

Raffreddamento a impulsi di stampi per stampaggio ad iniezione

H.Schirmacher, Wilhelmshaven

Il raffreddamento a impulsi offre un'interessante possibilità di raffreddare uno stampo in modo uniforme. L'articolo illustra le potenzialità di questa tecnologia con i risultati di alcune simulazioni agli elementi finiti.

Come noto, gli stampi per lo stampaggio dei termoplastici ricevono calore dal materiale iniettato in un processo discontinuo e, tipicamente, lo cedono al sistema di raffreddamento in un processo continuo. La temperatura della superficie delle cavità dello stampo viene in questo modo determinata primariamente dalla temperatura del mezzo di raffreddamento, ammessa una portata sufficiente.

In alternativa a questa metodologia si può utilizzare, come grandezza regolatrice, la portata volumetrica del mezzo di condizionamento a temperatura più bassa, realizzando degli impulsi di raffreddamento di durata definita ottenuti con una valvola elettromagnetica.

Un'accurata analisi dei vantaggi e degli svantaggi delle due strategie richiede l'opportuna considerazione dei parametri di processo relativi al tempo ottimale di raffreddamento e la valutazione dell'omogeneità del campo di temperatura delle superfici dello stampo.

Modellazione del raffreddamento

Le relazioni termodinamiche del sistema manufatto – stampo – canale di condizionamento possono essere descritte attraverso equazioni differenziali di Fourier con le corrispondenti condizioni iniziali e al contorno. Anche per semplici problemi piani una soluzione analitica è di difficile applicazione. Le analisi si avvalgono perciò di un modello agli elementi finiti [1,2], rappresentato con i suoi parametri essenziali in figura1.

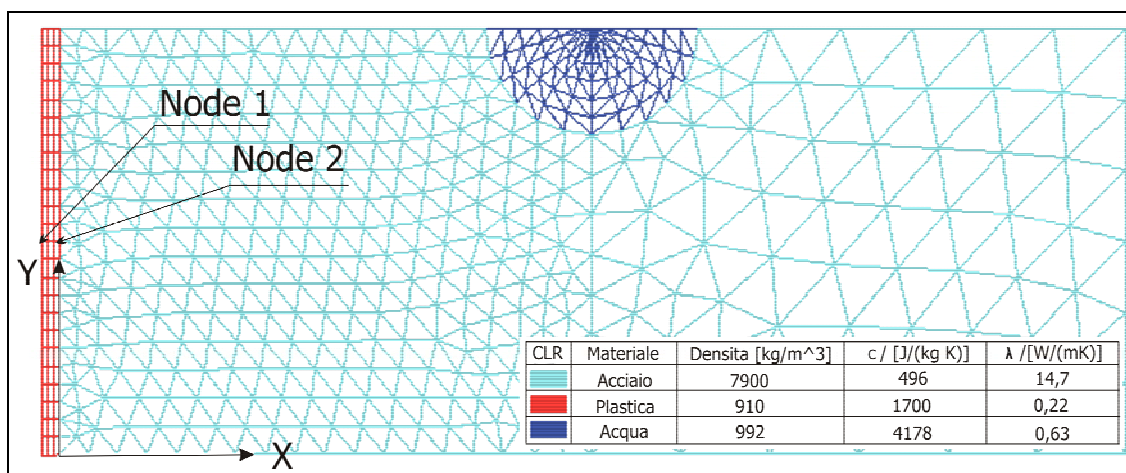


Figura 1: FE – modello e costanti dei materiali

Le diverse temperature iniziali vengono assegnate ai nodi in funzione del materiale contenuto nell'elemento. L'assegnazione della nuova condizione al contorno dopo l'estrazione dell'elemento in materia plastica all'inizio del tempo secondario (estrazione) permette la simulazione dello scambio di calore attraverso la superficie dello stampo aperto.

