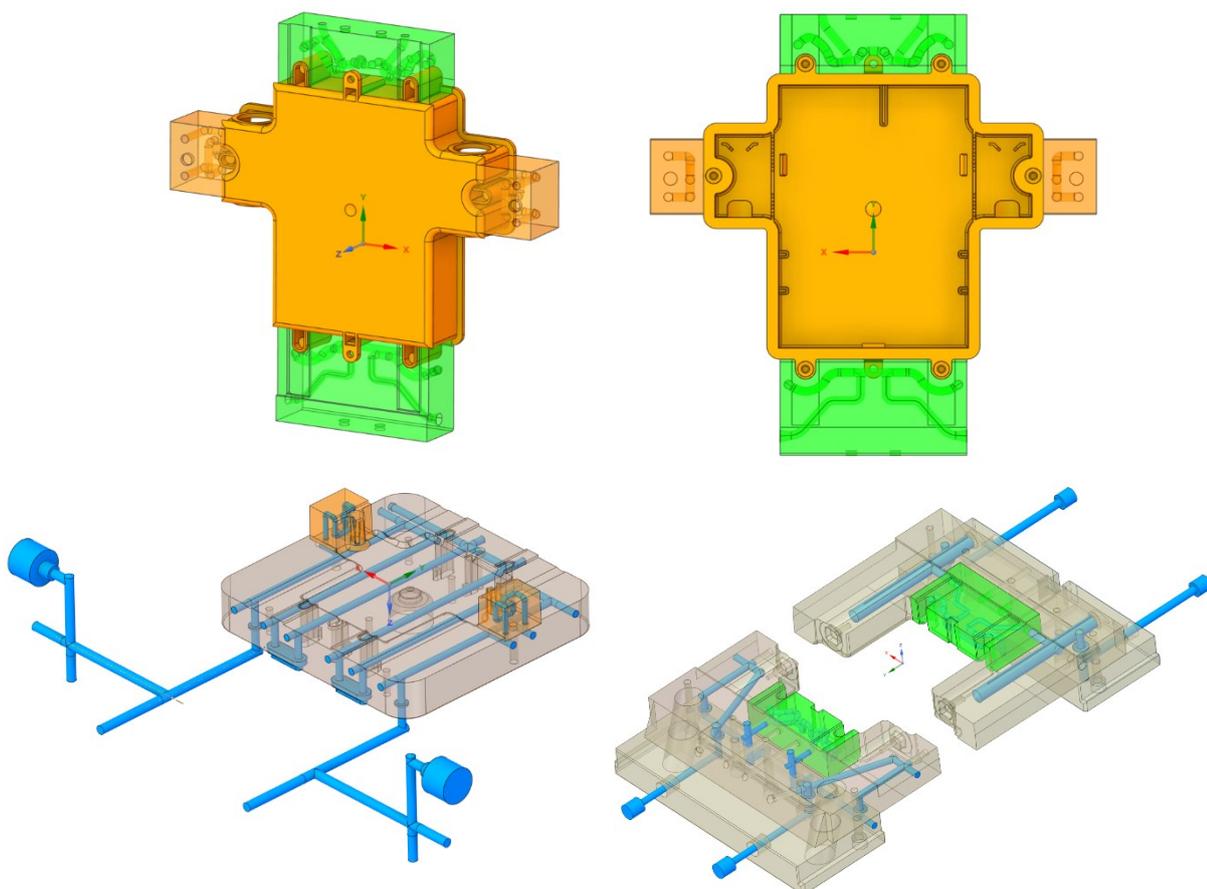


Figura 115 – Blocchi contenenti i tratti di canali conformali, da associare ai canali già esistenti

Nonostante le grandi opportunità disponibili oggi, le richieste del cliente affidatario del progetto, sono molto limitate per quanto riguarda i costi di conversione dello stampo da raffreddamento tradizionale a conformale; per questo motivo il piano prevede di realizzare a parte gli inserti con la tecnica SLM o LPBF per poi essere uniti mediante fissaggi o saldature, allineando i diametri dei canali alle interfacce dove presenti.

Sommariamente, si ritengono più che fattibili le modifiche da effettuare per questa reale applicazione, inoltre, come unico fattore di complicanza bisogna tenere presente l'operazione di foratura della piastra porta carrello per l'aggiunta di canali di collegamento, dal momento che non ha un afflusso diretto dal canale originario di partenza; la porzione di collegamento è evidenziata in colore blu come da Figura 116.

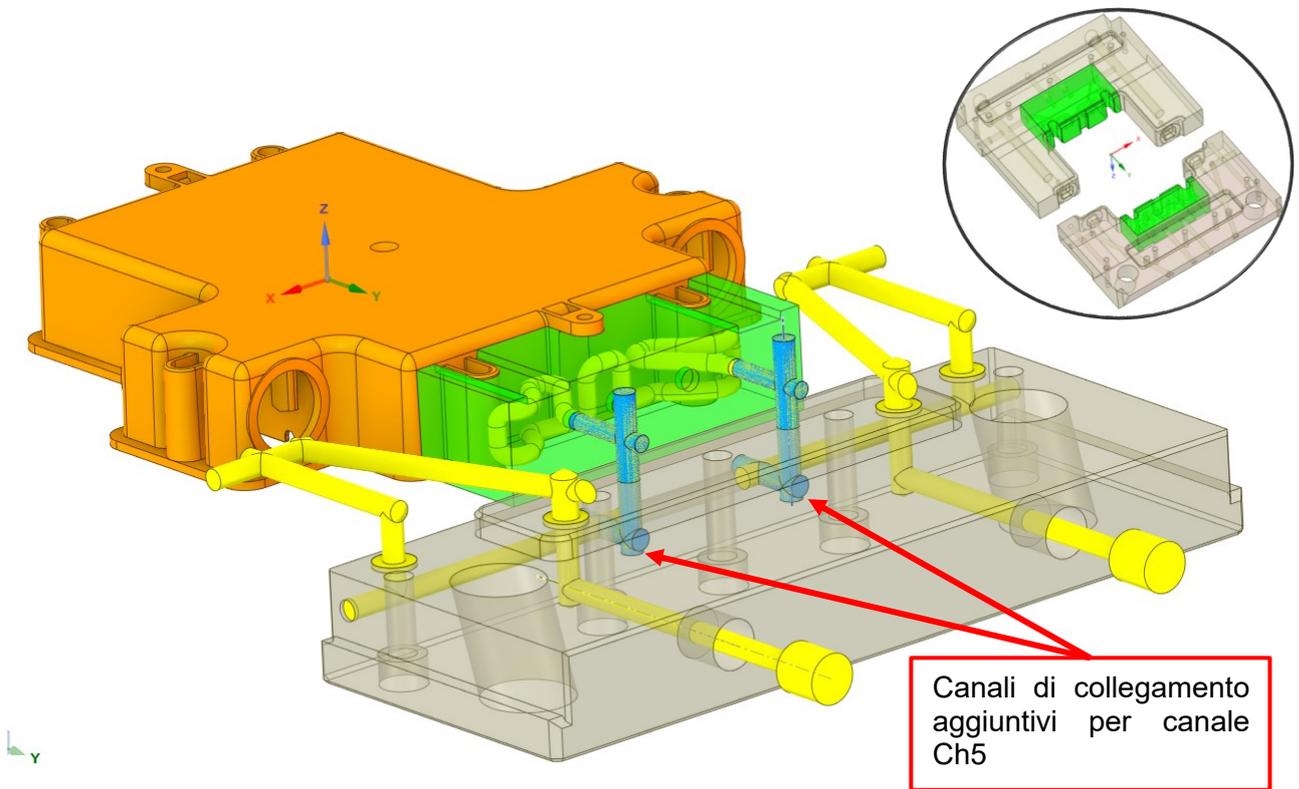


Figura 116 – Vista del canale n° 5 e relativi blocchi di attraversamento

Non sono presenti ostacoli tecnici allo sviluppo di questo design, pertanto in condizioni di sicurezza, con piccole modifiche strutturali questo layout di raffreddamento di tipo 1 è il candidato migliore in termini di applicabilità e fabbricazione.

6.1.1. Analisi di raffreddamento

I nuovi test di raffreddamento sono stati interamente svolti nell'ambiente di simulazione Moldex3D, bypassando le limitazioni dei precedenti software; le potenzialità di questo programma giustificano ampiamente la scelta, soprattutto in virtù della corretta esecuzione dei processi di calcolo, semplicità e completezza delle opzioni di setup e dei risultati di output, Postprocessing con annesse distribuzioni statistiche ecc..

Ciononostante, molte altre prove hanno avuto luogo parallelamente negli altri software, seppur con scarsi risultati, per completare il processo di valutazione; in questo testo saranno però riportate solo le analisi più rilevanti, se necessario.

Limitatamente ai nuovi canali conformali, a causa dei problemi riscontrati in alcune simulazioni, al fine di simulare il percorso del fluido refrigerante nei canali, senza errori di flusso e velocità, è stato necessario eliminare i solidi di estremità IN/OUT che rappresentavano i connettori dei canali, senza alterare la posizione stessa della superficie di ingresso (Figura 117).

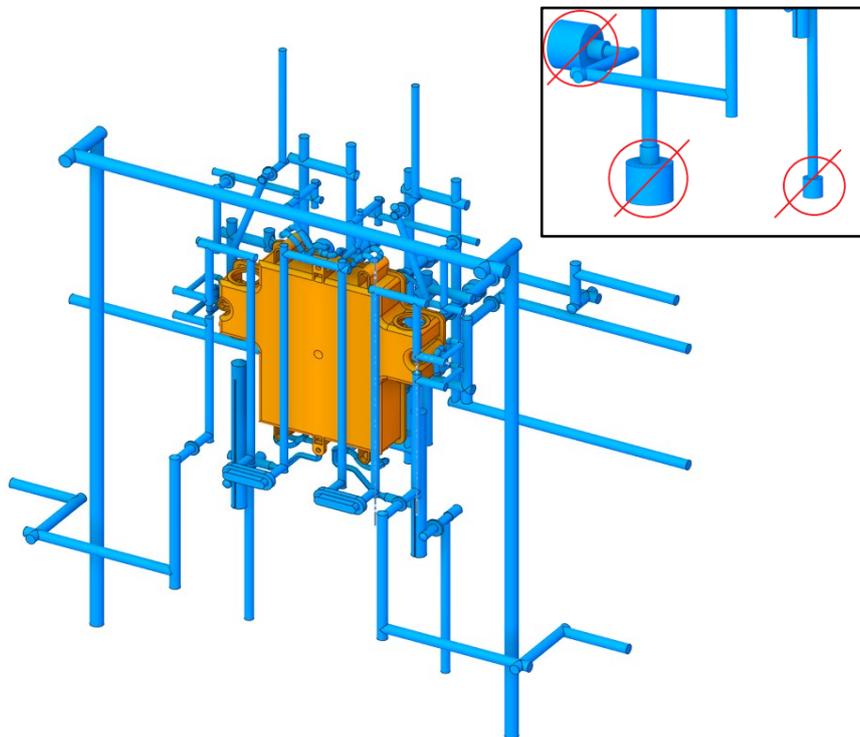


Figura 117 – Layout di raffreddamento conformale senza i connettori di estremità

L'ingresso dei canali a forma cilindrica maggiorata crea delle instabilità delle linee di flusso per cui non è sempre immediato il calcolo del dominio di acqua da parte del programma Moldex, che nella versione datata a disposizione mostra qualche piccola difficoltà di interpretazione.

Inoltre, dal momento che i tratti di canale conformale aggiungono perdite di carico importanti, i test hanno dimostrato che è necessario avere una pressione maggiore agli inlets di questi canali, di circa 4 bar. In seguito sarà argomentato anche questo aspetto tecnico, nella relativa sezione di raffreddamento.

In confronto alle analisi termiche relative al layout di canali tradizionale, adesso la distribuzione di temperatura con il nuovo design conformale mostra i primi segni di miglioramento, con abbassamento della massima temperatura di oltre 5°C, e omogeneizzazione generale, Figura 118.

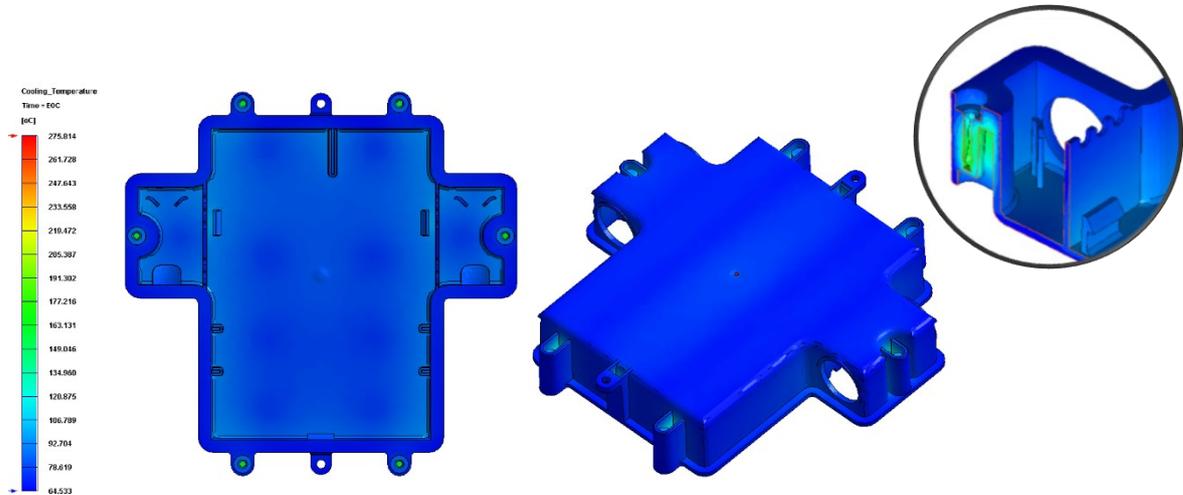


Figura 118 – Temperatura alla fine del raffreddamento per il design conformale tipo 1

Ancora, attraverso i diagrammi statistici si può confermare un netto miglioramento della distribuzione delle temperature; nella Figura 119 si osserva come nei due casi a confronto (ossia layout di canali convenzionale e nuovo layout a inserti conformali) l’abbassamento dei livelli termici e l’omogeneizzazione di questi sia in favore del nuovo design in sperimentazione.

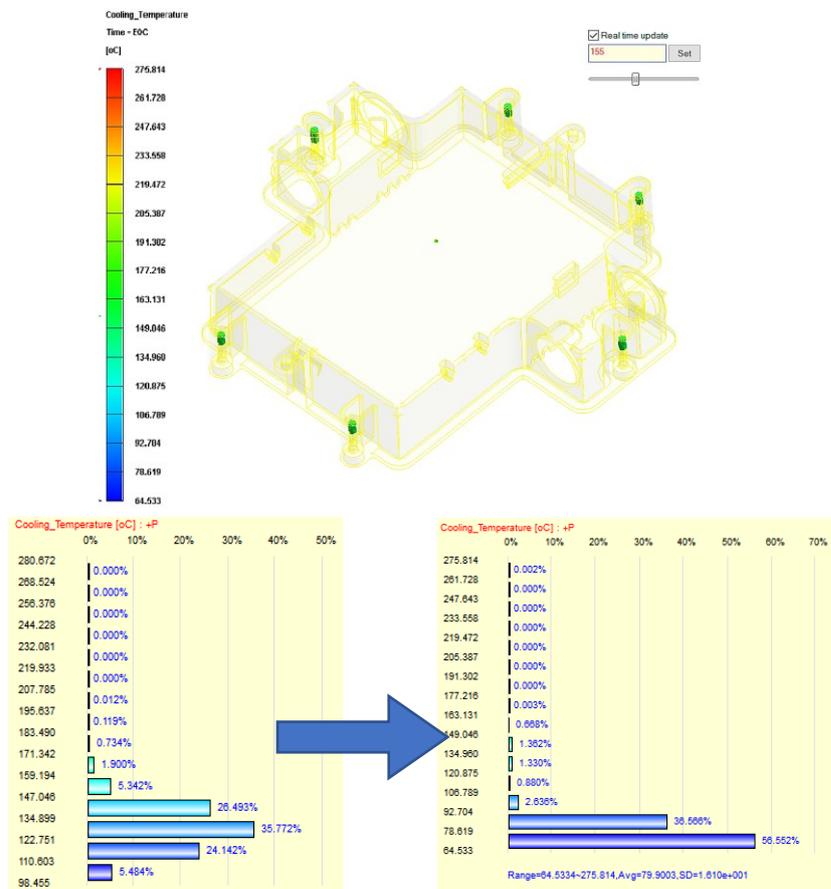


Figura 119 – Grafico iso-superficie (set a 155°C) e confronto di distribuzione statistica per la temperatura alla fine del raffreddamento rispetto al design originale

Ricordando che il tipo di raffreddamento impostato per queste simulazioni è sempre del tipo generale, di base, e settato su 32 secondi; ciononostante il programma Moldex se necessario ricalcola questo valore se attiva l'opzione di autoset, quindi è come se ottenessimo una stima del raffreddamento per il raggiungimento delle condizioni di estrazione del pezzo. Con questa premessa, tramite la Figura 120, si afferma con certezza che il nuovo tempo di raffreddamento con il layout di canali conformale è di circa 16,6 secondi. Valore praticamente dimezzato rispetto alle condizioni di progetto.

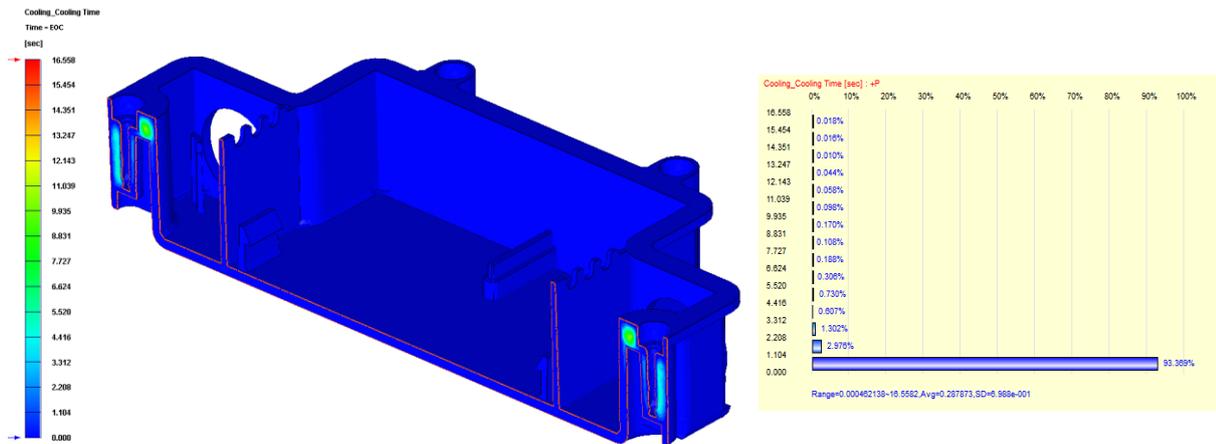


Figura 120 – Vista in sezione e distribuzione statistica per il risultato di tempo di raffreddamento

Nella vista in sezione si nota come i punti caldi siano stati parzialmente migliorati grazie a un design di canali mirato. In aggiunta, il risultato di temperatura centrale e temperatura media del pezzo volgono a favore del nuovo design: in confronto al caso originale, i dati testimoniano una diminuzione di queste soglie di temperatura di circa 35°C- 40°C, con picchi rispettivamente di circa 143°C e 146°C, Figura 121.

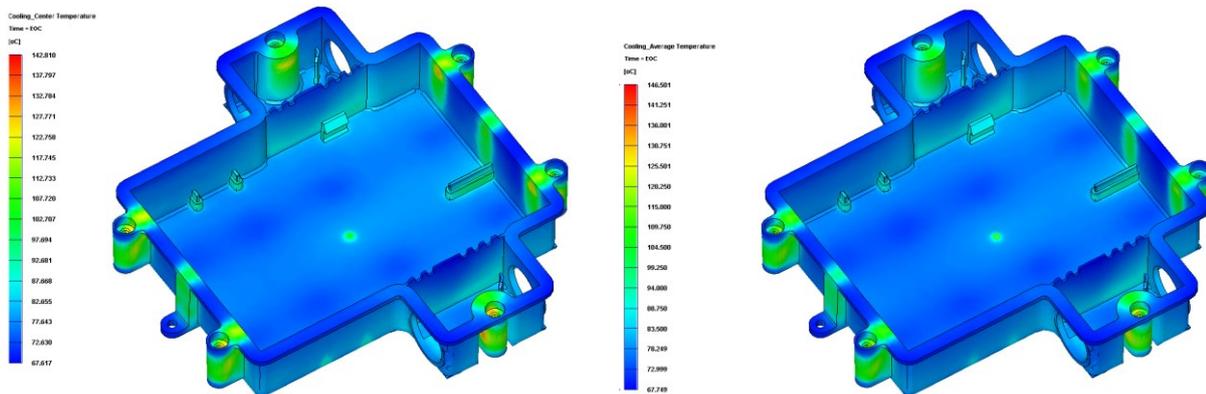


Figura 121 – Temperatura centrale, a sinistra, e temperatura media, a destra

Infine, il massimo valore di temperatura restituito dallo specifico risultato omonimo è visibile nella distribuzione cromatica di Figura 122, la quale indica soglie di 163°C, che ricordiamo fanno riferimento al nuovo tempo dimezzato di raffreddamento. La temperatura riscontrata per questo risultato è ben al di sotto della soglia limite di 190°C per la corretta estrazione del pezzo dallo stampo, a conferma dell'efficienza del nuovo design nell'asportazione di calore.

Concentrando l'attenzione sui grafici iso-superficie per il tempo di raffreddamento, si vede tramite la Figura 123 che già per un tempo di 10 secondi si assiste a un'ottima distribuzione temporale, con i piccoli hotspost in fase di consolidamento.

