



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE**

**Sviluppo di materiali cementizi con capacità “self-sensing” per il monitoraggio  
in continuo delle infrastrutture**

**Development of cement materials with “self-sensing” capability for continuous  
monitoring of infrastructures**

Relatore: Chiar.ma  
Prof.ssa **Francesca Tittarelli**

Tesi di Laurea di:  
**Emily Iencenella**

Correlatore:  
Dott.ssa **Gloria Cosoli**

**A.A. 2022 – 2023**

# INDICE

<b>CAPITOLO 1</b> .....	1
<b>Introduzione</b> .....	1
1.1 Premessa .....	1
1.2 Progetto.....	2
1.2.1 Obiettivo .....	2
<b>CAPITOLO 2</b> .....	4
<b>Materiali</b> .....	4
2.1 Cemento .....	4
2.2 Acqua.....	8
2.3 Aggregato .....	9
2.3.1 Sabbia.....	10
2.4 Aggiunte conduttive .....	11
2.4.1 Fibre di carbonio.....	11
2.4.2 Biochar .....	13
2.4.3 Nanopiastine di grafene .....	15
<b>CAPITOLO 3</b> .....	17
<b>Malte cementizie con aggiunte conduttive</b> .....	17
3.1 Introduzione .....	17
3.2 Impasti definitivi.....	18
3.2.1. Mix Design delle malte .....	18
3.2.2 Preparazione dei casseri .....	18
3.2.3 Miscelazione degli ingredienti (Norma UNI) .....	20
3.2.4 Esecuzione del getto.....	24
<b>CAPITOLO 4</b> .....	25
<b>Caratterizzazione Meccanica</b> .....	25
4.1 Introduzione .....	25
4.2 Resistenza meccanica a flessione.....	26
4.2.1 Risultati della prova a flessione .....	29
4.3 Resistenza meccanica a compressione .....	30
4.3.1 Risultati della prova a compressione.....	32
4.4 Modulo Elastico dinamico .....	33
4.4.1 Risultati della prova Ed .....	35
4.5 Risultati prove meccaniche .....	36

<b>CAPITOLO 5</b> .....	37
<b>Metodi e misurazioni</b> .....	37
5.1 Misurazioni di impedenza elettrica .....	37
5.1.1 Autolab.....	38
5.2 Prove di piezoresistività .....	40
5.3 Estensimetri e Spider8.....	41
5.3.1 Montaggio estensimetri .....	43
5.4 Prove di carico .....	48
<b>CAPITOLO 6</b> .....	51
<b>Risultati</b> .....	51
6.1 Risultati impedenza elettrica.....	51
6.2 Risultati delle prove di piezoresistività .....	53
6.3 Considerazioni .....	55
<b>Conclusioni</b> .....	57
<b>Bibliografia e sitografia</b> .....	58

# CAPITOLO 1

## Introduzione

### 1.1 Premessa

Con il termine infrastruttura critica intendiamo un sistema, una risorsa, d'importanza rilevante per l'economia di un paese e per la salute e la sicurezza dei cittadini che ne fruiscono. Queste infrastrutture civili sono vulnerabili alle minacce dovute all'attività antropica (come una non corretta o mancata manutenzione o difficoltà relative ai metodi di ispezione), a condizioni ambientali aggressive, e ad eventi di natura avversa come gli eventi sismici, soprattutto in un paese come l'Italia ad alto rischio sismico.

Episodi tragici come i crolli delle infrastrutture civili ci ricordano che è necessario adottare misure adeguate ad evitarli. Proprio per questo è importante garantire costantemente l'integrità e l'efficienza della struttura, andando a rilevare costantemente lo stato degli elementi strutturali in modo da poter individuare precocemente l'insorgere di possibili pericoli che possano indebolirla.

Ad oggi questo può essere attuato attraverso tecniche di monitoraggio che ci permettono di valutare il comportamento della struttura in tempo reale.

In questo studio abbiamo testato una classe di materiali conduttivi in forma di filler e fibre inseriti nell'impasto di una malta cementizia, aventi delle caratteristiche meccaniche e funzionali che sono utili per il monitoraggio della resistività elettrica del materiale. Abbiamo sollecitato dei provini di queste malte con carichi ciclici e valutato la risposta elettrica del materiale alle sollecitazioni, misurando in particolare l'impedenza elettrica.

Essendo dei materiali resi elettricamente conduttivi, attraverso la risposta elettrica di questi componenti, è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore [1]. Questi composti cementizi in grado di monitorare l'innesco e l'evoluzione di un possibile degrado prendono il nome di materiali *"self-sensing"*.

Nella prima parte della tesi vengono analizzate le caratteristiche meccaniche di malte cementizie contenenti le aggiunte conduttive, mentre nella seconda parte dell'elaborato viene studiato come questi materiali conduttivi possono essere impiegati nel monitoraggio strutturale.

## 1.2 Progetto



Figura 1.2.1: Concept del progetto reCITY [2]

In questo contesto, l'Università Politecnica delle Marche si focalizza sull'aspetto della "Gestione di infrastrutture critiche in ambito post-sisma" [2].

### 1.2.1 Obiettivo

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è quello di generare delle malte sostenibili per l'ingegneria civile e per l'ambiente, con materiali smart con caratteristiche di "self-sensing".

All'interno di queste malte cementizie vengono aggiunti filler (biochar e nanopiastrine di grafene) e fibre (fibre di carbonio riciclate) conduttivi, in grado di conferire alla malta buone prestazioni meccaniche e di durabilità oltre alla capacità di trasmettere segnali elettrici utili per il monitoraggio del materiale stesso, in un'ottica di resilienza della struttura. Attraverso il monitoraggio del segnale elettrico si ha la possibilità di ridurre i costi di manutenzione e aumentare la sicurezza e la vita della struttura.

Questi campioni di diversi mix-design sono stati testati meccanicamente in fase di stagionatura e monitorati in termini di impedenza elettrica sia in condizioni scariche, sia durante prove sotto carico ciclico, permettendo di ricavare un quadro generico di misurazioni nel lungo periodo, tenendo conto anche delle variabilità dei dati legate all'idratazione e all'invecchiamento delle malte.

Infine, dalla valutazione dei dati ottenuti dalla sperimentazione, è stato possibile individuare il mix-design più promettente in termini di resistenza meccanica ed elettrica, ovvero quello in grado di fornirci delle variazioni di resistenza elettrica in base allo sforzo-deformazione con un segnale più pulito.

# CAPITOLO 2

## Materiali

In laboratorio sono state preparate delle malte cementizie, composte da legante (cemento), acqua e sabbia. Per lo studio condotto sono stati inseriti nei vari impasti anche dei materiali conduttivi (biochar, fibre di carbonio e nanopiastrine di grafene) che sono o sottoprodotti industriali o scarti di lavorazioni.

### 2.1 Cemento

Il cemento Portland venne brevettato nel 1824 da Aspdin, ed è il legante più utilizzato nei calcestruzzi e nelle malte, è definito come tale proprio perché fa presa e indurisce in presenza di acqua. Il precursore del cemento moderno è la calce idraulica, tra i due non c'è una netta distinzione, differiscono per il quantitativo di argilla e per la temperatura di cottura, che sono maggiori nel cemento, e gli conferiscono una maggiore prestazione meccanica.

Il cemento si ottiene dalla macinazione del clinker con piccole quantità di gesso (5 % in peso). Per produrre il clinker, che è il principale componente del cemento portland (circa 95 %) si cuociono all'interno di forni rotanti alla  $T=1400-1450\text{ }^{\circ}\text{C}$  calcari, argille, sabbie e ceneri di pirite. All'interno del forno avvengono delle reazioni chimiche e si formano alle varie temperature dei composti mineralogici.

Il materiale in uscita dal forno viene fatto raffreddare bruscamente, si ottengono delle sferette di diametro variabile tra 3-25 mm costituite per circa 80% da componenti silicatici e 20% da alluminati.

Per trasformare il clinker in cemento, il clinker va macinato all'interno di un mulino a biglie con una piccola quantità di gesso con un mulino a biglie fino ad ottenere una polvere dell'ordine del micron.

La finezza di queste polveri ha una grande importanza sulla reattività del cemento, perché durante la macinazione sulle particelle di cemento si generano tante cariche elettriche e, più è macinato finemente il cemento e maggiore è la sua superficie specifica reattiva.

L'aggiunta del gesso in fase di miscelazione è fondamentale, perché funge da *regolatore di presa*. Se il gesso non ci fosse, il cemento reagirebbe con l'acqua troppo velocemente, facendo subito presa, e non ci sarebbe il tempo per lavorarlo [3].

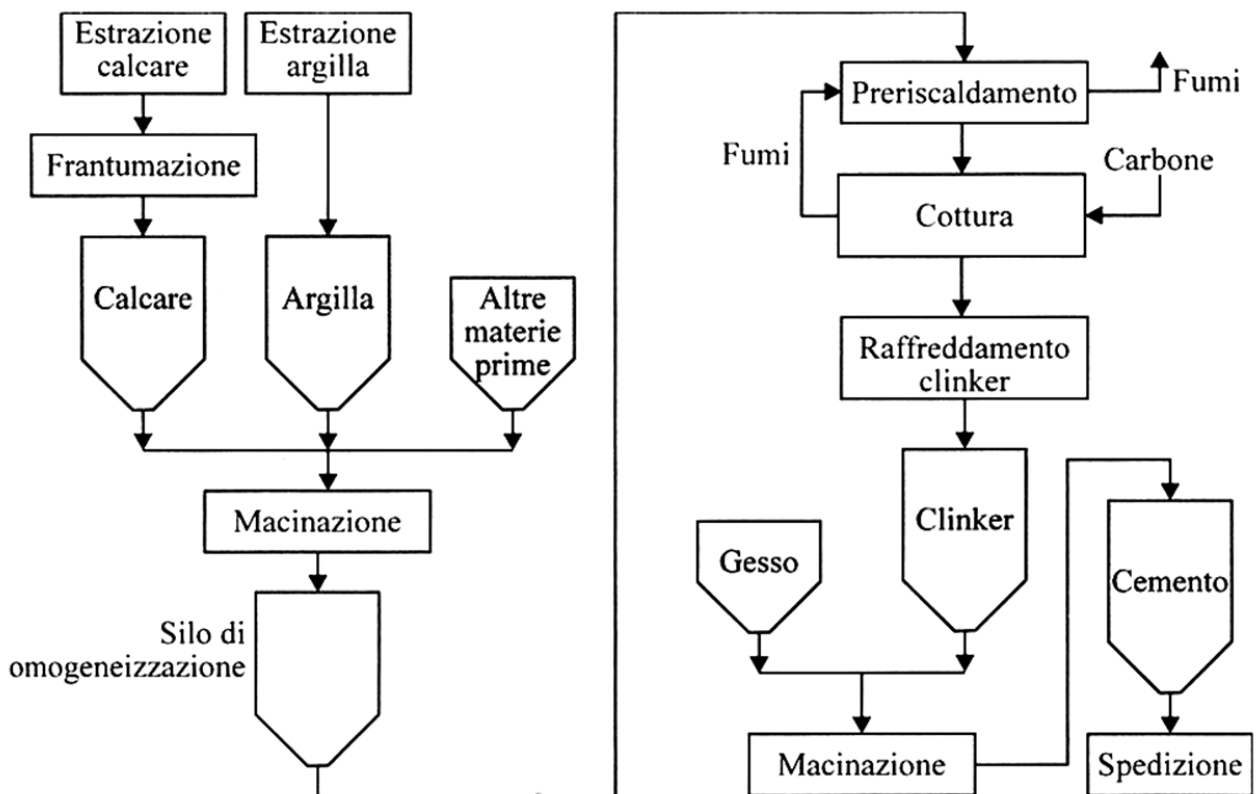


Figura 2.1.1: processo di produzione del cemento [4]

A seconda della presenza di diverse percentuali di altri costituenti mineralogici possiamo distinguere il cemento in base alla sua composizione in 5 classi CEM (normativa UNI EN 197-1:2011); che differiscono tra loro in base alla percentuale con cui il clinker viene sostituito da materiali pozzolanici (come la loppa d’altoforno, fumo di silice, cenere volante, pozzolana naturale o artificiale) o filler calcareo (Figura 2.1.2). Ogni classe è suddivisa in sottoclassi in cui cambiano le percentuali dei vari costituenti.

Da un’intensa attività di ricerca (progetto di ricerca *EnDurcrete*, coordinato da *HeidelbergCementGroup*, a cui ha preso parte anche l’UNIVPM [6]) finalizzata allo sviluppo di cementi sempre più sostenibili e alla riduzione dell’impronta di carbonio legata alla produzione di cemento; sono stati introdotti attraverso la normativa UNI EN 197-5:2021 due nuovi cementi; dunque, con questa normativa la classificazione del cemento in base alla sua composizione è passata a 6 classi CEM (Figura 2.1.3).

Per il seguente progetto abbiamo utilizzato:

- CEM II/A-LL 42,5R cemento Portland di miscela, prodotto da Colacem S.p.A, in cui si sostituisce una percentuale di clinker con il calcare (LL) in conformità con la normativa UNI EN 197-1 (Figura 2.1.2 - 4).



L'uso dei cementi di miscela permette di ridurre il quantitativo di clinker e quindi di ridurre anche lo sviluppo del calore, essendo la reazione di idratazione del cemento una reazione esotermica. Questa reazione è tanto più veloce quanto maggiore è il contenuto di clinker e la finezza del cemento.

La quantità di calore sviluppato e la velocità con la quale il calore si produce dipendono dal tipo e dalla classe di resistenza del cemento, oltre che dal suo dosaggio.

La normativa classifica il cemento in base alla sua resistenza in sei classi. Lo sviluppo della resistenza meccanica viene valutato confezionando il legante in una malta standard con rapporti: acqua/cemento ( $a/c=0,5$ ); e inerte/cemento ( $i/c=3$  in peso, secondo la EN 196-1. La resistenza viene valutata a 2, 7 e 28 giorni dal confezionamento della malta con una prova di resistenza a compressione e a seconda dei risultati ottenuti possiamo classificare il cemento in sei classi di resistenza, identificati con una sigla che indica la resistenza meccanica a 28 giorni di stagionatura e una lettera N (normale indurimento) o R (rapido indurimento) a seconda se lo sviluppo delle prestazioni meccaniche è avvenuto alle brevi stagionature.

Main types	Notation of the 27 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass <sup>a</sup> )										Minor additional constituents	
			Main constituents											
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone			
K	S	D <sup>b</sup>	natural P	natural calcined Q	siliceous V	calcareous W	T	L	LL					
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-pozzolana cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Portland-composite cement <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-94	←----- 6-20 ----->									0-5		
	CEM II/B-M	65-79	←----- 21-35 ----->									0-5		
CEM III	Blastfurnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	65-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pozzolanic cement <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Composite cement <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←----- 31-50 ----->			-	-	-	-	0-5	

<sup>a</sup> The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.  
<sup>b</sup> The proportion of silica fume is limited to 10 %.  
<sup>c</sup> In Portland-composite cements CEM II/A-M and CEM II/B-M, in pozzolanic cements CEM IV/A and CEM IV/B and in composite cements CEM V/A and CEM V/B the main constituents other than clinker shall be declared by designation of the cement (for example see clause 8).

Figura 2.1.2: Tipi di cemento e composizione percentuale in massa. UNI EN 197/1[3]

Tipi principali	Denominazione dei prodotti (tipi di cemento)		Composizione (percentuale in massa) <sup>a)</sup>											
			Costituenti principali									Costituenti secondari		
			Clinker	Loppa d'altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
Naturale	Naturale calcinata	Silicea				Calcareo	T	L <sup>c)</sup>	LL <sup>c)</sup>					
	Nome	Denominazione	K	S	D <sup>b)</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>c)</sup>	LL <sup>c)</sup>		
CEM II	Cemento Portland composito <sup>d)</sup>	CEM II /C-M	50-64	-----36-50-----									0-5	
CEM VI	Cemento composito	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5

<sup>a)</sup> I valori nel prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari  
<sup>b)</sup> Qualora utilizzati, la proporzione dei fumi di silice è limitata al 6-10% in massa  
<sup>c)</sup> Qualora utilizzato, la proporzione di calcare (somma di L, LL) è limitata al 6-20% in massa  
<sup>d)</sup> Il numero di costituenti principali diversi dal clinker è limitato a due e questi costituenti principali devono essere dichiarati nella designazione del cemento

Figura 2.1.3: Tipi di cemento e composizione percentuale in massa. UNI EN 197/5 [5]

Classe	Resistenza a compressione (N/mm <sup>2</sup> )			Tempo di inizio presa (min)
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata	
	2 gg	7 gg		
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 60
32,5 R	≥ 10	-		
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5 ≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20	-		
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5	≥ 45
52,5 R	≥ 30	-		

Figura 2.1.4: Requisiti meccanici dei cementi [3]

## 2.2 Acqua

L'acqua all'interno dell'impasto ha due principali funzioni:

- È necessaria per la reazione di idratazione degli alluminati e silicati del cemento. Va dosata in modo corretto, ricercando il giusto rapporto a/c necessario per raggiungere le prestazioni meccaniche richieste.
- Permette di rendere lavorabile l'impasto, rendendolo modellabile.

La normativa che regola i requisiti dell'acqua utilizzata per gli impasti delle malte è la UNI EN 1008.

Le prestazioni meccaniche di malte e calcestruzzi sono molto legate al rapporto a/c, perché questo rapporto influenza il volume dei pori capillari, infatti se questo rapporto è alto, il volume dei pori

capillari aumenta e il materiale risulta più poroso. Se la porosità è elevata si ha una riduzione della resistenza meccanica e della durabilità, perché il conglomerato risulta più permeabile all'acqua e alle sostanze aggressive.