Se ad ogni inizio ciclo si assegnano ai vari nodi i valori delle temperature finali dei cicli calcolati precedentemente, si possono seguire a piacimento i comportamenti termici. La modellazione di un condizionamento continuo si differenzia da quella di un condizionamento intermittente solamente nei dati della temperatura del mezzo di raffreddamento e nel coefficiente di scambio termico sulla

parete del canale di raffreddamento: se infatti il mezzo di raffreddamento fluisce, la sua temperatura può essere considerata costante (ammessa una portata sufficiente) mentre se non si muove la temperatura nel canale di raffreddamento diviene indeterminata e il coefficiente di scambio termico diminuisce nettamente.

Nelle figure 2 e 3 sono rappresentati, a titolo di esempio, gli andamenti ricavati della temperatura di alcuni nodi scelti sul modello.

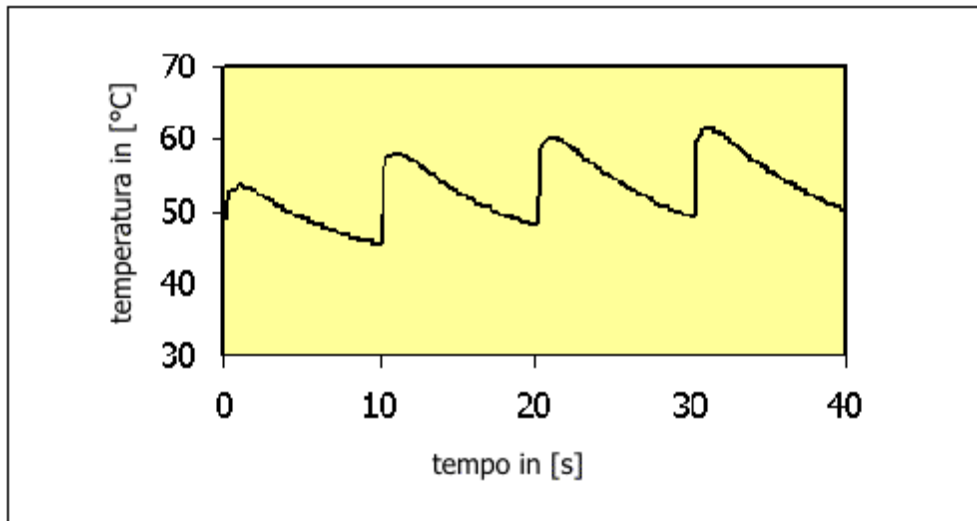


Figura 2 : Andamento della temperatura media della superficie dello stampo T (NODE 2)

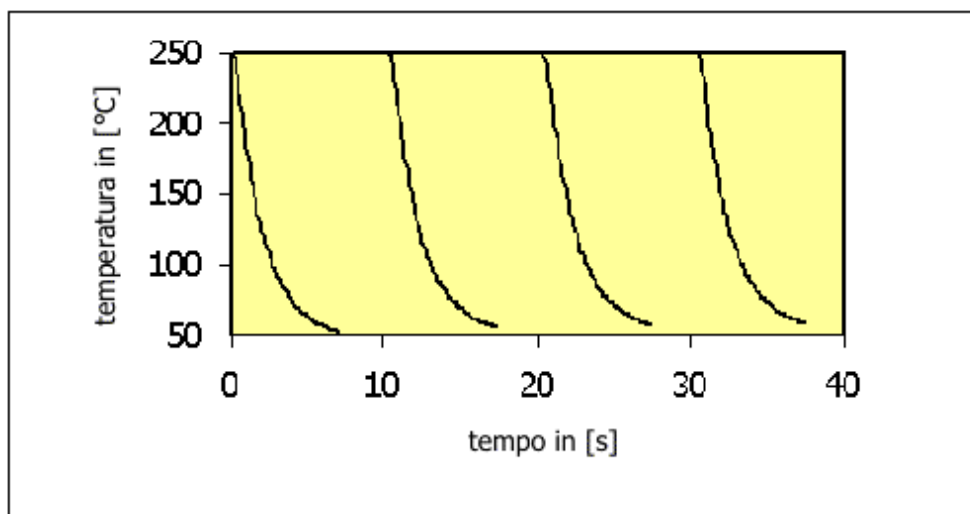


Figura 3 : Andamento della temperatura media del pezzo stampato T (NODE1)