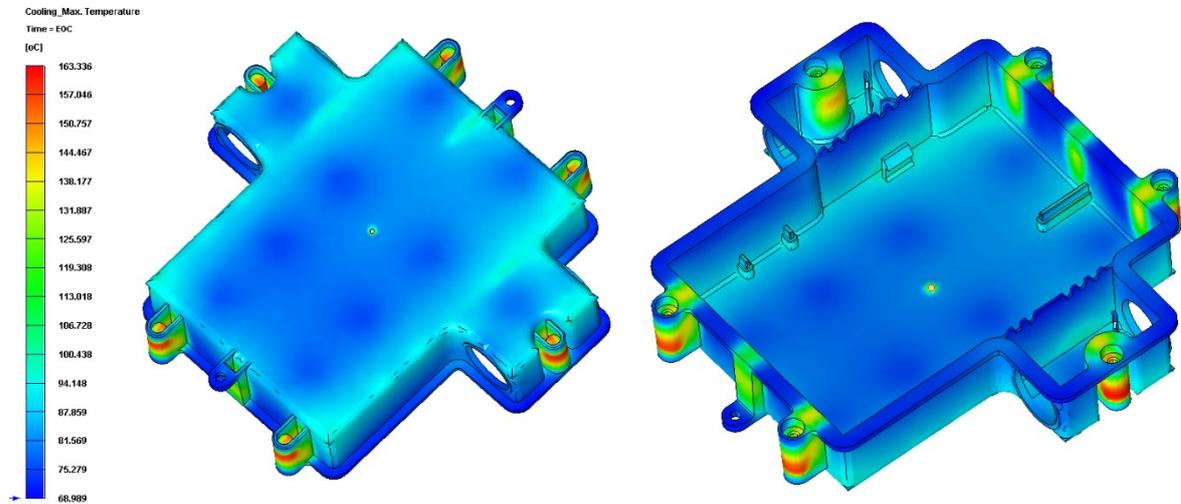


Figura 122 – Massima temperatura alla fine del raffreddamento

La situazione di raffreddamento giunge al termine completandosi intorno a 16 secondi: infatti i piccoli triangoli di mesh su cui termina il calcolo del tempo di raffreddamento sono piccoli e circoscritti. Con buona approssimazione si può quindi restringere il tempo richiesto al raffreddamento fino a 16 secondi esatti.

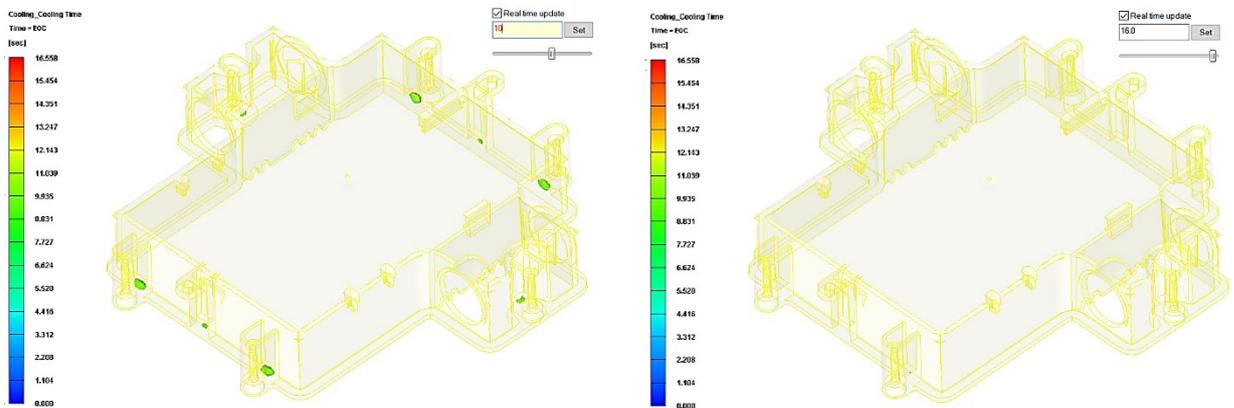


Figura 123 – Tempo di raffreddamento in iso-superficie per il design conformale tipo 1, con set su 10s, a sinistra, e 16s, a destra

Abbiamo a disposizione anche output di simulazione relative al massimo tempo di raffreddamento, che in via estrema riporta un dato di circa 11,77 secondi. Questo valore limite non è stato considerato a pieno, dal momento che sembra estremizzare troppo il processo di raffreddamento (Figura 124).

In riferimento alla mappa cromatica del massimo tempo di raffreddamento, si vuole evidenziare come le zone ancora rosse che allungano il tempo ciclo sono relative alle superfici in prossimità del canale n°3, pertanto un nuovo design di raffreddamento sarà ideato come evoluzione di questo e valutato successivamente.

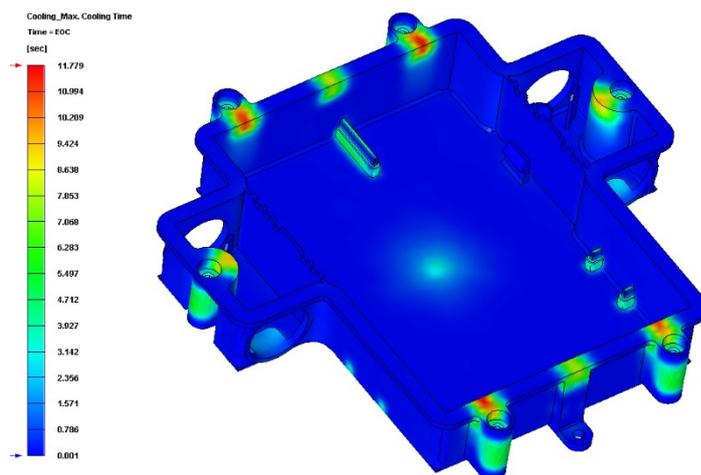


Figura 124 – Massimo tempo di raffreddamento

Il fluido refrigerante che attraversa i canali è stato idealizzato dal programma di calcolo con dei vettori velocità in Figura 125, e mostra grandezze anche piuttosto alte per questa applicazione, nel senso cioè, che il movimento del fluido è più che sufficiente per il processo di raffreddamento, avendo settato 4 bar di pressione ai soli canali (conformali) che sono stati modificati e 3 bar in quelli normali come il progetto originale prevedeva.

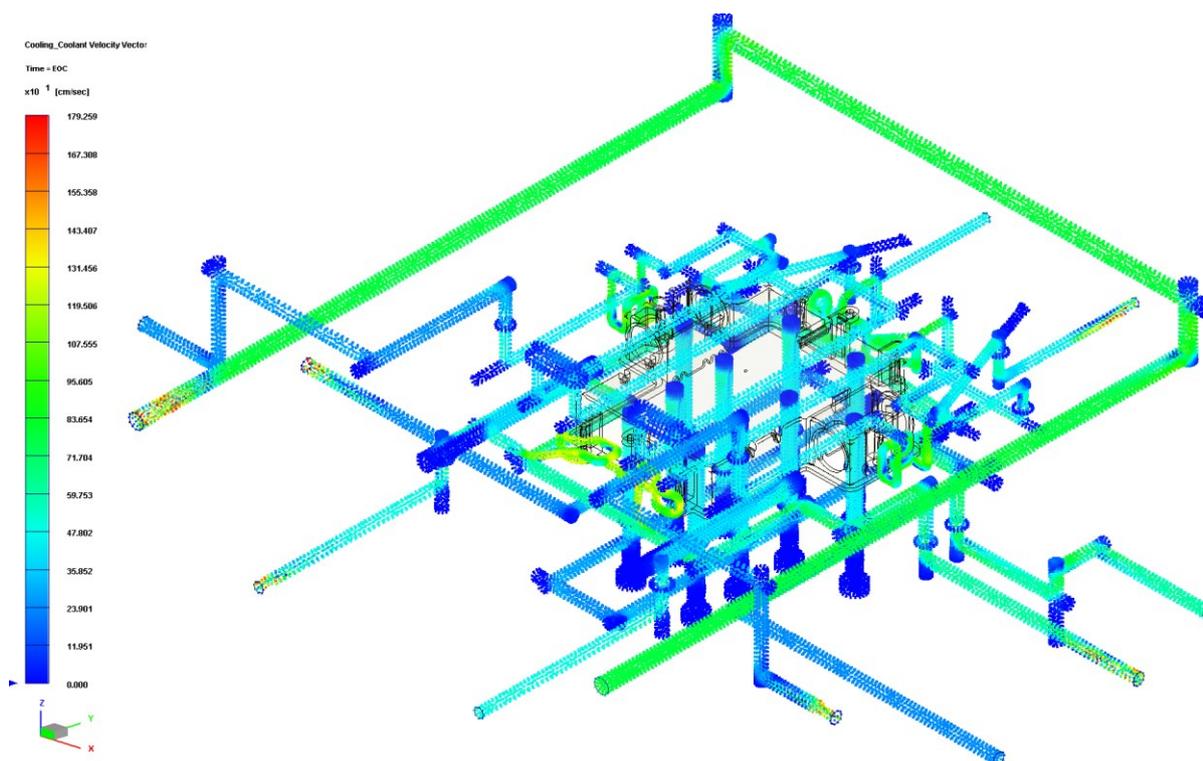


Figura 125 – Vettori velocità del liquido refrigerante

Si nota come i tratti di canale conformale a diametro minore di 4mm rappresentano un restringimento che accelera il flusso, visibili in colore giallo/verde più acceso. Allo stesso tempo anche il canale 1 più semplice e a maggior distanza presenta grandi velocità ma ciò è dovuto alle poche perdite di carico in esso presenti. Le zone in blu sono rappresentative delle minori velocità, come accade sulla punta dei baffles o nei tratti di canale morto alle intersezioni.

Le particolarità del canale n°1 riguardano anche la sua efficienza, che in varie simulazioni è stata riscontrata essere negativa, quindi come una funzione di riscaldamento contraria al raffreddamento. Ricordiamo, che il canale n°1 non era direttamente interessato alle piastre matrice e punzone, bensì limitrofo; per completezza è stato sempre aggiunto nelle simulazioni ma per valutare l'efficienza specifica dei canali. La figura 126 riporta quindi il parametro di efficienza, con e senza il canale 1 'incriminato'.

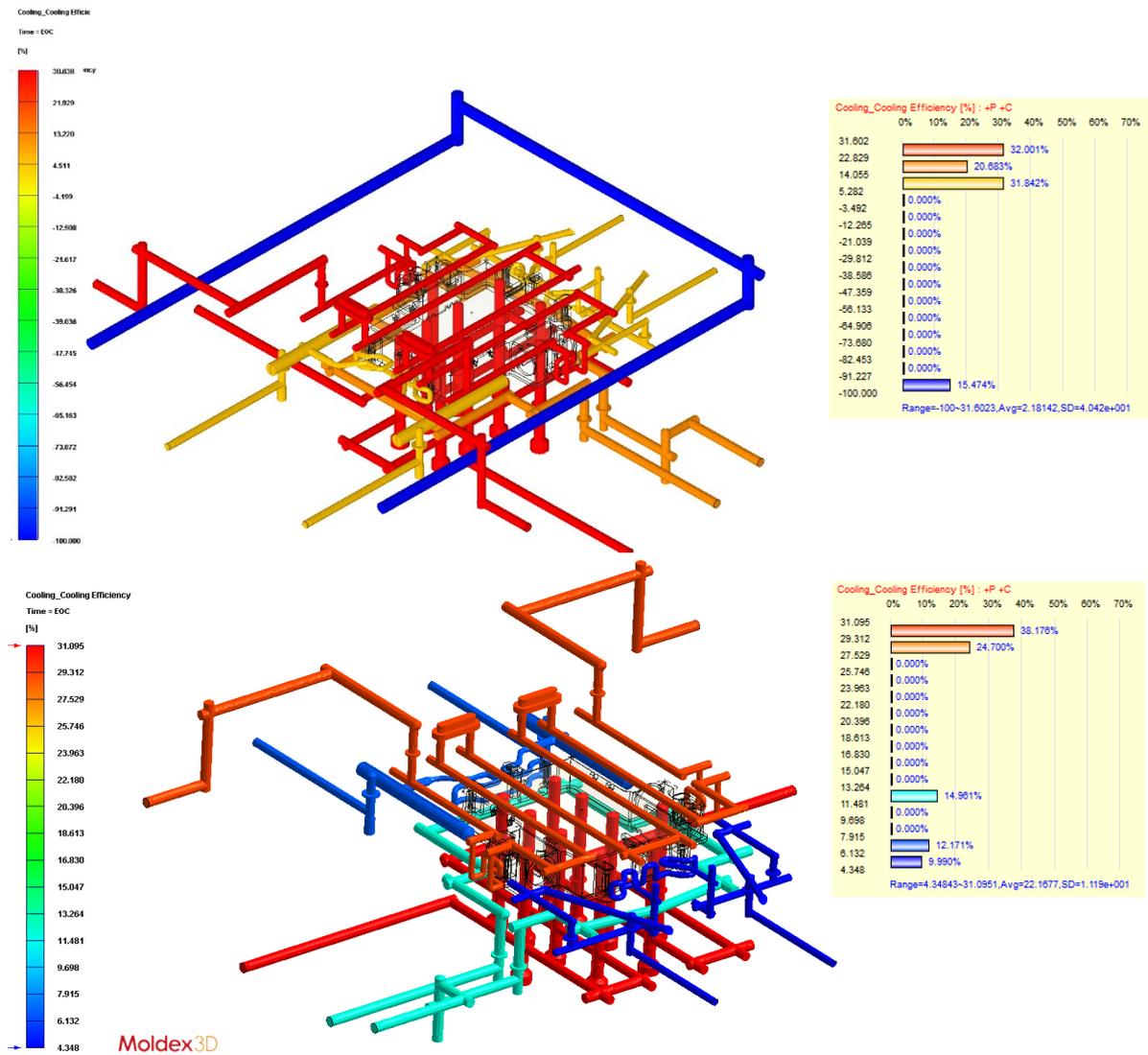


Figura 126 – Efficienza dei canali di raffreddamento con (in alto) e senza il canale n°1 (in basso)

Nell'insieme, considerando la sola immagine in basso di Figura 126 si assiste quindi alla scomparsa dei valori negativi di efficienza se si trascura il canale 1, e si nota come l'efficienza dei canali 4-5 sia invariata o aumentata di poco, mentre un ottimo risultato è stato individuato per il canale n°6, passando da circa 10% di efficienza al 30%

6.1.2. Deformazioni

I risultati di deformazione per il layout di tipo 1, sono mostrati in Figura 127, tramite la distribuzione di spostamento totale in mm.

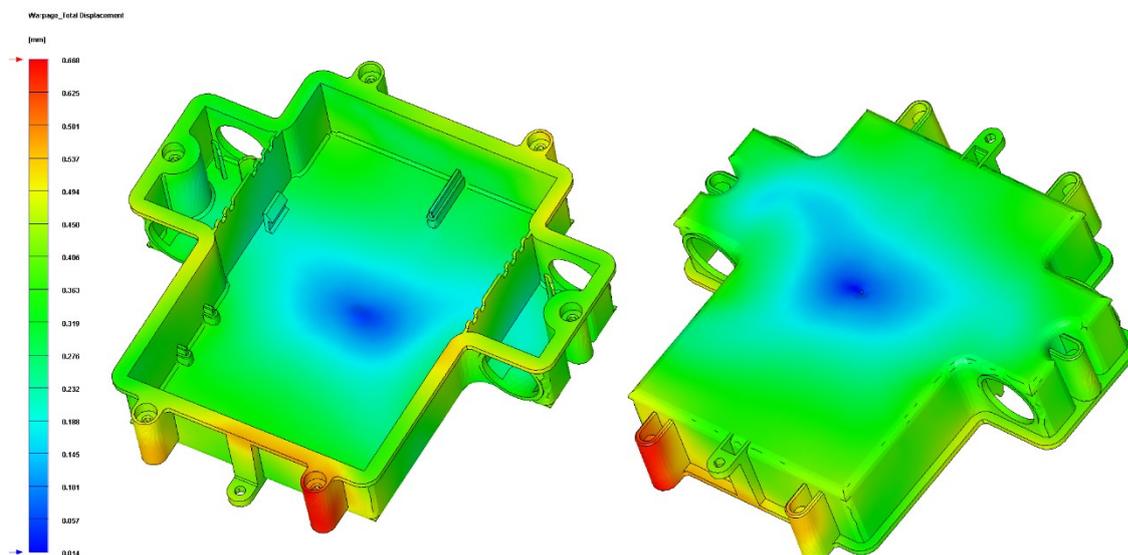


Figura 127 – Deformazione totale sul componente

Infine, conoscendo già i valori estremi max e min delle deformazioni, in Figura 128 è possibile apprezzare adesso la distribuzione della deformazione rispetto alla totalità dei risultati. La curva di distribuzione evidenzia un andamento gaussiano dove la maggior parte del pezzo esibisce spostamenti tra 0,1mm e 0,5mm.

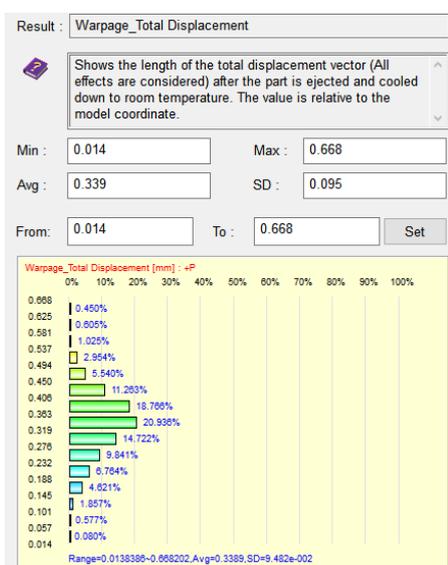


Figura 128 – Grafico di distribuzione delle deformazioni totali sul componente

Anche in questa occasione si registra un modesto miglioramento della qualità globale del pezzo, dal momento che è stata raggiunta una diminuzione della deformazione massima di circa il 21%, con una distribuzione media più orientata verso i bassi valori, a testimonianza dell'efficacia del nuovo seppur limitato layout di raffreddamento.

6.2. Design conformale 2

Come prosecuzione del primo modello conformale dei canali, è stato ideato un nuovo layout come evoluzione del primo design; in particolare il nuovo protagonista del design conformale di tipo 2 è il canale n° 3, che finora era rimasto immutato rispetto all'originale. La Figura 129 mostra il nuovo percorso del canale che presenta tratti conformali e personalizzati dove necessario.

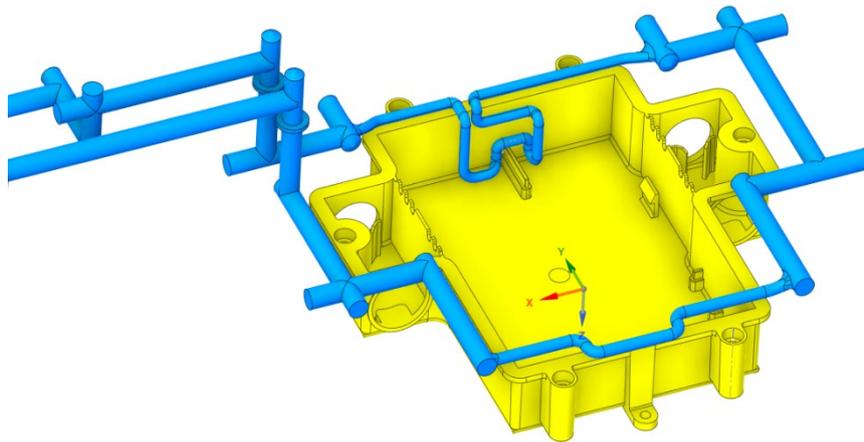


Figura 129 – Canale n°3 rimodellato con tratti conformali

Questa scelta deriva dall'osservazione delle mappe termiche relative all'analisi termica del design precedente; più in dettaglio, il nuovo design è progettato per avvicinarsi alle zone superficiali lunga la linea di separazione delle piastre stampo e vicino la protrusione centrale dal lato opposto. Questo nuovo design dei canali conformali di tipo 2 prevede la lavorazione degli inserti core nonché passaggi di fluido attraverso piastre adiacenti da isolare con guarnizioni. Già dalla semplice vista di Figura 130, si deduce il percorso del canale conformale in giallo rispetto a quello originale; per entrambi i lati interessati dalle

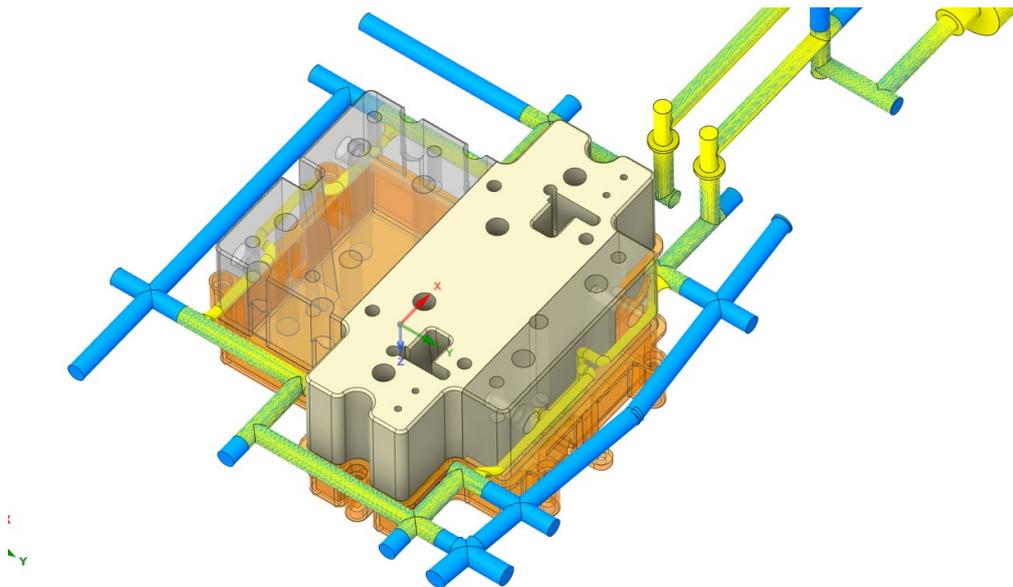


Figura 130 – Vista in sovrapposizione del canale n°3 originale (in blu) e di quello conformato (in giallo)

modifiche la realizzazione di questo layout resta piuttosto complessa poiché ci si ritrova ad attraversare piastre diverse al di fuori dei blocchi 'core' stessi.

Per di più, per motivi di spazio e interferenza sarebbe necessario eliminare o traslare due baffles deviatori; pertanto questo layout non si presta a una adozione facile e veloce, e resta quindi un test di simulazione destinato solamente a stimarne i possibili benefici come caso di studio.

Complessivamente, è stato necessario traslare due lame deviatrici di circa 18mm in direzione Y verso il centro del pezzo, per evitare interferenze senza particolari difficoltà, Figura 131. Questo tipo di operazioni di modellazione parametriche sono molto rapide in Ansys SpaceClaim che ancora una volta contribuisce alla progettazione.

