

# Progettazione e utilizzo di un sistema sensorizzato a supporto del processo produttivo di pressocolata

a cura di: E. Battaglia, A. De Mori, G. Scarpa

Il principale processo produttivo utilizzato per la produzione di componenti automotive è il processo di pressocolata. La ragione è legata alla sua economicità, a causa di un'alta frequenza produttiva e alla precisione dei componenti stampati. D'altra parte, le velocità particolarmente elevate, che regolano il processo, influenzano le dinamiche produttive interferendo notevolmente sulla qualità delle parti realizzate.

Avere il controllo del processo, conoscendone i punti di instabilità può essere un notevole vantaggio per gestire la stabilità qualitativa delle parti stampate.

L'attività che verrà illustrata, sviluppata nell'ambito del progetto SMARTI 4.0, presenta i risultati di uno studio condotto nell'ambito del controllo di processo.

L'obiettivo è progettare e definire un sistema di controllo basato sulle informazioni fornite da appositi sensori per garantire la stabilità di processo e di conseguenza la qualità dei componenti pressofusi.

Il dimostratore utilizzato è una CCU, un sistema di ricarica di bordo per pacchi batteria in veicoli ibridi ed elettrici puri.

## INTRODUZIONE

La pressofusione (HPDC) è un processo versatile e altamente produttivo per la produzione di parti metalliche complesse. Tale processo forza il metallo fuso ad alta pressione in stampi di acciaio fino a quando il metallo non si solidifica completamente, grazie all'utilizzo di una specifica macchina. I parametri che governano il processo sono interdipendenti e in conflitto tra loro in modo complicato; l'ottimizzazione della combinazione delle impostazioni di processo richiede molto tempo. Nella letteratura esistente, si possono trovare alcune linee guida di correlazione ai comuni difetti di colata e i parametri che governano il processo [1,2]. Tuttavia, non ci sono standard per selezionare la migliore soluzione in base a leghe, processo, metodo e design; infatti, la qualità della colata dipende da molti parametri difficili da controllare, specie se si influenzano reciprocamente [3].

Il processo può essere monitorato e controllato attraverso l'introduzione e il posizionamento più idoneo di una rete di sensori. I sensori hanno lo scopo di monitorare temperature, pressioni, deformazioni geometriche e parametri di processo. I dati raccolti dai sensori possono essere correlati non solo alle variazioni dei parametri ma

**E. Battaglia, A. De Mori**

Meccanica Cainelli S.r.l.

**G. Scarpa**

Enginsoft S.p.a.

anche all'esito qualitativo del pezzo prodotto.

Non tutto il sistema macchina-stampo ha la stessa sensibilità alla variazione dei parametri di processo. Infatti, alcune zone possono essere molto sensibili alle variazioni del processo, mentre altre non ne risentono affatto.

L'utilizzo di sistemi virtuali aiuta ad individuare le zone più sensibili e i parametri più pervasivi.

Attraverso simulazioni di Autonomous Engineering è possibile definire un piano di test virtuale automatizzato per perseguire diversi obiettivi di qualità e di costo contemporaneamente.

Questo contributo presenta, con il supporto di avanzati sistemi virtuali, un lavoro volto a individuare il numero giusto e le posizioni più idonee di un certo numero di sensori. Vi è inoltre la possibilità di valutare la correlazione tra i segnali dei sensori, le variabili di processo e la qualità della colata. L'attività sviluppata si basa su un vero e proprio campionamento virtuale attraverso il quale i parametri di processo vengono variati sulla base di un Design of Experiments (DOE).

## PROCEDURA DI SPERIMENTAZIONE

Nell'ambito del progetto di ricerca SMARTI 4.0 – Smart Manufacturing for an Automotive Tier 4.0 – il lavoro sviluppato ha visto la collaborazione tra Meccanica Cainelli ed Enginsoft. Il lavoro è strutturato in tre parti principali:

- Il posizionamento di termocoppie virtuali nello stampo per monitorare la variazione termica dell'utensile e della lega durante il processo;
- La definizione delle variabili di processo;
- La definizione di DoE

## POSIZIONAMENTO DELLE TERMOCOPPIE

La definizione delle posizioni delle termocoppie è il risultato dello studio tra la fonderia (Meccanica Cainelli), il produttore di stampi (Tomos) e il fornitore MAGMASOFT® (Enginsoft). Poiché il dimostratore industriale scelto, una CCU per auto ibride ed elettriche, era già in produzione, la valutazione della posizione (Fig. 1) si è basata su molteplici aspetti: posizioni dei canali di raffreddamento, posizioni dei perni di espulsione e progettazione dello stampo.



