



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Dipartimento Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche – DIISM

CORSO DI LAUREA TRIENNALE INGEGNERIA MECCANICA

**“Misure di impedenza elettrica per il monitoraggio di elementi in calcestruzzo: dallo studio della letteratura all'applicazione in campo”**

“Electrical impedance measurements for monitoring concrete elements:  
from the study of the literature to application in the field”

**Relatore:**

**Prof. Gian Marco Revel**

**Correlatori:**

**Dott.ssa Gloria Cosoli**

**Ing. Alessandra Mobili**

**Laureando:**

**Ilaria Pietrangeli**

**matricola S1083623**

**Anno Accademico 2020/2021**

# INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
PROGETTO EnDurCrete [1] .....	4
OBBIETTIVO .....	6
STUDIO DI MISURE DI IMPEDENZA ELETTRICA IN ELEMENTI DI CALCESTRUZZO E CALCESTRUZZO ARMATO ..	6
MALTE E CALCESTRUZZI.....	7
FORMA DEI CAMPIONI .....	8
ELEMENTI CHE POSSONO INFLUENZARE L'IMPEDENZA ELETTRICA.....	9
CLASSIFICAZIONE DEGLI ELEMENTI DI CONFIGURAZIONE DELLA MISURA (2 o 4 elettrodi, metodi di applicazione, AC o DC).....	10
STRUMENTI PER STUDIO DI CARATTERISTICHE NEL CALCESTRUZZO (con misurazione di impedenza) .....	17
MISURAZIONE PRESENZA IONE CLORURO [17][31] .....	19
MISURAZIONE UMIDITA' SU CALCESTRUZZO [26].....	21
RILEVATORE DI POROSITA' .....	22
MISURATORE DI RESISTENZA/DANNEGGIAMENTO DEL CALCESTRUZZO [26].....	23
MISURAZIONE DELLO STATO DI SALUTE [34] .....	25
MISURAZIONE DELLO STATO CORROSIVO [26] .....	27
2. MATERIALI E METODI .....	31
BLOCCO DI CALCESTRUZZO: COMPOSIZIONE E CONFIGURAZIONI .....	32
DS18B20 AZDelivery .....	37
EVAL-AD5940BIOZ .....	38
DESCRIZIONE DEL BLOCCO DI CALCESTRUZZO E RELATIVO SISTEMA DI MONITORAGGIO IMPEGNATO NEL PRESENTE LAVORO DI TESI .....	41
PROCESSAMENTO DEI DATI ACQUISITI .....	44
MATLAB .....	45
3. RISULTATI.....	48
4. CONCLUSIONI .....	59
APPENDICE.....	62
BIBLIOGRAFIA .....	67

# 1. INTRODUZIONE

Monitorare il calcestruzzo e il suo comportamento in particolari ambienti e condizioni risulta fondamentale oggi in quanto gran parte delle strutture civili (e non solo) è costruita proprio con questo materiale. Generalmente queste strutture sottoposte a particolari stress chimici o fisici possono vedere l'insorgere di fessure, corrosione dei rinforzi metallici e altri fenomeni che vanno a creare un danno che deve essere necessariamente controllato. Ancora più importante è andare a valutare le proprietà che diversi tipi di materiali possono avere a seconda della composizione, stato di sollecitazione, presenza di microrganismi, ecc... Questo lavoro di tesi segue il tirocinio svolto all'interno del progetto EnDurCrete (*New Environmental friendly and Durable conCrete* - "Nuovo calcestruzzo sostenibile e resistente") (GA n° 760639), un progetto europeo che si occupa di ricerca di un nuovo calcestruzzo armato con proprietà migliori rispetto ai calcestruzzi tradizionali, ma allo stesso tempo economico e sostenibile.

Un metodo che ci permette di effettuare queste analisi è quello che sfrutta la misura dell'impedenza elettrica: a seconda della struttura, composizione, presenza o meno di ioni o di acqua, ecc..., la corrente "fluirà" con più o meno difficoltà nel materiale: analizzando i dati ottenuti si potranno raccogliere informazioni legate alle diverse caratteristiche del campione in questione. Diversi sono i metodi e gli strumenti per questa tipologia di studio e in questo documento verranno riportati esempi più o meno innovativi per il monitoraggio e l'indagine dei campioni (nel capitolo "Studio di misure di impedenza elettrica in elementi di calcestruzzo e calcestruzzo armato"), l'analisi degli strumenti più comunemente usati (nella sezione "Classificazione degli elementi di configurazione della misura") e, infine, lo studio specifico condotto dal team dell'Università Politecnica delle Marche (partner del progetto EnDurCrete) su un blocco di calcestruzzo armato (nella sezione "Progetto EnDurCrete").

## PROGETTO EnDurCrete [1]



L'obiettivo principale del progetto EnDurCrete è lo sviluppo di un nuovo calcestruzzo armato sostenibile ed economico per applicazioni di lunga durata. Il concetto si basa sull'integrazione di nuovo cemento a basso contenuto di clinker, inclusi sottoprodotti industriali di alto valore, nuove tecnologie nano e micro e sistemi ibridi che assicurano una maggiore durabilità di strutture in calcestruzzo sostenibili con elevate proprietà meccaniche, capacità di auto-guarigione (*self-healing*) e automonitoraggio (*self-sensing*).

Il cemento Portland ordinario è stato considerato per molti anni il materiale strutturale di riferimento per edifici e infrastrutture durevoli, nonché per ambienti marini [1]. Tuttavia, il suo processo di produzione consuma significative risorse minerali (calcare e argilla di buona qualità), energia e carburante e crea emissioni di gas serra. Sono in corso vari sforzi per migliorare la compatibilità ambientale del calcestruzzo, integrando materiali cementizi supplementari (SCM), come i sottoprodotti dei processi industriali. Tuttavia, le attuali soluzioni sostenibili all'avanguardia basate sull'elevato tasso di sostituzione del clinker di cemento Portland da parte di SCM occasionalmente portano a prestazioni e durata limitate delle strutture in calcestruzzo, particolarmente critiche se applicate in condizioni difficili. Tutti questi aspetti influenzano anche il consumo di risorse e la produzione di rifiuti.

Quindi questo progetto cerca di raggiungere i seguenti obiettivi:

- **Nuovo cemento**, includendo materiali cementizi supplementari sostenibili e di alta qualità (es. cenere volante derivanti dalla combustione del carbone e loppa di altoforno).
- **Nuovi rivestimenti multifunzionali** che consentono proprietà di autoguarigione basate sulla micro-incapsulazione della resina e proteggono sia il calcestruzzo che l'armatura dagli agenti aggressivi.
- **Nuovi riempitivi intelligenti** a base di argille nano-modificate con proprietà anticorrosive e basati su materiali a base di carbonio con proprietà di self-sensing. Le proprietà self-sensing saranno integrate da sensori ambientali inglobati nel calcestruzzo.

→ **Sistemi di rinforzo multifunzionali non metallici per il calcestruzzo**, basati su tessuti tecnici integrati con sensori a fibra ottica, che consentono sia il rinforzo strutturale che il monitoraggio continuo della salute strutturale. I sistemi saranno ottimizzati con l'obiettivo di un corretto compromesso tra produttività, robustezza e adesione del rinforzo al calcestruzzo.

→ **Strumenti e procedure avanzati non distruttivi di monitoraggio e collaudo continui**, comprese le tecnologie messe a punto per i sistemi di auto-rilevamento del calcestruzzo. Le proprietà di durabilità dei componenti saranno valutate e monitorate.

→ **Approccio sperimentale e computazionale accoppiato per la comprensione teorica e sperimentale dei fattori che influenzano la durabilità**. La modellizzazione e le simulazioni applicate alla micro-mesoscala vengono eseguite definendo volumi elementari rappresentativi di pasta di cemento, malta e calcestruzzo, mentre la modellizzazione applicata alla macroscale viene eseguita rappresentando il calcestruzzo intero. Questi modelli di continuum sono risolti mediante analisi agli elementi finiti. L'approccio sperimentale e computazionale combinato consentirà la valutazione della durabilità a lungo termine e la conseguente previsione della durata di servizio delle infrastrutture target esposte a condizioni ambientali gravi.

I dimostratori saranno testati in 4 siti demo, che consistono in gallerie, ponti, porti e strutture offshore, al fine di dimostrare la maggiore durata (+ 40%, ovvero +30 anni) e la riduzione dei costi (-35%) dei nuovi sistemi di calcestruzzo in ambienti aggressivi dal punto di vista dei contaminanti. Saranno considerati aspetti dell'innovazione quali standardizzazione, valutazione del ciclo di vita, salute e sicurezza e attività di formazione. Questi i 4 siti demo dove le tecnologie sviluppate verranno dimostrate:

- Porto di Gijón "El Musel" in Spagna, esposto alle condizioni dell'acqua di mare del Mar Cantabrico;
- Impianto di tunnel minerario situato a Leon, in Spagna;
- Cantiere navale in Norvegia, lungo una linea di costa norvegese;
- Ponte di Krk in Croazia, caratterizzato da un ambiente marino molto aggressivo.

## **OBBIETTIVO**

Questo documento vuole analizzare il rapporto tra impedenza elettrica e caratteristiche strutturali, composizionali, ecc... di un campione in calcestruzzo. Viene analizzato prima lo stato dell'arte delle misure di impedenza elettrica nel calcestruzzo (quali sono le tecniche più comuni, quali sono gli strumenti utilizzati e con quali configurazioni ecc...), per poi proseguire selezionando un sistema ottimale per effettuare una valutazione piuttosto completa del nostro campione, fino allo studio del caso specifico di un blocco di calcestruzzo realizzato e analizzato nei laboratori dell'Università Politecnica delle Marche esposto in ambiente reale. Queste analisi rientrano all'interno del progetto EnDurCrete che, come precedentemente sottolineato, si occupa di studiare un nuovo calcestruzzo armato sostenibile ed economico per applicazioni di lunga durata.

L'ultima parte del documento presenterà i dati registrati in un certo periodo di tempo e con determinate configurazioni che verranno poi analizzati e rielaborati anche attraverso l'uso di programmi come MATLAB, fogli di calcolo, ecc...

## **STUDIO DI MISURE DI IMPEDENZA ELETTRICA IN ELEMENTI DI CALCESTRUZZO E CALCESTRUZZO ARMATO**

Questo lavoro di tesi si concentra in particolare sulle misure di impedenza elettrica, che risultano particolarmente efficaci in quei materiali dotati di capacità di self-sensing, ovvero di percepire la propria condizione. L'impedenza elettrica di un materiale riflette la difficoltà con cui la corrente può fluire attraverso di esso quando viene applicato un potenziale elettrico alternato ed è quindi correlata alla composizione e alla struttura del materiale. Per le applicazioni su composti cementizi, i test di impedenza elettrica vengono eseguiti applicando potenziali elettrici o correnti elettriche) alternati ad una frequenza specificata tramite elettrodi di lavoro, una sonda, elettrodi a garza, ecc..., che vengono posizionati (in genere) sulla superficie del calcestruzzo. Questo approccio consente l'interrogazione di tutti i materiali tra i due (o più) elettrodi, fornendo misure di impedenza che riflettono l'impedenza degli ioni della soluzione presente nei pori del calcestruzzo, o nell'acqua che penetra dalle fessure del calcestruzzo, degli ioni della corrosione degli elementi interni al calcestruzzo, ecc... Questi elementi infatti potrebbero compromettere la stabilità e solidità del calcestruzzo e per questo risulta di

fondamentale importanza monitorare il comportamento e l'andamento di alcune caratteristiche dello stesso in varie situazioni, ambienti, sollecitazioni ecc...

In particolare, la resistenza elettrica e la capacità elettrica possono essere utilizzate per descrivere i vari processi fisici misurati (corrosione, fessurazione, ecc...) durante i test. Nel sistema che andremo a sviluppare, il calcestruzzo può essere rappresentato come un resistore di base.

## MALTE E CALCESTRUZZI

Alcuni parametri del calcestruzzo sono osservabili attraverso degli elementi disposti all'interno del calcestruzzo stesso: i progressi della tecnologia del calcestruzzo negli ultimi decenni, infatti, hanno portato allo sviluppo di materiali strutturali in grado di possedere una o più funzioni non strutturali, pur mantenendo elevate proprietà meccaniche. Queste funzioni non strutturali includono la capacità di rilevamento dello sforzo di deformazione[2], autorigenerante[3], ritenzione di calore, conducibilità elettrica e schermatura elettromagnetica [4]. L'aggiunta di particelle elettriche conduttive, come fibre di carbonio, fibre di acciaio, polvere di grafite o nanotubi di carbonio[4], in malte a base di cemento, può aumentare significativamente la conducibilità elettrica insieme a una buona conservazione delle proprietà meccaniche. Per quanto riguarda le fibre di carbonio (*carbon fibres*, CF) [2], il loro consumo in tutto il mondo sta crescendo costantemente [4] [5] [4] grazie alle eccellenti proprietà meccaniche e all'estrema leggerezza. Le CF sono elettricamente conduttive, a differenza del vetro e delle fibre polimeriche. Inoltre, la leggerezza e la flessibilità delle CF le rendono particolarmente adatte alla realizzazione di matrici cementizie elettricamente conduttive. L'aggiunta di CF alle malte o al calcestruzzo a base di cemento è in grado di realizzare materiali con capacità *self-sensing*, che consente il sondaggio elettrico non distruttivo per il monitoraggio dei difetti [4].

Aggiungendo alcuni elementi metallici (e non solo) o anche microrganismi si possono anche andare a migliorare le caratteristiche fisico-meccaniche e aumentare le proprietà oltre che facilitare il monitoraggio dell'elemento in calcestruzzo.

Possiamo considerare dei tipi di fibra di acciaio [6] con due forme diverse (diritta o attorcigliata) e tre diverse proporzioni da 65 a 100 con una frazione di volume di fibra del 2%. Sono stati aggiunti [4] contemporaneamente lo 0,5% in volume di nanotubi di carbonio (CNT), effettuando dei test hanno indicato che l'aggiunta di fibre di acciaio al 2% è risultata efficace nel migliorare la resistenza a

compressione, il modulo elastico, la resistenza alla trazione e la capacità di deformazione del calcestruzzo semplice.

Ci sono alcuni studi sull'influenza delle aggiunte di biomassa-cenere [7] sulle proprietà meccaniche di calcestruzzi e malte di età pari o superiore a 7 giorni. Tali studi concludono che, con basse percentuali di sostituzioni (circa il 10%), l'influenza delle ceneri di biomassa sulle proprietà meccaniche dei calcestruzzi è trascurabile all'età di 28 giorni; in alcuni casi, gli autori hanno persino osservato un aumento della resistenza a compressione a causa dell'aggiunta di basse percentuali di ceneri di biomassa.

L'applicazione di microrganismi nel calcestruzzo [8] è la tecnologia innovativa per l'edilizia sostenibile e l'autoguarigione delle crepe. Il batterio di questi microrganismi produce carbonato di calcio in presenza di umidità e anidride carbonica. L'uso di batteri nel calcestruzzo consuma l'anidride carbonica disponibile nell'atmosfera e produce sostanze solide come il carbonato di calcio per l'autoguarigione delle crepe e lo sviluppo di infrastrutture sostenibili.

Basandoci sugli studi di queste tipologie di calcestruzzo e considerando anche calcestruzzi semplici o armati, andiamo a valutare le proprietà che possono essere messe in evidenza sfruttando lo studio dell'impedenza elettrica all'interno di questi materiali. Sfruttare l'impedenza elettrica per valutare le condizioni di un blocco di malta/calcestruzzo costituisce una prova non distruttiva che può essere usata ad esempio nel monitoraggio dei ponti, palazzi e altre strutture che possono subire variazioni strutturali e creare danni a cose e/o persone in caso di fallimento strutturale.

## **FORMA DEI CAMPIONI**

I campioni che abbiamo analizzato nello studio dei vari articoli sono generalmente campioni cilindrici con grandezze che variano per il diametro da 70 a 150 mm mentre per la lunghezza da 100 mm a 300 mm [6], [9].

Altri campioni sono stati realizzati con forma di prisma con misure dai  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  e  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  per lo studio delle caratteristiche di materiali self-sensing, ai  $300 \times 200 \times 110 \text{ mm}^3$  per malte con aggiunta di ceneri di biomassa, passando per i  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  di campioni per lo studio delle caratteristiche del cemento Portland [10], [11].

Lastre di cemento con dimensioni di  $500 \times 250 \times 120 \text{ mm}^3$  fino a  $900 \times 700 \times 150 \text{ mm}^3$  [12] sono invece principalmente utilizzate per l'analisi dell'idratazione del materiale e/o l'eventuale presenza di ioni dovuti all'esposizione ad ambienti particolari, presenza di armature corrose, ecc...

Provini di trazione di 100 mm e un'area di  $50 \times 25 \text{ mm}^2$  sono stati invece creati per specifiche prove di trazione/compressione e hanno quindi dimensioni tali da poter essere inseriti negli appositi macchinari (banchi di prova di trazione) [13], [14].

## **ELEMENTI CHE POSSONO INFLUENZARE L'IMPEDENZA ELETTRICA**

È possibile osservare come la corrente elettrica, fortemente influenzata dall'**umidità** e dalla **composizione del calcestruzzo**, possa essere "trasportata" all'interno del calcestruzzo dagli **ioni disciolti** nel calcestruzzo come ad esempio nel caso della presenza di **armature post-corrose** all'interno del calcestruzzo.

Poiché la corrosione del rinforzo dovuta all'azione dei **cloruri** è la principale causa di degrado delle strutture in calcestruzzo armato **in ambiente marino**, la resistività elettrica del calcestruzzo è stata utilizzata come metodologia non distruttiva al fine di valutare la durata di queste strutture, poiché è una soluzione semplice e veloce metodologia di campo che presenta risultati affidabili.

La tecnica di impedenza elettromeccanica (EMI) su materiali intelligenti viene utilizzata per il **monitoraggio di fessure presenti nelle strutture** [7]. I valori caratteristici dell'impedenza elettrica e dell'ammettenza elettrica possono essere utilizzati per determinare la presenza di danni all'elemento monitorato. Il monitoraggio della salute del calcestruzzo può essere eseguito utilizzando la tecnica EMI per determinare **l'avanzamento della guarigione delle crepe, lo sviluppo di resistenza meccanica, la profondità di carbonatazione, l'assorbimento d'acqua e la sua profondità di penetrazione, la permeabilità, la penetrazione di cloruri** [9], [14].

I metodi di prova elettrici per la previsione della **penetrabilità del calcestruzzo** sono stati ampiamente accettati per la valutazione della **qualità e della durata del calcestruzzo** [7].

Il **rapporto acqua/cemento** (*water/cement, w/c*, tipico di ogni miscela prodotta) ha mostrato di avere un'influenza significativa sulle misurazioni di impedenza elettrica complessa, sulla pressione nelle zone in cui è più o meno presente acqua quando questa raggiunge il punto di congelamento e di fusione, ecc...

La resistività elettrica può valutare sensibilmente il **grado relativo di segregazione nelle miscele** di calcestruzzo e in particolare il grado di segregazione statica nel calcestruzzo auto-compattante.

Altri studi [15] hanno dimostrato che esiste una relazione tra resistività elettrica e **danni da compressione** e in particolare è possibile andare a calcolare, in base ai valori di impedenza registrati, il danno D [16].

Il danno in questo caso è definito come  $D = 1 - \left(\frac{E_x}{E}\right)$

dove:

$E = dV^2 \cdot (1 - 2\nu)(1 + \nu)/(1 - \nu)$  è il modulo elastico iniziale del calcestruzzo;

$E_x$  è il modulo elastico dinamico durante il caricamento

$\nu$  è il coefficiente di Poisson;

$V$  è la velocità dell'onda ultrasonica;

$d$  è la densità di massa.

Di fondamentale importanza è stato correlare l'impedenza elettrica a **danni e difetti interni alla struttura** e che quindi non possono essere valutati dall'esterno.

## **CLASSIFICAZIONE DEGLI ELEMENTI DI CONFIGURAZIONE DELLA MISURA (2 o 4 elettrodi, metodi di applicazione, AC o DC)**

La misura dell'impedenza elettrica (e, quindi, della resistività elettrica) del calcestruzzo può essere ottenuta applicando una corrente elettrica (o un potenziale elettrico) nel campione da valutare e misurando la corrispondente differenza di potenziale (o la corrente elettrica). Ci sono diversi metodi per effettuare la misura e soprattutto diversi metodi di fissaggio degli elementi di misurazione.

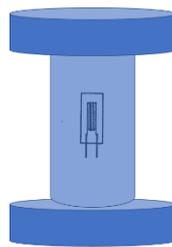
Per quanto riguarda i metodi di applicazione di elettrodi e sonde, possiamo dire che generalmente essi vengono appoggiati sulle superfici del campione da misurare, inglobati nell'elemento da studiare (che può essere un campione da laboratorio o una struttura reale), oppure incollati con adesivi o colle speciali [17]. Naturalmente nel caso di colle o adesivi queste non devono andare a ostacolare il

passaggio di corrente o andare ad abbassare la capacità ricettiva dell'elettrodo: devono essere il più possibile conduttive e sottili.

