



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

---

Corso di Laurea in:  
Ingegneria Civile e Ambientale

**Effetto del degrado accelerato sulle proprietà elettriche di calcestruzzi  
confezionati con cementi innovativi, a basso impatto ambientale.**

**Effect of accelerated degradation on the electrical properties of concretes  
manufactured with innovative cements at low environmental impact.**

**Relatore:**

Prof. Francesca Tittarelli

**Correlatori:**

Ing. Alessandra Mobili

Prof. Tiziano Bellezze

**Tesi di Laurea di:**

Diego Mengarelli

Anno Accademico 2019/2020

# Indice

1. INTRODUZIONE.....	4
1.1 Premessa.....	4
2. MATERIALI.....	6
2.1 Introduzione.....	6
2.2 L'acqua.....	6
2.3 I leganti idraulici .....	7
2.3.1 Il cemento .....	7
2.4 Gli aggregati.....	8
2.5 Gli additivi.....	8
2.5.1 I superfluidificanti .....	9
2.6 Le fibre .....	9
2.6.1 Le fibre di carbonio .....	10
2.7 I Fillers carboniosi.....	11
2.7.1 Il Char di gassificazione .....	11
3. SCELTA E OTTIMIZZAZIONE DEGLI AGGREGATI .....	13
3.1 Introduzione.....	13
3.1.1 La distribuzione granulometrica .....	13
3.2 Gli aggregati impiegati da Acciona.....	14
3.3 Gli aggregati impiegati nella sperimentazione .....	16
3.3.1 La misura della densità .....	21
3.3.2 La densità ssa.....	23
4. PROVINI ACCIONA .....	26
4.1 Acciona.....	26
4.2 La composizione dei provini .....	26
5. CAUSE DEL DEGRADO DEL CALCESTRUZZO .....	29
5.1 Introduzione.....	29
5.2 Assorbimento capillare di acqua .....	29
5.3 Carbonatazione.....	29
5.4 Penetrazione di cloruri.....	31
6. METODI DI MISURA .....	33
6.1 Misure di impedenza elettrica sul calcestruzzo .....	33

7. TEST DI DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO.....	35
7.1 Introduzione.....	35
7.1.1 Metodo inserimento elettrodi.....	35
7.2 Prova di assorbimento d’acqua capillare.....	36
7.3 Prova di penetrazione cloruri tramite nebbia salina .....	37
7.4 Prova di carbonatazione accelerata .....	38
7.5 Prova di penetrazione di cloruri tramite cicli di asciutto/bagnato.....	40
8. RISULTATI.....	42
8.1 Introduzione.....	42
8.2 Assorbimento capillare.....	42
8.3 Penetrazione di cloruri.....	44
8.4 Nebbia salina .....	51
8.5 Carbonatazione .....	57
9. CONCLUSIONI.....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
BIBLIOGRAFIA .....	61
ELENCO FIGURE .....	62
ELENCO TABELLE .....	63

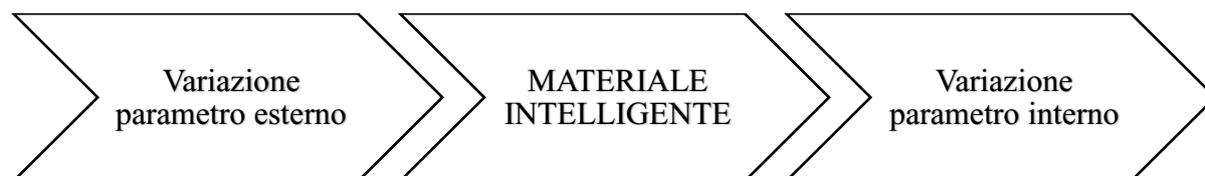
# 1. INTRODUZIONE

## 1.1 Premessa

L'obiettivo principale di coloro che progettano le strutture è che queste siano in sicurezza. Tuttavia, spesso accade che strutture apparentemente integre risultino essere più o meno seriamente danneggiate ed è per questa ragione che nasce l'esigenza di effettuare un monitoraggio continuo della salute della struttura in grado di fornire un valido supporto per individuare con sufficiente preavviso, l'insorgere di situazioni pericolose.<sup>1</sup>

I metodi per realizzare questo monitoraggio sono molteplici ma i sensori tradizionali possono essere applicati solo in un limitato numero di punti fornendo un'informazione parziale per la successiva fase di diagnosi.

L'obiettivo principale che si vuole raggiungere è quello di realizzare dei materiali intelligenti, ovvero materiali che siano capaci di rispondere ad un'azione esterna andando a modificare una caratteristica chimico/fisica o una specifica proprietà. Se questi materiali intelligenti vengono inseriti all'interno delle strutture si renderà possibile diagnosticare autonomamente il loro stato di tensione e di deformazione.



*Figura 1.1: Concetto di materiale intelligente*

Il primo passo da compiere in questa direzione dunque risulta essere l'impiego di materiali compositi che permettano di combinare capacità portanti e capacità diagnostiche.

In particolare, i materiali cementizi “self sensing”, ovvero capaci di autodiagnosticare il proprio stato di deformazione, si ottengono aggiungendo all'interno della matrice materie prime conduttive con peculiari proprietà elettriche.

Ad esempio, un modo per ottenere tale effetto consiste nell'aggiungere delle fibre di carbonio e/o fillers carboniosi. Le fibre hanno delle eccellenti caratteristiche meccaniche e sono capaci di condurre energia elettrica: per queste ragioni esse rappresentano una valida soluzione per realizzare strutture con capacità di “self monitoring”. I filler carboniosi invece modificano le caratteristiche elettriche delle matrici cementizie in cui sono inseriti e permettono di rilevare lo stato di deformazione. Essi inoltre sono nanoparticelle caratterizzate da un'elevata superficie specifica che le rende particolarmente attive dal punto di vista chimico.

Occorre anche precisare che caricando la matrice cementizia con una certa quantità di fibre di carbonio è possibile ottenere una rete di conduttori che viene localmente interrotta in presenza di un danneggiamento; misurando quindi la variazione della risposta elettrica del componente è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore per monitorare l'insacco e l'evoluzione del danneggiamento.<sup>2</sup>

Nella tesi verranno analizzati campioni di calcestruzzo composti da vari mix designs. Parte dei provini analizzati sono stati realizzati all'interno dell'Università Politecnica delle Marche. Nella presente tesi vengono studiati i materiali e le loro giuste composizioni per la realizzazione di tali provini.

La restante parte dei provini è stata creata dall'azienda Acciona e spedita all'Università Politecnica delle Marche. Nella presente tesi, questi ultimi campioni sono stati sottoposti a test di durabilità quali prove di assorbimento capillare, penetrazione di cloruri, nebbia salina e camera di carbonatazione.

Per la valutazione degli impatti dei tests di durabilità sullo stato fisico del calcestruzzo è stato svolto un monitoraggio dell'impedenza elettrica. Le misure sono state effettuate nella configurazione a 4 elettrodi (metodo Wenner) e lo strumento utilizzato è il Potenziostato/Galvanostato/ZRA Gamry Reference 600.



Figura 1.2: Strumento Gamry con elettrodi

Il Gamrt è uno strumento di misura elettrochimico che può funzionare come un potenziostato, un galvanostato o un amperometro a resistenza zero. Consente di acquisire dati di impedenza fino a 5 MHz; inoltre è dotato di isolamento elettrico dalla terra in modo da evitare possibili accoppiamenti con il campione preso in analisi (attraverso la formazione di una capacità parassita) e prevenire quindi errori nella misura. Infatti, se non ci fosse l'isolamento elettrica dalla terra, la corrente iniettata dallo strumento che passa nella capacità parassita, risulterebbe rilevata nella misura in un'induttanza.

Al Gamry sono associati elettrodi che, in base alle esigenze di misura, saranno collegati in numero adeguato al campione. Tali elettrodi sono:

- Working electrode (WE), elettrodo di lavoro in cui è fatta passare la corrente.
- Working Sense (S), elettrodo di rilevamento della corrente e sul quale viene calcolata la differenza di potenziale rispetto al RE;
- Reference (RE), è l'elettrodo in cui il potenziale è stabile ed è noto il suo valore; grazie a questa caratteristica è usato come punto di riferimento per la misura;
- Counter (CE), è un elettrodo ausiliario di materiale inerte che ha lo scopo di chiudere il circuito elettrico;

## 2. MATERIALI

### 2.1 Introduzione

La scelta del materiale è una parte fondamentale di qualunque tipo di progetto e presenta criticità dal punto di vista delle caratteristiche e dei costi dello stesso. Normalmente si arriva alla scelta definitiva facendo un compromesso tra esigenze tecniche, commerciali ed economiche.

In particolare, il calcestruzzo è un impasto omogeneo costituito da legante, aggregati ed acqua che, per effetto dei fenomeni di presa e indurimento attivati dal legante, raggiunge valori di compattezza e di resistenza tipici dei materiali litoidi, ovvero materiali che hanno caratteristiche simili a quelle della pietra. La resistenza a compressione del calcestruzzo dipende sostanzialmente dalla qualità e dal dosaggio dei componenti e dall'accuratezza dei procedimenti adottati per la preparazione dell'impasto e per l'esecuzione delle opere.

In linea con gli obiettivi della tesi, alle varie miscele sono state aggiunte differenti componenti carboniose al fine di testarne il comportamento elettrico; in particolare sono state aggiunte fibre di carbonio riciclate e char proveniente dalla gassificazione di biomasse in forma di filler.

### 2.2 L'acqua

L'acqua risulta essere un elemento indispensabile per la produzione del calcestruzzo in quanto essa determina l'idratazione del cemento e quindi attiva i processi di presa e di indurimento.

La qualità dell'acqua d'impasto è importante perché i sali o le impurità che può contenere possono interferire con i processi di presa e indurimento e influenzare la resistenza meccanica finale o causare efflorescenze e macchie sulla superficie della pasta.

La quantità di acqua all'interno del composto cementizio influisce sulle sue proprietà allo stato indurito in quanto un eccessivo quantitativo di acqua rispetto al cemento all'interno del materiale determina una drastica riduzione delle resistenze meccaniche mentre un quantitativo esiguo potrebbe compromettere la lavorabilità del prodotto e la sua corretta posa in opera.

In particolare, occorre prestare attenzione non tanto ad un eccessivo quantitativo di acqua in assoluto quanto ad un eccessivo rapporto tra acqua e legante, definito  $a/c$  in riferimento al generico legante cementizio. Quest'ultimo rapporto è senz'altro il fattore più importante per la resistenza del calcestruzzo, in quanto ha il maggiore effetto nel determinare la porosità sia della pasta cementizia sia della zona di transizione. Nel 1919 Abrams ha dimostrato che, a parità di condizioni di stagionatura, la resistenza a compressione ( $R_c$ ) di un calcestruzzo ben compattato è legata al rapporto  $a/c$  dalla seguente relazione:

$$R_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$$

in cui  $k_1$  e  $k_2$  sono delle costanti empiriche (legate a tutti gli altri parametri che, a parità di  $a/c$  influiscono sulla resistenza quali tempo di stagionatura, tipo di cemento, caratteristiche del provino ecc.).<sup>3</sup>

Pertanto, nel caso in cui sia necessario aggiungere acqua all'impasto per renderlo lavorabile è opportuna una conseguente aggiunta di legante idraulico in modo tale da riequilibrare il rapporto  $a/c$  e mantenere inalterate le proprietà del materiale.

La normativa UNI EN 1008 fissa dei requisiti fondamentali di accettazione per le acque destinate all'impasto di malte e calcestruzzi.

## 2.2I leganti idraulici

Secondo la definizione data dalla norma UNI EN 197-1 i leganti idraulici sono dei materiali inorganici finemente macinati che, quando mescolati con acqua, formano una pasta che fa presa e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione e che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott'acqua.

Sono dei leganti idraulici la calce idraulica, la calce aerea mescolata con cocciopesto o pozzolana e il cemento.

### 2.3.1 Il cemento

Il cemento è un legante idraulico. Gli impieghi principali dei cementi sono legati alla costruzione di opere in calcestruzzo armato o precompresso ma sono utilizzati anche per il confezionamento di malte impiegate per sistemi di finitura o per la realizzazione di murature.

Il cemento Portland rappresenta la base per la realizzazione della maggior parte dei cementi oggi utilizzati ed è stato considerato per molti anni il materiale strutturale di riferimento per edifici ed infrastrutture durevoli e per gli ambienti marini.

Si ottiene per macinazione del prodotto di cottura di una miscela di argilla, calcare e sabbia (clinker) con piccole aggiunte di gesso e, eventualmente, di altri materiali quali pozzolane naturali, microsilice, cenere volante, loppa d'altoforno, ecc.

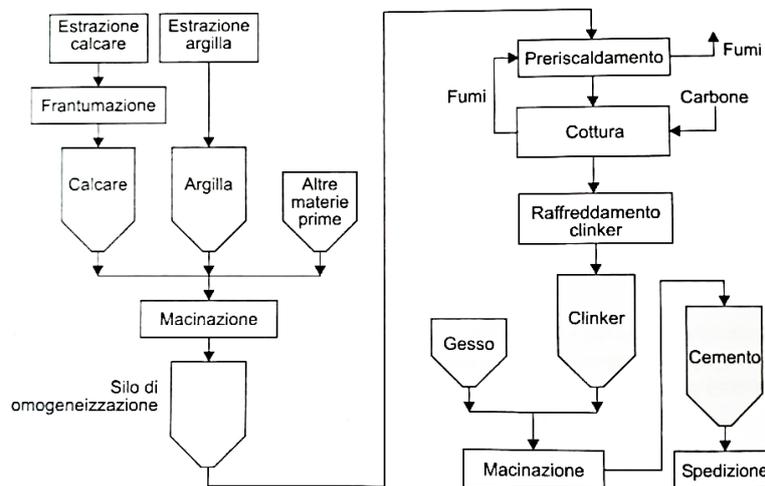


Figura 2.1 Schema semplificato del ciclo di produzione del cemento Portland

I cementi comuni sono classificati, in base alla norma UNI EN 197-1 e le classi principali sono cinque:

- Cemento Portland (tipo I)
- Cemento Portland di miscela (tipo II)
- Cemento d'altoforno (tipo III)
- Cemento pozzolanico (tipo IV)
- Cemento composito (tipo V).

Nella presente tesi sono stati utilizzati tre diversi tipi di cemento:

- CEM II/C-M (S-LL) (EDC-D)
- CEM II/A-S 42, 5R
- CEM VI/S-V (EDC-PL)

Il primo ed il terzo sono due cementi che non rientrano nella norma UNI EN 197-1 poiché sono stati sviluppati da HeidelbergCement AG all'interno del Progetto Europeo H2020 - EnDurCrete.

La composizione percentuale e le caratteristiche sono riservate.

Il cemento CEM II/C-M (S-LL) (EDC-D) è composto da clinker di cemento Portland (CEM I 52.5R), loppa d'altoforno e filler calcareo macinati separatamente.

Il cemento CEM VI/S-V (EDC-PL) è composto da clinker di cemento Portland (CEM I 52.5R), loppa d'altoforno e cenere volante.

Il secondo cemento è invece un cemento commerciale di miscela composto da clinker di cemento Portland (CEM I 52.5R) e loppa d'altoforno.

## 2.3 Gli aggregati

Gli aggregati sono sostanze minerali costituiti da particelle di dimensione e forme differenti adatte alla produzione di calcestruzzo e costituiscono l'ossatura principale della maggior parte dei materiali compositi presenti in edilizia.

Vengono definiti come “materiali minerali granulari particellari”, e vengono denominati “inerti” in quanto non contribuiscono al processo di idratazione e, quindi, ai processi di presa e indurimento, ma influiscono comunque, e in buona parte, sulle resistenze meccaniche ottenibili dal materiale composito.

Gli inerti possono essere naturali, artificiali o riciclati da materiali ottenuti dalle demolizioni.

Uno dei vantaggi legato al loro impiego riguarda l'aspetto economico in quanto essi costano meno del cemento. Inoltre, essi svolgono un ruolo essenziale nei confronti della stabilità dimensionale del calcestruzzo. Infine, essi hanno un ruolo determinante sul comportamento del calcestruzzo fresco e su molte proprietà del calcestruzzo indurito.

Gli aggregati si distinguono in particolare in base al diametro delle particelle in:

- Inerti finissimi (filler), minore di 0,063 mm;
- Inerti fini (sabbia), compreso tra 0,063 mm e 4 mm,
- Inerti grossi (ghiaietto o ghiaia), maggiore di 4 mm.

Differiscono in proprietà in base al processo di estrazione o di fabbricazione da cui derivano in quanto essi possono essere estratti da letti di fiume, da cave o prodotti dalla frantumazione di rocce ed anche in base alla forma che possiedono, arrotondata o spigolosa, e alla loro natura petrografica: sabbie silicee o calcaree.

La normativa europea UNI EN 13055 fissa i requisiti di accettabilità degli inerti utilizzati per confezionare calcestruzzi e malte.

Nella presente tesi sono stati utilizzati una sabbia, un ghiaino e una ghiaia, le cui caratteristiche sono riportate nel capitolo 3.

## 2.5 Gli additivi

Gli additivi per calcestruzzo sono sostanze aggiunte durante il procedimento di miscelazione del calcestruzzo, in quantità non maggiori del 5% in massa del contenuto di cemento, al fine di modificare le proprietà della miscela nello stato fresco e/o indurito.

A seconda della funzione di miglioramento che essi sono chiamati ad assolvere, gli additivi si distinguono in: acceleranti, ritardanti, aeranti, inibitori di corrosione, battericidi, idrofobizzanti, anti-ritiro, superfluidificanti.

### **2.5.1 I superfluidificanti**

I superfluidificanti sono additivi che permettono di ridurre il contenuto di acqua di una data miscela di calcestruzzo senza influenzarne la consistenza o che ne aumentano la lavorabilità senza influenzare il contenuto di acqua oppure che producono entrambi gli effetti in maniera simultanea. Con un superfluidificante è possibile ridurre la quantità d'acqua di una miscela di controllo almeno del 12%. I superfluidificanti sono basati su polimeri idrosolubili come *poli-naftalen-solfonati (PNS)*, *polimelammin-solfonati (PMS)* e i *policarbossilati (PC)*. Da un punto di vista prestazionale i superfluidificanti a base di policarbossilati sono capaci di fluidificare l'impasto molto di più rispetto a quelli a base di gruppi solfonici, ma soprattutto conservano meglio la lavorabilità durante il trasporto in climi caldi.

