

Minimizzazione dei difetti tramite simulatore di processo e ottimizzazione numerica

Raul Pirovano, Davide Molteni - XC Engineering S.r.l.
Daniele Grassivaro - FORM S.r.l.

Introduzione

Lo sviluppo di un prodotto prevede varie fasi di calcolo e di design, con una serie di passi atti al raggiungimento della fase di produzione e rilascio. I moderni software di simulazione di processo giocano sempre più frequentemente un ruolo determinante nel miglioramento del prodotto, prevedendo in modo accurato le sue caratteristiche finali e permettendo di valutare l'efficacia di possibili soluzioni alternative. In quest'ottica negli ultimi anni l'ottimizzazione numerica si sta ritagliando sempre più spazio, consentendo di automatizzare, velocizzare e semplificare la fase di ricerca del miglior design.

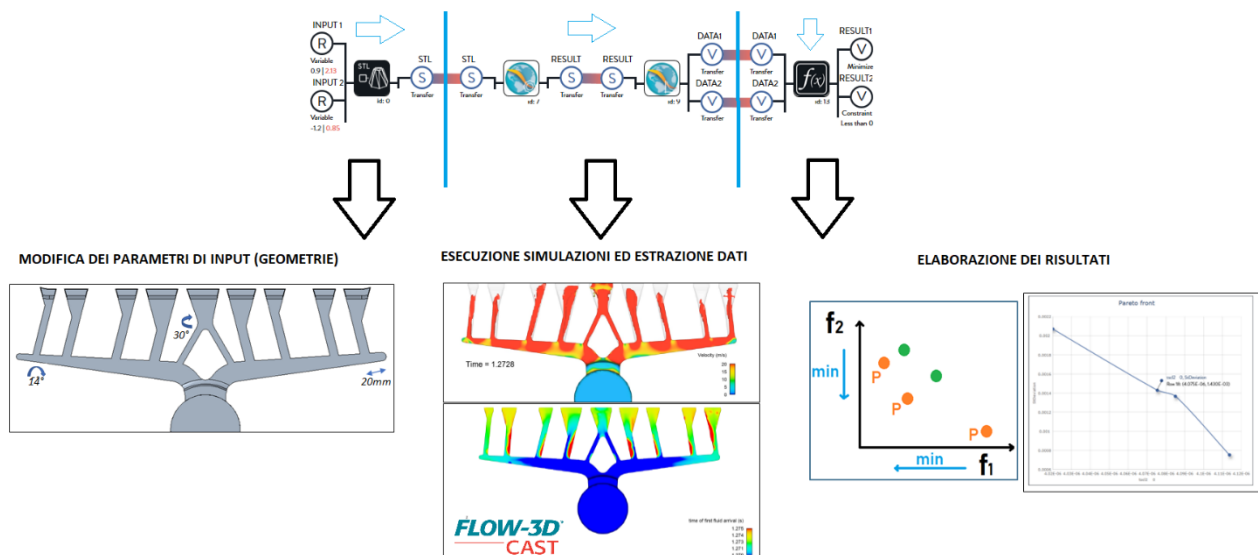


Figura 1: Schematizzazione del processo di ottimizzazione

Ottimizzazione

In matematica e in tutte le sue applicazioni, l'ottimizzazione è la ricerca di una o più soluzioni migliori relativamente ad un certo problema. All'interno di questo settore un ottimizzatore è un software in grado di identificare, suggerire ed eventualmente verificare l'insieme ideale di variabili di input che fornisce le migliori soluzioni progettuali tra tutte quelle possibili.

Nella maggior parte dei casi le relazioni sottostanti tra i parametri di controllo (che chiameremo input del sistema) e le performance misurate (che chiameremo output) sono sconosciute o difficili da risolvere. A volte, inoltre, per poter ottenere la risposta del sistema è necessario avvalersi di complessi modelli numerici che richiedono molto tempo per poter produrre l'output desiderato: esempio tipico è quello dell'utilizzo di simulatori di processo di fonderia, nei quali il risultato della simulazione, in funzione dei parametri scelti, è frutto di un lungo e complesso calcolo di termofluidodinamica 3D.