Ogni tipo di array presenta particolari vantaggi e svantaggi, in riferimento alla risoluzione, alla profondità di investigazione, alla sensibilità alle variabilità laterali, alla topografia, ecc... [18]. In generale, sulla base di queste diverse proprietà, viene scelta la configurazione più appropriata per ogni diversa indagine.

Per quanto riguarda le disposizioni e le geometrie degli elettrodi, invece possiamo dire che generalmente in laboratorio vengono utilizzate configurazioni a 2 o a 4 elettrodi.

Utilizzando il metodo con **due elettrodi** la resistenza elettrica del calcestruzzo può essere misurata applicando una corrente utilizzando due elettrodi collegati alle estremità di un provino a sezione trasversale uniforme (metodo uniassiale). La resistività elettrica ( $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ]) si ottiene dalla **seconda legge di Ohm**:  $\rho = RA/I$



*Figura 1. Configurazione uniassiale*

$R$  è la resistenza elettrica del campione, il rapporto tra tensione e corrente (misurata in Ohm,  $\Omega$ )

$l$  è la lunghezza del pezzo di materiale (misurata in metri, m)

$A$  è l'area della sezione trasversale del campione (misurata in metri quadrati,  $m^2$ ).

Questo metodo presenta lo svantaggio che la resistenza di contatto può aggiungere un contributo significativo alla resistenza misurata causando imprecisioni, legate all'errore di inserzione che si ha in conseguenza al fatto che gli elettrodi di misura coincidono con quelli di eccitazione. Gel conduttivi sono utilizzati per migliorare il contatto degli elettrodi con il campione.

Il problema della resistenza di contatto può essere superato utilizzando **quattro elettrodi**. I due elettrodi terminali sono usati analogamente al metodo precedente a due elettrodi, ma in questo caso la tensione viene misurata tra i due elettrodi più interni. Bisogna tener conto della lunghezza effettiva del campione e della distanza tra i due elettrodi interni. I voltmetri moderni assorbono pochissima

corrente (grazie alla loro impedenza di ingresso molto elevata), quindi non c'è corrente significativa attraverso gli elettrodi usati per la misura di tensione e quindi nessuna caduta di tensione attraverso le resistenze di contatto. Questa configurazione è la stessa che viene adoperata nel metodo Wenner che misura la resistività media della semisfera di raggio "a" (spaziatura tra gli elettrodi) [19].

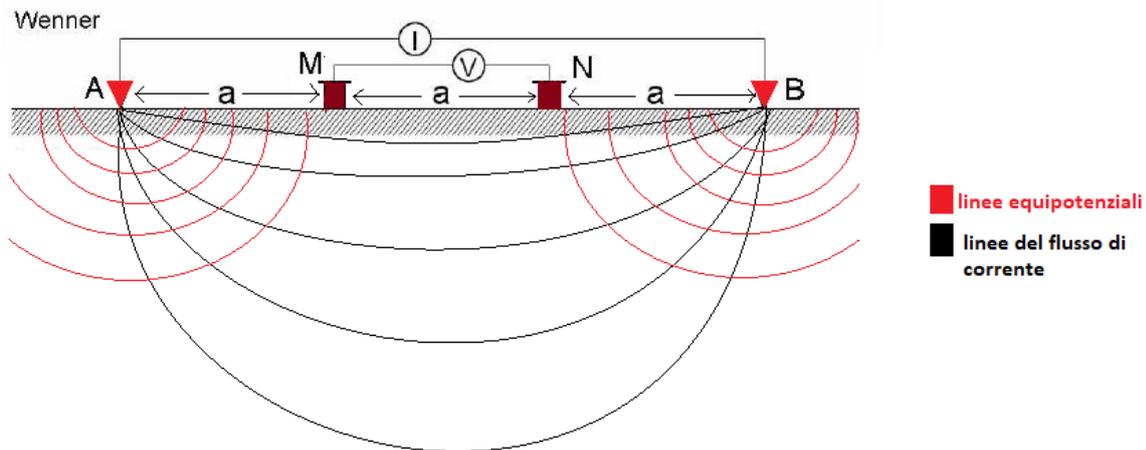


Figura 2. Configurazione a 4 elettrodi nel metodo Wenner

Un altro metodo che può essere utilizzato in laboratorio è il **metodo Transformer** [20]. Questo metodo è molto vantaggioso perché non prevede contatti con il campione. Viene utilizzato un trasformatore costituito da una bobina primaria (che energizza il circuito con una tensione alternata) e una bobina secondaria (che è formata da un elemento toroidale del campione di calcestruzzo). La corrente nel campione viene rilevata da una bobina avvolta attorno ad una sezione del toroide (un trasformatore di corrente). Questo metodo è buono per misurare le proprietà di indurimento del calcestruzzo, la sua idratazione e resistenza, dato che permette di fare misure sin dal momento del getto del campione. Il calcestruzzo bagnato ha una resistività di circa  $1 \Omega \cdot m$ , che aumenta progressivamente con l'aggiunta del cemento.

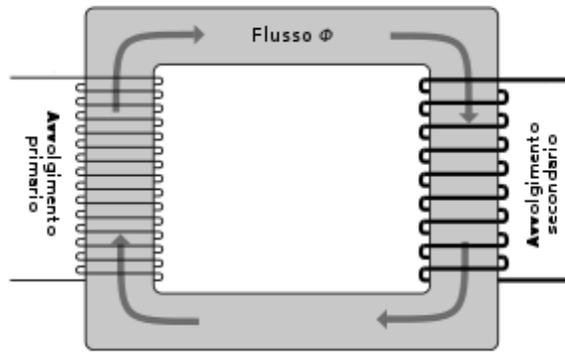


Figura 3. configurazione metodo Transformer

Metodi che invece possono essere utilizzati sul campo per ispezioni (*on-site* o *in-field*) – ma inadatti per monitoraggi nel lungo periodo – sono **metodi con inserimento di sonde**, le quali sono utilizzate proprio per evitare eventuali errori di contatto (come nei metodi di laboratorio sopra citati). Le sonde utilizzate sono sonde Wenner (4 elementi di misurazione) e vengono posizionate equidistanti lungo una linea. Le due sonde esterne inducono la corrente al campione e i due elettrodi misurano la caduta di potenziale che si registra nell’attraversamento del campione.

La resistività è data da:  $\rho = 2\pi aV/I$

$V$  è la tensione misurata tra le due sonde interne (misurata in Volt, V)

$I$  è la corrente iniettata nelle due sonde esterne (misurata in Ampere, A)

$a$  è la distanza uguale delle sonde (misurata in metri, m).

Un altro metodo inoltre sempre utilizzabile su strutture come ponti, edifici, ecc... è il metodo **Rebar** [21], che viene applicato nel caso in cui il campione sia di calcestruzzo armato: la presenza delle armature disturba la resistenza elettrica (poiché le armature conducono corrente elettrica molto meglio rispetto al materiale circostante) e questo è particolarmente vero quando lo spessore del calcestruzzo risulta minore di 30 mm [21]. Al fine di minimizzare l’effetto che l’armatura ha sulla misura di resistenza elettrica, si vanno a posizionare gli elettrodi in direzione perpendicolare rispetto alla barra

di rinforzo. Generalmente questa tipologia di misurazione è associata a una misura di tipo elettrochimico, che richiede una connessione elettrica con l'armatura. La resistività è data da:

$$\rho = 2RD$$

$R$  è la resistenza misurata,

$D$  è il diametro della sonda superficie.

L'impedenza elettrica estende il concetto di resistenza elettrica nei circuiti a corrente alternata (AC, *alternating current*) e possiede sia ampiezza che fase, a differenza della resistenza elettrica, che ha solo una grandezza per definirla. **Quando un circuito viene azionato con corrente continua (DC, *direct current*), non v'è alcuna distinzione tra impedenza e resistenza; quest'ultimo può essere pensato come impedenza da zero angolo di fase.** [22]

Nella valutazione dei vari metodi di misurazione quindi è importante anche tenere conto del tipo di corrente che attraversa il sistema: l'utilizzo di corrente continua permette una misura diretta e immediata della resistenza (= impedenza, nel caso DC); al contrario, sappiamo invece che nella misurazione dell'impedenza con corrente alternata ci troviamo in presenza di circuiti in regime sinusoidale permanente e il passaggio della corrente è ostacolato sia dalla resistenza  $R$  sia dalla reattanza  $X$ , che tiene conto dell'influenza dell'induttanza e della capacità del conduttore. La somma di entrambi i contributi è l'impedenza elettrica, definita come:  $Z = R + jX$ , dove  $R$  è la resistenza mentre  $X$  la reattanza. (Nel caso di corrente alternata la resistenza corrisponde alla parte reale dell'impedenza).

Nel caso di calcestruzzo armato, l'approccio convenzionale di impedenza elettrica misurata con corrente alternata richiede un collegamento elettrico diretto con l'armatura, anche se per il resto il sistema di misurazione risulta essere uguale a quello Wenner [16]. **Il metodo Wenner infatti è molto più utilizzato in corrente alternata**, poiché, se venisse utilizzato in corrente continua, in particolari condizioni le misurazioni potrebbero essere viziate da forze elettromotrici di tipo elettrolitico o da corrente continua vagante: la corrente continua tende a polarizzare il materiale e in particolare vengono usate frequenze inferiori a 1 kHz proprio per evitare questo effetto.

Analizzando i vari articoli presenti in letteratura, è possibile notare come molte misurazioni vengano effettuate con una configurazione a 4 elettrodi in corrente alternata: risulta la configurazione migliore per raccogliere dati in merito a diverse analisi. Ne riportiamo alcuni esempi come:

## Valutazione dello stato di salute di strutture di calcestruzzo[23]

Misurazioni condotte con **corrente alternata**

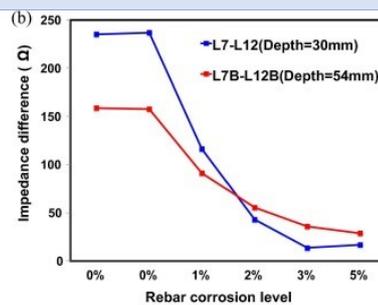
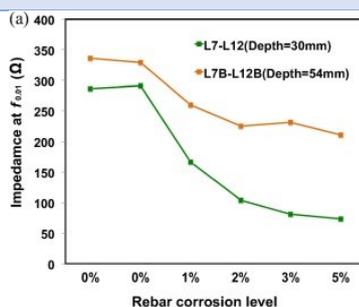
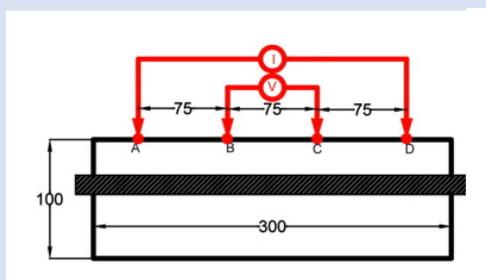
Misurazione condotta con metodo Wenner con **4 elettrodi** di contatto

Analizzatore di impedenza (ZGA5920, NF Corp.) che scansiona le frequenze AC da 0,01 Hz a 1 MHz, con un'ampiezza di tensione di 10 V.

Due tipi di elettrodi sono stati testati. Gli elettrodi del primo tipo erano costituiti da fogli quadrati di pellicola conduttiva con lunghezze laterali di 15 mm. Quelle del secondo tipo erano spugne cilindriche di uretano (10 mm di diametro), ciascuna penetrata da un ago rivestito in oro lungo l'asse longitudinale del cilindro.

Le seguenti procedure di preparazione sono state identificate come estremamente importanti per garantire l'accuratezza della misurazione e dovrebbero essere condotte attentamente prima della misurazione:

- Levigatura delle superfici in calcestruzzo per garantire un buon contatto elettrico e ottenere condizioni superficiali simili per tutte le misure;
- Allineamento degli elettrodi direttamente sopra il tendino per calcestruzzo armato: è possibile utilizzare elettrodi diversi purché sia garantita la conduzione;
- Registrazione della tensione e della fase tra gli elettrodi B e C mentre viene imposta una tensione AC agli elettrodi A e D e la frequenza viene spostata da 0,01 Hz a 1 MHz. Questa procedura può essere facilmente eseguita utilizzando un misuratore di impedenza commerciale, a condizione che lo strumento offra un'impedenza di ingresso sufficientemente elevata per garantire l'accuratezza dei dati tra gli elettrodi B e C.



Si registrano differenze di impedenza tra il massimo in  $f_{0,01}$  e il minimo in  $Z_{fmin}$  nell'intervallo 10–100 Hz. Queste differenze di impedenza sono state definite come  $\Delta Z_f$  e diminuiscono in modo uniforme con l'aumentare del livello di corrosione per entrambe le profondità di rilevamento di 30 mm e 54 mm. Pertanto,  $\Delta Z_f$  può essere considerato un candidato parametro di valutazione appropriato per il monitoraggio della struttura RC.

### Metodo per valutare la segregazione nel calcestruzzo [24]

#### Misurazioni condotte in **corrente alternata**

Metodo della resistività elettrica a **quattro elettrodi** (può misurare la resistività elettrica di materiali a base di cemento fresco senza l'errore di polarizzazione causato dal metodo a due elettrodi).

Per la configurazione del test elettrico, è stato generato un potenziale sinusoidale attraverso gli elettrodi attuali utilizzando un generatore di forme d'onda (National Instrument, 9263), che è stato utile per evitare la polarizzazione delle molecole d'acqua o il movimento unidirezionale delle specie ioniche durante la misurazione.

La tensione di ampiezza di picco era di  $\pm 1$  V e la frequenza era di 100 Hz. La durata del potenziale elettrico era limitata a 10 ms.

La corrente è stata misurata utilizzando un modulo di ingresso a corrente alternata (National Instrument, 9227) e la differenza di potenziale è stata misurata sugli elettrodi potenziali utilizzando un misuratore di tensione (National Instrument, 9222).

Quando la quantità di superfluidificante aggiunta è stata aumentata fino al 5%, l'aggregato grossolano depositato nella sezione inferiore era 3,5 volte maggiore rispetto alla sezione superiore. La resistività elettrica misurata è aumentata fino al 33,4%.

### Valutazione penetrazione ioni cloruro [25]

#### Misurazioni condotte in **corrente alternata**

Metodo di Wenner (a **quattro elettrodi**) usando un'apparecchiatura portatile, dove la spaziatura tra gli elettrodi era di 50 mm.

Correlazione penetrazione cloruri - valori di resistività misurati	Molto alto	alto	Moderare	Basso	Molto basso	Trascurabile
Penetrazione del cloruro (% calcestruzzo)						
Resistività elettrica della superficie del calcestruzzo (kΩ · cm)	<5	[5, 9]	[9, 17]	[17, 41]	[41, 220]	> 220

Sempre per misurazioni **con corrente alternata** è possibile **utilizzare elettrodi SSN** (*Stainless Steel Net* “elettrodi in rete di acciaio inossidabile” 30x 50mm<sup>2</sup>), invece di piastre SS (*Stainless Steel*), in quanto consentono **un migliore contatto tra l'elettrodo e l'interfaccia** della malta, **evitando la formazione di possibili fessure**. Inoltre, in questi casi i segnali elettrici di corrente alternata ad alta frequenza vengono spesso **utilizzati per evitare la polarizzazione degli elettrodi di prova** e, quindi, **per misurare solo la resistività di sistemi** compositi come malte cementizie contenenti una determinata quantità di fibre conduttive [26].

La normativa europea vigente [27] definisce le condizioni critiche di insorgenza della corrosione da interferenza da corrente alternata sulla base di un criterio che fissa un valore di soglia di 30 A/m<sup>2</sup> per la densità di corrente alternata, valore su cui non vi è un consenso unanime tra i ricercatori. Il meccanismo con cui la corrente alternata influenza i processi corrosivi non è ancora chiaro: sono state proposte diverse teorie e ipotesi, ma nessuna di queste è in grado di spiegare e descrivere completamente il fenomeno.

## **STRUMENTI PER STUDIO DI CARATTERISTICHE NEL CALCESTRUZZO (con misurazione di impedenza)**

Per quanto riguarda l'analisi di un elemento in calcestruzzo è possibile effettuare sostanzialmente due tipologie di studi: **l'ispezione** e il **monitoraggio**.

Il primo generalmente è condotto in un lasso di tempo inferiore e con strumenti ed elettrodi che sono di dimensioni minori e sicuramente più maneggiabili. Nel secondo caso invece si tratterà di una prova condotta in maniera continua in un certo periodo, con degli elettrodi che molto spesso sono inglobati.

Generalmente lo scopo del monitoraggio è quello di studiare delle caratteristiche che ci permettano poi di ricavare degli indici di valutazione (es. per la sicurezza di ponti e viadotti, ecc...) [28]

Il monitoraggio della salute strutturale (*Structural Health Monitoring, SHM*) basato su test non distruttivi (*Non Destructive Testing, NDT*) è stato sviluppato attivamente per garantire l'integrità di edifici e infrastrutture. Questa tecnica può acquisire continuamente dati e monitorare la sicurezza delle strutture valutando le misurazioni di stress e stati di deformazione. Lo SHM è stato applicato utilizzando estensimetri disponibili in commercio, come trasduttori piezo-ceramici, sensori a griglia in fibra di legno (*Fiber Bragg Grating, FBG*) e sensori piezoelettrici basati su zirconato di piombo-titanato [4]. Tuttavia, l'utilizzo di sensori commerciali presenta alcuni svantaggi, come la valutazione locale dello stato strutturale, la debolezza strutturale dovuta all'eterogeneità tra il sensore e il calcestruzzo e l'accoppiamento incerto tra il sensore collegato e la superficie strutturale. Per ovviare a tali problemi, i precedenti ricercatori hanno introdotto vari tipi di sensori a base di cemento. Poiché il cemento stesso non è un materiale conduttivo, i temi principali degli studi precedenti erano lo sviluppo di compositi cementizi conduttivi con vari materiali a base di carbonio. Questi sensori conduttivi a base di cemento presentano alcuni vantaggi, vale a dire basso costo di produzione, elevata durata e SHM continuo. In generale, le variazioni di sollecitazione e deformazione delle strutture in calcestruzzo sono interpretate dal cambiamento della resistenza elettrica dei sensori a base di cemento, quindi è importante simulare accuratamente lo stress e la deformazione del calcestruzzo sia in compressione che in tensione sulla base di una misurazione di elettricità resistenza e modelli teorici[4].

L'innovazione tecnologica ha consentito e consente di mettere a punto tecniche di prova molto avanzate su materiali e strutture e tali da permettere la stesura di un quadro diagnostico del costruito preciso e dettagliato.

Le tecniche utilizzate per le indagini non distruttive (NDT) in sito sono numerose, e almeno in gran parte, teoricamente conosciute. La casistica relativa alla loro applicabilità ed i risultati ottenibili pur essendo assai ampia e documentata, è forse meno nota. Poiché in queste pagine si intende parlare di prove ed indagini non distruttive, riteniamo utile chiarire il valore che a nostro giudizio deve essere dato al termine "non distruttivo" [29].

Poiché i test non distruttivi (NDT) possono essere eseguiti in condizioni operative senza causare danni aggiuntivi, la loro applicazione nella valutazione delle prestazioni di riparazione delle fessure è stata ampiamente studiata [30].

I metodi NDT più usati sfruttano la resistività (utilizzando una sonda quadripolare), tecnica capacitiva (con pochi set di elettrodi) e tecnica radar (utilizzando diverse configurazioni bi-statiche) [14]

Analizziamo di seguito degli strumenti che ci permettono di effettuare queste analisi non distruttive.

