



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Caratterizzazione metrologica di materiali cementizi con capacità di
self-sensing**

**Metrological characterization of cementitious materials with self-
sensing capabilities**

Studente:

LORENZO ORSILI

Relatore:

Prof. Gian Marco Revel

Correlatrici:

Prof.ssa Gloria Cosoli

Dott.ssa Alessandra Mobili

A.A. 2023/2024

INDICE

INDICE	3
ELENCO DELLE TABELLE	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 1 STATO DELL'ARTE	10
1.1 Importanza del monitoraggio della salute strutturale (SHM)	10
1.2 Vantaggi del monitoraggio continuo.....	12
1.3 Capacità di self- sensing	15
1.3.1 Meccanismi di self-sensing.....	15
1.4 Piezoresistività	16
1.5 Impedenza elettrica.....	18
1.5.1 Calcolo dell'impedenza elettrica parte reale e immaginaria .	19
1.6 Metodo Wenner.....	20
1.7 Estensimetri.....	21
CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI	25
2.1 Descrizione dei materiali cementizi utilizzati	25

2.2 Aggiunte conduttive	27
2.3 Miscele testate	29
2.4 Applicazioni estensimetri	30
2.5 Grandezze misurate	33
2.6 Protocollo dei test	36
2.7 Processamento dei dati	38
CAPITOLO 3 RISULTATI	40
3.1 Prove di carico ciclico – progetto MULTICLIMACT.....	41
3.1.1 Risultati miscela OPC.....	44
3.2 Prove di carico – progetto SensCrHEAT	47
3.2.1 Risultati miscela OPC.....	49
3.2.2 Risultati miscela CSA.....	51
3.2.3 Risultati miscela AAC	53
CAPITOLO 4 CONCLUSIONI	55
BIBLIOGRAFIA	57

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 . Mix design miscele [g/L].	29
Tabella 2 - Distribuzione sensibilità OPC (5 CICLI)	44
Tabella 3 - variabilità intracampione miscela OPC (5 cicli).....	47
Tabella 4 – Distribuzione sensibilità OPC (3 CICLI)	49
Tabella 5 – variabilità intracampione miscela OPC (3 cicli)	51
Tabella 6 – Distribuzione sensibilità CSA (3 CICLI)	51
Tabella 7 - variabilità intracampione miscela CSA (3 cicli).....	52
Tabella 8 – Distribuzione sensibilità AAC (3 CICLI).....	53
Tabella 9 - variabilità intracampione miscela AAC (3 cicli)	54

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1- Loghi dei progetti e dei funzionari	8
Figura 1.1 – Impedenza elettrica.....	19
Figura 1.2- Schema metodo Wenner utilizzato per provini con pioli [3].	21
Figura 1.3 - Estensimetro elettrico.....	22
Figura 1.4 - Circuito del ponte di Wheatstone.	23
Figura 2.1 - Applicazione colla bicomponente	32
Figura 2.2 - Estensimetri applicati.....	32
Figura 2.3 - Grandezze misurate.....	33
Figura 2.4 – scheda di acquisizione e software Analog Devices	35
Figura 2.5 - Impedenza elettrica misurata con il metodo Wenner	36
Figura 3.1 - Forza, Deformazione, Impedenza elettrica	42
Figura 3.2 - - Grafici Sensibilità BCH+RCF 1 – test n.3.....	43
Figura 3.3 - Distribuzione di sensibilità OPC (5 cicli)	44
Figura 3.4 - Distribuzione rettangolare e relativa analisi di incertezza.....	45
Figura 3.5 - Forza, Deformazione, Impedenza elettrica	48
Figura 3.6 - Grafici Sensibilità	49
Figura 3.7 – Distribuzione di sensibilità OPC (3 cicli)	50
Figura 3.8 – Distribuzione di sensibilità CSA (3 cicli)	51
Figura 3.9 – Distribuzione di sensibilità AAC (3 cicli).....	53

INTRODUZIONE

La seguente tesi si colloca nell'ambito dei progetti "MULTICLIMACT" e "SensCrHEAT". Il progetto MULTICLIMACT (MULTI-faceted CLIMate adaptation ACTions to improve resilience, preparedness and responsiveness of the built environment against multiple hazards at multiple scales, GA n° 101123538) è finalizzato allo sviluppo di soluzioni che migliorino la resilienza dell'ambiente costruito, anche attraverso materiali avanzati dotati di capacità di self-sensing (oggetto di questa tesi), ossia in grado di monitorare autonomamente il proprio stato strutturale attraverso la rilevazione di deformazioni indotte da carichi esterni. Solitamente si impiegano materiali a base di carbonio come aggiunte conduttive, che permettano di migliorare la risposta piezoresistiva del materiale di base, rendendolo automonitorante e permettendo quindi di rilevare variazioni interne ed esterne ai materiali stessi. L'obiettivo è favorire il monitoraggio continuo senza la necessità di sensori esterni, sfruttando variazioni dell'impedenza elettrica in relazione alle sollecitazioni. Parallelamente, il progetto SensCrHEAT (self-SENSing conCretes for HEATing products, CUP C38H23000640002) si concentra sulla

realizzazione di malte e calcestruzzi ecocompatibili e autosensibili, che impiegano leganti alternativi al cemento Portland (OPC, *Ordinary Portland Cement*), come il cemento a base di solfoalluminato di calcio (CSA, *Calcium Sulfoaluminate*) e i sistemi attivati alcalinamente (AAC, *Alkali-Activated Cement*). Questi nuovi materiali sono progettati per rispondere autonomamente a sollecitazioni meccaniche, potenziando il monitoraggio strutturale (SHM, *Structural Health Monitoring*) attraverso meccanismi di self-sensing.



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero delle Imprese
e del Made in Italy

Figura 1- Loghi dei progetti e dei funzionari

Come accennato sopra, la capacità di self-sensing deriva dall'inclusione di aggiunte conduttive, che aumentano la conducibilità elettrica dei materiali, consentendo di monitorare le variazioni di impedenza elettrica causate dalle deformazioni meccaniche o da altri eventi. Questo approccio facilita la creazione di reti di sensori distribuiti all'interno del materiale stesso, con applicazioni promettenti per il monitoraggio continuo di strutture (anche critiche), come ponti o edifici in aree a rischio sismico. Lo studio si focalizza

sulla piezoresistività, ovvero sulla capacità dei materiali di variare la propria resistenza elettrica sotto sforzo meccanico. L'impedenza elettrica diventa così un parametro chiave per monitorare lo stato di salute delle strutture. L'obiettivo principale di questa tesi è la caratterizzazione metrologica dei materiali cementizi con proprietà piezoresistive sviluppati nei progetti MULTICLIMACT e SensCrHEAT. Attraverso test sperimentali, i campioni sono stati caratterizzati anche dal punto di vista metrologico; in particolare, è stato analizzato il comportamento di questi materiali in termini di sensibilità, ossia la variazione dell'impedenza elettrica in funzione delle deformazioni meccaniche. Particolare attenzione sarà posta all'utilizzo e al confronto di un materiale commerciale, ossia le nanopiastrine di grafene, e l'uso combinato di due materiali riciclati, ossia le fibre di carbonio riciclate e il biochar, inseriti nelle miscele come aggiunte conduttive. Inoltre, verrà studiata l'influenza dei diversi tipi di leganti impiegati, comparando le prestazioni delle miscele prese in esame. Questa analisi consentirà di fornire una visione completa delle potenzialità di tali materiali per il monitoraggio strutturale avanzato.

Capitolo 1

STATO DELL'ARTE

Il monitoraggio della salute strutturale, attraverso l'implementazione di tecnologie avanzate come il self-sensing e la piezoresistività, offre soluzioni innovative per garantire la sicurezza e la sostenibilità delle strutture e infrastrutture. Questi sistemi non solo migliorano la capacità di rilevazione e risposta a condizioni critiche, ma contribuiscono anche a una gestione più efficiente delle risorse e alla pianificazione degli interventi di manutenzione. La misura dell'impedenza elettrica è una delle tecniche più efficaci per il monitoraggio della salute strutturale (SHM) dei materiali, in particolare viene eseguita mediante il metodo Wenner, il quale è una tecnica non invasiva.

1.1 Importanza del monitoraggio della salute strutturale (SHM)

Il monitoraggio della salute strutturale (SHM, *Structural Health Monitoring*) è un approccio avanzato e indispensabile per garantire la sicurezza, l'affidabilità e la sostenibilità delle infrastrutture moderne, come ponti, edifici, dighe, torri e piattaforme. Le strutture, nel corso del loro ciclo di vita, sono soggette a deterioramento dovuto a fattori ambientali, carichi dinamici, sollecitazioni

sismiche e usura operativa. In questo contesto, lo SHM permette di monitorare in tempo reale le condizioni strutturali attraverso l'uso di sensori e sistemi di raccolta dati, fornendo informazioni dettagliate sulle variazioni delle proprietà meccaniche e fisiche delle strutture. La rilevazione precoce di difetti o danni come fessurazioni, corrosione o instabilità meccanica consente di intervenire prontamente, riducendo il rischio di guasti improvvisi che potrebbero mettere in pericolo la vita umana e provocare ingenti perdite economiche. Inoltre, l'SHM è un elemento chiave nella gestione sostenibile delle infrastrutture, poiché permette di ottimizzare i costi di manutenzione e prolungare la vita utile delle strutture stesse. Con una crescente domanda di infrastrutture resilienti, capaci di adattarsi alle condizioni ambientali mutevoli e alle sollecitazioni straordinarie, come terremoti o inondazioni, l'importanza dello SHM diventa ancora più evidente. La possibilità di monitorare continuamente le strutture aiuta a garantire che siano in grado di resistere a eventi catastrofici e a migliorare la pianificazione strategica degli interventi di manutenzione, riducendo i costi non previsti e l'impatto ambientale. In sintesi, il SHM è un sistema che non solo migliora la sicurezza e la resistenza delle infrastrutture, ma contribuisce anche a una gestione più efficiente e sostenibile del patrimonio edilizio [1].

1.2 Vantaggi del monitoraggio continuo

Il monitoraggio continuo della salute strutturale (SHM) si distingue dalle ispezioni periodiche per la sua capacità di fornire un controllo ininterrotto delle condizioni strutturali, migliorando così la sicurezza, l'affidabilità e la gestione operativa delle strutture. Uno dei principali vantaggi del monitoraggio continuo è la possibilità di rilevare i danni o i difetti in tempo reale, garantendo interventi tempestivi prima che la situazione si aggravi. Questo approccio preventivo riduce significativamente il rischio di cedimenti improvvisi, proteggendo le persone e minimizzando i danni economici associati a guasti strutturali. Le ispezioni periodiche, d'altra parte, offrono solo una visione limitata e intermittente della struttura, aumentando la probabilità che i problemi si manifestino tra un'ispezione e l'altra senza essere rilevati. Un ulteriore vantaggio del monitoraggio continuo è la possibilità di raccogliere dati dettagliati e costanti sul comportamento della struttura nel tempo. Questi dati forniscono una comprensione approfondita delle dinamiche strutturali e permettono di tracciare tendenze, identificare cambiamenti progressivi e pianificare interventi di manutenzione in modo più preciso e preventivo. Ciò consente una gestione più efficiente delle risorse, poiché i lavori di manutenzione possono essere eseguiti solo quando strettamente necessari, evitando interventi preventivi inutili e costosi che spesso caratterizzano le ispezioni periodiche. Inoltre, il monitoraggio continuo permette di ottimizzare

la vita utile delle strutture, riducendo l'usura e minimizzando i costi di riparazione a lungo termine. Dal punto di vista operativo, il monitoraggio continuo riduce le interruzioni del servizio. Le ispezioni periodiche richiedono spesso la chiusura temporanea delle infrastrutture, con conseguenti disagi per gli utenti e perdite economiche. Il monitoraggio continuo, invece, avviene in modo non invasivo, consentendo alle strutture di rimanere operative senza necessità di fermo, aumentando così l'efficienza. Inoltre, grazie all'adozione di tecnologie avanzate come sensori wireless e sistemi di analisi dati in tempo reale, il monitoraggio continuo può essere integrato in infrastrutture nuove o esistenti con costi relativamente contenuti, fornendo un ritorno sugli investimenti nel lungo termine. In definitiva, rispetto alle ispezioni periodiche, il monitoraggio continuo rappresenta un'opzione tecnologica avanzata e strategicamente vantaggiosa per garantire la sicurezza e la sostenibilità delle infrastrutture [1].