All'interno del mondo dell'ottimizzazione si trovano numerose e variegata strategie, che si possono classificare in base al numero di test e di dati di cui l'intelligenza dell'ottimizzatore ha bisogno per

comprendere correttamente la natura del problema e fornire la soluzione ottimale. Per la citata complessa natura dei problemi di fonderia, in questo settore si punta su quella categoria specializzata in “costly and black-box functions”, ovvero che si occupa di cercare una soluzione ottima a problemi costosi e di difficile comprensione, con il numero di valutazioni minore possibile. In particolare, nei lavori mostrati nel presente articolo ci si è avvalsi del software di ottimizzazione IMPROVEit, sviluppato appositamente per questo tipo di problemi e con una interfaccia particolarmente semplice ed intuitiva che permette di svolgere agevolmente sia la fase di costruzione del flusso di lavoro che l’elaborazione dei risultati.

Il software di ottimizzazione, infatti, è in grado di interfacciarsi con molteplici software e connetterli tra loro per poter definire in maniera completa il flusso di lavoro e in esso selezionare un numero molteplice di input, ciascuno di essi avente un range di valori (di tipo variabile, intero o categorico) e di output, che rappresentino un obiettivo di minimizzazione, massimizzazione oppure un vincolo del sistema. Con queste informazioni il software esegue ripetutamente, in modo automatizzato e secondo una precisa strategia i calcoli, cambiando i parametri di input ed estraendo i dati da analizzare con lo scopo di ottenere il miglior risultato nel minor tempo possibile, riuscendo a comprendere la natura e la complessità del problema. Automatizzare questi passaggi consente sia di ridurre il tempo di esecuzione dell’intero processo, sia di coordinare in modo ordinato e schematico processi risolutivi complessi.

Per i successivi esempi si è utilizzato come simulatore di processo *FLOW-3D® CAST* (*Flow Science inc.*) per la ricchezza di modelli fisici, che permette di coprire ogni settore e difettosità del mondo della fonderia, e per la sua accuratezza particolare nella determinazione dei difetti da riempimento. Inoltre, la ragione che lo rende ideale per un processo di ottimizzazione del prodotto è la caratteristica di poter disporre una mesh completamente indipendente dalle geometrie utilizzate: la griglia di calcolo è infatti costituita da celle ortogonali di forma fissa al cui interno viene immersa la geometria, senza la necessità di dover discretizzare di volta in volta il volume definito dalle geometrie stesse. Durante un processo di ottimizzazione questo consente all’ottimizzatore di poter modificare i parametri geometrici del sistema e di lanciare immediatamente la simulazione senza dover cambiare nulla del setup, velocizzando notevolmente le operazioni e consentendo un confronto esatto tra le soluzioni, in quanto la discretizzazione dello spazio è sempre la medesima.

Casi studio

Il processo di colata della lega liquida prevede una serie di passaggi: prelevamento del metallo, versamento, riempimento e solidificazione. Uno degli aspetti che più influiscono sul prodotto finale è una corretta alimentazione dello stampo, che ha un’importanza cruciale per la prevenzione di difettosità interne e superficiali e dunque per la qualità, la finitura e la resistenza meccanica del prodotto.

I seguenti casi studio, mostrati per gentile concessione di *FORM S.r.l.* e *Teksid Aluminum*, dimostrano come l’ottimizzazione possa essere utilizzata efficacemente su ogni passaggio di questa fase del processo e di come ciò porti a miglioramenti effettivi dei prodotti da realizzare.

Ottimizzazione del design del canale di colata

Lo stampo, utilizzato per la produzione di un supporto per fari, presenta otto cavità e, come si può notare dal particolare a sinistra di *Figura 2*, nel design iniziale ci sono significative differenze nel tempo in cui il metallo entra nei vari pezzi (l’immagine è colorata con l’istante di tempo in cui il fronte del metallo giunge in ogni punto). Questo causa una riduzione della qualità dei pezzi collegati agli attacchi più distanti dal contenitore e perciò si è deciso di svolgere un’ottimizzazione numerica che variasse la geometria del sistema al fine di minimizzare le differenze tra le tempistiche di ingresso del metallo nell’impronta dei pezzi da stampare.

Vista la semplicità del sistema è stato scelto di modificare la geometria degli attacchi di colata direttamente all'interno di IMPROVEit tramite il modulo di modifica di file STL (stereolitografie). Nel dettaglio, sono stati scelti come input del problema di ottimizzazione l'angolo del canale principale e l'allungamento del tratto di canale secondario.