## MISURAZIONE PRESENZA IONE CLORURO [17][31]



Figura 4. 58-E0052

<b>Norme</b>	ASTM C1202, AASHTO T277
<b>Strumento</b>	58-E0052: Misuratore della penetrazione degli ioni cloruro. 110-230 V, 50-60 Hz, 1 F
<b>Descrizione generale</b>	Questo sistema di prova consente la valutazione della permeabilità del calcestruzzo allo ione cloruro. La prova viene condotta leggendo la quantità di corrente elettrica che passa attraverso cilindri o carote di calcestruzzo. Viene mantenuta una differenza di potenziale nota tra le due basi del provino, una delle quali funge da polo negativo ed è immersa in una soluzione di cloruro di sodio, l'altra da polo positivo, immersa in una soluzione di idrossido di sodio. La carica che passa, in Coulomb, viene misurata ed è correlata alla resistenza del provino alla penetrazione dello ione cloruro.
<b>Metodo di misura</b>	Una differenza di potenziale pari a 60 V è mantenuta tra i due poli, viene misurata la corrente che passa, poi integrata nel tempo
<b>Accuratezza</b>	$\pm 0.1$ V, $\pm 1$ mA



Figura 5. 58-E0064: Corredo per la misura in sito del contenuto di cloruri nel calcestruzzo

<b>Norme</b>	Si riferisce alla procedura ASTM C114 (strumento conforme alla norma AASHTO T260) [31]
<b>Strumento</b>	58-E0064: Corredo per la misura in sito del contenuto di cloruri nel calcestruzzo
<b>Descrizione generale</b>	<p>La determinazione della concentrazione di ioni cloruri consente di valutare il rischio della conseguente corrosione delle barre d'armatura. I tipi di strutture più a rischio sono le pavimentazioni in calcestruzzo, i ponti e i parcheggi. Il metodo consiste in un'estrazione acida di un campione rappresentativo trapanato del calcestruzzo, che viene poi provato con un elettrodo a ioni selettivi. Il potenziale misurato viene correlato con una calibrazione ottenuta da una serie di cinque soluzioni standard a titolo noto che fanno parte del corredo.</p> <p>Il corredo comprende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elettrodo combinato per cloruri con sensore di temperatura esterno</li> <li>- Strumento digitale di lettura ad alta impedenza - alimentazione a batteria, e microprocessore per la conversione diretta in percentuale di ione cloro</li> <li>- Confezione di ricambio di 12 flaconi con 20 ml di liquido di estrazione e 5 contenitori di soluzione colorata di calibrazione</li> <li>- Bottiglia di liquido per bagnatura elettrodo</li> <li>- Bilancia per pesata campione di 3 g</li> </ul>

## MISURAZIONE UMIDITA' SU CALCESTRUZZO [26]



Figura 6. LI9200 misuratore di umidità

<b>Strumento</b>	LI9200
<b>Descrizione generale</b>	LI9200 è un misuratore di umidità non distruttivo per il calcestruzzo. Attraverso la misura dell'impedenza elettrica il contenuto di umidità nel calcestruzzo può essere facilmente determinato premendo lo strumento contro la superficie.
<b>Metodo di misura</b>	L'impedenza è misurata attraverso la generazione di un campo a bassa frequenza elettrica con gli otto elettrodi dello strumento. Lo strumento è ideale per testare rapidamente pavimenti o costruzioni che devono essere verniciate o dove devono essere installate. Quattro scale permettono l'uso flessibile dello strumento come un misuratore accurato o semplicemente come un rilevatore di umidità o perdite.
<b>Accuratezza</b>	Temperatura di esercizio: 5°C a 40°C Accuratezza: $\pm 0.5\%$

## RILEVATORE DI POROSITA'

A BASSA TENSIONE [32]



Figura 7. Rilevatore di fori a spillo a bassa tensione TQC

<b>Strumento</b>	Rilevatore di fori a spillo a bassa tensione TQC
<b>Descrizione generale</b>	Il rilevatore di fori a spillo a bassa tensione TQC consente all'utente di ispezionare vari rivestimenti su substrati conduttivi per piccoli difetti quali vacanze e fori di spillo usando la "tecnica a spugna bagnata".
<b>Metodo di misura</b>	Il morsetto di messa a terra è collegato a un pezzo non trattato del substrato (che è collegato elettricamente all'area di misurazione), dove verrà utilizzata la spugna bagnata per sondare l'intero rivestimento con la tensione selezionata applicata. Quando la corrente fluisce dalla bacchetta di spugna alla pinza di messa a terra, questo indica un difetto nel rivestimento. L'utente riceverà una notifica utilizzando i metodi di feedback selezionati (cicalino, vibrazione, cuffie e/o display).

AD ALTA TENSIONE [33]



Figura 8. Rilevatore di fori a spillo ad alta tensione TQC

<b>Strumento</b>	Rilevatore di fori a spillo ad alta tensione TQC
<b>Descrizione generale</b>	Il rilevatore di vacanze (porosimetro) ad alta tensione TQC o il test di porosità forniscono un rilevamento accurato di fori di spillo, difetti, inclusioni, punti sottili e bolle in un rivestimento. Il misuratore è stato appositamente progettato per rivoluzionare la prova in cc ad alta tensione dei rivestimenti, rendendolo più sicuro, facile e affidabile del precedente.
<b>Metodo di misura</b>	La tecnica ad alta tensione può essere utilizzata per testare rivestimenti fino a 36 mm di spessore. Questo metodo è ideale per ispezionare la vernice su tubazioni, serbatoi e altri rivestimenti protettivi. Anche i rivestimenti su calcestruzzo possono essere testati con questo metodo. Lo strumento ha molte caratteristiche uniche. Una limitazione di corrente per evitare danni al rivestimento, e una presa di sicurezza senza elettronica sensibile. Le costolature estese sull'impugnatura forniscono un'efficace barriera tra l'alta tensione e l'utente. La regolazione accurata della sensibilità consente l'uso su rivestimenti metallizzati o leggermente umidi.

## MISURATORE DI RESISTENZA/DANNEGGIAMENTO DEL CALCESTRUZZO

[26]



Figura 9. V-METER MK IV

<b>Strumento</b>	V-METER MK IV
<b>Descrizione generale</b>	<p>È ampiamente utilizzato ed accettato per il controllo di qualità e l'ispezione del calcestruzzo. Si può misurare e correlare la resistenza del calcestruzzo con le prove standard di resistenza, permettendo il controllo non distruttivo di strutture complete. Esso individuerà favi, vuoti, calcestruzzo congelato. Il test ad ultrasuoni può essere applicato a strutture nuove e vecchie, lastre, colonne, pareti, aree danneggiate dal fuoco, strutture idroelettriche, tubi, travi prefabbricate e precomprese, cilindri ed altre forme. È disponibile una vasta gamma di trasduttori. I traduttori standard sono ad alta frequenza di risonanza Q di 54 kHz con un alloggiamento in acciaio inossidabile. Il connettore è a 90° rispetto alla superficie del trasduttore, per agevolare le operazioni e ottenere il corretto contatto acustico. Un pulsante e un cavo speciale vengono aggiunti al ricevitore per memorizzare i dati durante la misurazione. I dati possono essere caricati su un computer tramite il software "Velocilinx". Un adattatore è fornito per utilizzare generatori con cavo coassiale standard.</p>
<b>Applicazioni</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ricerca di vuoto nel calcestruzzo</li> <li>• test strutture danneggiate</li> <li>• determinazione profondità delle crepe</li> <li>• test di strutture nuove</li> <li>• qualità e resistenza nel controllo del cemento armato</li> <li>• testo non distruttivo per la misura della resistenza del calcestruzzo</li> </ul>

## MISURAZIONE DELLO STATO DI SALUTE [34]



Figura 10. A1040 MIRA per tomografia

<b>Strumento</b>	A1040 MIRA: Sistema di tomografia ad ultrasuoni a 48 trasduttori DPC (Dry-Point-Contact) per misure di spessori e localizzazione di difetti su strutture in calcestruzzo armato e altri materiali omogenei.
<b>Descrizione generale</b>	<p>A1040 MIRA rappresenta una soluzione altamente innovativa per effettuare prove non distruttive direttamente sul campo. Lo strumento portatile consente di effettuare indagini strutturali in modo facile e rapido e di eseguire tomografie a ultrasuoni su elementi e materiali da costruzione in calcestruzzo, muratura, legno, roccia, strutture metalliche e non metalliche.</p> <p>Altamente affidabile e resistente, A1040 MIRA utilizza tecnologia DPC (Dry-Point Contact) e permette un comodo utilizzo su ogni tipo di superficie, anche in caso di superfici irregolari. Il display HD visualizza in tempo reale immagini ad alta risoluzione con informazioni puntuali sui risultati dell'indagine. L'interfaccia consente di lavorare con raggi laser proiettati sulla superficie che guidano l'operatore per mantenere la corretta posizione durante l'acquisizione dei dati.</p>
<b>Funzioni</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ispezione di strutture in calcestruzzo, in marmo e in calcestruzzo armato ai fini della valutazione della consistenza del materiale; Ispezione dei blocchi refrattari;</li> </ol>

	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. Localizzazione di inclusioni non-metalliche, cavità, vuoti, delaminazioni e crepe negli elementi in calcestruzzo;</li> <li>3. Localizzazione di ferri di armatura e di tubi in plastica e metallo</li> <li>4. Valutazione della condizione dei tiranti in ponti di calcestruzzo armato;</li> <li>5. Ispezione di sottostrutture, colonne, elementi in calcestruzzo precompresso per rilevare vuoti e/o disomogeneità;</li> <li>6. Ricerca di vuoti e cavità sul retro delle calotte di rivestimento dei tunnel sotterranei e ferroviari;</li> <li>7. Stima dello spessore del rivestimento in calcestruzzo e della profondità della copertura di rinforzo di gallerie;</li> <li>8. Misura dello spessore dell'oggetto con accesso unilaterale.</li> </ol>
<b>Caratteristiche</b>	<p>Specifiche dei trasduttori</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivo di scansione: Serie di antenne a matrice incorporata</li> <li>• Frequenza operativa: 25 – 85 kHz</li> <li>• Numero di trasduttori: 48</li> <li>• Tipologia di trasduttori: Trasversale a banda larga e bassa frequenza con “dry-point-contact” e punte in ceramica antiusura</li> </ul> <p>Specifiche del sistema</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intervallo di velocità: da 1000 a 4000 m/s</li> <li>• Massima profondità di analisi: 2500 mm</li> <li>• Intervallo di misurazione dello spessore: 50 – 600 mm</li> <li>• Errore massimo (X= spessore): <math>\pm (0,05 \cdot X + 10)</math> mm</li> <li>• Dimensione minima dell'anomalia rilevata: una sfera di 20 mm di diametro, ad una profondità tra i 50 e i 400 mm.</li> </ul>
<b>Frequenza</b>	25 - 85 kHz

## MISURAZIONE DELLO STATO CORROSIVO [26]

<b>Norme</b>	AASHTO ( <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> )
<b>Strumento</b>	RESIPOD
<b>Descrizione generale</b>	<p>Per la durabilità del calcestruzzo delle nuove strutture, l'industria edile si sta rapidamente orientando verso specifiche basate sulle prestazioni. Al contempo, cresce l'importanza della stima della vita utile degli attuali elementi in calcestruzzo armato. La resistività del calcestruzzo è annoverata da anni tra i parametri critici utilizzati per determinare la qualità del calcestruzzo, sia nelle nuove costruzioni, sia nelle strutture esistenti. Resipod è il resistivimetro per le superfici in calcestruzzo più versatile al mondo per prove in laboratorio e in sito di durabilità, omogeneità e corrosione.</p> <p>Temperature di utilizzo: da 0 a 50 °C (da 32 a 122 °F)</p>
<b>Accuratezza</b>	<p>Risoluzione (corrente nominale 200 <math>\mu\text{A}</math>) <math>\pm 0,2</math> k<math>\Omega\text{cm}</math> o <math>\pm 1\%</math></p> <p>Risoluzione (corrente nominale 50 <math>\mu\text{A}</math>) <math>\pm 0,3</math> k<math>\Omega\text{cm}</math> o <math>\pm 2\%</math></p> <p>Risoluzione (corrente nominale <math>&lt; 50</math> <math>\mu\text{A}</math>) <math>\pm 2</math> k<math>\Omega\text{cm}</math> o <math>\pm 5\%</math></p>

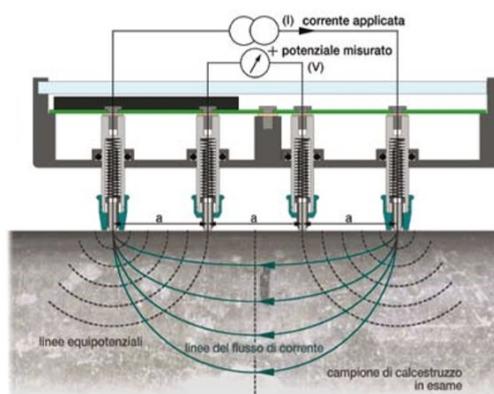


Figura 11. Configurazione Resipod

Resipod è uno strumento estremamente preciso, rapido, facile da usare, robusto e impermeabile, concepito per operare nelle difficili condizioni ambientali di cantiere.

Basato sul metodo della sonda Wenner, il Resipod misura la resistività elettrica del calcestruzzo e della roccia. Si applica una corrente ai due elettrodi esterni e si misura la differenza di potenziale (ddp) tra i due elettrodi interni; dal valore della ddp si calcola la resistività:  $\rho = 2\pi aV/I$  [kΩcm] [7].

La misura della resistività di superficie fornisce informazioni molto utili sullo stato di una struttura in calcestruzzo. Come già abbiamo riportato nel precedente paragrafo (“Elementi che possono influenzare l’impedenza elettrica”) è già stato provato infatti che sussiste una relazione molto stretta tra la misura di resistività e lo stato di una struttura in calcestruzzo, mentre recenti studi hanno verificato che esiste una relazione anche tra resistività e quota di diffusione del cloruro. Il metodo è efficace anche per la valutazione di altri parametri, come ad esempio la valutazione in situ dell’efficacia di maturazione, la determinazione delle esigenze zionali per i sistemi catodici di protezione, l’identificazione delle zone bagnate/asciutte di una struttura in calcestruzzo, l’indicazione di variazione nel rapporto acqua/cemento oppure delle aree più sensibili alla penetrazione del cloruro/acqua all’interno di una struttura in calcestruzzo, ecc...

Il Resipod è una sonda quadripolare integrata Wenner, concepita per misurare la resistività elettrica del calcestruzzo mediante una prova completamente non distruttiva. Si tratta dello strumento commerciale più preciso, estremamente stabile in un alloggiamento robusto e impermeabile concepito per lavorare in ambienti di cantiere esigenti.

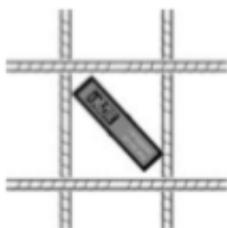


Figura 12. Spaziatura Resipod

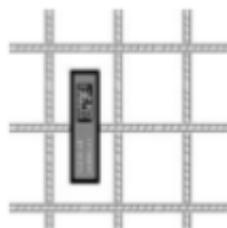


Figura 13. Resipod 50 mm e 30 mm

Il funzionamento è analogo a quello definito nella configurazione del metodo Wenner: una corrente applicata ai due elettrodi esterni viene misurata come differenza di potenziale dai due elettrodi interni. La resistività calcolata dipende dalla spaziatura tra gli elettrodi e la corrente è trasportata dagli ioni nella soluzione liquida.

Il Resipod è uno strumento utilizzato per misurazioni condotte sia su roccia che su calcestruzzo. Nel caso del secondo materiale che risulta non omogeneo è bene andare a valutare opportunamente la spaziatura delle sonde: una spaziatura maggiore garantisce una lettura più consistente (ricordiamo che l'impedenza misurata varia con l'area della semisfera di raggio pari alla distanza tra i sensori), ma se lo spazio è troppo ampio si rischia che la misura venga influenzata dall'acciaio di rinforzo. La spaziatura standard ottimale è di 50 mm della sonda mentre il modello a 38 mm è concepito per rispettare lo standard AASHTO per l'indicazione della resistività di superficie per garantire la resistenza del calcestruzzo alla penetrazione degli ioni cloruro.

La prova della resistività di superficie è la prova più rapida e semplice per la valutazione della permeabilità del calcestruzzo. Si tratta di un metodo affermato che potrebbe sostituire la prova di permeabilità al cloruro, che è molto più lunga e complicata[26]. Lo stesso elemento può essere utilizzato per le prove di resistenza alla compressione e gli elementi strutturali sul campo possono anche essere controllati con lo stesso misuratore per valori comparativi. I progetti di mix specifici possono essere valutati in laboratorio.

È possibile acquistare un accessorio di resistività HMA-843 utilizzato per eseguire misurazioni della resistività su cilindri in cemento 4x8 in (101,6 x 203,2 mm), che comprende piastre di misurazione con inserti in schiuma conduttiva e un supporto per strumenti con collegamenti per cavi.

Il Resipod è munito di una striscia reattiva e cuscinetti di contatto in schiuma per facilitare e non ostacolare la misurazione di impedenza.

Le caratteristiche del Resipod sono:

- Strumento integrato di misura della resistività di superficie
- Ampio campo di misura (da 0 a ca. 1000 k $\Omega$ ·cm con precisione da  $\pm 0,2$  a  $\pm 2$  k $\Omega$ ·cm a seconda della spaziatura della sonda)
- Risultati di misura rapidi e precisi
- Massima risoluzione disponibile per uno strumento di misura della resistività di superficie
- Conformità allo standard AASHTO [35] (spaziatura della sonda a 38 mm)

- Indicazione del flusso di corrente e del pessimo contatto
- Funzione di blocco, memorizzazione e cancellazione, con memoria integrata
- Collegamento usb e software Pc dedicato
- Sommergibile (impermeabile secondo IPX7)
- Regolazione della spaziatura variabile fra le sonde
- Sostituzione delle punte standard con accessori

## 2. MATERIALI E METODI

Analizziamo ora il caso specifico di un blocco di calcestruzzo 35x35x20 cm che viene monitorato e studiato attraverso un sistema di acquisizione dati EVAL-AD5940BIOZ della ANALOG DEVICES per quanto riguarda le misure di impedenza elettrica e tramite sensore DS18B20 della AZDelivery acquisito tramite Arduino Nano per le misure di temperatura.

Nel blocco di calcestruzzo sono stati inseriti 4 array con elettrodi di acciaio inossidabile collegati con un cavo a 4 fili (uno per ciascun elettrodo) che è vincolato all'altro estremo con un connettore RJ45 (femmina) per il cavo ethernet (CAT 6) posto sulla superficie del blocco. In questa presa verrà inserito, con un connettore RJ-45 maschio, il cavo dello strumento per la misurazione di impedenza elettrica.

Organizzare il sistema in questo modo serve per facilitare il trasporto separato di blocco e strumenti di misurazione in modo da evitare possibili danneggiamenti ad apparecchiature, cavi e collegamenti. Infatti, il blocco di calcestruzzo realizzato presso i laboratori UNIVPM è analogo a quelli realizzati per la fase di dimostrazione del progetto EnDurCrete; in tal caso, i collegamenti al sistema di misura verranno fatti solo una volta raggiunti i siti di validazione che, come già indicato nel paragrafo introduttivo sul progetto EnDurCrete, sono situati in Spagna.

Il blocco di calcestruzzo, dopo essersi solidificato con all'interno gli elettrodi e i fili necessari al monitoraggio (per mantenere tutto il sistema nelle medesime condizioni anche durante la fase di colata e di solidificazione del blocco, gli elettrodi sono stati inseriti in appositi contenitori realizzati mediante stampa 3D), è stato monitorato sia durante la fase di stagionatura che successivamente, in ambiente indoor e outdoor.

## BLOCCO DI CALCESTRUZZO: COMPOSIZIONE E CONFIGURAZIONI

Il calcestruzzo componente il nostro blocco di dimensioni 35 x 35 x 20 cm è realizzato con una miscela avente il seguente mix-design:

Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	Acqua [kg/m <sup>3</sup> ]	Sabbia 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]	Ghiaino 5/10 [kg/m <sup>3</sup> ]	Ghiaia 10/15 [kg/m <sup>3</sup> ]	Aria [%]	Additivi [kg/m <sup>3</sup> ]	
						Sika PC2	Sika PC3
375	158	912	366	623	2.4	1.10	1.27

Il blocco è stato realizzato e monitorato presso l'Università Politecnica Delle Marche.

Al suo interno array di 4 elettrodi in acciaio inossidabile, connessi ad un cavo a 4 poli, sono stati immersi ad una profondità di 5 cm e disposti con questa configurazione:

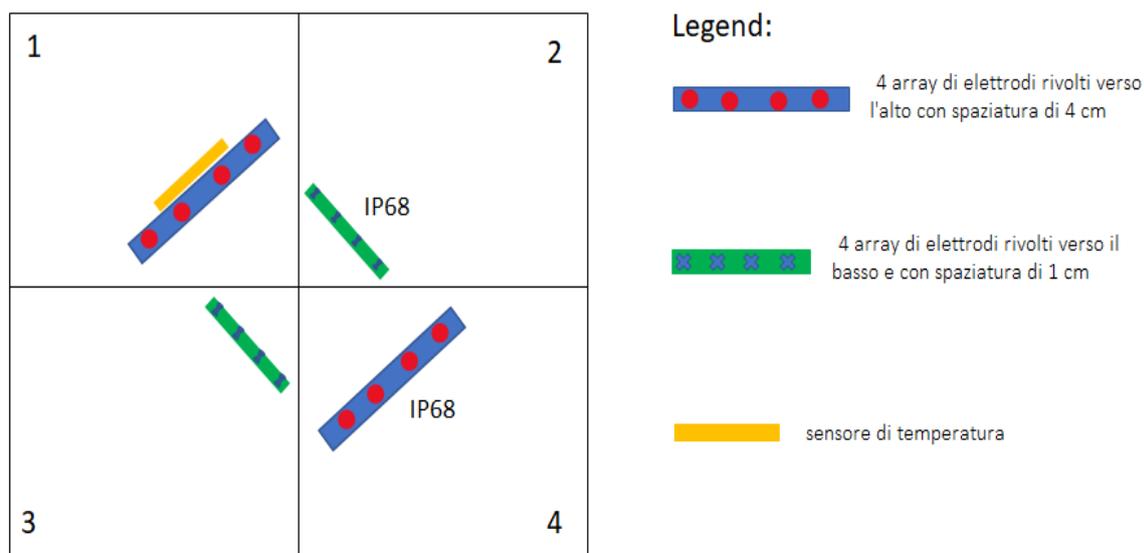
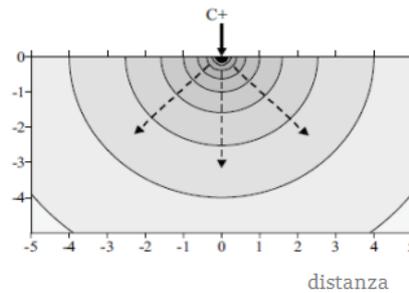


Figura 14. Configurazione array

Tra le varie configurazioni esistenti si è preferito utilizzare una con 4 elettrodi, piuttosto che una a 2 elettrodi, in quanto la prima permette di evitare un problema di polarizzazione nell'interfaccia elettrodo-materiale, eseguendo così misure con maggiore accuratezza.