Ottimizzazione dei parametri

Per ogni geometria e temperatura finale di estrazione il tempo di raffreddamento dipende dalla temperatura del fluido di raffreddamento e, in modo particolare, dalla durata degli impulsi di raffreddamento. Al tempo stesso bisogna garantire che la temperatura della cavità dello stampo non scenda al di sotto di un determinato valore. Da ciò derivano sia un limite minimo per la temperatura di raffreddamento (T_{TM}^*) che un limite massimo per la durata dell'impulso (t_I^*). Il compito dell'ottimizzazione consiste nel determinare le condizioni della più bassa temperatura del mezzo di raffreddamento con la più breve durata di impulso con le quali si raggiunge la temperatura di estrazione T_E assegnata garantendo una temperatura media minima dello stampo

T_{WZmin} . Sotto un'altra angolazione si ottiene come risultato anche il più breve tempo di ciclo per il modello considerato.

Grazie alla sue possibilità di trattare ogni tipo di condizione, questo problema è stato risolto con un procedimento di "evoluzione a due elementi" [3].

Confronto fra i tempi di ciclo

Variando alcuni parametri del modello (ad esempio, spessore del componente stampato e geometria del raffreddamento), il procedimento descritto permette di confrontare i tempi di raffreddamento ottimali per i vari sistemi di condizionamento impostati.

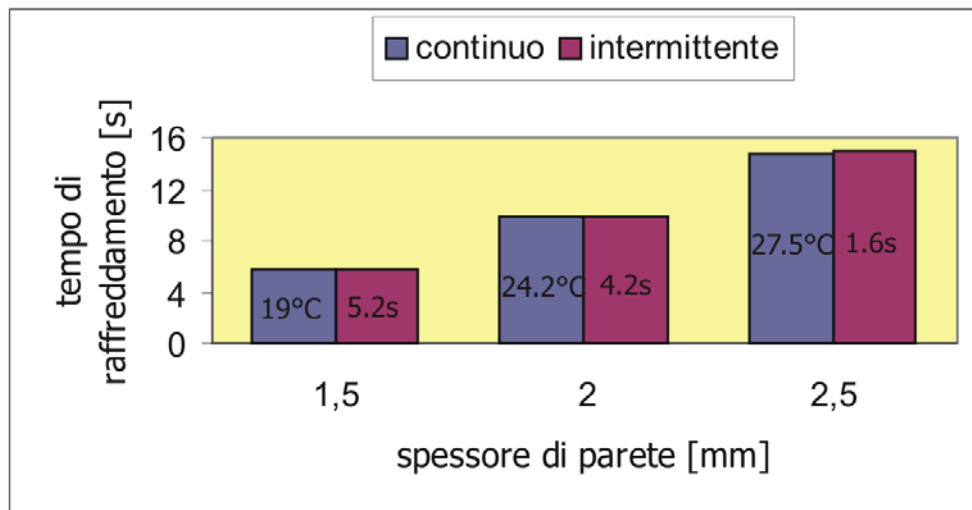


Figura 4: Tempo di raffreddamento in funzione dello spessore di parete (nelle colonne: T_{TM}^* risp. t_i^*)

La relazione tra tempo di raffreddamento e spessore di parete, rappresentata in figura 4, mostra con buona approssimazione un andamento quadratico: ciò significa che il tempo di raffreddamento aumenta proporzionalmente al quadrato dello spessore della parete. Con l'aumento del tempo di raffreddamento cresce anche il rischio di raffreddamenti locali eccessivi della superficie dello stampo. Con il vincolo della temperatura minima dello stampo T_{WZmin} si ottiene un aumento della temperatura del fluido di raffreddamento e dei corrispondenti impulsi di raffreddamento.

I valori all'interno delle colonne di figura 4 indicano i parametri ottimali, con $T_{WZmin}=55^{\circ}C$ e $T_E=70^{\circ}C$. Con un intervallo di integrazione pari a 0,1s non si trovano differenze nei tempi di raffreddamento ottenuti dai due procedimenti.