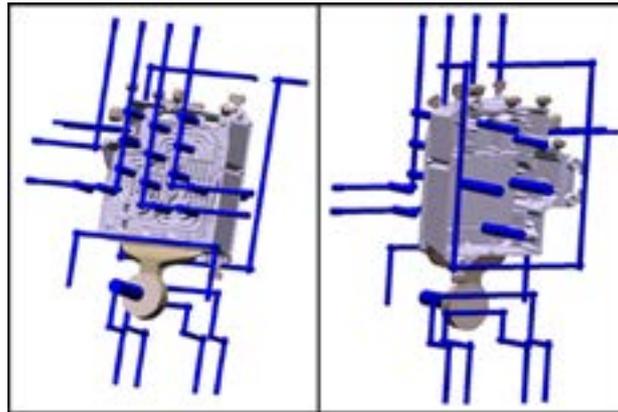
**Fig.1** - Posizionamento delle termocoppie a contatto rispetto al getto.

## DEFINIZIONE DELLE VARIABILI DI PROCESSO

L'impostazione del modello virtuale prevede l'utilizzo dei parametri di processo derivanti dalla produzione, considerando in particolare:

- i parametri che controllano la curva di iniezione ( $v_1$ ,  $v_2$  e punto di commutazione)
- i circuiti di termoregolazione, il mezzo termoregolante con la sua portata e temperatura di esercizio (Fig. 2)

- tutti i tempi che scandiscono il ciclo produttivo partendo dall'inizio dell'iniezione, passando alla fase di solidificazione per concludere alla fase di apertura delle parti stampanti, tenendo in considerazione i tempi di lubrificazione, di soffiatura e la fase di chiusura finale



**Fig.2** - Circuiti di termoregolazione.

Inoltre per tenere in considerazione il raggiungimento della condizione di regime termico sono stati simulati 10 cicli produttivi.

**Definizione del DOE**

La progettazione degli esperimenti è uno strumento di raccolta e analisi dei dati che consente di manipolare più fattori di input (variabili), determinandone l'effetto su un output desiderato (obiettivi).

Questa pianificazione di esperimenti, permette di analizzare, una volta eseguita, le correlazioni e interazioni che esistono fra le variabili e gli obiettivi comprendendo meglio i fenomeni che governano il processo e la qualità dei componenti prodotti

In questo lavoro le variabili scelte sono state le seguenti variabili:

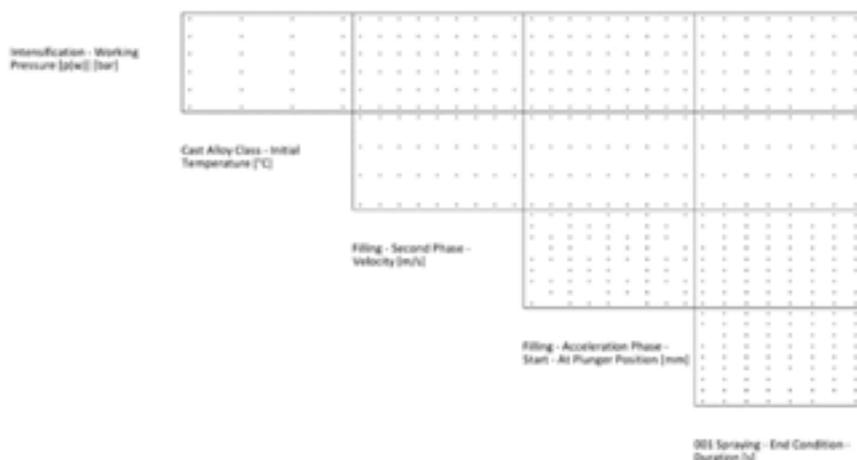
- La curva di iniezione, in particolare il punto di commutazione e la velocità del pistone della seconda

fase;

- Temperatura iniziale della lega;
- Tempo di spruzzatura;
- Intensificazione della pressione di terza fase

Per la definizione del DOE sono stati utilizzati due algoritmi statistici:

- Fattoriale Ridotto: utilizzato per identificare tutti i design estremi. Tale algoritmo permette di identificare tutti i design creati dalla combinazione dei valori min e max di ogni variabile
- Sobol: algoritmo utilizzato per ottenere design equidistanti tra loro all'interno del confine n-dimensionale identificato con il metodo precedente.
- Applicando questi due algoritmi è stata ottenuta una distribuzione variabile omogenea e simmetrica basata su 5 variabili, per un totale di 312 disegni (vedi Fig. 3).