La lavorabilità dell'impasto non dipende dal rapporto a/c ma è influenzata solo dal dosaggio di acqua. L'acqua d'impasto deve essere priva di impurezze, in particolare di sali a base di cloruri e da sostanze organiche e umiche, perché possono innescare fenomeni di degrado.

Il giusto quantitativo di acqua da inserire all'interno dell'impasto deve essere determinato con un corretto mix-design.

## 2.3 Aggregato

La principale differenza che ci permette di distinguere una malta da un calcestruzzo è che nella prima l'unico aggregato presente è la sabbia, mentre nel secondo viene aggiunta anche la ghiaia.

L'aggregato prende il nome di inerte perché non reagisce con gli altri elementi ma si va a mescolare con la pasta legante e l'acqua. Il contenuto di inerte influenza principalmente la resistenza meccanica e la durabilità, perché è la pasta legante la parte più porosa e più soggetta a degradarsi e a fessurarsi. Quindi confezionare una malta o un calcestruzzo con più aggregato rispetto al cemento permette di incrementare la durabilità e fornisce un vantaggio economico, in quanto l'inerte costa molto meno.

Gli aggregati per essere idonei al confezionamento di malte e calcestruzzi devono rispettare dei requisiti previsti dalla normativa UNI EN 13055 [3].

Gli aggregati vengono classificati in base alle loro dimensioni (diametro) in:

- filler (< 65  $\mu\text{m}$ )
- sabbia (< 4 mm)
- ghiaino (<8 mm)
- ghiaia (>8 mm)

ed in base alla forma in:

- aggregati di frantumazione: aventi superficie scabra e irregolare conferendo maggiore aderenza con il legante;
- aggregati alluvionali: aventi superficie liscia e tondeggianti, conferendo così una migliore lavorabilità.

Anche la scelta dell'aggregato influenza le prestazioni meccaniche della malta, in particolare dobbiamo prendere in considerazione le seguenti proprietà:

- rugosità: favorisce l'adesione tra la pasta cementizia e l'aggregato stesso;

- l'umidità: influenza il contenuto di acqua nel mix design, quindi a sua volta influenza il rapporto a/c e la lavorabilità.

### 2.3.1 Sabbia

Nel caso in esame abbiamo utilizzato come unico inerte la sabbia calcarea 0-8mm prodotta da Esincalce S.r.l. (Figura 2.3.1).

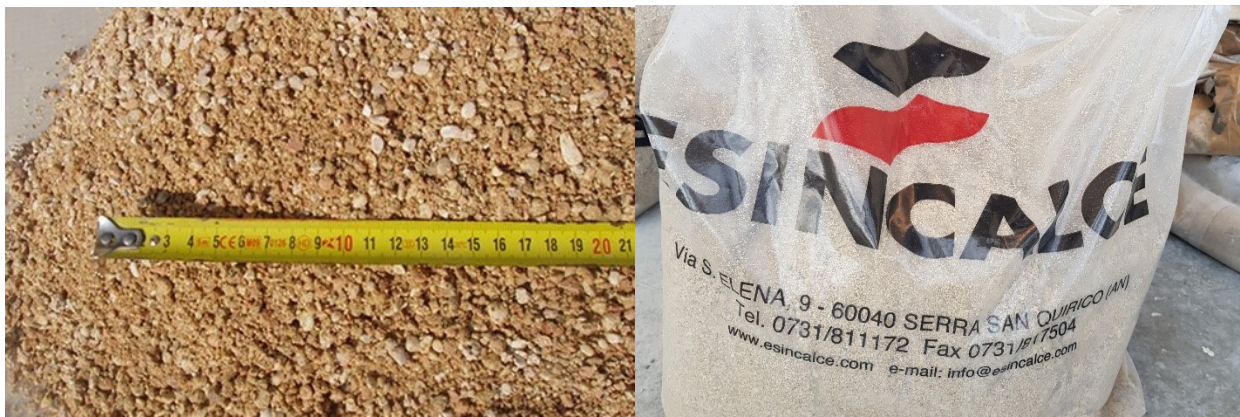


Figura 2.3.1: Sabbia Esincalce 8 mm

Per la composizione della malta, la sabbia è stata considerata in condizioni di superficie satura asciutta (s.s.a.), cioè considerando che le porosità aperte collegate all'esterno siano sature d'acqua con la superficie esterna asciutta, senza acqua che grondi dalla superficie.

In laboratorio abbiamo determinato l'umidità della sabbia su due campioni significativi, estratti da due sacchi di sabbia Esincalce, e posti per una settimana all'interno di un forno a temperatura costante di circa 90 ° C in modo da far evaporare l'acqua all'interno.

Per determinare l'umidità della sabbia abbiamo utilizzato la seguente formula:

$$U(\%) = \frac{P_{umido} - P_{secco}}{P_{secco}} \cdot 100$$

I dati sono riportati nella tabella seguente (Tabella 2.3.1).

Tab 2.3.1: umidità della sabbia

Sacco	Tara contenitore [g]	P <sub>L</sub> umido [g]	P <sub>N</sub> umido [g]	P <sub>L</sub> secco [g]	P <sub>N</sub> secco [g]	u%
1	12,06	779,11	767,05	732,29	720,23	6,50
2	12,45	661,60	649,15	623,65	611,2	6,21

Dato che i due valori sono pressoché simili, abbiamo fatto la media delle due umidità e in fase di getto abbiamo corretto la quantità d'acqua e sabbia in base al valore di umidità misurato.

## 2.4 Aggiunte conduttive

### 2.4.1 Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio sono composte al 99.9 % da carbonio grafítico puro, avente una struttura cristallina esagonale, in cui i cristalli sono disposti in piani allineati parallelamente all'asse della fibra (Figura 2.4.1).

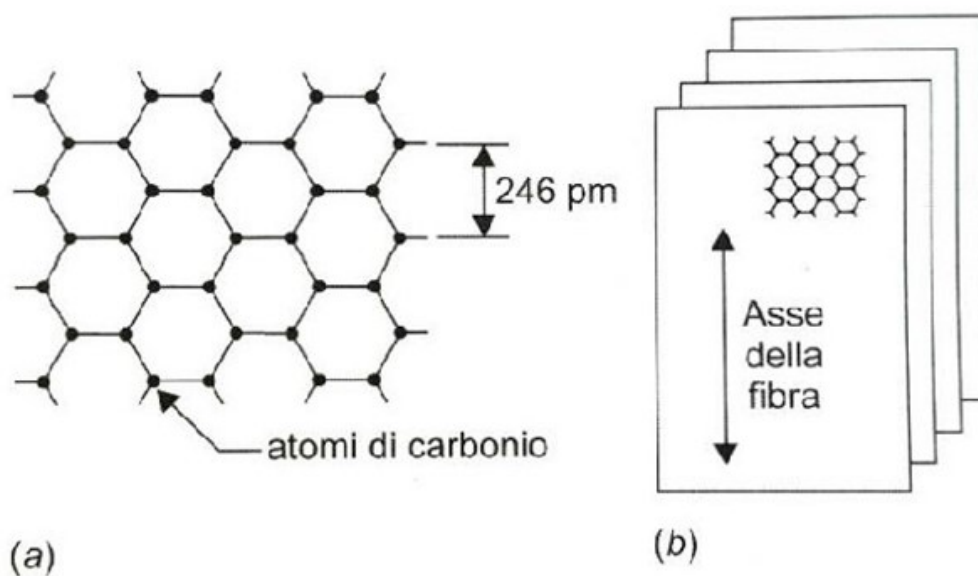


Figura 2.4.1: struttura grafítica delle fibre di carbonio [7]

È un materiale avente una struttura filiforme, molto sottile. Le fibre di carbonio sono prodotte per modificazione di fibre organiche (*PAN*) o da residui della distillazione del petrolio o del catrame (*PITCH*, *carbonio da pece*).

Per produrre i filamenti di carbonio si procede all'ossidazione e alla pirolisi termica di molecole organiche a catena lunga di diversi tipi. Inizialmente il materiale filamentoso subisce un complesso processo di ossidazione in atmosfera inerte a temperature che possono raggiungere circa 2000 °C. Il calore innesca una serie di reazioni chimiche ("*grafitizzazione*") il cui risultato è l'eliminazione degli atomi diversi dal carbonio, e la trasformazione delle molecole organiche in grafite. Le catene organiche grafitizzate infine si fondono generando un singolo filamento dalle elevatissime prestazioni meccaniche, in quanto sono molto resistenti e leggere, inoltre hanno un'elevata conducibilità elettrica e termica.

Le fibre utilizzate in questo caso studio sono fibre di carbonio riciclato (RCF) provenienti da una miscela di fibre di carbonio di tutte le origini e grafite provenienti da bobine di fibre di puro carbonio (Figura 2.4.2). Le fibre sono state fornite da Procotex Belgium SA, con un intervallo di densità variabile tra 1,7 e 2,0 g/cm<sup>3</sup> (densità media di 1.85 g/cm<sup>3</sup>), una lunghezza di 6 mm e spessore di 7 μm.



*Figura 2.4.2: fibre di carbonio RCF*

## 2.4.2 Biochar

Il biochar è un sottoprodotto ottenuto dal processo di pirolisi lenta delle biomasse.

Il processo di pirolisi è un'alternativa alla combustione, che si basa sulla decomposizione termochimica di materiali organici, attraverso l'applicazione di calore in assenza di agenti ossidanti.

Viene definita pirolisi lenta la conversione termica della biomassa per riscaldamento lento con temperatura di 400 °-600 °C ed in assenza di ossigeno. Da tale processo (Figura 2.4.3) si ottiene un residuo solido (*char*) ad alto contenuto di carbonio, un liquido nero viscoso (*tar*) e una miscela gassosa (*syngas*).

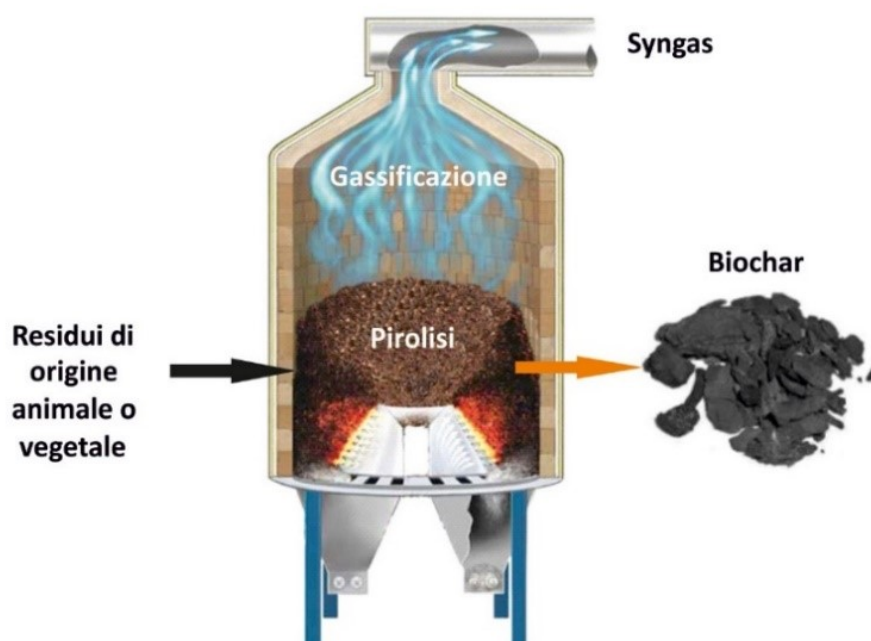


Figura 2.4.3: Processo di pirolisi lenta per ottenere biochar [8]

La parte solida, cioè il biochar, è a tutti gli effetti lo scarto del processo di produzione di energia; è un materiale amorfo, disordinato che contiene principalmente carbonio elementare, inoltre ha una struttura porosa (con dimensioni dei pori dell'ordine dei 20-30 micron), i quali permettono di intrappolare una quota significativa di CO<sub>2</sub> derivante dal processo di pirolisi lenta delle biomasse. Queste sue caratteristiche sono variabili e dipendono principalmente dalla biomassa di partenza e dalle condizioni termiche in cui avviene il processo di pirolisi [9].

Il biochar viene usato nel settore edile per le sue ottime proprietà di assorbire umidità, infatti se mescolato con una matrice cementizia rende il composto un ottimo coibente ed un eccellente regolatore di umidità interna negli edifici [10].



In questo progetto il biochar (BCH), la cui densità è pari a  $2,0 \text{ g/cm}^3$ , è stato fornito dalla ditta RES-Reliable Environmental Solutions in forma di pellet. Per favorire il suo inserimento all'interno della miscela è stato ridotto in polvere, sotto forma di filler carbonioso conduttivo attraverso la macinazione con un mulino a biglie e successivamente setacciato a  $74 \mu\text{m}$ . La riduzione in polvere è stata utile per incrementare la sua superficie specifica e permettere quindi al biochar di uniformarsi omogeneamente nell'impasto (Figura 2.4.4).



*Figura 2.4.4: Biochar*

### 2.4.3 Nanopiastrine di grafene

Il grafene è uno strato monoatomico di carbonio, disposto in un reticolo a nido d'ape (si formano angoli di  $120^\circ$  tra i legami C-C), robusto e stabile in aria. Questa struttura possiede eccellenti proprietà meccaniche e rende il grafene un eccellente conduttore elettrico e termico.

Tra le principali proprietà meccaniche del grafene troviamo:

- alto modulo di Young;
- elevata resistenza a rottura e flessibilità;
- superficie specifica molto estesa.

Per la produzione di grafene ci sono diversi metodi, ad oggi quelli più utilizzati si basano sul processo di esfoliazione della grafite, la quale presenta una struttura cristallina costituita da strati di grafene legati tra loro da interazioni deboli ("forze di Van der Waals"), proprio per la natura di questi legami la grafite risulta facilmente sfaldabile in direzione parallela al piano cristallino [11].

Nella letteratura scientifica, sotto il nome di grafene si trovano delle sue diverse varietà morfologiche, tra queste le nanopiastrine di grafene (GNP), che sono delle nanoparticelle ultrasottili di grafite a forma di piastrina (Figura 2.4.5).



*Figura 2.4.5: Nanopiastrine di grafene*

I nano materiali al carbonio, come il grafene, possono essere utilizzati per il rafforzamento delle strutture; ma anche per il rilevamento di qualsiasi cambiamento, perché queste nano/micro polveri formano delle reti di conduzione all'interno della matrice che in presenza di cambiamenti va a modificare la resistività elettrica della matrice, ecco perché è un materiale molto usato per la realizzazione di sensori meccanici [12].

Nella presente sperimentazione il grafene è un prodotto commerciale venduto da Pentachem S.r.l in forma di nanopiastrine (GNP) avente un contenuto di carbonio maggiore del 99,5%, uno spessore di 6-8 nm, una lunghezza inferiore a 5  $\mu\text{m}$  e una superficie specifica misurata tramite il modello di adsorbimento BET (Brunauer, Emmett, Teller) di 30  $\text{m}^2/\text{g}$  [13].

Le nanopiastrine di grafene (GNP) sono state utilizzate come aggiunta carboniosa di riferimento nella seguente sperimentazione.

# CAPITOLO 3

## Malte cementizie con aggiunte conduttive

### 3.1 Introduzione

In questa sperimentazione sono state testate delle malte cementizie con aggiunta di materiali elettricamente conduttivi, quali fibre e filler. Queste aggiunte hanno permesso di aumentare la conducibilità elettrica della malta e hanno permesso di ottenere un materiale self-sensing.

Abbiamo analizzato la malta sia dal punto di vista delle resistenze meccaniche, sia dal punto di vista dell'impedenza elettrica.

Un materiale self-sensing ha come proprietà quella di essere in grado di percepire e rilevare i cambiamenti, come stress e deformazioni, rendendoli dunque materiali ottimi per il monitoraggio di una struttura. È possibile rilevare questi cambiamenti attraverso il cambiamento della loro resistività elettrica (*piezoresistività*).

La piezoresistività è una caratteristica fisica dei materiali dotati di buona conducibilità elettrica, questa permette di tradurre una sollecitazione in una variazione della resistenza elettrica del materiale.

Per raggiungere la piezoresistività un materiale composito deve contenere un elemento conduttivo al suo interno, che forma una rete elettrica. Quando questi materiali vengono sollecitati o deformati, questa rete elettrica viene disturbata portando ad un cambiamento della resistività elettrica, quindi ad un cambiamento dell'impedenza elettrica misurata.

Nella presente sperimentazione sono state testate cinque diverse malte cementizie dal punto di vista meccanico ed elettrico.

Le malte studiate sono:

- REF: riferimento (legante, acqua e sabbia)
- RCF: malta cementizia con aggiunta di fibre di carbonio riciclate in quantità pari allo 0,05 % in volume
- BCH: malta cementizia con aggiunta di biochar in quantità pari allo 0,5 % in volume
- GNP: malta cementizia con aggiunta di nano-polveri di grafene in quantità pari allo 0,5 % in volume
- RCF+BCH: malta cementizia con aggiunta di fibre di carbonio riciclate e biochar rispettivamente in quantità pari allo 0,05 % e 0,5 % in volume

## 3.2 Impasti definitivi

### 3.2.1. Mix Design delle malte

Tab.3.2.1: Mix-design delle malte (kg/m<sup>3</sup>)

Miscela	Cemento	Acqua	Sabbia	RCF	BCH	GNP
REF	499	274	1497	-	-	-
GNP	496	273	1489	-	-	10,4
RCF	499	274	1496	1	-	-
BCH	496	273	1489	-	10,4	-
RCF+BCH	496	273	1488	1	10,4	-

Le malte sono state realizzate con CEM II/A-LL 42.5R, e sabbia Esincalce (0-8 mm) in condizioni s.s.a. Sono state preparate con rapporto acqua/cemento pari a 0,55.