Gli additivi superfluidificanti svolgono un'azione deflocculante sui granuli di cemento in quanto essi contrastano l'attrazione di natura elettrostatica esistente tra i vari granuli, a seguito della formazione di cariche elettrostatiche di segno negativo formatesi a seguito della macinazione della polvere. Il processo deflocculante è possibile a seguito di uno dei due fenomeni di adsorbimento:

- Adsorbimento sulla superficie dei granuli di cemento delle molecole di superfluidificante e formazione di cariche elettrostatiche dello stesso segno negativo apportate dai gruppi anioni PNS-PMS. Repulsione elettrostatica tra i granuli di cemento;
- Adsorbimento sulla superficie dei granuli di cemento delle molecole di PA dovuto all'ingombro fisico delle catene laterali delle molecole che impediscono il contatto delle particelle cementizie.

È importante tenere presente che aumentando o diminuendo la quantità di additivo si incrementa o si riduce il suo effetto.

I primi usi degli additivi fluidificanti risalgono agli anni '30, ma la loro diffusione è avvenuta solo a partire dagli anni '70.

L'efficacia dei superfluidificanti dipende anche dal dosaggio che in genere varia tra 0.5 e 1.5% in massa rispetto al cemento.

Nella presente tesi sono stati utilizzati i seguenti additivi:

- additivo superfluidificante a base di policarbossilati (Viscocrete 2014, Sika AG)
- additivo mantentore di viscosità policarbossilico (Viscoflow 10150666, Sika AG)
- additivo superfluidificante acrilico (Dynamon SP1, Mapei S.p.A.).

## **2.6 Le fibre**

Le fibre sono particolarmente utili in quanto esse presentano una densità inferiore ed una resistenza e modulo elastico superiori al materiale costitutivo in forma massiva.

La loro funzione primaria è quella di aumentare tenacità alla frattura alla quale si è affiancata anche quella di conduttore elettrico per rendere le malte conduttive così da permettere il monitoraggio della salute della struttura attraverso l'utilizzo di appositi strumenti di misura.

Attualmente le fibre reperibili sono di diverse tipologie e materiali e vengono scelte in base alla specifica applicazione.

Nella presente tesi sono state impiegate fibre di carbonio riciclate.

### 2.6.1 Le fibre di carbonio

Le fibre di carbonio a struttura reticolare di grafite sono state introdotte alla fine degli anni '60 per soddisfare le esigenze dell'industria aerospaziale, che necessitava di fibre che avessero una resistenza e un modulo di elasticità molto elevati.

Esse sono composte al 99,9% da carbonio grafiteo chimicamente puro, avente una struttura cristallina esagonale, in cui i cristalli sono disposti in piani allineati parallelamente all'asse della fibra.

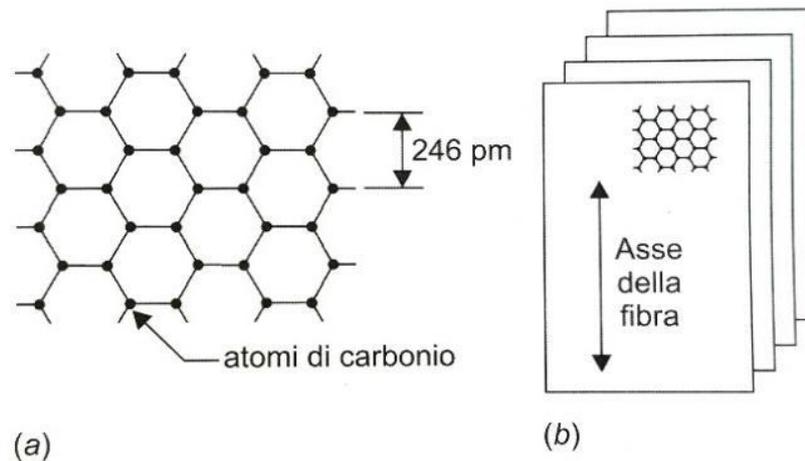


Figura 2.2 Struttura grafica delle fibre di carbonio: (a) reticolo esagonale degli atomi di carbonio nei diversi strati; (b) unità strutturale della fibra.

Tutte le tipologie di fibre di carbonio che sono attualmente reperibili in commercio sono ottenute mediante pirolisi di fibre polimeriche che rappresentano il materiale di partenza, detto anche precursore.

Esistono diversi tipi di precursore: rayon (di scarso livello qualitativo e dunque poco utilizzato), poliacrilonitrile (PAN), catrame/pece (PITCH).

A seconda del precursore il processo di fabbricazione si articola in modi differenti ma in linea generale esso si compone delle seguenti fasi:

- Una fase di filatura del polimero precursore, che non viene effettuata per il rayon;
- una fase di ossidazione da 220 a 300 °C in cui il filamento del precursore viene trasformato in un filamento infusibile, capace di essere riscaldato ulteriormente senza subire ritiro o alterazione di forma;
- la carbonizzazione, ovvero il riscaldamento in atmosfera inerte da 300 a 1500 °C. In questa fase il filamento è liberato da altri prodotti volatili iniziando la formazione di cristalli di grafite;
- la grafitizzazione, ovvero il riscaldamento in atmosfera inerte oltre i 2000 °C, fino a 2800÷3000 °C. A temperature superiori ai 2000 °C, si ottiene la struttura con meno difetti, in cui si riduce la distanza media tra i piani cristallini, e il materiale ottenuto può dirsi certamente grafite. Durante questa fase, se il precursore è il rayon, alle fibre è applicata una forza di trazione per innalzare notevolmente il modulo. Se il precursore è il PAN lo stiramento è applicato a temperature inferiori a quella di grafitizzazione, mentre non è necessario se il precursore è la pece;
- trattamenti superficiali per migliorare l'adesione con la matrice e la maneggiabilità.

I filamenti di carbonio hanno un diametro pari a 7÷12 µm e quindi risulta molto difficile maneggiarli; per questo motivo essi vengono riuniti in fasci di 1000÷160 000 filamenti individuali.

In base alle loro proprietà le fibre di carbonio sono classificate in:

- High Tensile Strength (HT): caratterizzate da resistenza superiore a 4000 MPa, modulo sui 250 GPa, allungamento a rottura di 1,5÷1,9%;
- High Modulus (HM): modulo di 350÷500 GPa, resistenza sui 2000 MPa, allungamento a rottura dello 0,5%;
- Intermediate Modulus (IM): resistenza simile alle HT, modulo sui 300 GPa e allungamento a rottura prossimo a 1,5%.

La resistenza e il modulo dipendono principalmente dal precursore utilizzato e, secondariamente, dal riscaldamento finale e dal grado di orientamento dei piani cristallini ottenuto con l'allungamento.

Le fibre di carbonio sono reperibili in commercio in forma continua o corta e queste ultime si distinguono in:

- macinate: sono le più corte (0,03÷3,0 mm) in media da 0,3 mm;
- tagliate circa a 6 mm di lunghezza;
- tagliate lunghe: hanno lunghezza di 10÷50 mm.

Le fibre utilizzate in questa tesi, sono fibre di carbonio riciclate (RCF) provenienti da una miscela di fibre di carbonio e grafite ex-PAN di tutte le origini, tagliate corte ( $6 \pm 0,5$  mm), rivestite con glicerolo.

## 2.7 Filler carbonioso

Nella presente tesi è stato utilizzato, come filler carbonioso, il char di gassificazione.

### 2.7.1 Char di gassificazione

La gassificazione è il processo chimico che permette di convertire un materiale ricco di carbonio, come il carbone, il petrolio o le biomasse, in monossido di carbonio, idrogeno ed altri composti gassosi attraverso la degradazione termica che avviene a temperature superiori a 700-800°C in presenza di un agente ossidante quale l'aria o il vapore. La miscela gassosa risultante dal processo costituisce quello che viene definito gas di sintesi (syngas) e rappresenta essa stessa un combustibile.

La gassificazione è un metodo per ottenere energia da differenti tipi di materiali organici, e trova anche applicazione nel trattamento termico dei rifiuti. L'uso del processo di gassificazione per la produzione di calore presenta alcuni vantaggi rispetto alla combustione diretta. Il syngas può essere bruciato direttamente in motori a combustione interna, o utilizzato per produrre metanolo o idrogeno, o convertito tramite il processo Fischer-Tropsch in combustibile sintetico.

Ad oggi, tuttavia, sono poco numerosi gli impianti che producono combustibili sintetici da gassificazione e quelli esistenti utilizzano principalmente il carbone come materia prima. La gassificazione, infatti, può anche utilizzare materie prime altrimenti poco utili come combustibili (ad esempio rifiuti organici). Inoltre, il processo di gassificazione permette di togliere con le ceneri elementi altrimenti problematici per la successiva fase di combustione, quali ad esempio cloro e potassio, consentendo la conseguente produzione di un gas molto pulito. La combustione dei combustibili fossili è attualmente ampiamente utilizzata su scala industriale per produrre energia elettrica. La gassificazione può anche cominciare con materiali che altrimenti sarebbero stati smaltiti come rifiuti biodegradabili. La gassificazione dei combustibili fossili è attualmente ampiamente utilizzata su scala industriale per produrre energia elettrica.

Il char è il residuo solido carbonioso poroso ottenuto dopo la gassificazione, raccolto direttamente nel portacenere. È un materiale amorfo, disordinato, isotropo, con struttura eterogenea che contiene principalmente carbonio elementare (50-80% in peso) e in proporzioni minori ossigeno, idrogeno, azoto e minerali come potassio, calcio, sodio, silicio e magnesio.<sup>4</sup>

Può avere diverse applicazioni, come carburante nei gassificatori o camere di combustione, carbone domestico, carbone attivo, fertilizzante, trattamento del letame, o anche come catalizzatore di catrame.<sup>5</sup>

Il char prodotto da biomassa in generale è molto più poroso rispetto ad un char ricavato dal carbone minerale (coke), infatti la sua porosità è circa 2-3 volte superiore con valori che spaziano dal 40 al 50%; anche le dimensioni di tali pori sono dell'ordine di 20-30 micron in luogo degli 0,5 nm del char da carbone minerale ed è per questa ragione il char da biomassa è molto più reattivo di quest'ultimo. Il char utilizzato nella seguente sperimentazione è ottenuto dalla gassificazione di trucioli di legno e proveniente da un impianto sito a Nocera Umbra che utilizza impianti legno-energia Spanner-Re<sup>2</sup> della Holz-Kraft. <sup>6</sup>



*Figura 2.3: Trucioli di legno destinati alla gassificazione*

## 3. SCELTA E OTTIMIZZAZIONE DEGLI AGGREGATI

### 3.1 Introduzione

La prima fase della sperimentazione ha come obiettivo quello di riuscire a creare un impasto che presenti caratteristiche il più possibile paragonabili alla miscela utilizzata da Acciona.

Dell'impasto creato da quest'ultima abbiamo a disposizione le curve granulometriche e le caratteristiche fisiche dei singoli aggregati utilizzati.

#### 3.1.1 Distribuzione granulometrica

Uno degli aspetti fondamentali per la produzione del calcestruzzo risulta essere la distribuzione delle dimensioni delle particelle degli aggregati i quali devono essere combinati, ovvero mescolati in opportune proporzioni, al fine di ottenere una distribuzione granulometrica finale che sia adeguata a garantire le proprietà richieste dal calcestruzzo, soprattutto in termini di lavorabilità.

La distribuzione granulometrica degli aggregati si determina impiegando una serie di setacci di diverse aperture e tale procedimento prende il nome di vagliatura. La norma EN 933-2 propone la seguente serie di setacci (le cui dimensioni sono da intendersi in mm): 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63 e 125.

I setacci vengono sovrapposti con apertura crescente verso l'alto in un apparecchio che genera delle scosse e delle vibrazioni e partendo da una massa nota di materiale, una volta avvenuta la separazione, si determinano le percentuali in massa di aggregato rimasto nei diversi setacci.

I dati vengono poi rappresentati mediante curve che riportano in funzione dell'apertura delle maglie del vaglio la percentuale di aggregato che riesce a passare ottenendo così la curva granulometrica dei passanti cumulativi.

La distribuzione granulometrica scelta per il confezionamento del calcestruzzo viene ottenuta mescolando diverse frazioni granulometriche (almeno una frazione fine, la sabbia e una grossa). Risulta dunque necessario stabilire le percentuali delle classi disponibili di aggregati, in modo che una volta miscelati essi presentino una distribuzione il più possibile vicina a quella richiesta.



Figura 3.1: Setacci su tavola vibrante

### 3.2 Aggregati impiegati da Acciona

I materiali impiegati da Acciona sono i seguenti:

- Sabbia lavata 0/5
- Gravel pisello 5/10
- Gravel ghiaino 10/15

Le curve granulometriche relative a questi materiali sono riportate nel seguente grafico:

Tabella 3.1. Analisi granulometrica aggregati Acciona

Apertura setaccio (mm)	PASSANTI CUMULATIVI (%)		
	Sabbia Lavata 0/5	Gravel Pisello 5/10	Gravel Ghiaino 10/15
32	100	100	100
16	100	100	98
8	100	68	18
4	94	1	0
2	76	0	0
1	59	0	0
0.5	37	0	0
0.25	15	0	0
0.125	6	0	0
0.063	2	0	0

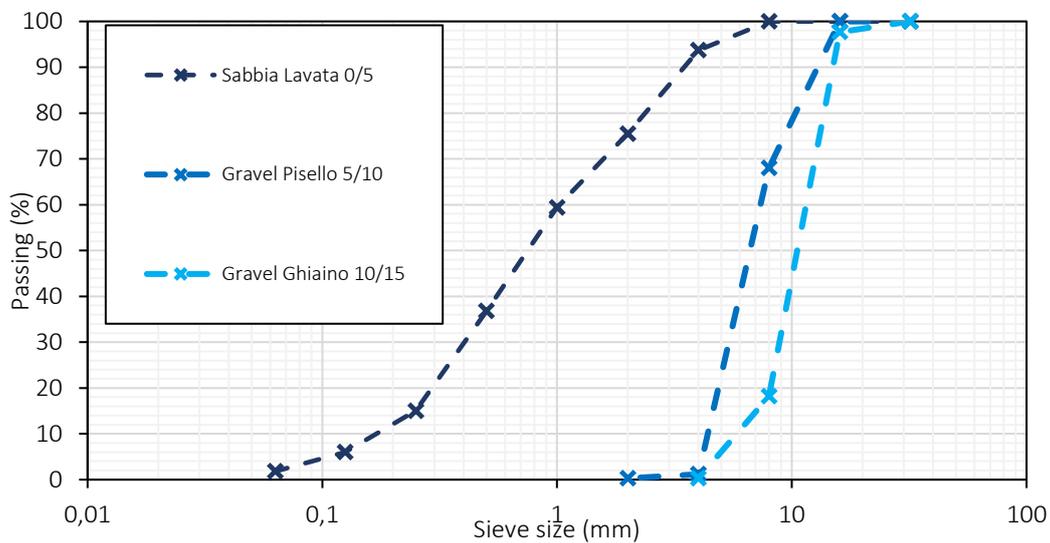


Figura 3.2: Curve granulometriche aggregati Acciona

Questi materiali presentano le densità riportate in tabella:

Tabella 3.2. Densità apparente aggregati Acciona

	<b>Sabbia Lavata 0/5</b>	<b>Gravel pisello 5/10</b>	<b>Gravel Ghiaino 10/15</b>
<b>Densità (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.73	2.76	2.72

Le quantità di aggregati impiegati per la produzione dell'impasto risultano essere le seguenti:

- 50% di Sabbia lavata 0/5;
- 20% di Gravel pisello 5/10;
- 30% di Gravel ghiaino 10/15.

Tali percentuali sono state ottenute per seguire al meglio la curva granulometrica usata per ottenere calcestruzzi autocompattanti, denominata come "0.45 power curve" e riportata di seguito.

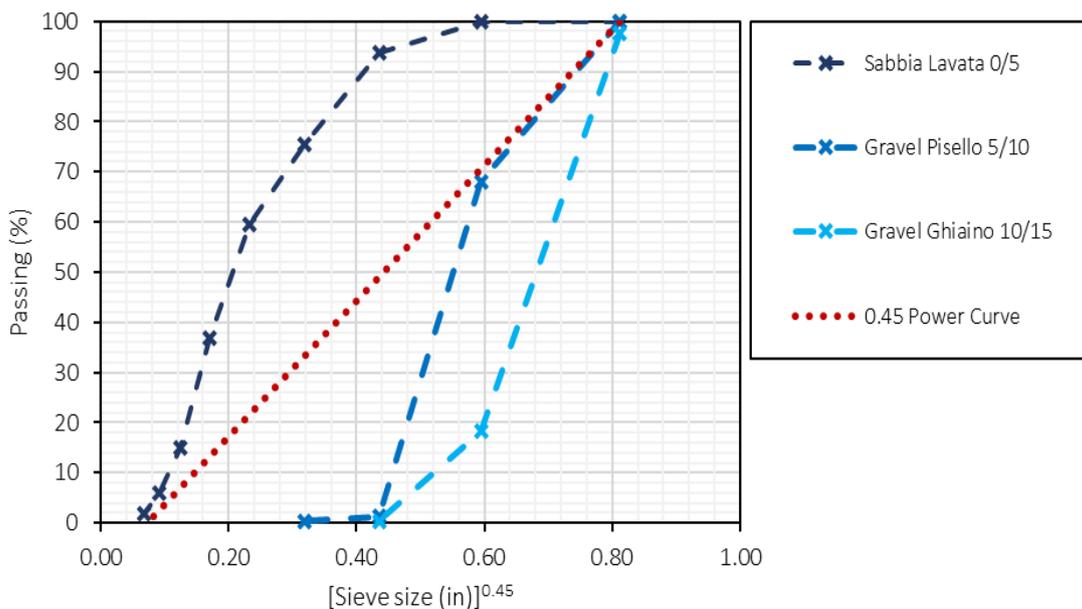


Figura 3.3: Curva granulometrica 0.45 power curve

Il risultato della combinazione di questi materiali, ottenuto mediante metodo grafico, nelle quantità specificate è una miscela che presenta la seguente curva granulometrica ottimale:

Tabella 3.3. Analisi granulometrica curva ottimale Acciona

Apertura setaccio (mm)	Passante cumulativo (%)			
	Sabbia Lavata 0/5	Gravel Pisello 5/10	Gravel Ghiaino 10/15	Curva ottimale
32	50	20	30	100.00
16	50	20	29	99.31
8	50	14	5	69.16
4	47	0	0	47.31
2	38	0	0	37.91
1	30	0	0	29.78
0.5	18	0	0	18.45
0.25	8	0	0	7.52
0.125	3	0	0	3.01
0.063	1	0	0	0.90

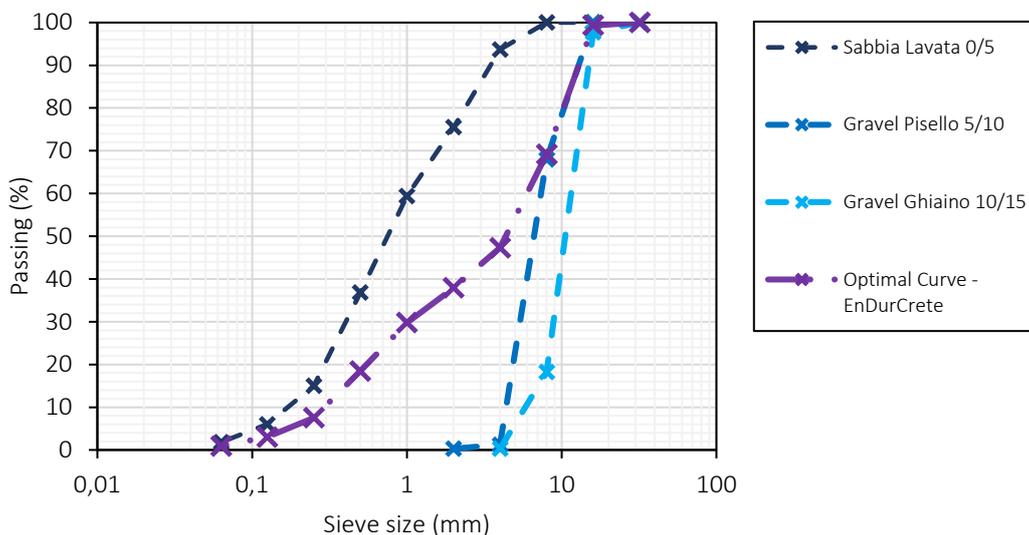


Figura 3.4: Curva granulometrica ottimale Acciona

### 3.3 Aggregati impiegati nella sperimentazione

Da aziende locali sono state reperite diverse tipologie di aggregati, sia in sacco che sfuse al fine di trovare la giusta composizione per gli impasti della presente sperimentazione.

