

# Analisi dei sensori di temperatura nel processo di produzione ceramica

Riccardo Lancellotti\*    Guido Setti    Iacopo Ferrari

## 1 Introduzione

La presente relazione costituisce un prodotto del progetto sviluppato da Università degli studi di Modena e Reggio Emilia in collaborazione con Ceramica Polis nell'ambito del progetto "Miglioramento di processo produttivo ceramico mediante controllo di qualità e ottimizzazione delle lavorazioni".

Lo scopo finale dell'analisi è validare l'ipotesi di una correlazione tra la presenza di spazi vuoti nel forno di cottura e fluttuazioni di temperatura, che sono una tipica causa di difettosità nella produzione delle piastrelle. Il riferimento è sempre al processo di produzione del gres porcellanato, oggetto di interesse dell'intero progetto.

A tale fine è stata effettuata una raccolta dati relativa a un periodo di funzionamento del forno di svariate ore raccogliendo dati dei sensori in termini di fluttuazioni della temperatura rispetto al preset. Tali dati sono poi stati collegati con i valori relativi alla presenza di spazi vuoti nel forno. valore raccolto a granularità più grossolana a fine giornata.

Gli indicatori chiave presi in esame sono l'errore relativo e l'errore assoluto tra temperatura attesa e temperatura misurata di ogni sensore. Un ulteriore elemento chiave da considerare per interpretare i risultati che verranno di seguito presentati è la quantità di slot di piastrelle vuoti all'interno del forno.

Ciò che il presente documento punta a dimostrare è la correlazione tra quantità di slot vuoti presenti nel forno e scostamento del dato relativo alla temperatura misurata a confronto con quello relativo alla temperatura attesa.

Il presente documento, nelle successive sezioni è organizzato come segue :

- *Preparazione e Presentazione Dati*, dove si illustrano e si motivano le scelte sui dati e sulle strutture operate durante la fase di analisi.

---

\*Dipartimento di ingegneria "Enzo Ferrari", Università di Modena e Reggio Emilia

- *Analisi e Presentazione Risultati*, in cui si descrivono le fasi dello studio e si motivano quantitativamente i risultati ottenuti.
- *Conclusioni*, in questa sezione si fa un riepilogo finale evidenziando le operazioni ulteriori da svolgere per l'analisi della qualità della produzione.

## 2 Presentazione e Preparazione Dati

Vengono ora introdotte nello specifico le operazioni definite per elaborare i dati e organizzarli in modo da evidenziare le anomalie di temperatura in relazione ai vuoti nel forno. Viene inoltre descritta e spiegata la scelta di omettere qualche dato al contorno;

L'analisi è stata svolta con l'applicazione open source *Jupyter Notebook*, come testimoniato da Figura 1 e le rappresentazioni grafiche sono state prodotte con l'ausilio di alcune librerie dedicate oltre che con l'uso del software *gnuplot*.

### 2.1 Overview dei dati

Il set di dati studiati si riferisce a 774 misurazioni istantanee della temperatura del forno, numero 3 (forno ricco di sensori che garantisce un elevato volume di dati disponibili). Il forno dispone di 54 sensori di temperatura. Le misurazioni considerate nell'analisi sono state prese a un intervallo di un minuto l'una dall'altra nella data del 22/12/2021, dalle 10:44 alle 23:59.

I dati sono forniti sotto forma di una collezione di file *.csv* recuperati dal processo produttivo mediante interrogazione del sistema SCADA che fornisce, ad ogni istante, una lettura completa dello stato dei sensori del forno.