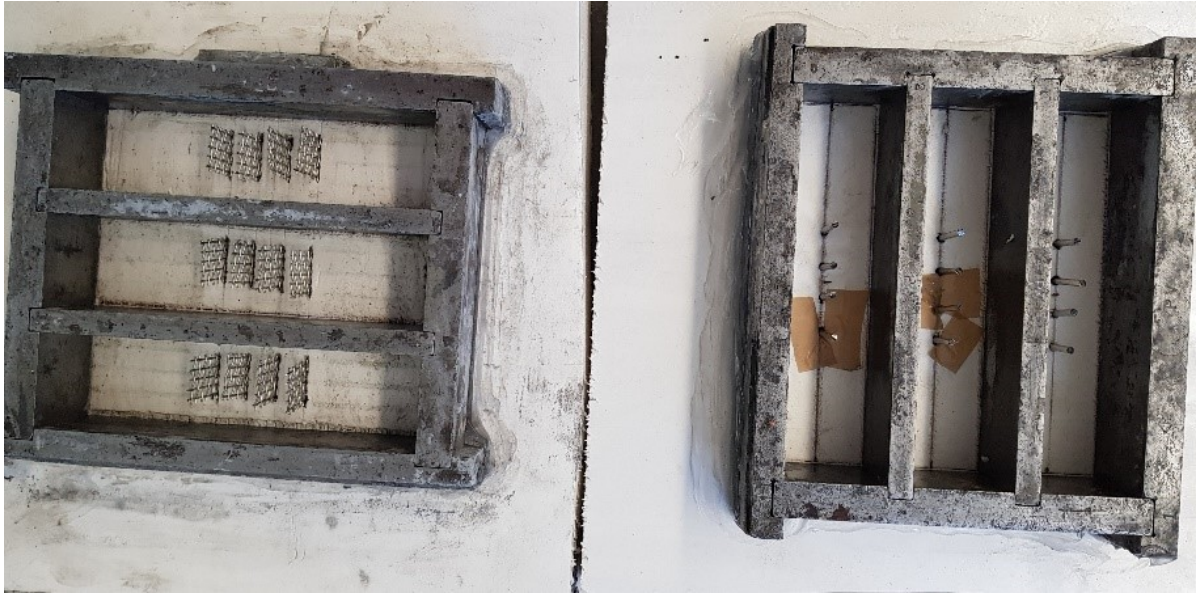
### 3.2.2 Preparazione dei casseri

Per ogni tipologia di malta sono stati realizzati due casseri metallici, ognuno contenente tre provini in cui abbiamo inserito reti metalliche (4 cm x 2 cm) e pioli in acciaio (d=0,3 cm), che abbiamo usato per monitorare l'impedenza elettrica e la piezoresistività (Figura 3.2.1).

Questi casseri metallici sono stati riposti su una base di polistirolo, in modo da poter inserire al suo interno parte delle reti e dei pioli, che saranno poi quelle parti che fuoriescono dal provino e che abbiamo usato per misurare la risposta elettrica del materiale. Prima di posizionarli abbiamo pulito le reti e i pioli con dell'acetone in modo da rimuovere eventuali residui di grasso e impurità.

Inoltre, per eseguire le prove meccaniche di resistenza a flessione e compressione e misurare il modulo elastico dinamico, abbiamo confezionato per ogni miscela altri sei provini (Figura 3.2.2).

I provini ottenuti hanno dimensioni standard (4 cm x 4 cm x 16 cm). Prima di eseguire il getto, con l'ausilio di un pennello abbiamo applicato l'olio disarmante sulle pareti metalliche interne dei casseri, per rendere più facile e accurata la fase di disarmo.



*Figura 3.2.1: Preparazione casseri con reti e pioli usati per il monitoraggio dell'impedenza e della piezoresistività*



*Figura 3.2.2: Cassero per provini usati nelle prove meccaniche*

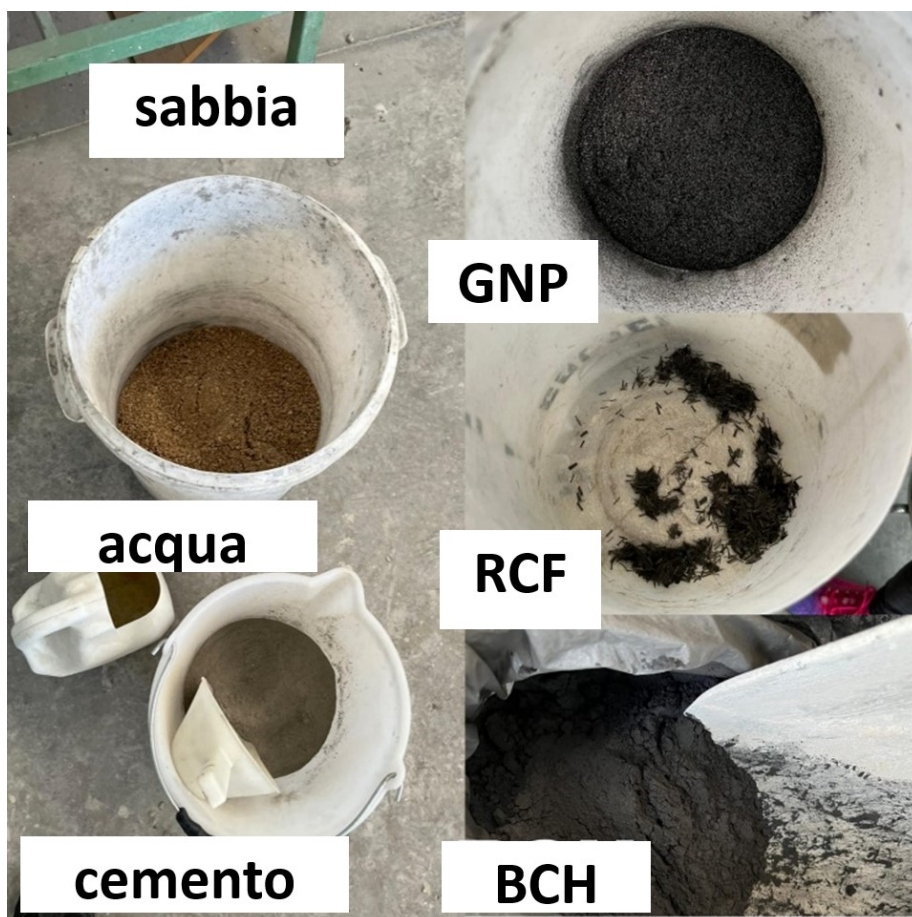
### 3.2.3 Miscelazione degli ingredienti (Norma UNI)

La tecnica d'impasto impiegata è quella riportata nella norma UNI EN 196-1.

La procedura eseguita è la seguente:

1. Pesato tutti i vari componenti;
2. Mescolato la sabbia con le rispettive aggiunte conduttive previste per le diverse malte con una l'ausilio di una cazzuola, in modo da distribuire il più uniformemente possibile i vari componenti;
3. Aggiunto il cemento e mescolato con l'ausilio di una cazzuola;
4. Aggiunto l'acqua;
5. Mescolato con l'ausilio di un trapano miscelatore a frusta singola tutto il mix fino a ottenere un impasto omogeneo per circa 5 minuti.

Il procedimento usato è lo stesso per ogni diverso impasto.



*Figura 3.2.3: Rappresentazione dei vari componenti delle diverse malte*

Prima di eseguire il getto della malta nei casseri, ovvero dopo aver mescolato tutti i componenti dell'impasto, è stato eseguito il test della lavorabilità (Figura 3.2.4). Per lavorabilità si intende la capacità della miscela di muoversi e deformarsi.



Si riempie un cono metallico con la malta, costipandola con dei colpi di pestello. Il cono è posto al centro di una tavola vibrante, che prima di azionarla va rimosso con cautela. Tolto il cono metallico si fa partire la prova attivando la tavola vibrante per 15 cicli (colpi), osservando poi come si spande la malta (spandimento dinamico) sul vetro in cui è posizionata. Finita la prova si va a misurare il diametro raggiunto dalla malta e si risale alla consistenza-lavorabilità dell'impasto.






*Figura 3.2.4: Slump test*



Dati rilevati:

Provino	Diametro medio (mm)	Immagine
REF	198	
RCF	162	

BCH	190	 A photograph of a circular concrete specimen, likely a core or a small cylinder, resting on a light-colored surface. The specimen is dark grey and has a rough, textured appearance. It is held in place by two vertical metal strips. A ruler is placed horizontally below the specimen, showing a scale from 0 to 23 cm. The ruler has the text 'COMEC STAMPATO IN DIGITALE CON' and 'www.comec-italia.it' printed on it.
RCF+BCH	167,5	 A photograph of a circular concrete specimen, similar to the one above, resting on a light-colored surface. The specimen is dark grey and has a rough, textured appearance. It is held in place by two vertical metal strips. A ruler is placed horizontally below the specimen, showing a scale from 0 to 23 cm. The ruler has the text 'COMEC STAMPATO IN DIGITALE CON' and 'www.comec-italia.it' printed on it.
GNP	181	 A photograph of a circular concrete specimen, similar to the ones above, resting on a light-colored surface. The specimen is dark grey and has a rough, textured appearance. It is held in place by two vertical metal strips. A ruler is placed horizontally below the specimen, showing a scale from 0 to 23 cm. The ruler has the text 'COMEC STAMPATO IN DIGITALE CON' and 'www.comec-italia.it' printed on it.

Tutti gli impasti sono stati confezionati con una lavorabilità plastica, poiché il valore dello spandimento è risultato compreso tra 140 e 200 cm, secondo la norma UNI EN 1015-6.

### 3.2.4 Esecuzione del getto

I vari impasti ottenuti dall'aspetto uniforme e lavorabile, sono stati versati negli appositi casseri, vibrati manualmente in modo da costipare la malta e ridurre il più possibile la presenza di bolle d'aria all'interno.

La superficie esterna è stata rasata con una cazzuola per rimuovere la malta in eccesso ed ottenere i provini dalla dimensione uniforme (Figura 3.2.5).



*Figura 3.2.5: Rasatura della malta*

La procedura prosegue andando a rivestire con la pellicola trasparente i getti, in modo tale da permettere all'acqua d'impasto di non evaporare. Successivamente sono stati riposti a stagionare all'interno della cella di stagionatura presente nel laboratorio a temperatura (T) e umidità relativa (UR) costanti (T=20 ° e UR=100 %).

Lo scassero dei provini è stato effettuato dopo due giorni dal getto, i provini sono stati poi avvolti nella pellicola per altri 5 giorni, dopodiché sono stati lasciati stagionare all'aria fino all'esecuzione dei vari test in cella di stagionatura.

# CAPITOLO 4

## Caratterizzazione Meccanica

### 4.1 Introduzione

La resistenza meccanica è una caratteristica fondamentale per un materiale da costruzione, viene indicata con  $R$  ed è il massimo sforzo  $\sigma$  che un materiale inteso come un provino di forma geometrica determinata è in grado di sopportare prima di rompersi. A seconda del tipo di sforzo applicato si parla di resistenza  $R_c$  e  $R_f$ , rispettivamente se si tratta di sforzo applicato a compressione o a flessione.

Nel caso in esame le prove meccaniche effettuate sui provini prismatici realizzati (40 mm x 40 mm x 160 mm) sono quelle a flessione a compressione e di modulo elastico dinamico, eseguite a 2,7 e 28 giorni dal getto.

Queste prove sono state effettuate in accordo con la normativa UNI EN 1015-11 misurando la resistenza a compressione e flessione su provini di malta cementizia. Quando testiamo le malte, la normativa ci fornisce la dimensione standard dei provini e ci dice di testarle meccanicamente prima a flessione e poi a compressione.

## 4.2 Resistenza meccanica a flessione

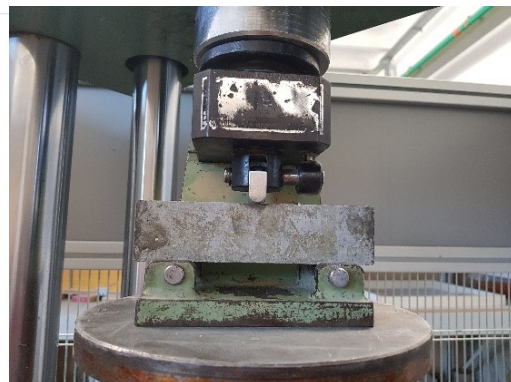
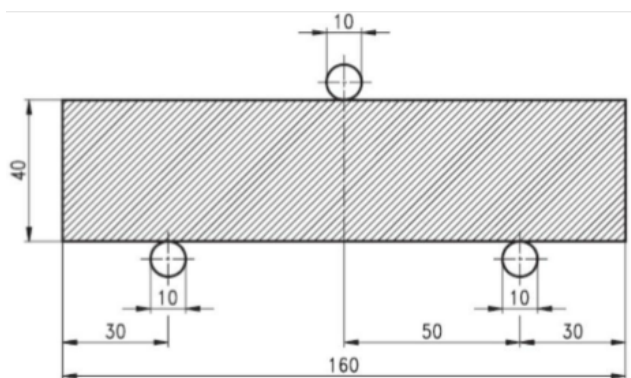
L'apparecchiatura utilizzata per eseguire la prova è una pressa idraulica (Figura 4.2.1) con carico massimo di 400 kN munita di cella di carico collegata ad un terminale che registra i dati.

Attraverso la cella si è potuto ricavare il valore della forza resistente espressa dal provino contro l'avanzamento del pistone cilindrico.



*Figura 4.2.1: pressa idraulica per la prova a flessione e compressione*

La prova a flessione si esegue disponendo il provino longitudinalmente sul supporto metallico costituito da due appoggi posti a distanza di 100mm tra loro. Al di sopra del provino è applicato un carico di punta centrale in corrispondenza del baricentro del provino (Figura 4.2.2 - 3).



*Figura 4.2.2: schema di vincolo prova a flessione a tre punti [7]*

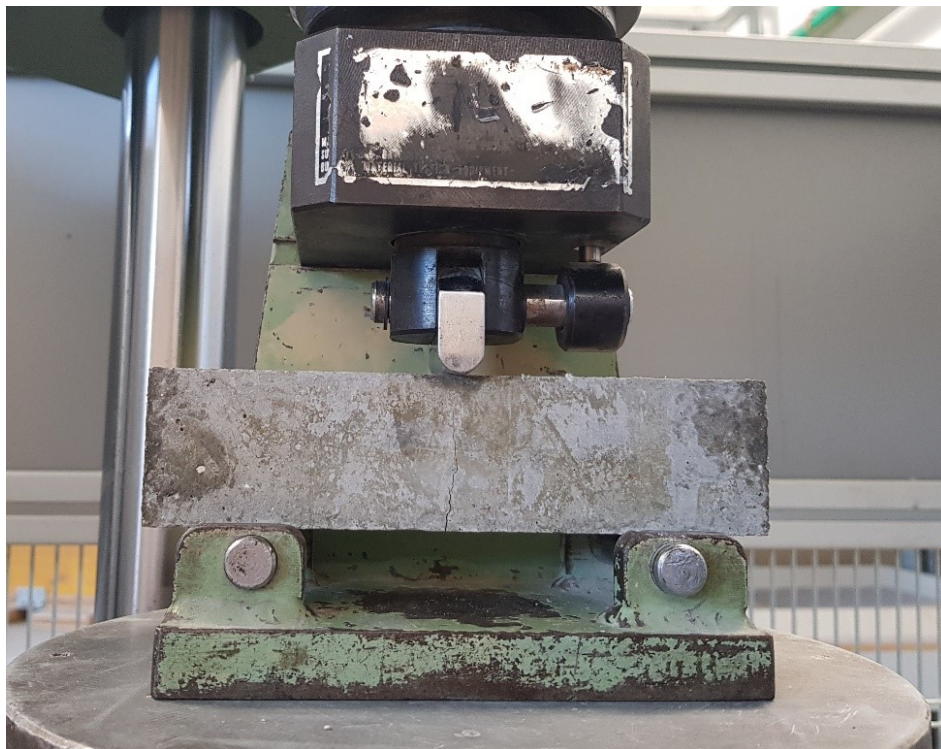
*Figura 4.2.3: prova a flessione in laboratorio*

Una volta che il provino è stato correttamente posizionato, si avvia la prova, che consiste nell'applicazione di un carico che aumenta gradualmente fino ad arrivare alla rottura del provino per flessione.

Con questa prova, il provino sollecitato a flessione si deforma e all'interno si generano delle sollecitazioni interne che sono rispettivamente: di trazione all'intradosso del provino e di compressione all'estradosso del provino (parte superiore dell'asse neutro).

La rottura si manifesta per la formazione di una fessura nella mezzeria del provino, che si innesca nella parte inferiore, cioè nella parte sollecitata a trazione e si propaga verso l'alto via via che aumenta la forza applicata sul provino (Figura 4.2.4).

La fessura si innesca nella zona sollecitata a trazione perché nei materiali ceramici la resistenza a trazione è circa 10 volte più bassa di quella a compressione, ecco perché in questa zona si forma e si propaga la cricca.



*Figura 4.2.4: Formazione e propagazione della cricca nella zona tesa*



*Figura 4.2.5: rottura del provino a flessione*

Dalla prova meccanica a flessione è stata ottenuta la tensione massima a flessione  $F$  (N) del provino, e nota geometria del provino, è stata ricavata la resistenza a flessione  $R_f$  (MPa) con la seguente formula:

$$R_f = \frac{3 * F * l}{2 * b * h^2}$$

Dove:

- $R_f$ : resistenza a flessione (MPa);
- $F$ : carico max applicato;
- $l$ : distanza tra i due appoggi (100 mm);
- $b$ : larghezza provino (40 mm);
- $h$ : altezza provino (40 mm).