I sistemi di prevenzione associati ai sistemi di monitoraggio strutturale (SHM, Structural Health Monitoring) si basano su una combinazione di tecniche per diagnosticare difetti e prevedere possibili guasti, garantendo così la sicurezza e l'affidabilità delle strutture. I principali approcci includono:

1. Manutenzione predittiva basata sui dati (PHM, prognostics and health management): Questa tecnica utilizza l'analisi dei dati provenienti da sensori installati nelle strutture per monitorare lo stato di salute in tempo

reale e prevedere il ciclo di vita rimanente delle componenti principali. L'integrazione di algoritmi di machine learning consente di analizzare dati complessi e identificare schemi che indicano possibili guasti.

2. Diagnosi e localizzazione dei difetti: Attraverso l'utilizzo di sensori che rilevano vibrazioni, emissioni acustiche e altre grandezze fisiche, il sistema SHM può diagnosticare e localizzare difetti prima che si evolvano in rotture critiche. Questi sensori, insieme a tecniche di elaborazione dei dati, aiutano a ridurre il tempo di fermo e a ottimizzare gli interventi di manutenzione.
3. Manutenzione integrata: Sistemi avanzati collegano la manutenzione predittiva con i processi aziendali e produttivi, ottimizzando così la gestione delle risorse e riducendo i tempi di inattività delle macchine o delle strutture. Questo tipo di manutenzione utilizza grandi volumi di dati provenienti da diverse fonti e li analizza per fornire previsioni accurate sulla salute delle strutture.

Questi sistemi, basati su sensori, big data e intelligenza artificiale, consentono una maggiore efficienza nella prevenzione dei guasti, ottimizzando le operazioni e garantendo una manutenzione più intelligente e mirata [2].

1.3 Capacità di self- sensing

La capacità di self-sensing nei materiali rappresenta un importante passo avanti nel campo dei materiali intelligenti, in quanto permette di integrare le funzioni di rilevamento direttamente nella struttura del materiale stesso. Questa proprietà è resa possibile attraverso l'incorporazione di aggiunte che modificano la risposta elettrica del materiale in base alle deformazioni meccaniche subite e ad altri eventi (es. penetrazione di contaminanti). Tra i principali vantaggi di questo approccio vi è la possibilità di monitorare in tempo reale le condizioni strutturali di una costruzione, riducendo la necessità di interventi invasivi o di sensori esterni che potrebbero non essere sempre pratici o economici [3].

1.3.1 Meccanismi di self-sensing

Il meccanismo principale alla base della capacità di self-sensing nei materiali cementizi e compositi risiede nella variazione della resistenza elettrica in risposta alle sollecitazioni meccaniche. Quando il materiale è sottoposto a carichi, la sua microstruttura subisce variazioni, ad esempio con la formazione di microfessurazioni o la compressione di alcune aree. Questi cambiamenti influenzano il comportamento dei componenti conduttivi inclusi nella matrice, come le fibre di carbonio o il grafene, che a loro volta alterano il passaggio della corrente elettrica attraverso il materiale. In termini pratici, questo fenomeno si manifesta come una variazione misurabile della resistenza elettrica

o dell'impedenza elettrica del materiale, che può essere correlata allo stato di deformazione o di danno. La misura di tali variazioni può essere eseguita mediante tecniche standard come il metodo a quattro elettrodi (Wenner) tramite metodi di misura di impedenza con corrente alternata (AC), per minimizzare gli effetti di polarizzazione. È importante sottolineare che la capacità di self-sensing dipende fortemente dalla distribuzione e dal tipo di aggiunte conduttive inserite nel materiale. La matrice di cemento o malta agisce principalmente come un mezzo non conduttivo, ma questi additivi formano reti conduttive che possono facilitare il passaggio di corrente grazie ad un miglioramento della conducibilità elettrica del materiale. La capacità di queste reti di trasmettere segnali elettrici varia con la deformazione, permettendo la rilevazione di tensioni e fessurazioni. In particolare, le aggiunte conduttive devono essere ben distribuite e avere un sufficiente contatto tra di loro per garantire una conduttività continua e un materiale che abbia prestazioni adeguate e con buona ripetibilità. La quantità e la qualità di questi materiali determinano in larga misura le prestazioni metrologiche dell'elemento finale [3].

1.4 Piezoresistività

La piezoresistività nei materiali autosensibili, in particolare nei compositi cementizi, è una proprietà che consente di rilevare variazioni di deformazione e sollecitazioni meccaniche in modo integrato, senza la necessità di installare sensori esterni. Questo fenomeno si basa su un cambiamento della resistività

elettrica del materiale sotto l'effetto di una deformazione meccanica (come compressione, trazione o flessione). La variazione di resistenza elettrica può essere misurata per fornire indicazioni sullo stato strutturale del materiale, contribuendo alla manutenzione preventiva e alla sicurezza delle infrastrutture civili. Nel caso dei compositi cementizi autosensibili, l'integrazione di filler conduttivi, come biochar o nanopiastrine di grafene, e/o di fibre, come fibre di carbonio (vergini o riciclate) permette la creazione di percorsi conduttivi nella matrice cementizia. Questi percorsi agiscono come reti per la conduzione elettrica, e la loro integrità e continuità sono sensibili alle deformazioni meccaniche. Sotto carico, i percorsi conduttivi possono subire rotture, riconessioni o variazioni di contatto, alterando così la resistività complessiva del materiale. La sensibilità della piezoresistività in questi compositi dipende dalla quantità, dal tipo e dalla dispersione omogenea dei filler conduttivi. Se i filler sono distribuiti in modo uniforme, i compositi possono mostrare un'elevata sensibilità e precisione nella rilevazione delle sollecitazioni. Tuttavia, una scarsa dispersione o agglomerazione dei filler può compromettere la continuità dei percorsi conduttivi, riducendo la risposta piezoresistiva e l'efficacia del monitoraggio, anche a causa di una ripetibilità limitata della realizzazione degli elementi sensibili. Un altro aspetto cruciale è la natura reversibile della piezoresistività, che permette di monitorare non solo le sollecitazioni statiche, ma anche quelle dinamiche. Ciò rende i compositi cementizi autosensibili adatti a monitorare in tempo reale il comportamento

delle strutture, ad esempio nei ponti o negli edifici sottoposti a vibrazioni e carichi ciclici [4].

1.5 Impedenza elettrica

La misura dell'impedenza elettrica rappresenta uno strumento fondamentale per il monitoraggio dello stato di salute dei materiali, in particolare nel campo dei materiali cementizi come il calcestruzzo. L'aggiunta di materiali conduttivi, come grafene o fibre di carbonio, introduce un miglioramento della conduzione elettrica basata sul movimento degli elettroni all'interno della matrice cementizia. L'impedenza elettrica, misurata in Ohm [Ω], rappresenta l'opposizione al passaggio della corrente alternata a una determinata frequenza, ed è indicata con la lettera Z . Essa è una grandezza complessa, costituita da due componenti principali, come descritto dalla seguente equazione:

$$Z = Z_{Re} + iZ_{Im}$$

- Z_{Re} : la componente reale, che rappresenta la resistenza elettrica effettiva del materiale. Questa componente dipende principalmente dalla conduttività della matrice solida e dal percorso che la corrente deve seguire per attraversare il materiale.
- Z_{Im} : la componente immaginaria, che rappresenta la reattanza, ovvero la resistenza opposta dai materiali reattivi come condensatori e induttori interni al materiale. Nel caso del calcestruzzo, questa parte potrebbe

essere influenzata da processi di polarizzazione legati alla distribuzione degli ioni e alla capacità dielettrica del materiale.

- i : rappresenta l'unità immaginaria, ed è definita come $i = \sqrt{-1}$

1.5.1 Calcolo dell'impedenza elettrica parte reale e immaginaria

L'impedenza elettrica può essere rappresentata come un vettore in un piano complesso. Questo vettore parte dall'origine degli assi e forma un angolo ϕ rispetto all'asse x , che rappresenta la parte reale dell'impedenza. L'asse y , invece, rappresenta la parte immaginaria. In questo modo, l'impedenza viene graficata come un vettore, la cui lunghezza rappresenta il modulo, mentre l'angolo ϕ indica lo sfasamento tra le componenti reale e immaginaria.

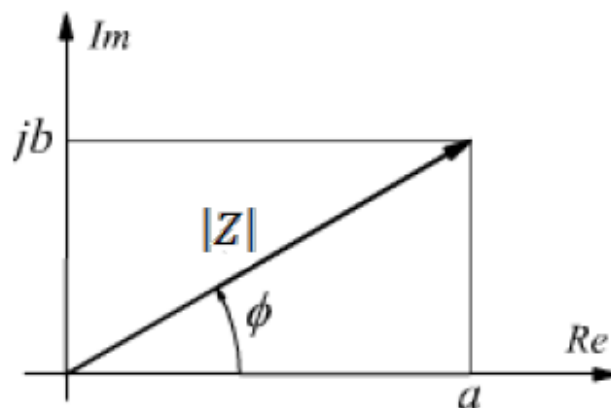


Figura 1.1 – Impedenza elettrica

Questa considerazione permette di derivare la formula per il calcolo dell'impedenza elettrica nelle sue componenti reale e immaginaria:

- La parte reale dell'impedenza, Z_{Re} , è data da:

$$Z_{Re}=|Z|\cdot\cos(\phi) [\Omega]$$

- La parte immaginaria dell'impedenza, Z_{Im} , è data da:

$$Z_{Im}=|Z|\cdot\sin(\phi)Z [\Omega]$$

Dove:

- $|Z|$ rappresenta il modulo dell'impedenza;
- ϕ è l'angolo di fase.

1.6 Metodo Wenner

Il metodo Wenner è una tecnica non invasiva utilizzata per misurare l'impedenza elettrica di materiali. Questa tecnica si basa sull'uso di quattro elettrodi disposti lungo una linea retta e posti a distanze uguali tra loro, durante la misurazione, una corrente viene fatta passare attraverso i due elettrodi esterni, mentre la differenza di potenziale viene misurata tra i due elettrodi interni [5].