Come vediamo in figura, gli array con spaziatura inter-elettrodo pari a 4 cm sono rivolti due verso l'alto e due, con spaziatura 1 cm, verso il basso. Questa configurazione è ottimale perché ci permette di "coprire" adeguatamente tutta la zona di indagine: il volume di misura è la semisfera di raggio pari alla

spaziatura inter-elettrodo. Gli elettrodi sono ad un'altezza tale che il volume da essi monitorato sia completamente incluso nello spessore del campione nel verso in cui sono rivolti; infatti, un elettrodo singolo che introduca nel mezzo una corrente  $I$  genererà un potenziale  $V_r$  ad una distanza  $r$  dalla sorgente, con superfici equipotenziali semisferiche. Per un mezzo omogeneo quindi la corrente fluisce radialmente dal punto di immissione, e la caduta di potenziale tra due punti è descritto dal gradiente:  $DV = - \delta V / \delta r$  [18].



*Figura 15. linee equipotenziali*

Le linee equipotenziali intersecano ad angolo retto le linee di flusso, mentre l'intensità di corrente  $J$  decresce con l'aumentare della distanza dal centro di immissione.

Gli elettrodi rivestono particolare importanza perché al contatto tra metallo e calcestruzzo (o meglio, fluidi presenti nel calcestruzzo) possono insorgere potenziali spontanei (effetto di polarizzazione degli elettrodi), con sviluppo di una differenza di potenziale (talvolta anche elevata), che può influire pesantemente sull'accuratezza delle misure [18].

Nella pratica il metodo Wenner è molto usato in campo geologico (anche se può essere applicato in maniera analoga anche a elementi in calcestruzzo), quindi, per l'immissione di corrente vengono infissi nel terreno due elettrodi e attraverso altri due viene misurata la differenza di potenziale; in questo modo le linee equipotenziali e di flusso si dispongono in maniera differente, come illustrato in figura 16.

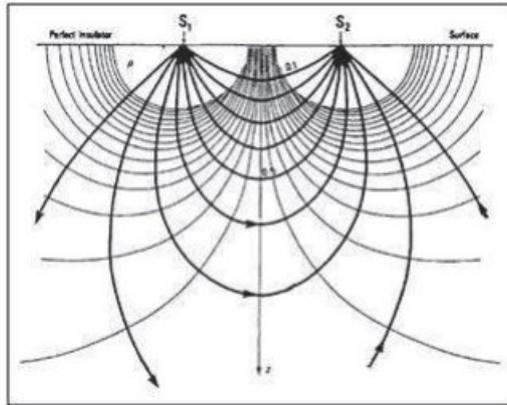


Figura 16. linee di flusso e linee equipotenziali

Inoltre, per evitare la polarizzazione del materiale, per le nostre misure è stata utilizzata una fonte di alimentazione alternata [18] (a frequenze superiori a 1 kHz, in particolare viene fatta una spettroscopia di impedenza elettrochimica nel range 1-10 kHz) [36].

Se la sorgente e il punto di misura sono entrambi sulla superficie di un semispazio omogeneo con resistività  $\rho$ , il potenziale è dato dalla relazione:  $V = \rho I / 2\pi r$ . Questa relazione consente di costruire la distribuzione di potenziale generato da una qualsiasi configurazione di elettrodi di corrente.

In un sistema eterogeneo, la distribuzione delle linee di corrente tra due mezzi a diversa resistività avviene con un cambiamento della direzione di flusso. Questo perché all'interfaccia tra due mezzi devono essere soddisfatte le condizioni per cui la corrente tende a percorrere preferenzialmente gli strati conduttivi e procede quanto più possibile parallela alle loro interfacce, mentre attraversa gli strati resistivi quasi ortogonalmente [18].

In teoria con i quadripoli di base (2 elettrodi di corrente e 2 elettrodi di potenziale) sono possibili diverse configurazioni (array), in cui gli elettrodi di corrente e di potenziale sono disposti reciprocamente in maniera diversa.

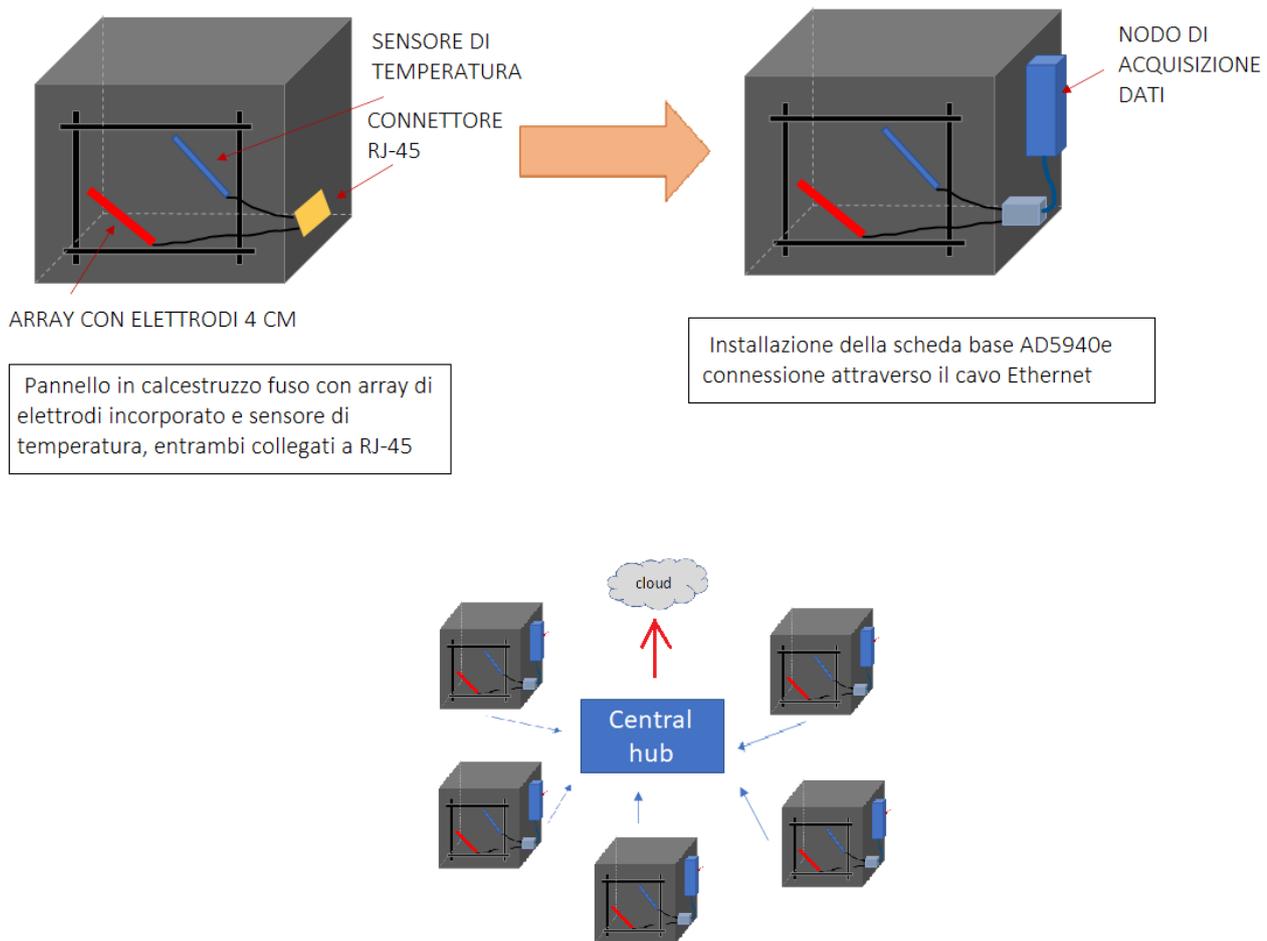
I nostri array in particolare sono realizzati con elettrodi equispaziati ed allineati, in acciaio inox, contenuti all'interno di un "case" che li mantiene in posizione durante la fase di colata e solidificazione del blocco campione in calcestruzzo.



*Figura 17. Case realizzato in stampa 3D contenente gli elettrodi. In alto a sx: resina bianca utilizzata per impermeabilizzare la zona inferiore.*

Per i collegamenti tra elettrodi e scheda di acquisizione viene usato un cavo Ethernet e i connettori installati sono di tipo RJ-45 (IP68 o meno); essi sono a contatto con la superficie del blocco, cosicché i cavi vengano collegati all'esterno e possano essere rimossi per facilitarne il trasporto in vista del fatto che all'interno del progetto EnDurCrete gli elementi da monitorare siano realizzati in un luogo (Mantova, presso Nuova Tesi System) per poi essere monitorati in un altro (Spagna, porto di Gijon e tunnel di Leon). Proprio nel sito di Gijon sono stati utilizzati connettori SIP68 (dove S sta per "small") perché questi dispositivi in plastica e resistenti all'acqua vanno a proteggere zone di connessione che potrebbero essere danneggiate con acqua di mare: i blocchi monitorati in questo sito spagnolo sono soggetti alle maree, la zona di connessione potrebbe rimanere sommersa per un tempo prolungato e quindi necessita di un elemento protettivo.

Nel nostro blocco in particolare è presente anche un sensore di temperatura che monitora la temperatura interna del blocco in modo tale da poter stabilire anche una relazione tra misura di impedenza-temperatura ed effettuare uno studio più completo.



*Figura 18. disposizione sensore temperatura e array di elettrodi*

Per quanto riguarda invece il nodo di misura dell'impedenza elettrica, è stato utilizzato il sensore AD5940 della Analog Devices. Attraverso questo sistema, sono stati acquisiti dati con una frequenza di campionamento pari a 15 minuti, mediante uno sweep in frequenza (secondo la modalità EIS, Electrochemical Impedance Spectroscopy "Spettroscopia di impedenza elettrochimica"), nel range di frequenza 1-10 kHz. Si sceglie questo range perché in letteratura si raccomanda di usare frequenze superiori ad 1 kHz per evitare effetti residui di polarizzazione del materiale (come avevamo prima indicato) [36].

Poi i dati vengono salvati come segue:

- Diagramma di Bode nell'intervallo di frequenze considerato (1-10 kHz)
- Modulo e fase dell'impedenza elettrica misurata a 10 kHz (frequenza singola di misura scelta per osservare le variazioni nel tempo)

- Data e ora dell'acquisizione
- Temperatura

Per quanto riguarda la spettroscopia di impedenza elettrochimica, essa è stata applicata in letteratura anche per monitorare lo sviluppo di crepe nel cemento e pasta di cemento rinforzata con fibre di carbonio [37].

La misurazione dell'impedenza elettrochimica generalmente viene condotta utilizzando la tecnica a 4 elettrodi: gli elettrodi sono realizzati in metallo speciale che può resistere all'ambiente alcalino elevato. Due sono gli elettrodi interni (“working” e “counter”) che vanno a eccitare gli elettrodi esterni, detti sono elettrodi di “sensing” e “reference”. Al fine di ridurre al minimo la resistenza di contatto del punto risultante da contatti non ottimali tra gli elettrodi e il campione, gli elettrodi possono essere inseriti direttamente nella miscela fresca [37]. Nella spettroscopia di impedenza elettrochimica le misurazioni vengono eseguite utilizzando ad esempio il sistema elettrochimico avanzato di Parstat 2273 (oppure nel nostro caso abbiamo usato il sistema Gambry Instruments Reference 600+). La parte reale ( $Z_{Re}$ ) e la parte immaginaria ( $Z_{Im}$ ) dell'impedenza vengono misurate per varie frequenze (nel nostro caso abbiamo usato solo frequenze da 1-10 kHz) e da questi dati si possono ottenere i grafici di Nyquist e di Bode[37].

## DS18B20 AZDelivery



*Figura 19. Sensore di temperatura*

Sonda di temperatura waterproof in acciaio inossidabile, realizzata con il sensore digitale di temperatura DS18B20. Consente di misurare con precisione la temperatura (da -55°C a +125°C) in

ambienti umidi. Ogni sensore è dotato di un codice seriale a 64-bit memorizzato al suo interno. Le applicazioni comprendono controlli termostatici, sistemi industriali, prodotti di consumo, termometri, etc.

- Alimentazione: da 3 V a 5,5 V
- Range di temperatura misurabile: da  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$  (da  $-67^{\circ}\text{F}$  a  $+257^{\circ}\text{F}$ )

## EVAL-AD5940BIOZ



Figura 20. EVAL-AD5940BIOZ

Il sistema di acquisizione prodotto da Analog Devices EVAL-AD5940BIOZ è specificamente progettato per applicazioni di bioimpedenza, tra cui l'analisi di impedenza del corpo (BIA) e l'attività elettrodermica (EDA). Possiamo dire che nello specifico la scheda EVAL-AD5940BIOZ contiene AD5940 e il chip AD8233 utilizzato per misurazioni ECG. La scelta della scheda per l'acquisizione dei dati è ricaduta su questo modello proprio perché è una scheda di valutazione pronta all'uso, che utilizza il chip AD5940 per la misura di impedenza elettrica. Di fatto facciamo una misura a 4 elettrodi, che è proprio quella che la board implementa per la misura BIA (*Body Impedance Assessment* ovvero "Bioimpedenziometria"). EVALAD5940BIOZ è una scheda fattore di forma Arduino Uno che si collega su EVAL-ADICUP3029. Questa scheda contiene i file in componenti discreti necessari e richiesti per ECG, EDA e Misurazioni BIA, inclusi condensatori di isolamento e corrente resistori limitanti. Questa

scheda dispone anche di un'interfaccia per collegare i cavi di misurazione e la scheda di test AD5940 Z ("dummy cell"), che modella l'impedenza della pelle e del corpo [38] e permette di valutare il corretto funzionamento del sistema di misura.

Applicazioni:

- Misure elettrochimiche
- Sensori di gas elettrochimici
- Potenziostato / amperometrico / voltammetria / voltammetria ciclica
- Applicazioni di bioimpedenza
- Impedenza della pelle
- Impedenza del corpo
- Monitoraggio continuo del glucosio
- Impedenza della batteria

AD5940 e AD5941 sono front-end analogici (AFE) ad alta precisione e bassa potenza progettati per applicazioni portatili che richiedono tecniche di misurazione ad alta precisione basate su elettrochimica, come misurazioni amperometriche, voltammetriche o di impedenza. AD5940 / AD5941 è un chip progettato per le misure di impedenza cutanea e di impedenza corporea e funziona con AFE AD8233 in un sistema di misurazione bioelettrico o biopotenziale completo. AD5940 / AD5941 è progettato per il rilevamento elettrochimico di gas tossici [39] [38].

AD5940 / AD5941 sono costituiti da due circuiti di eccitazione ad alta precisione e un canale di misurazione comune, che consente un'ampia capacità di misurazione del sensore in prova. Il primo circuito di eccitazione consiste in una stringa a bassissima potenza, doppia uscita, convertitore digitale-analogico (DAC) e un potenziostato a bassa potenza e basso rumore. Un'uscita del DAC controlla l'ingresso non invertente del potenziostato e l'altra uscita controlla l'ingresso non invertente dell'amplificatore di transimpedenza (TIA). Questo circuito di eccitazione a bassa potenza è in grado di generare segnali da cc a 200 Hz. Il secondo circuito di eccitazione è costituito da un DAC a 12 bit, indicato come DAC ad alta velocità. Questo DAC è in grado di generare segnali di eccitazione ad alta frequenza fino a 200 kHz [39].

Il canale di misurazione AD5940 / AD5941 è dotato di un convertitore analogico-digitale (ADC) a registro di approssimazione successivo multicanale (SAR) a 16 bit, 800 kSPS, con buffer di ingresso, un filtro anti-aliasing incorporato e un amplificatore di guadagno programmabile (PGA). Un multiplexer

di input (MUX) davanti all'ADC consente all'utente di selezionare un canale di input per la misurazione. Questi canali di ingresso includono più ingressi di corrente esterni, ingressi di tensione esterni e canali interni. I canali interni consentono misurazioni diagnostiche delle tensioni di alimentazione interne, della temperatura dello stampo e delle tensioni di riferimento [39].

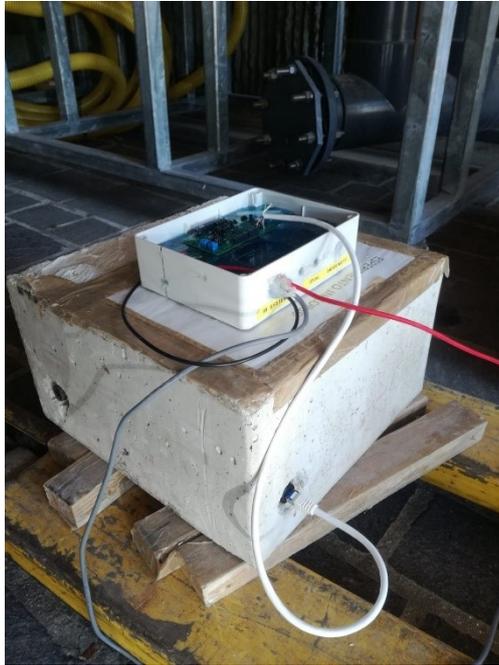
Gli ingressi di corrente includono due TIA con guadagno programmabile e resistori di carico per misurare diversi tipi di sensori. Il primo TIA, indicato come TIA a bassa potenza, misura i segnali a bassa larghezza di banda. Il secondo TIA, indicato come TIA ad alta velocità, misura segnali ad alta larghezza di banda fino a 200 kHz [39].

Una matrice di interruttori programmabile a bassissime perdite collega il sensore ai blocchi di misura e di eccitazione analogici interni. Questa matrice fornisce un'interfaccia per il collegamento di resistori di amplificazione di transimpedenza esterni e resistori di calibrazione. La matrice può anche essere utilizzata per "multiplexare" più dispositivi elettronici di misurazione sugli stessi elettrodi indossabili.

È disponibile una sorgente di riferimento su chip di precisione da 1,82 V e 2,5 V. I circuiti interni ADC e DAC utilizzano questa sorgente di riferimento su chip per garantire basse prestazioni di deriva per le periferiche da 1,82 V e 2,5 V [39].

AD5940 / AD5941 funzionano con un'alimentazione da 2,8 V a 3,6 V e sono specificati in un intervallo di temperature compreso tra -40 ° C e + 85 ° C.

## DESCRIZIONE DEL BLOCCO DI CALCESTRUZZO E RELATIVO SISTEMA DI MONITORAGGIO IMPEGNATO NEL PRESENTE LAVORO DI TESI



*Figura 21. Blocco calcestruzzo UNIVPM e relativo sistema di monitoraggio*

Il blocco realizzato presso i laboratori dell'UNIVPM non contiene aggiunte carboniose, le quali invece sono previste in alcuni dei pannelli di calcestruzzo realizzati dalla Nuova Tesi System di Mantova e che sono stati spediti nei vari siti demo del progetto EnDurCrete dopo 28 giorni di stagionatura (ovvero quando hanno raggiunto una solidificazione tale da garantire le migliori proprietà meccaniche).

Questi blocchi, che verranno studiati nei siti demo del progetto, sono posizionati in ambienti anche molto aggressivi:

- Un tunnel, dove, oltre ad essere a contatto con una parte di terreno, subisce tutte le influenze di un ambiente umido;
- Un porto, con diverse zone di esposizione, tra cui una zona asciutta (ma dove è comunque esposto all'aerosol marino) e una zona interessata dalle maree, e quindi soggetto anche alla penetrazione di acqua.