I sensori forniti sono strutturati come segue:

Sensori	Significato
K1-K3, dispari	Temperatura pre-riscaldamento (alto)
K2-K4, pari	Temperatura pre-riscaldamento (basso)
S1-S21, dispari	Temperatura forno (alto)
S2-S22, pari	Temperatura forno (basso)
S23-S35, dispari	Temperatura raffreddamento (alto)
S24-S36, pari	Temperatura raffreddamento (basso)

Tabella 1: Lista dei sensori

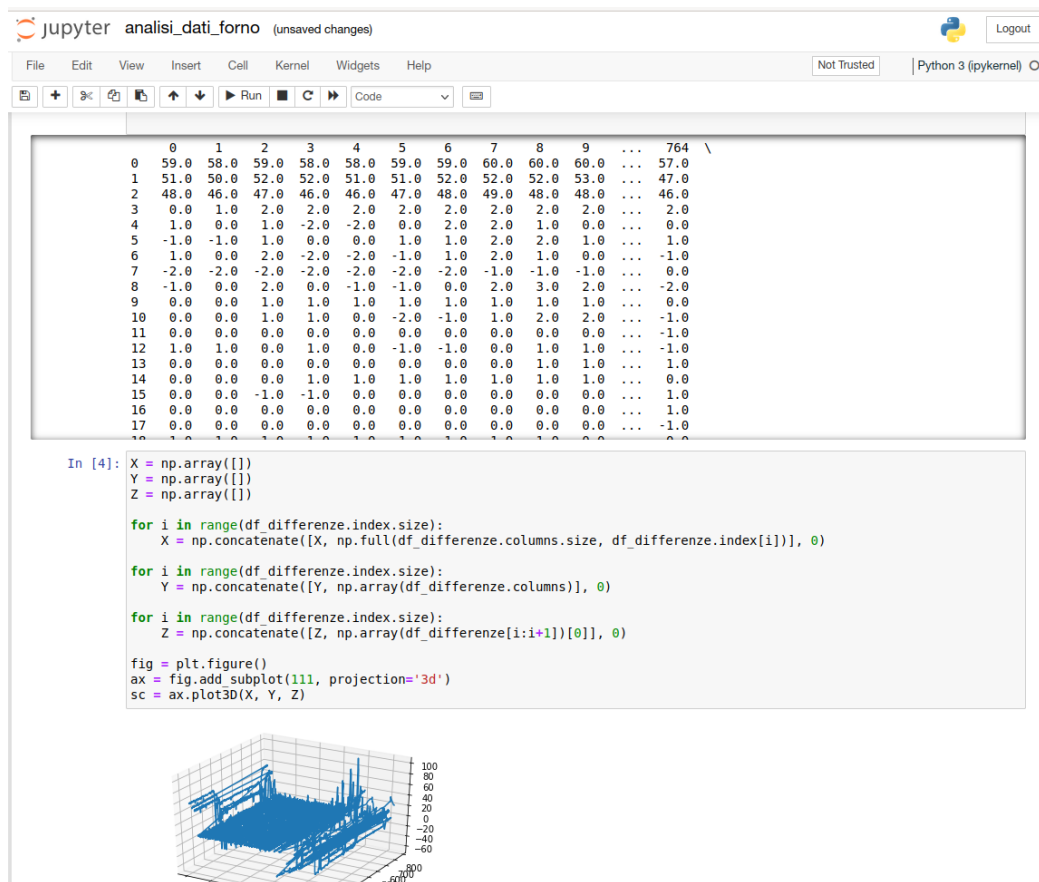


Figura 1: Scheramenta del sistema di analisi dati

A ogni lettura sono forniti, per ciascun sensore, il set point e il valore effettivo di temperatura misurato. risulta pertanto immediato controllare l'errore, che la principale misura considerata nell'analisi.

## 2.2 Selezione dati rilevanti

I dati utilizzati nell'analisi sono stati parzialmente filtrati. Nello specifico è stata fatta una pulizia iniziale dei dati rimuovendo elementi ritenuti spuri e a rischio di ridurre la qualità delle analisi effettuate.

Nelle 774 istantanee di stati del forno, riguardanti le temperature, che ci sono state fornite, sono state scartate le prime 3. Tali campioni, infatti, riguardano orari con un differente intervallo di campionamento rispetto a tutte le altre misurazioni. Si è ritenuto che tale anomalia potesse nascondere la presenza di comportamenti oscillatori o che potesse falsare eventuali analisi basate sulla velocità di variazione delle temperature.