Se si diminuisce la distanza tra il canale di raffreddamento e il profilo della cavità si ha il rischio di sottoraffreddamento della superficie che potrebbe anche non essere superato dall'uso di impulsi brevi. Nel caso di temperature relativamente alte del mezzo di raffreddamento, usate per evitare questo rischio, si potrebbe avere un'insufficiente durata degli impulsi per mantenere il ciclo. (Figura5).

In queste condizioni entrambi i sistemi presentano ancora una volta un potenziale paragonabile. Attraverso queste considerazioni diventa chiaro che, aumentando la distanza tra raffreddamento e profilo della cavità da raffreddare, diminuiscono le differenze tra le due tecniche, poiché gli impulsi divengono sempre più piccoli e corrispondentemente le temperature del mezzo di raffreddamento sempre più piccole.

Allo stesso modo, variando T_{WZmin} , i rispettivi tempi di raffreddamento non presentano differenze. Le due metodologie permettono di ottenere risultati soddisfacenti con il rispetto di diverse temperature minime dello stampo.

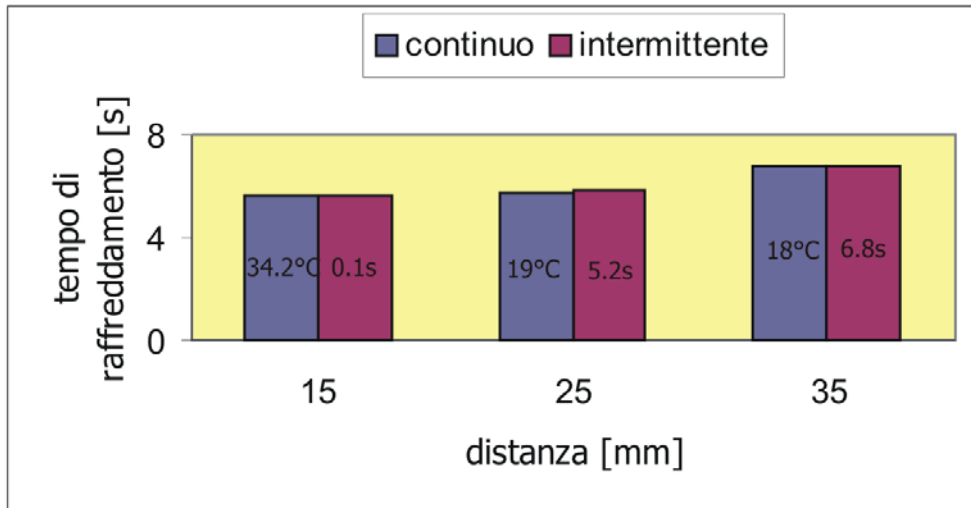


Figura 5: Tempo di raffreddamento in funzione della distanza "raffreddamento – contorno" (s=1.5mm)

Quanto più calda si voglia mantenere la temperatura dello stampo, tanto più caldo dovrà essere il mezzo di raffreddamento e relativamente più corti gli impulsi da scegliere (Figura 6). Se la differenza $T_E - T_{WZmin}$ diviene troppo piccola si ottengono lunghezze di impulso prive di significato (risultato T_{WZmin} a 65° C nella figura 6). Questa affermazione è legata al fatto che ad ogni ciclo di iniezione è assegnato un definito impulso di raffreddamento.