## 4.2.1 Risultati della prova a flessione

In Figura 4.2.6 sono riportati i valori dei risultati ottenuti attraverso la prova a flessione per ogni tipologia di malta, eseguita a 2,7 e 28 giorni di stagionatura.

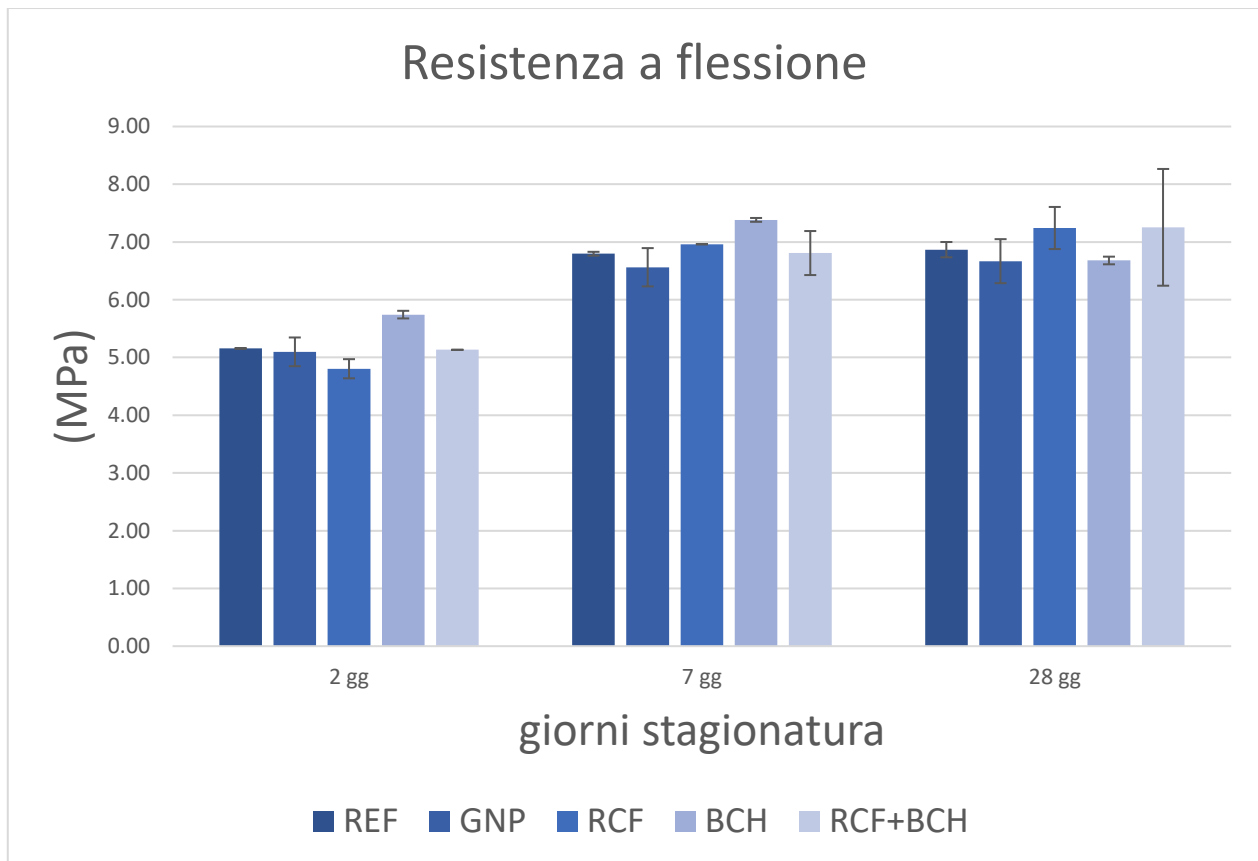


Figura 4.2.6: grafico relativo alla prova a flessione

Dai risultati ottenuti si può notare che la resistenza meccanica a flessione aumenta all'aumentare del tempo di stagionatura, come aspettato. Rispetto alla miscela di riferimento, vediamo che le miscele RCF e RCF+BCH hanno una resistenza a flessione maggiore a 28gg e tra loro comparabile. Questo è dovuto alla presenza delle fibre di carbonio, che fungono da ponte tra le fessure aumentando quindi il carico di rottura.



### 4.3 Resistenza meccanica a compressione

La prova meccanica di resistenza a compressione è stata eseguita utilizzando la pressa idraulica precedentemente descritta. Rispetto alla prova a flessione, in questa cambia il supporto, che è costituito da due piastre metalliche di superficie regolare e il provino in questione ha dimensioni 40 mm x 40 mm x 80 mm, poiché è quello che si genera a seguito della rottura a flessione (Figura 4.3.1).

La prova viene eseguita esercitando una forza di compressione perpendicolare al provino, su una superficie di dimensione 40 mm x 40 mm.



*Figura 4.3.1: supporto metallico per prova a compressione e posizionamento del provino*

La macchina idraulica rileva la forza di rottura, attraverso cui è possibile risalire alla tensione di rottura. Conoscendo la forza  $F$  (N) e l'area su cui è applicato il carico di dimensione 40 mm x 40 mm si ricava la resistenza a compressione  $R_c$ , con la seguente formula, usata nel caso di provini cubici:

$$R_c = \frac{F}{a^2}$$

Dove:

- $R_c$ : resistenza a compressione (MPa);
- $F$ : forza max applicata al provino (N);
- $a$ : lato generico della sezione trasversale di un provino cubico (40 mm).

Il provino al termine della prova assume la caratteristica forma a clessidra (Figura 4.3.2).



*Figura 4.3.2: provino portato a rottura per compressione, forma a clessidra.*

### 4.3.1 Risultati della prova a compressione

In Figura 4.3.3 viene riportato il grafico relativo alle prove di resistenza a compressione eseguite sulle diverse malte a 2, 7 e 28 gg di stagionatura.

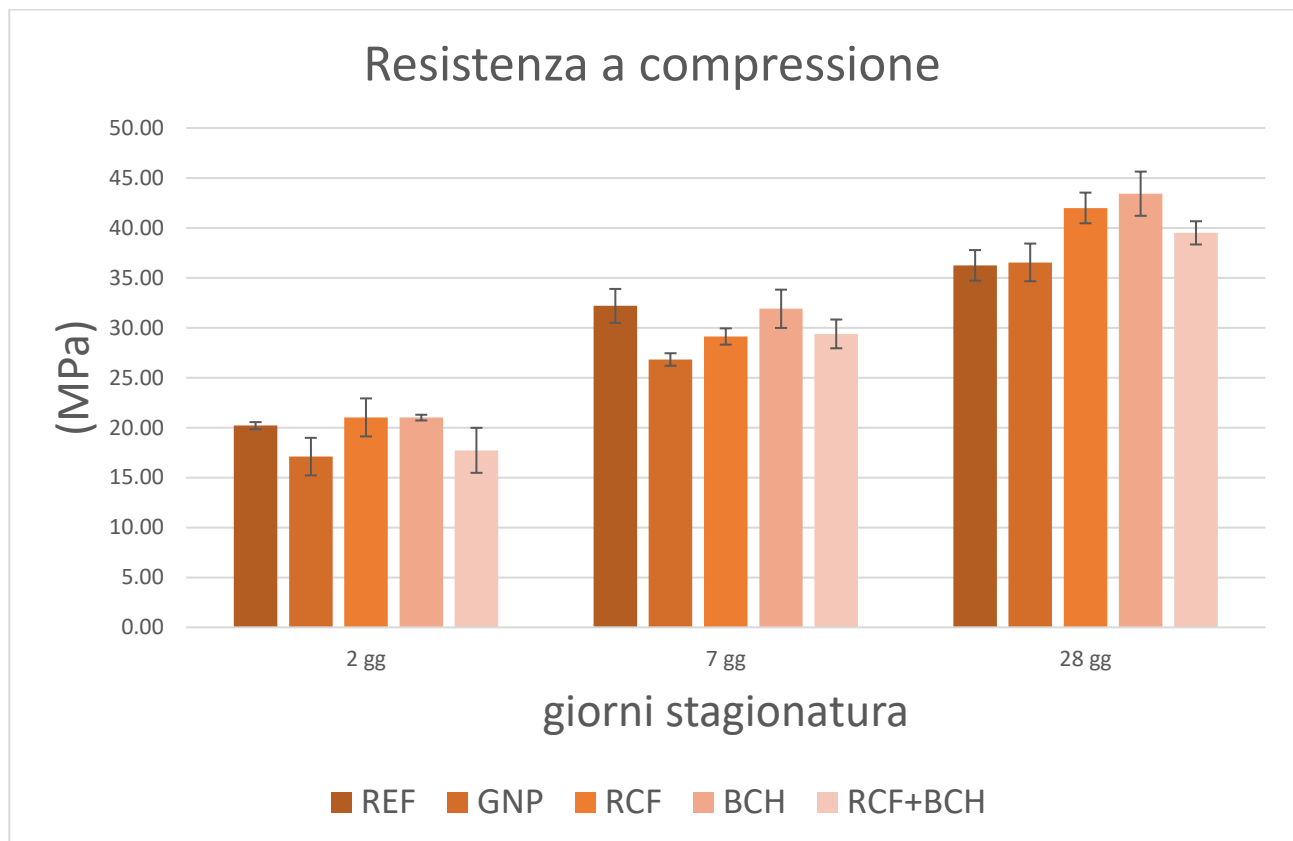


Figura 4.3.3: Grafico relativo alla prova di compressione.

Dal seguente grafico dove possiamo esaminare l'andamento della resistenza a compressione  $R_c$  per i vari impasti, vediamo che all'aumentare del tempo di stagionatura la resistenza a compressione aumenta, come aspettato.

Vediamo che a 28 giorni di stagionatura tutti i campioni contenenti le aggiunte conduttive hanno una resistenza a compressione maggiore rispetto al riferimento. Tra questi, il minimo valore di resistenza a compressione raggiunto si ha per GNP, mentre il massimo valore si ha per BCH.

Comunque tutte le malte testate hanno una  $R_c$  maggiore di 35 MPa a 28 giorni.

## 4.4 Modulo Elastico dinamico

Il modulo elastico (modulo di Young  $E$ ) è un indice della rigidità del materiale. In questo studio è stato analizzato il modulo elastico dinamico attraverso l'esecuzione della prova del Pundit, normata dalla UNI EN 12504-4.

Questa è una prova non distruttiva, attraverso la quale si determina la velocità di propagazione delle onde ultrasoniche all'interno delle malte.

Il misuratore Pundit è costituito da due trasduttori collegati tramite due cavi al generatore di impulsi e la prova consiste nel misurare il tempo impiegato dall'onda ad attraversare il provino inserito tra i due trasduttori.

All'inizio lo strumento va tarato eseguendo la prova su un provino cilindrico d'acciaio e va settato lo strumento da una manopola al tempo di trasmissione dell'onda a  $25,3 \mu\text{s}$ .

Prima di eseguire la prova va applicato sulle basi laterali del provino e sulle facce dei due trasduttori uno strato omogeneo di vasellina (Figura 4.4.1) per garantire la perfetta aderenza dei trasduttori al materiale dopo di che va eseguita la prova facendo pressione costante sui trasduttori con all'interno il provino e leggendo il tempo sul display (Figura 4.4.2).



*Figura 4.4.1: applicazione della vasellina sulle basi del provino*

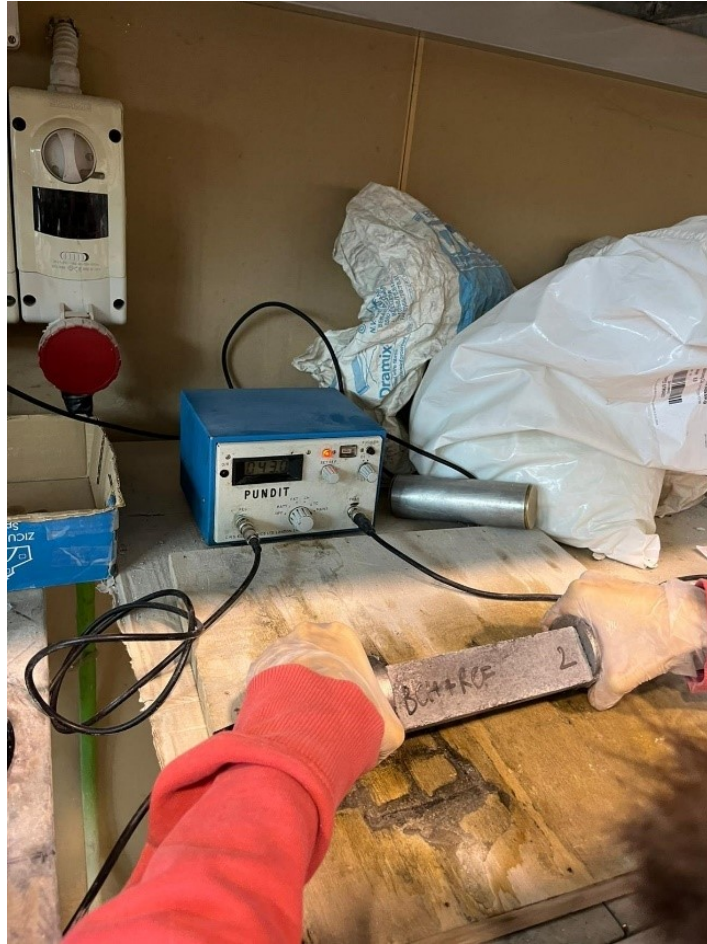


Figura 4.4.2: esecuzione della prova per la determinazione di  $E_d$

Dalla prova si ricava il tempo impiegato dall'onda ad attraversare la lunghezza del provino, e con questo si ricava la velocità:

$$v = \frac{L}{t} \text{ (m/s)}$$

Dove:

- L: lunghezza del provino di 160 mm
- t: tempo misurato in  $\mu\text{s}$

Dalla misura di velocità si ricava il modulo elastico dinamico (GPa):

$$E_d = \frac{\rho * v^2 * [(1 + \gamma) + (1 - 2\gamma)]}{1 - \gamma}$$

Dove:

- $E_d$ : modulo elastico dinamico
- v: velocità onda elastica (m/s)
- $\rho$ : densità del mezzo ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\gamma$ : modulo di Poisson (0,2)

#### 4.4.1 Risultati della prova Ed

In Figura 4.4.3 viene riportato il grafico relativo al modulo elastico dinamico per ogni provino, rilevato a 2, 7 e 28 gg di stagionatura.

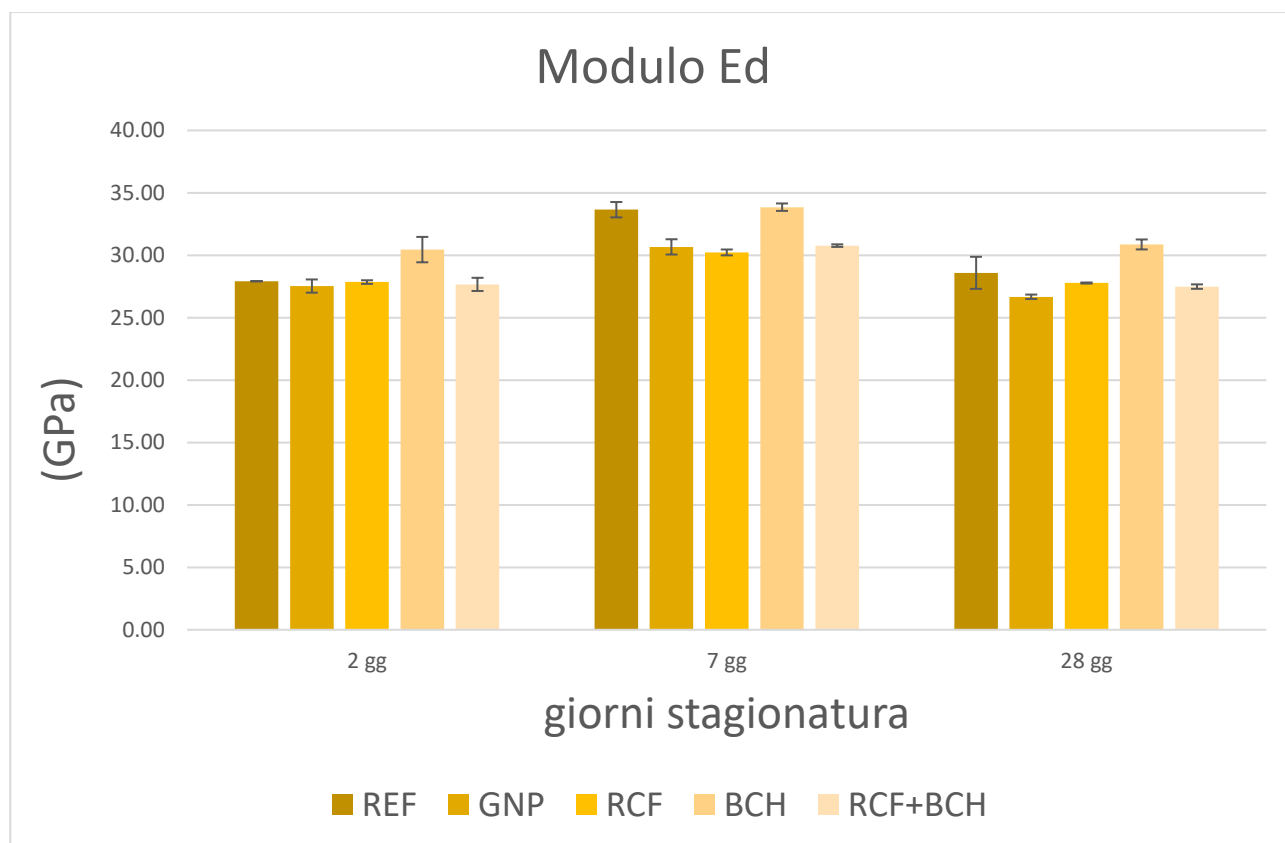


Figura 4.4.3: grafico relativo al modulo elastico dinamico

Da questo grafico possiamo analizzare l'andamento del modulo elastico dinamico, e vediamo che a 7 giorni i valori di Ed espressi in GPa sono aumentati, mentre a 28 giorni di stagionatura sono ritornati approssimativamente ai valori ottenuti a 2 giorni. Questo risultato non è quello che ci aspettavamo, anche se le variazioni in questioni sono minime, perché teoricamente all'aumentare della resistenza meccanica dovrebbe aumentare anche il modulo elastico dinamico. Il problema potrebbe essere legato a una differente modalità di esecuzione della prova.