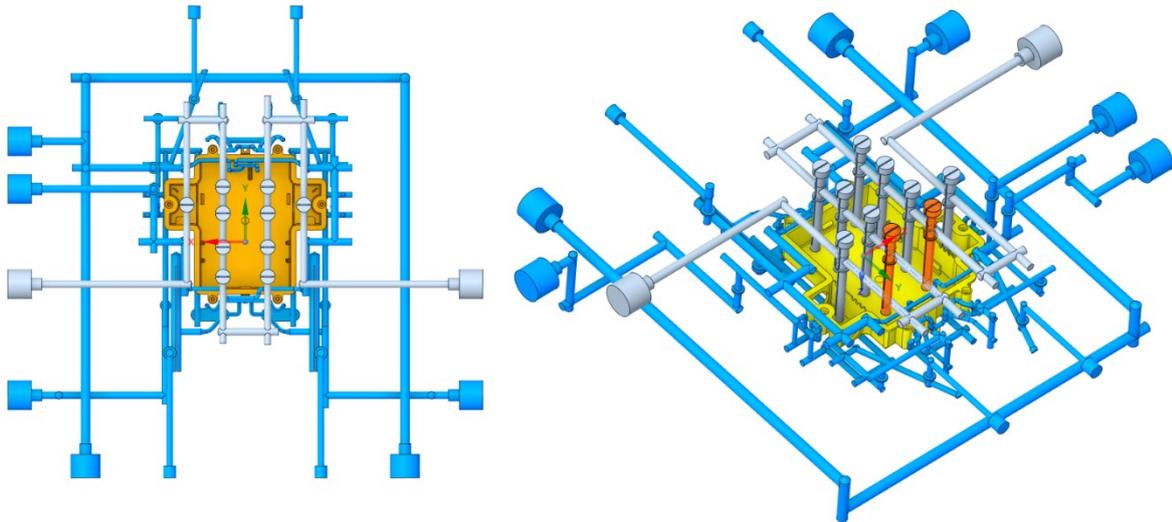


Figura 131 – Vista del layout completo per il design 2: Baffles evidenziati in arancione, traslati di 18mm in direzione Y (verso il centro del pezzo)

6.2.1. Analisi di raffreddamento

Per non appesantire ulteriormente la trattazione, i risultati di simulazione per questo nuovo design saranno sintetizzati al massimo, al solo scopo di fornire giustificazioni essenziali in merito al suo test e successivo abbandono a favore dell'unico precedente design conformale di tipo 1.

Anche in questo modello, le estremità dei connettori sono state eliminate per una migliore simulazione delle linee di flusso; questi problemi sono probabilmente dovuti al fatto che la versione del programma è piuttosto obsoleta, soprattutto in riferimento al modulo CFD per la simulazione dei canali solidi. Trascurando questo dettaglio,

La distribuzione di temperatura nel componente (Figura 132) vede adesso ancora zone a maggior concentrazione di calore in concomitanza degli ormai noti hotspot; ma in generale il risultato è simile al caso precedente di design conformale di tipo 1. Non si evidenziano quindi differenze rilevanti, ma data la piccola modifica attualmente in gioco questo aspetto era già stato considerato possibile.

Il tempo di raffreddamento indica un picco di 16,2s come da Figura 133, che rispetto al layout di tipo 1 testimonia un decremento di 0,4s, valore lievemente apprezzabile.

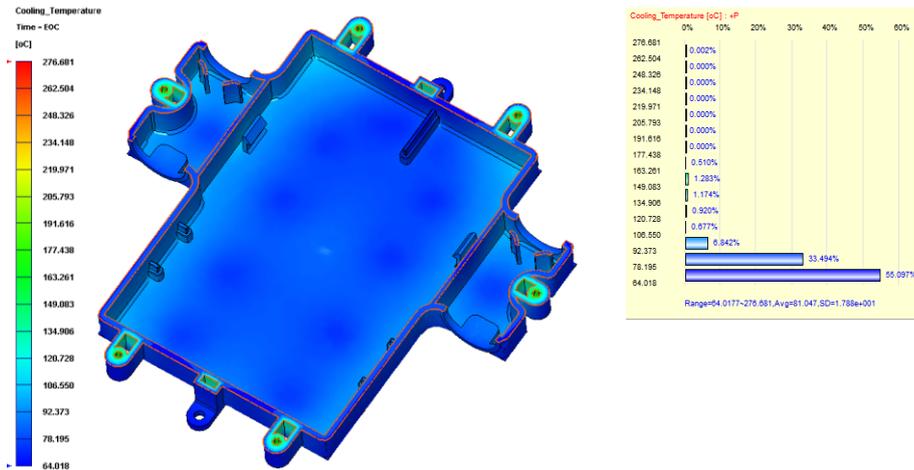


Figura 132 – Distribuzione di temperatura per il design conformale V2

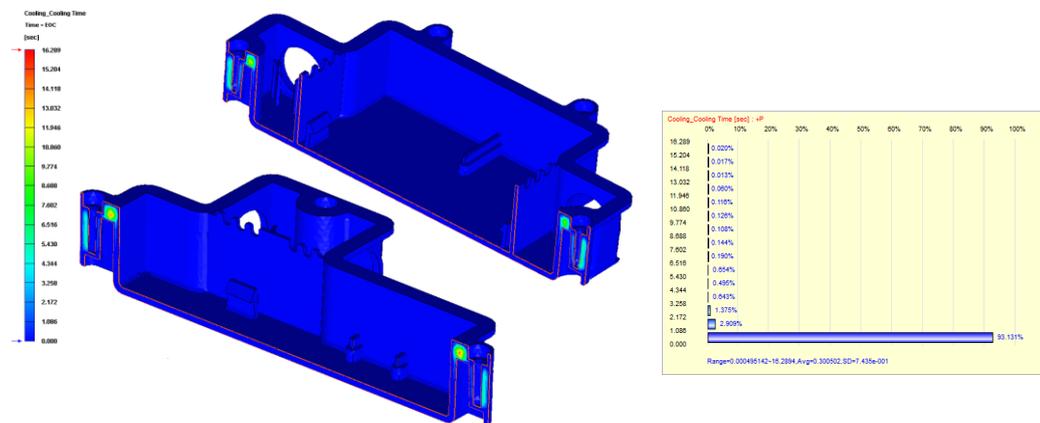


Figura 133 – Tempo di raffreddamento con vista in sezione e distribuzione statistica

In ultimo, riportiamo l'analisi del grafico iso-superficie in Figura 134, dove l'impostazione di 15,6 secondi sembra risultare già sufficiente per l'estrazione del pezzo dal momento che non compaiono più triangoli di mesh evidenziati con alcun colore.

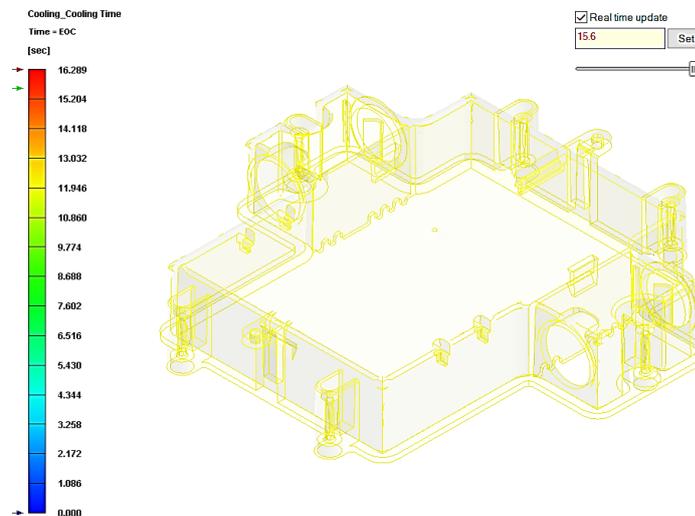


Figura 134 – Tempo di raffreddamento in iso-superficie per il design conformale tipo2, set a 15,6s

A chiusura di queste simulazioni possiamo affermare quindi che il design di tipo 2, derivato da un aggiornamento evoluto rispetto al tipo 1, permette di contrarre ulteriormente il tempo di raffreddamento richiesto dalla parte passando dai valori massimi teorici di 16,6s a 16,2 secondi, mentre considerando l'indagine approfondita secondo i grafici iso-superficie, si passa da circa 16s a 15,6s.

È evidente quindi che i miglioramenti raggiunti con l'ultima ottimizzazione di design di raffreddamento, contribuiscono in parte a ridurre i tempi richiesti, ma con vantaggi molto limitati e apprezzabili.

A tal riguardo, è indispensabile ricordare che questo caso di studio è stato svolto come una sperimentazione di interesse aggiuntivo nonostante la complessità della sua effettiva messa in opera; non si reputa difatti praticabile questa soluzione di raffreddamento poiché le lavorazioni richieste alle piastre, i passaggi di fluido, e la spesa economica annessa non sono allineate con gli obiettivi della società Techno.

7. TEST CON INSERTI IN RAME-BERILLIO

È risaputo come alcuni materiali possano dimostrarsi molto più efficaci nell'asportazione di calore rispetto ai classici metalli delle piastre stampo: una tecnica comune per applicazioni industriali consiste infatti nell'inserimento di inserti stampo in materiale altamente conduttivo del tipo rame-berillio (Cu-Be)

Una prova di simulazione è stata quindi condotta considerando il solo layout conformale di tipo 1 unitamente a una serie di inserti a sostituzione dei materiali standard già adoperati nel progetto originale.

In Figura 135 sono visibili i 6 inserti sviluppati come aggiunte di un caso di studio finale, dove il nuovo materiale di riferimento può essere utile per accelerare ulteriormente il processo di asportazione di calore dagli hotspost, per i quali non sorprende affatto come corrispondano alle zone di inserimento degli inserti stessi.

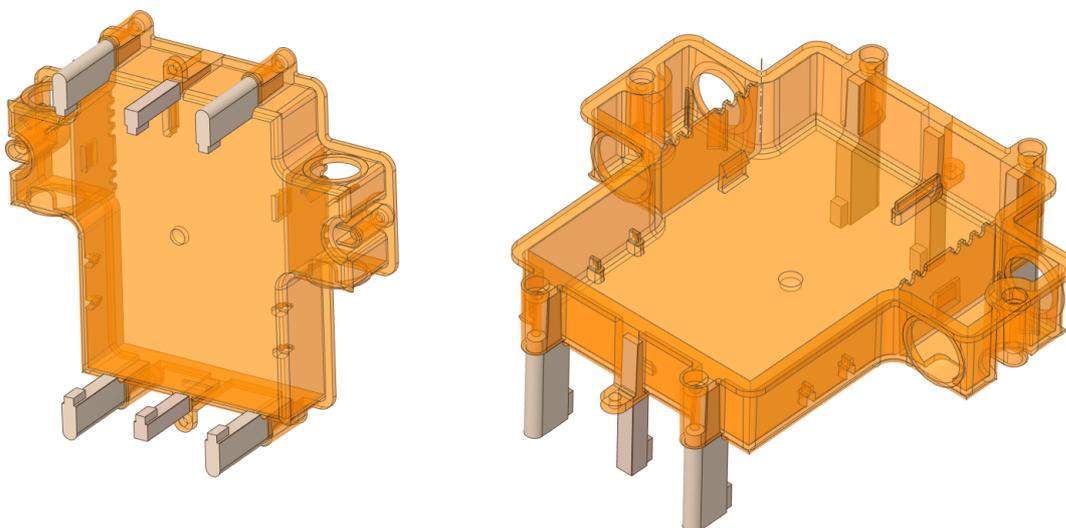


Figura 135 – Inserti stampo adottati nel nuovo processo di simulazione, come test finale di ottimizzazione

La Figura 136 mostra un estratto della finestra di setup in Moldex dove è stato selezionato il materiale degli inserti con le principali grandezze fisiche per il Cu-Be.

Mold Insert-1 [Cu_Be]		BeCu(HRC-40)
Material properties :		
Mold metal ID	Mold Metal [Moldbase material]	-
Density	7.68	g/cm^3
Heat Capacity	4.6e+006	erg/g.K
Thermal conductivity	1.95e+006	erg/sec.cm.K
Elastic modulus	2.2e+012	dyne/cm^2
Poisson ratio	0.285	-
CLTE	1.06e-005	1/K

Figura 136 – Grandezze caratteristiche per il materiale degli inserti Rame-Berillio

7.1. Analisi termica

Il tempo di raffreddamento restituito per questo modello di simulazione si aggira intorno ai 15,3 secondi come è stato individuato tramite l'analisi delle iso-superfici relative, a discapito della scala di riferimento base che si protrae fino a 17s, Figura 137.

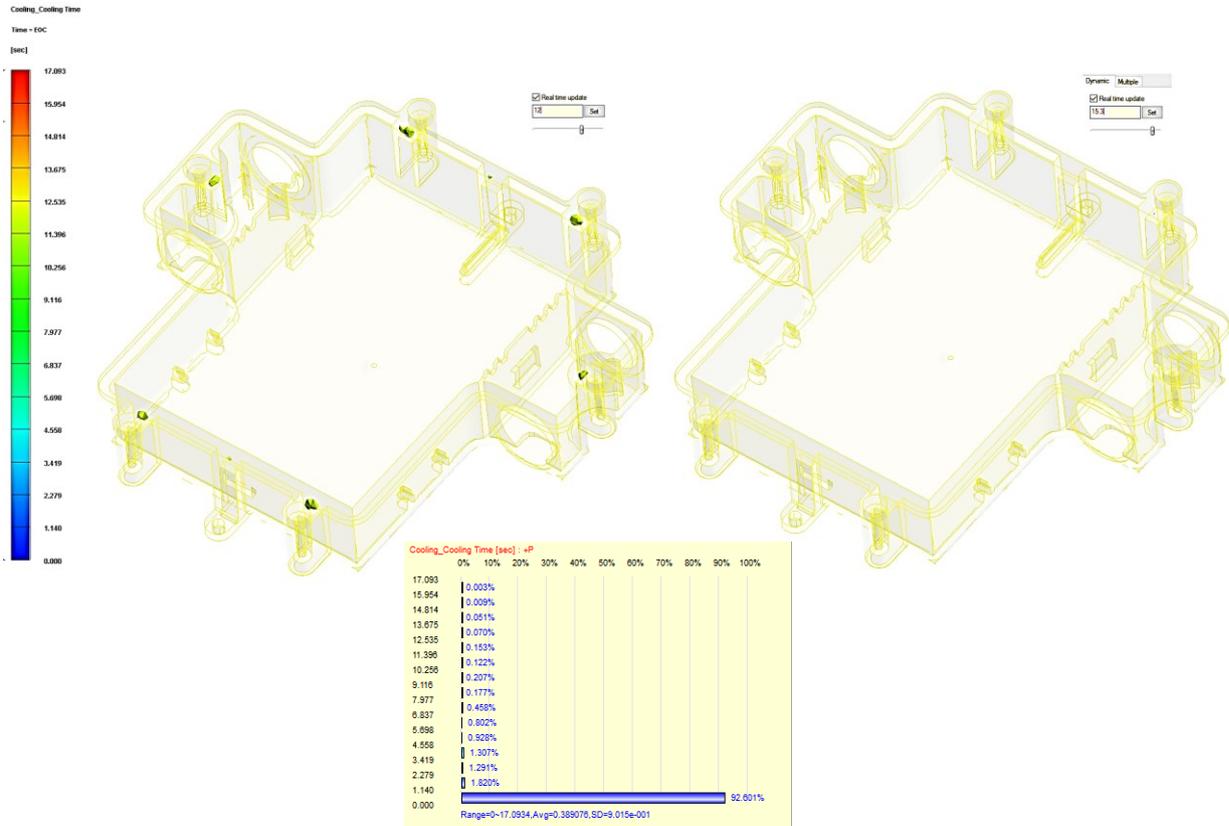


Figura 137 – Tempo di raffreddamento per il nuovo caso di studio con inserti

La distribuzione statistica del tempo di raffreddamento si avvicina al caso ideale dove la maggior parte del componente si allinea verso un tempo di circa 1.14s, ma restano piccole percentuali ostili al congelamento che necessitano di un'attesa maggiore. Se si trascurano infatti le piccole percentuali di pezzo che creano problemi di congelamento per l'estrazione, si deriva un tempo massimo di raffreddamento addirittura limitato intorno ai 13s, come mostra il grafico di Figura 138.

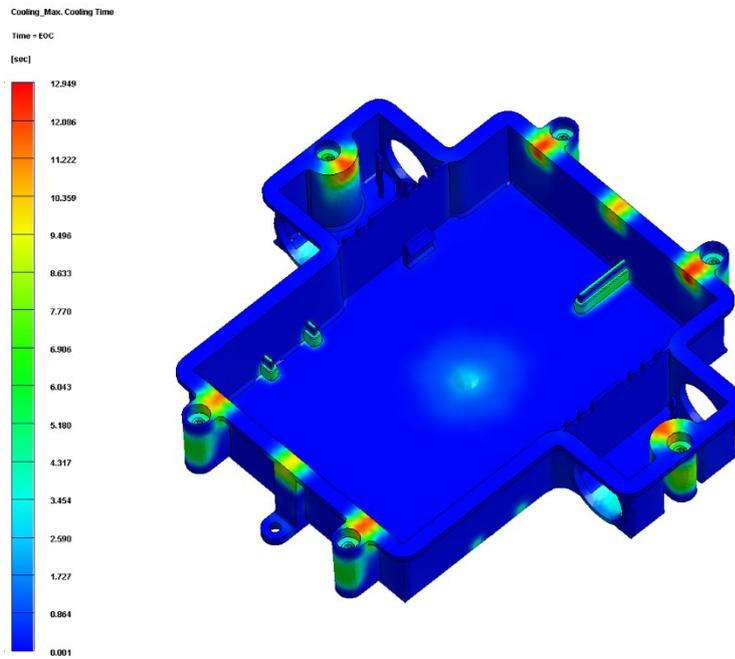


Figura 138 – Massimo tempo di raffreddamento stimato da Moldex per la simulazione con inserti e layout di raffreddamento di tipo 1

Ciò che mostra un netto miglioramento è la temperatura complessiva al termine del raffreddamento; in questo caso si osserva una diminuzione della temperatura massima di quasi 25°C rispetto ai casi precedenti senza inserti, proprio perché questi vanno a contatto con le zone calde irrisolvibili (Figura 139).

I benefici di adozione degli inserti stampo a materiale altamente conduttivo sono evidenti dai test di simulazione appena conclusi; d'altra parte l'unico inconveniente di questa pratica risiede nei problemi di usura precoce del materiale degli inserti se nonché in difetti di instabilità dimensionali dovuti alle forti variazioni di calore durante i cicli di produzione.

Questi svantaggi sono già noti in teoria, pertanto bisogna valutare quali sono nuovamente la limitazione del cliente e le sue disposizioni in materia di precisione, sostituzione degli inserti più frequente, o costi di setup e riattrezzaggio, fermi macchina ecc.

Generalmente è fortemente consigliato l'impiego di metalli ad alta efficienza di trasmissione termica seppur considerando i problemi del caso. Le nuove ricerche in ambito di tecnologia dei materiali sono comunque orientate anche in questo campo, ossia verso lo sviluppo di componenti in materiale termicamente reattivo ma stabili e duraturi, così come lo stesso Ing. Ahmed è coinvolto per studi di lungo termine.

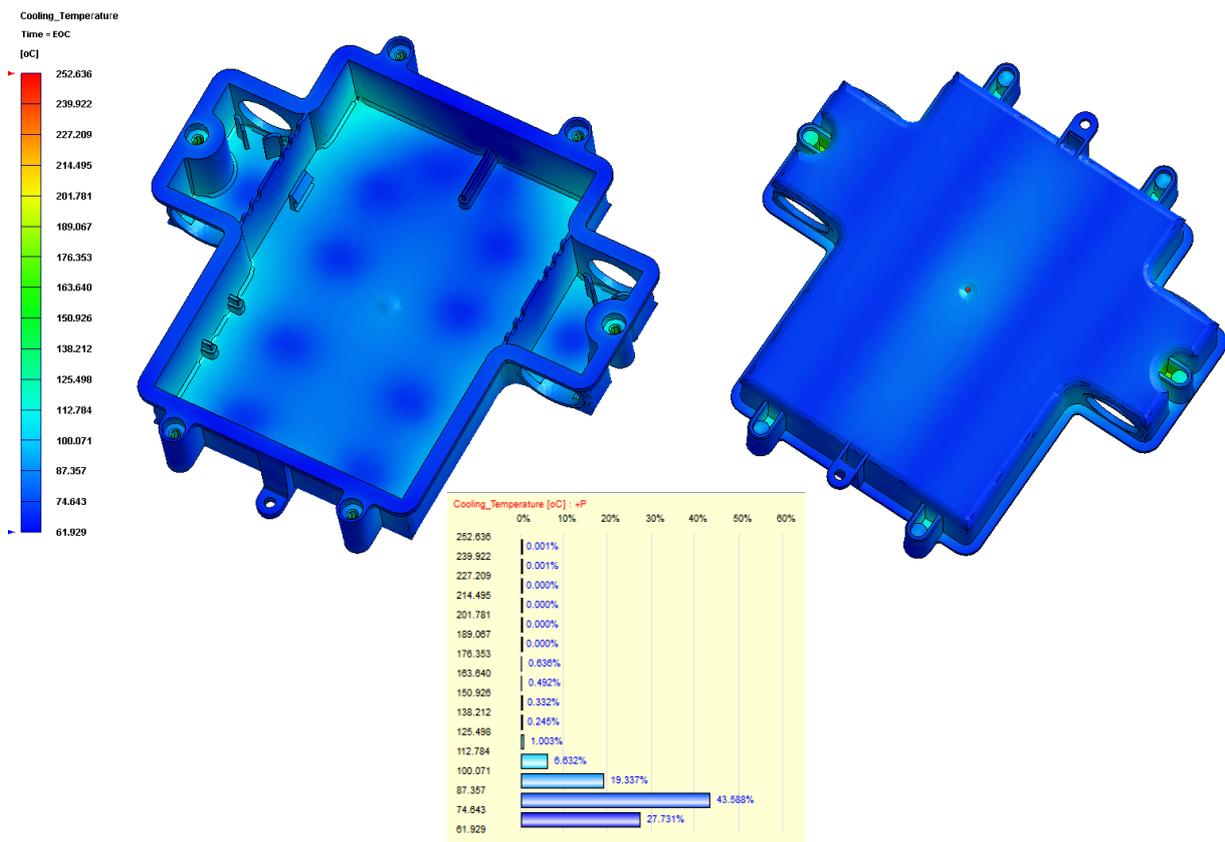


Figura 139 – Temperatura alla fine del raffreddamento per il nuovo caso di studio con inserti

Al giorno d’oggi dunque è possibile valutare e sperimentare molte strade differenti per l’ottimizzazione di un sistema di raffreddamento, e in seguito al semplice layout conformale, l’applicazione di inserti in materiale speciali sembra essere una strada molto promettendo in via di miglioramento.

In aggiunta, le deformazioni totali legate a questo modello di simulazione non mostrano particolari differenze rispetto al caso senza inserti, pertanto non saranno trascritte nuovamente. I benefici in termini di tempo di raffreddamento restano il principale vantaggio dell’uso degli inserti nello stampo.

8. FATTORI DI COSTO PER GLI STAMPI A INIEZIONE

Ad un certo punto del processo di sviluppo e produzione del prodotto, diventa necessario stabilire i costi stimati o effettivi per realizzare un prodotto specifico e immetterlo sul mercato. Lo stampaggio a iniezione è considerato un processo produttivo primario base, pertanto trascuriamo i dettagli coinvolti nel calcolo delle operazioni secondarie e/o dei costi di imballaggio o trasporto. Ai fini di questa trattazione, si considerano esclusivamente i costi associabili direttamente al processo di stampaggio a iniezione.