**Fig.3** - Distribuzione variabile.

Per tenere sotto controllo la qualità del getto sono stati presi in considerazione 4 obiettivi:

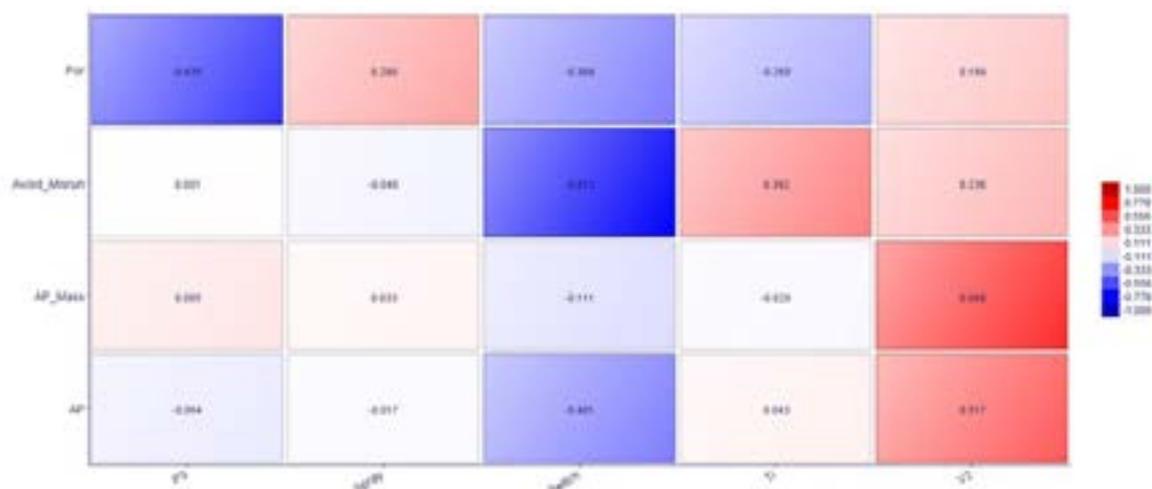
- Avoid Misrun: che controlla la temperatura della lega durante la fase di riempimento ed evidenzia i valori minimi raggiunti. Permette l'identificazione di giunti freddi o getti incompleti
- Pressione dell'aria (AP): questo criterio fornisce informazioni sull'aria intrappolata nel getto durante la fase di riempimento
- AirMass (AP\_Mass): indica la massa d'aria intrappolata nel getto durante il riempimento
- Porosità (Por): criterio che da riscontro sulla porosità da ritiro generata durante la solidificazione.

## RISULTATI

L'analisi dei risultati è condotta utilizzando diagrammi che

permettono la correlazione tra Variabili-Obiettivi-Termocoppie. Per la visualizzazione dei risultati sono stati utilizzati due tipi di grafici:

- Matrice di correlazione: mette in correlazione variabili e obiettivi e sensori fornendo un valore di correlazione percentuale (0 nessuna correlazione, 1 piena correlazione)
- Coordinate parallele: sistema utilizzato per visualizzare spazi n-dimensionali e analizzare dati multivariati. Per mostrare un insieme di punti in uno spazio a n dimensioni, vengono disegnate n linee parallele, solitamente verticali e poste a uguale distanza l'una dall'altra. Un punto nello spazio n-dimensionale è rappresentato come una linea spezzata con i vertici sugli assi paralleli.



**Fig.4** - Correlation Matrix: Variabili verso Obiettivi.

La prima analisi eseguita ha permesso di analizzare le correlazioni tra variabili e obiettivi. I risultati ottenuti (Fig 4) hanno evidenziato:

- Una forte correlazione diretta tra velocità di seconda fase (v2) e i risultati dell'aria intrappolata (cioè AP = AirPressure e AP\_Mass = Massa d'aria intrappolata)
- Una correlazione indiretta tra la posizione del punto di commutazione (cioè il punto in cui lo stantuffo passa dalla prima alla seconda fase) e la temperatura minima della lega durante il riempimento

- Una correlazione diretta tra la porosità da ritiro e la pressione di compattazione di terza fase
- Il confronto tra Variabili e Termocoppie è stato effettuato analizzando i valori minimi e massimi registrati dalle termocoppie (Fig. 5 e Fig. 6).



**Fig.5** - Correlation Matrix: Variabili vs TC Max.



**Fig.6** - Correlation Matrix: Variabili vs TC Min.

L'analisi svolta ha evidenziato una fortissima correlazione fra la temperatura iniziale della lega e i valori registrati dalle termocoppie. Tale comportamento è risultato sovrastare e coprire completamente l'effetto di tutte le altre variabili.

È stato, quindi, necessario isolare la temperatura iniziale raccogliendo tutti i design con la stessa temperatura iniziale della lega in sottofamiglie.

La temperatura iniziale è stata quindi scelta pari a  $T_i=640^{\circ}\text{C}$ , valore utilizzato durante la produzione dalla fonderia.

La nuova matrice di correlazione (vedi Fig. 7) mostra chiare correlazioni tra le restanti variabili e gli obiettivi in particolare in termini di:

- Effetto della velocità di seconda fase (V2) sull'aria intrappolata (AP e AP\_Mass)

- Effetto della posizione del punto di commutazione sulla temperatura della lega durante la fase di riempimento (AvoidMisrun)
- Tempo di lubrificazione ed intensificazione della pressione sulla porosità da ritiro.