## 4.5 Risultati prove meccaniche

Da questa prima parte della sperimentazione abbiamo potuto notare che il mix-design più promettente in termini di resistenza meccanica, sia quello contenente fibre di carbonio riciclate e biochar (BCH+RCF), questo perché prendendo singolarmente la malta contenente fibre di carbonio riciclate (RCF) e biochar (BCH) è emerso che:

- la malta contenente fibre di carbonio riciclato (RCF) ha una buona resistenza a flessione, dovuta alle fibre di carbonio che fanno da ponte sulle fessure (*“bridging effect”*) che si formano con l’aumento del carico.  
Le fibre di carbonio, infatti, vista la loro elevata resistenza meccanica a flessione e a compressione stanno prendendo largo impiego nel settore edilizio, come materiali di rinforzo strutturale.  
La miscela contenente biochar (BCH) tende ad avere una buona resistenza meccanica a compressione dovuta sia all’elevata superficie specifica della particella che contribuisce alla crescita dei prodotti di idratazione del cemento (*centro di nucleazione*), sia all’effetto filler che tende a chiudere le porosità [14][15].
- L’accostamento di queste due aggiunte conduttive ha permesso di ottenere una malta oltre che meccanicamente resistente, anche con bassa impedenza elettrica e quindi, come vedremo in seguito, con un buon comportamento piezoresistivo.

# CAPITOLO 5

## Metodi e misurazioni

Oltre alle prove meccaniche eseguite sui provini dedicati, durante il periodo di stagionatura e post stagionatura sono stati testati i provini con le reti e con i pioli per poter eseguire le misurazioni di impedenza elettrica e le prove di piezoresistività sotto carico, utilizzando le reti e i pioli come elettrodi di misura.

### 5.1 Misurazioni di impedenza elettrica

L'impedenza elettrica è la capacità di un materiale di opporsi al flusso di corrente elettrica. Il calcestruzzo è un materiale dotato di conducibilità elettrolitica data dagli ioni presenti in esso; questa sua conducibilità elettrolitica può essere trasformata in conducibilità elettrica attraverso le aggiunte conduttive. Per poter effettuare tale misurazione, è necessario che il materiale da testare venga attraversato da una corrente elettrica.

L'impedenza elettrica è definita dalla seguente equazione:

$$Z = Z_{Re} + Z_{Im} [\Omega]$$

dove:

- $Z_{Re}$ : è la parte reale dell'impedenza elettrica (a cui è stato fatto riferimento per i test);
- $Z_{Im}$ : è la parte immaginaria dell'impedenza elettrica.  
Entrambe sono espresse in  $[\Omega]$ .

In questa sperimentazione le misurazioni di impedenza elettrica sono state eseguite sia durante la stagionatura dei provini, a 2, 3, 7, 9, 14, 21, 28 giorni dall'esecuzione del getto, sia durante i test di carico.



### 5.1.1 Autolab

Le misurazioni di impedenza elettrica sono state eseguite tramite un potenziostato/galvanostato *Autolab PGSTAT204* prodotto dalla *Metrohm* (Figura 5.1.1), affiancato dal software NOVA 2.1.3 con cui sono stati forniti tutti i dati necessari per le analisi.

Key features	Compatible modules	
Electrode connections	2, 3 and 4	FRA32M
Potential range	+/- 10 V	EQCM
Compliance voltage	+/- 20 V	BA
Maximum current	+/- 400 mA	pX1000
Current ranges	100 mA to 10 nA	MUX
Potential accuracy	+/- 0.2 %	BOOSTER10A
Potential resolution	3 µV	
Current accuracy	+/- 0.2 %	
Current resolution	0.0003 % (of current range)	
Input impedance	> 100 GOhm	
Potentiostat bandwidth	1 MHz	
Computer interface	USB	
Control software	NOVA	

Figura 5.1.1: Autolab e sue caratteristiche [16]

Per queste misurazioni è stata scelta una configurazione a 4 elettrodi, per evitare la polarizzazione dell'interfaccia elettrodo-materiale, nonché una corrente alternata per evitare la polarizzazione del materiale stesso, in particolare attraverso l'allineamento dei dipoli.

Sono stati scelti elettrodi in acciaio inossidabile (reti e pioli), collegati al potenziostato tramite morsetti metallici rivestiti in plastica (in modo che se si toccavano a vicenda non interferivano tra loro) e disposti in modo da avere la seguente configurazione:

- due elettrodi esterni *Working Electrode* (WE) e *Counter Electrode* (CE) iniettavano la corrente di eccitazione fornita dal potenziostato a due dei quattro pioli metallici;
- gli altri due elettrodi, *Sensing Electrode* (S) e *Reference Electrode* (RE), disposti sui restati pioli centrali, misuravano la corrispondente caduta di potenziale elettrico (Figura 5.1.2) [17].

Mettendo poi a rapporto queste due grandezze rilevate, secondo la legge di Ohm, si è ricavato il valore dell'impedenza elettrica:

$$Z = \frac{V}{I}$$

dove:

- Z: impedenza elettrica [ $\Omega$ ];
- V: tensione [V];
- I: intensità di corrente elettrica [A].

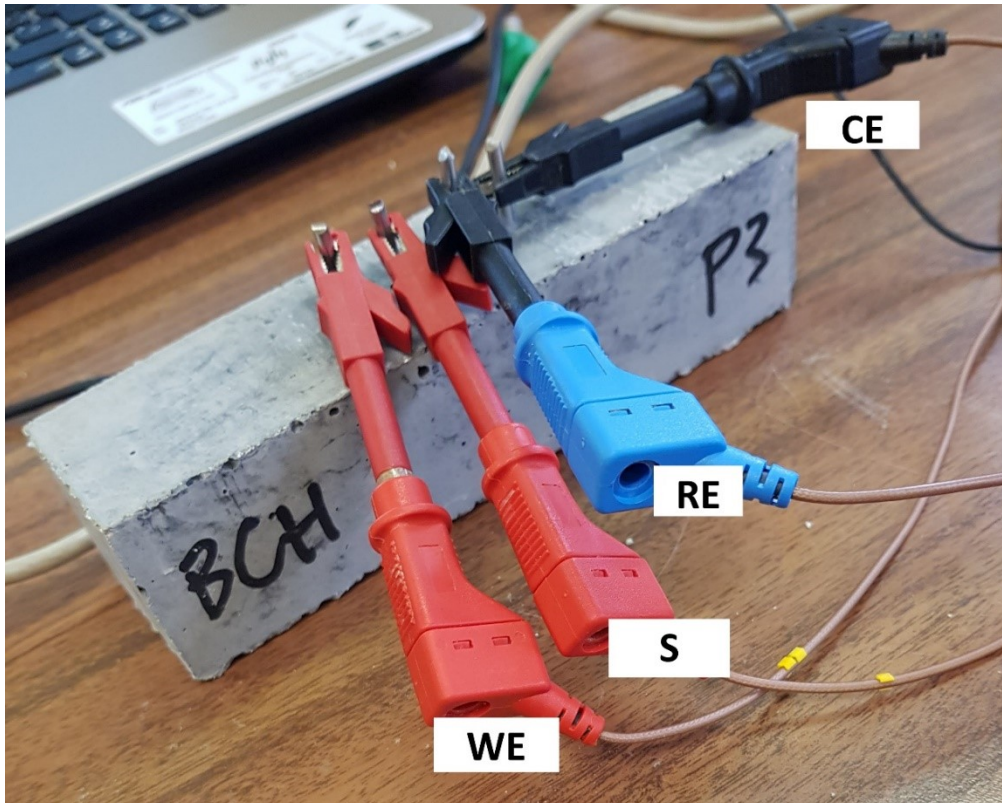


Figura 5.1.2: Schema della disposizione degli elettrodi

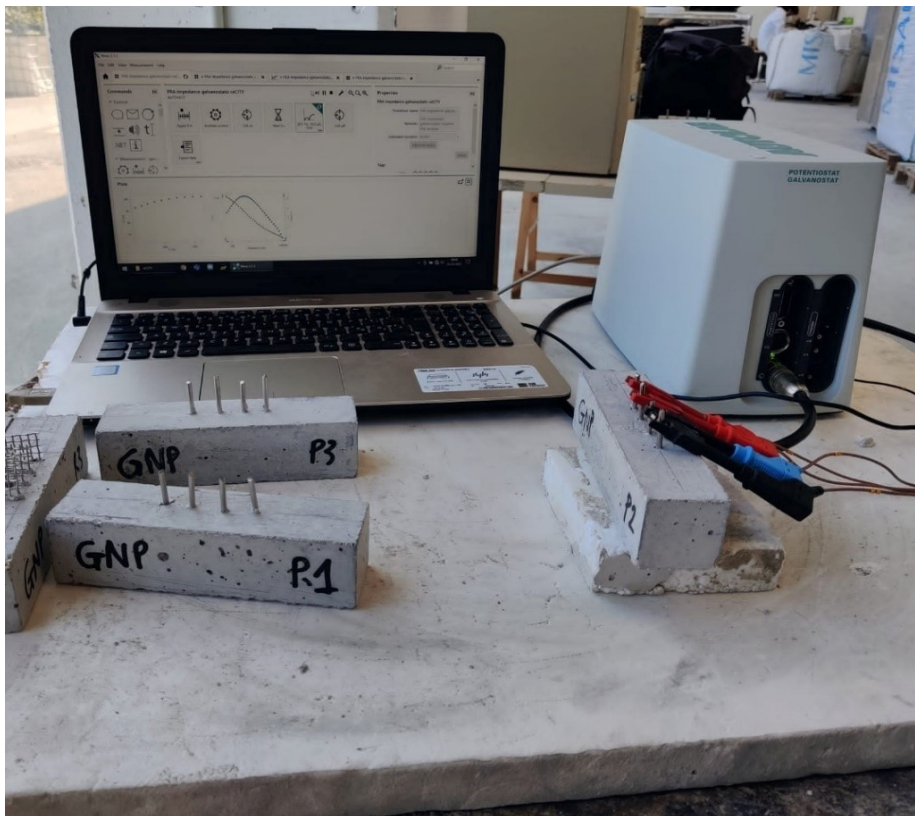


Figura 5.1.3: postazione per misurazioni con Autolab

Tramite il potenziostato Autolab veniva impressa una corrente massima di 400 mA, predisposta attraverso l'interfaccia NOVA 2.1.3.

Il software NOVA è stato settato in configurazione galvanostatica per misurare il valore dell'impedenza elettrica a singola frequenza, pari a 10 kHz, durante i test di carico. Il range scelto per la spazzolata in frequenza per caratterizzare il materiale nel periodo di stagionatura o comunque durante ispezioni periodiche va invece da 1 kHz a 100 kHz.

Tale programma, inoltre, forniva due grafici:

- *Diagramma di Nyquist*: con parte immaginaria  $Z_{Im}[\Omega]$  rispetto alla parte reale dell'impedenza  $Z_{Re}[\Omega]$ ;
- *Diagramma di Bode*: con fase ( $^{\circ}$ ) e modulo dell'impedenza elettrica  $[\Omega]$  graficate in frequenza (Hz).

Nella fase di elaborazione dei dati, si è scelto di prendere in considerazione solo la parte reale dell'impedenza elettrica, poiché è quella maggiormente collegata alle caratteristiche del materiale.

Durante le misurazioni di impedenza elettrica, la strumentazione e in particolare i provini sono stati riposti sopra un blocco di polistirolo, allo scopo di isolare elettricamente l'attrezzatura ed evitare variazioni del percorso di corrente elettrica fornita dall'Autolab, poiché il tavolo utilizzato per le misurazioni conteneva parti metalliche.

## 5.2 Prove di piezoresistività

La piezoresistività è una caratteristica fisica di quei materiali che se sottoposti a delle sollecitazioni esterne, producono una variazione della resistenza elettrica del materiale lungo la direzione della sollecitazione.

Per poter ottenere delle malte con questa caratteristica è stato necessario introdurre delle aggiunte conduttive nell'impasto, in modo da incrementare la conducibilità elettrica delle malte stesse. Per ottenere questo risultato è però necessaria una corretta omogenizzazione dell'impasto cementizio con questi materiali conduttivi, proprio per questo è fondamentale essere il più accurati possibili nella fase di miscelazione dell'impasto, anche perché queste aggiunte conduttive a causa del loro peso specifico tendono a separarsi dall'impasto dando luogo a fenomeni di segregazione.

Il comportamento piezoresistivo di questi materiali permette la loro applicazione in svariati campi di ricerca, come nel monitoraggio strutturale. È ovvio che una struttura dotata di sistemi di monitoraggio permette di intervenire tempestivamente qualora si riscontrino perdite di resistenza del materiale o variazioni delle condizioni normali di esercizio [17].

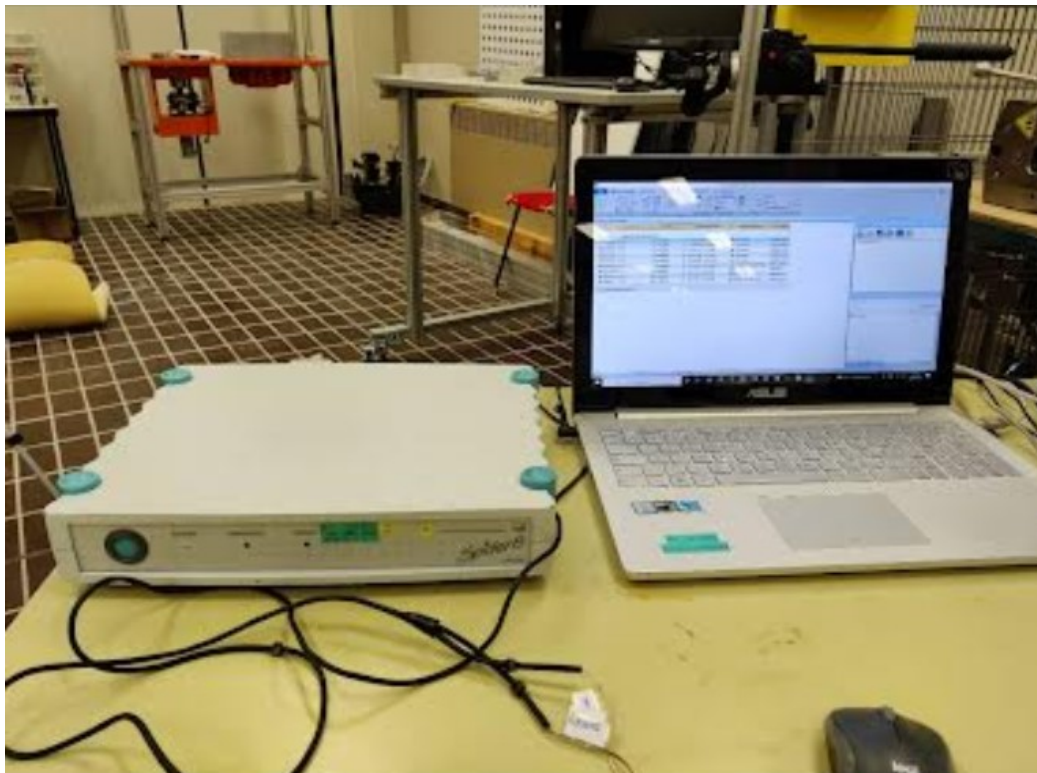
Nella seguente sperimentazione, le misurazioni di piezoresistività si sono svolte al termine della stagionatura dei provini a 28 giorni e sono state eseguite per un intervallo di tempo di 8 settimane in modo da poter tener conto della variabilità dei provini nel tempo, legata all'invecchiamento e all'idratazione della malta.

Contemporaneamente alle prove di piezoresistività sotto carico ciclico condotte utilizzando la pressa meccanica *Zwick Roell Z050*, sono state eseguite anche le misurazioni di impedenza con l'*Autolab* e la rilevazione delle deformazioni del provino mediante *estensimetri HBK* collegati allo *Spider8*.

### 5.3 Estensimetri e Spider8

L'estensimetro a resistenza elettrica è un dispositivo che va accuratamente incollato sulla superficie del provino così da essere in grado di misurare le deformazioni di un materiale sottoposto ad un carico.

Al fine di misurare la deformazione, l'estensimetro deve essere collegato ad un circuito elettrico in grado di misurare le variazioni nella resistenza elettrica dell'estensimetro, che corrispondono quindi alla deformazione. Questo circuito elettrico, a ponte di Wheatstone, è presente all'interno dello *Spider8*.



*Figura 5.3.1: Spider8 e computer d'acquisizione*

Lo *Spider8* (Fig.5.3.1) è un apparecchio in grado di trasdurre i dati da variazioni di lunghezza a variazione di resistenza elettrica e poi, attraverso il circuito di misura *a ponte di Wheatstone* (che può avere diverse configurazioni in base a quanti lati del ponte siano occupati da estensimetri [20]),

ci fornisce il valore di tensione elettrica di uscita. Attraverso la tensione elettrica si risale alla deformazione tramite il fattore di ponte (*Gage Factor*), cioè il fattore di taratura degli estensimetri.