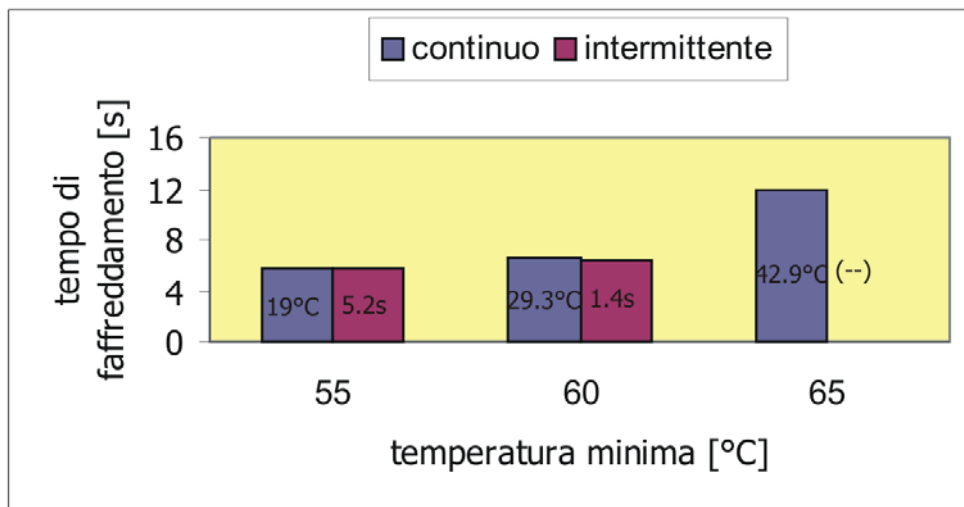


Figura 6: Tempo di raffreddamento a diverse temperature minime dello stampo (s=1.5mm)

Omogeneità del campo di temperatura

Poiché la distribuzione della temperatura sulla superficie dello stampo influenza in modo importante la qualità del pezzo stampato, l'obiettivo di un sistema di raffreddamento è di minimizzare le differenze di temperatura per assicurare la miglior uniformità.

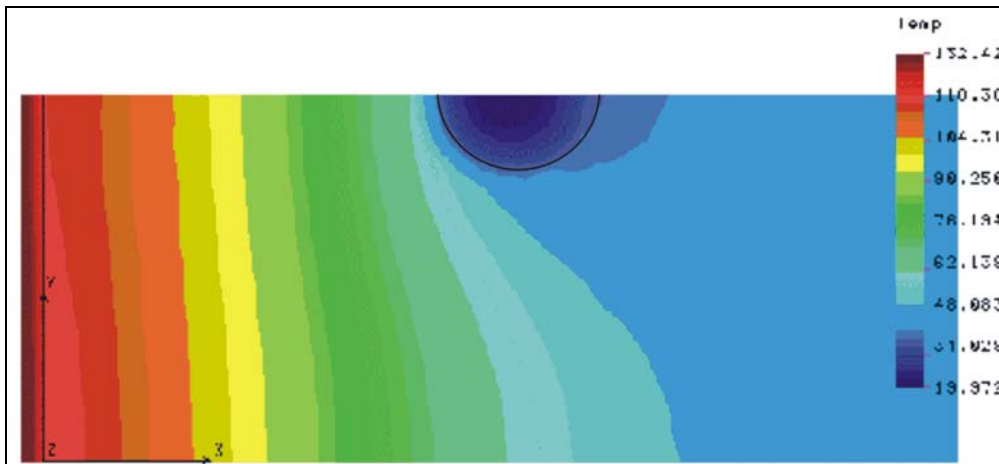


Figura 7: $T(x,y,t)$ con $s=2.5\text{mm}$ e raffreddamento a impulsi

La figura 7 illustra un esempio delle mappe di temperatura in una sezione dello stampo. Si può notare che tra il pezzo stampato ed il canale di condizionamento si forma, in prima approssimazione, un gradiente di temperatura lineare. Sulla superficie dello stampo si riconoscono zone fredde in prossimità del canale di raffreddamento e zone calde in prossimità del pezzo. Le zone dello stampo che non si trovano tra il pezzo stampato ed il canale sono praticamente termicamente inattive.

L'omogeneità del campo di temperatura, che possiamo definire come errore di temperatura, può venire descritta attraverso la formula $(T_{WZmax}-T_{WZmin})/T_{WZmedio}$. I risultati di vari calcoli sono riportati alla figura 8.

Da questa notiamo che un aumento dello spessore della parete, che significa un aumento dei tempi di raffreddamento, porta a una diminuzione della differenza di temperatura per entrambi i metodi. Il raffreddamento ad impulsi porta però ad una migliore omogeneità a fine ciclo con riduzioni di circa il 20 % nell'errore di temperatura rispetto al condizionamento continuo.