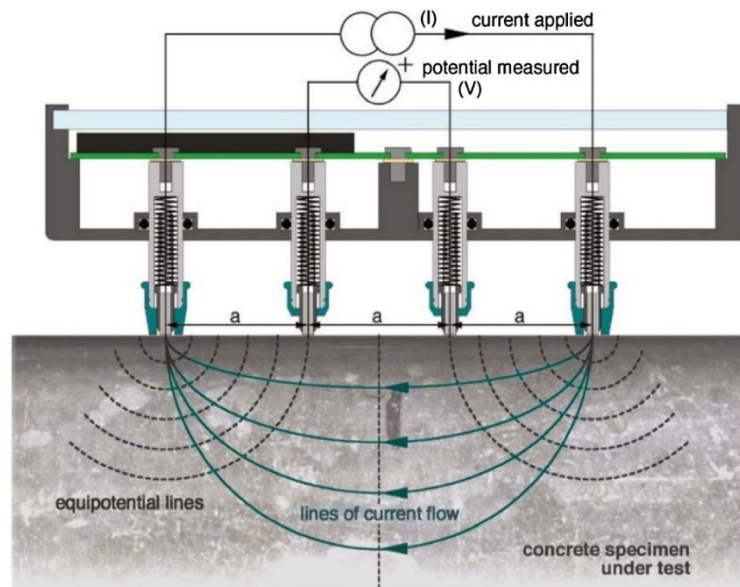


Figura 1.2- Schema metodo Wenner utilizzato per provini con pioli [3]

Nel caso specifico, viene utilizzata corrente alternata (AC, *Alternating Current*) al posto della corrente continua (DC, *Direct Current*) per minimizzare gli effetti di polarizzazione agli elettrodi, migliorando così la stabilità delle misure nel tempo. Questo approccio è particolarmente utile nei materiali conduttivi, dove l'uso di corrente continua può causare una diminuzione dell'affidabilità della misura a causa di effetti di polarizzazione che alterano la lettura dell'impedenza nel tempo.

1.7 Estensimetri

Gli estensimetri sono dispositivi utilizzati per rilevare e misurare la deformazione di un materiale sottoposto a sollecitazioni meccaniche. Il loro principio di funzionamento si basa sulla variazione della resistenza elettrica quando il sensore subisce una deformazione.

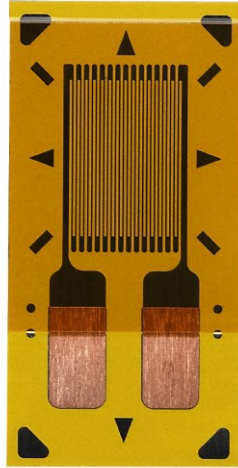


Figura 1.3 - Estensimetro elettrico

In particolare, un estensimetro elettrico è composto da un sottile filo metallico o una pellicola conduttiva, come rappresentato nella figura 1.3, applicata sulla superficie del materiale da testare. Quando il materiale si deforma, il filo o la pellicola si allungano o si comprimono, modificando la loro lunghezza e causando una variazione nella resistenza elettrica, secondo la formula:

$$\Delta R = R_0 \cdot G_f \cdot \varepsilon$$

Dove:

- ΔR rappresenta la variazione di resistenza [Ω];
- R_0 è la resistenza iniziale del sensore [Ω];
- G_f è il fattore di sensibilità (o "gauge factor"), che indica la sensibilità del sensore alla deformazione;
- ε è la deformazione meccanica a cui è sottoposto il materiale [$\mu\epsilon$].

Gli estensimetri elettrici trovano applicazione in vari campi, dalla meccanica strutturale alla ricerca sui materiali. Un settore di particolare interesse è il monitoraggio della deformazione in materiali avanzati, come quelli piezoresistivi, dove questi sensori si dimostrano cruciali per misurare con precisione le variazioni di resistenza elettrica indotte da forze meccaniche applicate, fornendo così informazioni dettagliate sul comportamento del materiale.

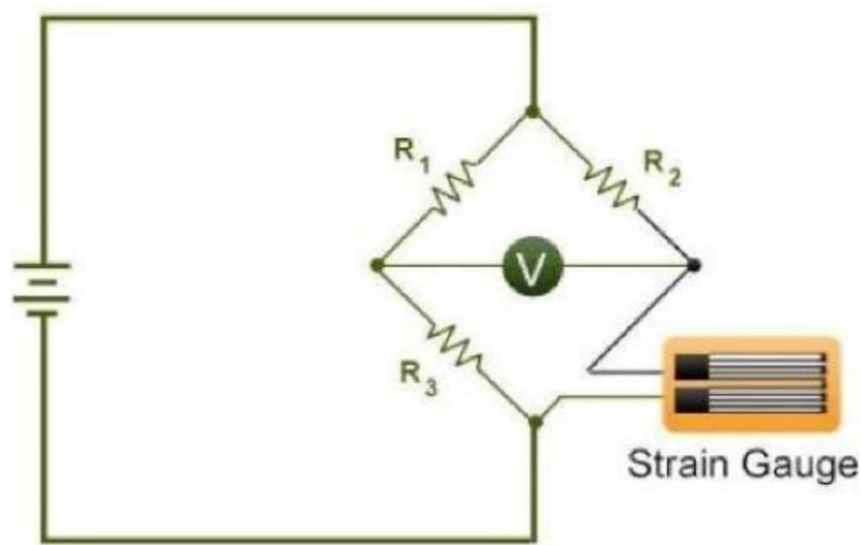


Figura 1.4 - Circuito del ponte di Wheatstone.

Per rilevare le piccole variazioni di resistenza generate dagli estensimetri, viene comunemente impiegato un ponte di Wheatstone, che trasduce la variazione di resistenza elettrica in una differenza di potenziale elettrico facilmente misurabile. Esistono diverse configurazioni del circuito del ponte di Wheatstone, tra cui:

- Ponte intero: utilizza quattro estensimetri, con due o tutti attivi nella misura. Gli estensimetri hanno lo stesso modulo di deformazione, in particolare, i lati adiacenti del ponte di Wheatstone hanno segno opposto, mentre i lati opposti hanno segno concorde. Questo fa sì che i segnali uguali sui lati opposti si sommino, provocando un raddoppio della sensibilità.
- Quarto di ponte: utilizza un solo estensimetro insieme a resistenze fisse, in questa configurazione non si ha compensazione degli effetti termici e la sensibilità è un quarto di quella con configurazione a ponte intero;
- Mezzo ponte: impiega due estensimetri, di cui uno è attivo e l'altro serve come riferimento o compensazione, con questa configurazione vengono compensati gli effetti termici e la sensibilità è la metà di quella con configurazione a ponte intero;

Nel contesto specifico, è stata utilizzata la configurazione a mezzo ponte, ideale per applicazioni dove è necessario compensare eventuali variazioni di temperatura o altre influenze esterne, migliorando così l'accuratezza della misura della deformazione [6].

Capitolo 2

MATERIALI E METODI

In questo paragrafo si procede alla descrizione dei materiali impiegati e delle metodologie adottate per la caratterizzazione delle proprietà piezoresistive delle malte sviluppate. Vengono illustrate le diverse miscele preparate, evidenziando i leganti utilizzati. Inoltre, vengono descritte le tecniche sperimentali adottate, tra cui i test di compressione e le misure di impedenza elettrica, impiegate per valutare la risposta piezoresistiva dei materiali.

2.1 Descrizione dei materiali cementizi utilizzati

All'interno del dipartimento “SIMAU” dell'Università Politecnica delle Marche sono stati realizzati provini in malta per valutare la capacità piezoresistiva, ovvero la variazione della resistenza elettrica in risposta a sollecitazioni meccaniche. I materiali cementizi utilizzati in questo studio sono stati selezionati con l’obiettivo di combinare le proprietà meccaniche necessarie per le applicazioni strutturali con caratteristiche avanzate di self-sensing. In particolare, nell'ambito del progetto MULTICLIMACT, la composizione base delle miscele cementizie prevede l'impiego di cemento Portland (OPC). Il cemento Portland è un tipo di legante idraulico, capace di indurire anche in

ambienti privi di aria e di resistere all'erosione provocata dall'acqua. La sua produzione avviene cuocendo una miscela di materiali naturali e artificiali a temperature molto elevate, circa 1450 °C. Il materiale ottenuto da questa cottura è il clinker, che viene poi macinato e mescolato con il gesso che funge da regolatore di presa. Possono essere inseriti anche altri costituenti secondari; la quantità di quest'ultimi è regolata da normative specifiche e varia in base alla classe di cemento. Il risultato finale della combinazione tra clinker e gesso costituisce il cemento Portland vero e proprio. Nel progetto SensCrHEAT si vuole verificare l'efficacia di aggiunte carboniose sostenibili in conglomerati cementizi con leganti alternativi al Cemento Portland e più sostenibili come il cemento a base di solfoalluminato di calcio (CSA) e il cemento alcali attivato (AAC) per migliorare le capacità di self-sensing del materiale finale. Il cemento CSA è un tipo di cemento a base di alluminio e zolfo, caratterizzato da un rapido indurimento e alte resistenze meccaniche, rispetto al cemento Portland, il CSA ha un ciclo produttivo più sostenibile, poiché richiede meno calcare, riducendo le emissioni di CO₂ e la temperatura di cottura. I cementi alcali-attivati (AAC) rappresentano una categoria innovativa di leganti inorganici, distinti dal cemento Portland tradizionale. Sono prodotti attraverso una reazione chimica tra un precursore e una soluzione attivante. In particolare, i cementi alcali-attivati producono fino al 60-80% in meno di emissioni di CO₂ rispetto al cemento Portland [7]. In questo lavoro, la miscela AAC sarà a base di cenere volante di classe F (FA, *fly ash*) e cemento a base di alluminato di

calcio (CAC, *calcium aluminat cement*) attivati con una soluzione composta da silicato di sodio (SS, *sodium silicate*) e idrossido di potassio (KOH).

2.2 Aggiunte conduttive

I materiali utilizzati nei progetti includono diverse aggiunte conduttive a base di carbonio, che sono state testate per migliorare le capacità di self-sensing e le prestazioni meccaniche dei materiali cementizi. Le aggiunte conduttive utilizzate sono:

- Nanoplastrine di Grafene (GNP)

Le nanoplastrine di grafene sono state considerate come materiale commerciale a base di carbonio. Grazie alla loro grande superficie specifica e alle eccellenti proprietà conduttive, contribuiscono a migliorare la conducibilità del materiale cementizio. Le GNP utilizzate in questo lavoro sono prodotte dalla ditta Pentachem S.r.l. con il nome di Pentagraf 30.

- Biochar (BCH)

Il biochar è un sottoprodotto derivato dalla pirolisi o gassificazione di biomasse, come i residui agricoli. Questo materiale riduce significativamente la resistività elettrica del cemento, migliorandone la conducibilità elettrica, così da permettere una risposta più efficace agli

stimoli esterni, come carichi meccanici o variazioni di temperatura, attraverso cambiamenti nella sua impedenza elettrica. Il biochar non solo aumenta le proprietà elettriche del cemento, ma rafforza anche la sua resistenza meccanica, influenzando positivamente la microstruttura. Essendo prodotto da scarti organici, supporta i principi di economia circolare e contribuisce alla sostenibilità ambientale. In questo lavoro di tesi il biochar utilizzato è stato prodotto dalla pirolisi lenta di scarti agricoli dalla ditta RES Società Cooperativa e opportunamente macinato e setacciato a 100 μm per essere introdotto nelle malte in forma di filler.

- Fibre di Carbonio Riciclate (RCF)

Le fibre di carbonio riciclate utilizzate nella presente tesi sono state ottenute da scarti di compositi a base di carbonio. Sono fornite dall'azienda Procotex Belgium SA ed hanno un diametro di 7 μm e una lunghezza di 6 mm. Da studi precedenti è stato dimostrato che queste fibre migliorano sia la resistenza meccanica che quella elettrica del cemento [8]. In particolare, aumentano la resistenza alla compressione grazie alla presenza di microparticelle di carbonio e riducono significativamente la resistività elettrica. Questo potenzia le proprietà piezoresistive, rendendo il materiale più sensibile a variazioni di carico e facilitando il monitoraggio strutturale. Queste aggiunte conduttive migliorano la capacità dei materiali cementizi di rispondere agli stimoli

esterni, rendendo i materiali più adatti per applicazioni strutturali avanzate e sostenibili.