Gli aggregati che sono stati analizzati sono i seguenti:

- Sabbia lavata 0/8;
- Misto tondo 10;
- Simonetti mucchio 6;
- Ripanti River Gravel 10/15;
- Ripanti Edilizia mucchio 6.

Dei suddetti aggregati sono state elaborate le relative curve granulometriche che sono riportate in seguito:

Tabella 3.4. Analisi granulometrica aggregati impiegati nella sperimentazione

Apertura setaccio (mm)	PASSANTI CUMULATIVI (%)				
	Sabbia Lavata 0/8	Misto Tondo 10	Simonetti Mucchio 6	Ripanti River Gravel 10/15	Ripanti Mucchio 6
32	100	100	100	100	100
16	100	100	100	100	100
8	100	18	100	84.4	99.84
4	87	0	22.99	0.8	14.47
2	59	0	2.30	0	0.25
1	37	0	1.68	0	0.14
0,5	23	0	1.62	0	0.12
0,25	12	0	1.58	0	0.11
0,125	4	0	1.01	0	0.09
0,063	1	0	0.49	0	0.4

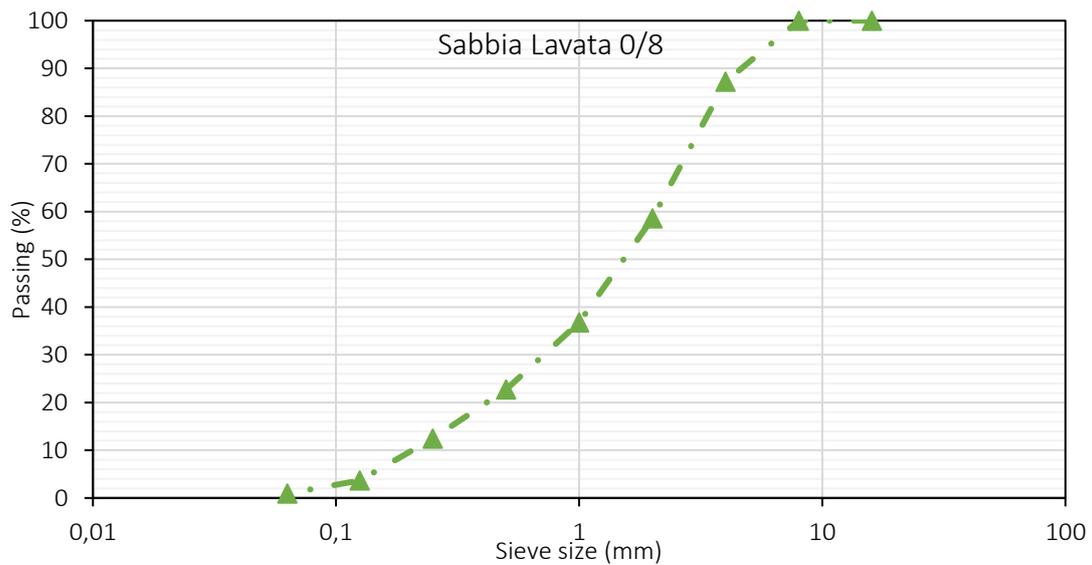


Figura 3.5: Curva granulometrica Sabbia Lavata 0/8



Figura 3.6: Sabbia Lavata 0/8

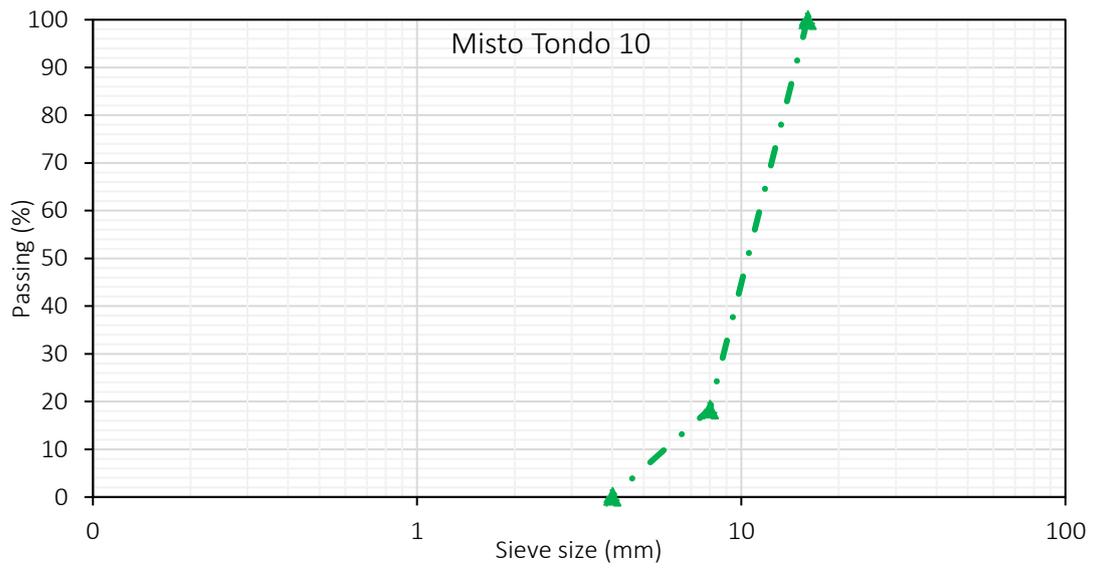


Figura 3.7: Curva granulometrica Misto Tondo 10



Figura 3.8: Misto Tondo 10

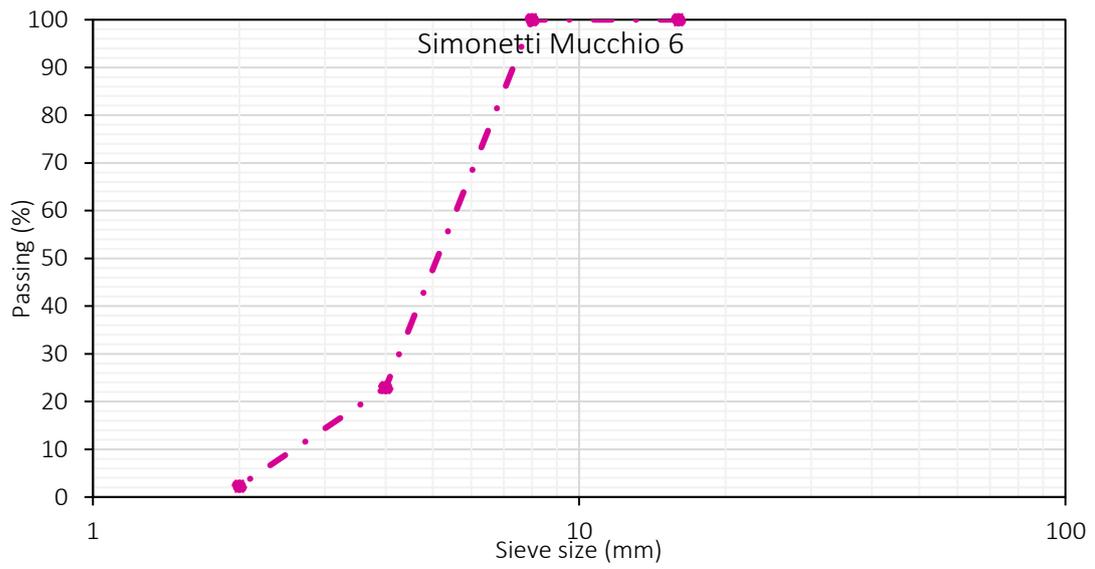


Figura 3.9: Curva granulometrica Simonetti Mucchio 6

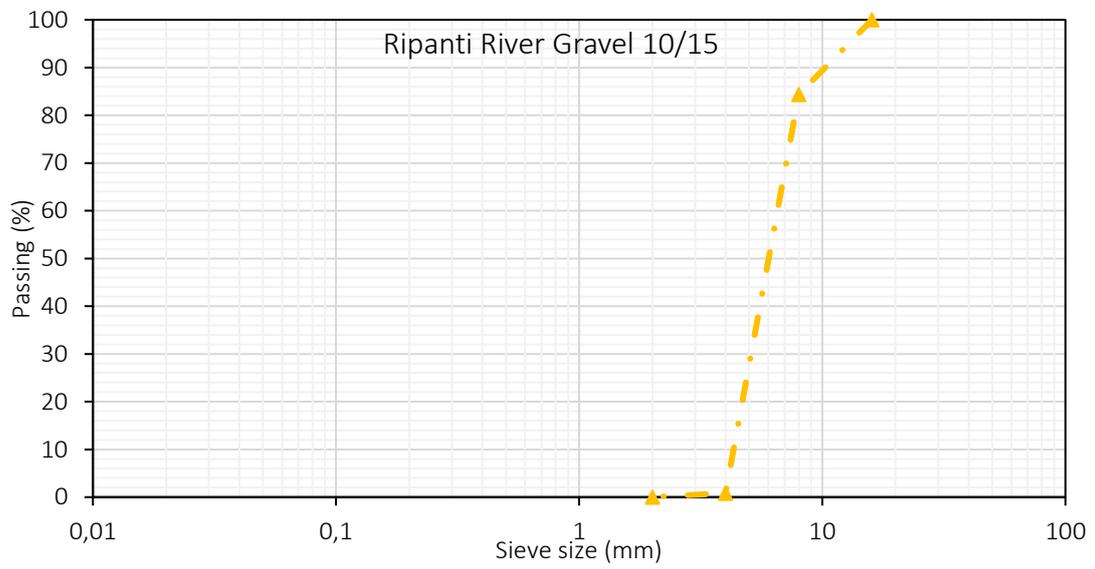


Figura 3.10: Curva granulometrica Ripanti River Gravel 10/15



Figura 3.11: Ripanti River Gravel 10/15

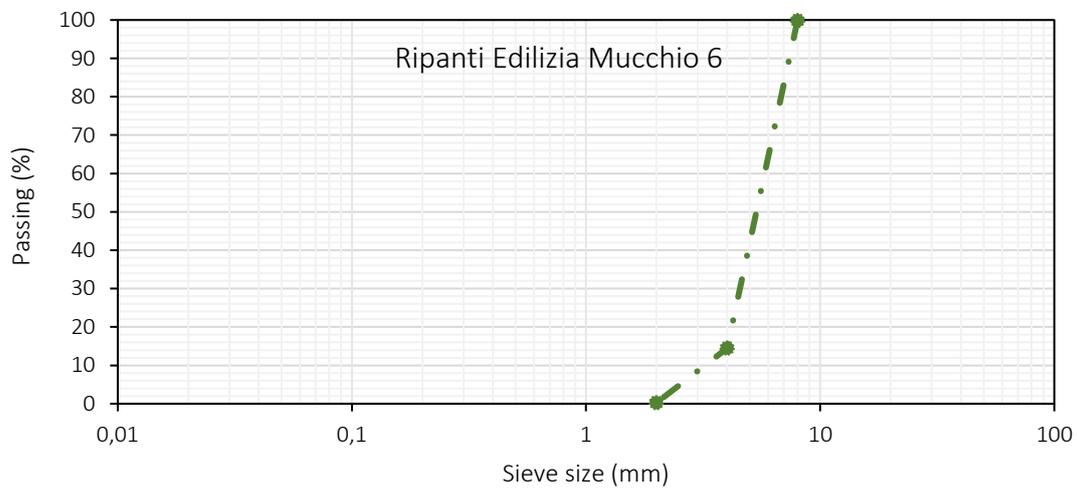


Figura 3.12: Curva granulometrica Ripanti Edilizia Mucchio 6

Partendo da questi materiali si è cercato di ottenere, tramite la loro combinazione, una miscela che fosse il più possibile simile a quella utilizzata da Acciona. Per fare ciò è stato utilizzato il metodo grafico.

I materiali “Ripanti mucchio 6” e “Simonetti mucchio 6” sono stati esclusi dalla sperimentazione perché non ritenuti idonei.

Di seguito sono riportate le curve granulometriche che evidenziano il confronto tra la curva ottimale EnDurCrete e quella ottenuta dalla combinazione dei materiali impiegati nella sperimentazione:

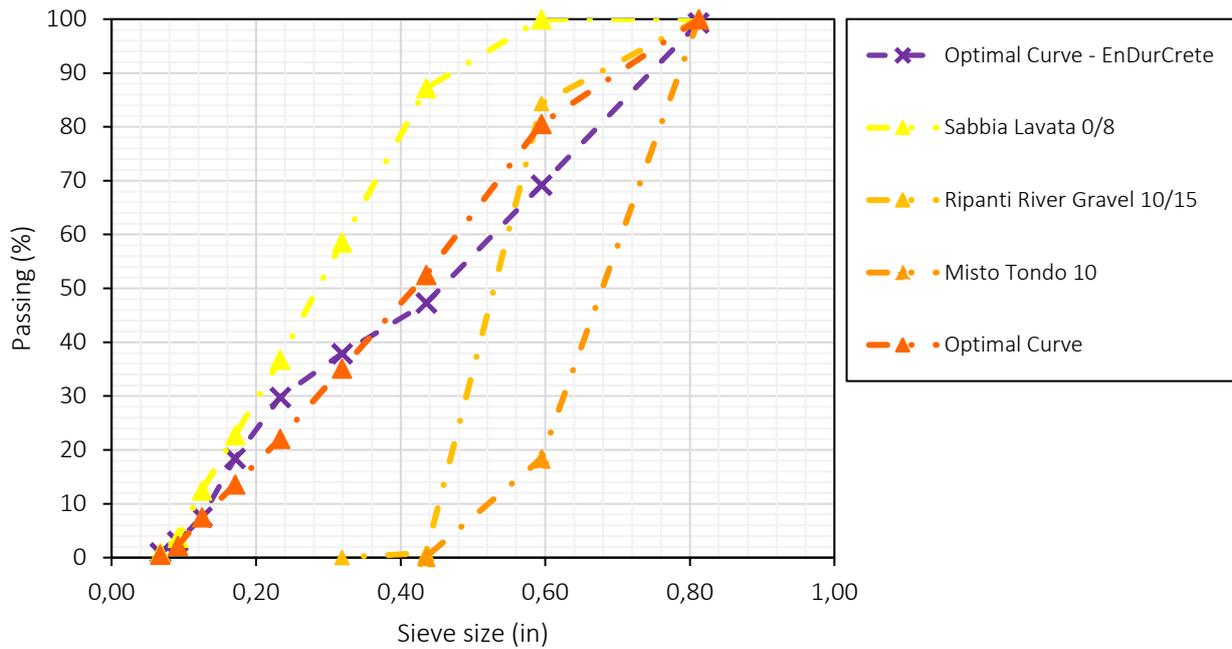


Figura 3.13: Confronto tra curve granulometriche

Per ottenere tale curva ottimale le percentuali impiegate dei materiali sono le seguenti:

- 60% di Sabbia lavata 0/8;
- 20% di Ripanti River Gravel 10/15;
- 20% di Misto Tondo 10.

Di ciascun materiale selezionato per la sperimentazione sono state studiate le principali caratteristiche fisiche: densità e densità ssa.

### 3.3.1 Misura della densità

La densità dei materiali impiegati è stata misurata con il metodo del picnometro, usando al posto del picnometro un cilindro graduato.



Figura 3.14. Cilindro graduato

Di seguito viene riportato il procedimento che è stato seguito per effettuare la prova.