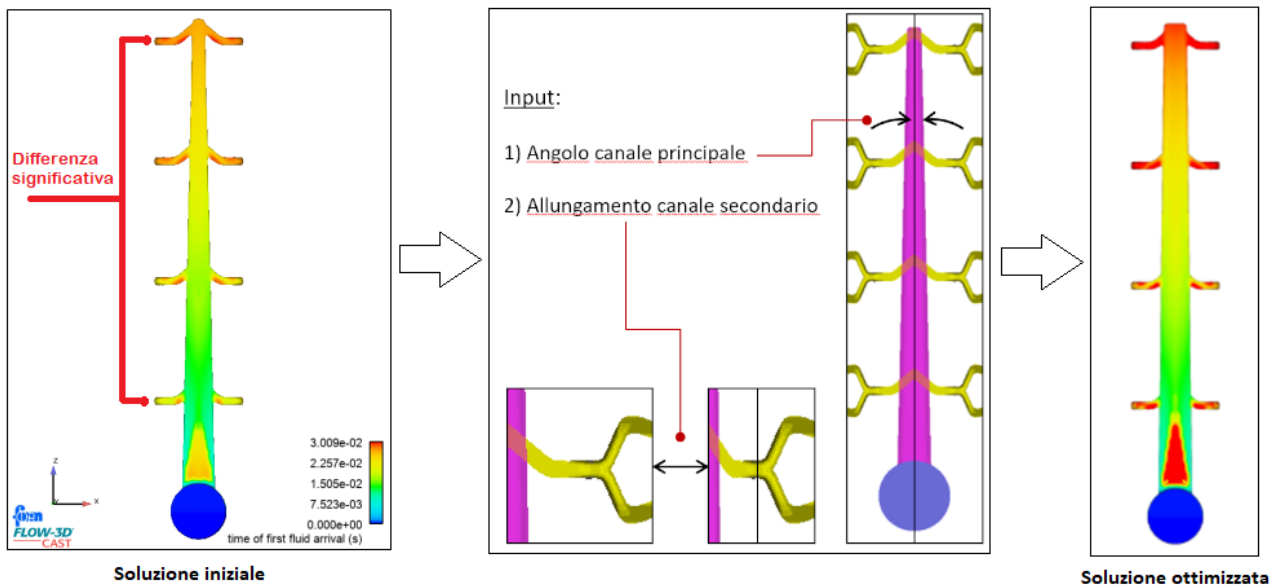


Figura 2: Caso studio: ottimizzazione del design del canale di colata

Una volta preparato il setup della simulazione fluidodinamica il flusso di lavoro è piuttosto semplice (Figura 3, da sinistra a destra): dopo la modifica delle geometrie (input) il processo lancia la simulazione ed elabora i risultati tramite alcune operazioni matematiche per ottenere la differenza tra il tempo di entrata nel primo e nell'ultimo attacco di colata (output).