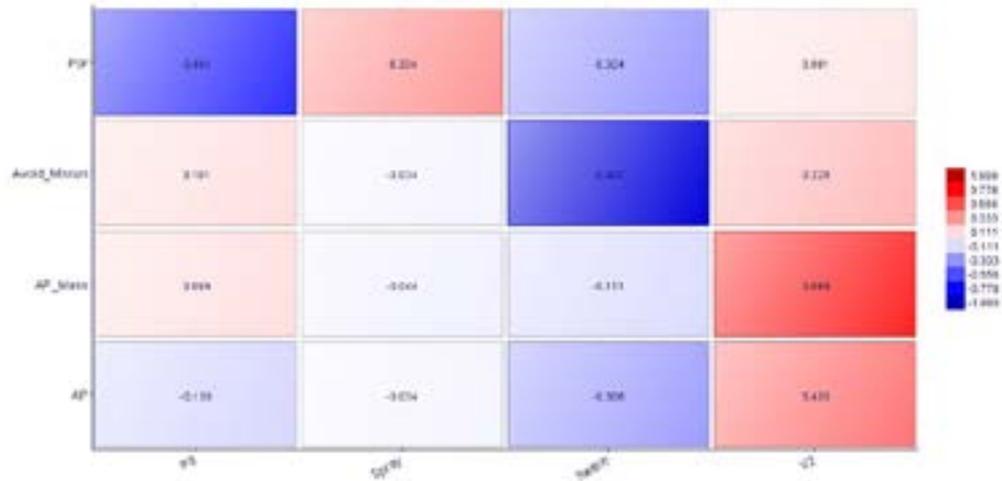


Fig.7 - Correlation Matrix Ti= 640 °C: Variabili vs Objectives.

Buone correlazioni tra variabili fluidodinamiche (v2 e swi- tch) e termocoppie sono state mostrate anche dalle Matrici di Correlazione tra Variabili e Termocoppie (Fig. 8 e Fig. 9).

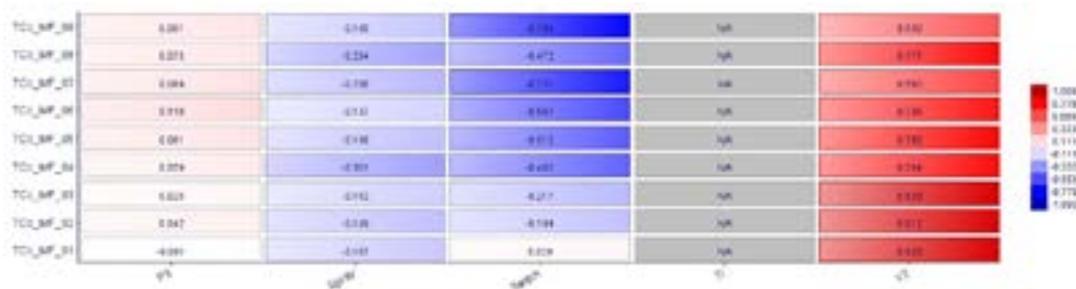


Fig.8 - Correlation Matrix Ti= 640 °C: Variables vs TC Max.

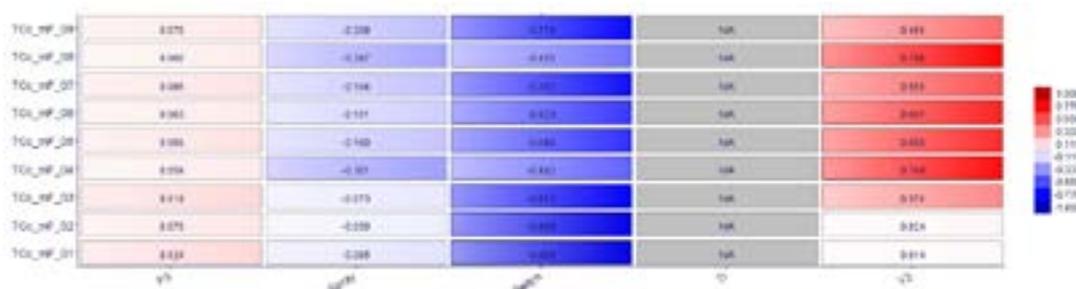


Fig.9 - Correlation Matrix Ti= 640 °C: Variables vs TC Min.