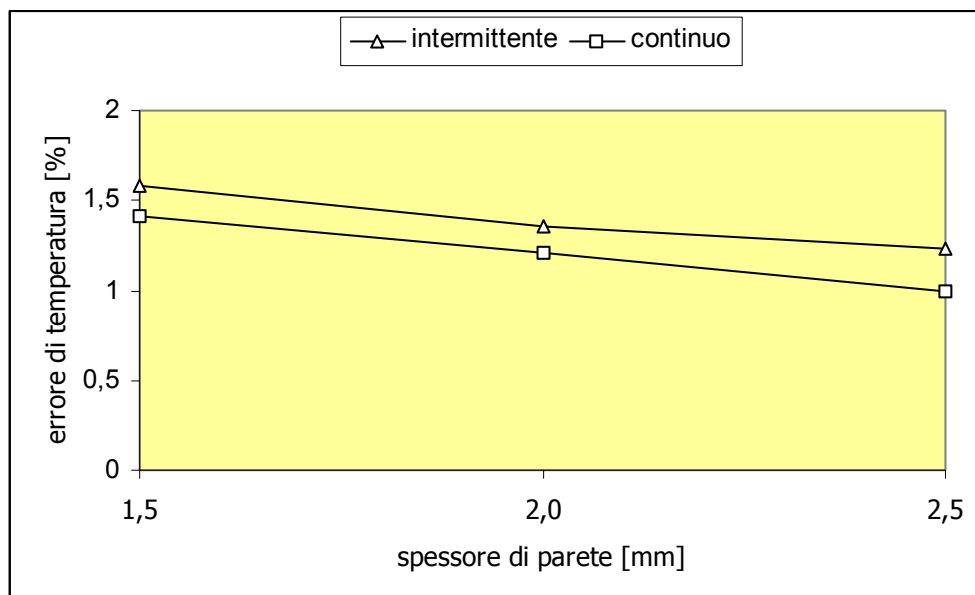


Figura 8: Errore di temperatura in funzione dello spessore di parete (distanza dal foro $A=25\text{mm}$)

Questo vantaggio del raffreddamento a impulsi diventa molto significativo nelle condizioni in cui sono disponibili distanze ridotte tra il circuito di raffreddamento e la sezione del pezzo da realizzare. Queste condizioni sono tipiche di piccoli maschi e di tasselli mobili.

La figura 9 oltre a ricordare che, come ben noto, l'errore di temperatura diminuisce all'aumento della distanza tra circuito e sezione da raffreddare evidenzia i grandi vantaggi del sistema ad impulsi nelle situazioni precedenti.