2.3 Miscele testate

Le miscele oggetto della sperimentazione sono riportate di seguito in Tabella 1. In particolare, per ognuno dei tre leganti studiati (OPC, CSA e AAC) sono state realizzate tre miscele differenti: una di riferimento (REF) senza aggiunte conduttive, una preparata con l'aggiunta di GNP allo 0,5% in volume in quanto considerato come materiale conduttivo a base di carbonio di riferimento, una con l'aggiunta combinata di BCH allo 0,5% e RCF allo 0,05% in volume (BCH+RCF) in quanto aggiunte riciclate a base di carbonio innovative e sostenibili.

Tabella 1 . Mix design miscele [g/L].

Miscela	OPC	CSA	BCH	RCF	GNP	Acqua	Sabbia s.s.a.	FA	CAC	SS	KOH 50%	Acqua per KOH	a/l
OPC REF	508	-	-	-	-	305	1407	-	-	-	-	-	0,60
OPC BCH+RCF	505	-	10	1	-	303	1400	-	-	-	-	-	0,60
OPC GNP	506	-	-	-	10	303	1400	-	-	-	-	-	0,60
CSA REF	-	490	-	-	-	294	1407	-	-	-	-	-	0,60
CSA BCH+RCF	-	486	10	1	-	293	1400	-	-	-	-	-	0,60
CSA GNP	-	487	-	-	10	293	1400	-	-	-	-	-	0,60
AAC REF	-	-	-	-	-	-	1407	480	42	156	32	125	0,37
AAC BCH+RCF	-	-	10	1	-	-	1400	477	42	155	32	124	0,37
AAC GNP	-	-	-	-	10	-	1400	478	42	155	32	124	0,37

2.4 Applicazioni estensimetri

Il montaggio degli estensimetri elettrici richiede precisione e attenzione per garantire che le misurazioni siano accurate e affidabili. Ecco una procedura dettagliata dei passaggi tipici:

- Preparazione della superficie: Per garantire un'adesione ottimale dell'estensimetro, è essenziale che la superficie sia liscia e priva di impurità. Utilizzando un compressore d'aria e della carta assorbente, si assicura che la faccia scelta fosse perfettamente pulita.
- Marcatura delle linee per il centraggio dell'estensimetro: Abbiamo tracciato, le linee mediane sui lati della faccia selezionata per l'installazione dell'estensimetro. La parte centrale, dove sarà applicato l'estensimetro, deve rimanere libera. Le linee tracciate sull'estensimetro

stesso, fornite dal produttore, devono corrispondono a quelle tracciate sul provino, facilitando il corretto posizionamento.

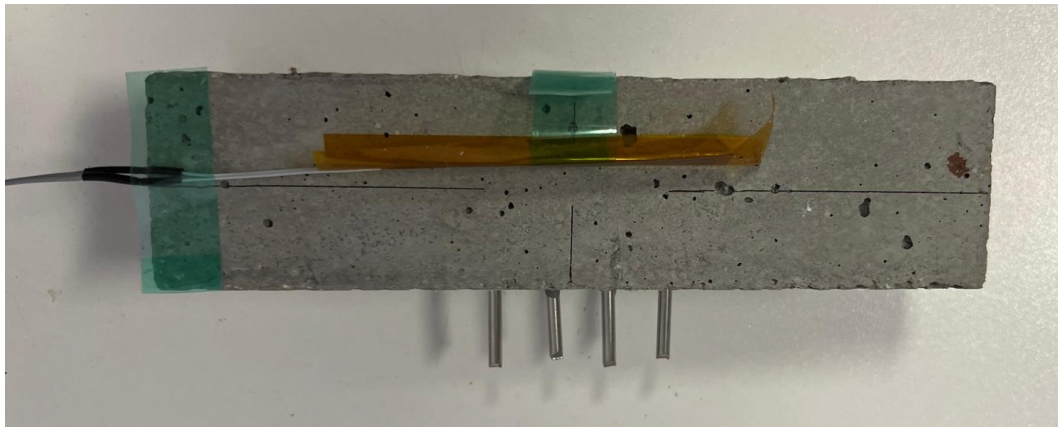


Figura 2 - Applicazione estensimetro

- Posizionamento dell'estensimetro: Si fissa temporaneamente l'estensimetro con del nastro adesivo, come in figura 2, ha aiutato a mantenere l'estensimetro stabile durante l'applicazione della colla.
- Preparazione e applicazione della colla: La colla bicomponente X60 prodotta da HBM è composta da due elementi uno liquido e uno in polvere. Per prepararla, bisogna miscelare un misurino di polvere con 20 gocce di liquido. Per evitare tensioni sull'estensimetro, è fondamentale stendere la colla uniformemente, utilizzando una spatolina per facilitare l'applicazione.

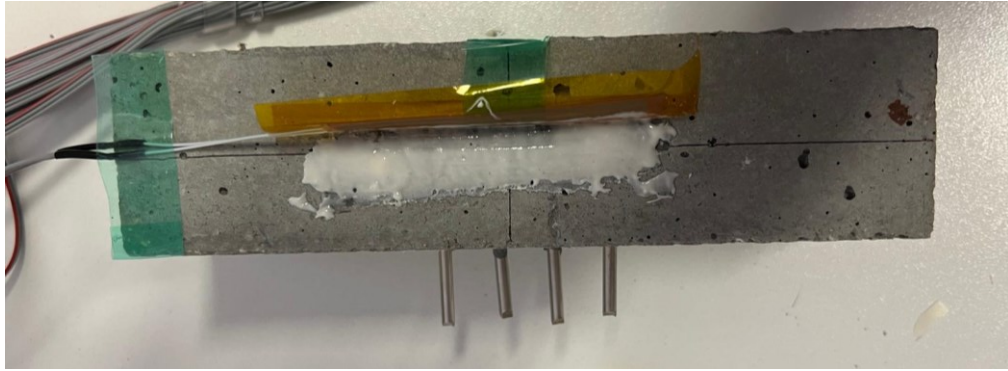


Figura 2.1 - Applicazione colla bicomponente

- Applicazione del carico: Per garantire una presa uniforme, bisogna applicare un leggero carico sopra all'estensimetro cinque minuti.



Figura 2.2 - Estensimetri applicati

Questa procedura garantisce un'installazione precisa e affidabile degli estensimetri, essenziale per ottenere misurazioni accurate delle deformazioni nei provini. La procedura è stata ripetuta per ogni provino. Al termine dell'applicazione, le estremità dei cavi degli estensimetri sono state poi stagnate.

2.5 Grandezze misurate

Il setup di laboratorio per la misurazione delle diverse grandezze fisiche su un campione di materiale deve essere progettato con cura per garantire precisione, ripetibilità e affidabilità dei dati. Esso comprende una serie di strumenti e dispositivi che variano in base alle grandezze da misurare.

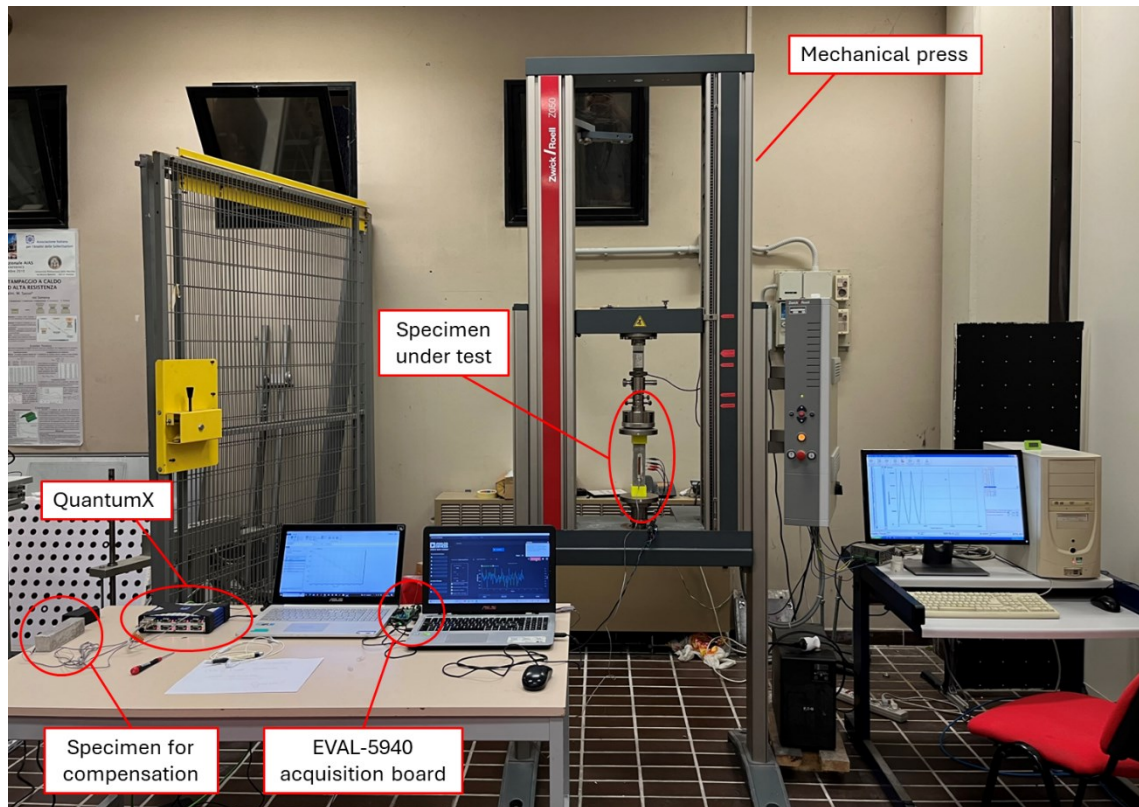


Figura 2.3 - Grandezze misurate

Il setup include:

1. Macchina a compressione: una pressa meccanica (Zwick Roell Z050) utilizzata per applicare una forza controllata sul campione, mantenendola entro il limite elastico del materiale.

2. Campione in prova: un campione di materiale posizionato sotto carico per il test di compressione. È collegato a vari sensori e strumenti di misurazione.
3. Campione per compensazione: un secondo campione utilizzato per la compensazione durante la misurazione.
4. QuantumX: un sistema di acquisizione dati della (HBM), configurato in modalità mezzo ponte, utilizzato per raccogliere i segnali degli estensimetri montati sul campione per misurare la deformazione.
5. EVAL-5940 acquisition board: è una scheda di acquisizione dati utile per la misura dell'impedenza elettrica, in particolare grazie al chip AD5940, che è ottimizzato per applicazioni di bioimpedenza o misure di impedenza elettrica a 4 elettrodi in generale. Insieme al software Analog Devices Sensor Pal, questa configurazione permette di raccogliere e analizzare i segnali da vari sensori, compresi quelli per la misura di impedenza elettrica in materiali o componenti elettrici.