**CONCLUSIONI**

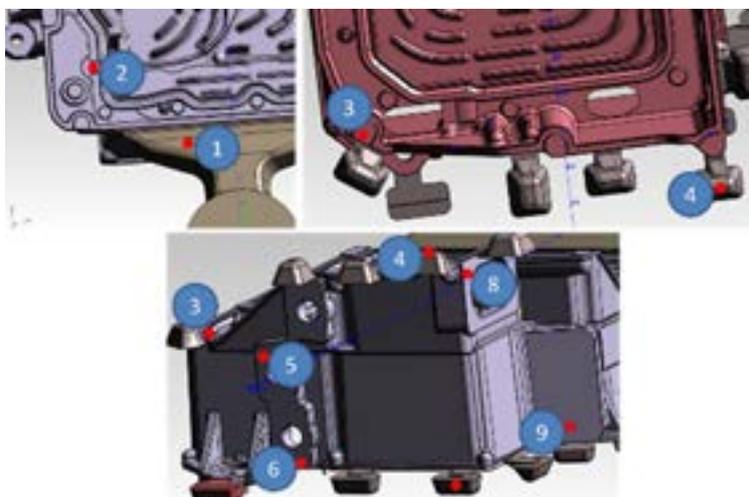
Lo scopo del lavoro è identificare quali fra i sensori posizionati risultino essere efficienti e ben correlati a variabili e obiettivi, al fine di ridurre il numero, il costo e avendo la certezza dell'efficacia delle informazioni fornite. Inoltre

lo studio permette di identificare gli effetti dei parametri di processo sulla qualità dei pezzi prodotti fornendo l'opportunità di creare un sistema di monitoraggio che in tempo reale fornisce indicazioni sull'andamento del processo reale,

Una prima analisi ha messo a confronto le termocoppie 1 e 2 evidenziando un comportamento, nel rilevare le temperature, pressochè identico. Va inoltre considerato che l'estrema vicinanza della termocoppia 1 al pistone, la sottopone a forti pressioni con il rischio di essere danneggiata. Pertanto, poiché TC01 e TC02 sono comparabili, TC01

può essere evitata.

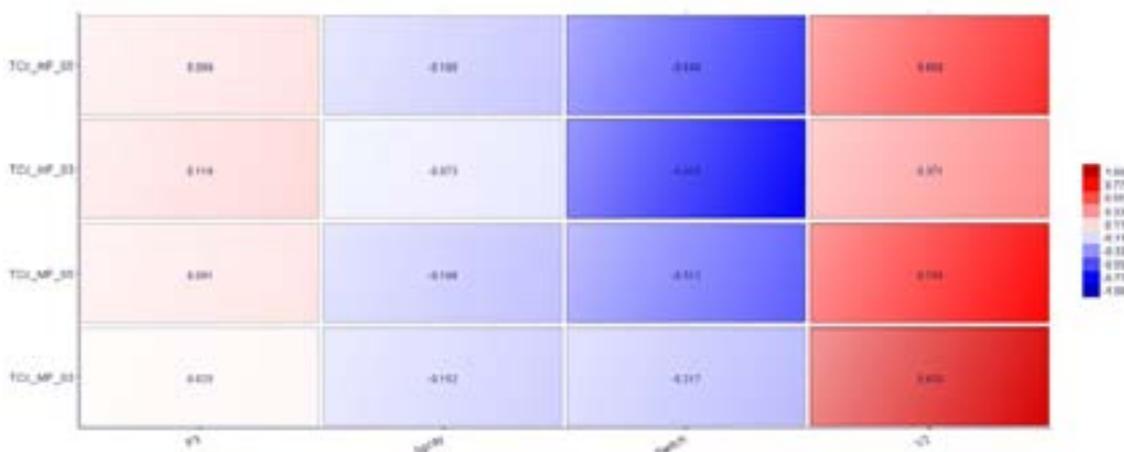
Dall'osservazione delle posizioni delle altre termocoppie (Fig. 10), si può notare che TC03-TC05 e TC04-TC08 sono molto vicine tra loro. Quindi, ci si può aspettare un comportamento molto simile.



**Fig.10** - Posizione delle termocoppie.

Per quanto riguarda le termocoppie TC03 e TC05, il diagramma che le mette in correlazione con Variabili (Fig. 11) e Obiettivi (Fig. 12) mostra che i due sensori hanno un comportamento simile; ciò è confermato anche dalle Co-

ordinate Paralleli (Fig. 13 – 14) che mostrano che al diminuire della temperatura dei sensori si ha una progressiva riduzione dei difetti.