1. È stata essiccata la porzione di prova in stufa a  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  fino al raggiungimento della massa costante, dopodiché è stata lasciata raffreddare a temperatura ambiente.
2. Il cilindro è stato pulito, asciugato e pesato ( $M_0$ ).
3. Dopo aver aggiunto dell'acqua nel cilindro e tarato la bilancia, è stata aggiunta la porzione di prova e ne è stata registrata la massa ( $M_1$ ).
4. La porzione di prova non dovrebbe occupare più di  $\frac{1}{3}$  del volume del cilindro, per questa ragione si è deciso di aggiungere acqua fino al livello di 1000 ml per Misto Tondo 10 e Ripanti River Gravel 10/15 e fino al livello di 300 ml per Sabbia Lavata 0/8; con l'aiuto di una bacchetta sono state eliminate le bolle d'aria rimaste intrappolate.
5. Dopo aver eliminato il vuoto il cilindro è stato immerso in un bagno d'acqua per un'ora.
6. Dopo aver asciugato esternamente il cilindro, con il suo contenuto, ne è stata misurata la massa ( $M_2$ ).
7. Per determinare il volume del cilindro esso è stato pulito, asciugato, riempito d'acqua fino al livello di 1000 ml e pesato ( $M_3$ ).

Per calcolare la massa volumica dei granuli viene impiegata la seguente equazione:

$$\rho = \frac{M_1}{\frac{M_3}{\rho_w} - \frac{(M_2 - M_1 - M_0)}{\rho_w}}$$

Dove:

$\rho_w$  è la massa volumica dell'acqua;

$M_0$  è la massa del cilindro;

$M_1$  è la massa della porzione di prova, in grammi;

$M_2$  è la massa del cilindro, campione di prova ed acqua, in grammi;

$M_3$  è la massa dell'acqua che riempie il cilindro fino a 1000 ml.

Di seguito vengono riportati i calcoli effettuati per arrivare alla misura della densità dei materiali.

Tabella 3.5. Dati relativi a Misto Tondo 10

<b>Misto tondo 10</b>	
<b>Peso cilindro (g)</b>	402.83
<b>Peso netto aggregato (g)</b>	339.32
<b>Peso cilindro+aggregato+H<sub>2</sub>O (g)</b>	1611.47
<b>Peso cilindro + H<sub>2</sub>O</b>	1393.89
<b>Densità H<sub>2</sub>O a 20°C (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.9982

$$\rho = \frac{339.32}{\frac{(1393.89 - 402.83)}{0.9982} - \frac{(1611.47 - 339.32 - 402.83)}{0.9982}} = 2.78 \text{ g/cm}^3$$

Tabella 3.6. Dati relativi a Ripanti River Gravel 10/15

<b>Ripanti River Gravel 10/15</b>	
<b>Peso cilindro (g)</b>	402.44
<b>Peso netto aggregato (g)</b>	442.07
<b>Peso cilindro+aggregato+H<sub>2</sub>O (g)</b>	1654.76
<b>Peso cilindro + H<sub>2</sub>O</b>	1389.08
<b>Densità H<sub>2</sub>O a 20°C (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.9982

$$\rho = \frac{442.07}{\frac{(1389.08 - 402.44)}{0.9982} - \frac{(1654.76 - 442.07 - 402.44)}{0.9982}} = 2.50 \text{ g/cm}^3$$

Tabella 3.7. Dati relativi a Sabbia Lavata 0/8

<b>Sabbia Lavata 0/8</b>	
<b>Peso cilindro (g)</b>	166.72
<b>Peso netto aggregato (g)</b>	249.00
<b>Peso cilindro+aggregato+H<sub>2</sub>O (g)</b>	623.37
<b>Peso cilindro + H<sub>2</sub>O</b>	470.79
<b>Densità H<sub>2</sub>O a 20°C (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.9982

$$\rho = \frac{249.00}{\frac{(470.79 - 166.72)}{0.9982} - \frac{(623.37 - 249.00 - 166.72)}{0.9982}} = 2.58 \text{ g/cm}^3$$

Di seguito vengono riepilogati i risultati:

Tabella 3.8. Densità apparente materiali

	<b>Sabbia Lavata 0/8</b>	<b>Ripanti River Gravel</b>	<b>Misto Tondo 10</b>
<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.58	2.50	2.78

### 3.3.2 Misura assorbimento aggregati (condizione *ssa*)

L'aggregato può assorbire acqua all'interno dei suoi pori e sulla sua superficie ed è detto asciutto o insaturo quando i suoi pori aperti sono rispettivamente asciutti o non completamente riempiti d'acqua. È bagnato quando, oltre ad avere i pori completamente pieni d'acqua, ha anche la superficie bagnata. Una condizione molto importante è quella di saturo a superficie asciutta (*ssa*) che si ha quando i suoi pori aperti sono completamente pieni d'acqua mentre la superficie è asciutta. Questa è la condizione in cui si porta l'aggregato quando viene introdotto nell'impasto del calcestruzzo, assorbendo l'acqua d'impasto se è asciutto o insaturo e, viceversa, cedendo acqua all'impasto se è bagnato.

Si definisce umidità il contenuto percentuale d'acqua, riferito alla massa secca dell'aggregato. Il contenuto di umidità che individua la condizione *ssa* è detto assorbimento. Esso dipende dalla porosità dell'aggregato. La conoscenza dell'effettiva quantità di acqua presente nell'aggregato al momento del confezionamento del calcestruzzo è necessaria per procedere al calcolo della quantità d'acqua da aggiungere all'impasto. Infatti le ricette vengono in genere formulate con riferimento alla condizione *ssa*.

Per calcolare la densità *ssa* è stato seguito il seguente procedimento:

La porzione di prova è stata immersa nell'acqua contenuta nel cilindro a  $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$  ed è stata rimossa l'aria intrappolata facendo ruotare e scuotendo leggermente il picnometro tenuto in posizione inclinata.

Il picnometro è stato posto nel bagno d'acqua e la porzione di prova è stata mantenuta alla temperatura di  $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$  per  $(24 \pm 5)\text{h}$ .

Al termine del periodo di immersione il picnometro è stato estratto dal bagno d'acqua e, con leggera rotazione e scuotimento, ogni bolla d'aria rimasta intrappolata è stata rimossa.

L'aria intrappolata può anche essere eliminata mediante applicazione del vuoto.

Il picnometro è stato riempito con acqua fino al traboccamento ed il tappo è stato sistemato evitando di intrappolare aria nel recipiente. Il picnometro è stato dunque asciugato all'esterno e pesato,  $M_2$ .

L'aggregato è stato tolto dall'acqua e lasciato scolare per alcuni minuti.

Il picnometro è stato riempito con acqua a livello e il tappo risistemato nella stessa posizione di prima. Quindi il picnometro è stato asciugato all'esterno e pesato,  $M_3$ .

La porzione di prova che si è lasciata scolare è stata trasferita su un panno asciutto.

La superficie dell'aggregato posto sul panno è stata leggermente asciugata e, quando il primo panno non è stato più in grado di asciugare, l'aggregato è stato trasferito su un secondo panno assorbente.

L'aggregato è stato speso sul secondo panno in uno strato di spessore pari ad un solo granulo di aggregato e lasciato esposto all'aria lontano da raggi solari diretti o da altre fonti di calore fino a che ogni visibile film d'acqua fosse scomparso pur conservando un aspetto umido dell'aggregato.

La porzione di prova satura con superficie asciutta è stata trasferita nella bacinella e l'aggregato è stato pesato,  $M_1$ .

L'aggregato è stato essiccato nella stufa ventilata alla temperatura di  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  fino al raggiungimento della massa costante, è stato poi lasciato raffreddare a temperatura ambiente e pesato,  $M_4$ .

Tutte le masse sono state registrate con accuratezza almeno pari allo 0,1% della massa della porzione di prova  $M_4$ .



Figura 3.15. Misura ssa Ripanti River Gravel 10/15



Figura 3.16: misura ssa Misto Tondo 10

Per quanto riguarda la misura della condizione ssa della sabbia è stato utilizzato il metodo del castelletto come detto da normativa (UNI EN 1097-6). E' stato riempito uno stampino con un campione di materiale che successivamente, con cautela viene sfilato. Se il cono di aggregato non collassa la sabbia non ha ancora raggiunto la situazione di ssa. Il campione viene essiccato e la procedura viene ripetuta finché, togliendo lo stampino, si mostra come una piramide.



Figura 3.17: misura ssa Sabbia Lavata 0/8; (sx): condizione ssa non raggiunta; (dx) condizione ssa raggiunta.

I valori del contenuto di umidità rilevati nelle condizioni di ssa degli aggregati (assorbimento) sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 3.9. Assorbimento degli aggregati

	<b>Misto Tondo 10</b>	<b>Ripanti River Gravel 10/15</b>	<b>Sabbia Lavata 0/8</b>
<b>a (%)</b>	2.29	2.99	3.77

## 4. PROVINI ACCIONA

### 4.1 Acciona

Acciona è un'azienda europea leader nel settore delle costruzioni e delle infrastrutture civili che rispetta principi di sostenibilità. È presente in più di 30 Paesi con 9412 persone impiegate.

La strategia di Acciona è strettamente legata alla sostenibilità e come riconoscimento per l'impegno dimostrato, nel 2009 ha ottenuto il premio per la sostenibilità dell'Unione Europea.

Grazie alla vasta esperienza che ha maturato per quanto riguarda la costruzione di ponti, strade e strutture speciali, è ora in grado di sviluppare soluzioni tecniche per qualsiasi progetto e cliente, in ogni posto nel mondo e partecipando ad ogni passo del progetto, dal disegno alla costruzione ed al mantenimento delle infrastrutture.

Acciona impiega tecnologie all'avanguardia per sviluppare ed impiegare i materiali, i componenti, i sistemi e le soluzioni più avanzati per la sostenibilità.

Essa dispone del suo centro Ricerca&Sviluppo a Madrid composto da un team multidisciplinare e internazionale di circa 150 ricercatori altamente qualificati.

### 4.2 Composizione dei provini

I campioni inviati da Acciona sono già stagionati e su di essi sono state svolte soltanto prove di durabilità. La stagionatura di tali campioni è avvenuta per 28 giorni alla temperatura costante di 20°C e ad un'umidità relativa maggiore del 95%.

Sono state inviate tre tipologie distinte di campioni secondo i codici UNIVPM1, UNIVPM2 ed UNIVPM3. Si tratta di parallelepipedi di dimensioni 40x10x10cm.

Questi provini presentano i seguenti parametri:

- Classe di resistenza C35/45;
- Classe di esposizione ambientale XS1, XS2, XS3;
- Rapporto (acqua/cemento)<sub>max</sub> 0,45;
- Contenuto minimo cemento 340 kg/m<sup>3</sup>;
- Lavorabilità S5/SCC.

Tabella 4.1. Mix-design calcestruzzo campioni Acciona

Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	Acqua [kg/m <sup>3</sup> ]	Sabbia Lavata 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]	Gravel Pisello 5/10 [kg/m <sup>3</sup> ]	Gravel Ghiaino 10/15 [kg/m <sup>3</sup> ]	Aria [%]	Additivi [kg/m <sup>3</sup> ]	
						Sika Viscocrete 2014	Sika Viscoflow 10150666
360	162	968	390	575	3.2	1.0	1.5

Tabella 4.1 Campioni calcestruzzo Acciona

Tipo di cemento	Miscela	Dimensioni	Numero totale di campioni
<b>CEM II/C-M (S-LL) (EDC-D)</b>	UNIVPM1	(0.40 x 0.10 x 0.10) m	3
<b>CEM II/A-S 42.5R</b>	UNIVPM2	(0.40 x 0.10 x 0.10) m	3
<b>CEM VI/S-V (EDC-PL)</b>	UNIVPM3	(0.40 x 0.10 x 0.10) m	3
Totale			9

La composizione è la stessa per i 9 campioni di Acciona. L'unica differenza nei diversi gruppi è il tipo di cemento.

Il calcestruzzo è stato impastato con un rapporto a/c=0.42 con una classe di lavorabilità pari a S5.

I campioni sono stati trattati a 20°C con RH>95% per 28 giorni.

Dopo la stagionatura sono stati spediti all'UNIVPM. Dunque non è stato possibile monitorare il periodo della stagionatura mediante la misura dell'impedenza elettrica.

Presso le strutture dell'UNIVPM, i campioni di 40x10x10 cm sono stati tagliati ed in totale se ne sono ottenuti 4x(20x10x10) cm e 4x(10x10x10) cm. Entrambe le due tipologie di provini sono state sottoposte a degrado accelerato, in particolare, i campioni 20x10x10 cm sono stati usati per i test elettrici, mentre i provini 10x10x10 cm sono stati utilizzati per analizzare l'avanzamento dell'agente aggressivo a seconda del test accelerato (standard test).

Tabella 4.3. Campioni Acciona ottenuti dopo il taglio

Tipo di cemento	Mix	Dimensions	Test di durabilità	Number of specimens
<b>CEM II/C-M (S-LL) (EDC-D)</b>	UNIVPM1	(0.20 x 0.10 x 0.10) m	Test elettrici	4
		(0.10 x 0.10 x 0.10) m	Standard test	4
<b>CEM II/A-S 42.5R</b>	UNIVPM2	(0.20 x 0.10 x 0.10) m	Test elettrici	4
		(0.10 x 0.10 x 0.10) m	Standard test	4
<b>CEM VI/S-V (EDC-PL)</b>	UNIVPM3	(0.20 x 0.10 x 0.10) m	Test elettrici	4
		(0.10 x 0.10 x 0.10) m	Standard test	4
Totale (0.20 x 0.10 x 0.10) m				12
Totale (0.10 x 0.10 x 0.10) m				12

I tre provini da analizzare sono contraddistinti dalla tipologia di cemento.

UNIVPM1 è composto dal CEM II/C (S-LL) (EDC-D), dove:

- CEM II = cemento portland con una o più aggiunte minerali;
- C= percentuale di aggiunta;
- (S-LL) = aggiunta di loppa granulata d'altoforno (S) e calcare (LL).

UNIVPM2 è composto dal REFERENCE- CEM II/A-S 42,5R, dove:

- CEM II = cemento portland con una o più aggiunte minerali;

- A = percentuale di aggiunta;
- S = aggiunta di loppa d'altoforno;
- 42,5R = classe di resistenza [N/mm<sup>2</sup>].

UNIVPM3 è composto dal CEM VI/S-V, dove:

- CEM VI = cemento pozzolanico;
- S = aggiunta di loppa d'altoforno;
- V = aggiunta di ceneri volanti di tipo silicico;

Per effettuare le misure di impedenza elettrica sui campioni 20x10x10 cm sono stati aggiunti pioli in acciaio inox sulla faccia laterale distanziati tra di loro di 4 cm. Essi sono stati aggiunti forando i campioni e riempiendo i fori di malta in modo da fissare i pioli (Capitolo 7).

# 5. CAUSE DEL DEGRADO DEL CALCESTRUZZO

## 5.1 Introduzione

Il degrado del calcestruzzo può portare a variazioni delle condizioni di sicurezza per le armature al suo interno. Da qui nasce la necessità di definire la resistenza del materiale alla penetrazione di sostanze esterne.

Per durabilità del materiale si intende la capacità prestazionale dello stesso nel tempo, anche in condizioni aggressive. Tra le principali cause di degrado del calcestruzzo ci sono:

- Assorbimento capillare di acqua: l'acqua entra all'interno del calcestruzzo per la sua struttura porosa e fa da veicolo a sostanze aggressive (cloruri, solfati, ecc.).
- La carbonatazione del calcestruzzo: si tratta di una forma di degrado del calcestruzzo in cui il fronte procede gradualmente dall'esterno verso l'interno.
- La penetrazione di cloruri: essa avviene per differenza di gradiente di concentrazione.

La corrosione delle armature nel calcestruzzo dipende quindi dai processi di trasporto delle sostanze come acqua, aria e cloruri. La loro cinetica è funzione delle caratteristiche fisiche del calcestruzzo quali porosità, presenza di fessure, spessore e delle condizioni ambientali in cui esso si trova.

Si parla di permeabilità per indicare la tendenza del calcestruzzo a permettere l'ingresso di sostanze al suo interno.

## 5.2 Assorbimento capillare di acqua

Si tratta di uno dei processi di trasporto di sostanze all'interno del calcestruzzo il quale, dal momento che è un materiale dalla struttura complessa e ricca di pori, è in grado di assorbire acqua per effetto delle forze capillari, dovute a viscosità, tensione superficiale, ecc. Le forze capillari presentano la caratteristica di aumentare al diminuire delle dimensioni del poro e della viscosità del liquido. Per questa ragione è possibile distinguere due situazioni:

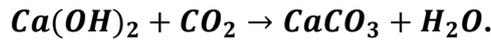
- Pori di diametro  $> 50$  nm: in questo caso è sufficiente che l'umidità relativa dell'aria esterna scenda sotto al 100% affinché l'acqua possa evaporare e l'evaporazione avviene senza comportare reazioni chimico-fisiche, dunque il calcestruzzo non subisce ritiri dimensionali.
- Pori di diametro  $< 50$  nm: in questo caso giocano un ruolo fondamentale le forze di tensione superficiale che trattengono l'acqua ostacolando l'evaporazione. L'acqua evapora dunque a livelli di umidità relativa esterna più bassi al diminuire del diametro dei pori.

Una volta che l'acqua è evaporata all'interno del poro capillare ne rimane comunque una parte che viene definita "adsorbita" ovvero uno stato molto sottile di acqua che resta ancorato alla superficie del poro che contribuisce in maniera limitata ai fenomeni di trasporto delle sostanze ed è inconsistente per la corrosione delle armature metalliche all'interno del calcestruzzo. Inoltre, essa è in gran parte allontanata se l'umidità relativa esterna scende sotto la soglia del 30%.

## 5.3 Carbonatazione

Si tratta di un fenomeno chimico che riguarda il calcestruzzo e che influisce negativamente anche sui ferri di armatura situati al suo interno favorendone l'ossidazione.

La carbonatazione consiste nell'interazione tra l'anidride carbonica presente nell'atmosfera e l'idrossido di calcio secondo la seguente reazione:



Si tratta di un processo inevitabile che risulta essere molto lento in quanto la concentrazione di  $\text{CO}_2$  nell'aria risulta essere tendenzialmente bassa se non in atmosfere particolarmente inquinate come quelle urbane.

Il fronte di carbonatazione si muove nell'ordine di 2-4 mm ad anno e la sua profondità può essere calcolata nel seguente modo:

$$x = K \cdot t^{\frac{1}{2}}$$

dove  $x$  è la profondità del fronte di carbonatazione in mm,  $K$  è la costante del calcestruzzo che dipende dalla profondità raggiunta dopo un anno anche se questo varia dal tipo di calcestruzzo e dall'ambiente e  $t$  è il tempo in anni.

La velocità di diffusione dell'anidride carbonica dipende dall'umidità relativa. Infatti la carbonatazione si annulla nel caso in cui l'umidità sia pari al 100% ma si produce solo in presenza di acqua (umidità almeno al 40%); l'intervallo in cui la velocità raggiunge un picco è intorno al 60-80% di umidità.