Visto il numero esiguo di campioni rimossi, tale rimozione non pregiudica la validità statistica delle osservazioni compiute.

Un filtraggio più significativo, invece, riguarda i sensori considerati.

La struttura dei sensori riguarda tre zone principali del forno:

- Pre-riscaldamento delle piastrelle
- Cottura
- Raffreddamento

Nella ricerca di un pattern che fosse supportato dai dati a disposizione si è reso evidente che alcuni sensori erano da classificare come inaffidabili. In questi sensori infatti si registra un andamento del tutto irregolare per quanto riguarda il valore di temperatura registrata rispetto al valore della temperatura attesa.

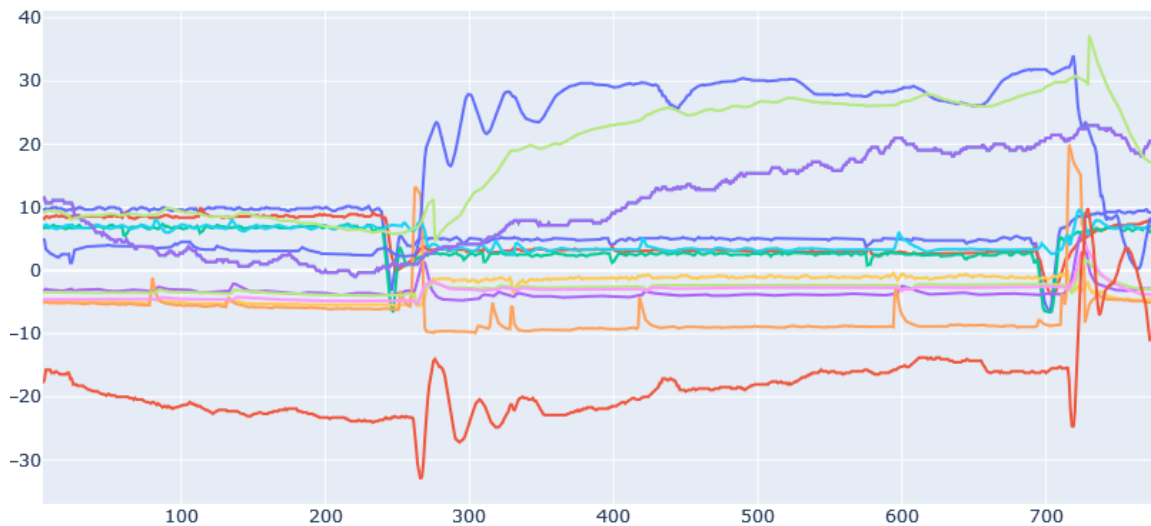


Figura 2: Serie storiche sensori esclusi

In figura 2 sono sovrapposte le serie storiche relative agli altrettanti sensori nelle 771 misurazioni che si è deciso di escludere. Sull'asse delle ascisse troviamo il numero di misurazione: la prima è quella della 10:44, la seconda delle 10:45 e così via, fino all'ultima che è quella delle 23:59. Sull'asse delle ordinate invece troviamo la differenza percentuale tra valore registrato e valore atteso. Come si può vedere tutti questi sensori si discostano molto dallo zero, che sarebbe l'ideale, cioè il punto in cui valore atteso e valore registrato corrispondono.

## 2.3 Descrizione delle Strutture Dati

Come accennato nella sezione introduttiva i dati ci sono stati forniti dall'azienda e riguardano una giornata produttiva. Una prima analisi svolta ci ha portato a considerare le differenze in assoluto tra temperature attese e temperature effettivamente registrate dai sensori all'interno del forno.