**Fig.11** - Correlation Matrix Ti= 640 °C: Variabil vs TC 03-05.

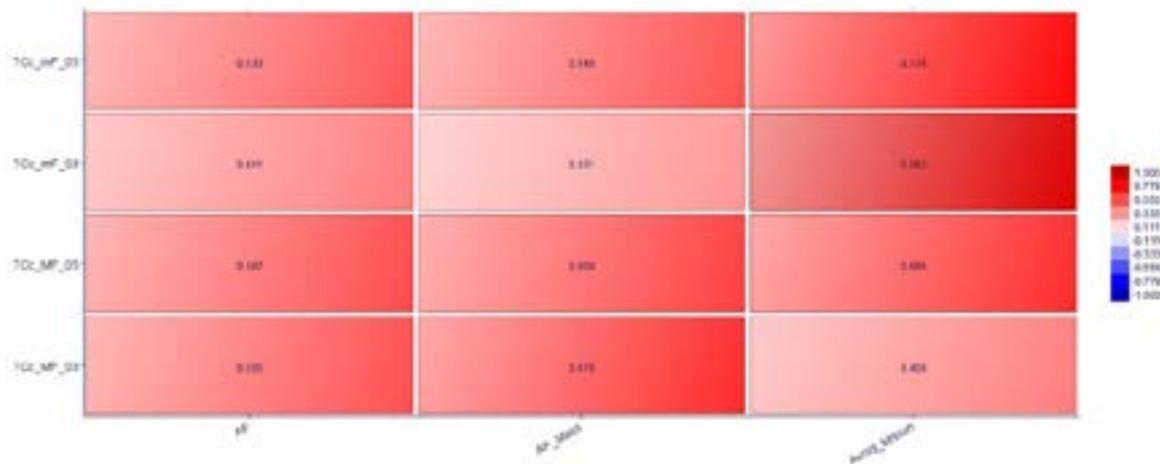


Fig.12 - Correlation Matrix Ti= 640 °C: Objectivi vs TC 03-05.

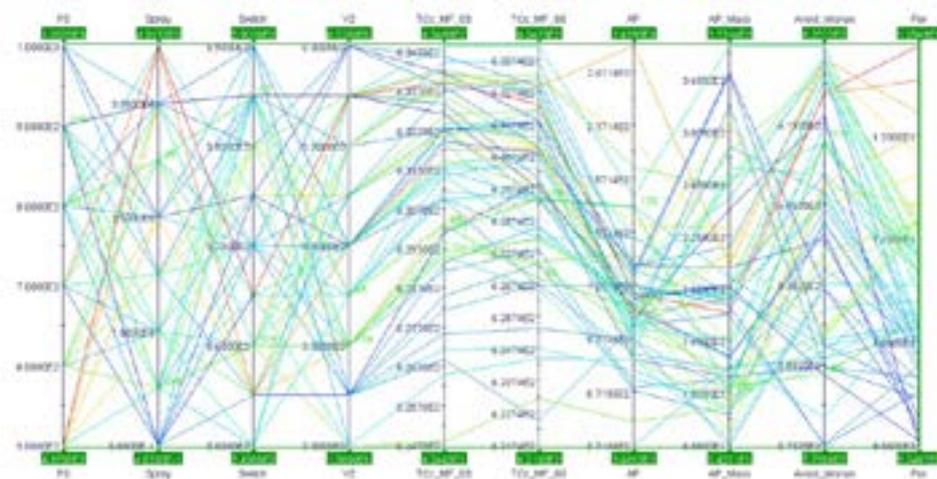


Fig.13 - Parallel Design Ti= 640 °C Completo.