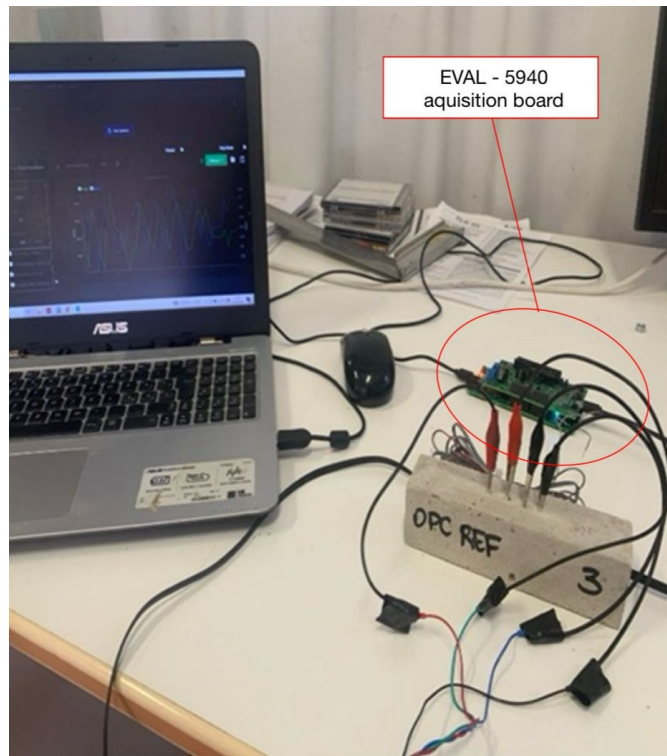


Figura 2.4 – scheda di acquisizione e software Analog Devices

Sono presenti dei computer per il monitoraggio e l'analisi in tempo reale dei dati raccolti, come la forza applicata e la risposta del materiale in termini di deformazione e impedenza elettrica.

I parametri misurati quindi sono:

- Impedenza elettrica [Ω]: misurata con il metodo Wenner a corrente alternata (AC); questa tecnica è scelta per ridurre gli effetti di polarizzazione che si possono verificare agli elettrodi quando si utilizzano correnti continue [9].

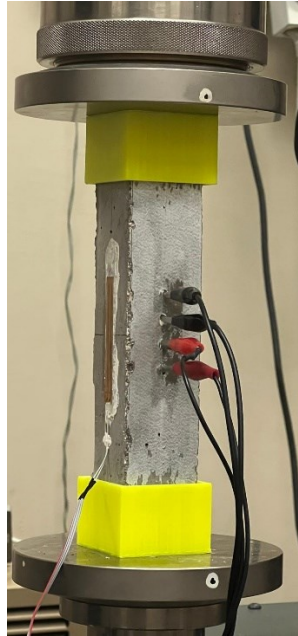


Figura 2.5 - Impedenza elettrica misurata con il metodo Wenner

- Deformazione [$\mu\epsilon$]: misurata tramite il sistema QuantumX.
- Forza [N]: applicata tramite la pressa meccanica (Zwick Roell) e viene misurata tramite la cella di carico a bordo della macchina.

In generale, questa configurazione è utilizzata per la caratterizzazione dei materiali sotto carico, monitorando sia le proprietà meccaniche che elettriche.

2.6 Protocollo dei test

Nel contesto del progetto MULTICLIMACT, l'obiettivo era studiare la risposta meccanica e le proprietà di self-sensing di malte innovative a base di cemento Portland. In particolare, per ciascuna delle 3 miscele realizzate (OPC REF, OPC GNP e OPC BCH+RCF, vedi Tabella 1), sono stati realizzati 3 campioni, per un totale di 9 campioni complessivi. Su ogni campione è stato eseguito un test di compressione con 5 cicli di carico e scarico, impiegando una

macchina di compressione. Questo approccio ha permesso di valutare sia le proprietà meccaniche che le capacità piezoresistive dei materiali sviluppati, fornendo dati preziosi per la caratterizzazione dei materiali avanzati studiati all'interno del progetto. Il progetto SensCrHEAT si concentra sullo sviluppo e la caratterizzazione di malte e calcestruzzi ecosostenibili con capacità autosensibili. In questo caso, sono stati studiati 3 diversi leganti (OPC, CSA, AAC) su 3 diverse miscele, ottenendo così 9 miscele differenti. Per ciascuna miscela, sono stati preparati 3 campioni, portando a un totale di 27 campioni. Ogni campione è stato sottoposto a un test di compressione che prevedeva 3 cicli di carico e scarico, eseguiti mediante una macchina di compressione (Zwick Roell Z050). I dati raccolti da questi test hanno permesso di confrontare le proprietà meccaniche e di self-sensing delle varie miscele, contribuendo allo sviluppo di soluzioni avanzate per materiali ecosostenibili e intelligenti.

2.7 Processamento dei dati

L'elaborazione dei dati è stata eseguita utilizzando MATLAB®, scrivendo codici specifici. Un codice è stato dedicato alla visualizzazione dei grafici delle grandezze prese in esame, mentre un altro codice è stato sviluppato per lo studio della sensibilità. Per quanto riguarda la sensibilità, ovvero la variazione della parte reale dell'impedenza elettrica in funzione della deformazione, le formule adottate sono le seguenti:

- Per il progetto MULTICLIMACT:

$$k = \frac{FCR}{\varepsilon} [\mu\varepsilon^{-1}]$$

- Per il progetto SensCrHEAT:

$$k = \frac{FCZ}{\varepsilon} [\mu\varepsilon^{-1}]$$

La variazione dell'impedenza elettrica nei due progetti (SensCrHEAT e MULTICLIMACT) può essere descritta attraverso due parametri distinti: FCZ (Fractional Change in Impedance) per SensCrHEAT e FCR (Fractional Change in Resistance) per MULTICLIMACT. Quando si considera una componente immaginaria induttiva, l'impedenza non è più semplicemente resistiva ma ha una parte immaginaria. Questo influenza il comportamento complessivo dei materiali piezoresistivi.

Nel caso di MULTICLIMACT, viene considerata principalmente la parte reale dell'impedenza elettrica, senza includere la componente immaginaria che per i campioni OPC risulta essere sempre di tipo capacitivo.

La formula per il FCR è:

$$FCR = \frac{z_{Re\ t} - z_{Re\ t_0}}{z_{Re\ t_0}} \times 100 [\%]$$

- $z_{Re\ t}$ parte reale dell'impedenza elettrica [Ω].
- $z_{Re\ t_0}$ parte reale dell'impedenza elettrica al tempo zero [Ω].

Nell'ambito di SensCrHEAT, viene considerata invece la variazione del modulo dell'impedenza elettrica, in quanto la parte immaginaria dell'impedenza non è sempre di tipo capacitivo.

La formula per il FCZ è:

$$FCZ = \frac{|z_{Re\ t}| - |z_{Re\ t_0}|}{|z_{Re\ t_0}|} \times 100 [\%]$$

- $|z_{Re\ t}|$ modulo dell'impedenza elettrica [Ω].
- $|z_{Re\ t_0}|$ modulo dell'impedenza elettrica al tempo zero [Ω].

Capitolo 3

RISULTATI

I test sperimentali eseguiti sui campioni di malta sviluppati all'interno dei progetti MULTICLIMACT e SensCrHEAT hanno permesso di raccogliere dati significativi sia in termini di proprietà meccaniche che di capacità piezoresistive.

I dati raccolti durante la fase sperimentale hanno evidenziato una significativa variabilità, sia tra campioni appartenenti allo stesso mix-design, sia all'interno dello stesso campione sottoposto a test ripetuti. Questa variabilità (inter- e intra-campione, rispettivamente) è in gran parte dovuta all'impossibilità di ottenere provini perfettamente omogenei a causa dell'intrinseca eterogeneità dei materiali cementizi. Tali fattori hanno contribuito a una variabilità nei risultati sperimentali che, nonostante tutto, si sono dimostrati promettenti rispetto agli obiettivi iniziali. Dopo queste considerazioni preliminari, i risultati vengono approfonditi.

3.1 Prove di carico ciclico – progetto MULTICLIMACT

Le malte utilizzate nei test del progetto MULTICLIMACT sono state realizzate con un legante a base di cemento Portland (OPC) con tre differenti composizioni (OPC REF, OPC GNP e OPC BCH+RCF). In totale, sono stati preparati 9 campioni, 3 per ciascuna delle miscele considerate. Questo ha permesso di avere un'ampia base di dati per confrontare le prestazioni meccaniche e piezoresistive di ogni miscela e di valutare quindi le prestazioni delle diverse aggiunte conduttive in termini di piezoresistività del materiale finale. I campioni sono stati sottoposti a prove di compressione per valutarne la risposta in condizioni cicliche di carico e scarico.

Le prove di compressione sono state condotte utilizzando una macchina di compressione, applicando un protocollo che prevedeva cinque cicli di carico e scarico per ciascun campione. Per prima cosa si è notato che all'aumentare della deformazione (negativa, legata ad un aumento di carico) si ha una diminuzione della parte reale dell'impedenza elettrica, come si può vedere nella figura 3.1, in tutti e nove i campioni. Questo era atteso, in quanto comprimendo il campione diminuisce la lunghezza dell'elemento resistivo.

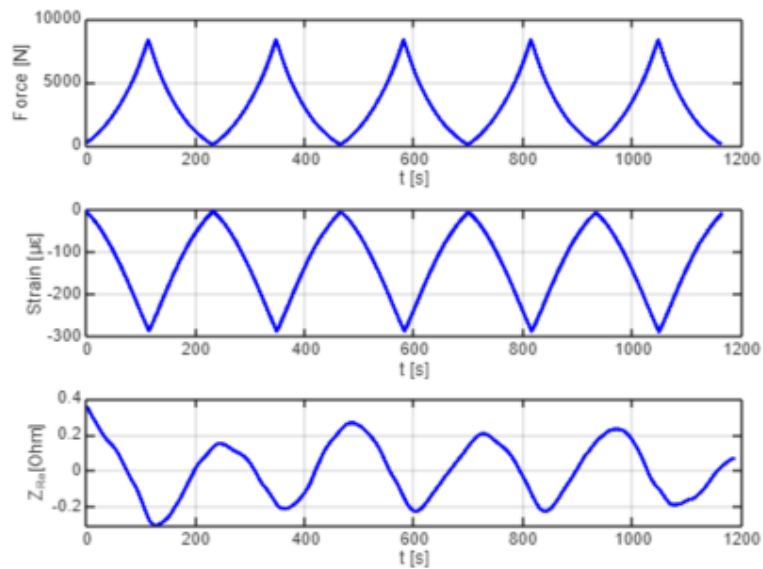


Figura 3.1 - Forza, Deformazione, Impedenza elettrica

Questo effetto è legato alla variazione delle proprietà elettriche del materiale in risposta alla sollecitazione meccanica, in particolare nel caso di materiali conduttivi o compositi con filler conduttivi, come fibre di carbonio o biochar.

In questi materiali, quando vengono sottoposti a una deformazione, la struttura interna cambia, riducendo le distanze tra gli elementi carboniosi, il che porta a un aumento della conducibilità elettrica e, quindi, a una riduzione della resistenza/impedenza elettrica. Questo comportamento è alla base del fenomeno di piezoresistività e della capacità di self-sensing dei materiali.

Naturalmente, il comportamento specifico può variare in base alla composizione del materiale e alla natura della deformazione, ma il principio generale è che c'è una correlazione inversa tra deformazione e impedenza elettrica. Quando si elaborano i dati relativi alla piezoresistività, l'obiettivo principale è comprendere come varia la sensibilità del materiale in risposta alle sollecitazioni meccaniche. La sensibilità, in questo contesto, è definita come la

variazione relativa della parte reale dell'impedenza elettrica in funzione della deformazione del materiale, come visto nella sezione 2.7.