Anche l'ambiente in cui si trova il calcestruzzo è in grado di influenzare la velocità di diffusione dell'anidride carbonica: ad esempio in un ambiente industriale si avrà una carbonatazione più veloce rispetto ad un ambiente rurale.

Un elemento importante per il fenomeno della carbonatazione è il rapporto acqua cemento ( $a/c$ ) del calcestruzzo in quanto da esso dipende la porosità e la permeabilità. È importante tenere presente che per  $a/c < 0,6$  il degrado per carbonatazione può essere poco rilevante.

Il fenomeno della carbonatazione riguarda comunque il calcestruzzo armato mentre per quello non armato esso non è un fenomeno degradante. Nel primo caso (calcestruzzo armato) il carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) può far corrodere i ferri di armatura in quanto il prodotto della reazione porta il calcestruzzo a cambiare il pH (passando da circa 12-13 a 9); in questo modo il ferro non risulta più passivo e dunque può ossidarsi dando inizio a un processo di corrosione di tipo generalizzato (ovvero l'acciaio nel calcestruzzo si corrode, come se fosse in contatto con acqua pura).

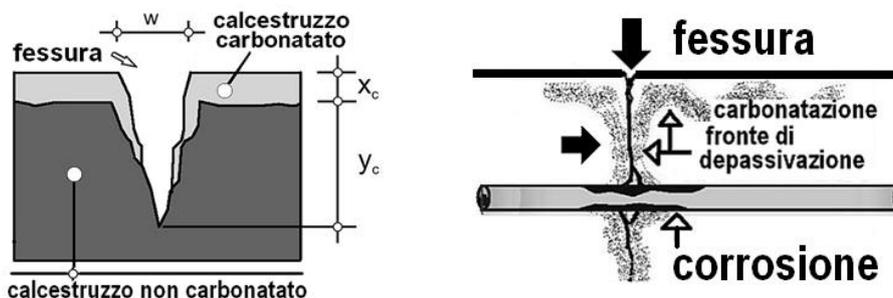


Figura 5.1. Carbonatazione calcestruzzo

È evidente che la corrosione delle armature porta con sé conseguenze pericolose quali la diminuzione della sezione resistente del ferro con conseguente riduzione del carico portante e della resistenza a fatica (ciò potrebbe portare alla rottura per schianto); la fessurazione o il definitivo distacco del copriferro ("spalling") in seguito alla generazione di tensioni dovute all'aumento di volume causato

dalla formazione di ruggine ed infine la perdita di aderenza tra calcestruzzo e armatura ferrosa che può portare a distacco e quindi a rotture per schianto della struttura.



*Figura 5.2. Espulsione copriferro*

La camera di carbonatazione simula un ambiente ad alta concentrazione di anidride carbonica al fine di accelerare il processo ed analizzare e quantificare la resistenza di diversi calcestruzzi a questo fenomeno.

## **5.4 Penetrazione di cloruri**

I cloruri sono una delle cause più pericolose per la corrosione delle armature ferrose perché essi determinano corrosioni di tipo puntuale, dunque non di prevedibile andamento. I cloruri che raggiungono con una concentrazione critica la superficie delle armature, vanno a rompere il film passivo che le protegge andando ad innescare il processo di corrosione, che risulta localizzato in tale zona.

I cloruri possono entrare in contatto con le armature sia perché essi erano già presenti nel mix del calcestruzzo (se si utilizzano inerti prelevati dal mare) o perché penetrano successivamente. Per quanto riguarda la presenza di cloruri nel mix di calcestruzzo sono state emanate delle leggi che impediscono l'utilizzo di materie prime contenenti significative concentrazioni di ioni cloruro ( $Cl^-$ ) mentre per quanto riguarda la penetrazione dall'ambiente esterno si può distinguere tra la penetrazione per diffusione e la penetrazione per permeazione. Per diffusione si intende il processo per cui le sostanze aggressive penetrano nel calcestruzzo per effetto di un gradiente di concentrazione: gli ioni cloruro si muovono dai pori più esterni del calcestruzzo dove sono presenti in concentrazione più elevate verso le regioni più interne con concentrazione inferiore. Essi possono diffondere solo se sciolti nell'acqua presente nei pori e la diffusione sarà maggiore quanto più il poro risulta saturo di acqua.

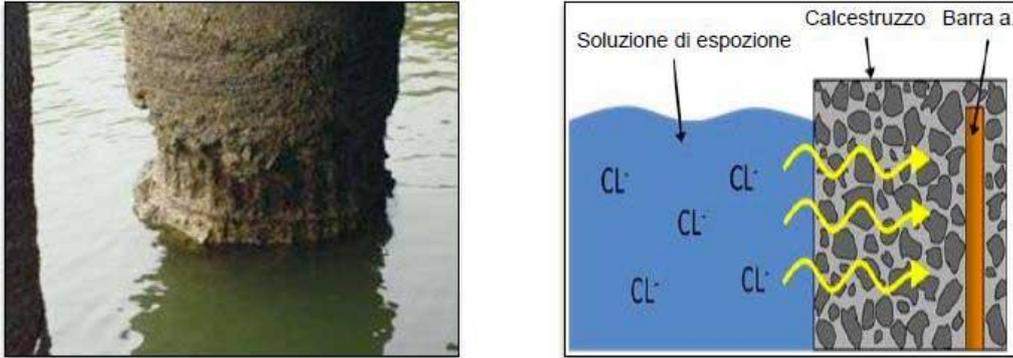
La concentrazione dei cloruri tuttavia non è l'unica causa della corrosione delle armature in quanto essa dipende anche dal tenore di ossigeno presente sulla superficie delle barre.

È dunque opportuno distinguere tra strutture in atmosfera marina, strutture immerse in acque marine e strutture sottoposte a cicli asciutto/bagnato.

Nel primo caso l'apporto di ossigeno avviene più semplicemente e dunque l'attacco corrosivo può avvenire anche in caso di concentrazioni modeste di cloruri.

Nel secondo caso l'ossigeno arriva più difficilmente alle armature e dunque la corrosione, per realizzarsi, necessita di gradienti di  $Cl$  piuttosto consistenti. Per strutture completamente e permanentemente immerse in acqua di mare, anche supposto che le condizioni per l'innescio siano rispettate, la velocità di corrosione si mantiene costante e quasi trascurabile (perché molto lenta).

Nel terzo caso infine il rischio di corrosione risulta essere molto elevato in quanto nella fase di bagnato i cloruri possono penetrare all'interno del calcestruzzo, mentre nei cicli di asciutto è l'ossigeno a pervenire in prossimità delle barre in modo da alimentare considerevolmente il fenomeno della corrosione.



*Figura 5.3: Penetrazione Cloruri*

## 6. METODI DI MISURA

### 6.1 Misure di impedenza elettrica sul calcestruzzo

Negli ultimi anni si stanno diffondendo le tecniche di misura dell'impedenza elettrica su campioni di calcestruzzo per valutarne la durabilità in quanto sono più facili e veloci rispetto alle tecniche di valutazione tradizionali che comportano la rottura del provino. Le misure dell'impedenza elettrica sono non distruttive e minimizzano l'impatto sulle proprietà del campione testato. Si tratta di tecniche che sono ancora in fase di sperimentazione non ancora normate (fino ad ora solo il metodo ASTM C1760 è stato standardizzato).

Misurando l'impedenza su campioni di calcestruzzo si possono stimare diverse proprietà:

- Grado di idratazione del cemento;
- Penetrazione di cloruri;
- Probabilità di corrosione delle armature;
- Penetrazione di acqua all'interno del calcestruzzo.

Inoltre, è stata rilevata una correlazione tra la resistenza a compressione del calcestruzzo e la sua resistenza elettrica; in particolare durante il periodo di stagionatura, al crescere dell'uno corrisponde un incremento dell'altro.

La resistività elettrica può essere usata come parametro di valutazione della penetrazione di cloruri in quanto la quantificazione del cloruro penetrato avviene attraverso la valutazione della carica  $Q$  che attraversa il materiale in un dato tempo  $t$ . Poiché la corrente  $I$  equivale al flusso di carica si può ricavare una correlazione tra  $Q$  e  $R$ , data dalla seguente relazione:

$$Q = I \cdot t = \frac{V}{R} \cdot t$$

dove  $Q$  = carica;  $V$  = differenza di potenziale;  $R$  = resistenza;  $t$  = tempo.

La relazione tra  $Q$  e  $R$  è dunque inversa e lineare: più la carica è alta, più è alta la penetrazione dei cloruri all'interno del campione di calcestruzzo; di conseguenza man mano che la resistenza elettrica cala, i cloruri avanzano verso l'interno del campione.

Per realizzare tali misure di impedenza viene impiegata la corrente alternata (AC) anche se essa introduce reattanza, ovvero un'opposizione al passaggio della corrente. Tuttavia, se venisse usata la corrente continua (DC) vi sarebbe il rischio di polarizzazione sia all'interfaccia elettrodo-campione sia all'interno del campione stesso.

Vi sono principalmente due tecniche di determinazione dell'impedenza elettrica su un campione di calcestruzzo:

- A due elettrodi;
- A quattro elettrodi.

Secondo la configurazione a 4 elettrodi questi ultimi vengono posizionati in linea ed equamente distanziati sulla superficie del campione di calcestruzzo. Sugli elettrodi esterni viene fatta passare una corrente alternata e sugli interni è calcolata la differenza di potenziale, così da poter calcolare la resistenza secondo la seguente legge:

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

dove  $V$ =differenza di potenziale tra gli elettrodi,  $I$ =corrente iniettata negli elettrodi ed  $R$ = resistenza del calcestruzzo. In base alla posizione e alla distanza tra gli elettrodi, si può determinare il volume

interno del campione su cui si effettua la misura; questo fenomeno è dovuto all'espansione delle linee di campo.  
Si tratta di un metodo veloce, non distruttivo, semplice e che può essere utilizzato anche in loco su strutture già realizzate.

# 7. TEST DI DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO

## 7.1 Introduzione

I test di durabilità sono stati svolti per tutte le composizioni di calcestruzzo prese in analisi. I campioni sono stati sottoposti a 4 prove di degrado accelerato.

I provini posti in analisi per tutte le prove sono parallelepipedi di grandezza 20x10x10 cm e i loro codici sono: UNIVPM1, UNIVPM2, UNIVPM3 per il mix design Acciona. Questi campioni, non avendo fatto la stagionatura in sede, non erano forniti di pioli metallici ai quali attaccare gli elettrodi dello strumento Gamry; dunque prima dell'inizio delle prove sono stati forati e forniti di pioli mantenuti in sede mediante malta colata all'interno del foro.

I test di durabilità effettuati sono i seguenti:

- assorbimento d'acqua capillare;
- penetrazione dei cloruri tramite nebbia salina;
- carbonatazione;
- penetrazione dei cloruri tramite cicli di asciutto/bagnato.

### 7.1.1 Metodo inserimento elettrodi

La malta è stata impastata con un cemento calcareo CEM II A-LL 42.5 R, un filler calcareo (dimensione delle particelle <math><400 \mu\text{m}</math>) ed un superfluidificante (Dynamon SP1, Mapei).

La malta è stata preparata con  $a/c = 0,67$  ed  $i/c = 3$ ; lavorabilità plastica (tra 140 e 210 mm).

I campioni sono stati stagionati a  $20^\circ\text{C}$  con umidità relativa  $> 95\%$  per 7 giorni prima delle prove.

Tabella 7.1. Mix-design della malta usata per riempire i fori

Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	Acqua [kg/m <sup>3</sup> ]	Filler calcareo [kg/m <sup>3</sup> ]	Dynamon SP1 [kg/m <sup>3</sup> ]	Agente espansivo CaO [kg/m <sup>3</sup> ]
467	311	1400	3.11	23.3

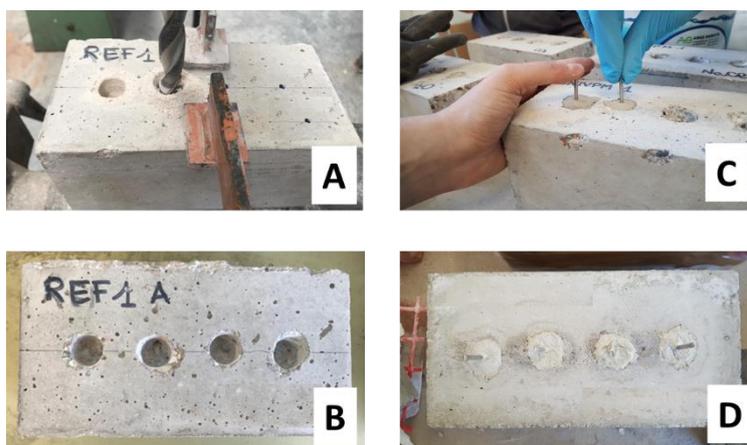


Figura 7.1. Procedura impiegata per installare gli elettrodi nei fori: foro (A), foro per gli elettrodi (B), riempimento con malta ed elettrodi (c), campione completo (D)

## 7.2 Prova di assorbimento d'acqua capillare

Questo test ha lo scopo di vedere come procede il fronte di acqua quando essa viene a contatto con il calcestruzzo.

L'acqua fa da veicolo ai principali ioni aggressivi come  $\text{Cl}^-$  o  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Per questa ragione, lo studio dell'assorbimento dell'acqua è considerato di primaria importanza per constatare la durabilità di un materiale da costruzione.

L'acqua assorbita per unità di area è stata misurata secondo quanto previsto dalla norma EN 15801.

Il test stima la quantità di acqua assorbita da un campione per azione capillare, monitorando la massa del campione nel tempo.

Lo standard è stato adattato in modo tale da poterlo sottoporre ad una misura di resistenza elettrica. In particolare i campioni non sono stati seccati nel forno altrimenti l'impedenza elettrica sarebbe stata estremamente alta e non misurabile (perché eccede la scala di misura dello strumento).

I campioni sono stati posizionati verticalmente in 1 cm di carta da filtro multistrato saturo di acqua distillata (figura 7.2) e mantenuti in un container chiuso per tutta la durata del test per evitare l'evaporazione dell'acqua.

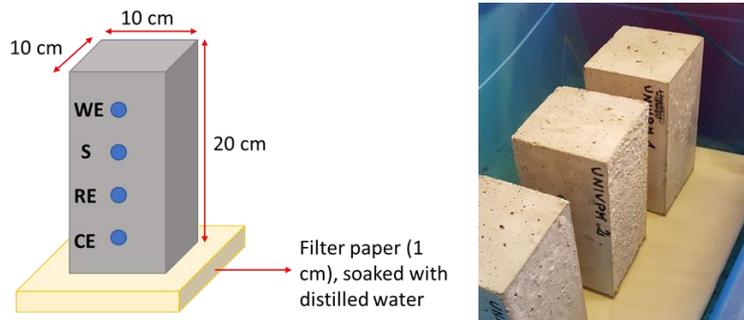


Figura 7.2. Assorbimento capillare di acqua del calcestruzzo di ACCIONA – setup

Le misurazioni sono state effettuate a 0, 10, 20, 30 e 60 minuti e a 4, 6, 24, 72, 144 e 168 ore.

Prima di ogni misura di impedenza (con una frequenza di 1 kHz-100 kHz), il campione è stato pesato. Secondo EN 15801, l'acqua assorbita per unità di area, è stata calcolata impiegando la seguente equazione:

$$Q_i = \frac{(m_i - m_0)}{A} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

Dove

- $Q_i$  acqua assorbita per unità di area, in  $\text{kg}/\text{m}^2$
- $m_0$  massa del campione a  $t_0$ , in kg
- $m_i$  massa del campione a  $t_i$ , in kg
- $A$  area del campione a contatto con l'acqua, in  $\text{m}^2$

### 7.3 Prova di penetrazione cloruri tramite nebbia salina

Ioni aggressivi come solfati e cloruri, che sono presenti per esempio in zone costiere, sono promotori della deteriorazione del calcestruzzo e della corrosione dei rinforzi incorporati.

Questo fenomeno è da considerarsi una delle maggiori cause della corrosione delle armature nel calcestruzzo.

Lo standard EN ISO 9227 è stato seguito per la preparazione del test di nebbia salina, al fine di simulare un ambiente caldo, umido e ricco di cloruro.

I campioni (orizzontali) sono stati posizionati in adeguati supporti all'interno della camera a nebbia salina (38°C, umidità relativa >100%, NaCl=5%).

Gli elettrodi inseriti per la misurazione elettrica sono stati sigillati con della plastilina al fine di prevenirne la corrosione.



Figura 7.3. Nebbia salina campioni Acciona

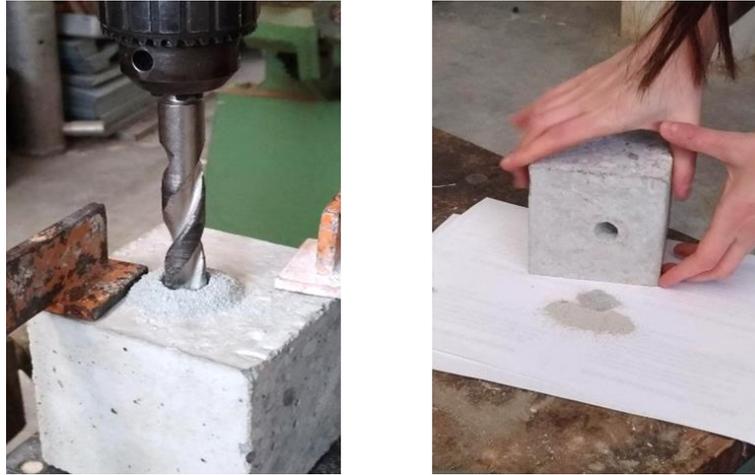
Le misure elettriche (con una frequenza di scansione tra 1 kHz e 100 kHz) sono state effettuate a 0, 7, 14, 21 e 28 giorni.

Al tempo 0 il campione era già stato sottoposto ad esposizione per 28 giorni.

Per l'analisi della concentrazione di cloruri liberi è stato seguito lo standard UNI 9944. La concentrazione di cloruri liberi è stata misurata dopo ogni settimana a diverse profondità (0-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm, 30-40 mm) sulla polvere prelevata dai provini cubici (10x10x10 cm) con la stessa composizione ed esposti alle stesse condizioni e agli stessi cicli bagnato-asciutto dei provini usati per i test elettrici.