Figura 3: Serie storiche dei Sensori presi in analisi

In figura 3 sono sovrapposte le serie storiche relative ai sensori ritenuti affidabili, ovvero i 54 meno quelli di figura 2, nelle 771 misurazioni consecutive a un minuto di distanza l'una dall'altra. Ancora una volta sull'asse delle ascisse troviamo il numero di misurazione: la prima è quella della 10:44, la seconda delle 10:45 e così via, fino all'ultima che è quella delle 23:59. Sull'asse delle ordinate invece troviamo la differenza percentuale tra valore registrato e valore atteso. Come si può evincere da una prima occhiata notiamo che per un buon numero di serie storiche la differenza si avvicina allo zero per molte delle 771 misurazioni. Un fenomeno che salta subito all'occhio è rappresentato due *periodi critici* in cui tutte le serie storiche si distaccano molto dallo zero, quindi in cui i valori registrati dai sensori si discostano molto da quelli previsti. Questi avvengono a cavallo tra la duecentesima e la trecentesima misurazione e verso la settecentesima misurazione. Ciò indica uno stato del forno non previsto e ciò potrebbe andare a impattare sulla qualità del processo di cottura, ipotesi questa che per la mancanza di dati a riguardo non è suffragata da un'analisi quantitativa.

Nella prossima sezione viene illustrata l'analisi fatta e i risultati ottenuti, in cui si è cercato di motivare anche i due momenti anomali del forno appena introdotti.

### 3 Analisi e Presentazione Risultati

L'analisi si concentra maggiormente sui due periodi critici individuati nella sezione precedente. Le figure 4 e 5 mostrano uno zoom sui due periodi della giornata interessati da questi valori anomali.

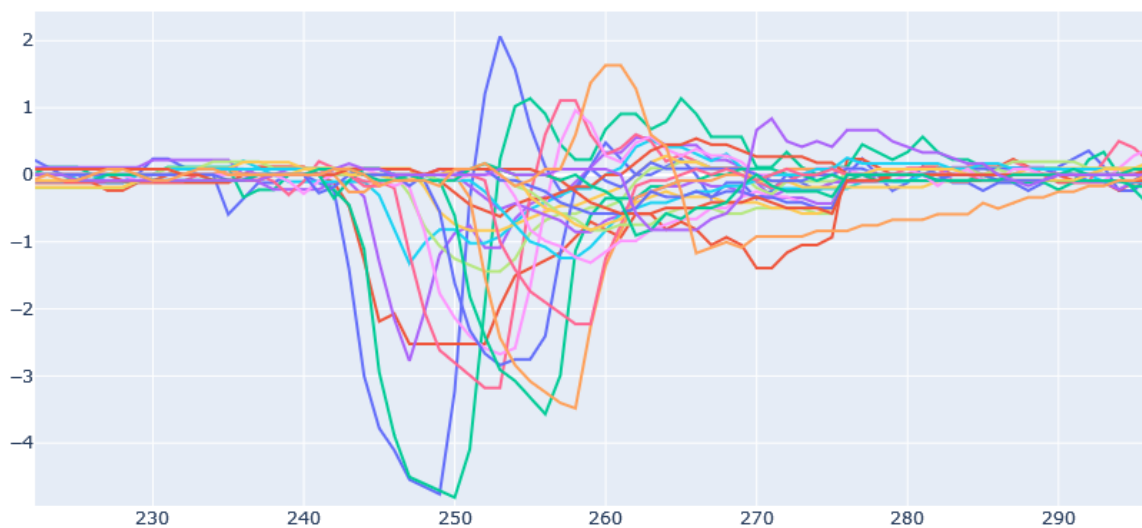


Figura 4: Zoom primo periodo critico

Il pattern con cui i sensori nelle successive misurazioni si discostano dallo zero non sembra essere del tutto casuale. Questa considerazione ci ha spinto a cercare le cause analizzando i dati di carico del forno che riportiamo nella tabella di seguito. Dalla tabella si nota che alle ore 14 e alle ore 22 il forno risulta avere un numero di vuoti considerevolmente più alto che negli altri orari, rispettivamente 6 e 11 metri. Confrontando gli orari con le misurazioni che abbiamo e operandone una corrispondenza, risultano le seguenti:

- la misurazione 238, dove inizia il primo momento anomalo, si riferisce alle ore 15:04,
- la misurazione 693, dove inizia il secondo momento anomalo, si riferisce alle ore 22:39

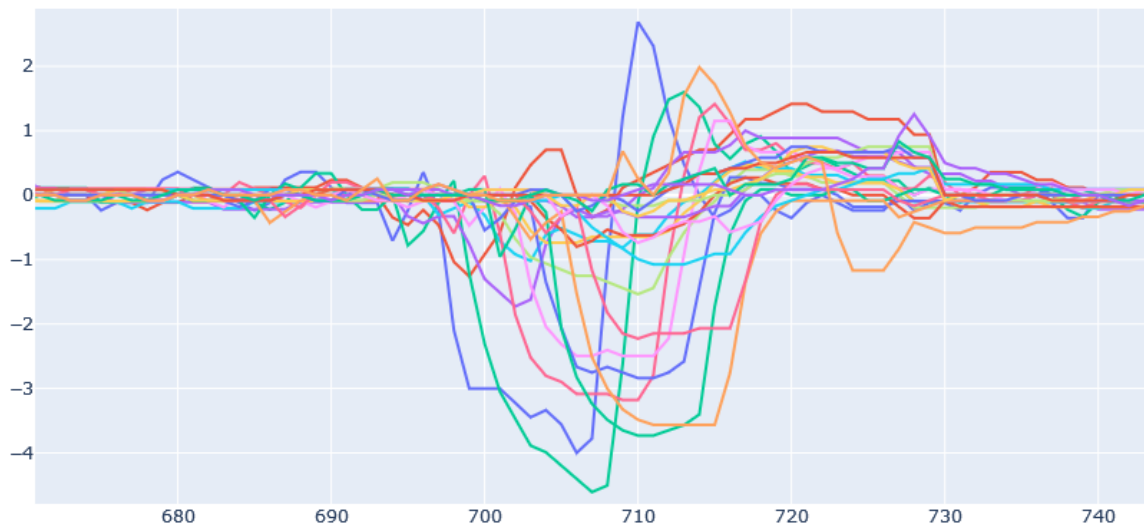


Figura 5: Zoom secondo periodi critico

Ora	Vuoti (m)
10	0
11	0
12	0
13	0
14	6
15	1
16	1
17	0
18	0
19	0
20	0
21	0
22	11
23	0

Tabella 2: Vuoti per ora nel forno

Questa correlazione tra numero vuoti e differenza tra valore registrato e valore previsto, conferma l'ipotesi che la causa dell'aumento delle differenze risieda proprio nell'aumento del numero di vuoti all'interno del forno.

Un ulteriore elemento che suffraga questa ipotesi è appunto il pattern con il quale le suddette anomalie si presentano.

La figura 6 ci mostra alcuni sensori del primo momento anomalo in sequenza. Questo pattern d'esempio, si trova anche nel secondo momento anomalo della giornata e avviene per sensori in serie a 2 a 2. Per esempio in figura 6 ci riferiamo ai sensori 7,9,11 e 13, ma come dicevamo è una situazione che si presenta su entrambi i momenti della giornata in cui si registra il maggior numero di vuoti e su un gran numero di sensori in serie.