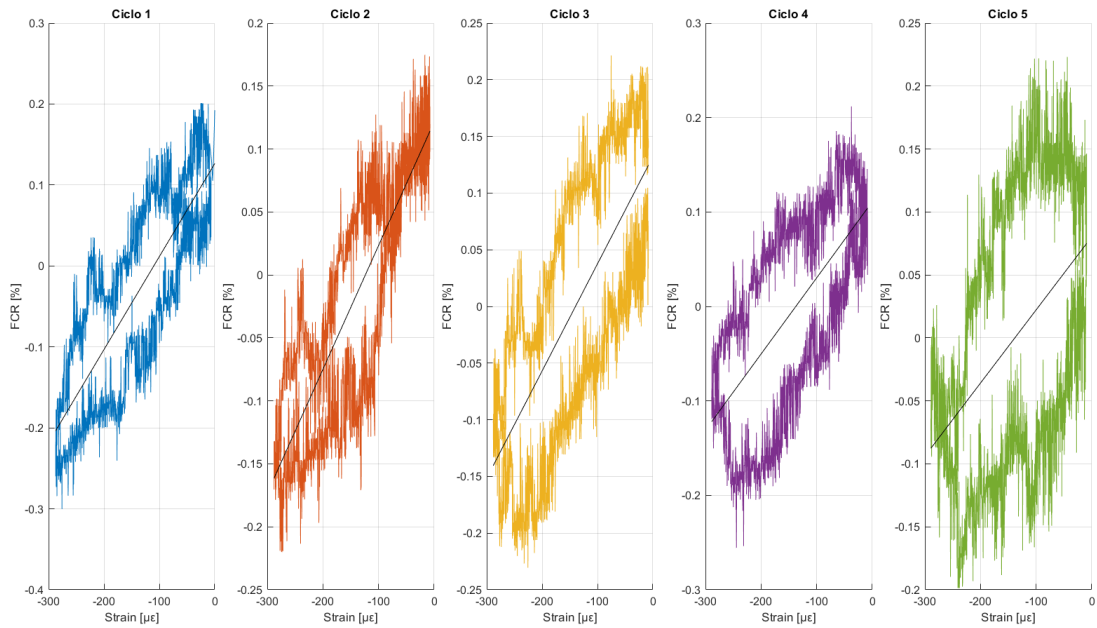


Figura 3.2 - - Grafici Sensibilità BCH+RCF 1 – test n.3

Guardando la Figura 3.2, che mostra la relazione tra FCR e deformazione durante cinque cicli di carico e scarico, si nota che in ogni ciclo i dati non seguono un'unica traiettoria al crescere e al diminuire della deformazione. Questo suggerisce la presenza di isteresi. In particolare, l'isteresi può essere osservata come una differenza tra il percorso seguito dalla parte reale dell'impedenza elettrica del materiale durante l'aumento del carico (compressione) e quello seguito durante il rilascio (scarico o trazione).

3.1.1 Risultati miscela OPC

Dallo studio effettuato sono stati ricavati i seguenti dati.

Tabella 2 - Distribuzione sensibilità OPC (5 CICLI)

MULTICLIMACT	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	Distribuzione Rettangolare	
MIX	μ	a [$\mu\epsilon^{-1}$]	$\pm K * u$ [$\mu\epsilon^{-1}$] (K=2)
OPC_REF	$3,86 * 10^{-04}$	$2,24 * 10^{-04}$	$2,59 * 10^{-04}$
OPC_GNP	$2,54 * 10^{-04}$	$1,02 * 10^{-04}$	$1,18 * 10^{-04}$
OPC_BCH+RCF	$4,23 * 10^{-04}$	$5,20 * 10^{-04}$	$6,01 * 10^{-04}$

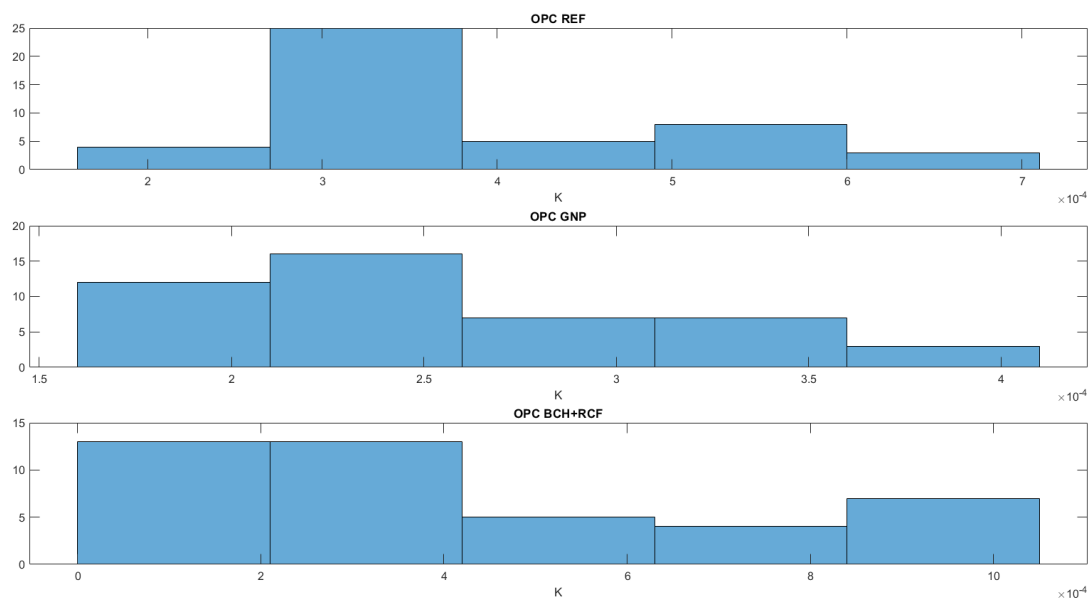


Figura 3.3 - Distribuzione di sensibilità OPC (5 cicli)

La tabella 1 riassume parametri relativi alla piezoresistività dei materiali sotto studio. La sensibilità indica la capacità piezoresistiva del materiale. Più

alto è il valore di k , maggiore sarà la risposta del materiale a una deformazione $[\mu\varepsilon]$.

La tabella è organizzata in quattro colonne principali:

1. MIX: Indica il tipo di miscela esaminata. Sono riportate tre miscele diverse:
 - OPC_REF (cemento Portland di riferimento),
 - OPC_GNP (cemento Portland con nanopiastrine di grafene),
 - OPC_BCH+RCF (cemento Portland con biochar e fibre di carbonio riciclate).
2. k $[\mu\varepsilon^{-1}]$: Valore medio della sensibilità, calcolato a partire dai 5 cicli di carico e scarico per i tre campioni di test della stessa miscela, su 15 valori di sensibilità.
3. Distribuzione Rettangolare; si può notare che i dati non seguono una distribuzione gaussiana, probabilmente a causa del numero limitato di test; pertanto, si è stata considerata una distribuzione rettangolare e i relativi parametri per la valutazione dell'incertezza.

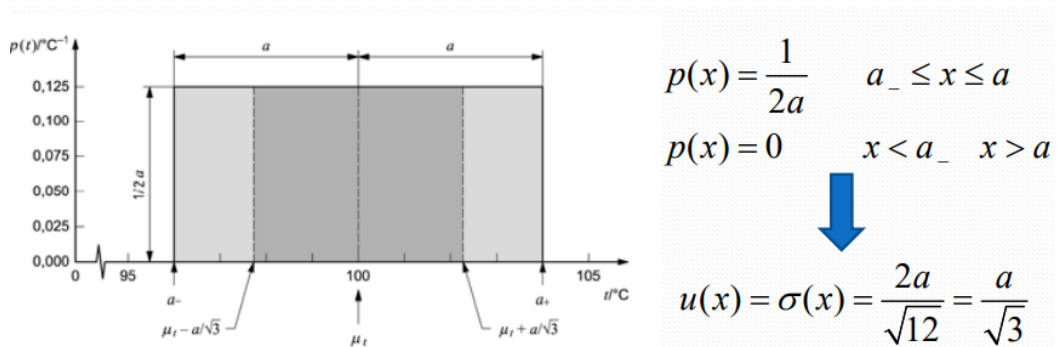


Figura 3.4 - Distribuzione rettangolare e relativa analisi di incertezza

- $a [\mu\epsilon^{-1}]$: rappresenta lo scarto, calcolato come la metà della differenza tra il valore massimo e il valore minimo delle sensibilità rilevate. Questo parametro fornisce una misura della variabilità delle sensibilità osservate durante i test e consente di valutare l'intervallo entro cui i valori di sensibilità si distribuiscono. Uno scarto più elevato indica una maggiore dispersione dei dati, suggerendo una variabilità più significativa nelle misurazioni, mentre uno scarto ridotto riflette una distribuzione più omogenea e coerente dei risultati.
- $Ku [\mu\epsilon^{-1}]$ ($K=2$): rappresenta l'incertezza associata al valore medio della sensibilità, come si può vedere nella figura 3.4, mentre k è il fattore di copertura utilizzato per ottenere un determinato intervallo di confidenza. Il fattore di copertura k è pari a 2 se si vuole avere un intervallo di confidenza al 95%.

Nel caso specifico:

- OPC_REF ha un valore medio di sensibilità ($3,86 \cdot 10^{-04} [\mu\epsilon^{-1}]$).
- OPC_GNP ha una sensibilità inferiore ($2,54 \cdot 10^{-04} [\mu\epsilon^{-1}]$).
- OPC_BCH+RCF ha la sensibilità più alta ($4,23 \cdot 10^{-04} [\mu\epsilon^{-1}]$).

Questo suggerisce che la miscela OPC_BCH+RCF sia la più sensibile alle deformazioni meccaniche, cioè, ha una maggiore capacità piezoresistiva rispetto alle altre due miscele. Per quanto riguarda l'incertezza, OPC_BCH+RCF ha però l'incertezza più alta ($6,01 \cdot 10^{-04} [\mu\epsilon^{-1}]$), mentre OPC_GNP ha l'incertezza minore ($1,18 \cdot 10^{-04} [\mu\epsilon^{-1}]$).

Considerando la variabilità intracampione, Tabella 3, il gruppo OPC_BCH+RCF mostra la maggiore variabilità, mentre i gruppi OPC_REF e OPC_GNP presentano una variabilità più contenuta, con OPC_GNP che sembra avere la distribuzione più ristretta tra i campioni.

Tabella 3 - variabilità intracampione miscela OPC (5 cicli)

OPC_REF	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	OPC_GNP	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	OPC_BHC+RCF	k [$\mu\epsilon^{-1}$]
OPC_REF 1	$2,98 \cdot 10^{-04}$	OPC_GNP 1	$2,31 \cdot 10^{-04}$	OPC_BHC+RCF 1	$8,28 \cdot 10^{-04}$
OPC_REF 1	$8,03 \cdot 10^{-03}$	OPC_GNP 1	$3,09 \cdot 10^{-03}$	OPC_BHC+RCF 2	$2,43 \cdot 10^{-03}$
OPC_REF 1	$4,85 \cdot 10^{-03}$	OPC_GNP 1	$4,88 \cdot 10^{-03}$	OPC_BHC+RCF 1	$3,76 \cdot 10^{-03}$

3.2 Prove di carico – progetto SensCrHEAT

Le prove condotte nell'ambito del progetto SensCrHEAT sono state mirate alla valutazione delle proprietà meccaniche e piezoresistive di malte ecosostenibili e autosensibili realizzate con diverse tipologie di leganti. L'obiettivo principale è stato quello di sviluppare materiali innovativi che combinassero una buona resistenza meccanica con la capacità di rilevare autonomamente deformazioni e variazioni di carico. Queste caratteristiche sono fondamentali per l'utilizzo in costruzioni intelligenti e sostenibili, dove è possibile monitorare in tempo reale lo stato di salute del materiale. Per questo studio sono state preparate nove diverse miscele di malta, ciascuna realizzata combinando tre diversi leganti. Per ogni miscela sono stati prodotti tre campioni, per un totale di 27 campioni. Questo ampio numero di campioni ha

permesso di valutare l’impatto delle diverse combinazioni di materiali sulla resistenza meccanica e sulla capacità piezoresistiva.