Prima di procedere alla successiva profondità, per evitare la contaminazione dei diversi campioni di polvere raccolti alle diverse profondità di penetrazione, la punta del trapano è stata pulita con dell'acqua e il foro con aria compressa.

Ogni campione di polvere (approssimativamente 5 g) è stato messo in 20 ml di acqua distillata (rapporto polvere/acqua=1:4 in peso). La sospensione ottenuta è stata mescolata per 24 ore al fine di dissolvere i cloruri liberi dal campione solido. Successivamente, la sospensione è stata filtrata, diluita in 100 ml di acqua distillata ed analizzata per determinarne il contenuto di ioni cloruro liberi espressi come percentuale in peso del cemento.



*Figura 7.4. Prelievo di campioni di polvere per l'analisi di cloruri*

## **7.4 Prova di carbonatazione accelerata**

La carbonatazione dei materiali a base di cemento durante la loro vita utile è considerata un aspetto critico, in particolare in quelle regioni caratterizzate da un ambiente caldo e relativamente umido.

La carbonatazione della pasta del cemento causa l'abbassamento di pH, il quale a sua volta distrugge gli strati passivi dei rinforzi in acciaio che diventano inclini alla corrosione.

L'inizio della corrosione del rinforzo è il principale responsabile per la riduzione del periodo di vita utile dei rinforzi delle strutture in calcestruzzo.

I campioni sono stati mantenuti in una camera per il test di carbonatazione accelerata:  $T=21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $UR = 60 \pm 10\%$ ,  $\text{CO}_2 = 3 \pm 0.2 \text{ vol.}\%$



*Figura 7.5. Provini nella camera di carbonatazione*

Le misure elettriche (con una frequenza di scansione tra 1 kHz e 100 kHz) sono state effettuate a 0, 7, 14, 21 e 28 giorni.

Al tempo 0 il campione era già stato sottoposto ad esposizione per 28 giorni.

La profondità della carbonatazione è stata misurata secondo quanto previsto dallo standard EN 13295 su provini cubici (10 cm a lato) esposti alle stesse condizioni del campione prismatico nella camera di carbonatazione.

Nello stesso periodo delle misure elettriche, il provino è stato rotto e la superficie interna è stata trattata con 1% di soluzione di fenolftaleina in alcool etilico.

Nella parte di campione dove non c'è stata la carbonatazione, dove la malta è ancora altamente alcalina, è stata ottenuta una colorazione violacea-rossa, dove non c'è cambiamento di colore è stata misurata invece la regione di carbonatazione.



*Figura 7.6. Test fenolftaleina*

Per la misurazione della penetrazione media è stato utilizzato il programma AutoCad calcolando prima la superficie carbonatata e poi dividendola per la lunghezza del lato. Questa procedura è stata ripetuta su tutte e quattro le facce del campione e infine è stata calcolata la misura della penetrazione media.

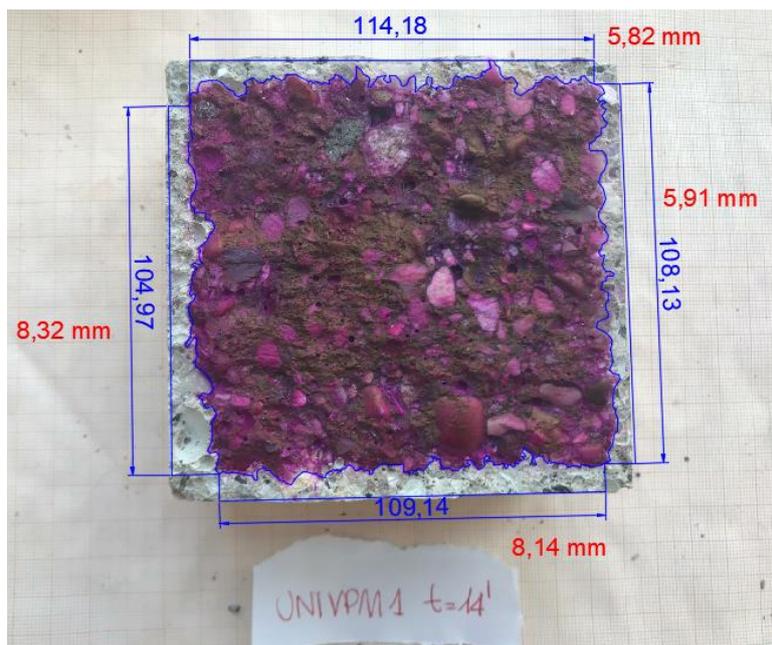


Figura 7.7. Calcolo carbonatazione con AutoCad

## 7.5 Prova di penetrazione di cloruri tramite cicli di asciutto/bagnato

Al fine di simulare un attacco di cloruri in un ambiente sottoposto a cicli di asciutto/bagnato, i campioni (orizzontali) sono stati esposti a 6 cicli settimanali di asciutto/bagnato (2 giorni bagnato e 5 giorni asciutto) in una soluzione 3,5% NaCl.

I campioni sono stati posizionati in un contenitore di plastica chiuso su supporti cilindrici al fine di garantire l'assorbimento della soluzione dalla superficie inferiore e consentire un livello di soluzione di 9 cm di altezza.

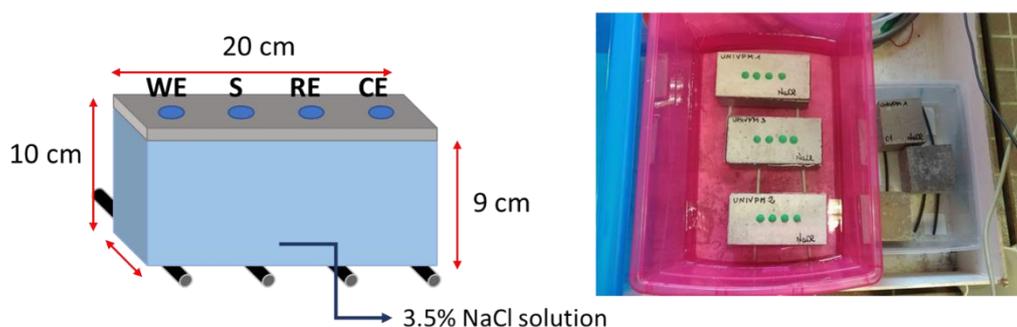


Figura 7.8. Penetrazione di cloruri campioni Acciona

Durante i cicli di asciutto/bagnato il livello della soluzione è stato mantenuto costante andando ad aggiungere quella assorbita.

Gli elettrodi inseriti per la misurazione elettrica sono stati sigillati con della plastilina al fine di prevenirne la corrosione.

Le misurazioni elettriche (con una frequenza di scansione tra 1 kHz e 100 kHz) sono state effettuate 2 volte per ogni ciclo: immediatamente dopo l'estrazione dalla soluzione e subito prima della successiva immersione, per un totale di 6 cicli. Ad tempo  $t_0$  il campione era già stato sottoposto a 3 cicli di esposizione.

L'analisi di concentrazione di cloruri liberi è stata effettuata alla stesso modo dell'analisi dei cloruri dei campioni esposti in nebbia salina.



*Figura 7.9. Pesatura campioni e sistemazione nei contenitori a tenuta stagna*

# 8. RISULTATI

## 8.1 Introduzione

In questo capitolo verranno descritti i risultati derivanti dalle varie prove. Con il fine di rendere confrontabili i risultati e di poter ottenere misure significative, sono state utilizzate le stesse impostazioni per tutte le prove, ovvero: il range di frequenza che è stato scelto per la scansione va da 1 kHz a 100 kHz, la corrente AC imposta è pari a 0,0001A, i punti di acquisizione sono 10 per decade. Per svolgere le misure sono stati collegati tramite morsetti gli elettrodi del Gamry con i pioli metallici presenti sui provini di calcestruzzo. Lo strumento di misura è collegato al computer tramite USB e, attraverso il Gamry Software, viene creato un file di testo contenente i valori di impedenza al variare della frequenza secondo le specifiche. Da tale file si è deciso di prendere in considerazione principalmente valori corrispondenti alle frequenze di 1 kHz, 10 kHz, 31.6 kHz, 50.2 kHz e 100 kHz; tale scelta è stata fatta per considerare approssimativamente un punto per decade per valori bassi di frequenza, per poi considerare punti sempre più radi fino ad arrivare alla frequenza massima di 100 kHz. Inoltre, la giustificazione della minima frequenza (1kHz) nasce dal fatto che per valori inferiori potrebbero verificarsi eventuali polarizzazioni del materiale e di conseguenza errori di misura<sup>8</sup>.

In conclusione, come si evince dal grafico (figura 8.1), dato che al variare della frequenza non si assiste ad una importante variazione della resistenza elettrica, per i successivi risultati verrà presa come riferimento solamente la frequenza a 10 kHz.

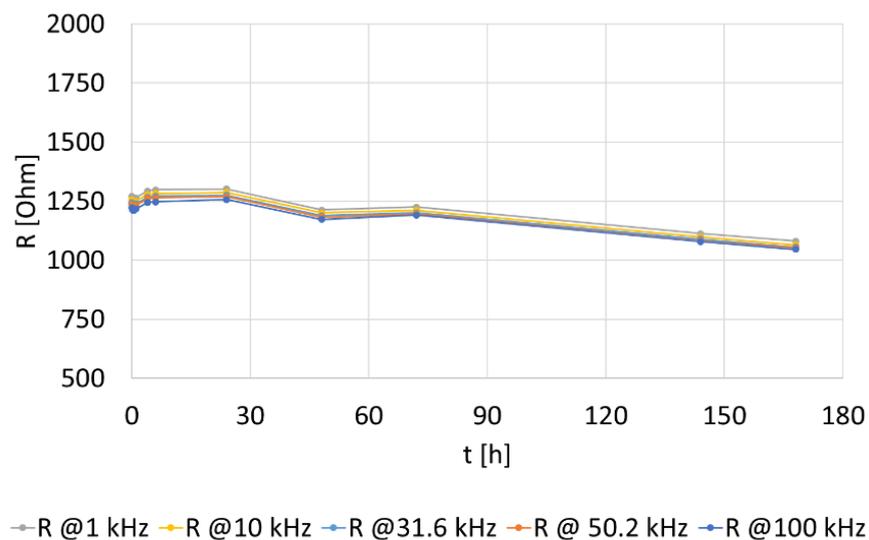


Figura 8.1. Correlazione Resistenza-Tempo a varie frequenza di misura

## 8.2 Assorbimento capillare

Questa prova di durabilità è stata monitorata eseguendo misure di resistenza elettrica. Per ogni campione vengono riportati i grafici di resistenza elettrica in funzione dei tempi in cui sono svolte le misure. Si ricorda che le misure di resistenza sono svolte con configurazione a 4 elettrodi. La prova di durabilità è svolta ponendo il campione in verticale su un panno impregnato di acqua (come indicato nella norma UNI 10859:2000).

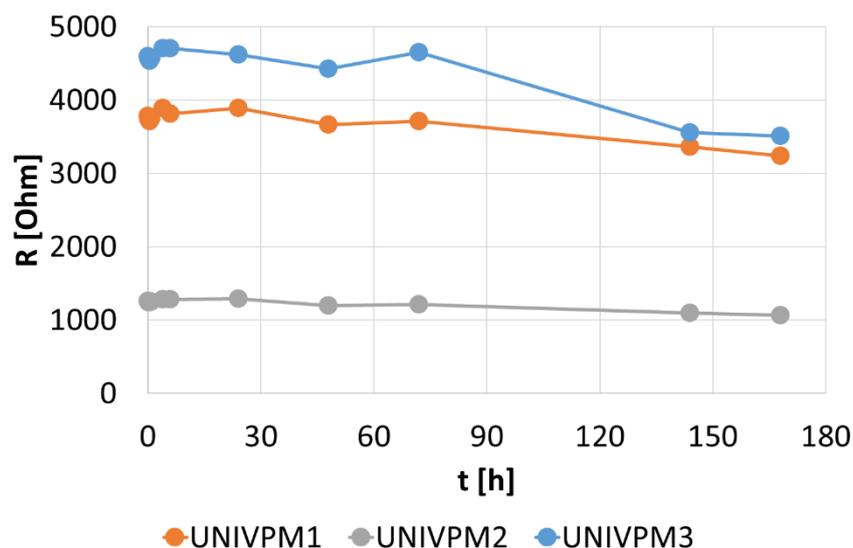


Figura 8.2. Risultati di assorbimento capillare di acqua su provini Acciona: resistenza elettrica a 10 kHz

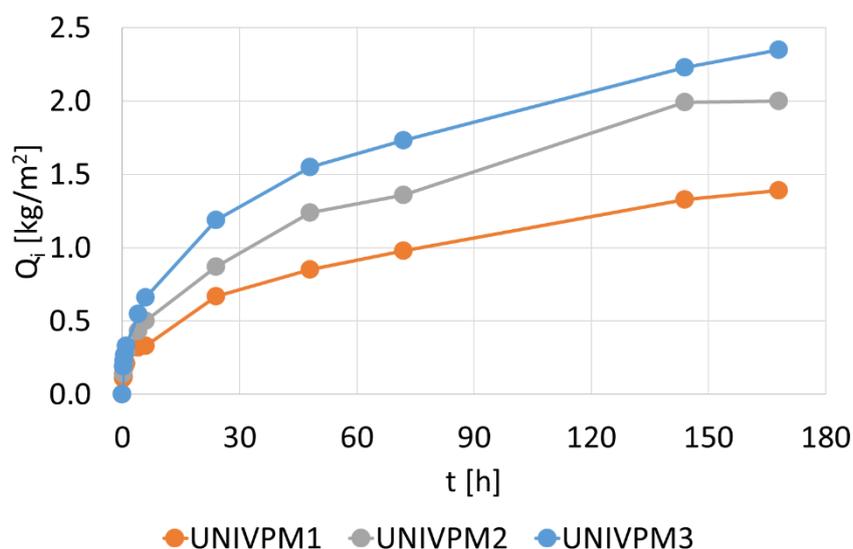


Figura 8.3. Risultati di assorbimento capillare di acqua su provini Acciona: acqua assorbita per unità di area

Dai risultati precedenti si può notare come la resistenza elettrica decresca al passare del tempo (figura 8.2) e dunque all'aumentare dell'acqua assorbita per suzione capillare dal calcestruzzo (figura 8.3) questo perché l'acqua va a riempire i pori del calcestruzzo ed essendo l'acqua un conduttore migliore dell'aria fa diminuire la resistenza elettrica globale. In un primo momento si può notare che, nonostante ci sia un veloce assorbimento di acqua, la resistenza elettrica non cambia e questo avviene per via del fatto che la risalita capillare non è ancora arrivata nel volume interessato dalla misurazione. Il campione più sensibile alla variazione di resistenza elettrica è UNIVPM3, che come si vede dal grafico è il campione che assorbe più acqua (figura 8.3). Il campione UNIVPM1 invece è quello che assorbe meno acqua. Il campione che risente meno in termini di variazione di resistenza elettrica è UNIVPM2, nonostante assorba di più rispetto UNIVPM1, questo probabilmente dipende dal tipo di cemento utilizzato per il suo mix design, si nota infatti che a differenza degli altri due provini parte già da una resistenza elettrica molto minore.

Si riporta in conclusione la relazione tra resistenza e quantità di acqua assorbita (figura 8.4). Come si evince dal grafico, inizialmente la curva di interpolazione per tutti i campioni è pressoché stazionaria. Quindi, anche se i campioni assorbono, la resistenza elettrica non cambia. Più va avanti il tempo più si percepisce la diminuzione di resistenza al variare di acqua assorbita. Si evidenzia inoltre che le curve con maggiore pendenza sono quelle dei campioni UNIVPM1 e UNIVPM3 che sono quelli più sensibili elettricamente all'ingresso dell'acqua.

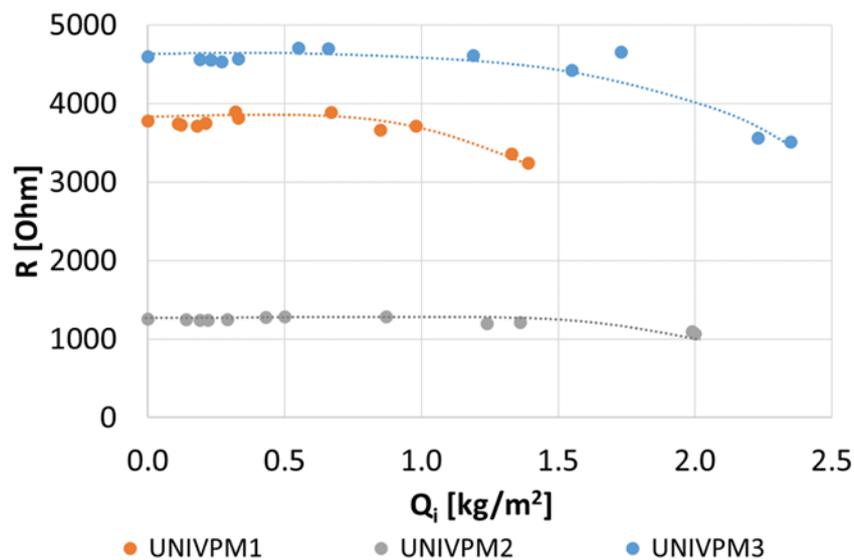


Figura 8.4. Correlazione tra resistenza elettrica ed acqua assorbita per unità di area dei campioni Acciona

### 8.3 Penetrazione di cloruri

Dal grafico (figura 8.5) si nota come le curve siano oscillanti tra picchi e punti di minimo; tale andamento è dovuto ai cicli di asciutto/bagnato a cui il campione è sottoposto. Infatti, quando il campione è bagnato si registra una misura di resistenza elettrica minore rispetto allo stesso campione in condizioni asciutte. Inoltre, si può notare, l'andamento generale della resistenza elettrica fino ai 21 giorni che tende a diminuire ciclo dopo ciclo; la spiegazione di questo deriva dal fenomeno della penetrazione dei cloruri all'interno del calcestruzzo durante le fasi di bagnato. Dopo questo periodo si registra una leggera risalita della resistenza elettrica che probabilmente è dovuta al fatto che il campione non aumenta più il suo assorbimento d'acqua ma continua a stagionare con conseguente incremento di resistenza elettrica. Come detto per quanto riguarda l'assorbimento capillare i campioni che risentono di più della variazione di resistenza elettrica sono UNIVPM3 e UNIVPM1 a differenza di UNIVPM2 che, sempre probabilmente a causa della sua iniziale minore resistenza elettrica, risente molto meno anche a livello di cicli asciutto/bagnato.