In letteratura, le stime di costo iniziali si basano su uno stampo tradizionale a due piastre. La valutazione per stampi più complessi si basa sul confronto tra la maggior spesa per il sistema dello stampo con il grado di automazione presente, ossia la ridotta supervisione della pressa in relazione al funzionamento semiautomatico o automatico.

Esistono tre principali fattori di costo per i prodotti stampati:

- Costo dello stampo
- Costo dei materiali
- Costo di produzione

La Figura 140 fornisce una ripartizione di questi fattori di costo primari e delle loro componenti subordinate. È importante notare che queste voci non includono i costi indiretti come strutture, spese generali amministrative, benefici accessori o profitti. Tuttavia, tali costi indiretti possono essere contabilizzati attraverso l'adeguamento delle tariffe orarie o l'applicazione delle tariffe specifiche dei costi indiretti.

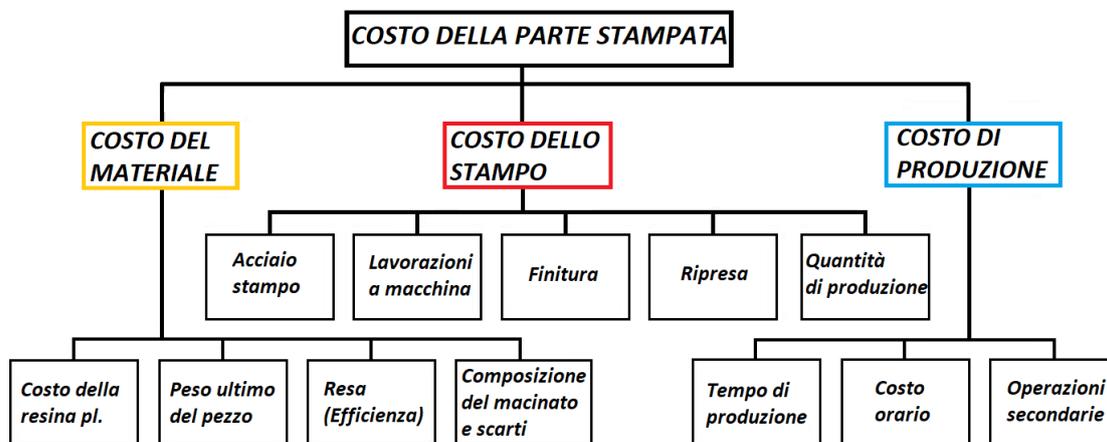


Figura 140 – Driver di costo per i prodotti stampati a iniezione

Il materiale grezzo di partenza è introdotto nella vita di plastificazione in granuli di piccola o media dimensione, e il costo per kg varia in base alle caratteristiche meccaniche e fisiche desiderate nel pezzo finale e ai materiali di rinforzo o additivi.

Il costo del materiale dipende dal tipo di resina richiesta per la particolare applicazione, della quantità stessa impiegata per formare una parte, dalla resa di plastificazione e produzione, e infine dall'estensione degli scarti. Anziché usare una resina vergine pura, comunemente si accetta una certa percentuale di scarti da riutilizzare nel macinato a monte, in modo da riciclare il più possibile il materiale che altrimenti andrebbe perso. In questo modo si limitano al meglio i costi relativi al grezzo acquistato. Per questo

scopo si prendono in considerazione una serie di fattori di influenza per la quantità di materiale riciclato e l'incidenza degli scarti e la stima per l'accumulo di rimacinato stimato.

Lo specifico costo di produzione è funzione dei tempi di produzione, e del costo complessivo del sistema inerente a macchine per automazione, pompe di raffreddamento, e costo degli operatori. In aggiunta è bene considerare anche il costo relativo alle fasi di setup, attrezzaggio e messa a punto dello stampo e della pressa.

Lo stampo è lo strumento centrale del processo di produzione; esso richiede una grande quantità di tempo per essere realizzato, in particolare a causa delle geometrie complesse che dovrà avere e dal grado di finitura superficiale richiesto. Le complesse lavorazioni a macchina e quelle non convenzionali incidono molto sul costo totale dello stampo, e in base destinazione d'uso nei molteplici lotti di produzione, si avrà una certa durata preventivata; di conseguenza un costo relativo al materiale in lega metallica da modellare e rilavorare a macchina quando sarà necessario far fronte all'usura e ricostituire le tolleranze originali previste da progetto.

Riassumendo, il costo d'insieme per l'avviamento di un processo di produzione a iniezione è dovuto a:

- Progettazione stampo
- Costruzione stampo
- Materiale stampo
- Materiali plastici grezzi ed additivi
- Processo di produzione per iniezione
- Altro: collaudi e messe a punto, scarti di produzione, assemblaggi, attrezzature e accessori, manutenzione e ripresa tolleranze blocchi punzone e matrice.

Il peso relativo di questi fattori è comune a quasi tutte le tipologie di stampo, e in linea di massima si ha una suddivisione globale come indicato in Figura 141. Ciò che può orientare i budget di preventivazione in una direzione o nell'altra, è la geometria di uno stampo, semplice o multi-impronta, la dimensione e la complessità con tutto quello che implica in termini di cura del dettaglio e delle finiture, volumi e difficoltà delle lavorazioni necessarie a realizzarlo.

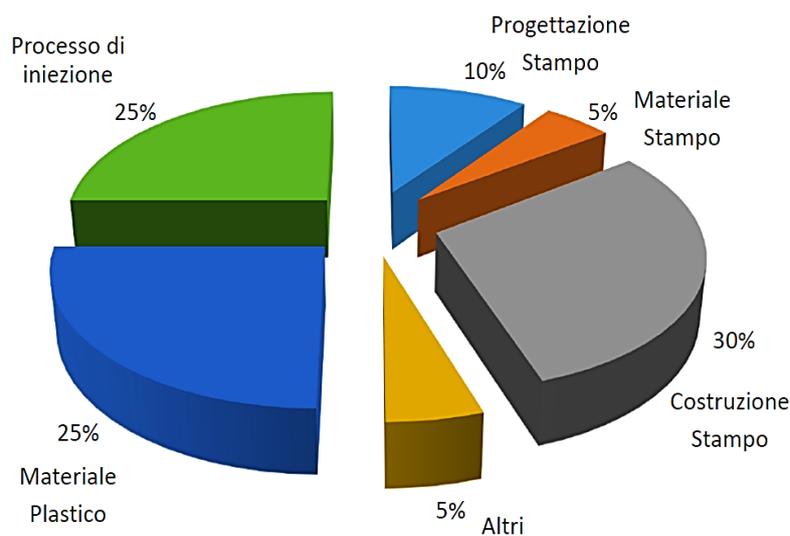


Figura 141 – Ripartizione in percentuale dei fattori di costo per uno stampo classico

8.1. Costi e B.E.P.

Capire come determinare i costi dello stampaggio a iniezione può essere utile per differenti scopi, in particolare gli obiettivi possono essere:

1. Determinare se la realizzazione del prodotto sarà redditizia oppure no;
2. Fare valutazioni del tipo "what-if" modificando materiali, parametri di processo, volumi, dimensioni della pressa o altro per vedere se è possibile generare profitti aggiuntivi;
3. Ausilio per determinare se i costi dei fornitori di stampaggio esterni sono ragionevoli o meno.

Limitatamente al nostro caso applicativo, adesso, si propone una semplice stima dei costi a conclusione di questo progetto di tesi. Questa stima servirà come ulteriore incentivo per accettare le soluzioni di raffreddamento conformali studiate e consolidate con successiva messa in opera. L'analisi si basa su modelli di costo convenzionali, già noti in letteratura, ma limitatamente alla parte di produzione mediante fabbricazione additiva, ricordiamo che il piano prevede la stampa dei nuovi inserti in modo a sé stante, per poi lasciar procedere il cliente stesso alle operazioni interne di allineamento, giunzione e controlli.

Dall'azienda Techno non sono stati comunicati i dati e le informazioni indispensabili per le voci di costo uniche per lo stampo esistente; allora, per quanto possibile, sarà qui proposto un confronto finale tra i costi totali dello stampo con e senza inserti per canali conformali, ossia considerando essenzialmente la variabilità del tempo ciclo di produzione e quindi i costi variabili di trasformazione. È stato creato per l'occasione un file 'Excel' dove le voci di costo fondamentali sono state raccolte al fine di valutare il punto di pareggio all'interno di una ipotetica produzione di 200.000 pezzi, come singolo lotto di produzione.

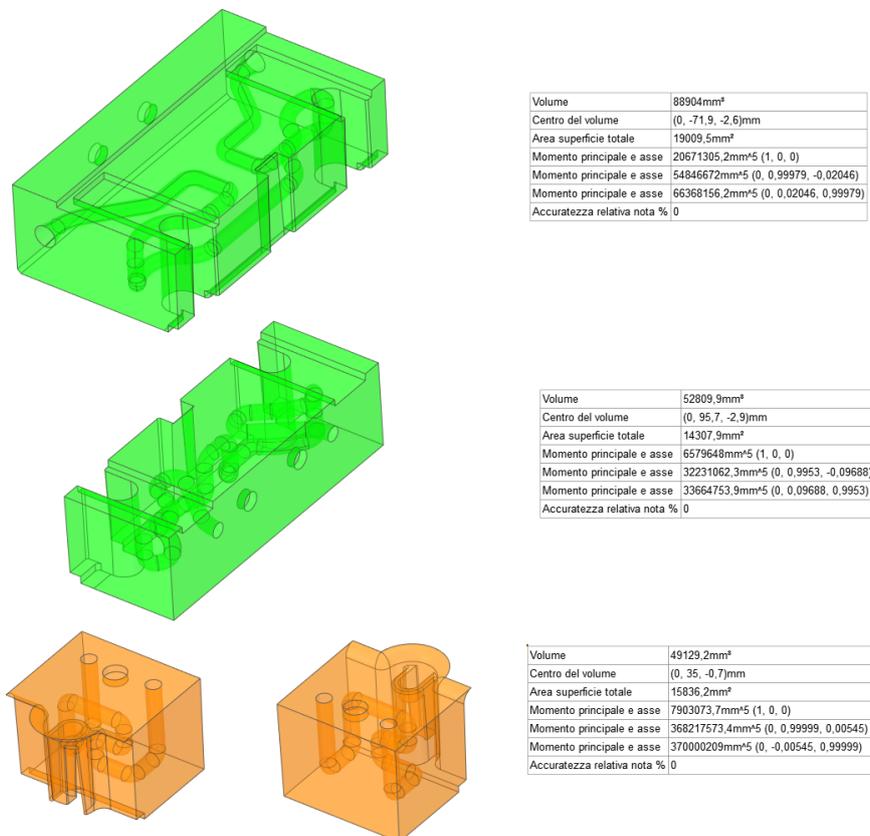


Figura 142 – Inserti da produrre e informazioni di base

A partire dalle informazioni di volume dei pezzi da sostituire nello stampo originale (Figura 142) è stato reso noto dalla QTool un preventivo diretto e unico per la realizzazione effettiva; difatti, l'azienda è in grado di rilasciare una stima dei costi di produzione degli inserti, in brevissimo tempo, solo in funzione dei modelli cad che vengono inviati per la valutazione. Il formato dei file richiesto è del tipo .stl, tipica estensione più comune per gli oggetti di stampa 3D, con il quale si entra direttamente in macchina per avviare la produzione.

Il volume totale degli inserti da stampare è pari a 190843,1 mm³; in base ad esso si ricava direttamente una voce singola di costo che distingue il prodotto finale con o senza trattamento termico, in base alle future scelte del cliente. La tabella di Figura 143 fa parte del foglio Excel di calcolo dove sono state raccolte le informazioni necessarie per il primo calcolo del costo degli inserti.

CF: COSTO INSERTI IN A.M.		
Densità Materiale (Acciaio Maraging 1.2908)	7750	kg/m ³
Volume dell'inserto da realizzare (4 Pz)	190.843	mm ³
MASSA INSERTO ACCIAIO	1,48	Kg
Costo polvere di Acciaio	120	€/kg
Costo di produzione base	2473,6	€
Costo di produzione base + trattamento termico	2610,9	€

Figura 143 – Informazioni sul costo degli inserti

Considerando la migliore soluzione di layout e i vantaggi derivanti dall'adozione del raffreddamento conformale, con inserti speciali in Cu-Be, si vuole mettere in evidenza come sia possibile trarre benefici dall'applicazione delle modifiche, suggerite per lo stampo Techno. Per questa sezione sono state considerate poche voci essenziali di costo, tra cui massa parte stampata, costo base del singolo

CV cliente: PROC. PRODUZ. CON STAMPO ORIGINALE		
Densità del materiale	1410	kg/m ³
Volume pezzo/i stampato/i	68716,5	mm ³
MASSA PARTE STAMPATA (Plastica)	96,9	g
Maggiorazione per ritiro volumetrico/materiale di scarto/residui	10%	
Costo Materiale plastico (PA66 A3WG7)	6	€/kg
COSTO BASE DEL SINGOLO COMPONENTE	0,64	€/Pz
Dimensione lotto di produzione preventivato	200000	Pz
Tempo ciclo per ogni stampata	42	sec
Numero di impronte nello stampo	1	#
Ore di attività necessarie per la produzione	2333	h
Costo orario operatore/ supervisore	25	€/h
Costo orario energia elettrica per funz. pressa e accessori	60	€/h
COSTO DEL LOTTO DI PRODUZIONE	198333,33	€
COSTO VARIABILE UNITARIO	1,631	€/Pz

CV cliente: PROC. PRODUZIONE CON MODIFICHE STAMPO		
Densità del materiale	1410	kg/m ³
Volume pezzo/i stampato/i	68716,5	mm ³
MASSA PARTE STAMPATA	96,89	g
Maggiorazione per ritiro volumetrico/materiale di scarto/residui	10%	
Costo Materiale plastico (PA66 A3WG7)	6	€/kg
COSTO BASE DEL SINGOLO COMPONENTE	0,64	€/Pz
Dimensione lotto di produzione preventivato	200000	Pz
Tempo ciclo per ogni stampata (inserti conformali)	25,3	sec
Numero di impronte nello stampo	1	#impronte
Ore di attività necessarie per la produzione	1406	h
Costo orario operatore/ supervisore	25	€/h
Costo orario energia elettrica per funz. pressa e accessori	60	€/h
COSTO DEL LOTTO DI PRODUZIONE	119472,22	€
COSTO VARIABILE UNITARIO	1,24	€/Pz

Figura 144 – Tabelle di calcolo dei costi variabili di trasformazioni per i due casi a confronto, in base ai principali parametri di costo

componente e su larga scala poi il costo del lotto di produzione. Queste macro voci derivano dalla combinazione di altre grandezze, come mostra l'elenco di Figura 144.

Nel caso in cui siano necessari costi aggiuntivi per applicare le modifiche allo stampo, questi risulterebbero molto al di sotto del limite di costo dettato dal processo di trasformazione per lo stampo originale.

Da considerazioni di carattere generale, si vede come il confronto tra i costi di trasformazione, relativi alla produzione per iniezione plastica con e senza i vantaggi delle modifiche, sia immediato e lineare. Differenza sostanziale è data dal decremento del tempo ciclo che passa da 42s a 25,3s, grazie al dimezzamento del tempo di raffreddamento per ogni stampata che passa da 32s a 15,3s

Il lotto di produzione che è stato preso in carico per il calcolo è di 200.000 unità. Per i due casi si stimano quindi costi variabili unitari di trasformazione di 1.63€ contro 1.24€; il beneficio economico relativo solo a questa fase ha un impatto di circa il 24% sul costo variabile unitario.

Anche se in questo caso sarebbe già sufficiente valutare solo i costi variabili, per derivare dei valori di costo realistici e creare una panoramica completa della situazione è stato sfruttato un modello convenzionale che stima il costo dello stampo a singola impronta.

Il modello di costo tradizionale che è stato implementato nel foglio Excel, contempla una serie di formule piuttosto semplici ma sufficienti per una buona approssimazione, la Figura 145 riporta in sintesi le relazioni di calcolo considerate.

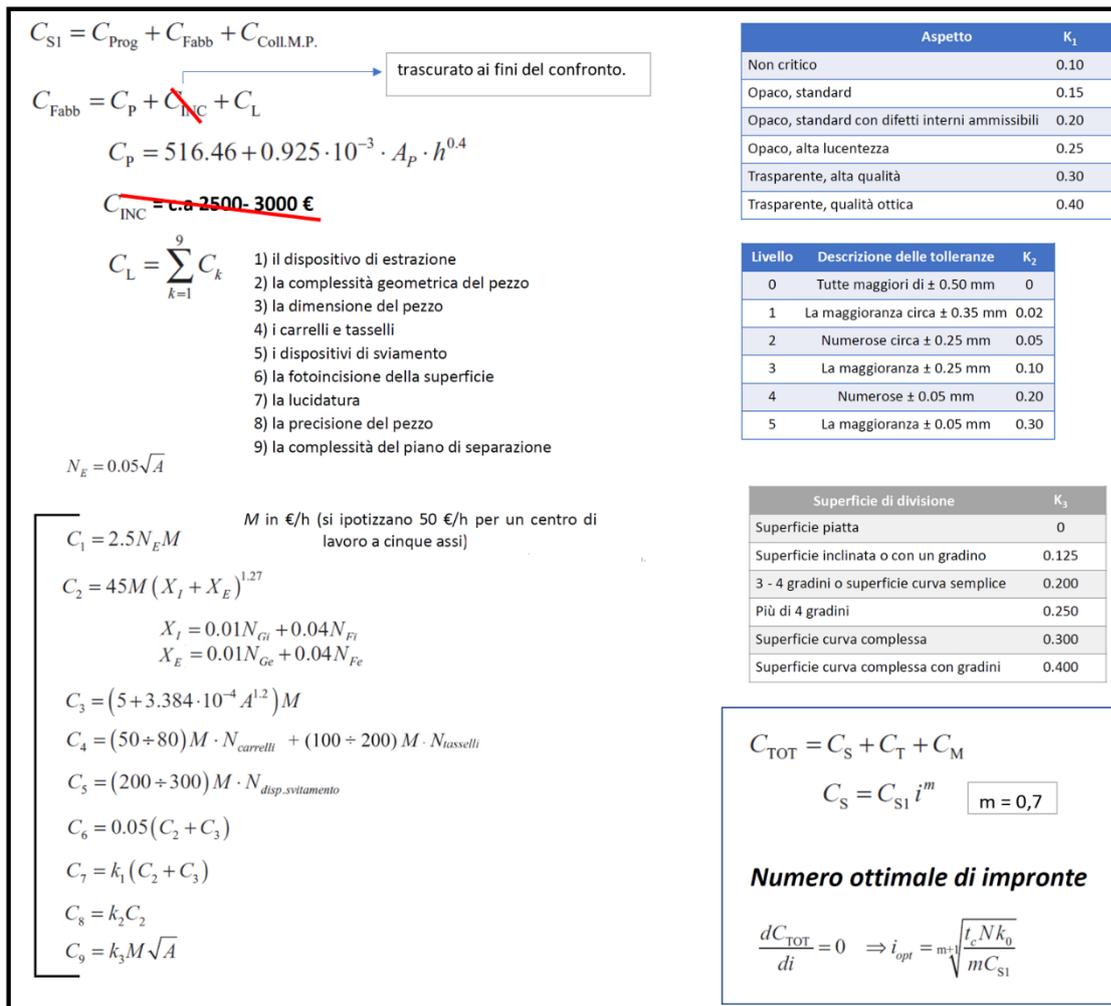


Figura 145 – Modello di costo principale per il calcolo del costo dello stampo a singola impronta

Il costo dello stampo a singola impronta, C_{S1} , è composto da Costo di progettazione, più il costo di fabbricazione e il costo di collaudo e messa a punto. Ognuno di questi addendi deriva dalle altre sotto voci di costo, tranne per il Costo di progettazione che può essere assunto come valore unico soggettivo, di circa 10000-15000 euro. Il costo dell'incastellatura è stato trascurato seppur di limitata entità.

La parte del modello inerente al calcolo del numero ottimale di impronte non è di nostro interesse, pertanto sarà saltata, dal momento che il nostro stampo è già ben definito e immutato.

L'elaborazione dei dati numerici svolta in Excel è sintetizzata dalla Figura 146.

CF: piastre centrali_esclusa l'incastellatura		
Costo di progettazione e definizione cicli di lavoro/distinte base + Collaudo e Messa a punto	15000	€
COSTO DELLE PIASTRE (punzone e matrice)		
Area proiettata delle due piastre - Ap	37200	mm ²
Ingombro complessivo dei due inserti - h	95	mm
Costo delle piastre - Cp	729,16	€
COSTO DI LAVORAZIONE		
Numero di estrattori presenti (se già noto dal file cad)	15	#
Costo orario del centro di lavoro a 5 assi - M	50	€/h
C1	1875,00	
Entità geometriche interne (core)	4	
Fori/ avvallamenti/depressioni interni (core)	43	
Entità geometriche esterne (cavità)	2	
Fori/ avvallamenti/depressioni esterni (cavità)	8	
X1	1,76	
X2	0,34	
C2	5772,99	€
C3	5414,78	€
Numero di carrelli (se presenti)	2	#
Numero di tasselli (se presenti)	9	#
C4	50000,00	€
Numero dei dispositivi di svitamento	0	#
C5	0,00	€
C6	11187,77	€
K1	0,25	
C7	2796,94	€
K2	0,20	
C8	1154,60	€
K3	0,00	
C9	0,00	€
COSTO DI LAVORAZIONE FINALE DELLE PIASTRE	78202,09	€
COSTO TOT. INSERTO preventivato	93931,3	€

Figura 146 – Stima di costo dello stampo a singola impronta, del tipo convenzionale senza modifiche

Si prevede quindi una stima di costo complessiva intorno ai 93.931,3€, ma probabilmente si tratta solo di una stima al ribasso. Senza troppe precisazioni, ricordiamo che questo genere di calcoli è influenzato da molteplici fattori, pertanto la stima è molto variabile e approssimata.

Dopo aver ricavato il valore di costo variabile e costo fisso, considerando un prezzo di vendita di 2,5€ al pezzo è possibile calcolare il margine di contribuzione unitario, pari a circa 0,87€.

Questi dati così ottenuti vengono sfruttati per calcolare il dato di 'Break Even Point', molto utile in queste situazioni. La Figura 147 mostra questi passaggi in tabelle di calcolo con valore finale del punto di pareggio, stimato a circa 108.109 pezzi.