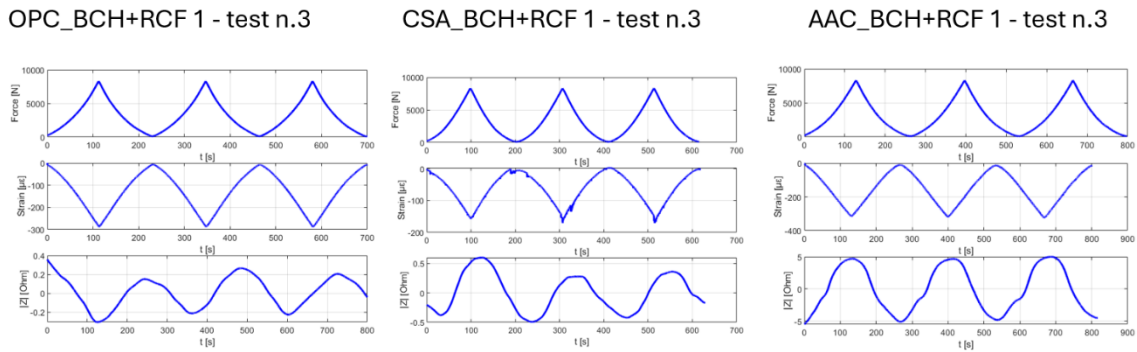


Figura 3.5 - Forza, Deformazione, Impedenza elettrica

La figura 3.5 riporta alcuni esempi dei risultati. Si è notato che per le miscele CSA e AAC all’aumentare della deformazione l’impedenza aumenta descrivendo un comportamento non atteso e contrario rispetto a quanto avviene per i materiali basati su OPC. Questo aspetto in futuro andrebbe ulteriormente indagato per comprendere il meccanismo alla base di questi risultati. Di conseguenza, la sensibilità avrà segno opposto rispetto a quella osservata per i materiali realizzati con OPC. Per uniformare i dati è stato utilizzato il modulo di k ($|k|$) per le miscele CSA e AAC.

OPC_BCH+RCF 1 - test n.1

CSA_BCH+RCF 1 - test n.3

AAC_BCH+RCF 2 - test n.2

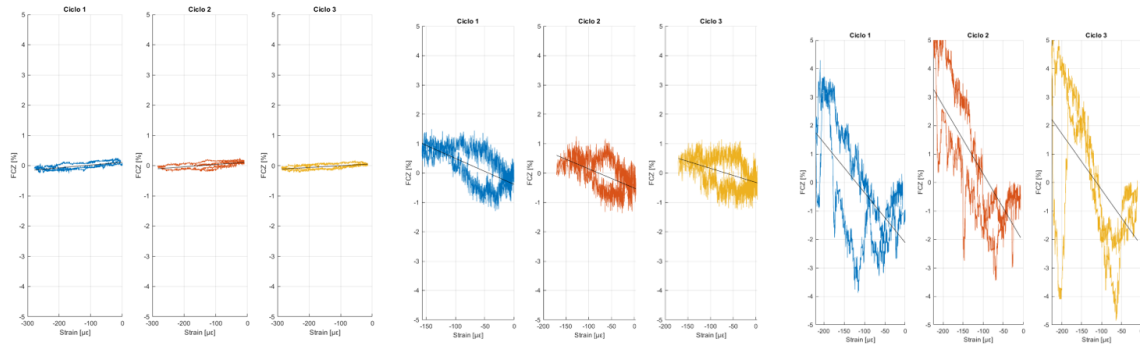


Figura 3.6 - Grafici Sensibilità

3.2.1 Risultati miscela OPC

I dati ottenuti dallo studio eseguito sono i seguenti.

Tabella 4 – Distribuzione sensibilità OPC (3 CICLI)

SensCrHEAT	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	Distribuzione Rettangolare	
MIX	μ	a [$\mu\epsilon^{-1}$]	$\pm K*u$ [$\mu\epsilon^{-1}$] (K=2)
OPC_REF	$3,70*10^{-04}$	$2,26*10^{-04}$	$2,61*10^{-04}$
OPC_GNP	$2,50*10^{-04}$	$1,08*10^{-04}$	$1,25*10^{-04}$
OPC_BCH+RCF	$5,18*10^{-04}$	$4,82*10^{-04}$	$5,57*10^{-04}$

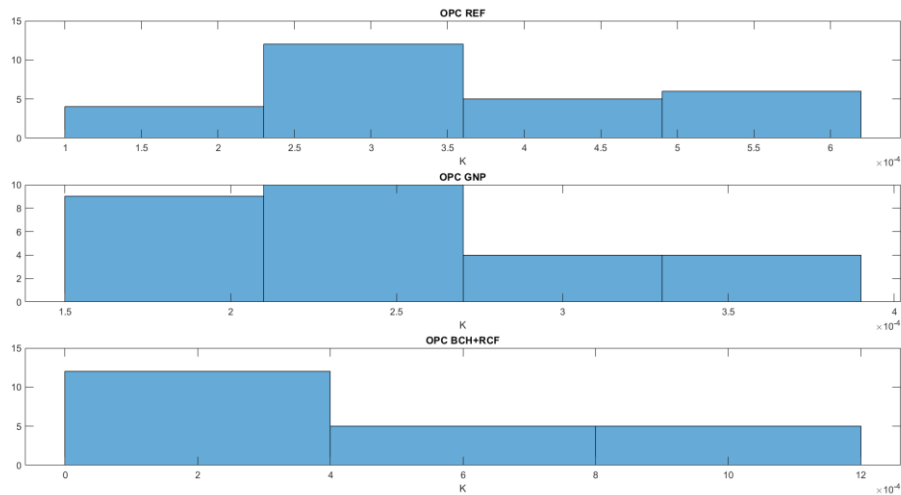


Figura 3.7 – Distribuzione di sensibilità OPC (3 cicli)

- OPC_REF: Ha una sensibilità moderata ($3,70 \cdot 10^{-4} [\mu\epsilon^{-1}]$), ma l'incertezza è piuttosto ampia ($2,61 \cdot 10^{-4} [\mu\epsilon^{-1}]$), indicando una variazione significativa delle misurazioni.
- OPC_GNP: Presenta la sensibilità più bassa ($2,50 \cdot 10^{-4} [\mu\epsilon^{-1}]$) con un'incertezza moderata ($1,25 \cdot 10^{-4} [\mu\epsilon^{-1}]$), anche se con valori di sensibilità ridotti.
- OPC_BCH+RCF: Ha la sensibilità più elevata ($5,18 \cdot 10^{-4} [\mu\epsilon^{-1}]$), il che indica che potrebbe essere la miscela migliore in termini di proprietà piezoresistive, ma d'altra parte soffre di una maggiore incertezza ($5,57 \cdot 10^{-0} [\mu\epsilon]^{-1}$), il che rende la misura meno ripetibile.

Considerando la variabilità intracampione, Tabella 5, il gruppo OPC_BCH+RCF mostra la maggiore variabilità, mentre il gruppo OPC_GNP sembra presentare la variabilità minore.

Tabella 5 – variabilità intracampione miscela OPC (3 cicli)

OPC_REF	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	OPC_GNP	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	OPC_BCH+RCF	k [$\mu\epsilon^{-1}$]
OPC_REF 1	2,97*10 ⁻⁰⁴	OPC_GNP 1	2,32*10 ⁻⁰⁴	OPC_BCH+RCF 1	8,46*10 ⁻⁰⁴
OPC_REF 1	5,25*10 ⁻⁰⁴	OPC_GNP 1	2,01*10 ⁻⁰⁴	OPC_BCH +RCF 1	2,13*10 ⁻⁰⁴
OPC_REF 1	2,88*10 ⁻⁰⁴	OPC_GNP 1	3,17*10 ⁻⁰⁴	OPC_BCH +RCF 1	3,58*10 ⁻⁰⁴

3.2.2 Risultati miscela CSA

I risultati elaborati sono i seguenti.

Tabella 6 – Distribuzione sensibilità CSA (3 CICLI)

SensCrHEAT	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	Distribuzione Rettangolare	
MIX	μ	a [$\mu\epsilon^{-1}$]	$\pm K*u$ [$\mu\epsilon^{-1}$] (K=2)
CSA_REF	1,01*10 ⁻⁰²	1,26*10 ⁻⁰²	1,45*10 ⁻⁰²
CSA_GNP	1,15*10 ⁻⁰²	1,61*10 ⁻⁰²	1,86*10 ⁻⁰²
CSA_BCH+RCF	2,68*10 ⁻⁰²	4,79*10 ⁻⁰²	5,53*10 ⁻⁰²

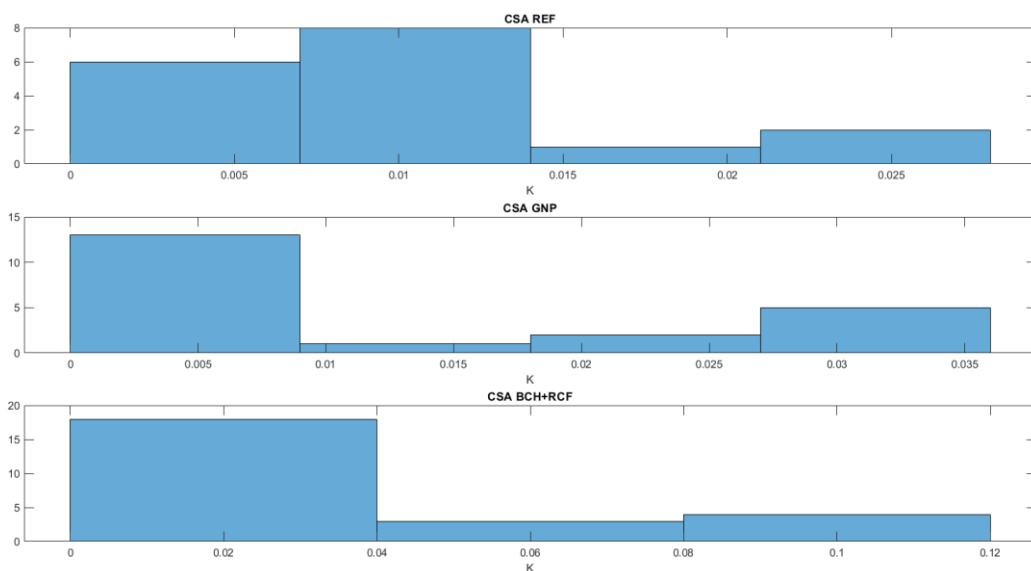


Figura 3.8 – Distribuzione di sensibilità CSA (3 cicli)

- CSA_REF: Ha una sensibilità relativamente bassa ($1,01 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$), con un'incertezza estesa moderata ($1,45 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$).
- CSA_GNP: Presenta una sensibilità leggermente maggiore ($1,15 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$) rispetto a CSA_REF, ma con un'incertezza più elevata ($1,86 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$). Anche in questo caso, l'intervallo di variazione è ragionevolmente contenuto.
- CSA_BCH+RCF: È la miscela con la sensibilità piezoresistiva più elevata ($2,68 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$), ma anche con la maggiore incertezza ($5,53 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$). Questo suggerisce che, nonostante le sue potenziali prestazioni migliorate, i risultati sperimentali variano notevolmente.