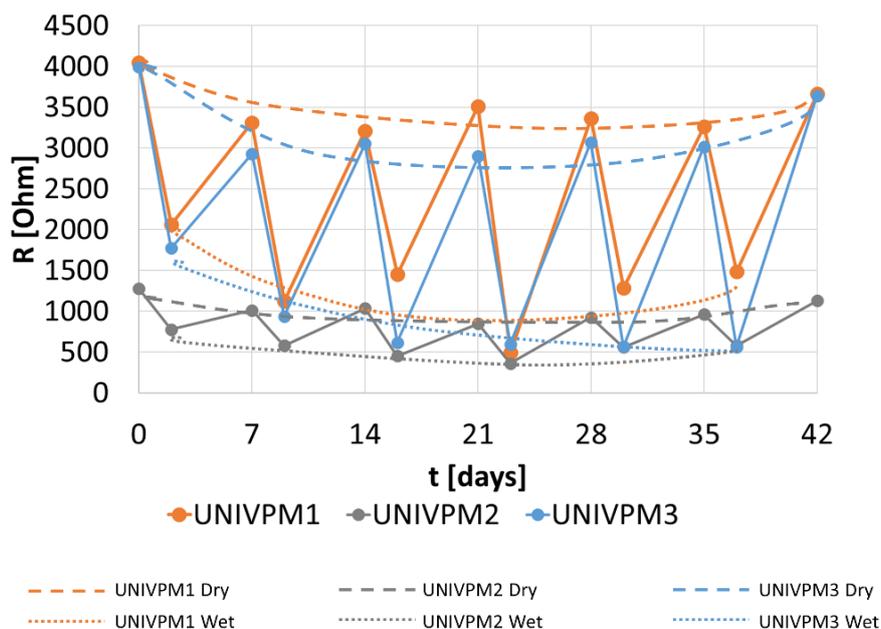


Figura 8.5. Risultati della penetrazione cloruri su provini Acciona: resistenza elettrica 10 kHz

Oltre alla misura di resistenza elettrica su questi provini esposti a cicli di asciutto/bagnato sono state anche prelevate le polveri per misurare la quantità dei cloruri liberi penetrati. Di seguito vengono riportate le quantità di cloruri penetrati con i relativi grafici ai diversi cicli e alle diverse profondità di misurazione. In tutti si nota come è la parte più esterna (profondità 0-10 mm) ad essere influenzata maggiormente dalla penetrazione dei cloruri.

t<sub>0</sub> – inizio prova

Tabella 8.1. Analisi polveri t<sub>0</sub> – inizio prova.

Specimen	Depth	Powder	H <sub>2</sub> O	Cl- Mirko	Cl- on water	Cl- on powder	Cl- on cement	Cl- on cement
	[mm]	[g]	[ml]	[mg/L]	[mgCl-]	[mgCl-/g powder]	[mgCl-/g cement]	[%]
UNIVPM 1	0-10	4.38901	17.545	339.100	5.949	1.356	9.244	0.9
	10-20	5.71088	22.860	22.860	0.523	0.092	0.624	0.1
	20-30	6.31384	25.015	13.010	0.325	0.052	0.352	0.0
	30-40	5.96912	23.925	12.700	0.304	0.051	0.347	0.0
UNIVPM 2	0-10	4.54484	18.218	407.600	7.426	1.634	11.142	1.1
	10-20	5.49178	21.902	55.480	1.215	0.221	1.509	0.2
	20-30	6.06372	24.573	10.520	0.259	0.043	0.291	0.0
	30-40	5.53579	22.145	7.160	0.159	0.029	0.195	0.0
UNIVPM 3	0-10	4.91965	19.614	380.900	7.471	1.519	10.356	1.0
	10-20	5.96096	23.806	45.730	1.089	0.183	1.245	0.1
	20-30	5.89264	23.836	21.710	0.517	0.088	0.599	0.1
	30-40	5.25857	21.032	13.720	0.289	0.055	0.374	0.0

t9 - Ciclo 2

Tabella 8.2. Analisi polveri t9 - Ciclo 2.

Specimen	Depth	Powder	H <sub>2</sub> O	Cl- Mirko	Cl- on water	Cl- on powder	Cl- on cement	Cl- on cement
	[mm]	[g]	[ml]	[mg/L]	[mgCl-]	[mgCl-/g powder]	[mgCl-/g cement]	[%]
UNIVPM 1	0-10	4.40743	17.630	704.600	12.422	2.818	19.220	1.9
	10-20	5.77765	23.111	267.400	6.180	1.070	7.294	0.7
	20-30	5.79723	23.189	197.300	4.575	0.789	5.382	0.5
	30-40	6.38026	25.521	246.000	6.278	0.984	6.710	0.7
UNIVPM 2	0-10	3.07929	12.417	689.100	8.557	2.779	18.949	1.9
	10-20	7.40860	29.737	354.900	10.554	1.425	9.714	1.0
	20-30	5.35853	21.721	178.100	3.869	0.722	4.923	0.5
	30-40	5.69454	22.780	231.200	5.267	0.925	6.307	0.6
UNIVPM 3	0-10	2.80562	11.246	804.900	9.052	3.226	22.002	2.2
	10-20	5.79386	23.222	464.200	10.780	1.861	12.688	1.3
	20-30	6.56169	26.461	226.400	5.991	0.913	6.226	0.6
	30-40	5.36691	21.902	199.300	4.365	0.813	5.546	0.6

t23 - Ciclo 4

Tabella 8.3. Analisi polveri t23 - Ciclo 4.

Specimen	Depth	Powder	H <sub>2</sub> O	Cl- Mirko	Cl- on water	Cl- on powder	Cl- on cement	Cl- on cement
	[mm]	[g]	[ml]	[mg/L]	[mgCl-]	[mg Cl-/g powder]	[mgCl-/g cement]	[%]
UNIVPM 1	0-10	3.95967	16.169	756.100	12.225	3.087	21.055	2.1
	10-20	7.57266	30.294	241.200	7.307	0.965	6.580	0.7
	20-30	4.39546	17.582	210.200	3.696	0.841	5.734	0.6
	30-40	6.31545	25.311	194.200	4.915	0.778	5.308	0.5
UNIVPM 2	0-10	4.14844	16.801	751.600	12.628	3.044	20.758	2.1
	10-20	6.40000	25.666	343.200	8.809	1.376	9.386	0.9
	20-30	4.74697	19.151	209.100	4.004	0.844	5.753	0.6
	30-40	4.10580	16.482	216.500	3.568	0.869	5.927	0.6
UNIVPM 3	0-10	4.28811	17.267	922.300	15.925	3.714	25.326	2.5
	10-20	5.94591	23.984	269.600	6.466	1.087	7.416	0.7
	20-30	6.87547	27.838	219.400	6.108	0.888	6.058	0.6
	30-40	5.68568	22.907	210.700	4.827	0.849	5.789	0.6

Tabella 8.4. Analisi cloruri UNIVPM 1.

	Depth (mm)	Cl- [% on cement wt.]		
		Cycle n.		
		0	2	4
<b>UNIVPM 1</b>	0-10	0.9	1.9	2.1
	10-20	0.1	0.7	0.7
	20-30	0.0	0.5	0.6
	30-40	0.0	0.7	0.5

### UNIVPM1

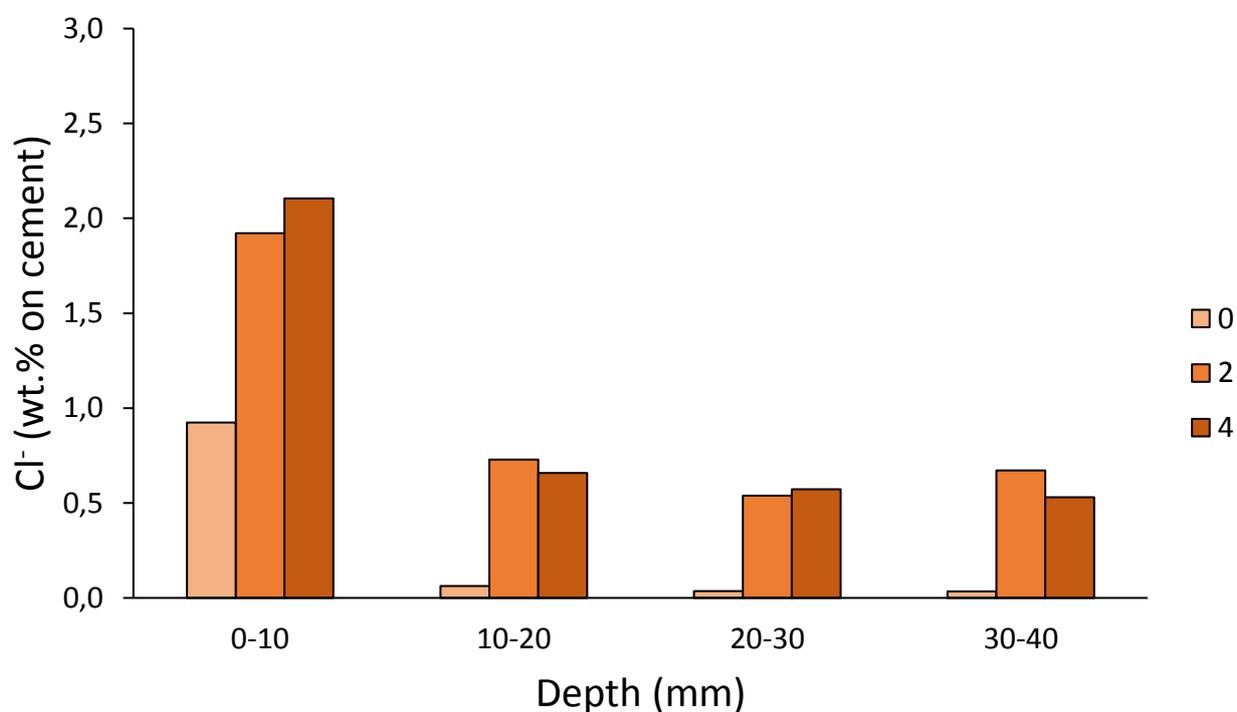
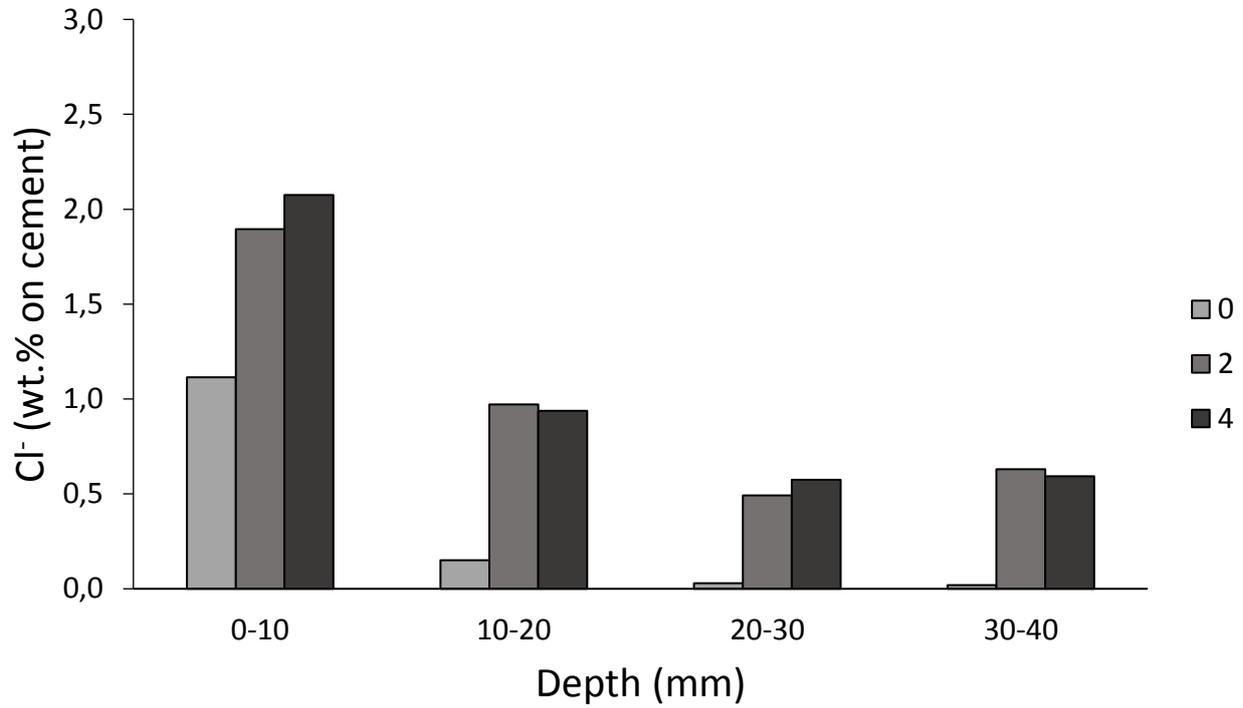


Figura 8.6. Analisi cloruri UNIVPM 1.

Tabella 8.5. Analisi cloruri UNIVPM 2.

	Depth (mm)	Cl- [% on cement wt.]		
		Cycle n.		
		0	2	4
<b>UNIVPM 2</b>	0-10	1.1	1.9	2.1
	10-20	0.2	1.0	0.9
	20-30	0.0	0.5	0.6
	30-40	0.0	0.6	0.6

## UNIVPM2



*Figura 8.7. Analisi cloruri UNIVPM 2*

*Tabella 8.6. Analisi cloruri UNIVPM 3.*

	Depth (mm)	Cl- [% on cement wt.]		
		Cycle n.		
		0	2	4
<b>UNIVPM 3</b>	0-10	1.0	2.2	2.5
	10-20	0.1	1.3	0.7
	20-30	0.1	0.6	0.6
	30-40	0.0	0.6	0.6

## UNIVPM3

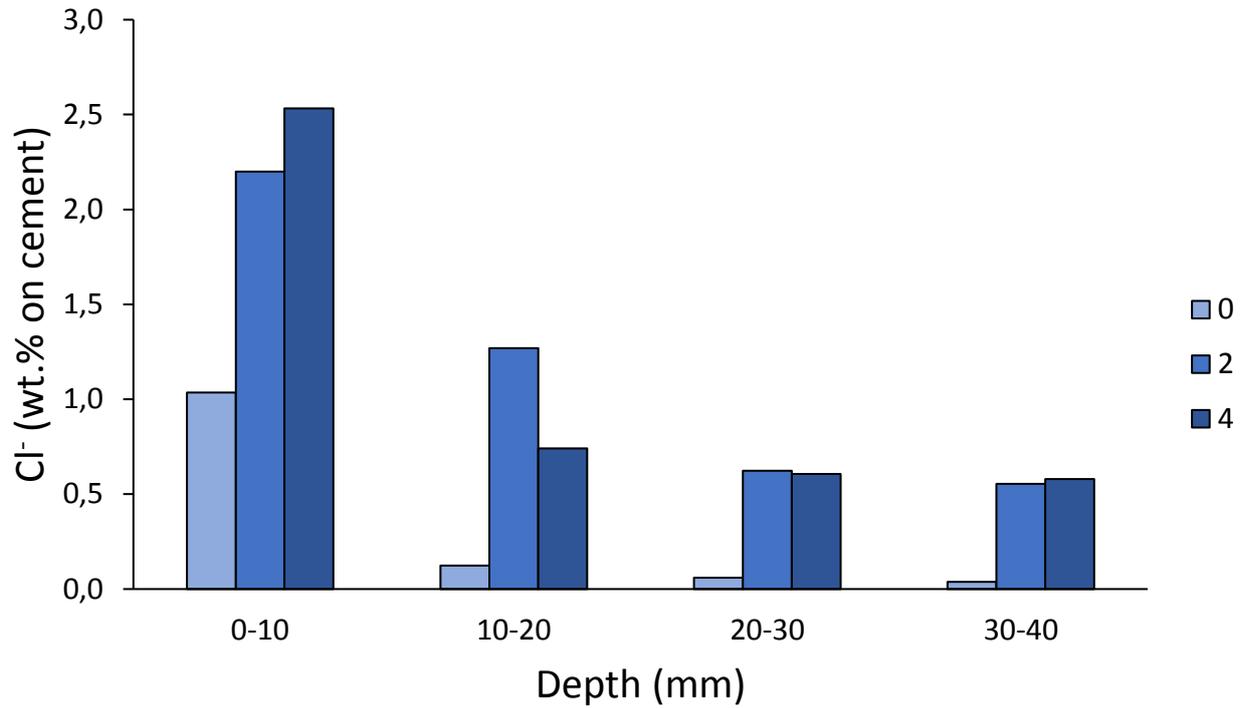


Figura 8.8. Analisi cloruri UNIVPM 3.

Tabella 8.7. Analisi cloruri campioni Acciona - media su tutte e quattro le profondità (0-40 mm).