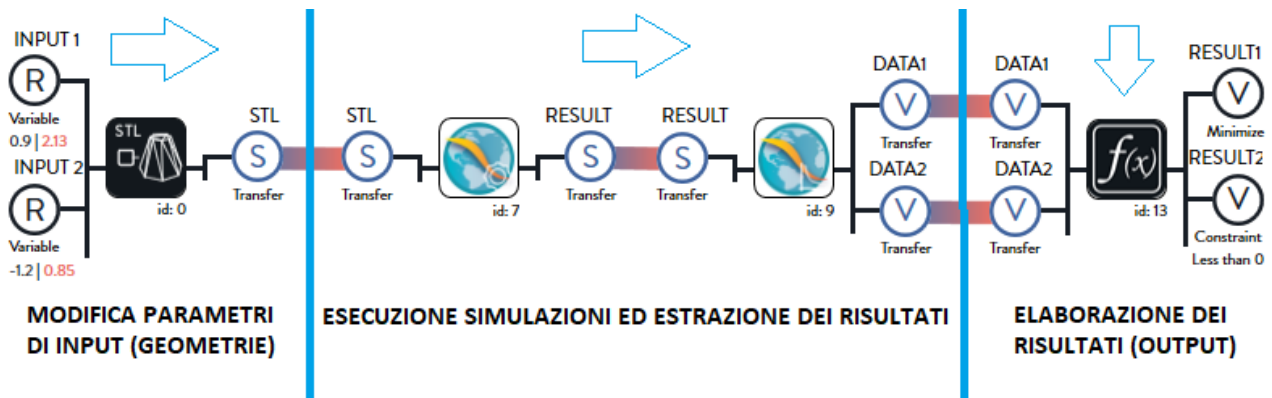


Figura 3: Flusso di lavoro (Workflow) di un'ottimizzazione

Poiché un intero ciclo richiede soltanto pochi minuti si è scelto di eseguire una ottimizzazione sulla base di 35 chiamate, a valle delle quali l'ottimizzatore ha potuto ottenere un risultato decisamente migliorativo e ha reso visibili le correlazioni tra le dimensioni geometriche in gioco e le tempistiche di entrata nelle impronte. In particolare, si nota una forte dipendenza del risultato dalla larghezza del canale centrale, mentre l'estensione delle guide è relativamente poco influente. In Figura 2 è possibile vedere la differenza tra soluzione iniziale (sinistra) e ottimizzata (destra), in cui le tempistiche sono ben più uniformi in tutti gli attacchi: la differenza tra i tempi di ingresso passa da 1.2 centesimi di secondo a soli 2 millesimi di secondo.

Ottimizzazione della fase di iniezione

Durante la progettazione della stampata di coperture di batterie in ambito automotive mediante pressocolata sono state riscontrate molte zone in cui è presente un elevato quantitativo di porosità da gas. Questi difetti possono essere ridotti lavorando su canali di colata e ottimizzando la velocità del pistone, e si è scelto quindi di utilizzare l'ottimizzatore a tale scopo.

Analizzando nel dettaglio l'ottimizzazione, gli input del flusso di lavoro sono i valori della curva di velocità del pistone in prima fase e una vasta gamma di parametri geometrici dei canali, mentre gli obiettivi sono la miglior calibrazione dell'arrivo del metallo agli attacchi di colata e la riduzione della quantità di aria intrappolata nella lega durante questa prima fase del riempimento.

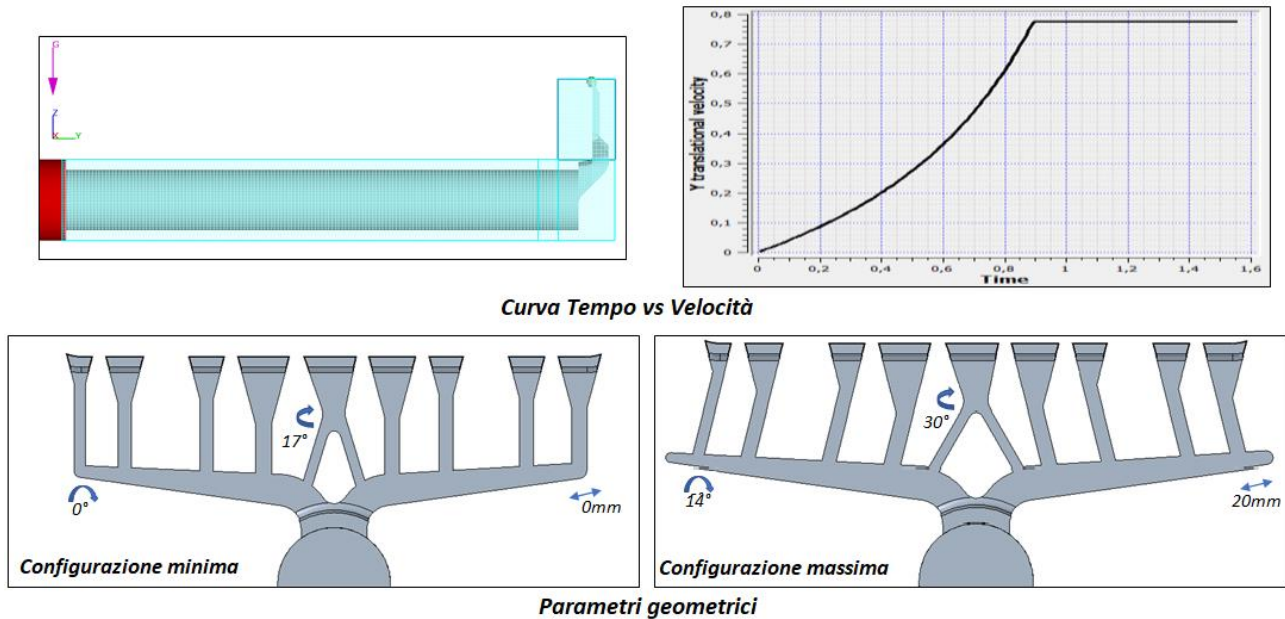


Figura 4: Parametri dell'ottimizzazione della fase di iniezione

Poiché le modifiche apportate alla geometria sono di una discreta complessità si è scelto di sfruttare la possibilità di IMPROVEit di interagire direttamente con un software CAD parametrico per variare automaticamente la forma dei canali di colata ed esportarla in formato STL. Quest'ultimo file viene poi utilizzato da FLOW-3D® CAST per simulare il processo, a valle del quale vengono estratti ed elaborati gli output desiderati.