Per compensare gli errori che si possono avere durante la misura estensimetrica, dovuti principalmente alla temperatura, che rappresenta sia un ingresso interferente che modificatore, si è utilizzato un secondo estensimetro, detto compensatore, montato su un provino di malta dello stesso tipo di quella sottoposta a carico, ma scarico.

La configurazione usata nella sperimentazione è stata quella a mezzo ponte, cioè con estensimetri collegati su rami adiacenti del ponte di Wheatstone (Figura 5.3.2), in modo da annullare gli effetti di disturbo (che se uguali su lati adiacenti si annullano). Tale configurazione viene realizzata appunto attraverso l'uso di due estensimetri uguali, incollati uno sul provino sottoposto alla deformazione da carico e termica, mentre l'altro, il compensatore (*dummy*), posizionato sul provino sottoposto solo alla deformazione termica.

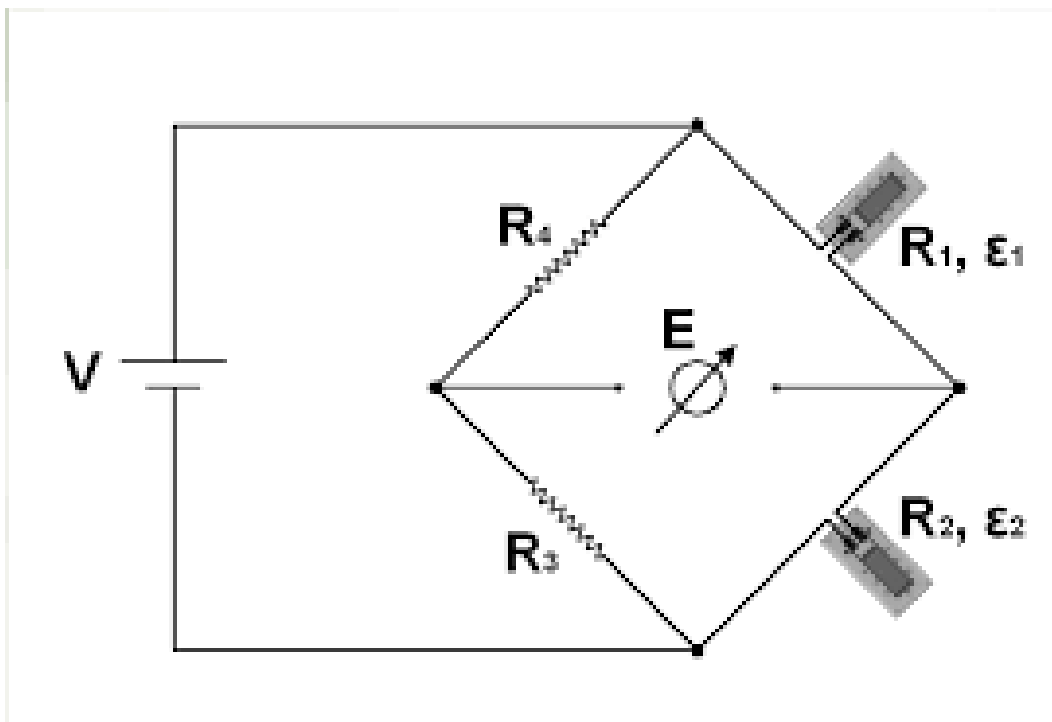


Figura 5.3.2: schema configurazione di Wheatstone a mezzo ponte [20]

### 5.3.1 Montaggio estensimetri

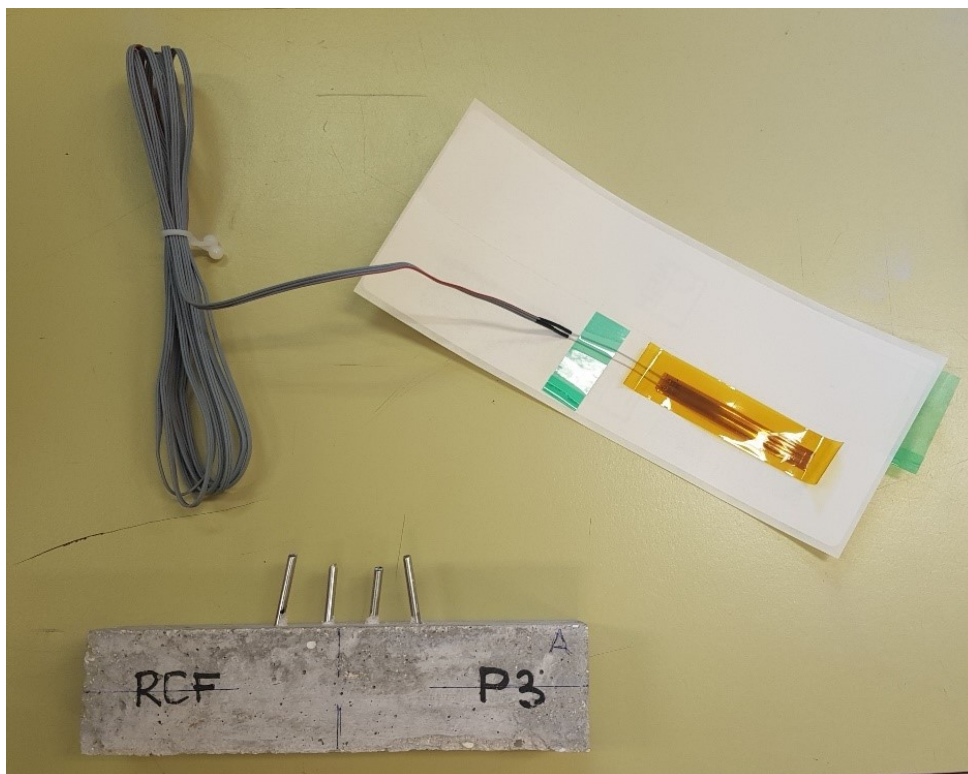
Il montaggio degli estensimetri è una fase che va eseguita accuratamente, poiché sono strumenti molto delicati. La procedura di incollaggio degli estensimetri è stata ripetuta per tutti i provini con reti e pioli delle varie malte.



*Figura 5.3.3: strumenti usati per l'operazione di incollaggio degli estensimetri*

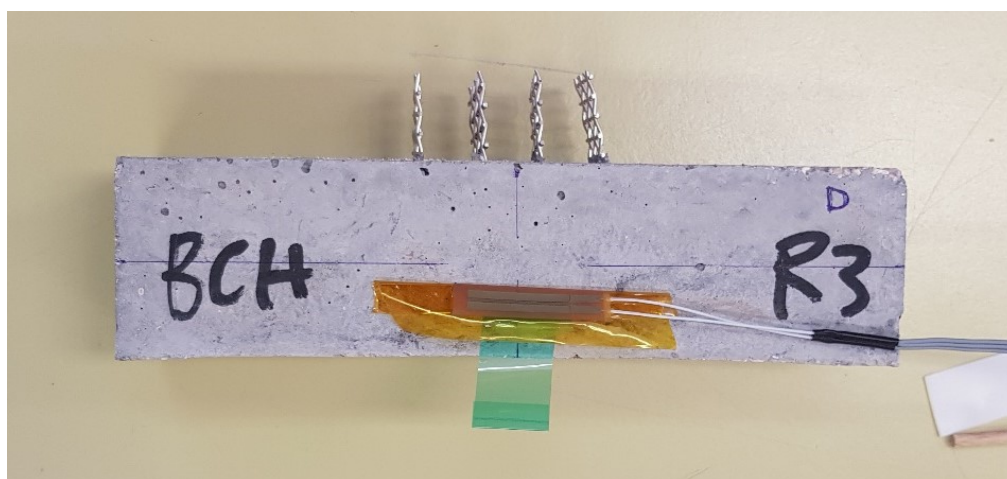
La procedura adottata è la seguente:

- I. Pulizia attraverso aria compressa della superficie del provino, in modo da rimuovere eventuali polveri ed evitare un incollaggio debole;
- II. Disegno delle tracce per poter incollare l'estensimetro al centro della faccia laterale del provino;



*Figura 5.3.4: disegno tracce su provino*

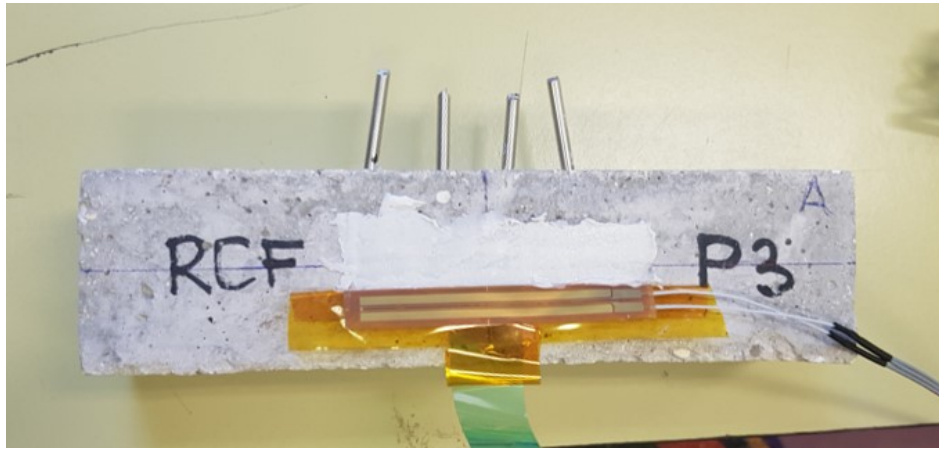
- III. Posizionamento preliminare tramite scotch dell'estensimetro (HBK, di lunghezza 50mm) sul provino, in corrispondenza delle tracce precedentemente segnate;



*Figura 5.3.5: posizionamento preliminare dell'estensimetro con lo scotch*

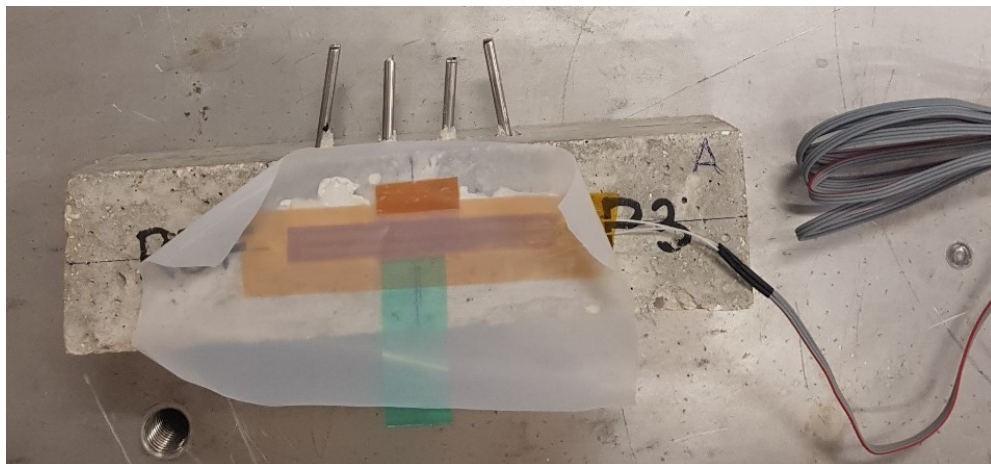
- IV. Incollaggio dell'estensimetro attraverso una colla bicomponente (X60, prodotta da HBM).  
 Per comporre la colla sono necessari due piccoli misurini della componente in polvere e circa 20 gocce della componente liquida (Fig.5.3.3).  
 Il processo di presa della colla è molto influenzato dalla temperatura esterna (ragione per cui il dosaggio della componente liquida della colla non viene fornito in modo preciso).

Le due componenti vengono poi miscelate fino ad ottenere un composto idoneo ad essere spalmato sulla superficie del provino.



*Figura 5.3.6: applicazione della colla bicomponente X60 prima del fissaggio dell'estensimetro*

- V. Disposizione dello strato (sottile) di colla sulla superficie del provino ed applicazione dell'estensimetro;
- VI. Pressione leggera con palmo della mano ed un foglio di plastica antiaderente sull'estensimetro per circa 6 minuti;



*Figura 5.3.7: applicazione del foglio di plastica protettivo*

- VII. Rimozione del foglio di plastica e dello scotch;





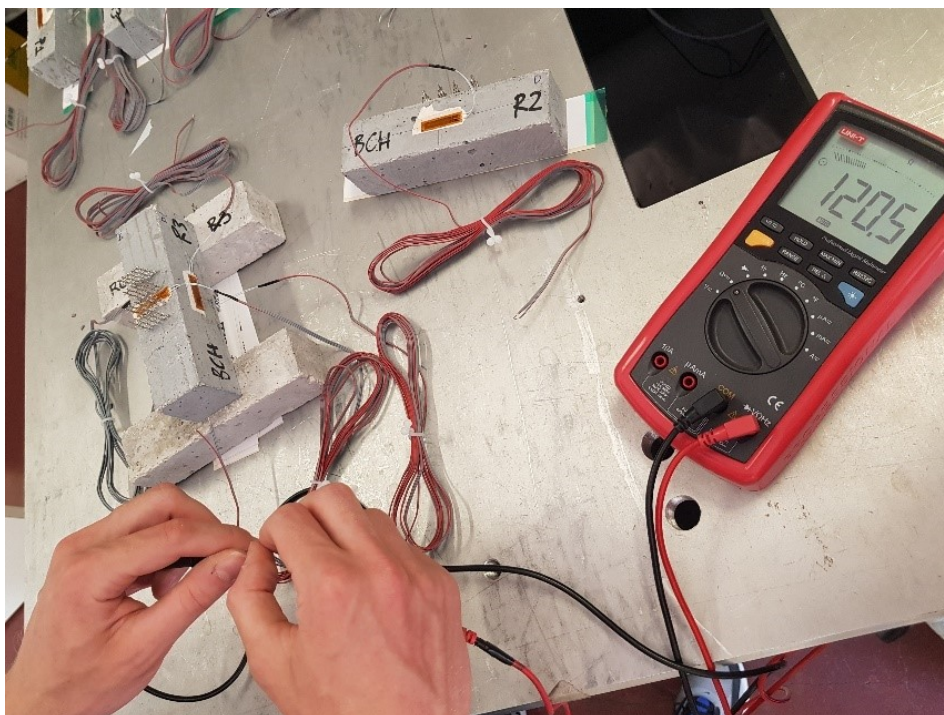
*Figura 5.3.8: rimozione scotch e risultato ultimo*

- VIII. Saldatura dei connettori negli estensimetri, necessari per poterli collegare allo Spider8 (e quindi, al circuito di misura);



*Figura 5.3.9: saldatura dei connettori dagli estensimetri*

- IX. Verifica del corretto funzionamento dei connettori attraverso l'utilizzo di un tester (verifica di continuità dei cavi).



*Figura 5.3.10: verifica della corretta saldatura dei connettori*

Come accennato precedentemente, per la sperimentazione è stata scelta la configurazione a mezzo ponte per tutti i provini poiché, confrontata con quella a ponte intero, rappresentava un buon compromesso tra praticità d'installazione e costi.

Per prendere questa decisione sono stati montati quattro estensimetri da 25 mm su un provino BCH R3, su cui sono stati eseguiti cinque cicli di carico ripetuti a mezzo ponte e a ponte intero, ed è stata poi valutata la deformazione.

Sono stati ottenuti i seguenti risultati (Tabella 5.3.1):

*Tab.5.3.1: confronto tra le configurazioni a mezzo ponte e a ponte intero*

Configurazione:	campo di ripetibilità ( $\mu\epsilon$ )	Scarto di ripetibilità ( $\mu\epsilon$ )
<b>MEZZO PONTE</b>	18	7
<b>PONTE INTERO</b>	4	2

Ovviamente con la configurazione a ponte intero il segnale della temperatura e del carico è meno rumoroso, ma poiché i risultati sono simili, si è potuto comunque dimostrare che con la configurazione a mezzo ponte è possibile riuscire a misurare la deformazione e ad ottenere risultati confrontabili, raggiungendo una sufficiente precisione di misura. Questo ha portato alla scelta della configurazione più veloce e meno costosa, soprattutto in prospettiva della realizzazione di un sistema di monitoraggio distribuito su un'intera struttura.

## 5.4 Prove di carico

Le prove di piezoresistività sono state eseguite con la pressa *Zwick Roell Z050* con carico massimo 50 kN. Tali prove di carico sono state condotte in modo da rimanere in campo elastico, quindi settate ad una forza massima pari a 11,5 kN, cioè al 20% della forza massima di rottura a compressione ( $R_c$ ) del provino di riferimento REF (58 kN). La velocità di applicazione del carico era di 0,5 mm/min.

Per ogni provino sono state fatte tre prove, dove ogni prova prevedeva l'esecuzione di cinque cicli di carico, dalla durata di 160 s per ciclo. Un totale di 15 cicli di carico per provino.

Quello che più ci ha interessato dalle seguenti prove sono:

- Il carico massimo raggiunto ( $F$ );
- La deformazione massima raggiunta ( $\epsilon$ );
- La variazione della parte reale dell'impedenza ( $Z_{Re}$ )

Questi dati sono stati acquisiti attraverso la strumentazione precedentemente descritta (Figura 5.4.1), quindi:

- Cella di carico (*Zwick Roell Z050*);
- Potenzenziatore/galvanostato *Autolab PGSTAT204* (*Metrohm*);
- *Spider8* (*HBM*) per l'elaborazione dei dati forniti dagli estensimetri *HBK*.