Proprio per evitare che l'acqua del mare o altri agenti corrosivi possano danneggiare il nostro sistema di acquisizione, è stato inserito all'interno un gel (Raytech – Magic Gel) resistente all'acqua (IP68) e

all'ambiente marino, ma che non influenzi le misurazioni. Inoltre, sempre per evitare possibili danneggiamenti dei cavi e delle prese dovuti all'ingresso di acqua, vengono utilizzati dei connettori RJ45 IP68, muniti con guarnizioni apposite che garantiscano una tenuta stagna.

Ogni pannello di calcestruzzo che deve essere monitorato è associato ad un nodo di monitoraggio, costituito da una scatola elettrica contenente la scheda di acquisizione, collegata attraverso cavi agli elettrodi di misurazione.



Figura 22. Board di acquisizione

Inoltre, in tale scatola è presente un Arduino Nano per l'acquisizione dei dati misurati dal sensore di temperatura (posto in prossimità di uno degli array di elettrodi). I dati sono acquisiti con una frequenza di campionamento pari a 15 minuti in modo continuo.

Per quanto riguarda i collegamenti dei sensori con il cavo Ethernet, il cavo ha dei fili elettrici con colorazioni standard (in particolare, è stato adottato lo standard T-568B). Sappiamo inoltre che i 4 elettrodi hanno come ruolo di emettitori (esterni) e ricevitori (interni) e in particolare distinguiamo: tra quelli interni il *sensing electrode (SE)* (in posizione definita come S+ sulla scheda di acquisizione) con cavo di colore marrone, e il *reference electrode (RE)* (collegato ad S- sulla scheda di acquisizione) con cavo di colore bianco-marrone; tra gli elettrodi esterni invece abbiamo il Working electrode (WE)

(collegato in posizione F+ sulla scheda di acquisizione) con cavo di colore bianco-arancio, e *il counter electrode (CE)* (collegato in in F- sulla scheda di acquisizione) con cavo di colore arancio.

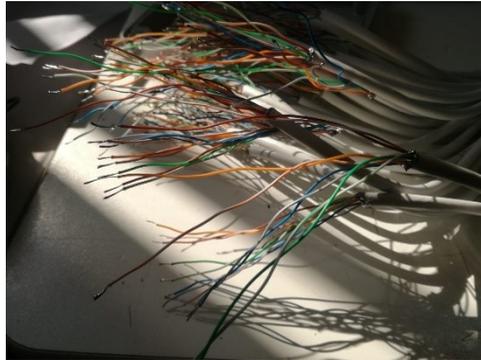


Figura 23. Fili cavo ethernet

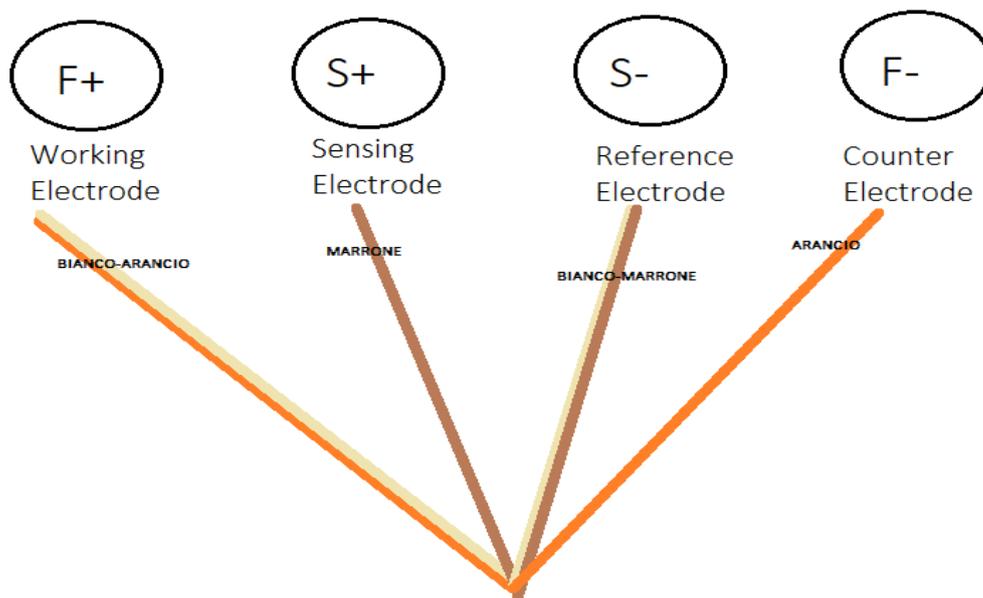


Figura 24. Schema fili ethernet-elettrodi

3 dei restanti 4 fili del cavo Ethernet invece servono per alimentare e registrare i dati del sensore di temperatura.

Per acquisire i dati riportati in questa tesi, abbiamo considerato un solo array (con la relativa scheda di acquisizione dati), ma nei siti demo le misurazioni verranno effettuate con tutti e 4 gli array e quindi con 4 schede di acquisizione adeguatamente protette e fissate alle pareti del blocco di calcestruzzo. Tutte le schede di acquisizione invieranno i dati a un piccolo computer, posizionato all'interno di un

apposito quadro elettrico, il quale a sua volta li invierà al cloud al quale è possibile collegarsi per un monitoraggio da remoto.

## PROCESSAMENTO DEI DATI ACQUISITI

Una volta acquisiti i dati attraverso la nostra scheda collegata ad un PC, è stato possibile salvarli su un foglio Excel e calcolare la parte reale e immaginaria dell'impedenza a partire da modulo e fase. Successivamente è stato possibile graficare i dati seguendo i valori che i vari parametri assumevano nel tempo.

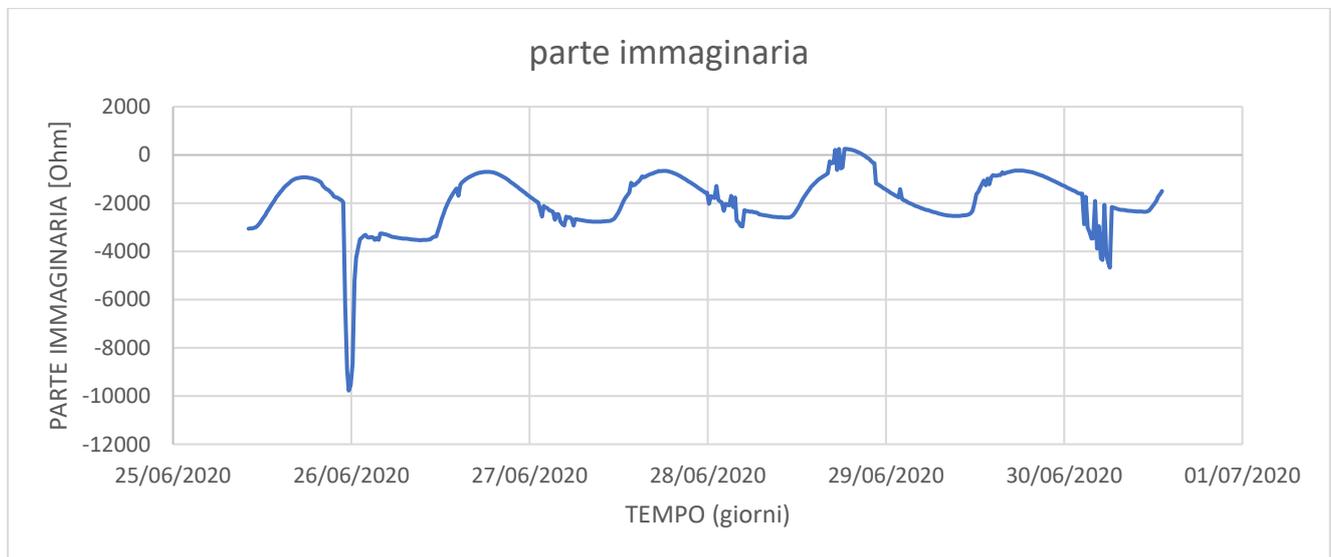


Figura 25. Andamento parte immaginaria dell'impedenza (dati grezzi)

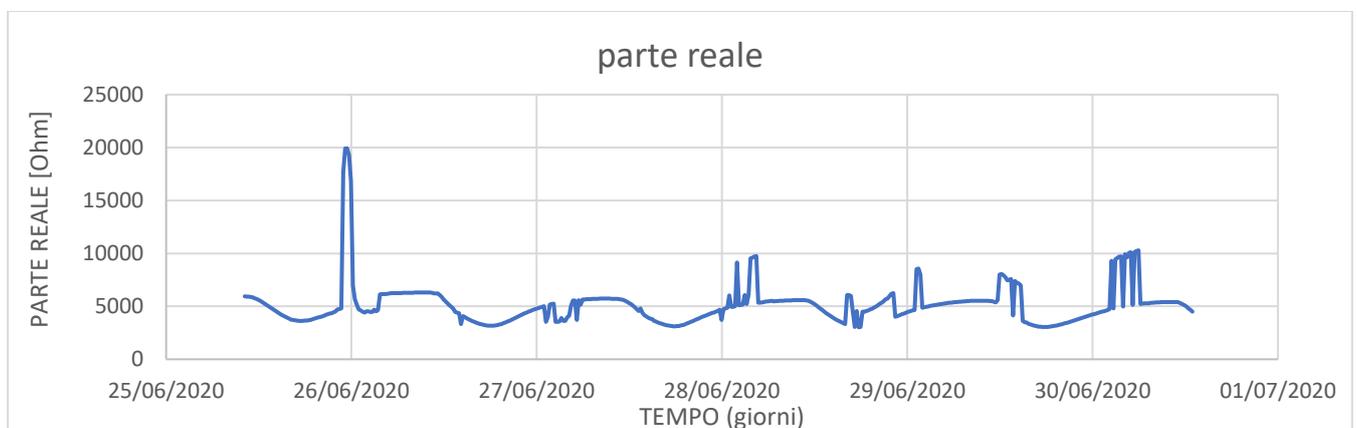


Figura 26. Andamento parte reale dell'impedenza

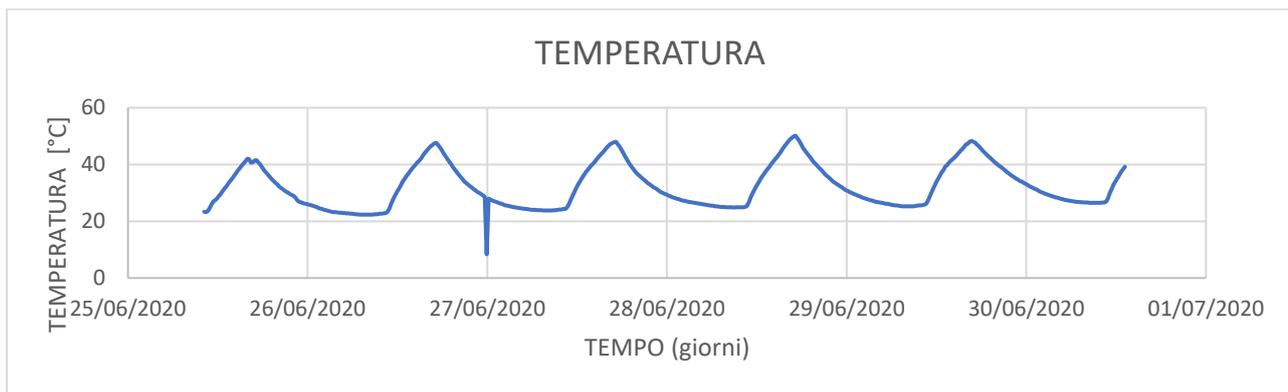


Figura 27. Andamento della temperatura

Possiamo notare come i dati siano piuttosto ciclici durante la giornata (il ciclo giorno-notte si riflette in cambiamenti ciclici sia dell'impedenza elettrica che della temperatura, grandezze fra di loro collegate: da notare che all'aumentare della temperatura l'impedenza elettrica diminuisce e viceversa), anche se sono presenti alcuni spike dovuti a rumori ed errori di misurazione. Per avere dei risultati più accurati, è necessario dapprima filtrare i dati acquisiti; per far questo, è possibile utilizzare un ambiente di programmazione come MATLAB per andare a inserire dei "filtri" ed eliminare le componenti di rumore presenti nei nostri grafici.

## MATLAB

MATLAB (abbreviazione di *Matrix Laboratory* ovvero "laboratorio di matrici") è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C, che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla MathWorks. MATLAB consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi.

L'interfaccia principale di MATLAB è composta da diverse finestre che è possibile affiancare, spostare, ridurre a icona, ridimensionare e così via. Le finestre principali, più usate, sono quattro: Command Window; Workspace; Current directory; Command history [40].

La Command Window è una finestra dell'interfaccia principale di MATLAB, nella quale è possibile digitare comandi supportati e visualizzare a schermo in tempo reale i risultati.

Il Workspace è lo spazio di lavoro (o spazio di memoria) contenente le variabili dichiarate. Per visualizzare tutte le variabili utilizzate si utilizza il comando “who”, mentre con il comando “whos” si visualizzano tutte le variabili utilizzate, ma in forma estesa, cioè ci viene data la loro descrizione con nome, dimensione, memoria occupata, classe e attributi [40].

La finestra Current Directory permette, come si può intuire, di esplorare il contenuto delle cartelle sul proprio hard disk. Da questa finestra è possibile aprire direttamente file compatibili con MATLAB con un semplice doppio click. Inoltre, è possibile esplorare cartelle utilizzando, in Command Window, comandi tipici dei moderni sistemi operativi basati su tecnologia UNIX (come Linux e Macintosh) come “cd nomecartella”, e così via.

Nella finestra Command History sono elencati tutti i comandi digitati di recente, divisi per ora e data. È possibile rilanciare direttamente da Command History un comando digitato in Command Window in precedenza semplicemente con un doppio click [40].

Per poter plottare i nostri dati è necessario utilizzare apposite righe di codice. In questo modo, è possibile graficare dapprima i dati grezzi, poi confrontarli nei vari step della fase di filtraggio, verificando che questa elimini il rumore senza però distorcere il segnale di interesse.

È inoltre fondamentale per il corretto funzionamento di MATLAB che la cartella nella quale sono contenuti i file da utilizzare, sia aperta in modo che il sistema possa avere accesso diretto ad essi (altrimenti occorre specificare la directory su cui i dati sono disponibili). Infatti, con MATLAB è possibile prelevare i dati da un foglio Excel e andarli ad analizzare, realizzare grafici, ecc...

Per dati che avevamo nel file Excel è stato scritto uno script di cui andiamo ad analizzare solo alcune parti principali e il loro funzionamento.

Si parte con il comando di “clear” che ci permette di iniziare da zero la stesura del nostro script chiudendo ed eliminando tutto quello che eventualmente poteva essere stato scritto precedentemente. Vengono poi importati i dati dal file Excel salvato durante l’acquisizione (“file\_dati\_blocco.xlsx”) e a seconda della colonna considerata si assegnano i nomi corrispondenti: abbiamo, ad esempio, assegnato il nome  $Z_{mod}$  alla prima colonna digitando “ $Z_{mod} = data(:,1)$ ”, dove 1 indica la colonna 1 del file, relativa al modulo dell’impedenza elettrica, alla quale decidiamo di assegnare un certo nome, mentre i due punti (“:”) indicano che devono essere considerate tutte le righe del file, e si procede in maniera analoga per tutte le colonne.

Procediamo poi con la realizzazione dei grafici del modulo, fase, della parte immaginaria e reale dell'impedenza. Usiamo la funzione di *subplot* indicando il numero di righe, colonne in cui viene divisa l'immagine e in che posizione debbano essere collocati gli assi (*subplot (2,2,1)*, per avere un grafico in forma matriciale 2x2). Si utilizzerà poi la funzione *plot* specificando quali saranno le variabili all'interno del grafico da realizzare (es. *plot(t, Z\_mod)*).

Si passa quindi alla fase di filtraggio dei segnali.

Il comando  $M = \text{movmedian}(A, k)$  restituisce un array di k-valori mediani in punti locali, in cui ogni mediana viene calcolata su una finestra scorrevole di lunghezza k tra elementi adiacenti di A. Quando k è dispari, la finestra è centrata sull'elemento nella posizione corrente. Quando k è pari, la finestra è centrata sugli elementi attuali e precedenti. M è la stessa dimensione di A. Se A è un vettore, allora *movmedian* opera lungo la lunghezza del vettore. Se A è un array multidimensionale, *movmedian* opera lungo la prima dimensione dell'array la cui dimensione non è uguale a 1 [41].

La funzione Wavelet invece permette di effettuare una scomposizione del segnale e in particolare in questo caso si effettua una decomposizione di grado 4 seguendo una approssimazione discreta di "wavelets" di Meyer. Wavelet Toolbox consente di ottenere una rappresentazione sparsa dei dati, utile per ridurre il rumore o comprimere i dati conservandone le caratteristiche più importanti [42].

Si effettua la scomposizione sia per il modulo che per la fase.

Successivamente si vanno a plottare i vari segnali filtrati inserendo una legenda dei diversi andamenti del segnale "grezzo", dopo l'applicazione del "filtro mediano" e dopo l'applicazione della wavelet.

Facciamo lo stesso per quanto riguarda la fase, sempre distinguendo tramite legenda i diversi segnali. Ricalcoliamo infine parte reale e immaginaria a partire dai segnali filtrati di modulo e fase dell'impedenza elettrica.

Infine, plottiamo i dati filtrati di modulo, fase, parte reale e immaginaria dell'impedenza elettrica.

### 3. RISULTATI

I grafici che otterremo dando il "RUN" dello script in MATLAB sono i seguenti:

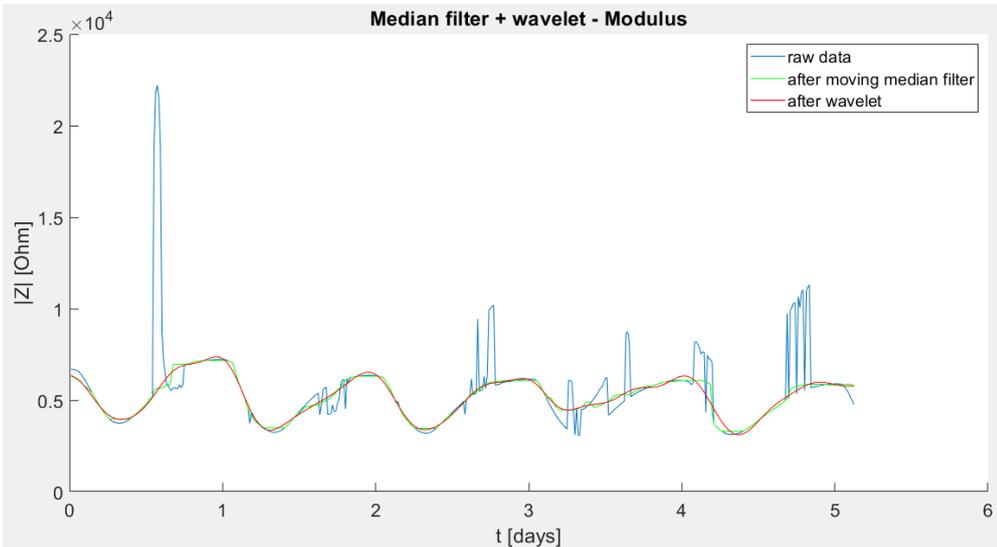


Figura 28. Andamento del modulo dell'impedenza elettrica: dati grezzi (blu), con filtro mediano (verde) e dopo aver applicato la wavelet (rosso).

In questo primo caso il filtro va ad eliminare picchi anche molto significativi, dimostrandosi un ottimo metodo per ripulire l'andamento del modulo di impedenza elettrica dal rumore e dagli artefatti.

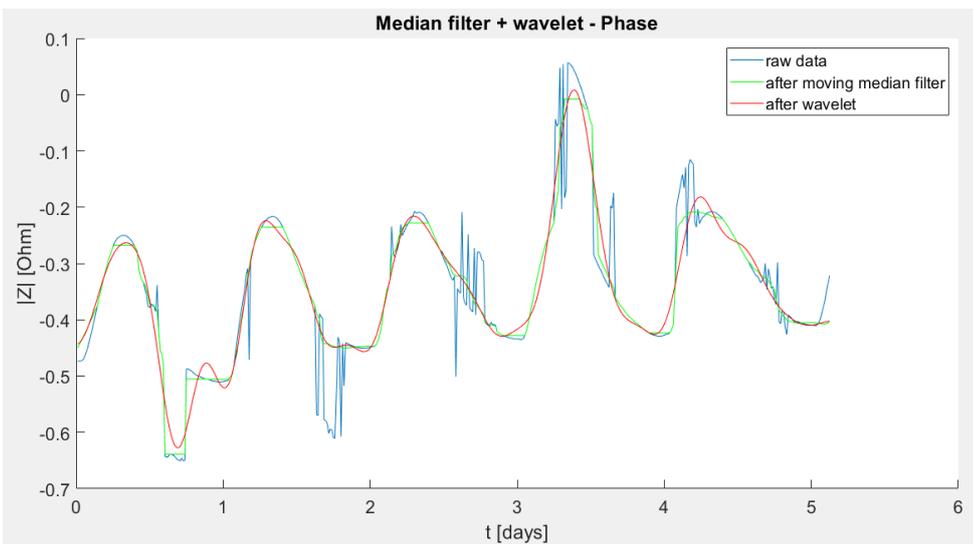


Figura 29. Andamento della fase dell'impedenza elettrica: dati grezzi (blu), con filtro mediano (verde) e dopo aver applicato la wavelet (rosso).