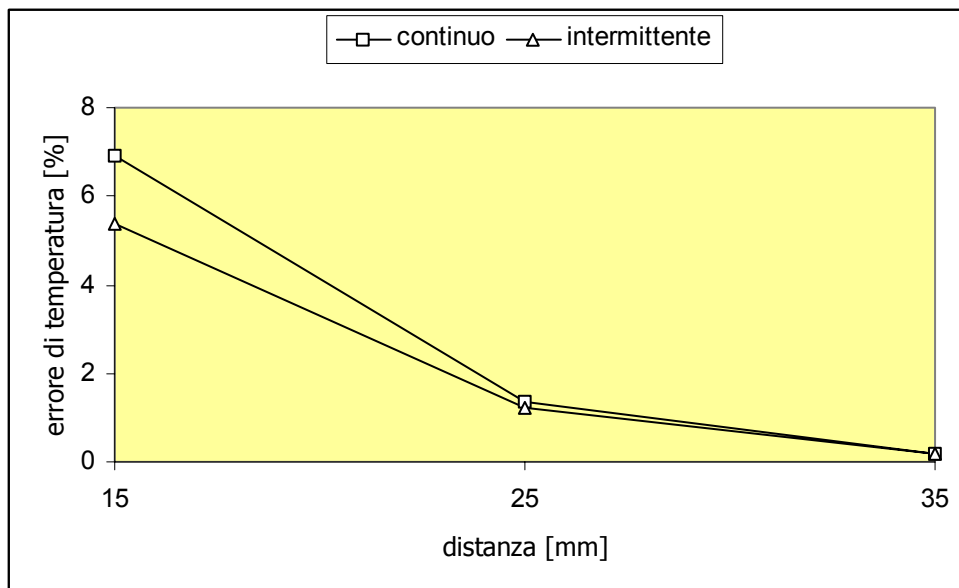


Figura 9: Errore di temperatura in funzione della distanza canale – sezione (s=1.5mm)

“Robustezza” dei sistemi

Nell'ultima serie di prove è stata analizzata la capacità dei due procedimenti di raffreddamento di tollerare variazioni della durata del tempo secondario (stampo aperto senza pezzo). Come noto, le variazioni nei tempi secondari possono derivare da funzionamenti semiautomatici oltre che da brevi arresti della macchina.

Per simulare questa variabilità, in una serie di 50 simulazioni, sono stati variati i tempi secondari una legge di distribuzione normale assumendo un valore medio di 5 s ed una deviazione standard di 1.5s. All'interno di questi cicli sono stati ottenuti i seguenti valori medi e dispersioni della temperatura media della superficie dello stampo:

- Raffreddamento continuo: $48.2^{\circ}\text{C} \pm 2.46^{\circ}\text{C}$
- Raffreddamento a impulsi: $53.2^{\circ}\text{C} \pm 1.96^{\circ}\text{C}$

Come si può notare le oscillazioni di temperatura sono più piccole per il sistema ad impulsi.

Conclusioni

Se si considera unicamente il potenziale di raffreddamento tra la modalità continua e quella intermittente non si nota alcun vantaggio perché entrambi permettono identici tempi di raffreddamento, fatto salvo il loro utilizzo in condizioni tali da garantire simili temperature della superficie. Questa considerazione non contraddice le affermazioni di utilizzatori [5] di raffreddamento a impulsi relative all'ottenimento di aumenti della produttività. Infatti se si considera anche l'omogeneità del campo di temperatura, fattore che influenza la qualità del manufatto stampato, si notano differenze a vantaggio del raffreddamento ad impulsi con riduzioni dell'errore di temperatura del 20%.

Anche nella simulazione con tempi secondari variabili ha avuto decisamente più successo il raffreddamento a impulsi rispetto a quello continuo. Nell'insieme lo stampo raffreddato a impulsi è sulla sua superficie mediamente più caldo e le differenze di temperatura tra i cicli sono più piccole.

Il raffreddamento a impulsi reagisce in modo più robusto a questo tipo di disturbi.

La realizzazione di un sistema di raffreddamento con alte prestazioni ed elevata stabilità, richiede l'analisi di tutti i fattori con inclusione della scelta dei migliori punti di misura e delle modalità di intervento. Il sistema di calcolo qui descritto rappresenta una valida alternativa per lo sviluppo di nuove e migliori strategie di controllo del raffreddamento dei pezzi stampati.

Letteratura

- [1] Structural Research and Analysis Corporation: COSMOSM, Version 2.6, Los Angeles 2001 (FE-CODE)
- [2] Hell, Friedrich: Grundlagen der Wärmeübertragung. 3.Auflage, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1982
- [3] Schwefel, H.-P.: Evolutionsstrategie und numerische Optimierung. Dissertation TU Berlin, Berlin 1975
- [4] Menges, Mohren: Spritzgießwerkzeuge. 3.Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 1991
- [5] Kotzab, W.: Der Impuls zum Energie sparen. Kunststoffe 5 (1991), Carl Hanser Verlag, München

Autore dell'articolo

Prof. Dr.-Ing. Heiko Schirmacher, nato nel 1964, è Professore di Costruzione di Macchine e di Meccanica Tecnica presso la FH Wilhelmshaven, Facoltà di Ingegneria. Indirizzo E-mail: schirmacher@fbm.fh-wilhelmshaven.de