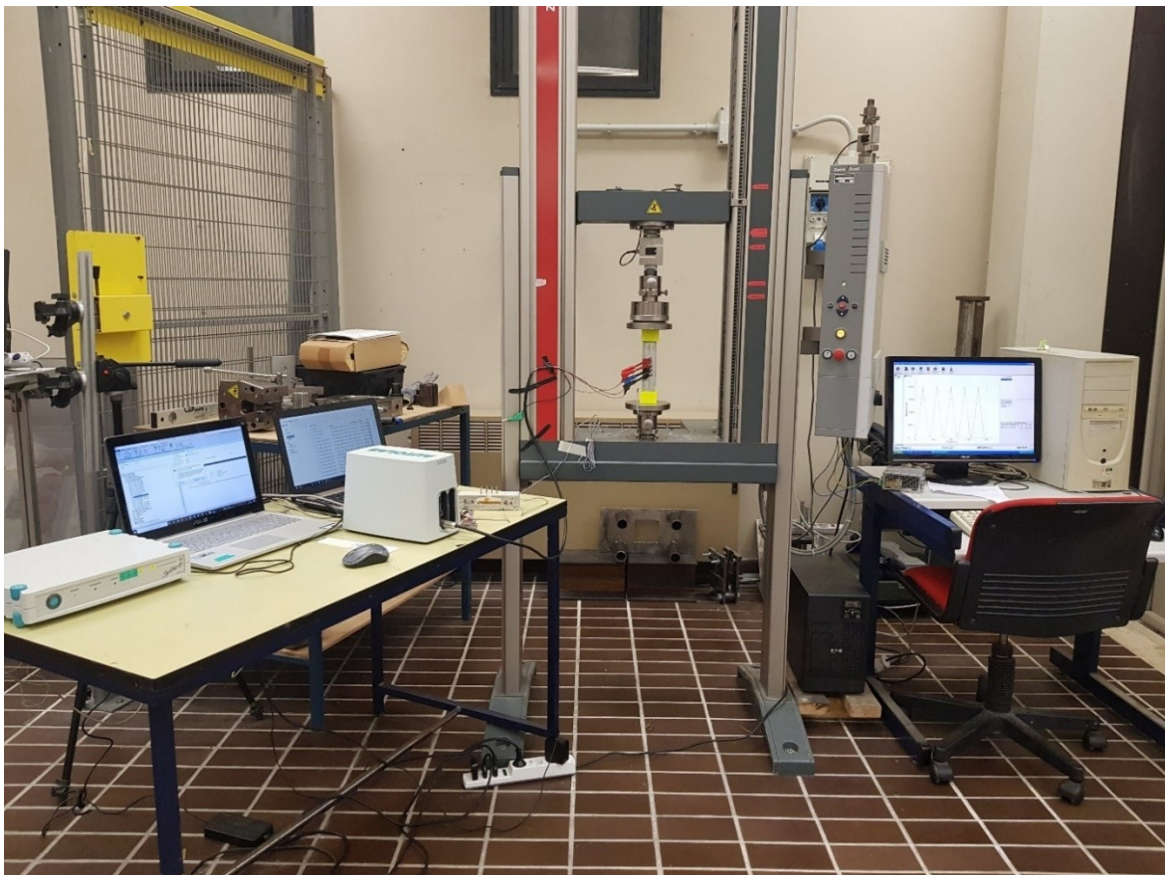


Figura 5.4.1: Setup di misura

Durante l'esecuzione delle prove di carico sono stati utilizzati l'Autolab per la misurazione dell'impedenza elettrica in corrente alternata (CA), la pressa meccanica Zwick Roell che applicava il carico ciclico sul provino, e gli estensimetri collegati allo Spider8 per fornirci i dati relativi alla deformazione del provino.

Come anticipato, per compensare gli errori dovuti alla deformazione termica nella misura estensimetrica sono stati installati degli estensimetri compensatori. I provini su cui sono stati installati questi tipi di estensimetri prendono il nome di provino "dummy". Abbiamo preso come "dummy" i provini R1 (con le reti) di ogni singola malta.

L'applicazione del carico indotto dalla pressa veniva applicato sul provino posto verticalmente tra i due piatti metallici della pressa (Figura 5.4.2). Per evitare che la corrente elettrica erogata dall'Autolab potesse circolare liberamente attraverso la pressa meccanica, alle estremità dei provini sono stati posti dei *pad*, ovvero degli elementi plastici, in grado di garantire il ciclo della corrente all'interno del provino, evitando il flusso di linee di corrente sulle parti metalliche della pressa (causa di errori nella misura).

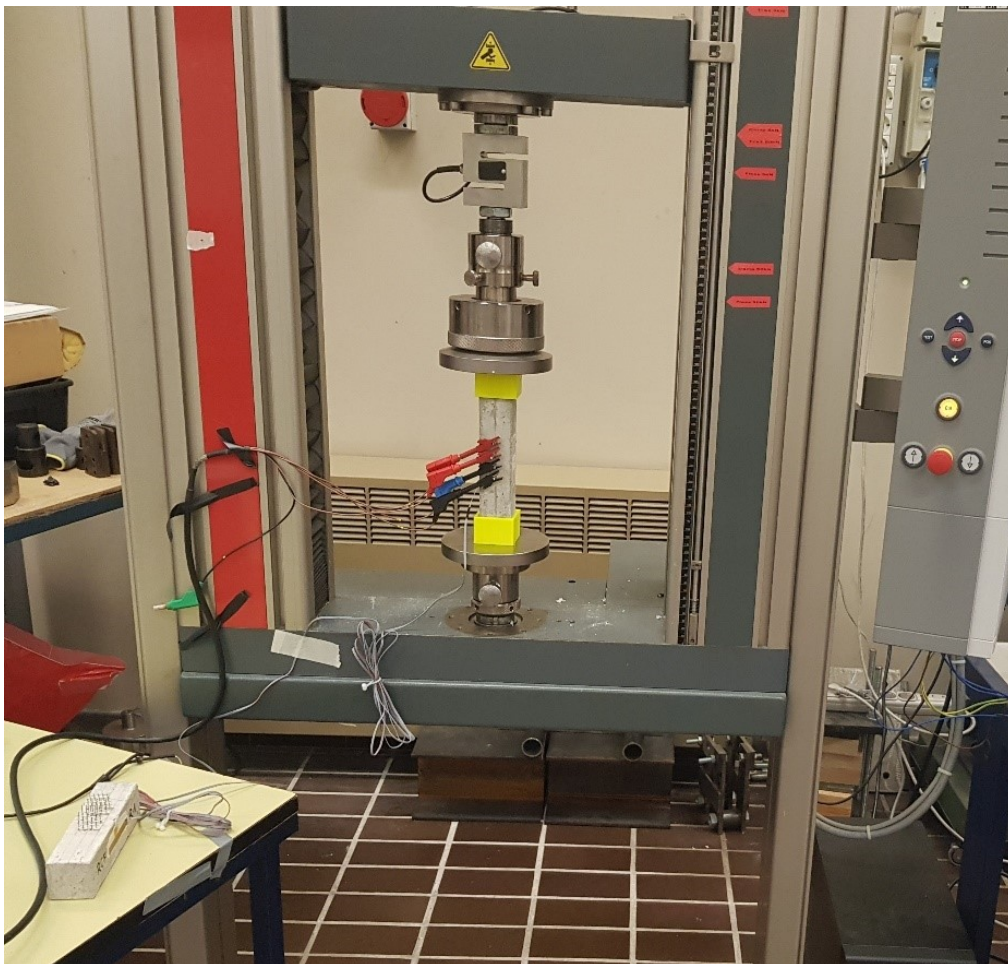


Figura 5.4.2: esecuzione del test

Durante la prova, per tenere sotto controllo l'andamento del test ed il corretto funzionamento degli estensimetri venivano controllati visivamente gli andamenti dei grafici forniti dai computer collegati con le strumentazioni precedentemente descritte.

I software utilizzati:

- *CATMAN* relativo allo Spider8: forniva il grafico deformazione-tempo per controllare il corretto funzionamento degli estensimetri;
- *NOVA* relativo all'Autolab: in configurazione galvanostatica per misurare i valori reali dell'impedenza elettrica;
- *testXpert* relativo alla pressa Zwick: forniva l'andamento della forza applicata nel tempo.

Dopo il periodo di misurazioni, i dati raccolti dalla sperimentazione sono stati elaborati utilizzando Excel per i dati relativi al monitoraggio in fase di stagionatura e MATLAB per le misurazioni di piezoresistività.

# CAPITOLO 6

## Risultati

### 6.1 Risultati impedenza elettrica

Nelle figure 6.1.1 e 6.1.2 sono riportati i risultati dell'impedenza elettrica misurata sui provini con reti e pioli in fase di stagionatura.

Come previsto, l'impedenza elettrica è aumentata nel tempo per tutti i tipi di impasto, poiché questa aumenta con l'idratazione del materiale.

Sia per i provini con le reti che per quelli con i pioli, la malta di riferimento REF al termine della stagionatura (28 giorni) mostra la più alta impedenza elettrica. Come anticipato, per queste misurazioni si prende in considerazione solo la parte reale dell'impedenza elettrica, questo perché è maggiormente correlata alla durabilità del calcestruzzo e perché segue bene le variazioni del carico applicato nell'esecuzione delle prove.

Le malte contenenti come filler le nanopiastrine di grafene (GNP) e biochar (BCH) hanno riportato un comportamento di poco inferiore a quello del riferimento in termini di impedenza elettrica. Invece le malte contenenti fibre di carbonio riciclate RCF e RCF+BCH hanno riportato un valore dell'impedenza elettrica inferiore, il quale è cresciuto lentamente nel tempo.

Nello specifico, i risultati dell'impedenza elettrica ottenuti sui campioni contenenti reti metalliche (Figura 6.1.1), rispetto al riferimento (REF) sono:

- le malte GNP e BCH mostrano impedenze elettriche rispettivamente del 30% e del 36% più basse del riferimento;
- le malte RCF e RCF+BCH hanno raggiunto rispettivamente il 92% e 85% in meno del riferimento.

Mentre per i campioni contenenti pioli metallici come elettrodi di misura (Figura 6.1.2), i risultati di impedenza elettrica ottenuti rispetto al riferimento (REF) sono:

- la malta GNP mostra un'impedenza elettrica paragonabile al riferimento;
- la malta BCH mostra un'impedenza elettrica del 13% in meno della malta REF;
- le malte RCF e RCF+BCH hanno raggiunto rispettivamente il 91% e l'82% in meno del riferimento.

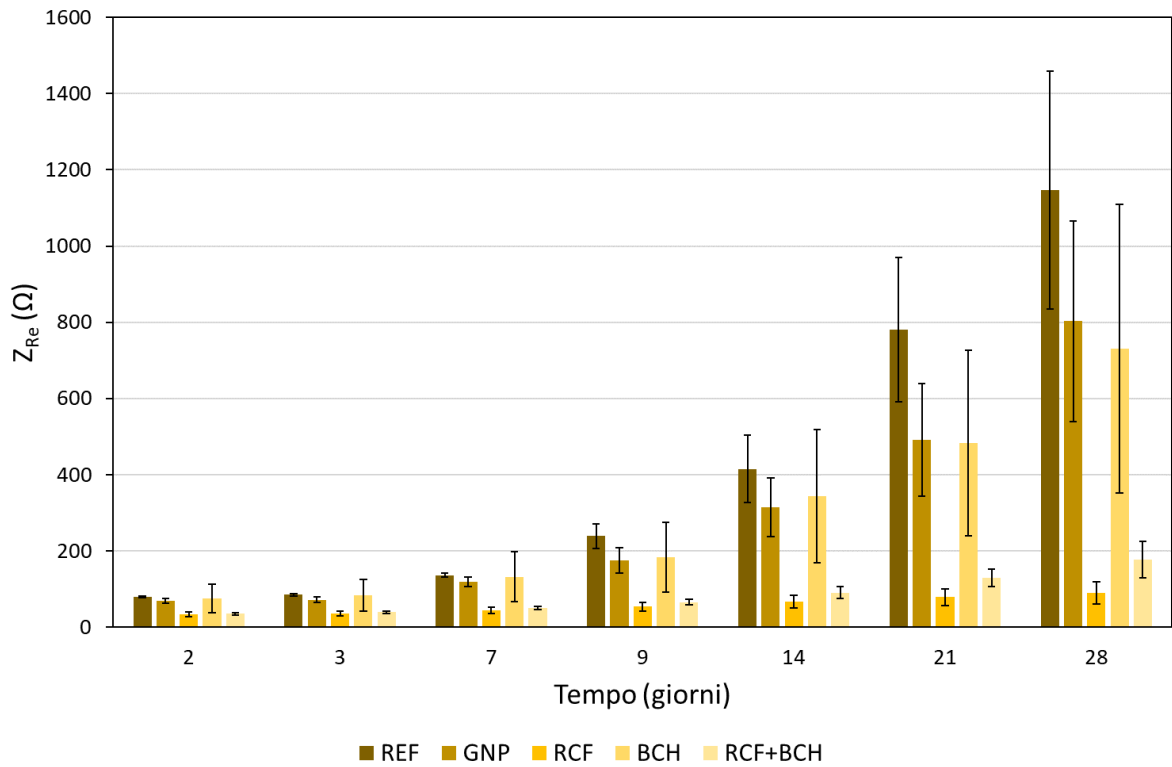


Figura 6.1.1: impedenza elettrica campioni con reti metalliche

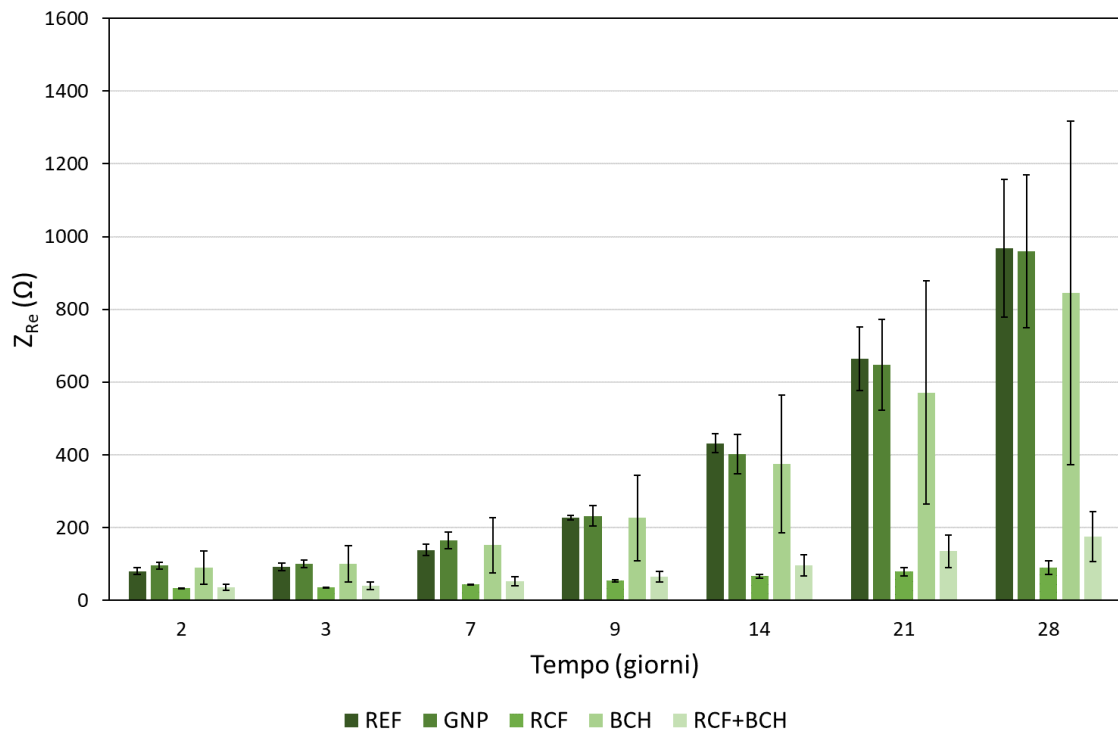


Figura 6.1.2: impedenza elettrica campioni con pioli metallici

La differenza dei risultati ottenuti dalle prove di impedenza elettrica tra i campioni delle stesse malte contenenti reti metalliche e pioli metallici è legata sia alla differente geometria degli elettrodi di misura, sia alla variabilità tra i campioni.

## 6.2 Risultati delle prove di piezoresistività

Dai risultati ottenuti dalle prove di piezoresistività sotto carico effettuati sui campioni delle varie malte (Tabella 6.2.1) [19] sono stati ottenuti valori piuttosto elevati sia di deviazione standard ( $\sigma$ ) relativi all'impedenza elettrica, legati all'idratazione del materiale e quindi al suo invecchiamento, sia di deformazione ( $\epsilon$ ) della malta.

Tab.6.2.1: Risultati prove piezoresistività per i diversi mix-design

Miscela	$F_{\max}$ [N]	$\epsilon_{\max}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\Delta Z_{\text{Re}}$ [ $\Omega$ ]	$Z_{\text{Re}_t0}$ [ $\Omega$ ]	Sensibilità [ $(\mu\text{m}/\text{m})^{-1}$ ]
<b>REF</b>	11516,20 6,25	$\pm 157 \pm 73$	$23,16 \pm 18,25$	5673,10 3572,57	$\pm 0,003 \pm 0,002$
<b>GNP</b>	11511,88 2,04	$\pm 226 \pm 88$	$9,86 \pm 8,08$	6605,27 4999,12	$\pm 0,001 \pm 0,000$
<b>RCF</b>	11512,16 2,05	$\pm 181 \pm 78$	$0,92 \pm 0,33$	203,14 24,71	$\pm 0,004 \pm 0,003$
<b>BCH</b>	11511,57 2,11	$\pm 217 \pm 119$	$22,25 \pm 15,30$	5725,73 6071,60	$\pm 0,008 \pm 0,009$
<b>RCF+BCH</b>	11512,76 1,26	$\pm 155 \pm 49$	$70,26 \pm 26,46$	419,07 71,15	$\pm 0,109 \pm 0,026$

Dai risultati delle prove di piezoresistività sotto carico si è osservata una buona correlazione tra la deformazione del materiale e la variazione della parte reale dell'impedenza elettrica.