Notiamo che già dopo aver processato i dati attraverso il filtro a mediana mobile, la curva assume un andamento molto più regolare, in quanto gli artefatti sono stati eliminati. Applicando poi una wavelet di livello 4, andiamo poi a regolarizzare in maniera ottimale l'andamento di modulo e fase dell'impedenza, eliminando quanto più possibile la componente di rumore.

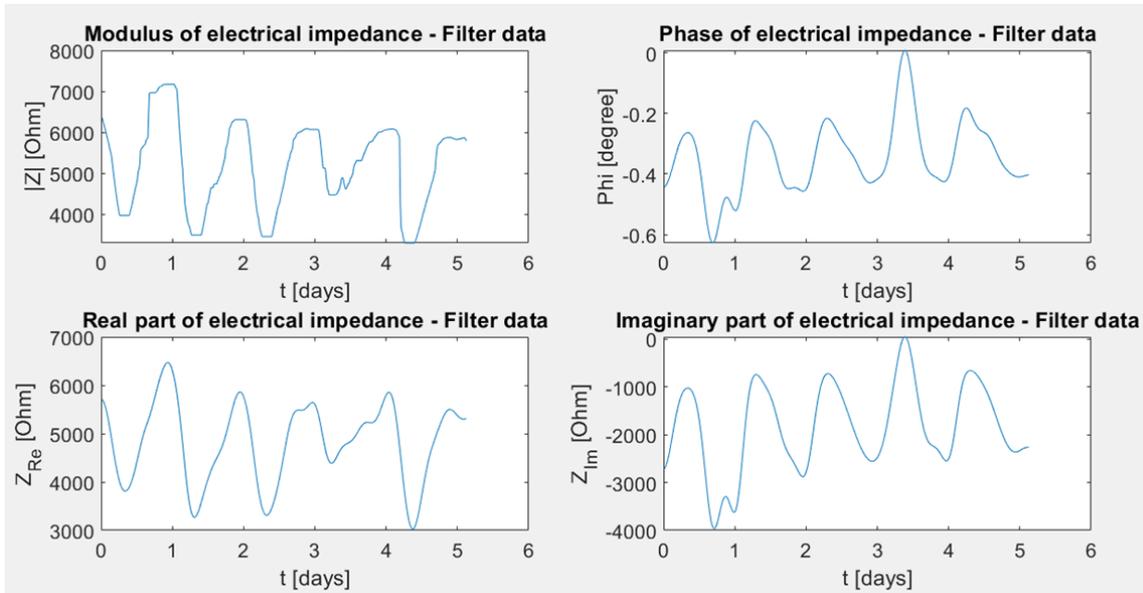


Figura 30. Modulo (in alto a sinistra), fase (in alto a destra), parte reale (in basso a sinistra) e parte immaginaria (in basso a destra) dell'impedenza elettrica – dati filtrati

Abbiamo poi plottato l'andamento della temperatura con lo script (che abbiamo riportato in appendice) per avere un elemento in più nella nostra valutazione del fenomeno:

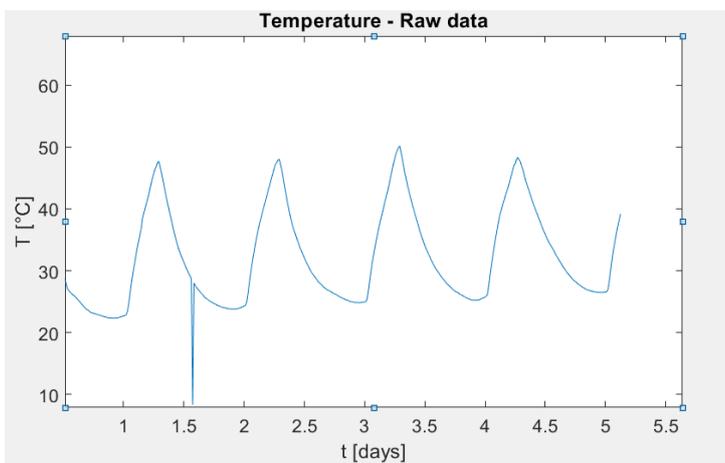


Figura 31. Grafico della temperatura ottenibile

Abbiamo anche filtrato i dati di temperatura semplicemente con un filtro mediano anche per eliminare gli spike:

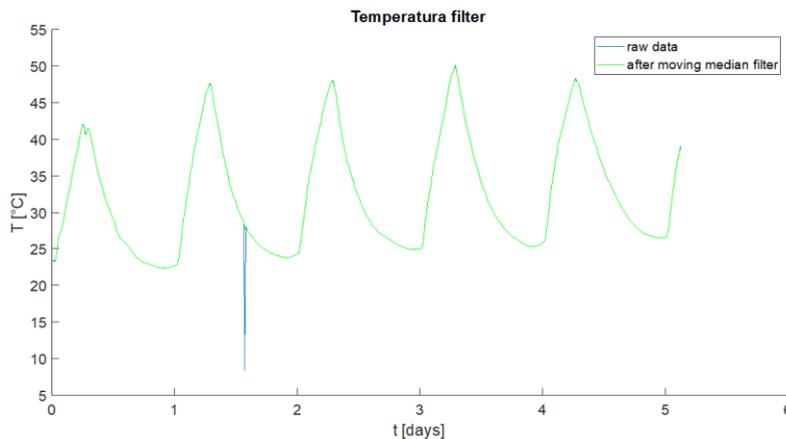


Figura 32. Grafico temperatura filtrato

Notiamo che l'andamento dei grafici della parte reale e di quella immaginaria dell'impedenza hanno un andamento ciclico, andamento che può essere collegato con l'andamento della temperatura dovuto all'alternarsi giorno-notte. Questo risultato non ci stupisce: sappiamo dalla letteratura che anche la temperatura è un parametro che può influenzare l'impedenza elettrica o meglio la conducibilità elettrica. Infatti, l'aumento della temperatura determina un aumento anche dello stato di agitazione delle entità molecolari delle quali è costituito il materiale e quindi una maggiore conducibilità elettrica (e quindi minore impedenza elettrica): all'aumentare della temperatura corrisponde una diminuzione nel grafico dell'impedenza elettrica.

Andiamo allora a evidenziare ancora di più la relazione di proporzionalità inversa tra modulo di impedenza elettrica e temperatura: consideriamo i dati registrati nella giornata del 29/06/2020 e andiamo a considerare due intervalli di tempo di qualche ora (es. 00:10 alle 08:40 e dalle ore 12:10 alle 16:40) in modo tale da poter analizzare un caso con andamento crescente della temperatura e uno con andamento decrescente. Andiamo a realizzare i grafici con Matlab, andando ad integrare lo script con alcune linee di codice che vanno ad importare le misure di temperatura, filtrarle e graficarle (le riportiamo in appendice).

Andiamo a considerare due fasce orarie, una in cui risultava un andamento decrescente della temperatura (ore 00:00-08:40) e una che presentava andamento crescente della temperatura (ore

12:10-16:40); si può notare che in entrambi i casi risulta sussistere una relazione di proporzionalità inversa tra impedenza elettrica e temperatura.

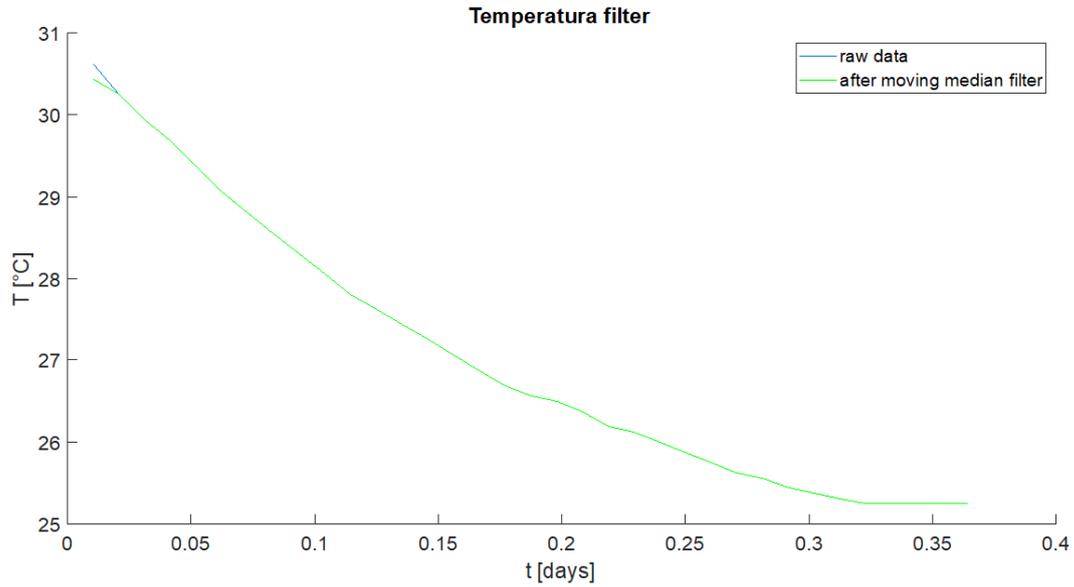


Figura 33. Andamento decrescente della temperatura (ore 00:00-08:40)

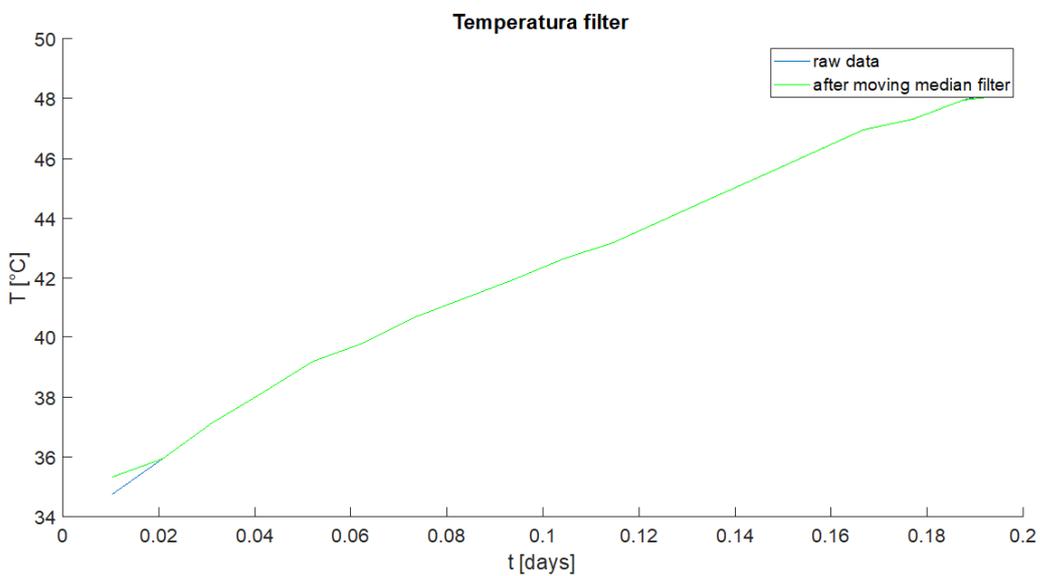


Figura 34. Andamento crescente della temperatura (ore 12:10- 16:40)

Allora i grafici che otterremo sono i seguenti:

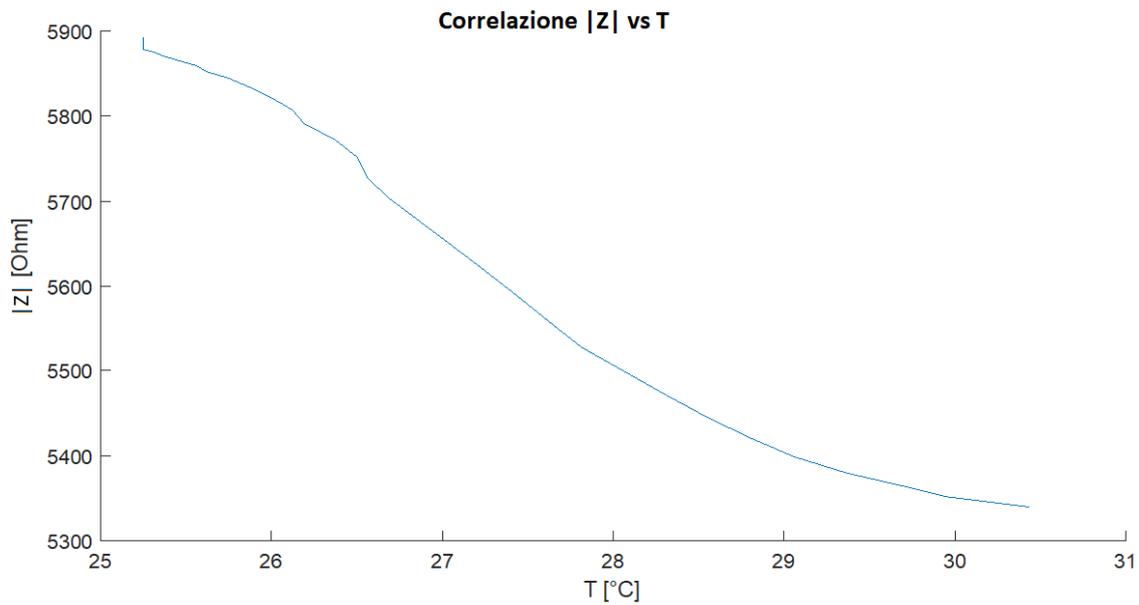


Figura 35. Andamento Modulo di impedenza-Temperatura (dati 29/06/20 ore 00:00-08:40)

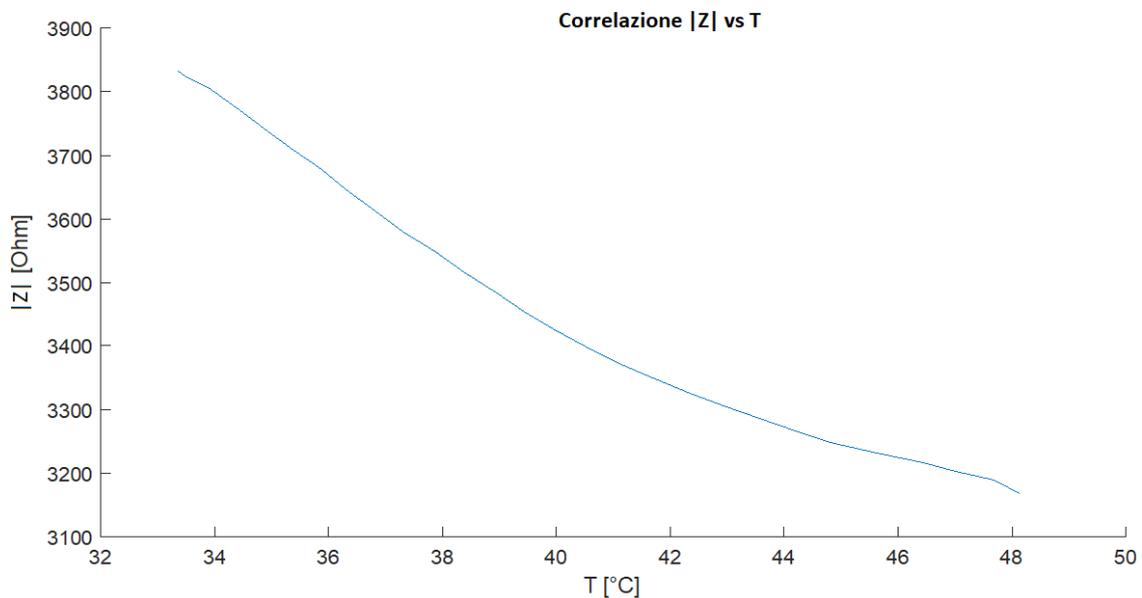


Figura 36. Andamento Modulo di impedenza-Temperatura (dati 29/06/20 ore 12:10- 16:40)

Questo andamento, come ci aspettavamo, evidenzia una proporzionalità inversa tra  $|Z|$  e  $T$ : all'aumentare infatti della temperatura, si verifica una maggiore eccitazione della struttura del materiale a livello microscopico e si ha una maggiore conducibilità elettrica, quindi una minore impedenza elettrica in termini di modulo. All'aumentare della temperatura, diminuisce il modulo di impedenza elettrica, e viceversa (vedi anche grafici Fig. 30 e Fig.31).

Possiamo poi andare a trovare quale relazione matematica lega le due variabili; per farlo usiamo il tool “Basic Fitting” di Matlab: questo tool permette anche di riportare sul grafico l’equazione relativa alla relazione trovata, nonché il relativo coefficiente di correlazione  $R^2$ .

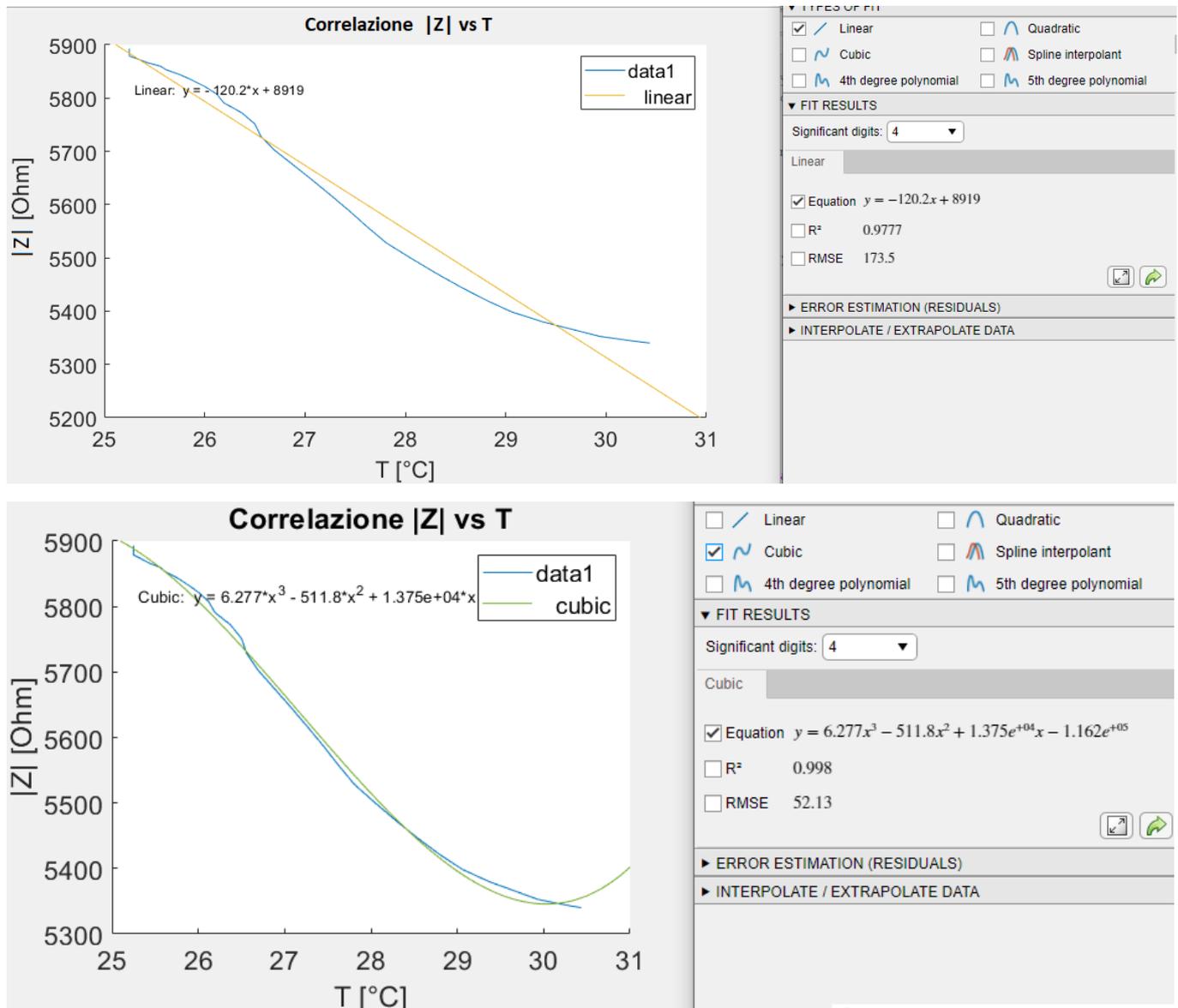


Figura 37. Applicazione del tool "Basic Fitting" (dati del 29/06/20 ore 00:00-08:40) – Approssimazione lineare (sopra) e approssimazione cubica (sotto)

La correlazione lineare che approssima la curva è quindi  $y = -120.2x + 8919$  e dove  $R^2 = 0.9777$  e  $RMSE = 173.5$ .