La formula obiettivo da elaborare è quella classica della letteratura economica:

$$Q_{BEP} = \frac{CF}{mdc} = \frac{CF}{p - cvu}$$

Il margine di contribuzione è fortemente influenzato dal prezzo di vendita del singolo oggetto prodotto, quindi è a discrezione di colui che esegue l'analisi, non avendo informazioni precise al riguardo.

Costi Fissi Totali per lotto di produzione	93931,25	€
Prezzo di vendita (1 Pz)	2,5	€/Pz
Costo variabile unitario	1,63	€/Pz
margine di contribuzione unitario	0,87	€

B.E.P. =	Costi Fissi Totali	=	93.931,25	=	108.109	pezzi
	m.d.c.		0,87			

Figura 147 – Margine di contribuzione e il punto di pareggio per lo stampo originale

Per il caso di stampo originale, quindi si ottiene un grafico dei costi e del punto di pareggio, come mostrato in Figura 148.

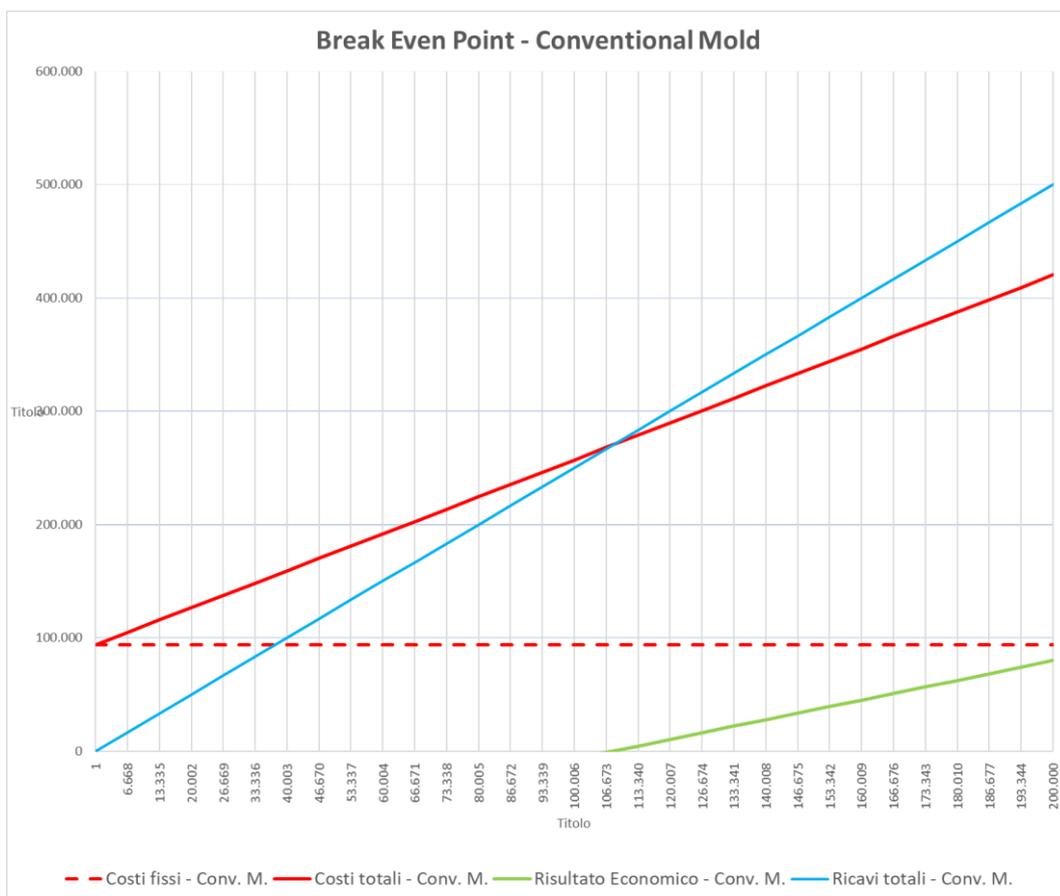


Figura 148 – Grafico del B.E.P. per il caso di stampo originale senza modifiche

D'altra parte, tenendo a mente il costo totale dello stampo e riferendoci adesso allo stampo modificato con gli inserti in A.M., si può ricavare un punto di pareggio similmente come quanto è stato fatto per il caso originale Figura 149.

Costi Fissi Totali = CF stampo originale + Costi inserti A.M. + Costi op. modifica e fissaggi	96542,15	€
Prezzo di vendita (1 Pz)	2,5	€/Pz
Costo variabile unitario	1,24	€/Pz
marginde di contribuzione unitario	1,26	€

$$\text{B.E.P.} = \frac{\text{Costi Fissi Totali}}{\text{m.d.c.}} = \frac{96.542,15}{1,26} = 76.429 \text{ pezzi}$$

Figura 149 – Margine di contribuzione e il punto di pareggio per lo stampo modificato

Il valore del punto di pareggio che si ottiene a beneficio delle modifiche risulta essere di 76.429 pezzi, valore molto al di sotto del caso padre di confronto. In Figura 150 è visibile il relativo grafico rappresentativo del punto di pareggio appena calcolato.

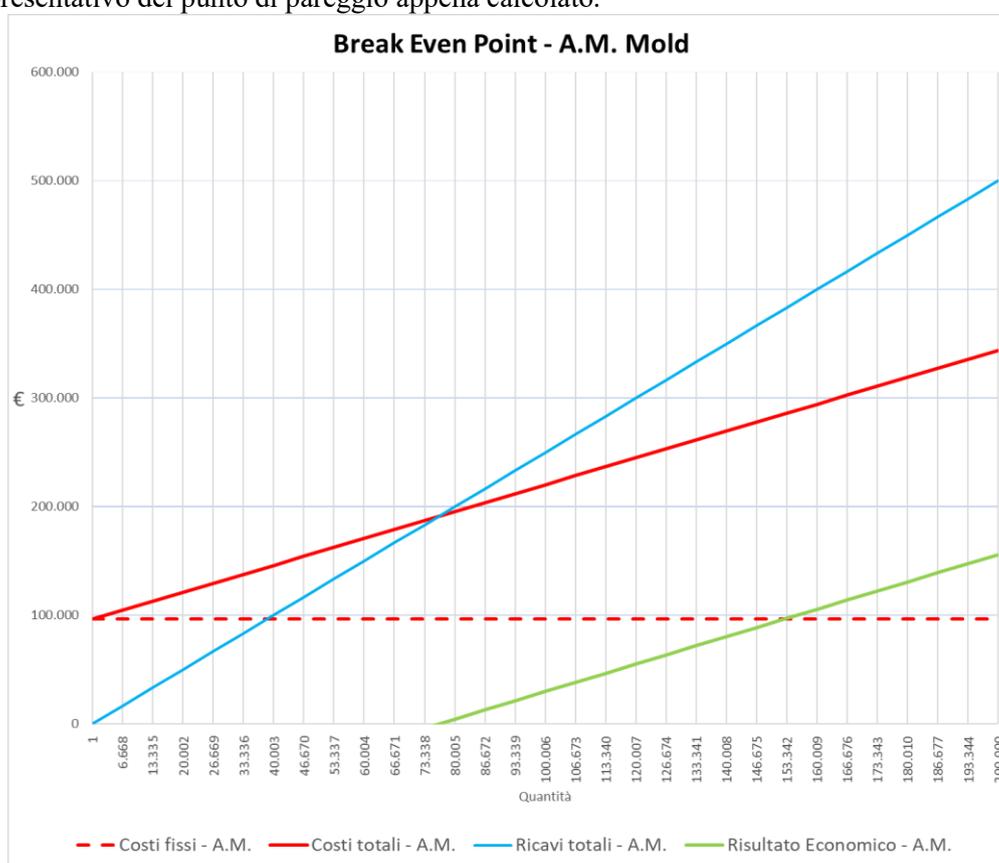


Figura 150 – Grafico del B.E.P. per il caso di stampo modificato con inserti in A.M.

In generale sarebbe anche possibile incrociare i costi fissi per ricavare il grafico di Cross BEP dei CF, ma in questa situazione non è necessario poiché consideriamo solo modifiche da apportare a uno stampo con dei piccoli tasselli in A.M. piuttosto che un confronto globale per la produzione completa delle piastre punzone e matrice con due diverse tecnologie.

Ad ogni modo, si può affermare che il confronto dei punti di pareggio nei due scenari conduce inevitabilmente a favorire l'utilizzo della nuova tecnologia in A.M. poiché per lo stampo convenzionale si affrontano normalmente costi variabili unitari maggiori per ogni pezzo prodotto, a causa dei tempi ciclo più lunghi rispetto al caso dello stampo modificato con inserti in A.M. con canali conformali.

9. CONCLUSIONI

In questo elaborato è stato affrontato un problema reale di condizionamento stampo da cui sono state ricavate soluzioni di ottimizzazione moderne ed economiche seppur semplici ed efficaci. È stato dimostrato come con un raffreddamento conformato possa essere ridotto il tempo ciclo di un componente termoplastico prodotto per iniezione, lavorando sul tempo di raffreddamento come principale leva di miglioramento. I numerosi ostacoli relativi ai programmi di simulazione impiegati sono stati il primo incentivo a ricercare migliori strumenti di calcolo che rispecchiassero gli obiettivi dello studio. Resta indiscussa la supremazia del software Moldex3D in ambito industriale come principale ausilio alla simulazione dei processi di iniezione plastica.

Dopo aver affrontato diversi scenari di simulazione e aver fatto evolvere il modello di calcolo, i principali risultati proposti in questa trattazione sono stati derivati dall'utilizzo di appositi inserti destinati a percorsi di conformal cooling e inserti in rame-berillio; in particolare per il migliore caso praticabile è stato possibile sperimentare una diminuzione del massimo tempo di raffreddamento del componente di oltre il 50%. Il riassunto dei casi di simulazione è mostrato in Figura 151, dove si osserva il percorso di avanzamento dal modello di stampo originale con tempo di raffreddamento di 32s, fino al modello con inserti conformali di tipo 1, e tempo di raffreddamento di 16,6s, come il caso prima citato. Infine ulteriori layout di canali rispecchiati nel modello di tipo 2 non si sono rivelate fattibili da un punto di vista economico e costruttivo.

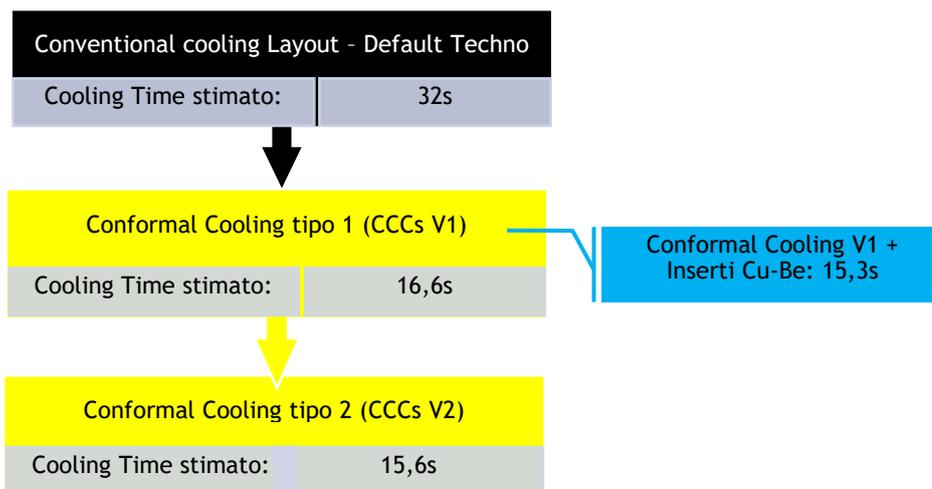


Figura 151 – Sintesi dei risultati ottenuti dalle simulazioni per i vari modelli di studio

In aggiunta, sono state stimate deformazioni ridotte del 21% circa come ulteriore vantaggio a favore della tecnologia sviluppata, poiché il caso di layout conformale permette di diminuire gli spostamenti totali del componente scatolare e quindi raggiungere una migliore qualità dimensionale del pezzo.

La semplice analisi dei costi, nella sua versione base e semplificata, ha evidenziato come piccole modifiche possono condurre a notevoli vantaggi economici; grazie alle potenzialità della produzione additiva e ai design di canali conformali si raggiungono prestazioni sempre più alte nei processi di raffreddamento degli stampi.

In conclusione, si ribadisce come le soluzioni individuate possano effettivamente contribuire al miglioramento e all'ottimizzazione del processo di produzione da parte della società Techno Plast e si spera quindi di poter vedere realizzato questo progetto.

10. Sviluppi futuri

Dopo aver sperimentato con grande interesse le possibilità di ottimizzazione del progetto di stampo Techno, il risultato della ricerca volge lo sguardo verso traguardi a più alto valore aggiunto, ossia a nuove pratiche legate alla fabbricazione additiva.

Esistono infatti nuove tecniche di modellazione e sviluppo di prototipi che si orientano verso metodi di progettazione più avanzati e moderni, ma al tempo stesso intuitivi e semplici, parliamo cioè delle strutture lattice basate su celle elementari che ripetute nello spazio, ordinatamente o casualmente, generano sistemi articolati con ottime potenzialità di sviluppo futuro.

Come naturale evoluzione di studio di raffreddamento per il nostro lavoro di tesi è stato proposto l'approfondimento teorico e pratico delle nuove tecnologie di modellazione per geometrie complesse con strutture lattice.

10.1. Design lattice e reticolare per alte prestazioni

Geometrie reticolari e cellulari fanno parte di un campo di ricerca avanzato che promette notevoli benefici e alte prestazioni, nei vari campi di applicazione. Esistono molti metodi diversi per creare prodotti innovativi e competitivi, le limitazioni del caso sono dettate dopotutto esclusivamente dalle resistenze strutturali e termomeccaniche degli oggetti modellati, oltre che dalle idee dei progettisti.

Un caso pratico reperibile in letteratura, mostra un esempio reale di strutture reticolari come supporto e riempimento di cavità circolari di raffreddamento oltre alle strutture lattice come layout avanzato, Figura 152.

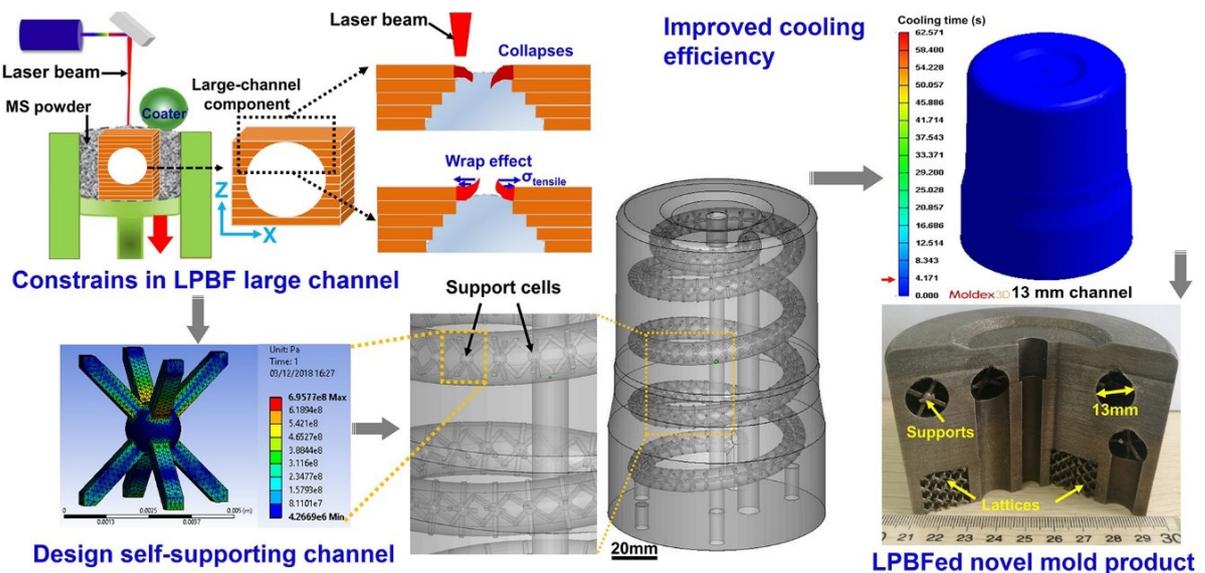


Figura 152 – Caso di studio di letteratura a dimostrazione di strutture reticolari e lattici

Le potenziali applicazioni di questi design sono numerose, e in particolari si rivolgono alle necessità di migliori prestazioni per i casi di raffreddamento, oppure progetti di ottimizzazione topologica con alleggerimento del peso.

Queste superfici TPMS presentano simmetrie di un gruppo centrale cristallografico. Sono noti numerosi esempi con simmetrie cubiche, tetragonali, romboedriche e ortorombiche. I TPMS sono rilevanti nelle scienze naturali e fanno parte di alcuni casi naturali come membrane biologiche, come copolimeri a blocchi superfici equipotenziali nei cristalli ecc. Sono stati anche di particolare interesse nell'architettura, nel design e nell'arte.

Quasi tutti i TPMS studiati sono privi di auto intersezioni: da un punto di vista matematico sono i più interessanti (poiché le superfici auto intersecanti sono banalmente abbondanti). I primi esempi di TPMS furono le superfici descritte da Schwarz nel 1865, seguite da una superficie descritta dal suo studente E. R. Neovius nel 1883. Nel 1970 Alan Schoen ha ideato 12 nuovi TPMS basati su grafici scheletrici che si estendono su cellule cristallografiche. Mentre le superfici di Schoen sono diventate popolari nelle scienze naturali, la costruzione non si è prestata a una prova matematica dell'esistenza ed è rimasta in gran parte sconosciuta in matematica, fino a quando H. Karcher ha dimostrato la loro esistenza nel 1989.

Le strutture giroidali sono esempi di solidi con geometria del tipo TPMS, ossia 'Triply periodic minimal surface' e sono una rappresentazione fisica di equazioni particolari formate dalle funzioni composte di seno e coseno; la Figura 153 mostra alcune di queste strutture in base alla loro descrizione matematica

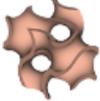
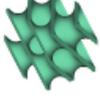
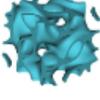
Image	Type	Equation
	Gyroid	$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x)$
	Schwarz	$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)$
	Diamond	$\sin(x)*\sin(y)*\sin(z) + \sin(x)*\cos(y)*\cos(z) + \cos(x)*\sin(y)*\cos(z) + \cos(x)*\cos(y)*\sin(z)$
	Lidinoide	$\sin(2*x) * \cos(y) * \sin(z) + \sin(2*y) * \cos(z) * \sin(x) + \sin(2*z) * \cos(x) * \sin(y) - \cos(2*x) * \cos(2*y) - \cos(2*y) * \cos(2*z) - \cos(2*z) * \cos(2*x) + .3$

Figura 153 – Formule originali per le differenti geometrie a struttura cellulare TPMS più comuni

Le strutture TPMS hanno ottime capacità anche come assorbitori di energia o di impatto e possono essere sfruttate anche come isolatori di vibrazioni. Apparentemente, il peso di oggetti con design TPMS è molto più piccolo della struttura solida a parità di volume dell'involucro; difatti le TPMS possono essere utilizzati come strutture leggere per risparmiare il consumo di materiali ed energia. Nel settore dell'ingegneria aerospaziale o automobilistica, i pannelli sandwich ampiamente diffusi, sono composti da due pannelli frontali con strutture solide e anime interne progettate da strutture porose. Negli ultimi decenni, la maggior parte dei pannelli sandwich è stata progettata con anime a traliccio. Recentemente, nuovi pannelli sandwich sono stati costruiti anche sulla base delle strutture TPMS.

Nel campo termico, grazie alle aree di superficie specifiche ad alto volume, le prestazioni di trasferimento del calore delle TPMS sono eccezionali, non a caso principalmente applicate come

scambiatori di calore per vari scopi. La Figura 154 evidenzia varie tipologie di dissipatori di calore creati praticamente come celle giroidi e simili.

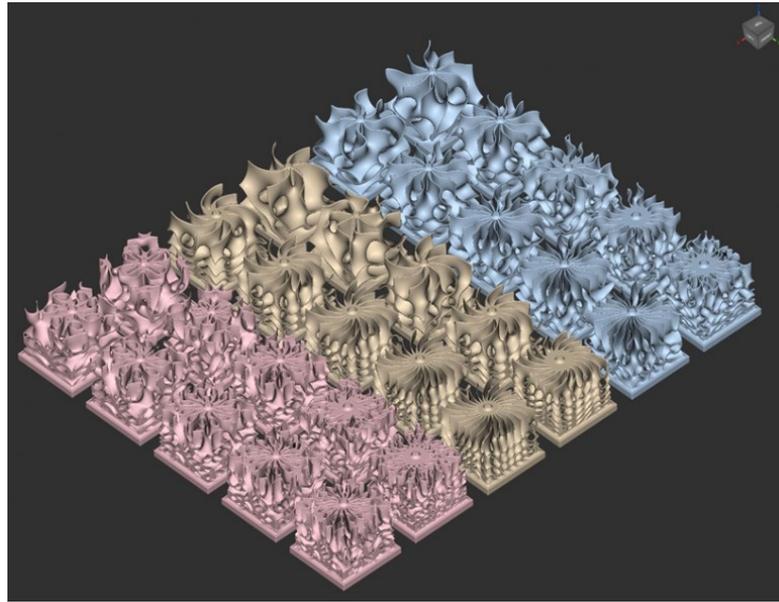


Figura 154 – Strutture TPMS differenti come dissipatori di calore: Gyroid, Schwarz-P, e Lidinoid a varia periodicità e spessore

Il coefficiente di trasferimento del calore delle TPMS è in genere molto superiore rispetto agli scambiatori di calore a circuito stampato tradizionali. Tuttavia, rispetto alle applicazioni di altri domini, la ricerca e le applicazioni del TPMS nel dominio termico sono nella fase iniziale. Alcuni modelli di scambiatori di design già sviluppati e consolidati, sono mostrati in Figura 155, dove si possono osservare tipiche geometrie rettangolari o cilindriche a simmetria radiale, come evoluzioni moderne dei classici scambiatori di calore. In particolare, dove visibile, sono state evidenziate in rosa/arancio e in azzurro, i due domini separati che si vengono a creare con l'utilizzo di TPMS 'walled' cioè con parete centrale separatoria. Intrinsecamente quindi si vengono a creare due domini distinti che possono diventare praticamente i domini dei fluidi (o gas) a contatto nello scambiatore.

nTopology



Figura 155 – Esempi di applicazioni termiche delle TPMS negli scambiatori di calore

La maggior parte degli scambiatori di calore TPMS attualmente applicati sono progettati con forme standard e porosità uniformi. Come migliorare ulteriormente le prestazioni di trasferimento del calore degli scambiatori di calore TPMS con un volume minimo è un problema interessante che richiede maggiore attenzione.

Nel settore degli stampi a iniezione, sembra sia ancora difficile proporre soluzioni di questo tipo con le specifiche dimostrazioni, infatti gli scenari di alto profilo che ricercano alte prestazioni per uno stampo a iniezione, sono molto limitati.