Dai grafici ricavati, infatti (Figura 6.2.1, per miscela RCF+BCH), si può vedere che quando il carico è massimo e quindi anche la deformazione è massima, la variazione di impedenza elettrica risulta di alcune decine di Ohm, questo perché comprimendo (in lunghezza) il provino la corrente passa meglio e si registra una diminuzione della parte reale dell'impedenza elettrica [21].



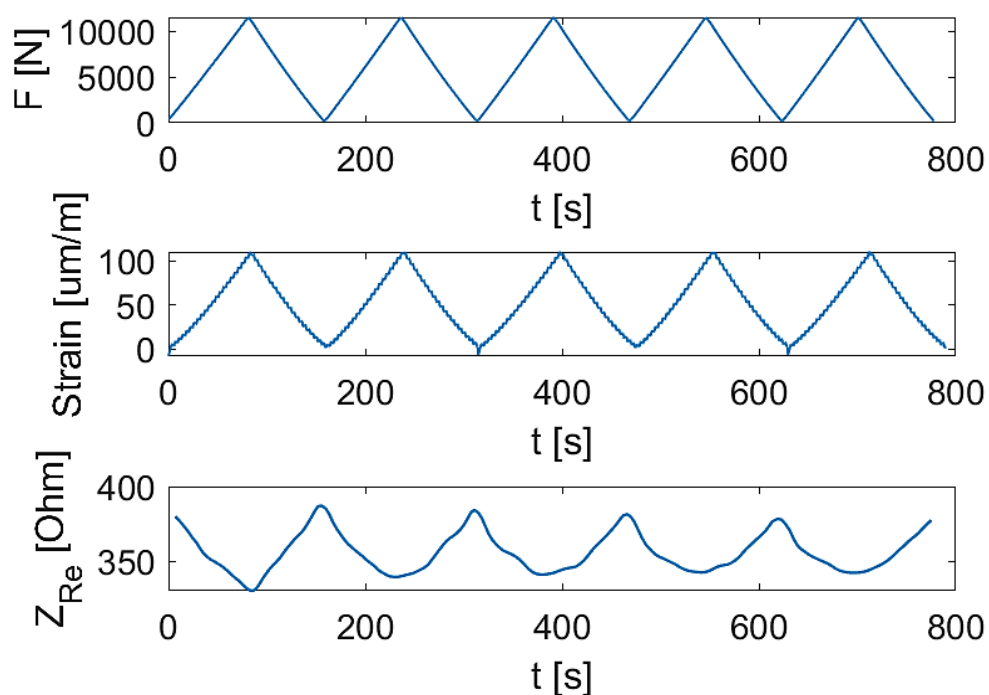


Figura 6.2.1: grafici relativi alla misura di forza (alto), deformazione (centro), impedenza elettrica (basso), rispetto al tempo sul provino RCF+BCH [19]

Dalle prove è emerso che la miscela RCF+BCH (Figura 6.2.1) preparata con entrambi i sottoprodotti ecosostenibili, è quella che ha mostrato valori di sensibilità<sup>1</sup> maggiori rispetto alla deformazione indotta dal carico esterno, in correlazione a quella del provino di riferimento REF (Tabella 6.2.2).

Tab.6.2.2: confronto in termini di sensibilità tra REF e BCH+RCF

Sensibilità media ( $\mu\text{m/m}$ ) <sup>-1</sup>	
<b>RCF+BCH</b>	0,109
<b>REF</b>	0,003

<sup>1</sup> Per sensibilità si intende la variazione di impedenza in uscita rispetto a quella in entrata

### 6.3 Considerazioni

I dati raccolti durante le prove sono stati molto variabili, sia tra provini della stessa miscela, sia relativamente allo stesso campione testato in tempi diversi. Questo perché, nonostante le relative accortezze in fase di impasto e di getto delle malte, è impensabile realizzare provini perfettamente omogenei. Un altro fattore decisivo è l'invecchiamento dei provini che modifica la morfologia del materiale nel tempo. Nonostante questo però i dati raccolti sono stati molto promettenti ai fini della ricerca.

Per un'analisi in termini economici, la strumentazione utilizzata nella seguente ricerca è sicuramente troppo onerosa se adottata per un monitoraggio continuativo di una struttura in campo, in molti punti critici.

Per ovviare a questo problema, si potrebbe utilizzare una scheda di acquisizione più economica, come il *Chip AD5940* controllato dall' *evaluation board EVAL-AD5940BIOZ* dell'Analog Devices [22] (Figura 6.3.1). Questa è una scheda a basso costo (rispetto all'Autolab) che consente di fare misurazioni pratiche sia di spazzolata in frequenza, come l'Autolab, sia misurazioni a singola frequenza (in particolare, si è interessati al range da 1 kHz a 10 kHz) [19].

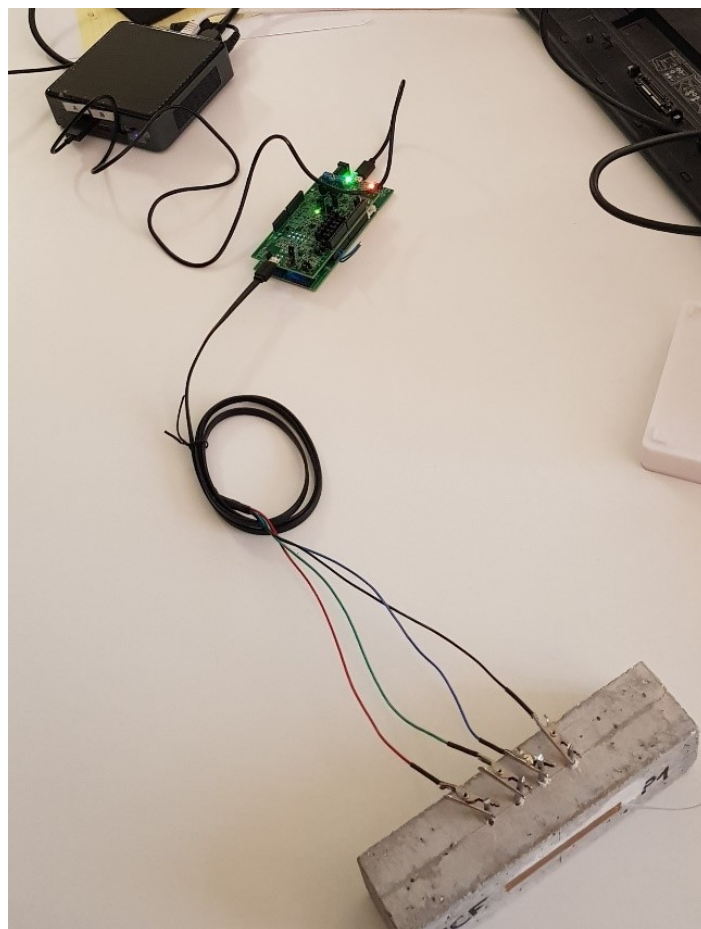


Figura 6.3.1: *Chip AD5940 evaluation board*

Il seguente grafico (Figura 6.3.2) riporta i risultati del confronto tra il sistema da laboratorio Autolab e il sistema a basso costo, testati entrambi sui provini delle varie malte.

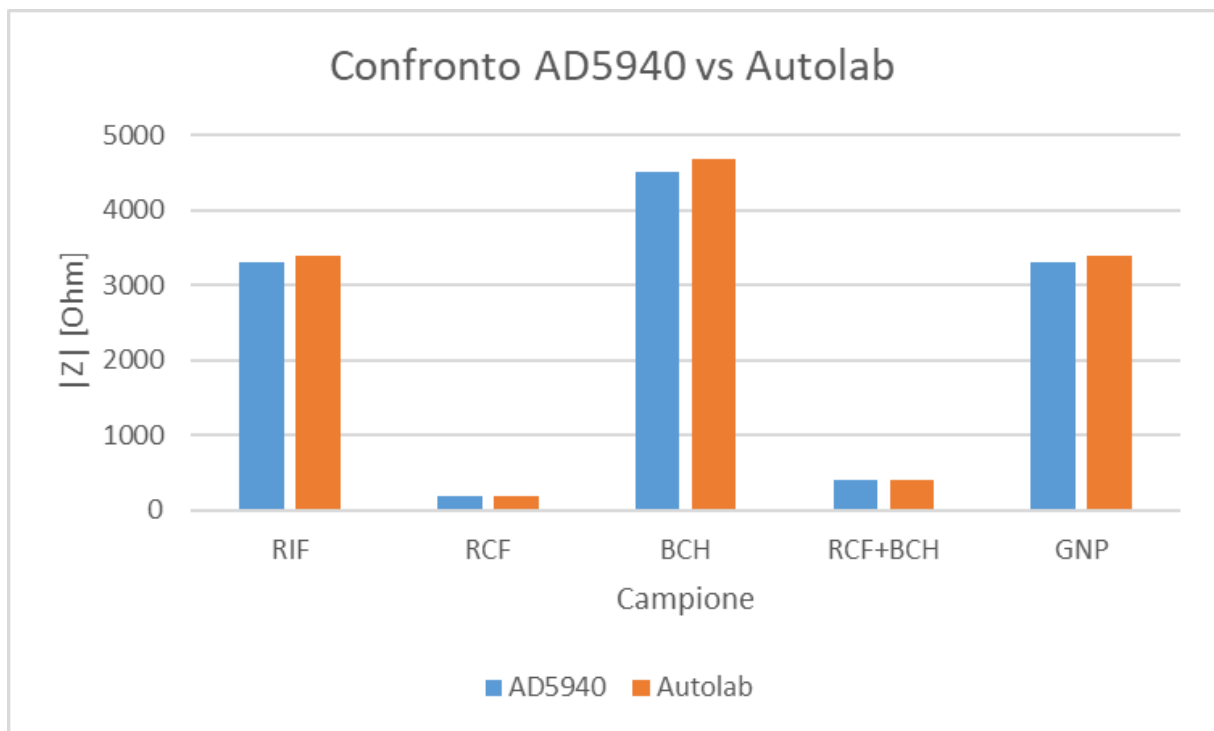


Figura 6.3.2: confronto Autolab e scheda a basso costo

Come è possibile vedere, la media delle misurazioni è molto simile e quindi i due sistemi possono considerarsi confrontabili. La scheda di acquisizione AD5940 si conferma una valida alternativa all'Autolab per effettuare misurazioni in campo e per la realizzazione di un sistema di monitoraggio con nodi di misura distribuiti anche su una struttura molto grande.

# Conclusioni

In questo lavoro di tesi, inserito all'interno del progetto di ricerca "Resilient City- Everyday Revolution" (reCITY) [2], sono state preparate e testate diverse malte cementizie contenenti aggiunte conduttive, le quali hanno permesso di ottenere un materiale con buone caratteristiche "self-sensing", ovvero autodiagnostici. Queste aggiunte conduttive vengono direttamente inserite nella miscela andando a creare una rete di materiale conduttivo, generando così un composto che permette contemporaneamente il rilevamento delle sollecitazioni esterne e il degrado della struttura (ad esempio attraverso la penetrazione di contaminanti).

Nel presente lavoro di tesi sono state realizzate in particolare cinque malte cementizie: una di riferimento senza aggiunte conduttive (REF), una realizzata con biochar come filler conduttivo (BCH), una con nanopiastrine di grafene (GNP), una contenete fibre di carbonio riciclate (RCF) e una realizzata combinando biochar e fibre di carbonio riciclate (RCF+BCH).

In particolare, su queste malte sono state eseguite prove meccaniche (nel periodo di stagionatura) per rilevarne la loro resistenza, e prove di impedenza elettrica e di piezoresistività sotto carico.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione sono stati molto promettenti, in linea con gli obiettivi fissati, ovvero quelli di trovare il mix-design più adatto in termini di resistenza meccanica e sensibilità, in modo da poterlo affiancare ad un accurato sistema di monitoraggio.

Ovviamente va ribadito che le prove eseguite sono state influenzate dalle disomogeneità dei campioni; infatti, i materiali cementizi sono definiti come disomogenei e le aggiunte conduttive possono non essersi distribuite correttamente, nonostante l'accuratezza delle fasi di impasto e di getto.

Dalle prove è emerso che le aggiunte conduttive come le fibre di carbonio riciclate (RCF) e biochar (BCH), inserite in uno stesso impasto, rispettivamente allo 0,05% e 0,5% in volume, conferiscono ai conglomerati le migliori prestazioni in termini di sensibilità alle sollecitazioni esterne (piezoresistività) e di resistenza meccanica del materiale.

Questa miscela ha mostrato una variazione dell'impedenza elettrica speculare con il carico applicato/ deformazione indotta sul provino, mostrando un'alta sensibilità, pari a  $0,109 (\mu\text{m}/\text{m})^{-1}$ , contro lo  $0,003 (\mu\text{m}/\text{m})^{-1}$  del provino REF.

Le misurazioni di impedenza e di piezoresistività di un materiale con caratteristiche "self-sensing" rappresentano un buon metodo per il monitoraggio in continuo di un'infrastruttura, soprattutto in zone sismiche come gran parte del territorio italiano; e questo può essere sfruttato nell'ottica di creare città sostenibili e resilienti, capaci di garantire la sicurezza dei cittadini che vi abitano e far fronte alle situazioni di emergenza che possono presentarsi.

## Bibliografia e sitografia

- [1] Sohel Rana, P.Subramani, R. Fangueiro (2016)- A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications- AIMS Materials Science
- [2]progetto\_di\_ricerca\_industriale\_PON\_smart\_community- Resilient City-Everyday Revolution (reCITY)
- [3] Appunti docente Tittarelli Francesca A.A 2020-2021
- [4] V. Corinaldesi. Corso di materiali strutturali per l'Ingegneria Civile. A.A. 2018/2019.
- [5]<https://blog.federbeton.it/evoluzione-dei-materiali-per-contribuire-alla-decarbonizzazione-delle-costruzioni-i-cementi-della-uni-en-197-5/>
- [6] Appunti docente Tittarelli Francesca A.A 2022-2023
- [7] G.Pierini. "Effetto di aggiunte conduttive sostenibili sul comportamento a corrosione di armature in calcestruzzi self sensing"- Tesi di Laurea Magistrale Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica Delle Marche, A.A 2019-2020
- [8] <http://www.biochar-molise-proseaa.it/biochar/>
- [9] R.A. Mensah, V. Shanmugam, S. Narayanan, S.M.J. Razavi, A. Ulfberg, T. Blanksvärd, F. Sayahi, P. Simonsson, B. Reinke, M. Forsth, G. Sas, D.Sas and O.Das, Biochar-Added Cementitious Materials- A Review on Mechanical, Thermal, and Environmental Properties, Sustainability 2021, 13(16), 9336; doi: 10.3390/su13169336
- [10] S. Gupta, H.W. Kua, Carbonaceous micro-filler for cement: Effect of particle size and dosage of biochar on fresh and hardened properties of cement mortar, Sci. Total Environ (2019).
- [11] G. Capotorto "Effetto delle nanocariche al grafene sulle performance meccaniche di una resina epossidica per materiali compositi avanzati"-Tesi di Laurea Magistrale Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica Delle Marche, A.A 2019-2020
- [12] <http://blog.italcementi.it/it/self-sensing-concrete-il-calcestruzzo-intelligente-che-monitora-lo-stato-di-salute-delle-strutture-grazie-al-grafene>
- [13] Deliverable R.6.1.1 "Relazione sull'analisi dello stato dell'arte di materiali cementizi con caratteristiche di self-sensing"; Università Politecnica delle Marche.
- [14] A. Mobili, C. Giosuè, T. Bellezze, G. M. Revel, and F. Tittarelli, "Gasification Char and Used Foundry Sand as Alternative Fillers to Graphene Nanoplatelets for Electrically Conductive Mortars with and without Virgin/Recycled Carbon Fibres," Appl. Sci. 2021, Vol. 11, Page 50, vol. 11, no. 1, p. 50, Dec. 2020, doi: 10.3390/app11010050.
- [15] S.-J. Lee, I. You, G. Zi, D.-Y. Yoo, Experimental Investigation of the Piezoresistive Properties of Cement Composites with Hybrid Carbon Fibers and Nanotubes, Sensors. 17, (2017). doi:10.3390/s17112516

[16] [https://www.metrohm.com/it\\_it/products](https://www.metrohm.com/it_it/products)

[17] G. Cosoli, A. Mobili, F. Tittarelli, G.M. Revel, P. Chiariotti ,Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review, Appl. Sci. 10 (2020) 9152.

[18] B. Han, S. Ding, X. Yu, Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review, Measurement, Volume 59, January 2015, pages 110-128,doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048

[19] Deliverable R.6.2.2 “Caratterizzazione di prototipi di materiali cementizi self-sensing in scala di laboratorio”; Università Politecnica delle Marche.

[20]<https://www.unisalento.it/documents/20152/884807/Lezione+2+--+Circuiti+di+misura.pdf>

[21] N. Giuliotti, P. Chiariotti, G. Cosoli, G. Giacometti, L. Violini, A. Mobili, G. Pandarese, F. Tittarelli, G.M. Revel, Continuous monitoring of the health status of cement-based structures: electrical impedance measurements and remote monitoring solutions, Acta Imeko. 10 (2021) 132–139.

[22]<https://www.lkrelec.com/details?did=4546378&EVAL-AD5940BIOZ>