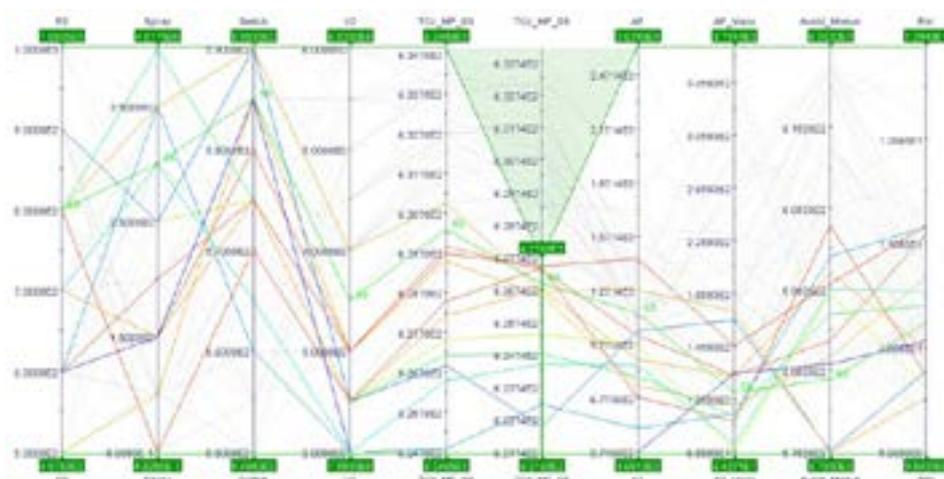
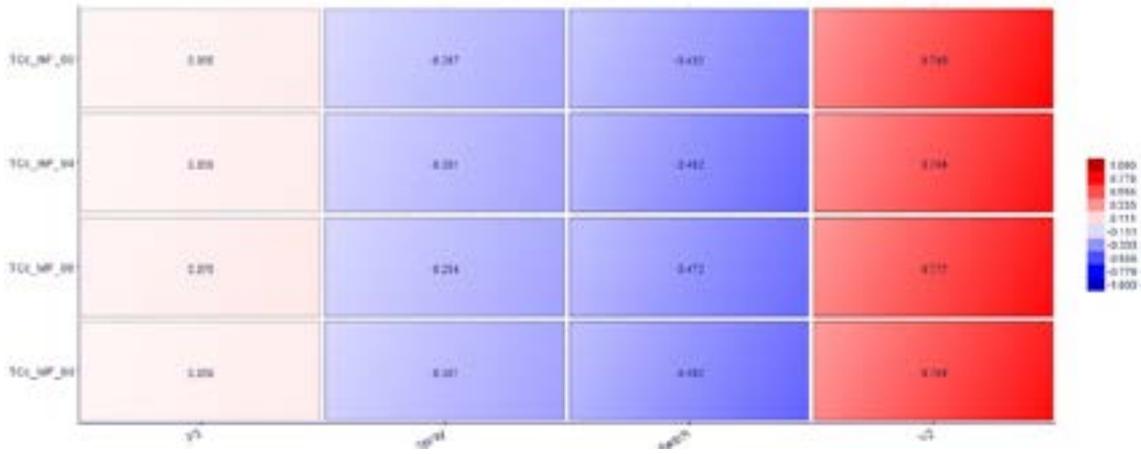
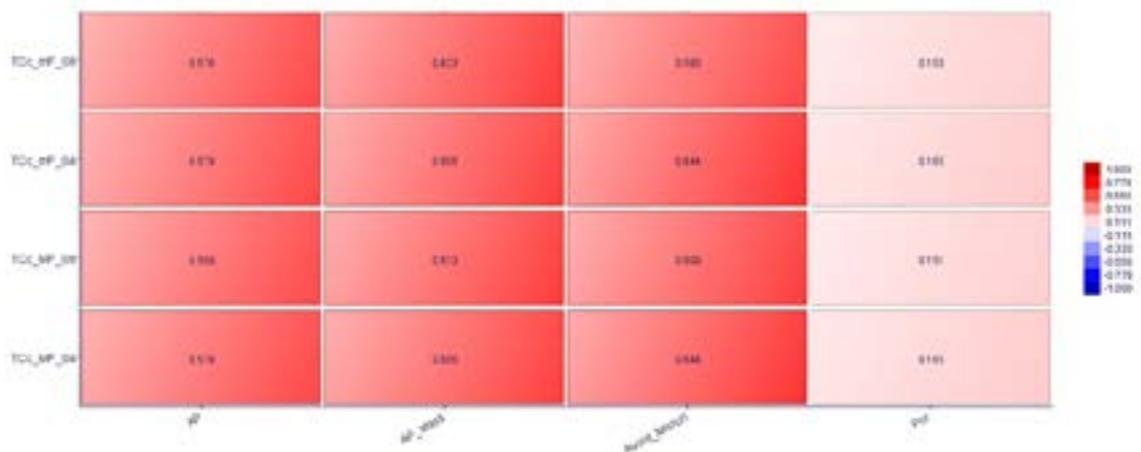


Fig.14 - Parallel Design Ti= 640 °C: Partial cutoff TC 05.

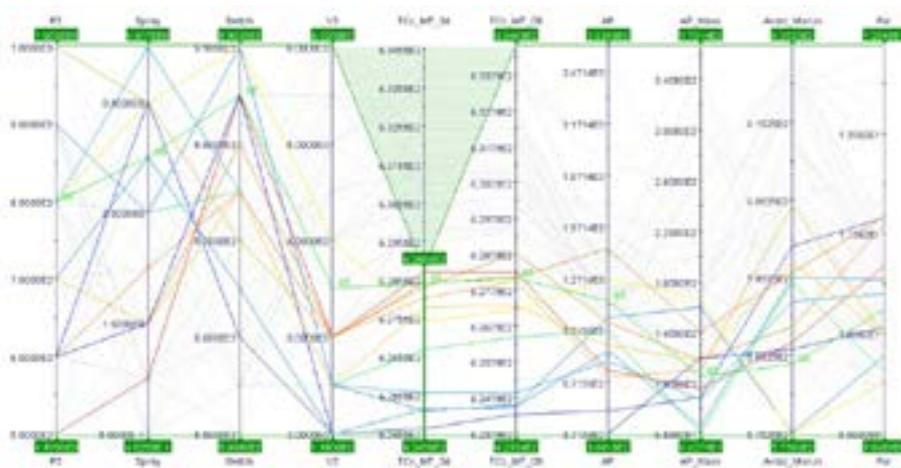
Una conclusione simile si può trarre anche per le termocoppie TC04 e TC08; poiché mostrano quasi lo stesso comportamento (Fig. 15 – 18).