È bene ricordare che la produzione di inserti stampo ad alte prestazioni è interamente affidata alla fabbricazione rapida (A.M.), dal momento che è impossibile realizzare questo genere di componenti con le tecnologie tradizionali. Ciò che caratterizza queste forme libere di raffreddamento è il progettista stesso che è in grado di manipolarle agevolmente con gli strumenti disponibili al giorno d'oggi. Per questo scopo programmi di elaborazione dati e modellazione 3D rappresentano un grande aiuto ai designer che ricercano algoritmi veloci ed efficienti.

L'implementazione di modelli complessi in lattice, o simili, in ambito industriale sono dedicate ai casi speciali dove per esempio è richiesta una dinamica di raffreddamento molto veloce e contenimento di deformazioni; ma generalmente nelle situazioni che sperimentano design conformali di raffreddamento nasce parallelamente un forte incentivo a testare anche queste soluzioni di raffreddamento, dal momento che la complessità crescente delle forme da realizzare non è un problema, bensì un vantaggio risolto dalle macchine di fabbricazione additiva.

Per quanto riguarda le forme lattice e periodiche, sebbene esistono già molte applicazioni in letteratura relative a queste soluzioni di raffreddamento avanzate, il tutor ing. Ahmed Eldagani, nonché CEO della società QTool S.r.l, che si occupa di vari progetti di ricerca, concentrando i propri sforzi nello sviluppo di inserti stampo con raffreddamenti interni avanzati, solitamente con tipiche strutture giroidi, opportunamente sagomate. Le conoscenze sviluppate da parte della QTool sono coperte da segreto industriale e brevetti, ma per scopi accademici è possibile mostrare apertamente modelli di riferimento come quello in Figura 156, dove si osserva un inserto che alloggia al suo interno un raffreddamento conformale del tipo lattice giroide, a parete.

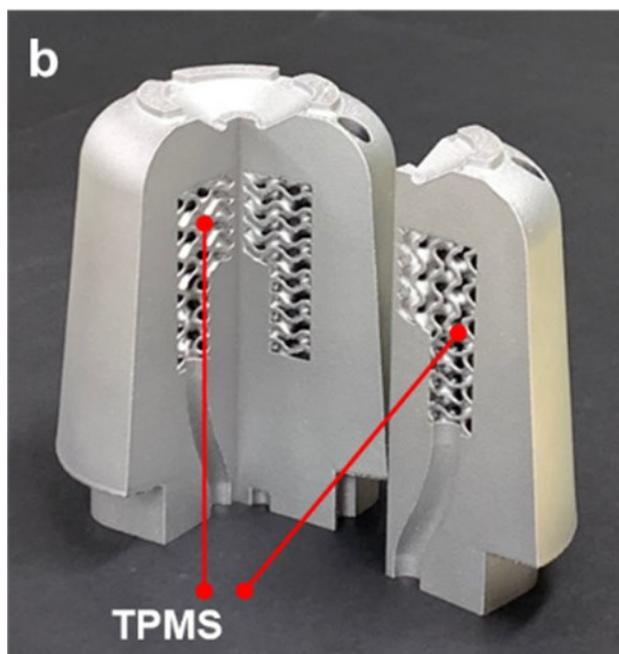


Figura 156 – Esempio di struttura TPMS con parete come struttura di raffreddamento per un tassello

Per questo inserti stampo è stata creata una geometria a simmetria radiale TPMS con ingresso e uscita collegati ai domini di fluido, ma separati fra loro, anche se non facilmente intuibile dall'immagine. Ebbene lo scopo nell'uso di queste soluzioni risiede nello sfruttare al massimo le pareti metalliche come superfici di scambio termiche per massimizzare il processo di raffreddamento. I domini che si creano in tal modo possono essere visualizzati meglio dall'immagine di Figura 157 che evidenzia chiaramente come i profili coniugati 3D danno origine a due solidi univoci.

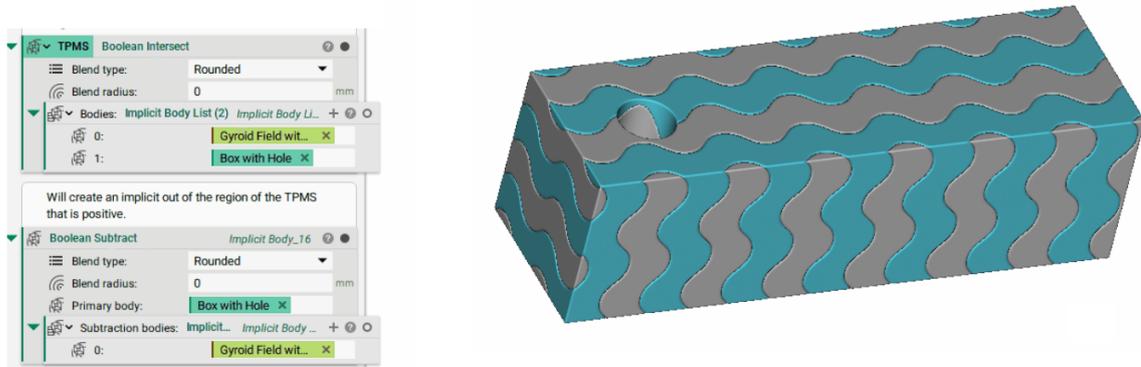
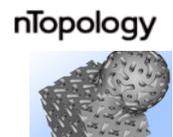


Figura 157 – Esempio di solido derivato da sottrazione booleana di una struttura giroide: in grigio e azzurro sono rappresentati i due domini spaziali contraddistinti

Per estrarre questi design si procede semplicemente con funzione di modellazione booleana di sottrazione (o altre in base alle necessità).

10.2. nTopology



Il software nTopology è un'applicazione innovativa di design che nasce con l'obiettivo di semplificare le operazioni di modellazione e progettazione di strutture anche complesse e particolari, contiene molteplici funzioni algoritmiche che fanno di questo software uno strumento all'avanguardia nel campo dell'ingegneria, e soprattutto nel settore dell'ottimizzazione topologia e della produzione additiva. Le possibilità e le infinite combinazioni di funzioni e comandi fanno di questo programma uno degli strumenti più efficaci per gestire e manipolare qualsiasi tipo di geometria interna/esterna senza alcuna difficoltà operativa.

Il nome del software nTopology richiama naturalmente l'ottimizzazione della topologia; tuttavia, sebbene il supporto dell'ottimizzazione della topologia sia il nucleo di design per questo software, le capacità, l'ambito e la visione del prodotto di nTopology si estendono ben oltre. La tecnologia alla base di nTopology migliora l'ottimizzazione dei flussi di lavoro nel contesto più ampio della progettazione di prodotti ad alte prestazioni.

Molti degli strumenti di ingegneria odierni sono spesso pieni di problemi geometrici che sono ostacoli al rapido sviluppo del prodotto e alla produzione additiva. Ciò ha aperto le porte a un nuovo tipo di rappresentazione 3D: *la modellazione implicita*.

Dalla Figura 158 è visibile l'interfaccia utente del software nTopology con elenco dei comandi annidati a sinistra, e vista 3D dell'oggetto in fase di design al centro. Le immense potenzialità del programma derivano dalle numerose funzioni di progettazione, e vari comparti di lavoro, dalla modellazione alle strutture lattice, dall'alterazione delle grandezze di campo alle operazioni di analisi e simulazione CAE base, fino alle geometrie ottimizzate di alleggerimento ecc..

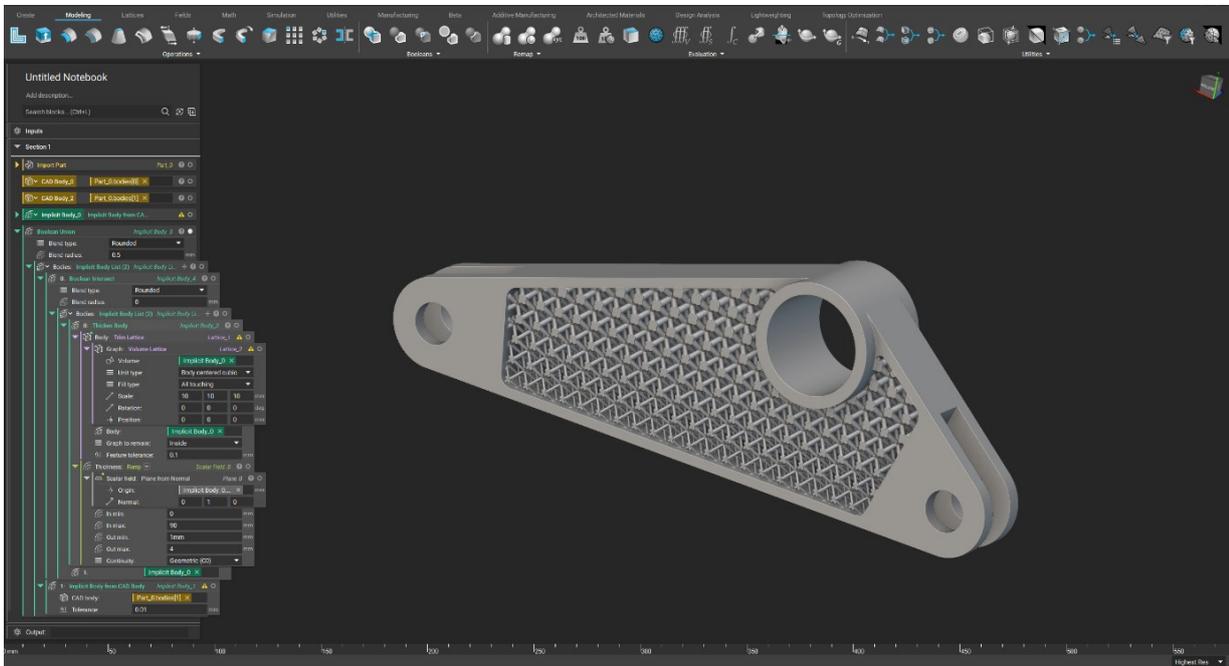


Figura 158 – Interfaccia di lavoro nTopology con esempi di struttura personalizzata a densità variabile

nTopology ha introdotto il concetto di modellazione implicita per la progettazione meccanica, che è un modo innovativo, moderno e scalabile per definire parti e prodotti. Presenta molti vantaggi per gli utenti finali e le aziende, come l'eliminazione degli errori dei modelli, la velocità delle modifiche o delle iterazioni e la scalabilità, solo per citarne alcuni. Ma la modellazione implicita consente molto di più, superando i limiti comuni delle tecniche di progettazione tradizionali e fornisce alle aziende una base per trarre vantaggio dalle tecniche di produzione avanzate, inclusa la produzione additiva. La modellazione implicita rimuove i colli di bottiglia e le inefficienze comuni della progettazione 3D, consente modelli intelligenti e pronti per la produzione.

L'approccio di modellazione 3D sviluppato da nTopology è di natura più robusta e rimuove le barriere geometriche che ostacolano lo sviluppo del prodotto, tramite la tecnologia di modellazione implicita, sfruttando le nuove tecnologie che rendono più facile per gli ingegneri progettare parti migliori in meno tempo. La progettazione guidata dal campo è un modo per i team di progettazione, analisi e produzione di sovrapporre le informazioni in un unico modello ingegneristico. Questo approccio consente di aumentare di ordini di grandezza la velocità di iterazione della progettazione e migliora notevolmente la collaborazione tra i team.

10.3. Modellazione a geometria implicita

Negli ambienti CAD, la geometria può essere definita e rappresentata in più modi. Utilizzando un programma di modellazione 3D convenzionale, si lavora con mesh, BReps o entrambi a seconda

dell'attività da svolgere. Sebbene mesh e BRep abbiano i loro punti di forza, i loro punti deboli aumentano man mano che la geometria diventa più complessa. La gestione delle dimensioni e delle prestazioni della geometria complessa richiede un mezzo computazionalmente più leggero per definire e rappresentare la geometria. Integrando un approccio di progettazione basato sul campo e sulla tecnologia di modellazione implicita, i progettisti possono concentrarsi sul lavoro di ingegneria che cerca di velocizzare le attività senza valore aggiunto.

La modellazione definita da bordi di contorno, superfici e spigoli (B-rep) utilizzata dalla maggior parte dei sistemi CAD tradizionali e grafici basati su mesh funziona bene per parti a bassa complessità e processi di produzione convenzionali.

Tuttavia, la produzione avanzata richiede:

- Incorporare input diversi di fedeltà variabile per produrre un output preciso
- Sintetizzare geometrie di travi a struttura lattice altamente complesse, funzionali, a mesoscala
- Processi automatizzati e verificabili per prodotti basati sulle conoscenze elaborate e personalizzati in base alla massa

Per qualsiasi utente CAD esperto, la promessa di operazioni affidabili e accurate al 100% è un concetto troppo ideale; per superare questi problemi si fa ricorso alla modellazione implicita, che meglio si presta alla complessità esponenziale.

La modellazione implicita è un modo efficace per definire, modificare e rappresentare la geometria 3D: cioè, la geometria è definita attraverso equazioni, piuttosto che attraverso una rete di vertici, bordi e facce come mesh e BRep. Ciò significa che gli impliciti sono significativamente più leggeri da calcolare e mantenere la loro forma pura perché non sono discretizzati come mesh e BRep, che non sempre catturano perfettamente la continuità. Ad esempio, la geometria della mesh, indipendentemente dalla sua risoluzione, è una rappresentazione sfaccettata della forma effettiva. Ad un certo punto della pipeline dalla progettazione alla produzione, sarà necessaria una qualche forma di discretizzazione, che si tratti di mesh, BRep o della produzione di dati di sezione per la produzione. Discretizzando i dati dai modelli impliciti direttamente a un output pronto per la produzione, la discretizzazione avviene proprio alla fine del processo piuttosto che all'inizio o per intero. Ciò significa che i dati di produzione in uscita sono più precisi. Oltre ad essere di ordini di grandezza più veloci da calcolare, la geometria implicita si traduce anche in file super leggeri poiché è necessaria solo una quantità minima di informazioni.

La modellazione implicita offre una nuova serie di strumenti che superano molte limitazioni delle tecniche tradizionali come la rappresentazione dei confini (B-rep) e le mesh, che stanno diventando sempre più problematiche nella produzione avanzata e nella progettazione generativa. Ad esempio, i modellatori B-rep e mesh non sono in grado di eseguire operazioni di routine come offset, arrotondamento, disegno e persino semplici booleani con sufficiente affidabilità. Inoltre, non possono gestire la complessità dei modelli stampati in 3D, manualmente o in flussi di lavoro automatizzati, per non parlare di descrivere parti con proprietà dei materiali variabili.

La matematica alla base della modellazione implicita garantisce che operazioni come booleane, offset, arrotondamenti e bozze non falliscano mai. Con gli impliciti, è possibile eseguire simultaneamente comandi booleani insieme e arrotondare l'intersezione di milioni di raggi in meno tempo di quello necessario per generare le posizioni dei raggi. È possibile aggiungere reticoli, schiuma e texture periodici e non periodici a qualsiasi livello di dettaglio richiesto.

10.4. Field-Driven Design

Il Field-Driven Design è un concetto abilitante che si basa sulla modellazione implicita. Offre numerosi vantaggi per gli utenti finali e le organizzazioni, come una maggiore flessibilità ed efficienza della progettazione. I campi che rappresentano diversi tipi di dati come distanza, forza o valori di velocità possono essere utilizzati e persino combinati per migliorare la geometria implicita per prestazioni ottimali.

Sebbene molti diversi tipi di dati possano essere convertiti in campi, ci concentreremo solo sui campi di distanza, poiché sono il primo tipo di campo che si affronta in nTop Platform. Quando si creano modelli tramite un'interfaccia di programmazione visiva, l'output è più della semplice rappresentazione: sotto ogni operazione implicita risiede un'equazione che restituisce i valori di distanza al confine della geometria. Come la temperatura nel nostro ambiente, i dati sulla distanza sono ovunque. Può essere campionato con incrementi molto grandi o molto piccoli da qualsiasi altezza o profondità in qualsiasi asse. I valori di distanza uguali a zero definiscono il confine della geometria. I valori di distanza negativi definiscono cosa c'è dentro, mentre i valori positivi definiscono cosa c'è fuori.

Parlando in termini di campo, la presenza o l'assenza del modello digitale entro un certo confine spaziale deriva dall'interpretazione dei campi, come visibile in Figura 159; dei valori numerici precisi descrivono tutto il modello in 3D e la visualizzazione grafica risulta un ausilio al progettista.

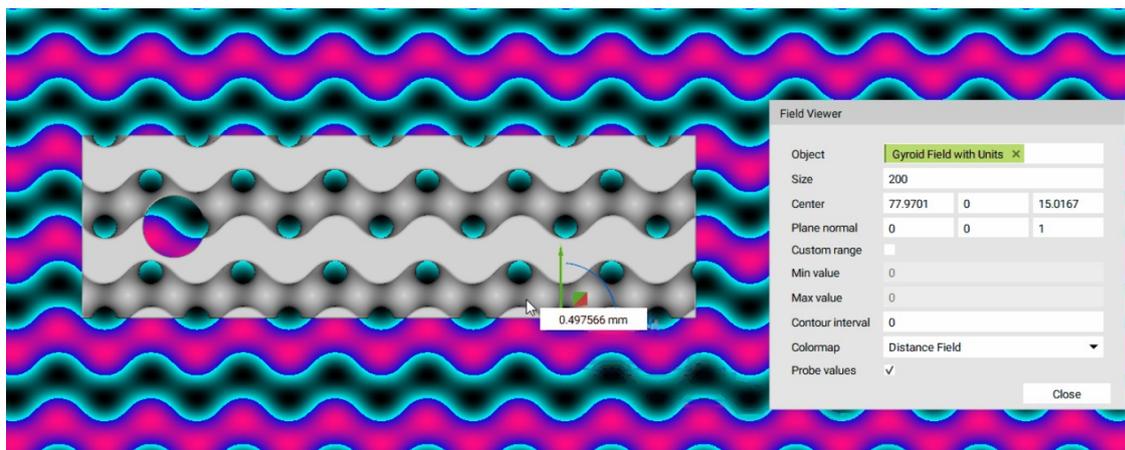


Figura 159 – Solido con TPMS e vista sottostante come grandezza di campo secondo la tecnica di interpretazione geometrica di nTopology

Le operazioni booleane sono alcuni dei primi comandi che qualsiasi designer o ingegnere apprende quando viene introdotto alla modellazione 3D. La combinazione di due semplici geometrie di mesh è facile, ma l'esecuzione di questa operazione tra parti di mesh complesse come i reticoli comporta sicuramente una serie di errori ad un certo punto. Tuttavia, la modellazione implicita tratta questi problemi in modo completamente diverso che non falliscono mai: calcolare implicitamente l'unione booleana di due geometrie è solo questione matematica di estrarre i valori minimi di due campi di distanza sovrapposti. L'inversione di questa condizione per estrarre i valori massimi tra i due campi risulterà in un'intersezione booleana.

Ingegneri e progettisti che utilizzano un approccio basato sul campo per guidare i modelli impliciti sono liberati da frustranti impostazioni manuali, rielaborazioni e riparazioni dei dati e hanno la capacità di mettere a punto e controllare i propri dati. Possono concentrarsi su progetti creativi e rivoluzionari con un percorso agevole verso la produzione. Dalla modellazione alla simulazione alla produzione, i campi

sono sempre presenti nei flussi di lavoro principali di nTop Platform e consentono agli utenti di guidare la geometria con strati di dati sintetizzati e schematizzati.

nTopology lavora quindi con tecniche di interpretazione geometria computazionale basata sui campi, vale a dire che il software elabora i modelli 3D in base a come essi sono matematicamente descritti nello spazio con grandezze numeriche di campo.

In breve, si può affermare che la progettazione guidata sul campo è un modo per i team di progettazione, analisi e produzione di sovrapporre le informazioni in un unico modello ingegneristico. Questo approccio consente di aumentare di ordini di grandezza la velocità di iterazione della progettazione e migliora notevolmente la collaborazione tra i team.

Tramite le manipolazioni dei campi è possibile modificare le forme delle strutture lattice e non solo, in modo da allungarle, deviarle o orientarle nel modo che più si desidera.

Questo genere di operazioni sarebbe impossibile con i software tradizionali di modellazione parametrica ma con nTopology si ha un notevole controllo spaziale di tutto il modello. La Figura 160 mostra un esempio di come si possono alterare le dimensioni e le forme di una struttura cellulare mista, variandone dunque, sia il tipo che la densità.

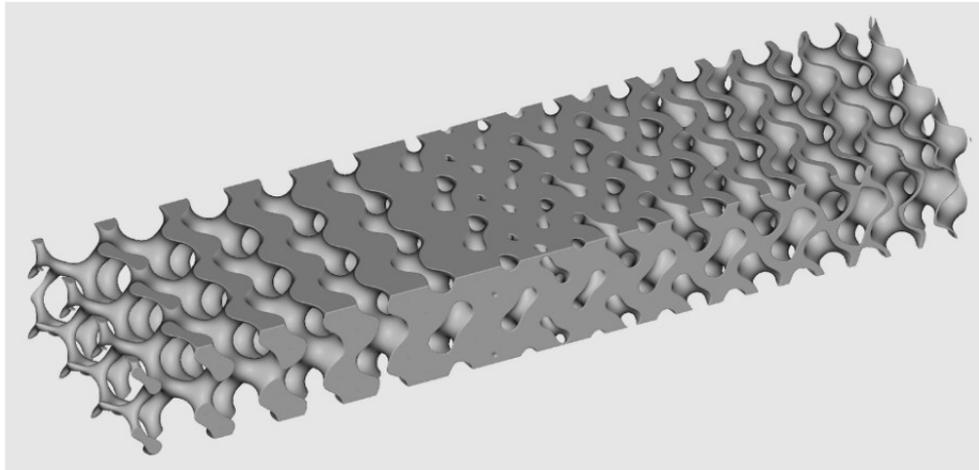


Figura 160 – Reticolo implicito giroide variabile da zone maggiormente solide (regione centrale) a travi (a sinistra) e a TPMS a parete interna sottile (a destra).

I reticoli che si vanno a creare tramite manipolazione dei design non hanno vincoli stringenti o limitazione di design, ma solitamente le preoccupazioni dei progettisti sono rivolte essenzialmente alla resistenza degli spessori minimi e quindi alla lavorabilità durante la produzione con tecniche di A.M.

Il termine "reticolo" si riferisce a qualsiasi struttura composta da un sottile schema di materiale e aria. In nTopology, sono disponibili molteplici strutture TPMS, reticoli di grafi e corpi reticolari. Un tipo a traliccio è una struttura composta da travi che non hanno spessore. Un corpo reticolare può essere una struttura TPMS, un modello personalizzato o un reticolo grafico con spessore incluso.