Se invece andiamo ad utilizzare una cubica, l’approssimazione risulta più efficace:

$$y = 6.2777x^3 - 511.8x^2 + 1.375e+04x - 1.162e+05, \text{ con } R = 0.998 \text{ e } RMSE = 52.13$$

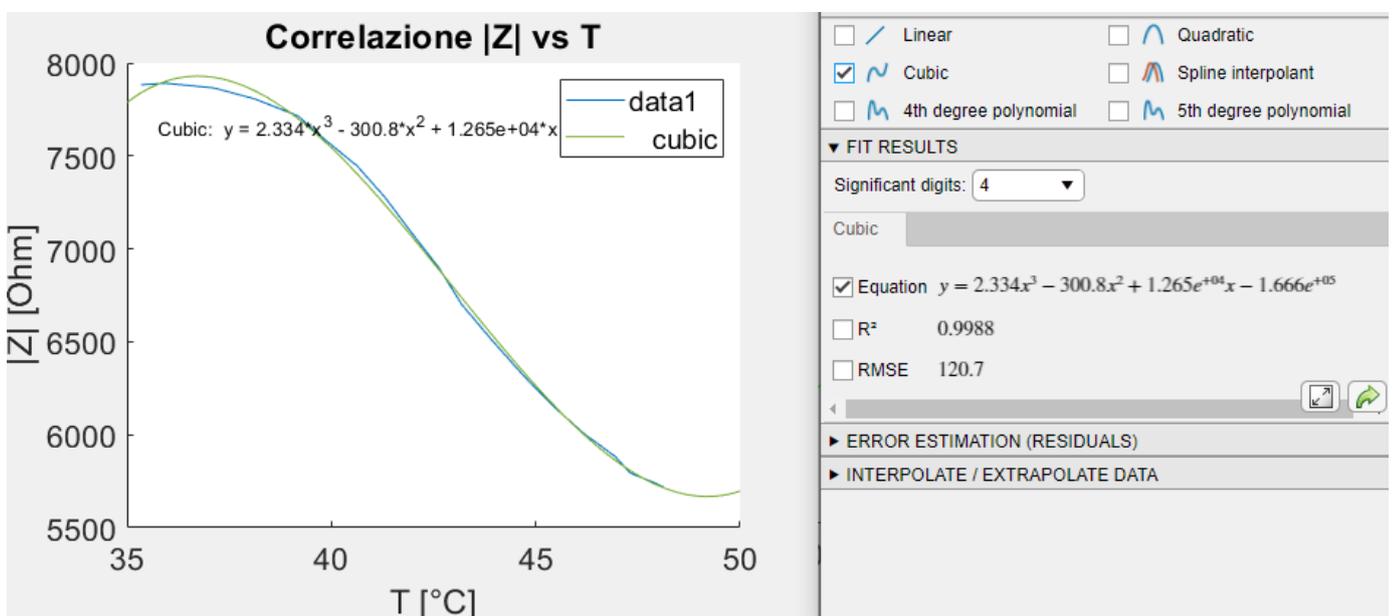
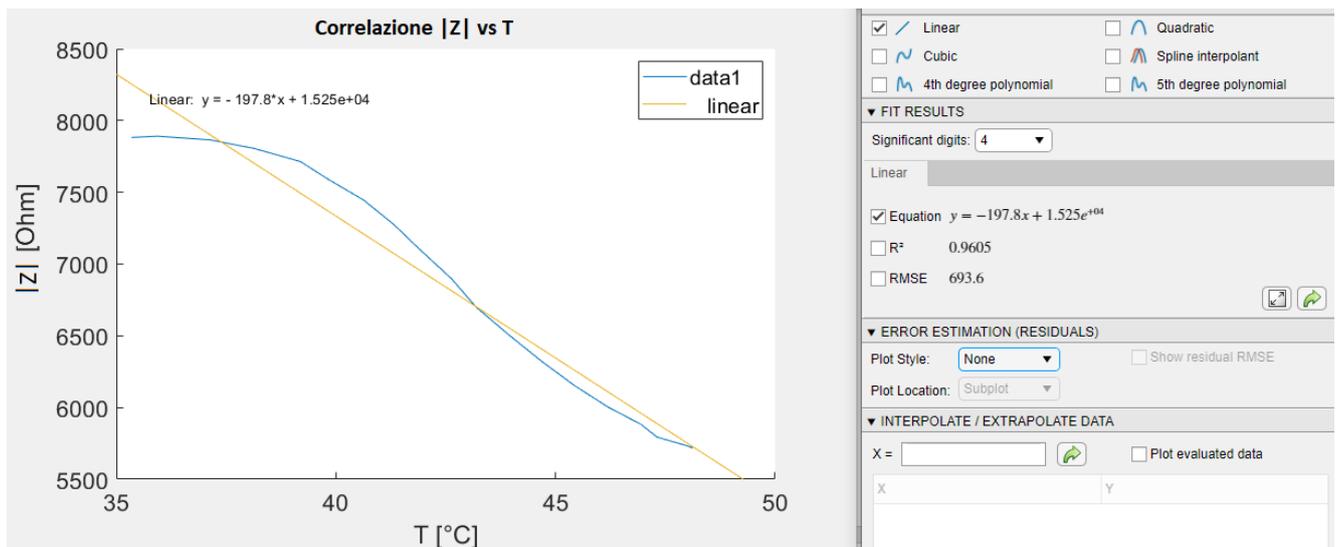


Figura 38. Applicazione del tool "Basic Fitting" (dati 29/06/20 ore 12:10- 16:40) – Approssimazione lineare (sopra) e approssimazione cubica (sotto)

La correlazione lineare che approssima la curva è quindi  $y = -197.8x + 1.525e+04$ , dove  $R^2 = 0.9605$  e  $RMSE = 693.6$ .

Se invece andiamo ad utilizzare una cubica, l'approssimazione risulta più efficace:

$y = 2.334x^3 - 300.8x^2 + 1.265e+04x - 1.666e+05$ , con  $R = 0.9988$  e  $RMSE = 120.7$ .

Andando ad applicare le stesse procedure, è possibile studiare gli andamenti del modulo in relazione alla temperatura registrata in altre giornate (es. 26/06/20 e 28/08/20), sempre per le stesse fasce orarie, come riportato nella Tabella 1.

Tabella 1. Funzioni ottenute dall'applicazione del fitting lineare e cubico

	<b>APPROSSIMAZIONE LINEARE</b> <b><math>y = p1*x + p2</math></b>	<b>APPROSSIMAZIONE CUBICA</b> <b><math>y = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4</math></b>
<b>29/06/2020</b> <b>00:00-08:40</b> <b>(T decrescente)</b>	p1 = -120.2076 p2 = 8919.1915  R <sup>2</sup> =0.97772 RMSE=173.4669	p1 = 6.2771 p2 = -511.7635 p3 = 13754.3734 p4 = -116180.517  R <sup>2</sup> =0.99799 RMSE=52.1294
<b>29/06/2020</b> <b>12:10-16:40</b> <b>(T crescente)</b>	p1 = -197.8259 p2 = 15246.9448  R <sup>2</sup> = 0.96053 RMSE= 693.5822	p1 = 2.3342 p2 = -300.8396 p3 = 12652.2175 p4 = -166591.938  R <sup>2</sup> = 0.9988 RMSE= 120.7167
<b>26/06/2020</b> <b>00:00-08:40</b> <b>(T decrescente)</b>	p1 = -481.2721 p2 = 17960.0255  R <sup>2</sup> =0.89593 RMSE=1029.2357	p1 = 157.1696 p2 = -11293.6295 p3 = 269676.2518 p4 = -2133462.2765  R <sup>2</sup> =0.95934 RMSE=643.3724

<p><b>26/06/2020</b>  <b>12:10-16:40</b>  <b>(T crescente)</b></p>	<p>p1 = -31.2669  p2 = 5495.8645    R<sup>2</sup>=0.95142  RMSE=139.2822</p>	<p>p1 = 0.2122  p2 = -26.6789  p3 = 1075.1334  p4 = -9624.0633    R<sup>2</sup>=0.99753  RMSE=31.4331</p>
<p><b>27/06/2020</b>  <b>00:00-08:40</b>  <b>(T decrescente)</b></p>	<p>p1 = -389.4342  p2 = 15381.7963    R<sup>2</sup>=0.88257  RMSE=1026.958</p>	<p>p1 = -29.7863  p2 = 2419.4007  p3 = -65597.0664  p4 = 598630.5159    R<sup>2</sup>=0.99764  RMSE=145.4457</p>
<p><b>27/06/2020</b>  <b>12:10-16:40</b>  <b>(T crescente)</b></p>	<p>p1 = -45.1027  p2 = 6103.358    R<sup>2</sup>=0.96608  RMSE=157.8416</p>	<p>p1 = 0.43882  p2 = -55.0846  p3 = 2243.8196  p4 = -25364.1914    R<sup>2</sup>=0.99958  RMSE=17.5248</p>
<p><b>28/06/2020</b>  <b>00:00-08:40</b>  <b>(T decrescente)</b></p>	<p>p1 = -151.0867  p2 = 9846.0157    R<sup>2</sup>=0.83395  RMSE=488.0842</p>	<p>p1 = 46.2879  p2 = -3753.116  p3 = 101136.0236  p4 = -899959.4948    R<sup>2</sup>=0.99214  RMSE=106.2208</p>

<b>28/06/2020</b> <b>12:10-16:40</b> <b>(T crescente)</b>	$p1 = -16.7644$	$p1 = 0.14286$
	$p2 = 5091.5263$	$p2 = -18.0215$
	$R^2=0.97896$	$p3 = 735.1967$
	$RMSE=51.3653$	$p4 = -5283.1442$
		$R^2=0.9997$
		$RMSE=6.1809$

Notiamo come sia possibile individuare sempre una relazione di proporzionalità inversa tra impedenza elettrica e temperatura, anche se con una certa variabilità tra i diversi giorni (dovuta soprattutto al fatto che considerando le stesse fasce orarie di giorni differenti l'andamento delle temperature registrate è differente).

Inoltre, possiamo notare una differenza per quanto riguarda la pendenza delle curve di correlazione  $|Z|$  vs T appartenenti allo stesso giorno ma con andamento di temperatura crescente e decrescente: abbiamo che per quanto riguarda la fascia oraria 00:00-08:40, considerata decrescente in termini di temperatura, le curve risultano essere più inclinate rispetto a quanto accade nelle curve ottenute considerando un andamento crescente della temperatura. Questo comportamento potrebbe essere attribuito al fatto che nella fase di raffreddamento del blocco di calcestruzzo la correlazione tra modulo di impedenza elettrica e temperatura è più forte oppure ad una certa inerzia termica che è tipica del calcestruzzo.

Per inerzia termica, in termodinamica, si intende la capacità di un materiale o di una struttura di variare più o meno lentamente la propria temperatura in risposta a variazioni di temperatura esterna o ad una sorgente di calore/raffreddamento interno (è il perfetto analogo dell'inerzia dei sistemi meccanici, basta sostituire l'energia meccanica alla termica). Come grandezza, l'inerzia termica risulta

direttamente proporzionale al calore specifico dei materiali e alla loro massa, invece è inversamente proporzionale alla conducibilità termica e alla differenza di temperatura fra interno ed esterno [43].

Il calcestruzzo e i laterizi compatti (ma anche le pietre naturali) sono materiali ad alta inerzia termica, capaci di rallentare il flusso di calore in uscita da un edificio o da un elemento campione [44].

Nel nostro caso a causa dell'inerzia termica il blocco tende a raffreddarsi in un tempo maggiore rispetto a quello necessario per riscaldarlo: abbiamo infatti una inclinazione della retta delle temperature crescenti maggiore rispetto alla pendenza della curva decrescente della temperatura.

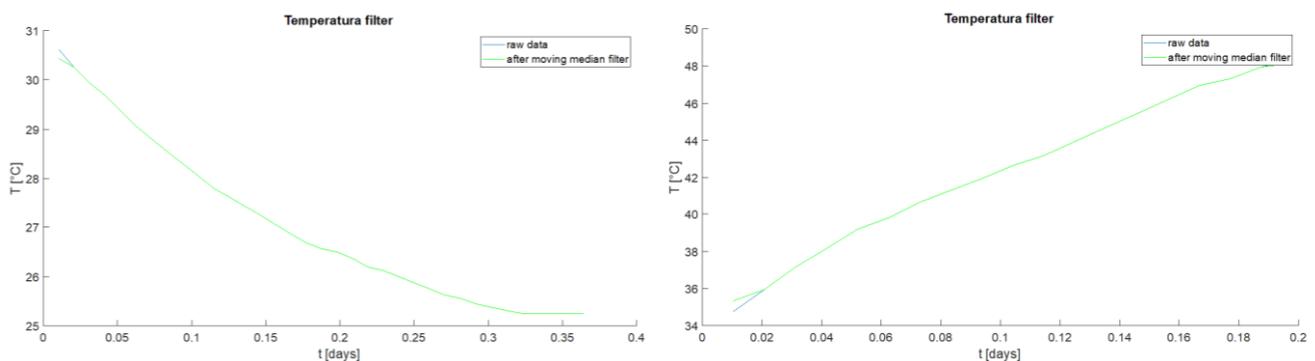


Figura 39. Andamento temperatura fasce orarie 00:00-08:40 (destra) e 12:10-16:40 (sinistra)

Questo andamento delle temperature e l'inerzia termica vanno determinare anche una pendenza minore delle curve di correlazione " $|Z|$  vs  $T$ " registrate per andamenti crescenti della temperatura rispetto a quelli per temperature decrescenti: abbiamo una variazione più significativa dell'impedenza elettrica a parità di variazione di variazione di temperatura nella fase di raffreddamento piuttosto che in quella di riscaldamento.

I risultati che abbiamo ottenuto dal processamento dei dati acquisiti sono il punto di partenza per la valutazione delle possibili correlazioni con i parametri che influenzano l'andamento dell'impedenza elettrica, fra cui, oltre alla temperatura, possiamo menzionare umidità, ingresso di acqua, formazione di crepe, ecc. È possibile poi andare a variare alcune caratteristiche e valutare la risposta in termini di impedenza elettrica: dalle variazioni studiate sarà possibile costruire una relazione che permetterà l'analisi e il monitoraggio di tale caratteristica in blocchi diversi da quello "campione".

## 4.CONCLUSIONI

La presente tesi ha cercato di analizzare il rapporto tra impedenza elettrica e caratteristiche riscontrabili in elementi in calcestruzzo: dalla letteratura scientifica in merito deduciamo che la misura dell'impedenza elettrica costituisce un metodo di indagine non distruttiva molto efficace per valutazioni di parametri strutturali e composizionali, oltre a permettere lo studio di una possibile correlazione con parametri quali temperatura, umidità, ioni cloruro e acqua. Valutare la misura di impedenza elettrica costituisce un test piuttosto immediato e con risultati che variano sensibilmente nelle diverse condizioni, dimostrandosi pertanto una tecnica valida per molteplici scopi. Questo metodo infatti risulta già utilizzato in molti strumenti commerciali, sia per cantieri o comunque applicazioni in campo, sia per applicazioni da laboratorio: permette di ricavare parametri che non sarebbero deducibili dall'esterno (es. danni o fessurazioni interne). Inoltre, la misura di impedenza elettrica rappresenta un metodo non distruttivo e un valido parametro per le indagini di tipo SHM.

Per misurare l'impedenza elettrica, come abbiamo visto, le configurazioni sono diverse, ma le più comuni prevedono 2 o 4 elettrodi (la seconda opzione è preferibile, perché permette di evitare l'errore di inserzione e quindi la polarizzazione degli elettrodi), così come è possibile usare una corrente continua che alternata (la seconda è preferibile, in quanto permette di evitare la polarizzazione del materiale). Nel caso del blocco di calcestruzzo monitorato presso l'Università Politecnica Delle Marche, considerato nel presente lavoro di tesi, la configurazione usata prevede l'utilizzo di array di elettrodi con spaziature inter-elettrodo e disposizioni differenti (1 cm, rivolti verso il basso, e 4 cm, rivolti verso l'alto) in modo tale da poter monitorare tutto il volume di interesse, considerando che gli elettrodi si trovano a una distanza di 5 cm dalla base del campione e che in tal modo si rispettano le raccomandazioni presenti in letteratura [45]; inoltre, è previsto anche un sensore di temperatura collegato in prossimità di uno degli array di elettrodi. Il sistema di acquisizione dati per il sensore di temperatura è un Arduino Nano, mentre per l'acquisizione di impedenza elettrica è stata usata una scheda di acquisizione EVAL-AD5940.

Il blocco di calcestruzzo considerato nel presente lavoro di tesi è analogo ai campioni realizzati all'interno del progetto EnDurCrete per la fase di validazione. Mentre la nostra analisi si è limitata all'utilizzo di un solo array, nel progetto EnDurCrete saranno disposte 4 schede di acquisizione per il monitoraggio di tutti e 4 gli array di elettrodi inglobati nei pannelli di calcestruzzo, per effettuare

un'indagine più completa delle possibili correlazioni tra impedenza elettrica (e, in particolare, la sua parte reale) e parametri quali temperatura, ingresso di acqua e presenza di ioni cloruro nei blocchi di calcestruzzo, al fine di poter realizzare un sistema di monitoraggio dedicato al calcestruzzo sostenibile, economico e più durevole sviluppato all'interno dello stesso progetto.

I dati ottenuti dal nostro monitoraggio, opportunamente filtrati e graficati, ci mostrano che sussiste una certa periodicità nell'andamento legata all'alternanza giorno-notte e alle conseguenti variazioni di temperatura. È infatti possibile apprezzare come a una diminuzione della temperatura corrisponda un aumento del modulo dell'impedenza elettrica e quindi, di conseguenza, anche della sua parte reale, a causa di una migliore mobilità degli ioni contenuti al suo interno.

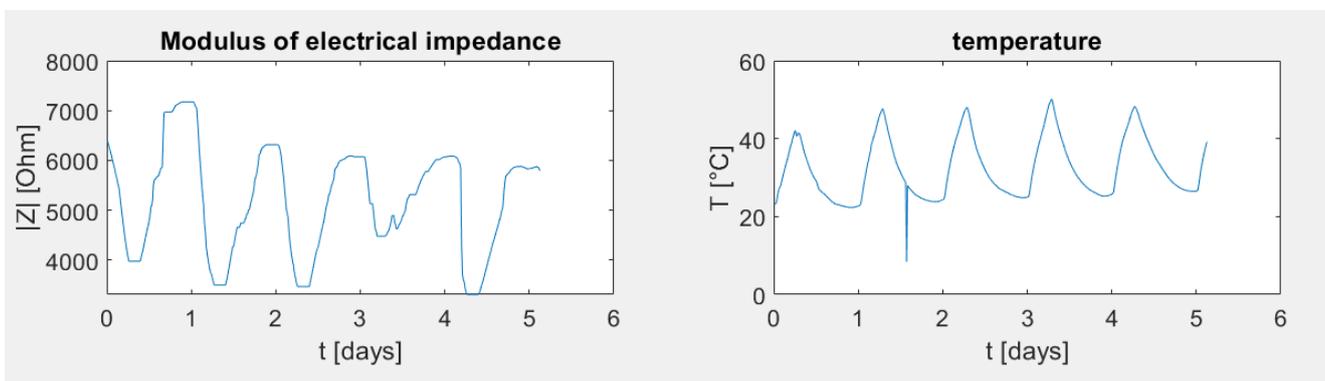


Figura 40. Confronto andamento modulo dell'impedenza elettrica - temperatura

Andiamo allora a evidenziare ancora di più la relazione di proporzionalità inversa tra modulo di impedenza elettrica e temperatura: consideriamo i dati registrati nelle giornate dal 26 al 29/06/2020 e andiamo a considerare due intervalli di tempo di qualche ora (es. 00:10 alle 08:40 e dalle ore 12:10 alle 16:40).

Come abbiamo già detto, questo andamento è quello atteso, perché la temperatura di un materiale è definita come la misura dello stato di agitazione delle entità molecolari delle quali è costituito: un incremento nella misura di temperatura allora determinerà un aumento della conducibilità termica e conseguentemente una diminuzione della misura di impedenza elettrica.

Abbiamo poi studiando le curve di correlazione “|Z| vs T” andando ad applicare due tipi di fitting: quello lineare e quello cubico. L'indice  $R^2$  è detto coefficiente di determinazione e rappresenta una proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello (statistico) utilizzato. Se  $R^2$  è prossimo ad 1 significa che il fitting utilizzato approssima bene il valore della variabile dipendente in campione, mentre se è pari a 0 significa che non è ben descritta dal fitting utilizzato.

Essendo quindi  $R^2$  più prossimo ad 1 nel caso del fitting cubico (rispetto a  $R^2$  ottenuto nel caso lineare), allora diciamo che questo rappresenta meglio l'andamento delle curve.