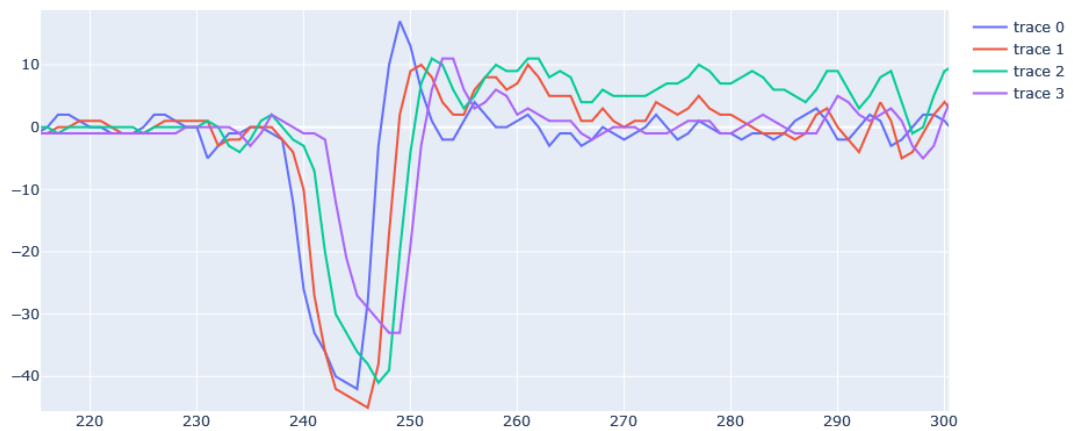
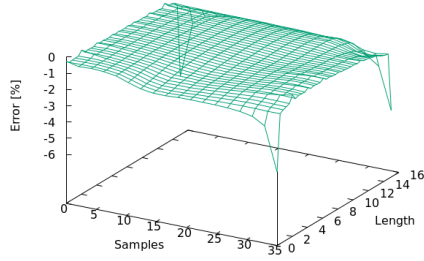


Figura 6: Onda di errore

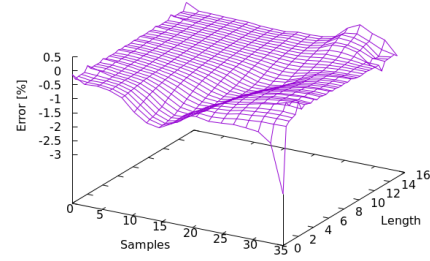
Una analisi più dettagliata di tali propagazioni delle anomalie termiche è riportata in Figura 7, dove, per ciascun periodo critico, sono riportate le anomalie di temperatura lungo il forno (asse denominato "Lenght") e la loro propagazione nel tempo (asse "Samples"). Per ciascun periodo si sono raggruppati i sensori dividendoli tra quelli situati nella parte alta del forno e quelli situati in basso.

Si osserva che, per entrambi i periodi, i sensori nella parte bassa del forno registrano deviazioni limitate dal punto di lavoro. Questo è legato all'inerzia termica dei rulli del forno, che mascherano l'impatto dei vuoti. Nella parte alta, invece, è molto semplice osservare l'anomalia termica spostarsi lungo il forno mano a mano che il vuoto si muove.

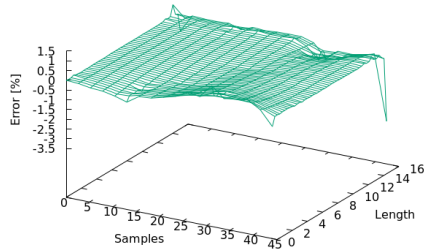




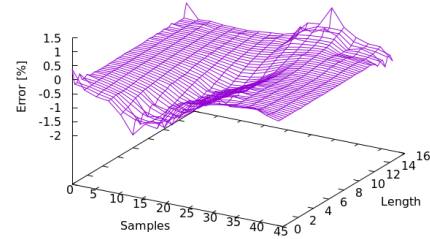
(a) Primo periodo critico, Sensori bassi



(b) Primo periodo critico, Sensori alti



(c) Secondo periodo critico, Sensori bassi



(d) Secondo periodo critico, Sensori alti

Figura 7: Onde di errore

## 4 Conclusioni

Le considerazioni fatte sulla base dei dati messi a disposizione dall'azienda validano in modo soddisfacente l'ipotesi che i vuoti nel forno siano un problema in quanto determinano una variazione nella temperatura che può influire sulla qualità delle piastrelle.

I risultati della seguente analisi dovranno tuttavia essere integrate con ulteriori indagini per capire e quantificare l'impatto dei vuoti sulla qualità del processo produttivo, che si considera l'obiettivo principale per la presente sezione del progetto.