Considerando la variabilità intracampione, Tabella 7, si evidenzia come la distribuzione dei valori di k sia più ampia nei gruppi CSA_REF e CSA_BCH+RCF, indicando una maggiore variabilità tra i campioni, mentre il gruppo CSA_GNP presenta una variabilità intracampionaria più limitata.

Tabella 7 - variabilità intracampione miscela CSA (3 cicli)

CSA_REF	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	CSA_GNP	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	CSA_BCH+RCF	k [$\mu\epsilon^{-1}$]
CSA_REF 1	$6,71 \cdot 10^{-03}$	CSA_GNP 1	$2,38 \cdot 10^{-02}$	CSA_BCH+RCF	$5,63 \cdot 10^{-03}$
CSA_REF 1	$8,01 \cdot 10^{-03}$	CSA_GNP 1	$3,00 \cdot 10^{-03}$	CSA_BCH+RCF	$3,24 \cdot 10^{-03}$
CSA_REF 1	$1,87 \cdot 10^{-02}$	CSA_GNP 1	$1,41 \cdot 10^{-03}$	CSA_BCH+RCF	$6,63 \cdot 10^{-02}$

3.2.3 Risultati miscela AAC

Tabella 8 – Distribuzione sensibilità AAC (3 CICLI)

SensCrHEAT	$ k [\mu\epsilon^{-1}]$	Distribuzione Rettangolare	
MIX	μ	$a [\mu\epsilon^{-1}]$	$\pm K*u [\mu\epsilon^{-1}] (K=2)$
AAC_REF	$2,63*10^{-02}$	$2,90*10^{-02}$	$3,34*10^{-02}$
AAC_GNP	$1,02*10^{-02}$	$7,31*10^{-03}$	$8,44*10^{-03}$
AAC_BCH+RCF	$7,91*10^{-02}$	$1,65*10^{-01}$	$1,90*10^{-01}$

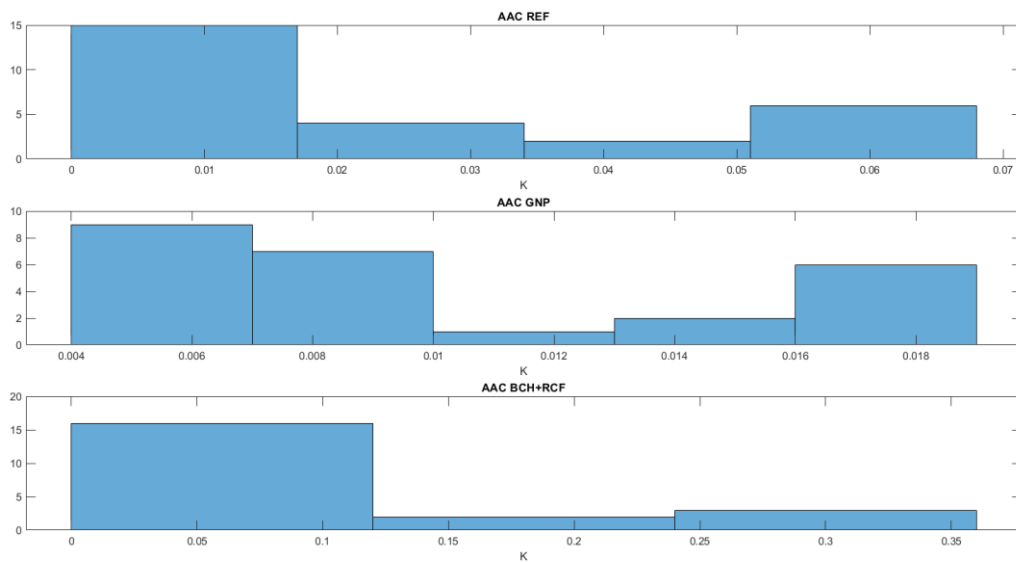


Figura 3.9 – Distribuzione di sensibilità AAC (3 cicli)

AAC_REF: Ha una sensibilità moderata con un'incertezza piuttosto alta

- ($2,63*10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$), suggerendo una variazione significativa nelle misure di sensibilità ($3,34*10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$).
- AAC_GNP: Presenta la sensibilità più bassa ($1,02*10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$), ma anche l'incertezza combinata più piccola ($8,44*10^{-03} [\mu\epsilon^{-1}]$).

- AAC_BCH+RCF: Questa miscela ha la sensibilità più elevata ($7,91 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$), ma soffre anche della maggiore incertezza ($1,90 \cdot 10^{-01} [\mu\epsilon^{-1}]$), con un'ampia variabilità nei risultati. Pertanto, per l'elevata sensibilità offre ottime prestazioni piezoresistive. Considerando la variabilità intracampione, Tabella 9, il gruppo AAC_REF mostra la maggiore variabilità, seguito da AAC_BCH+RCF, mentre AAC_GNP sembra avere una variabilità intracampionaria minore, con valori di k che si distribuiscono in modo più uniforme.

Tabella 9 - variabilità intracampione miscela AAC (3 cicli)

AAC_REF	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	AAC_GNP	k [$\mu\epsilon^{-1}$]	AAC_BCH+RCF	k [$\mu\epsilon^{-1}$]
AAC_REF 1	$1,57 \cdot 10^{-02}$	AAC_GNP 1	$1,65 \cdot 10^{-02}$	AAC_BCH+RCF 1	$1,79 \cdot 10^{-01}$
AAC_REF 2	$8,99 \cdot 10^{-03}$	AAC_GNP 2	$5,49 \cdot 10^{-03}$	AAC_BCH+RCF 2	$1,69 \cdot 10^{-02}$
AAC_REF 3	$5,43 \cdot 10^{-02}$	AAC_GNP 3	$8,17 \cdot 10^{-03}$	AAC_BCH+RCF 3	$1,94 \cdot 10^{-02}$

Capitolo 4

CONCLUSIONI

In conclusione, i risultati ottenuti dai test sperimentali eseguiti nell'ambito dei progetti MULTICLIMACT e SensCrHEAT evidenziano il ruolo cruciale delle aggiunte conduttive, in particolare del biochar (BCH) e delle fibre di carbonio riciclate (RCF), nel miglioramento delle proprietà piezoresistive di malte e calcestruzzi avanzati. Nel progetto MULTICLIMACT, la miscela a base di cemento Portland (OPC) ha dimostrato che l'aggiunta di BCH e RCF consente di ottenere le migliori prestazioni in termini di sensibilità al carico applicato ($4,23 \cdot 10^{-04} [\mu\epsilon^{-1}]$), fornendo una risposta piezoresistiva ottimale e più elevata rispetto all'aggiunta commerciale di riferimento (GNP). Questo può essere dovuto al fatto che il GNP, essendo idrofobo, tende ad agglomerarsi e a formare numerosi vuoti nella matrice, che ostacolano in modo significativo il passaggio della corrente. Per quanto riguarda il progetto SensCrHEAT, l'aggiunta di BCH e RCF ha prodotto risultati coerenti attraverso diverse combinazioni di leganti. I valori più alti di sensibilità (piezoresistività) sono stati ottenuti con quest'ultima combinazione (OPC_BCH+RCF: $5,18 \cdot 10^{-04} [\mu\epsilon^{-1}]$, CSA_BCH+RCF: $2,68 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$ e AAC_BCH+RCF: $7,91 \cdot 10^{-02} [\mu\epsilon^{-1}]$), accompagnati da una maggiore incertezza nei dati (OPC_BCH+RCF: $5,57 \cdot 10^{-$

⁰⁴ [$\mu\epsilon^{-1}$], CSA_BCH+RCF: $5,53 \cdot 10^{-02}$ [$\mu\epsilon^{-1}$] e AAC_BCH+RCF: $1,90 \cdot 10^{-01}$ [$\mu\epsilon^{-1}$]); questo può essere dovuto all'agglomerazione delle fibre di carbonio riciclate, che quindi formano dei cluster all'interno della matrice, rendendo il materiale non omogeneo ed ostacolando quindi la ripetibilità della misura. Questo risultato pone le basi per l'utilizzo di tali materiali in soluzioni strutturali avanzate, ecosostenibili e intelligenti, con potenziali applicazioni nell'edilizia green e nella progettazione di infrastrutture più resilienti e durature. È fondamentale sottolineare l'importanza di una meticolosa fase di getto, con particolare attenzione alla distribuzione omogenea delle aggiunte carboniose, come il biochar e le fibre di carbonio riciclate, per garantire un comportamento uniforme e ottimizzare le prestazioni piezoresistive delle strutture. Una corretta integrazione di questi materiali conduttivi può infatti migliorare l'affidabilità dei sistemi di monitoraggio strutturale.

In sintesi, i test eseguiti in entrambe le ricerche confermano che la combinazione di biochar e fibre di carbonio riciclate (BCH+RCF) rappresenta il miglior compromesso verso lo sviluppo di materiali cementizi dotati di proprietà piezoresistive superiori, contribuendo così al progresso delle tecnologie dei materiali autosensibili e a un futuro più sostenibile, anche in ottica di miglioramento di resilienza delle costruzioni grazie a sistemi di monitoraggio della salute strutturale basati su materiali con capacità di automonitoraggio.

BIBLIOGRAFIA

1. O. Ahmed, X. Wang, M. Tran, M. Ismadi “Advancements in fiber-reinforced polymer composite materials damage detection methods: Towards achieving energy-efficient SHM systems”, 15 October 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109136>.
2. P. Jieyang, A. Kimmig, W. Dongkun, Z. Niu, F. Zhi, W. Jiahai, Xiufeng Liu, Jivka Ovtcharova, "A systematic review of data-driven approaches to fault diagnosis and early warning", *Journal of Intelligent Manufacturing* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10845-022-02020-0>.
3. Y. Ma, F. Li, H. Xie, W. Liu, X. Ouyang, J. Fu, H. Wang “Self-sensing properties of alkali-activated materials prepared with different precursors” *Construction and Building Materials* Volume 409, 15 December 2023, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134201>.
4. H. Li ^a, Y. Wang “Investigation on piezoresistivity of self-sensing cementitious composites containing nano carbon fillers under water content variations” <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137169>.
5. J. Yu, S. Akira, I. Masahir “Wenner method of impedance measurement for health evaluation of reinforced concrete structures” *Construction and*

Building Materials, Volume 197, 10 February 2019,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.121>.

6. A. Meeruty, M.N. Patel, S. Nihalani, C. Alex “Evaluation of strain measurements using ZnS: Mn, Cu as mechanoluminescent material and strain gauge sensor” <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.388>.
7. E. Sampaolesi “Studio di conglomerati sel-sensing a base di leganti innovativi per il monitoraggio delle strutture in calcestruzzo” - Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile e Architettura, Università Politecnica Delle Marche.
8. G. Cosoli, A. Mobili, E. Blasi, F. Tittarelli, M. Martarelli, G. M. Revel “Development and metrological characterization of cement-based elements with self-sensing capabilities for structural health monitoring purposes” Università Politecnica Delle Marche.
9. Cosoli, G., Mobili, A., Tittarelli, F., Revel, G. M., & Chiariotti, P. (2020). Electrical resistivity and electrical impedance measurement in mortar and concrete elements: A systematic review. *Applied Sciences*, *10*(24), 9152, <https://doi.org/10.3390/app10249152>.