Visto che un ciclo di flusso di lavoro richiede all'incirca 20 minuti si è deciso di eseguire l'ottimizzazione su 20 chiamate totali. Dovendo valutare due obiettivi contemporaneamente non siamo in presenza di un singolo caso migliore, comunemente chiamato minimo assoluto o globale in ambito matematico, ma è possibile trovare una serie di differenti risultati ottimali di compromesso tra i due output ricercati. Questo insieme di soluzioni, detto fronte di Pareto, in presenza di due obiettivi può essere rappresentato visivamente come una serie di punti disposti su un piano i cui assi sono rispettivamente il primo ed il

secondo obiettivo, e in cui vengono mostrate solo le soluzioni non dominate (quelle per cui non esiste un'altra soluzione migliore per tutti gli obiettivi allo stesso tempo).

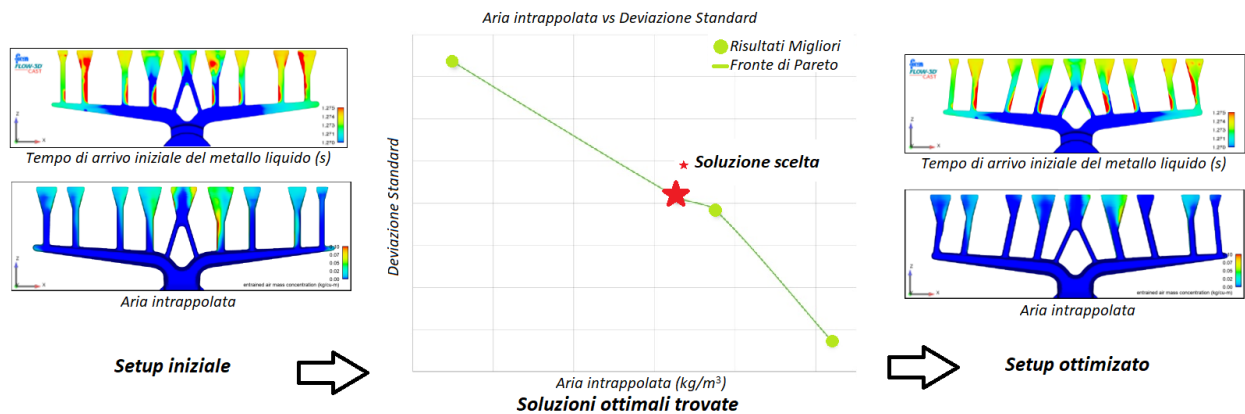


Figura 5: Confronto tra soluzione iniziale e ottimizzata

Sulla base di esse la configurazione scelta è posizionata al centro del fronte di Pareto e presenta quindi un buon compromesso per avere un basso e più uniforme possibile tempo di arrivo agli attacchi di colata, migliore del 10% rispetto al setup iniziale, ed al contempo ottenere una minima quantità di aria intrappolata, il 13% inferiore rispetto ai dati iniziali: nonostante il numero di valutazioni limitato, le configurazioni finali trovate dall'ottimizzatore hanno portato ad ottimi miglioramenti. In Figura 5 si riporta il confronto tra il setup iniziale e il setup scelto tra i migliori risultati, in cui il metallo è colorato in base al tempo di arrivo nell'immagine superiore e alla quantità di aria inglobata in quella inferiore.

Progettazione ottimale della fase di tazzaggi

L'ottimizzazione si può spingere anche fino alle fasi ancora più a monte del processo. In questo caso studio si vuole migliorare la forma del mestolo ed il suo movimento in fase di tazzaggi, con l'obiettivo di minimizzare il raffreddamento della lega e al contempo la concentrazione di ossidi all'interno di essa. Utilizzando un mestolo di tipo tradizionale, infatti, si può definire e prevedere facilmente il movimento in fase di versamento, ma in termini di raccolta degli ossidi la prestazione non è ottimale.