Le celle elementari comunemente adoperate fanno parte di specifici moduli di comando all'interno del software e sono anche molto diverse fra loro (Figura 161); a partire da queste è possibile generale le strutture desiderate con la moltiplicazione spaziale delle celle elementari

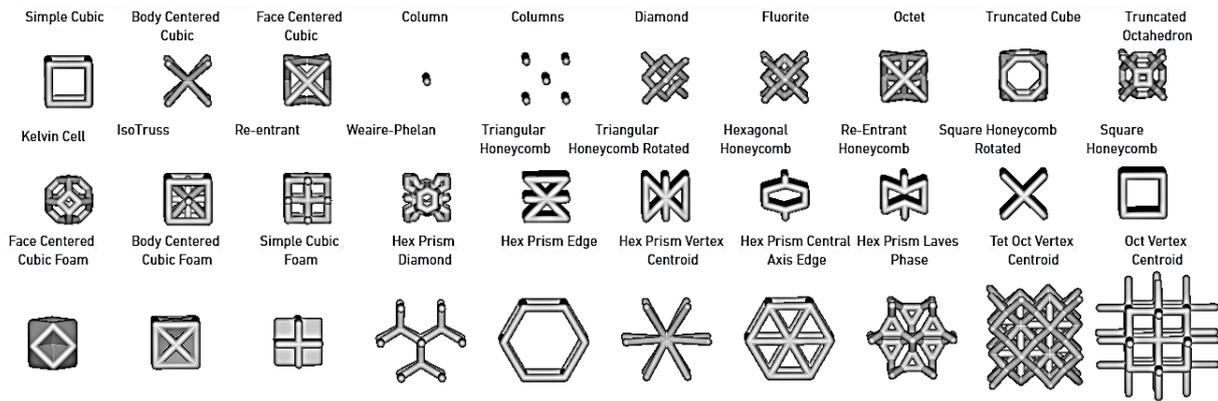


Figura 161 – Celle elementari a fondamento della generazione di strutture lattice personalizzate

10.5. Prove di modellazione

Come ulteriore sviluppo dei canali conformali, si è ritenuto interessante sperimentare l'approccio di modellazione in nTopology per scopi didattici; in particolare, le prove vedono coinvolti i comuni blocchi con i tratti di canale conformale nei quali è stata infiltrata una geometria lattice per scopi qualitativi.

A partire dall'insieme degli inserti laterali e degli inserti dei carrelli inerenti allo stampo Techno da modificare, ecco che tramite nTopology è stato possibile stravolgere il design interno dei blocchi con pochi comandi.

Il frutto di queste prove di modellazione è rivelato in Figura 162: l'elenco di comandi per ricavare questo design è elencato come segue:

- 1) Si avvia il programma e si inizia con l'importazione dei modelli CAD da elaborare
- 2) Si convertono i corpi solidi in corpi impliciti secondo la pratica automatica di nTopology
- 3) Si richiamano dei comandi tramite icone o parole, per avviare operazioni a volte già preimpostate, come in questo caso guscio e giroide insieme
- 4) Si modificano i parametri caratteristici della struttura in base alle preferenze, variando lo spessore delle pareti interne separatorie e l'orientazione UVW della cella elementare giroide.
- 5) Si attuano operazioni booleane per unire/sottrarre/intersecare parti di blocchi come voluto se necessario
- 6) I modelli così ottenuti sono quelli da stampare previo controllo dei raccordi e dei fori necessari da inserire per la successiva asportazione delle polveri non solidificate, in seguito alla produzione dell'inserto
- 7) Se l'obbiettivo consiste nel ricavare il dominio di fluido refrigerante da utilizzare come corpo di simulazione, allora è necessario sfruttare le potenzialità delle operazioni booleane di sottrazione e salvare i design risultanti come una copia in positivo dell'oggetto da stampare.
- 8) Alla fine della progettazione si procede tranquillamente alle fasi di mesh ed esportazione che risulta molto agevole e completa, con tutti i controlli del caso direttamente all'interno del software.

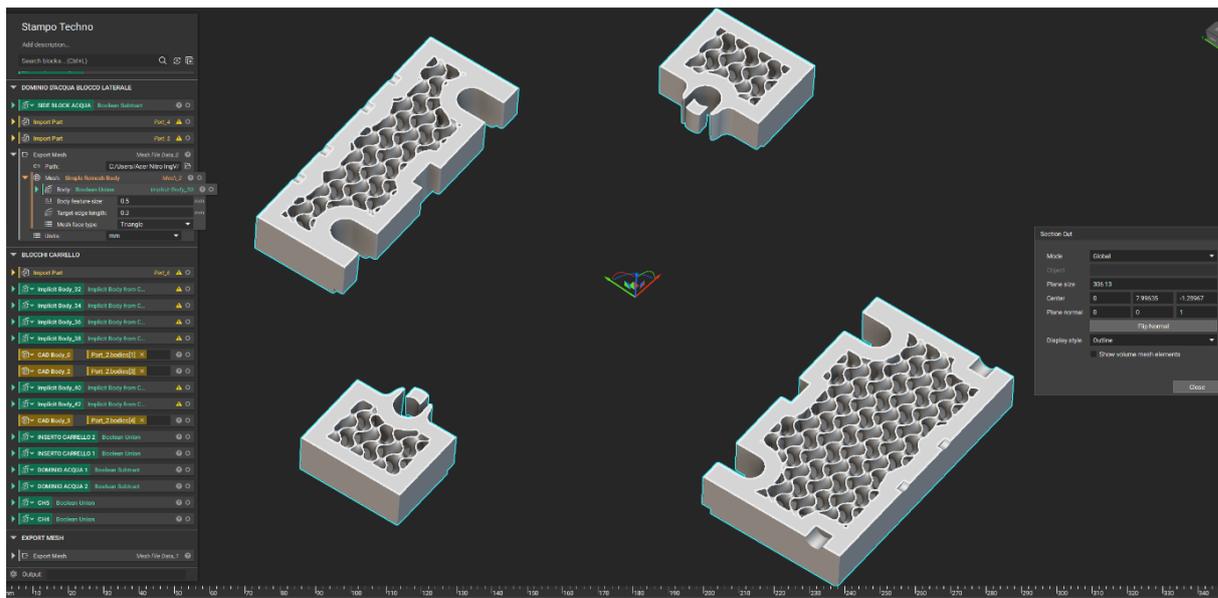


Figura 162 – Inerti con strutture giroidi generiche da realizzare in A.M.

Gli algoritmi che permettono la manipolazione solida degli oggetti 3D sono piuttosto semplici e intuitivi, e seguono una logica tipica dell'informatica con sezioni annidate, ripetute o cicliche.

Difatti, grazie all'impostazione algoritmica è possibile variare dei parametri, creati come variabili, e ripercorrere automaticamente la storia di modellazione rigenerando i risultati di output.

Questo primo test di modellazione piuttosto semplice è l'inizio di una lunga fase di apprendimento, dove sono richieste una serie di accortezze che non riguardano la pratica in nTopology bensì le considerazioni progettuali tipiche di un problema ingegneristico.

Al fine di realizzare un design corretto e funzionale bisogna prestare attenzione a molti fattori, come ad esempio:

- Spessori minimi e raggi di raccordo per la resistenza strutturale e la corretta produzione degli oggetti di design
- Valutazione degli ingombri e delle connessioni di ingresso/uscita come dominio di fluido refrigerante
- Studio e simulazione dell'eventuale percorso di fluido all'interno delle strutture lattice per validare un buon progetto di raffreddamento mirato.

Con questo elenco di raccomandazioni si vuole evidenziare il fatto che non è sufficiente stampare in 3D i modelli solidi così generati in modo semi-automatico e veloce, piuttosto bisogna ancora valutare se e come eseguire una serie di operazioni, quali la modifica dell'orientamento delle geometrie per consentire il flusso di un fluido, separare fisicamente porzioni dell'oggetto in esame così da migliorare il potere di asportazione di calore ecc.

In modo simile, al posto delle le giroidi è stato ideato un modello con infiltrazioni di strutture casuali di Voronoi, come da Figura 163, e con poche semplici operazioni è piuttosto comodo saltare da un design all'altro con semplici click del mouse.

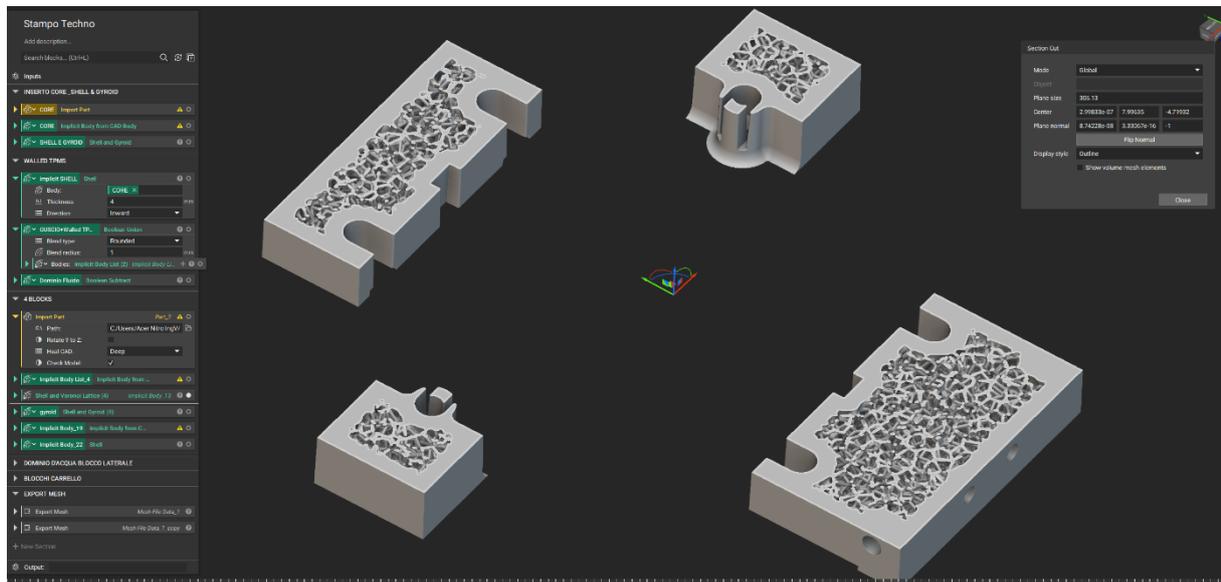


Figura 163 – Inserti con strutture lattice Voronoi casuali

Infine, come prova didattica, è stato creato molto semplicemente il blocco punzone del nostro stampo con tipica giroide al suo interno, Figura 164.

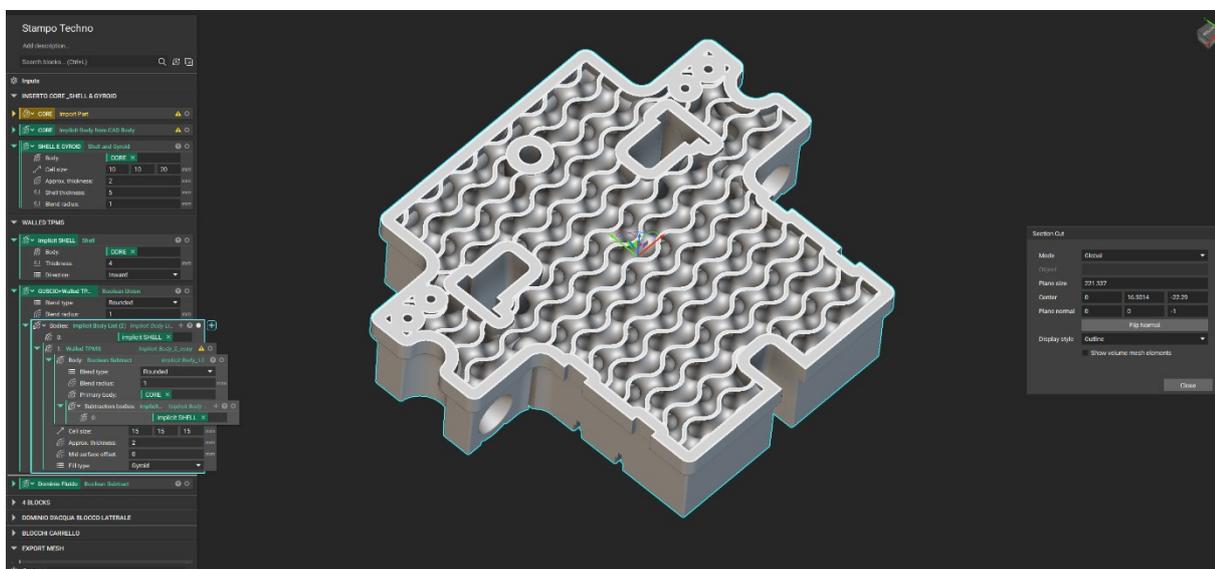


Figura 164 – Unico inserto punzone (Core) riempito con strutture TPMS giroidi a parete, come prova di modellazione

In base alle funzioni scelte nel programma si ottengono diversi risultati, come in prima battuta la scelta di TPMS del tipo 'walled' (cioè a parete interna e quindi 2 domini) oppure semplice.

Soprattutto nel caso di un unico blocco centrale a raffreddare il core dello stampo, bisogna porre particolare concentrazione a quali porzioni di struttura assottigliare o ispessire per guidare il flusso nelle zone prescritte, e infine garantire un buon attraversamento di fluido refrigerante nelle numerose cavità giroidali. Queste operazioni sono state trascurate dal momento che richiedono molta attenzione e studio, pertanto sono affidate a studi futuri che si occuperanno di tale argomento.

Le variazioni ai domini di acqua refrigerante che sono state implementate grazie ad NTopology sono visibili a partire dalla Figura 165 per il canale n°6 modificato e dalla Figura 166 per i canali n°4 e n°5.

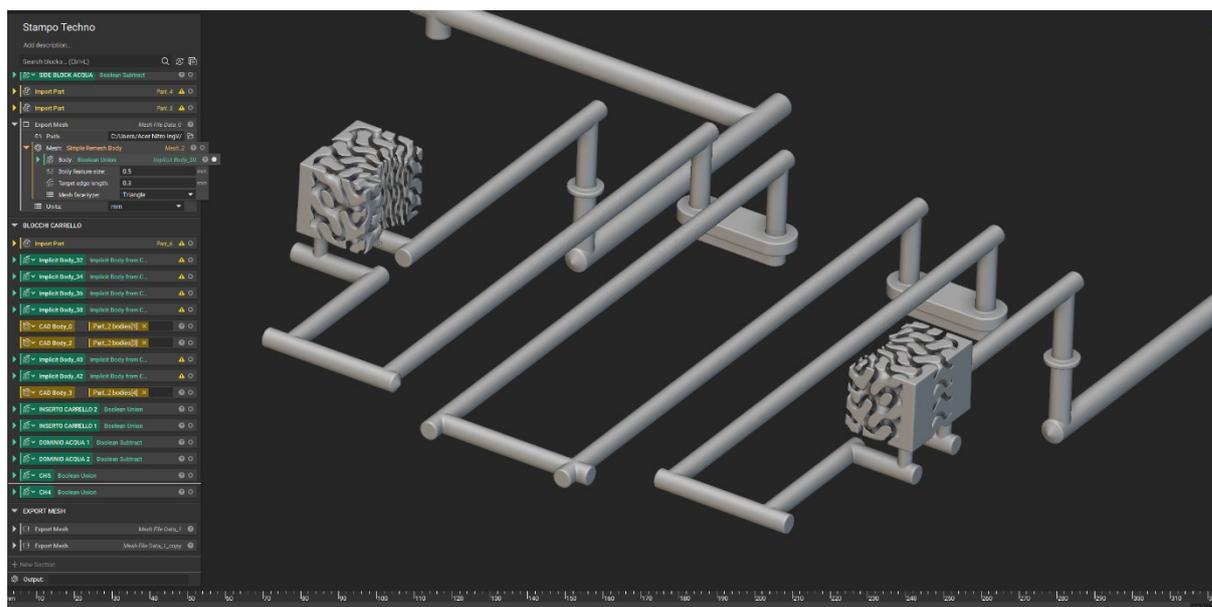


Figura 165 – Canale n°6 con inserto in lattice giroide a simmetria cilindrica come dominio di raffreddamento ad alte prestazioni termiche

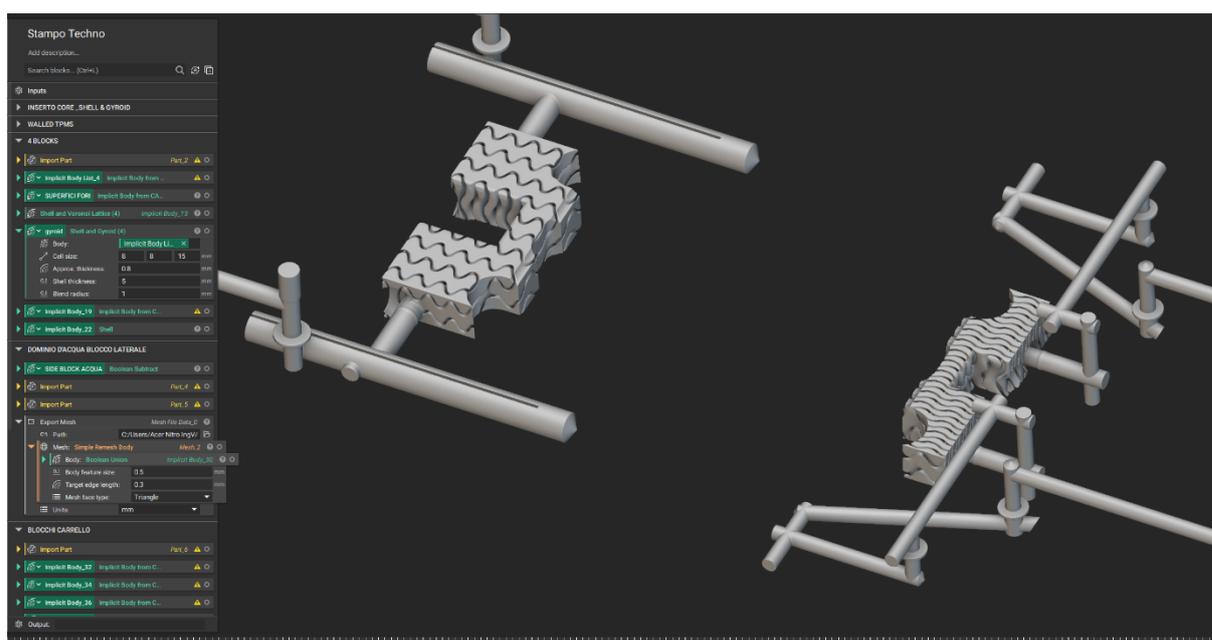


Figura 166 – Canali n°4 e n°6 con l'aggiunta di strutture lattici giroidi custom, con incavo, come dominio di raffreddamento ad alte prestazioni termiche

Nel primo caso, per il canale n°6 la modellazione è stata impostata secondo strutture TPMS a simmetria cilindrica in modo da allinearsi alle forme stesse del blocchetto. Similmente i canali 4 e 6 contengono adesso un dominio complesso TPMS che è dedicato agli hotspot rilevati nella scatola in poliammide da stampare. Si può notare come siano stati intagliate anche delle forme semplici rettangolari per meglio separare e influenzare i percorsi di fluido refrigerante fra ingresso e uscita dei canali.

Di base questo design è già sufficiente per poter essere valutato a livello di simulazioni di flusso e di raffreddamento per il processo di iniezione plastica, ma di sicuro non è il progetto ottimale che porterà i migliori risultati.

Non a caso sarebbero necessarie alcune successive operazioni atte a validare il design così ottenuto. In particolare, sono generalmente richieste modifiche all'orientamento delle strutture giroidi, magari con variazioni manuali e personalizzate dei campi di definizione, modifiche delle dimensioni delle celle elementari per uno studio in termini di caduta di pressione massima e flusso turbolento, nonché infine uno studio di stress termomeccanico e resistenza statica per i carichi di esercizio.

Il lavoro di tesi termina qui, con la presentazione di queste nuove tecnologie e possibilità di sviluppo; non contempla ulteriori simulazioni dal momento che richiederebbero studi specifici, dettagliati e prove reali sperimentali a sostegno delle proprie idee di progettazione.

La ricerca in merito a questo settore avanzato, procede a buon passo, ma solo il tempo e l'evoluzione delle necessità industriali potrà favorire l'accrescimento delle capacità ingegneristiche per strutture avanzate, lattice e non.

Con la speranza che il futuro sia sempre più aperto alla ricerca scientifica e allo sviluppo di nuovi concept e prototipi, il software nTopology è in prima linea per affrontare e aiutare i progettisti in questo cambiamento e mette a disposizione di chiunque gli strumenti per le infinite applicazioni possibili che potranno mai essere realizzate.