Sono molteplici le relazioni che possono essere stabilite tra misura di impedenza elettrica e condizioni ambientali alle quali il blocco è sottoposto (temperatura, umidità, presenza ione cloruro, ecc ...), così come possono essere individuati collegamenti con composizione, salute della struttura, presenza di fessure o porosità, ecc...

Possiamo affermare dunque che le tecniche di misura di impedenza elettrica vengono applicate con diversi scopi (sia per ispezione che per monitoraggio) e di conseguenza diversa sarà la strumentazione commerciale adottata (che considera delle relazioni presenti in letteratura per fornire dati di correlazione) o le soluzioni *ad hoc* sviluppate in laboratorio; abbiamo visto che ci sono già molti dispositivi in commercio che sfruttano l'impedenza elettrica come parametro di indagine; tra questi strumenti ricordiamo sicuramente il Resipod, che individua la presenza di armature corrose attraverso una configurazione data dal metodo Wenner. Oltre a queste configurazioni di misura, ricordiamo anche la configurazione Rebar e quella Transformer. Ad ogni modo, un sistema di monitoraggio dell'impedenza elettrica può fornire dati che possono essere correlati a molteplici parametri, a seconda dello scopo del monitoraggio stesso, pur utilizzando il medesimo sistema di acquisizione (come quello sviluppato all'interno del progetto EnDurCrete).

Possiamo quindi concludere che la configurazione di misura ottimale (e che è applicata anche nei campioni del progetto EnDurCrete) è quella che prevede 4 elettrodi e l'utilizzo di corrente alternata: con questo metodo si evita sia la polarizzazione degli elettrodi (in quanto quelli di misura sono separati da quelli di eccitazione), sia quella del materiale (che si avrebbe nel caso di corrente continua). Inoltre, la presenza di più array di elettrodi funge da parametro ridondante, che permette di ridurre gli errori dovuti al contatto non ottimale tra elettrodo e superficie del campione e di avere dati disponibili anche nel caso di guasto di uno dei sensori.

# APPENDICE

Di seguito riportiamo il codice Matlab usato per l'elaborazione dei dati di impedenza elettrica e temperatura. L'ambiente di programmazione Matlab ci ha permesso di andare a filtrare e graficare l'andamento dei dati acquisiti in modo da poterne fare uno studio più preciso, nonché studiare la possibile correlazione tra modulo dell'impedenza elettrica e temperatura.

Si parte con il comando di *"clear"* che ci permette di iniziare la stesura del nostro script chiudendo ed eliminando tutto quello che era stato scritto precedentemente. Vengono poi importati i dati dal file Excel salvato durante l'acquisizione (*"file\_dati\_blocco.xlsx"*) e si importano i dati, assegnando i nomi corrispondenti alle colonne: *"nome= data(:,n)"*, dove **n** indica la colonna **n**-esima del file, relativa al modulo dell'impedenza elettrica, alla quale decidiamo di assegnare un certo nome, mentre i due punti (*"::"*) indicano che devono essere considerate tutte le righe del file.

Per la realizzazione dei grafici del modulo, fase, della parte immaginaria e reale dell'impedenza elettrica, usiamo la funzione di *subplot*, indicando il numero di righe e colonne in cui viene divisa l'immagine e in che posizione debbano essere collocati gli assi.

Si utilizzerà poi la funzione *plot*, specificando quali saranno le variabili all'interno del grafico da realizzare (es. *plot(t, Z\_mod)* per graficare l'andamento del modulo dell'impedenza elettrica nel tempo). Si assegnerà anche un'etichetta agli assi x e y e un titolo generale al grafico (di cui è possibile stabilire anche la dimensione del font con il comando *set(gca, 'FontSize', 16)* ).

```

1 - clear all;
2 - close all;
3 - clc;
4
5
6 - data = xlsread('file_dati_blocco.xlsx');
7
8 - Z_mod = data(:,1);
9 - Z_Phi_deg = data(:,2);
10 - Z_Phi = Z_Phi_deg.*pi/180;
11 - T = data(:,5);
12 - t = (1:length(Z_mod))*1/24/4;
13 - Z_Re = Z_mod.*cos(Z_Phi);
14 - Z_Im = Z_mod.*sin(Z_Phi);
15
16
17 - figure;
18 - subplot(2,2,1);
19 - plot(t, Z_mod);
20 - xlabel('t [days]');
21 - ylabel('|Z| [Ohm]');
22 - title('Modulus of electrical impedance - Raw data');
23 - set(gca, 'FontSize', 16);
24 - subplot(2,2,2);
25 - plot(t, Z_Phi_deg);
26 - xlabel('t [days]');
27 - ylabel('Phi [degree]');
28 - title('Phase of electrical impedance - Raw data');
29 - set(gca, 'FontSize', 16);
30 - subplot(2,2,3);
31 - plot(t, Z_Re);
32 - xlabel('t [days]');
33 - ylabel('Z_Re [Ohm]');
34 - title('Real part of electrical impedance - Raw data');
35 - set(gca, 'FontSize', 16);
36 - subplot(2,2,4);
37 - plot(t, Z_Im);
38 - xlabel('t [days]');
39 - ylabel('Z_I_m [Ohm]');
40 - title('Imaginary part of electrical impedance - Raw data');
41 - set(gca, 'FontSize', 16);

```

Si passa quindi alla fase di filtraggio dei segnali.

Il comando  $M = \text{movmedian}(A, k)$  restituisce un array di  $k$ -valori mediani in punti locali, in cui ogni mediana viene calcolata su una finestra scorrevole di lunghezza  $k$  tra elementi adiacenti di  $A$ . Quando  $k$  è dispari, la finestra è centrata sull'elemento nella posizione corrente. Quando  $k$  è pari, la finestra è centrata sugli elementi attuali e precedenti.  $M$  è la stessa dimensione di  $A$ . Se  $A$  è un vettore, allora  $\text{movmedian}$  opera lungo la lunghezza del vettore. Se  $A$  è un array multidimensionale,  $\text{movmedian}$  opera lungo la prima dimensione dell'array la cui dimensione non è uguale a 1 [41].

La funzione Wavelet invece permette di effettuare una scomposizione del segnale di un certo livello seguendo una approssimazione discreta (es. "wavelet" di Meyer).

Wavelet Toolbox consente di ottenere una rappresentazione sparsa dei dati, utile per ridurre il rumore o comprimere i dati conservandone le caratteristiche più importanti [42].

Si effettua la scomposizione sia per il modulo che per la fase dell'impedenza elettrica.

```
44 - Z_mod_f = movmedian(Z_mod, 27);
45 - Z_Phi_f = movmedian(Z_Phi, 27);
46
47
48 - [c, l] = wavedec(Z_mod_f, 4, 'dmey');
49 - Z_mod_f2 = wrcoef('a', c, l, 'dmey', 4);
50 - [c2, l2] = wavedec(Z_Phi_f, 4, 'dmey');
51 - Z_Phi_f2 = wrcoef('a', c2, l2, 'dmey', 4);
52
```

Successivamente si vanno a plottare i vari segnali filtrati, inserendo una legenda dei diversi andamenti del segnale “grezzo”, dopo l'applicazione del “filtro a mediana mobile” e dopo la scomposizione mediante wavelet.

```
55 - figure;
56 - hold on;
57 - plot(t, Z_mod);
58 - plot(t, Z_mod_f, 'g');
59 - plot(t, Z_mod_f2, 'r');
60 - xlabel('t [days]');
61 - ylabel('|Z| [Ohm]');
62 - title('Median filter + wavelet - Modulus');
63 - legend('raw data', 'after moving median filter', 'after wavelet');
64 - set(gca, 'FontSize', 16);
65
```

Facciamo lo stesso per quanto riguarda la fase, sempre distinguendo tramite legenda i diversi segnali.

Ricalcoliamo quindi parte reale e immaginaria a partire dai segnali filtrati di modulo e fase dell'impedenza elettrica.

```
68 - figure;
69 - hold on;
70 - plot(t, Z_Phi);
71 - plot(t, Z_Phi_f, 'g');
72 - plot(t, Z_Phi_f2, 'r');
73 - xlabel('t [days]');
74 - ylabel('|Z| [Ohm]');
75 - title('Median filter + wavelet - Phase');
76 - legend('raw data', 'after moving median filter', 'after wavelet');
77 - set(gca, 'FontSize', 16);
78
79 - Z_Re_f = Z_mod_f2.*cos(Z_Phi_f2);
80 - Z_Im_f = Z_mod_f2.*sin(Z_Phi_f2);
```

Infine, plottiamo i dati filtrati di modulo, fase, parte reale e immaginaria dell'impedenza elettrica.

```
83 - figure;
84 - subplot(2,2,1);
85 - plot(t, Z_mod_f);
86 - xlabel('t [days]');
87 - ylabel('|Z| [Ohm]');
88 - title('Modulus of electrical impedance - Filter data');
89 - set(gca, 'FontSize', 16);
90 - subplot(2,2,2);
91 - plot(t, Z_Phi_f2);
92 - xlabel('t [days]');
93 - ylabel('Phi [degree]');
94 - title('Phase of electrical impedance - Filter data');
95 - set(gca, 'FontSize', 16);
96 - subplot(2,2,3);
97 - plot(t, Z_Re_f);
98 - xlabel('t [days]');
99 - ylabel('Z_R_e [Ohm]');
100 - title('Real part of electrical impedance - Filter data');
101 - set(gca, 'FontSize', 16);
102 - subplot(2,2,4);
103 - plot(t, Z_Im_f);
104 - xlabel('t [days]');
105 - ylabel('Z_I_m [Ohm]');
106 - title('Imaginary part of electrical impedance - Filter data');
107 - set(gca, 'FontSize', 16);
```

Figura 41. Script per graficare e filtrare dati

Le seguenti righe di codice invece sono state scritte per andare ad effettuare la valutazione dell'andamento del modulo di impedenza elettrica rispetto all'andamento della temperatura. I

comandi sono analoghi a quelli visti fino ad ora. Questo ha permesso poi di studiare la correlazione esistente tra le due variabili mediante il tool “Basic Fitting” di Matlab.

```
116 - figure;
117 - subplot(2,6,1);
118 - plot(t, T );
119 - xlabel('t [days]');
120 - ylabel('T [°C]');
121 - title('Temperature ');
122 - set(gca, 'FontSize', 16);
123
124 - Temperature_f = movmedian(T,3);
125
126 - figure;
127 - hold on;
128 - plot(t, T);
129 - plot(t, Temperature_f, 'g');
130 - xlabel('t [days]');
131 - ylabel('T [°C]');
132 - title('Temperatura filter');
133 - legend('raw data', 'after moving median filter');
134 - set(gca, 'FontSize', 16);
135
136 - figure;
137 - hold on;
138 - plot(Temperature_f, Z_mod_f2);
139 - xlabel('T [°C]');
140 - ylabel('Z_mod_f2 [Ohm]');
141 - title('Impedenza (temperatura)');
142 - set(gca, 'FontSize', 16);
```

*Figura 42. Righe aggiuntive di script per la valutazione della correlazione tra modulo dell'impedenza elettrica e temperatura*

# BIBLIOGRAFIA

- [1] “Endurcrete.” <http://www.endurcrete.eu/> (accessed Jul. 16, 2020).
- [2] J. Donnini, T. Bellezze, and V. Corinaldesi, “Mechanical, electrical and self-sensing properties of cementitious mortars containing short carbon fibers,” *Journal of Building Engineering*, vol. 20, no. June, pp. 8–14, 2018, doi: 10.1016/j.jobe.2018.06.011.
- [3] S. Dong, X. Dong, A. Ashour, B. Han, and J. Ou, “Fracture and self-sensing characteristics of super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 105, no. September 2019, p. 103427, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103427.
- [4] S. H. Lee, S. Kim, and D. Y. Yoo, “Hybrid effects of steel fiber and carbon nanotube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 185, pp. 530–544, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.071.
- [5] “Cemento rinforzato con fibre di carbonio: il materiale da costruzione del futuro? - ALLPLAN Italia S.r.l.” <https://www.allplan.com/it/cemento-rinforzato-con-fibre-di-carbonio-il-materiale-da-costruzione-del-futuro/> (accessed Jul. 01, 2020).
- [6] M. Velay-Lizancos, M. Azenha, I. Martínez-Lage, and P. Vázquez-Burgo, “Addition of biomass ash in concrete: Effects on E-Modulus, electrical conductivity at early ages and their correlation,” *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 1126–1132, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.179.
- [7] K. K. Maurya, T. Sonker, and A. Rawat, “Sustainable concrete construction by microorganism and monitoring using EMI technique: A review,” *Materials Today: Proceedings*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.169.
- [8] H. H. Pan and M. W. Huang, “Piezoelectric cement sensor-based electromechanical impedance technique for the strength monitoring of cement mortar,” *Construction and Building Materials*, vol. 254, p. 119307, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119307.
- [9] V. Talakokula, S. Bhalla, and A. Gupta, “Monitoring early hydration of reinforced concrete structures using structural parameters identified by piezo sensors via electromechanical impedance technique,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 99, pp. 129–141, 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2017.05.042.
- [10] P. Rovnaník, I. Kusák, P. Bayer, P. Schmid, and L. Fiala, “Comparison of electrical and self-sensing properties of Portland cement and alkali-activated slag mortars,” *Cement and Concrete Research*, vol. 118, no. January, pp. 84–91, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.02.009.
- [11] H. Dehghanpour and K. Yilmaz, “Investigation of specimen size, geometry and temperature effects on resistivity of electrically conductive concretes,” *Construction and Building Materials*, vol. 250, p. 118864, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118864.
- [12] M. A. Alhajj, S. Palma-Lopes, and G. Villain, “Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey,” *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 898–909, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.208.

- [13] D. L. Nguyen, M. Ngoc-Tra Lam, D. J. Kim, and J. Song, "Direct tensile self-sensing and fracture energy of steel-fiber-reinforced concretes," *Composites Part B: Engineering*, vol. 183, no. August 2019, p. 107714, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107714.
- [14] X. Dérobert, J. F. Lataste, J. P. Balayssac, and S. Laurens, "Evaluation of chloride contamination in concrete using electromagnetic non-destructive testing methods," *NDT and E International*, vol. 89, no. February, pp. 19–29, 2017, doi: 10.1016/j.ndteint.2017.03.006.
- [15] X. Zeng *et al.*, "Study on damage of concrete under uniaxial compression based on electrical resistivity method," *Construction and Building Materials*, vol. 254, p. 119270, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119270.
- [16] "catalogo Controls: macchine e strumenti di prova per l'ingegneria civile," *catalogo Controls*.
- [17] H. Shu, V. Sldqh, and X. G. H. O. Whpsr, "CATALOGO STRUMENTI CALCESTRUZZO MISURAZIONE."
- [18] F. di SCIENZE MM FF NN Dipartimento di Geoscienze Direttore Profssa Cristina Stefani, "UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA CARATTERIZZAZIONE NON INVASIVA DELLE DINAMICHE IDROLOGICHE DEI SUOLI IN PRESENZA DI IRRIGAZIONE E TRASPIRAZIONE." Accessed: Jul. 15, 2020. [Online].
- [19] "Indagini geoelettriche: spiegazioni e impieghi - Studio Geologico Bellucci." <https://www.studiogeologicobellucci.it/indagini-geoelettriche/> (accessed Jul. 01, 2020).
- [20] K. A. T. Edwards, S. H. Al-Abed, S. Hosseini, and N. A. Brake, "Properties of a magnetic concrete core transformer for application in wireless power transfer systems," *Construction and Building Materials*, vol. 227, p. 117041, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117041.
- [21] M. de Magistris, M. Morozov, G. Rubinacci, A. Tamburrino, and S. Ventre, "Electromagnetic inspection of concrete rebars," *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 389–398, 2007, doi: 10.1108/03321640710727746.
- [22] "misura resistività elettrica del calcestruzzo - Electrical resistivity measurement of concrete - qwe.wiki." [https://it.qwe.wiki/wiki/Electrical\\_resistivity\\_measurement\\_of\\_concrete](https://it.qwe.wiki/wiki/Electrical_resistivity_measurement_of_concrete) (accessed Jul. 28, 2020).
- [23] J. Yu, A. Sasamoto, and M. Iwata, "Wenner method of impedance measurement for health evaluation of reinforced concrete structures," *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 576–586, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.121.
- [24] H. J. Yim, Y. H. Bae, and J. H. Kim, "Method for evaluating segregation in self-consolidating concrete using electrical resistivity measurements," *Construction and Building Materials*, vol. 232, p. 7044605, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117283.
- [25] E. K. Melara, A. Z. Mendes, N. C. Andreczevecz, M. O. G. P. Bragança, G. T. Carrera, and R. A. Medeiros-Junior, "Monitoring by electrochemical impedance spectroscopy of mortars subjected to ingress and extraction of chloride ions," *Construction and Building Materials*, vol. 242, p. 118001, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118001.
- [26] "Resipod: Il resistivimetro per le superfici in calcestruzzo più preciso del mondo," *Catalogo resipod*.

- [27] “Modello di riferimento riconosciuto da AEEG - Servizi a Rete.” <https://www.serviziarete.it/modello-riferimento-riconosciuto-aeeg/> (accessed Jul. 01, 2020).
- [28] “Manutenzione viadotti, monitoraggio tradizionale e attivo | Ediltecnico.it.” <https://www.ediltecnico.it/72656/manutenzione-viadotti-mit-monitoraggio-tradizionale-attivo/> (accessed Jul. 08, 2020).
- [29] P. del corso Pag, “INDICE DELLE MATERIE PREMessa.” Accessed: Jul. 06, 2020. [Online].
- [30] H. Kim, X. Liu, E. Ahn, M. Shin, S. W. Shin, and S. H. Sim, “Performance assessment method for crack repair in concrete using PZT-based electromechanical impedance technique,” *NDT and E International*, vol. 104, no. April, pp. 90–97, 2019, doi: 10.1016/j.ndteint.2019.04.004.
- [31] “Strumenti portatili per prove non distruttive su calcestruzzo Soluzioni per il futuro,” *catalogo Proceq*, 1954.
- [32] “RILEVATORE DI POROSITA’ A BASSA TENSIONE - TQC Italia.” [https://tqcitaliasrl.it/it\\_it/rilevatore-di-pinhole-a-bassa-tensione/](https://tqcitaliasrl.it/it_it/rilevatore-di-pinhole-a-bassa-tensione/) (accessed Jul. 01, 2020).
- [33] “RILEVATORE DI POROSITÀ AD ALTA TENSIONE - TQC Italia.” [https://tqcitaliasrl.it/it\\_it/rilevatore-ad-alta-tensione-della-porosita/](https://tqcitaliasrl.it/it_it/rilevatore-ad-alta-tensione-della-porosita/) (accessed Jul. 01, 2020).
- [34] “A1040 MIRA - Novatest.it.” <https://www.novatest.it/prodotti/indagini-su-calcestruzzo/a1040-mira/> (accessed Jul. 01, 2020).
- [35] “AASHTO-American Association of State Highway and Transportation Officials.” <https://global.ihs.com/standards.cfm?publisher=AASHTO> (accessed Jul. 01, 2020).
- [36] T.-C. Hou, “WIRELESS AND ELECTROMECHANICAL APPROACHES FOR STRAIN SENSING AND CRACK DETECTION IN FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS MATERIALS,” 2008. Accessed: Aug. 03, 2020. [Online]. Available: <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/61606>.
- [37] Y. Zhu, H. Zhang, Z. Zhang, B. Dong, and J. Liao, “Monitoring the cracking behavior of engineered cementitious composites (ECC) and plain mortar by electrochemical impedance measurement,” *Construction and Building Materials*, vol. 209, pp. 195–201, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.132.
- [38] “Scheda di valutazione EVAL-AD5940BIOZ | Analog Devices.” <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-ad5940bioz.html#eb-overview> (accessed Jul. 15, 2020).
- [39] “AD5940 Scheda dati e informazioni sul prodotto | Analog Devices.” <https://www.analog.com/en/products/ad5940.html#product-overview> (accessed Jul. 15, 2020).
- [40] “MATLAB .” <https://it.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (accessed Aug. 04, 2020).
- [41] “Moving median - MATLAB movmedian - MathWorks Italia.” <https://it.mathworks.com/help/matlab/ref/movmedian.html> (accessed Aug. 18, 2020).
- [42] “Wavelet Toolbox - MATLAB.” <https://it.mathworks.com/products/wavelet.html> (accessed Aug. 18, 2020).
- [43] “Inerzia termica: definizione e materiali - Idee Green.” <https://www.ideegreen.it/inerzia-termica-70092.html> (accessed Oct. 02, 2020).
- [44] “Il calcestruzzo per l’efficienza energetica degli edifici.” Accessed: Oct. 02, 2020. [Online].

- [45] S. G. :10. 14359/655. Gowers, K.R.; Millard, "Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique.," *Mater J*, pp. 96, 536–541., 1999.