Al fine di migliorarne l'efficacia, dunque, si sono messe a confronto differenti geometrie predefinite di tazza, tramite un'ottimizzazione categorica, e si è modificata la legge di moto in fase di prelevamento del metallo per identificare la migliore configurazione in termini di contenuto minimo di ossidi e temperatura finale, a parità di volume raccolto.

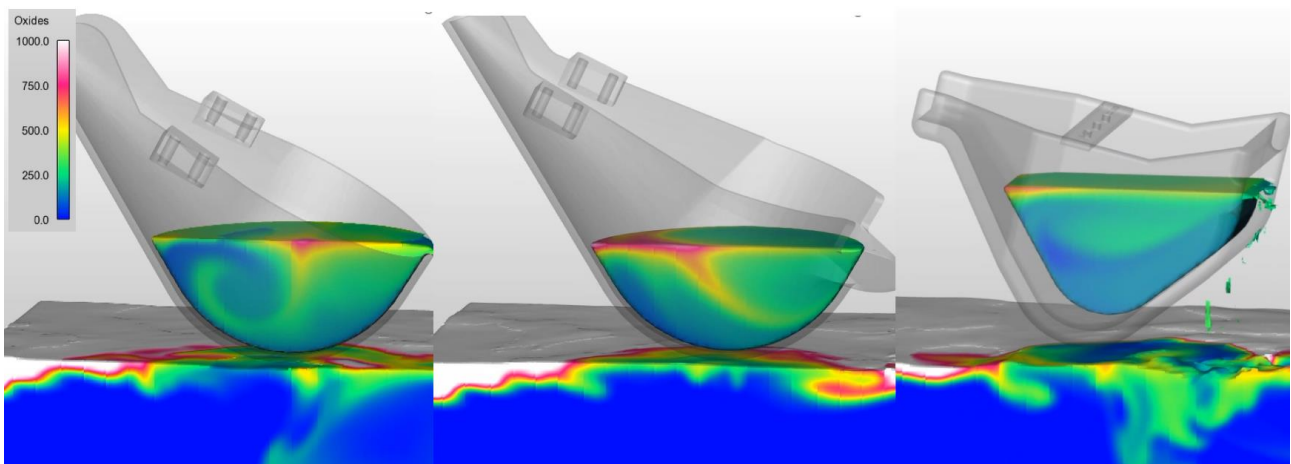


Figura 6: Concentrazione di ossidi nel metallo a confronto per i diversi design analizzati dall'ottimizzazione

In *Figura 6* si confrontano tre delle soluzioni testate, in cui la lega liquida, sezionata a metà lungo il piano di simmetria della tazza, è colorata in funzione della concentrazione di ossidi. Si può facilmente apprezzare come la pulizia della lega sia differente nelle tre configurazioni ed in particolare sia migliore per il caso più a destra in figura. Analizzando l'intero processo, inoltre, l'ottimizzatore è in grado di comprendere in quale fase del tazzaggio vengano raccolti più ossidi e come sia più opportuno modificare la legge di moto per poter raccogliere efficacemente lega pulita per la maggior parte del tempo possibile.

A valle di sole 10 simulazioni, l'ottimizzatore ha potuto confrontare tre differenti forme e proporre delle soluzioni migliorative, intese come geometria e relativo movimento, rispetto alla soluzione di partenza. Nella soluzione ottimale scelta si è potuto ridurre la concentrazione media di ossidi del 20%, a discapito di una piccola diminuzione di temperatura media legata ad un tempo di immersione della tazza più breve.

Visti i promettenti risultati, sviluppi futuri daranno più margine di manovra e più tempo all'ottimizzatore per ottenere miglioramenti ancor più significativi.

Conclusioni

L'automazione del ciclo di sviluppo di un prodotto, inteso come design, simulazione, interpretazione dei risultati e modifiche, aiuta a risparmiare molto tempo ed è il principale pregio di una ottimizzazione numerica. Scegliendo in modo oculato i parametri su cui agire e gli obiettivi da ottenere, in funzione del tempo a disposizione da dedicare al perfezionamento del design, è possibile ottenere dei miglioramenti importanti anche a fronte di un numero limitato di chiamate del simulatore di processo, sfruttando gli algoritmi adattivi del software di ottimizzazione.

Grazie alla potenza di calcolo oggi disponibile, all'evoluzione di tali tecniche e alla precisione raggiunta dalle simulazioni di processo, l'utilizzo di strumenti di ottimizzazione numerica sta diventando sempre più diffuso nelle realtà industriali.