Indice delle Figure

Figura 1 – Esempio di pressa a iniezione standard	8
Figura 2 – Elementi base di una pressa a iniezione	9
Figura 3 – Sistema di fabbricazione additiva con tecnologia Laser Bed Powder Fusion	13
Figura 4– Specifiche di base della stampante di polveri metalliche con tecnologia LBPF	14
Figura 5 – Composizione dell'acciaio Maraging 1.2709	15
Figura 6 – Proprietà meccaniche per l'acciaio maraging 1.2709	15
Figura 7 – Ripartizione delle fasi del processo di iniezione plastica rispetto al tempo ciclo totale.....	18
Figura 8 – Esempificazione grafica del tipo di flusso in un condotto	22
Figura 9 – Grafico temperatura stampo-portata di refrigerante, in base al numero di Reynolds.....	23
Figura 10 – Schema di un circuito completo di raffreddamento per uno stampo tradizionale	24
Figura 11 – Schema delle configurazioni dei layout di raffreddamento: parallelo e serie	25
Figura 12 – A sinistra, esempio di circuito di raffreddamento articolato, lato matrice (piastra matrice nascosta invisibile); A destra, esempio di circuito di raffreddamento piano, lato punzone (piastra punzone in trasparenza)	26
Figura 13 – a) Lama piatta (Baffle); b) Fontana circolare (Bubbler); c) Pin termico.....	27
Figura 14 – Lama deviatrice (Baffle) e schema di funzionamento	28
Figura 15 – a) Deflettore a elica (Helix baffle); b) Deflettore a spirale (Spiral baffle).....	28
Figura 16 – Schema di funzionamento per un inserto termico	29
Figura 17 – A sinistra, deflettore a spirale inserito nel core (tassello maschio); a destra gorgogliatore centrale e canali a doppia elica	29
Figura 18 – Configurazione delle linee di flusso nei canali conformali	31
Figura 19 – Esempi di canali a spirale per il raffreddamento conforme	31
Figura 20 – Altri esempi di design per i canali conformali di tipo circolare e a sezione complessa variabile	32
Figura 21 – Linee guida per le distanze nel design dei canali di raffreddamento conformati	33
Figura 22 – Modello CAD complessivo dello stampo Techno, a sinistra; principali piastre di interesse con vista in trasparenza, a destra.....	36
Figura 23 – Scatola con pin estrattori, baffles e inserti a vista	37
Figura 24 – Viste del modello CAD del pezzo 'Scatola' con informazioni sulle grandezze di base	38
Figura 25 – Informazioni di base e valutazione qualitativa delle caratteristiche per l'acciaio 1.2083	39
Figura 26 – Diagramma di rinvenimento per l'acciaio 1.2083	40
Figura 27 – Informazioni base dell'acciaio 1.2083	40
Figura 28 – Gradi dei materiali Ultramid.....	41
Figura 29 – Dati tecnici del materiale del componente in PA66 [dati cataloghi BASF].....	42
Figura 30 – Immagine riassuntiva della scheda stampaggio per lo stampo Techno [dati originali di produzione]	43
Figura 31 – Diagramma a torta del tempo ciclo di riferimento.....	44
Figura 32 – Tabella riassuntiva dei dati di processo.....	44
Figura 33 – Canale caldo 3D e misura annessa	45
Figura 34 – Canale caldo e punto di attacco sul pezzo, vista 3D (in sezione) a sinistra, vista in piano (wireframe) a destra.....	45
Figura 35 – Oggetto di simulazione con gate e hot runner	46
Figura 36 – Mappa degli spessori in base all'analisi Solidworks	47
Figura 37 – Risultati tabellati dell'analisi degli spessori	47
Figura 38 – Mappa degli spessori su vista mesh del pezzo in base al calcolo VISI Flow	48
Figura 39 – Mappa degli spessori sul pezzo in base al calcolo Moldex3D, nel range tra 2,5mm e il max di 8,99mm, a sinistra; distribuzione statistica dei valori numerici in diagramma a barre, a destra.....	49
Figura 40 – Layout originale del sistema di canali di raffreddamento convenzionali nello stampo Techno: numeri dispari indicano gli ingressi del fluido refrigerante, numeri pari le uscite	50
Figura 41 – Distinzione numerica dei canali di raffreddamento originali, da 1 a 6	50
Figura 42 – Grafici di convergenza normalizzati dei parametri obiettivo durante la simulazione di flusso.....	51
Figura 43 – Grafico delle pressioni generali e pressioni relative per i due set di canali separati, canali 1,2,3 in alto, canali 4,5,6 in basso	52
Figura 44 – Grafico delle velocità nei canali 1,2,3 in alto, canali 4,5,6 in basso	53
Figura 45 – Tabelle dei diametri e delle aree dei canali, insieme alle velocità e alle portate ottenute dalla simulazione di flusso in SolidWorks	53
Figura 46 – Portate di acqua suggerite da Visi Flow durante il Setup delle simulazioni di raffreddamento	55
Figura 47 – Modifiche al pezzo Scatola, confronto prima e dopo	56
Figura 48 – Baffles a confronto, prima e dopo il taglio.....	57
Figura 49 – Vista di tutti i baffles intagliati nella mezzeria per definire il percorso di flusso.....	57
Figura 50 – Modello di stampo virtuale adoperato nelle simulazioni, dimensioni 500x500x220 mm	58
Figura 51 – Finestra di lavoro per il modulo SolidWorks Plastics 2022.....	60
Figura 52 – Setup per la fase di riempimento e mantenimento, in alto, con rispettivi profili come da scheda stampaggio.....	61
Figura 53 – Curva del materiale PA66 A3WG7: grafico della viscosità, in alto, volume specifico, in basso	62
Figura 54 – Tempo di iniezione	63
Figura 55 – Pressione alla fine dell'iniezione	63
Figura 56 – Temperatura del fronte di flusso	64
Figura 57 – Temperatura alla fine dell'impaccaggio, a sinistra con vista ritagliata dell'effetto pelle, a destra	65
Figura 58 – Ritiro volumetrico percentuale.....	66
Figura 59 – Stima preliminare del tempo di raffreddamento dall'analisi di riempimento	67

Figura 60 – Stima della temperatura alla fine del raffreddamento (dall’analisi di riempimento).....	67
Figura 61 – Tempo di raffreddamento per la simulazione di base a 32s, mappa unica.....	68
Figura 62 – Temperatura della parte alla fine del raffreddamento (di 32s).....	69
Figura 63 – Temperatura della parte alla fine del raffreddamento: vista in sezione per le zone calde nel range 190-230°C	69
Figura 64 – Temperatura dei canali d’acqua per il raffreddamento di 32s	70
Figura 65 – Pressione (in alto) e vettori velocità (in basso) del fluido del sistema refrigerante.....	71
Figura 66 – Tempo di raffreddamento dello auto-determinato in base al raggiungimento della temperatura di estrazione di 190°C nel 90% della parte	72
Figura 67 – Grafico isoline del tempo di raffreddamento.....	72
Figura 68 – Temperatura della parte alla fine del raffreddamento.....	73
Figura 69 – Sezione con distribuzione di temperatura della parte alla fine del raffreddamento	73
Figura 70 – Temperatura dei canali d’acqua	74
Figura 71 – Caricamento del flusso di calore.....	74
Figura 72 – Temperatura della parte alla fine del raffreddamento, per un tempo di 32s a sinistra, tempo di autoset di 10,49s a destra, stimato in base alla temperatura di estrazione; range di confronto 40-80°C	75
Figura 73 – Analisi di deformazione: spostamento da stress totale.....	76
Figura 74 – Setup del gate e del canale caldo durante la preparazione del modello in Visi Flow.....	77
Figura 75 – Setup per la fase di riempimento (in alto) e mantenimento (in basso) in Visi Flow.....	78
Figura 76 – Parametri del materiale PA66 A3WG7 in VISI, con relative curve caratteristiche	79
Figura 77 – Modello di simulazione completo di gate, canale di alimentazione e canali di raffreddamento	79
Figura 78 – Grafico delle isocrone del tempo di riempimento	80
Figura 79 – Pressione durante il riempimento.....	81
Figura 80 – Diagramma pressione-portata-tempo durante il riempimento	81
Figura 81 – Diagramma pressione-portata-tempo comprensivo del mantenimento.....	82
Figura 82 – Tempo tecnico di raffreddamento, secondo stima del riempimento	83
Figura 83 – Tempo di solidificazione	83
Figura 84 – Temperatura del materiale relativa ai soli valori cavità.....	84
Figura 85 – Setup dell’analisi termica per il calcolo automatico del tempo di raffreddamento, con indicazione con freccia blu del punto di riferimento.....	85
Figura 86 – Temperature nel pezzo in seguito al calcolo del tempo di raffreddamento.....	85
Figura 87 – Numero di Reynolds per il layout di canali di raffreddamento.....	86
Figura 88 – Incremento di temperatura per il fluido refrigerante	86
Figura 89 – Deformazione totale del componente.....	87
Figura 90 – Setup del canale di iniezione caldo in Moldex3D	88
Figura 91 – Modello mesh in Moldex3D con vista stampo.....	89
Figura 92 – Informazioni principali sul materiale usato in Moldex3D.....	89
Figura 93 – Modello mesh in Moldex3D con vista stampo.....	90
Figura 94 – Riassunto dei parametri di iniezione per le simulazioni in Moldex3D.....	90
Figura 95 – Setup delle fasi di simulazione da eseguire in successione	91
Figura 96 – Profili di iniezione e mantenimento adoperati nella simulazione Moldex3D.....	91
Figura 97 – Setup del raffreddamento in Moldex3D.....	92
Figura 98 – Setup del canale caldo con diversi scenari	92
Figura 99 – Temperature alla fine del riempimento, con vista in sezione e diagramma statistico	93
Figura 100 – Tempo di riempimento.....	93
Figura 101 – Densità alla fine dell’impaccaggio.....	94
Figura 102 – Melting core, a sinistra; massimo ritiro volumetrico, a destra.....	94
Figura 103 – Tempo di raffreddamento stimato durante la fase di riempimento, vista dei 3 casi in iso-superfici per 5,10 e 16,457s	95
Figura 104 – Tempo di raffreddamento con vista in sezione, a sinistra, e con vista iso-superficie a destra, per la mesh grezza di partenza	96
Figura 105 – Tempo di raffreddamento con vista in sezione per il pezzo con mesh a 2,3mm e relativo diagramma statistico.....	96
Figura 106 – Tempo di raffreddamento iso-superficie a 32s.....	96
Figura 107 – Temperatura alla fine del raffreddamento	97
Figura 108 – Iso-superficie a 190 °C per la Temperatura alla fine del raffreddamento con diagramma statistico.....	97
Figura 109 – Incremento di temperatura del liquido refrigerante.....	98
Figura 110 – Efficienza dei canali di raffreddamento	98
Figura 111 – Temperatura centrale, a sinistra, e temperatura media, a destra	99
Figura 112 – Deformazione totale.....	100
Figura 113 – Impostazioni dell’analisi delle deformazioni	100
Figura 114 – Nuovi canali di raffreddamento n°4 e n°5 (in alto), e n°6 (in basso) con porzioni personalizzate.....	101
Figura 115 – Blocchi contenenti i tratti di canali conformali, da associare ai canali già esistenti	102
Figura 116 – Vista del canale n° 5 e relativi blocchi di attraversamento.....	103
Figura 117 – Layout di raffreddamento conformale senza i connettori di estremità.....	104
Figura 118 – Temperatura alla fine del raffreddamento per il design conformale tipo 1	104
Figura 119 – Grafico iso-superficie (set a 155°C) e confronto di distribuzione statistica per la temperatura alla fine del raffreddamento rispetto al design originale.....	105
Figura 120 – Vista in sezione e distribuzione statistica per il risultato di tempo di raffreddamento.....	106
Figura 121 – Temperatura centrale, a sinistra, e temperatura media, a destra	106
Figura 122 – Massima temperatura alla fine del raffreddamento	107
Figura 123 – Tempo di raffreddamento in iso-superficie per il design conformale tipo 1, con set su 10s, a sinistra, e 16s, a destra	107
Figura 124 – Massimo tempo di raffreddamento	108
Figura 125 – Vettori velocità del liquido refrigerante	108

Figura 126 – Efficienza dei canali di raffreddamento con (in alto) e senza il canale n°1 (in basso).....	109
Figura 127 – Deformazione totale sul componente	110
Figura 128 – Grafico di distribuzione delle deformazioni totali sul componente	110
Figura 129 – Canale n°3 rimodellato con tratti conformali	111
Figura 130 – Vista in sovrapposizione del canale n°3 originale (in blu) e di quello conformato (in giallo)	111
Figura 131 – Vista del layout completo per il design 2: Baffles evidenziati in arancione, traslati di 18mm in direzione Y (verso il centro del pezzo)	112
Figura 132 – Distribuzione di temperatura per il design conformale V2.....	113
Figura 133 – Tempo di raffreddamento con vista in sezione e distribuzione statistica.....	113
Figura 134 – Tempo di raffreddamento in iso-superficie per il design conformale tipo2, set a 15,6s.....	113
Figura 135 – Inserti stampo adottati nel nuovo processo di simulazione, come test finale di ottimizzazione.....	114
Figura 136 – Grandezze caratteristiche per il materiale degli inserti Rame-Berillio	115
Figura 137 – Tempo di raffreddamento per il nuovo caso di studio con inserti.....	115
Figura 138 – Massimo tempo di raffreddamento stimato da Moldex per la simulazione con inserti e layout di raffreddamento di tipo 1	116
Figura 139 – Temperatura alla fine del raffreddamento per il nuovo caso di studio con inserti	117
Figura 140 – Driver di costo per i prodotti stampati a iniezione	118
Figura 141 – Ripartizione in percentuale dei fattori di costo per uno stampo classico	119
Figura 142 – Inserti da produrre e informazioni di base.....	120
Figura 143 – Informazioni sul costo degli inserti	121
Figura 144 – Tabelle di calcolo dei costi variabili di trasformazioni per i due casi a confronto, in base ai principali parametri di costo	121
Figura 145 – Modello di costo principale per il calcolo del costo dello stampo a singola impronta.....	122
Figura 146 – Stima di costo dello stampo a singola impronta, del tipo convenzionale senza modifiche	123
Figura 147 – Margine di contribuzione e il punto di pareggio per lo stampo originale	124
Figura 148 – Grafico del B.E.P. per il caso di stampo originale senza modifiche	124
Figura 149 – Margine di contribuzione e il punto di pareggio per lo stampo modificato	125
Figura 150 – Grafico del B.E.P. per il caso di stampo modificato con inserti in A.M.	125
Figura 151 – Sintesi dei risultati ottenuti dalle simulazioni per i vari modelli di studio	126
Figura 152 – Caso di studio di letteratura a dimostrazione di strutture reticolari e laticci.....	127
Figura 153 – Formule originali per le differenti geometrie a struttura cellulare TPMS più comuni	128
Figura 154 – Strutture TPMS differenti come dissipatori di calore: Gyroid, Schwarz-P, e Lidinoid a varia periodicità e spessore	129
Figura 155 – Esempi di applicazioni termiche delle TPMS negli scambiatori di calore.....	129
Figura 156 – Esempio di struttura TPMS con parete come struttura di raffreddamento per un tassello	130
Figura 157 – Esempio di solido derivato da sottrazione booleana di una struttura giroide: in grigio e azzurro sono rappresentati i due domini spaziali contraddistinti	131
Figura 158 – Interfaccia di lavoro nTopology con esempi di struttura personalizzata a densità variabile	132
Figura 159 – Solido con TPMS e vista sottostante come grandezza di campo secondo la tecnica di interpretazione geometrica di nTopology	134
Figura 160 – Reticolo implicito giroide variabile da zone maggiormente solide (regione centrale) a travi (a sinistra) e a TPMS a parete interna sottile (a destra).....	135
Figura 161 – Celle elementari a fondamento della generazione di strutture lattice personalizzate	136
Figura 162 – Inserti con strutture giroidi generiche da realizzare in A.M.	137
Figura 163 – Inserti con strutture lattice Voronoi casuali.....	138
Figura 164 – Unico inserto punzone (Core) riempito con strutture TPMS giroidi a parete, come prova di modellazione.....	138
Figura 165 – Canale n°6 con inserto in lattice giroide a simmetria cilindrica come dominio di raffreddamento ad alte prestazioni termiche	139
Figura 166 – Canali n°4 e n°6 con l'aggiunta di strutture laticci giroidi custom, con incavo, come dominio di raffreddamento ad alte prestazioni termiche	139

BIBLIOGRAFIA

- Archer, David, "Early Cost Estimation of Injection Molded Components" (1988). Open Access Master's Theses. Paper 674. Paper 674, <https://digitalcommons.uri.edu/theses/674>
- Attar, H.; Ehtemam-Haghighi, S.; Kent, D.; Dargusch, M.S. Recent developments and opportunities in additive manufacturing of titanium-based matrix composites: A review. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2018, 133, 85–102.
- Atzeni E, Salmi A. Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Journal of Manufacturing Processes* 2015; 20: 500-506.
- Autodesk, MoldFlow Insight, <http://www.autodesk.com,2010>.
- Bremen, S.; Meiners, W.; Diatlov, A. Selective laser melting: A manufacturing technology for the future? *Laser Tech. J.* 2012, 9, 33–38.
- Castro, C. E., Rios, M. C., (2005), *Journal of Polymer Engineering Tuncay Erzurumlu*, (2006), *Materials and Design*
- D.E. Dimla, M. Camilotto, F. Miani, "Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools", *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 164–165, 2005, Pages 1294-1300, ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.162>.
- David o. Kazmer, *Injection Mold Design Engineering*, 2nd edition, Hanser Publishers, Munich Cincinnati
- Douglas S. Thomas and Stanley W. Gilbert, "Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing", National Institute of Standards and Technology, Special Publication 1176
- Douglas M. Bryce, *Plastic Injection Molding*, Volume I, Volume II e Volume III - Society of Manufacturing Engineers, ® Dearborn, Michigan
- Doubenskaia, M.; Domashenkov, A.; Smurov, I.; Petrovskiy, P. Study of selective laser melting of intermetallic TiAl powder using integral analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2018, 129, 1–14.
- Eleonora Atzeni Luca Iuliano Paolo Minetola Alessandro Salmi, (2010), "Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 16 Iss. 5 pp. 308 – 317
- Frazier, W.E. Metal additive manufacturing: A review. *J. Mater. Eng. Perform.* 2014, 23, 1917–1928.
- Griffiths, V.; Scanlan, J.P.; Eres, M.H.; Martinez-Sykora, A.; Chinchapatnam, P. Cost-driven build orientation and bin packing of parts in selective laser melting (SLM). *Eur. J. Oper. Res.* 2019, 273, 334–352.
- H. S. Park and N. H. Pham, (2008), Design of conformal channel for an automotive part. *Int. J. Automotive Technology*.
- H.S. Park, X.P. Dang, Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 11 (2010) 879–890, doi: 10.1007/s12541-010-0107-z .
- Heising W, Wolfgang M, Knizek C, Lukic V. *Get Ready for Industrialized Additive Manufacturing*. The Boston Consulting Group, 2017. Available from www.bcg.com (lastly accessed on September 7th, 2018).
- Khan M., Afaq S. K., Khan N. U., Ahmad S. Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design. *ISRN Mechanical Engineering* 2014
- Kruth, J.-P.; Badrossamay, M.; Yasa, E.; Deckers, J.; Thijs, L.; Van Humbeeck, J. Part and material properties in selective laser melting of metals. In *Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining*, Shanghai, China, 19–23 April 2010; pp. 1–12.
- Mellor, S.; Hao, L.; Zhang, D. Additive manufacturing: A framework for implementation. *Int. J. Prod. Econ.* 2014, 149, 194–201.
- Moldflow Design Guide, A Resource for Plastics Engineers, First Edition, Edited by Jay Shoemaker Moldflow Corporation, Framingham, Massachusetts, U.S.A
- O. Tuteski , A. Kořcov , Conformal cooling channels in injection molding tools –design considerations, *Mach. Technol. Mater.* 12 (2018) 4 45–4 48 .
- Paolo Minetola, *Appunti del Corso di "Stampi e processi di formatura"*, Politecnico di Torino, 2020.
- Paolo C. Priarone, Vincenzo Lunetto, Eleonora Atzeni, Alessandro Salmi, "Laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing: On the correlation between design choices and process sustainability", *Procedia CIRP*, Volume 78, 2018, Pages 85-90, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.058>.
- Park, H. S., & Pham, N. H. (2009). Design of conformal cooling channels for an automotive part. *International Journal of Automotive Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12239-009-0011-7>
- R.Ramanarayanan, C. HariVenkateswara Rao, C. Venkateswara Reddy *International journal of Advanced Materials Manufacturing & Characterization (IJAMMC)* Vol3 (2013)
- Sachs E., Wylonis E., Allen S., Cima M., Guo H. "Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three-dimensional printing process". *Polymer Engineering & Science* 2000;40.5:1232-47.
- Saifullah, a B. M., Masood, S. H., & Sbarski, I. (2009). *New Cooling Channel Design for Injection Moulding*. *World Congress on Engineering* 2009, Vols I and II, I(May 2014), 700–703.
- S. Marques, A. Fagali de Souza, J. Miranda and I. Yadroitsau. Design of conformal cooling for plastic injection molding by heat transfer simulation.

- 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.
- Simons M. Additive manufacturing - A revolution in progress? Insights from a multiple case study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018; 96(1-4): 735-749.
- Suchana A. Jahan¹ and Hazim El-Mounayri¹, (2016), Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding
- Venkatesh, G.; Ravi Kumar, Y., (2017), Thermal analysis for Conformal Cooling Channel J.C. Ferreira, A. Mateus, (2003), *Journal of Materials Processing Technology*
- Vojnová E. The benefits of a conforming cooling systems the molds in injection molding process. *Procedia Engineering* 2016; 149:535-3.
- Wang Y., Yu K. M., Wang C. C., Zhang Y. Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling. *Computer-Aided Design* 2011;43.8:1001-10.
- Xiao Chen, Ping Zhou, Ren-ke Kang, Zhi-gang Dong, Xiao-chen Ai, *Applied Thermal Engineering* 81 (2015)
- Y.A. Cengel, (1998), "Termodinamica e Trasmissione del Calore", Mc Graw-Hill.
- Young, Son K., "A Cost Estimation Model for Advanced Manufacturing Systems.", *International Journal of Production Research*. 1991. 29(3): 441-452.
- Yu Wang, Kai-Min Yu, Charlie C.L. Wang, (2015), Spiral and conformal cooling in plastic injection molding. *Computer-Aided Design*.
- 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

SITOGRAFIA

- Stampaggio ad iniezione, http://www.edurete.org/pd/sele_art.asp?ida=2538
- <http://www.stellini.it>
- Turbulent Flow Rate Calculator, <https://www.smartflow-usa.com>
- <https://learn.ntopology.com/>
- <https://ntopology.com/blog/implicit-modeling-for-mechanical-design/>
- <https://www.moldex3d.com/moldex3d-help/>

Ringraziamenti

I primi Ringraziamenti per questo lavoro sono dedicati innanzitutto alla QTool S.r.l nonché all'Ing. Ahmed Eldagani, tutor accademico e gestore di questa startup innovativa di successo, che ha sempre trovato il tempo e il modo di guidare il percorso di ricerca e apprendimento, collaborando attivamente alla definizione di questa tesi di laurea, nonostante l'immensa distanza che ci separa. Si ringraziano quindi anche la società Techno Plast S.r.l. per aver condiviso il caso di studio e aver fornito tutti i dati a inerenti al progetto assegnato.

Un ringraziamento speciale va al Prof. Paolo Minetola, come relatore ufficiale di tesi e esperto del settore, grazie al quale è nato l'interesse e la passione per il settore dell'ingegneria dello stampaggio a iniezione, della simulazione e della continua ricerca per l'autoapprendimento.

Ancora, nonostante pochi ma grandi intralci di carriera, si ringrazia il Politecnico di Torino e tutti gli insegnanti del percorso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica per l'esperienza accademica indimenticabile.

Infine direi che giunto il momento di ringraziare me stesso, per aver affrontato con coraggio e audacia ogni sfida che si è presentata: dalla definizione del percorso di tesi, alle infinite ore di simulazioni ripetute per ogni variabile modificata, alla ricerca dei software di calcolo e del loro funzionamento nonché alle noiose e lunghe presentazioni richieste dal tutor come aggiornamento dei lavori. Molte ore insonni e instabilità emotiva hanno contraddistinto gli sconfinati mesi di lavoro che tutto considerato sono volti al termine, regalando un'opportunità di formazione personale molto stimolante

Ringrazio anche una persona speciale, che è stato il mio punto di riferimento e la mia salvezza in tutti questi anni, dottoressa e fidanzata Giovanna Carpentiero, la quale è stata presente ogni volta come unico supporto morale ed emotivo ineguagliabile.