**Fig.15** - Correlation Matrix Ti= 640 °C: Variabili vs TC 04-08.



**Fig.16** - Correlation Matrix Ti= 640 °C: Obiettivi vs TC 04-08.



**Fig.17** - Parallel Design Ti= 640 °C: Partial cutoff TC 04.

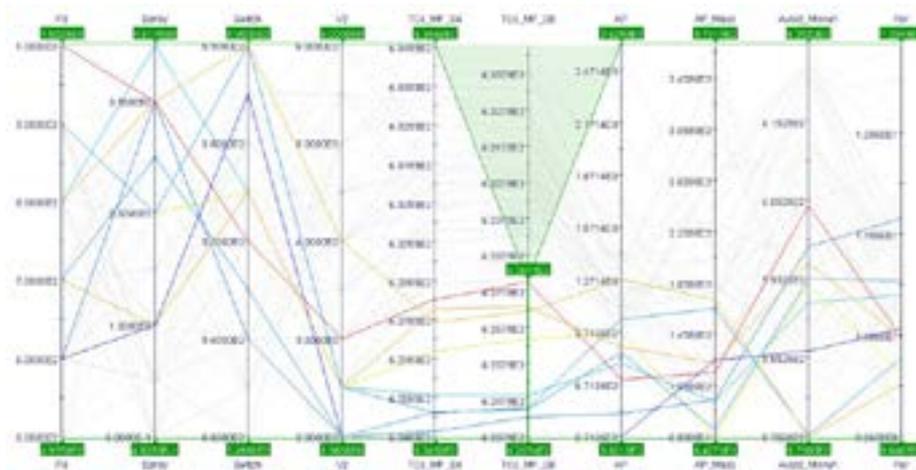


Fig.18 - Parallel Design Ti= 640 °C: Partial cutoff TC 08.

L'analisi condotta mostra una buona correlazione tra termocoppie, variabili e obiettivi. Mostra che la modifica dei parametri di processo può influenzare chiaramente il risultato e la qualità della colata. Per quanto riguarda il numero di termocoppie da utilizzare nello stampo, il risultato è che non sono necessarie tre termocoppie, ovvero

TC01, TC04 e TC05, quindi possono essere evitate. Le informazioni così ottenute sono state implementate sulle attrezzature reali fornendo un completo monitoraggio del sistema e permettendo il controllo della produzione.



Fig.19 - Implementazione del sistema di monitoraggio nelle attrezzature.

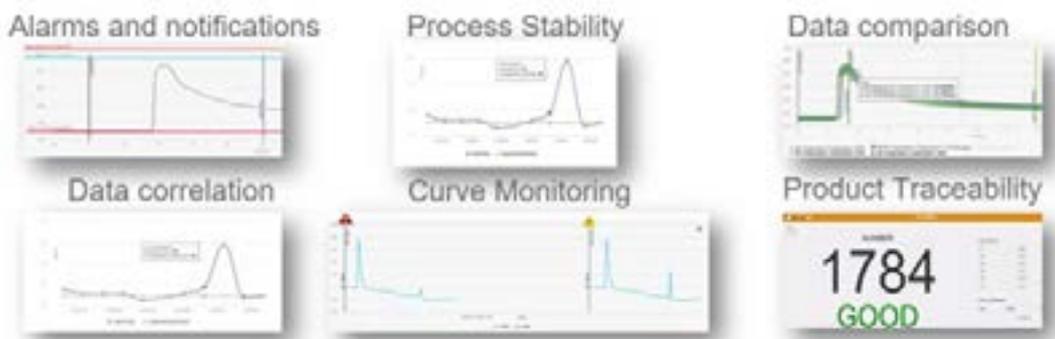


Fig.20 - Sistema di monitoraggio Smart ProACTIVE

## RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto SMARTI 4.0. Gli autori desiderano ringraziare tutti i part-

ner coinvolti nel suo sviluppo: Meccanica Cainelli, Enginosft, Tomos, Fisep e New Olef.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] W. G. Walkington, Die Casting Defects – Troubleshooting Guide, NADCA (2003) Arlington Heights, Illinois.
- [2] J. Campbell, The 10 Rules of Good Castings, in: Complete Casting Handbook, second ed. (2015) pp. 535-638.
- [3] E. Battaglia, F. Bonollo, G. Timelli, E. Fiorese and G. Kral, Correlation between process, microstructure and properties in high pressure die casting Aluminum-Silicon alloys, Adv. in Mat. Proc. Tech. (2016) 111-124.
- [4] A. E. Kopper, Knowledge Creation via Data Analytics in a High Pressure Die Casting Operation, PhD Thesis WPI University (2020).
- [5] UNI EN 1706, Aluminium and aluminium alloys – casting – chemical composition and mechanical properties, Brussels: European Committee for Standardization (2010).