	Depth (mm)	Cl- [% on cement wt.]		
		Cycle n.		
		0	2	4
<b>UNIVPM 1</b>	0-40	0.3	1.0	1.0
<b>UNIVPM 2</b>	0-40	0.3	1.0	1.0
<b>UNIVPM 3</b>	0-40	0.3	1.1	1.1

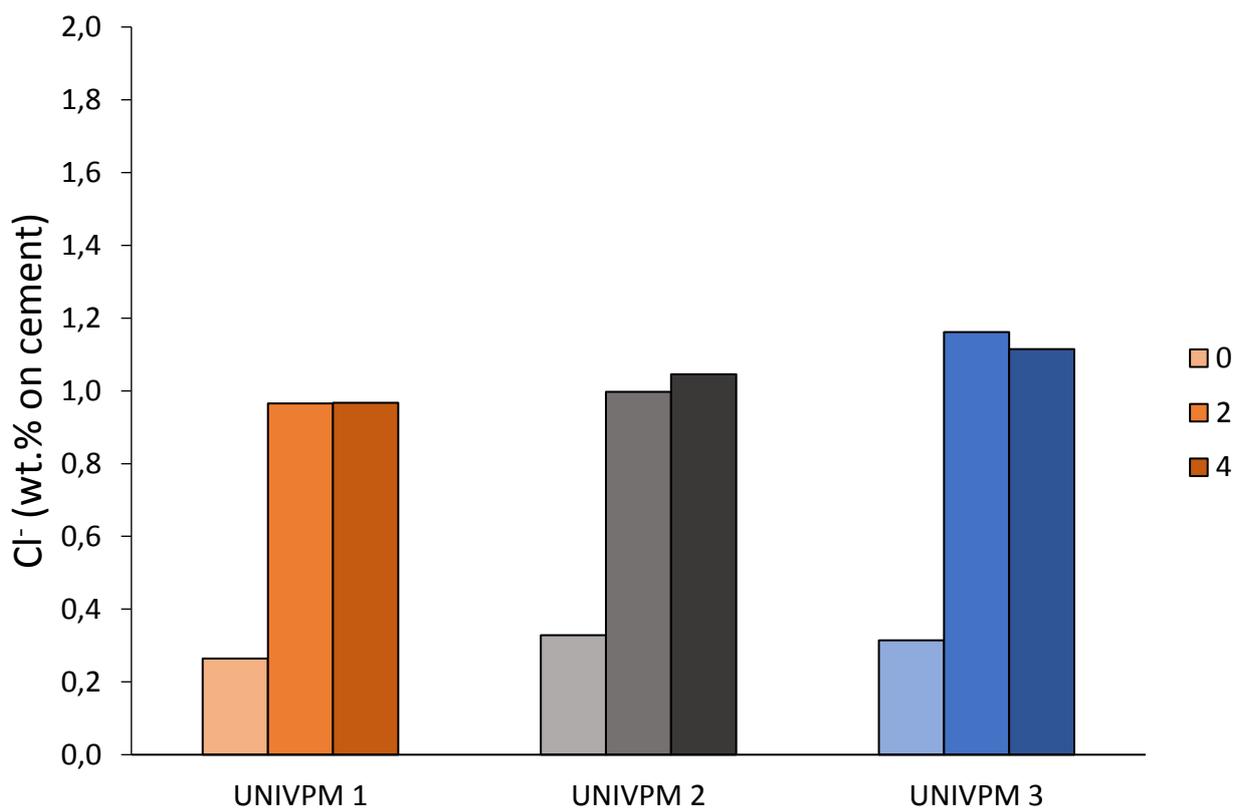


Figura 8.9. Analisi cloruri campioni Acciona - media su tutte e quattro le profondità (0-40 mm).

Dal grafico (figura 8.10) si evince come in un primo momento si ha una veloce penetrazione di cloruri dopo i primi 2 cicli di esposizione, la quale poi rimane costante dopo 4 cicli di esposizione.

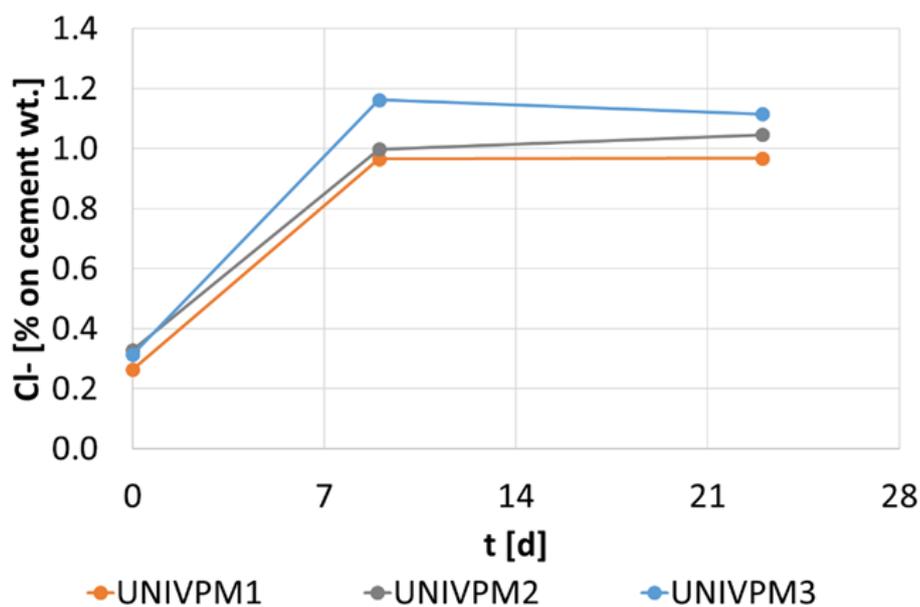


Figura 8.10. Penetrazione cloruri nel tempo.

Di seguito si riportano le correlazioni tra cloruri liberi assorbiti e resistenza elettrica sia durante le misurazioni in asciutto sia durante le misurazioni in bagnato (figura 8.11).

Dai risultati ottenuti si nota che all'aumentare della percentuale di cloruro nel calcestruzzo si assiste ad una diminuzione della resistenza elettrica; in particolare questa diminuzione è accentuata sulle misure dei campioni bagnati poiché anche l'acqua assorbita influisce sulla resistenza. I campioni che ne risentono maggiormente sono sempre UNIVPM1 ed UNIVPM3.

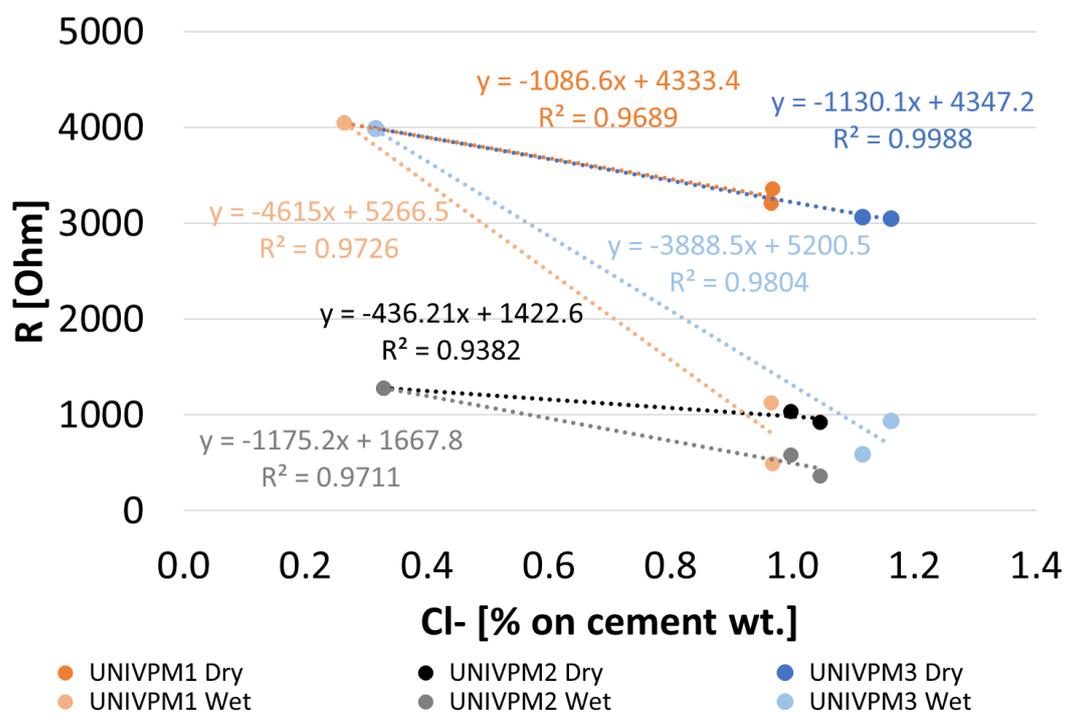


Figura 8.11. Correlazione resistenza-penetrazione cloruri

## 8.4 Nebbia salina

Dalle misure si nota come le misure a 4 elettrodi evidenziano un andamento comune della resistenza elettrica dei campioni. In particolare, si nota un abbassamento elevato di resistenza elettrica nei primi 7 giorni dovuto prevalentemente al passaggio dalle condizioni di asciutto (tempo 0) alla condizione di bagnato. Dai 7 giorni ai 28 giorni l'andamento della resistenza elettrica è sempre in diminuzione ma con una pendenza meno elevata. I campioni che risentono maggiormente di un abbassamento della resistenza elettrica sono UNIVPM3 e UNIVPM1 a differenza di UNIVPM2 che partendo già da una resistenza più bassa rispetto agli altri risente meno dell'esposizione all'ambiente saturo d'acqua.

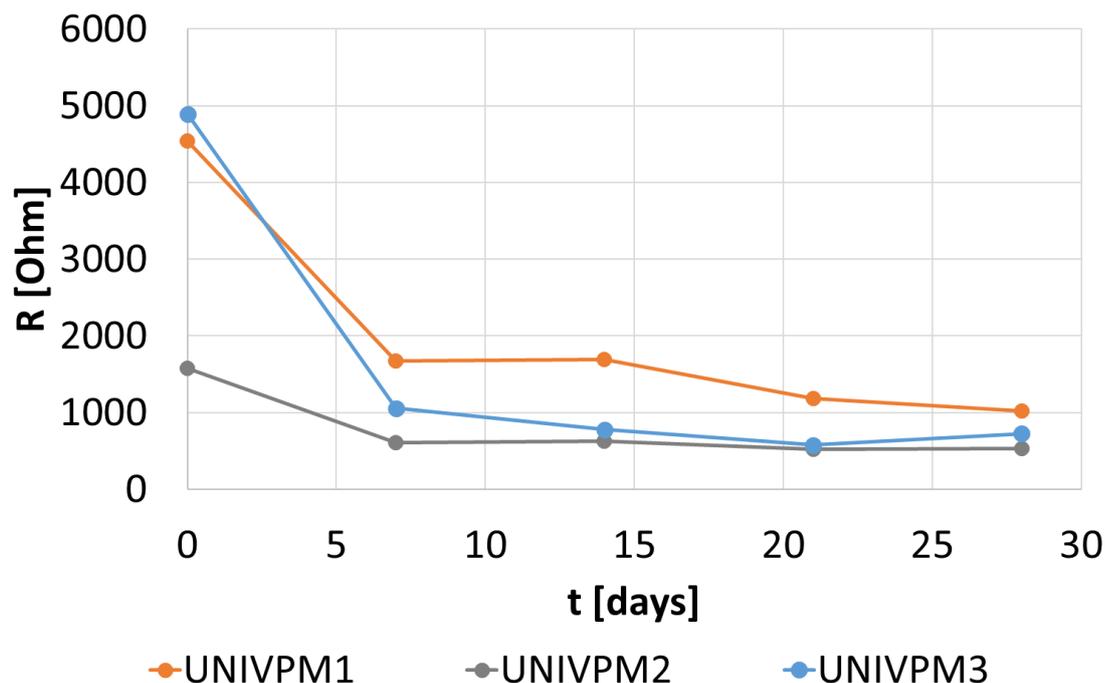


Figura 8.12. Resistenza nel tempo.

Oltre alla misura di resistenza su questi provini esposti alla nebbia salina sono state anche prelevate le polveri per misurare la quantità dei cloruri liberi penetrati. Queste misure partono dai provini già esposti a degrado. Vengono riportate le quantità di cloruri penetrati con i relativi grafici ai diversi cicli e alle diverse profondità. Anche in questo caso, la penetrazione dei cloruri è maggiore per gli strati più esterni (0-10 mm).

t<sub>0</sub> – inizio prova

Tabella 8.8. Analisi polveri t<sub>0</sub> – inizio prova.

Specimen	Depht	Powder	H <sub>2</sub> O	Cl- Mirko	Cl- on water	Cl- on powder	Cl- on cement	Cl- on cement
	[mm]	[g]	[ml]	[mg/L]	[mgCl-]	[mgCl-/g powder]	[mgCl-/g cement]	[%]
UNIVPM 1	0-10	3.96471	15.845	385.800	6.113	1.542	10.515	1.1
	10-20	5.94662	23.853	22.010	0.525	0.088	0.602	0.1
	20-30	6.92823	27.716	14.350	0.398	0.057	0.391	0.0
	30-40	4.98182	17.531	15.950	0.280	0.056	0.383	0.0
UNIVPM 2	0-10	4.38081	17.525	710.800	12.457	2.844	19.392	1.9
	10-20	6.30066	25.226	119.500	3.015	0.478	3.263	0.3
	20-30	5.35786	21.300	17.790	0.379	0.071	0.482	0.0
	30-40	4.33733	17.394	16.620	0.289	0.067	0.455	0.0
UNIVPM 3	0-10	3.89935	15.738	596.200	9.383	2.406	16.409	1.6
	10-20	5.88462	23.504	85.590	2.012	0.342	2.331	0.2
	20-30	5.11882	20.402	18.670	0.381	0.074	0.507	0.1
	30-40	4.10112	16.622	13.600	0.226	0.055	0.376	0.0

t14

Tabella 8.9. Analisi polveri t14.

Specimen	Depht	Powder	H <sub>2</sub> O	Cl- Mirko	Cl- on water	Cl- on powder	Cl- on cement	Cl- on cement
	[mm]	[g]	[ml]	[mg/L]	[mgCl-]	[mgCl-/g powder]	[mgCl-/g cement]	[%]
UNIVPM 1	0-10	4.22870	16.955	629.430	10.672	2.524	17.210	1.7
	10-20	5.67351	20.996	110.014	2.310	0.407	2.776	0.3
	20-30	4.56588	18.254	49.361	1.084	0.197	1.346	0.1
	30-40	4.81350	19.243	40.517	0.780	0.162	1.105	0.1
UNIVPM 2	0-10	4.01632	16.731	646.075	10.809	2.691	18.354	1.8
	10-20	5.75069	23.029	194.521	4.480	0.779	5.312	0.5
	20-30	5.51388	22.679	56.834	1.289	0.234	1.594	0.2
	30-40	4.60476	18.535	41.152	0.763	0.166	1.130	0.1
UNIVPM 3	0-10	3.30741	13.656	581.075	7.935	2.399	16361	1.6
	10-20	5.79112	22.768	168.773	3.843	0.664	4.525	0.5
	20-30	4.51174	18.115	42.241	0.765	0.170	1.157	0.1
	30-40	4.79405	19.334	41.281	0.798	0.166	1.135	0.1

t28

Tabella 8.10. Analisi polveri t28.

Specimen	Depht	Powder	H <sub>2</sub> O	Cl- Mirko	Cl- on water	Cl- on powder	Cl- on cement	Cl- on cement
	[mm]	[g]	[ml]	[mg/L]	[mgCl-]	[mgCl-/g powder]	[mgCl-/g cement]	[%]
UNIVPM 1	0-10	3.55452	14.130	603.854	8.533	2.400	16.370	1.6
	10-20	5.84831	23.290	94.506	2.201	0.376	2.567	0.3
	20-30	5.37538	21.688	60.206	1.306	0.243	1.657	0.2
	30-40	5.32919	21.554	29.064	0.626	0.118	0.802	0.1
UNIVPM 2	0-10	3.58841	14.044	575.355	8.080	2.252	15.356	1.5
	10-20	5.69216	22.543	305.640	6.890	1.210	8.254	0.8
	20-30	5.39499	21.431	69.806	1.496	0.277	1.891	0.2
	30-40	3.67442	15.757	63.487	1.000	0.272	1.857	0.2
UNIVPM 3	0-10	4.02328	16.064	682.170	10.958	2.724	18.574	1.9
	10-20	5.58796	22.232	272.658	6.062	1.085	7.398	0.7
	20-30	5.41358	21.660	39.252	0.850	0.157	1.071	0.1
	30-40	5.20644	23.326	33.653	0.785	0.151	1.028	0.1

### UNIVPM1

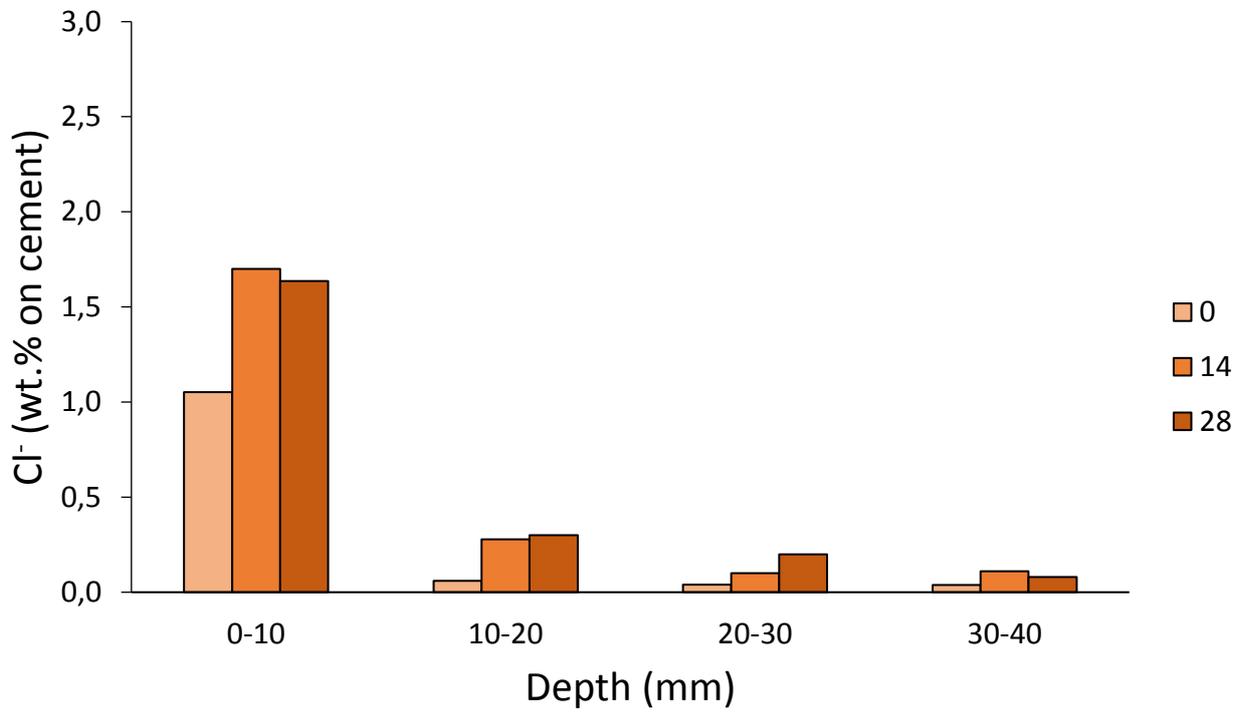


Figura 8.13. Analisi nebbia salina UNIVPM 1.

### UNIVPM2

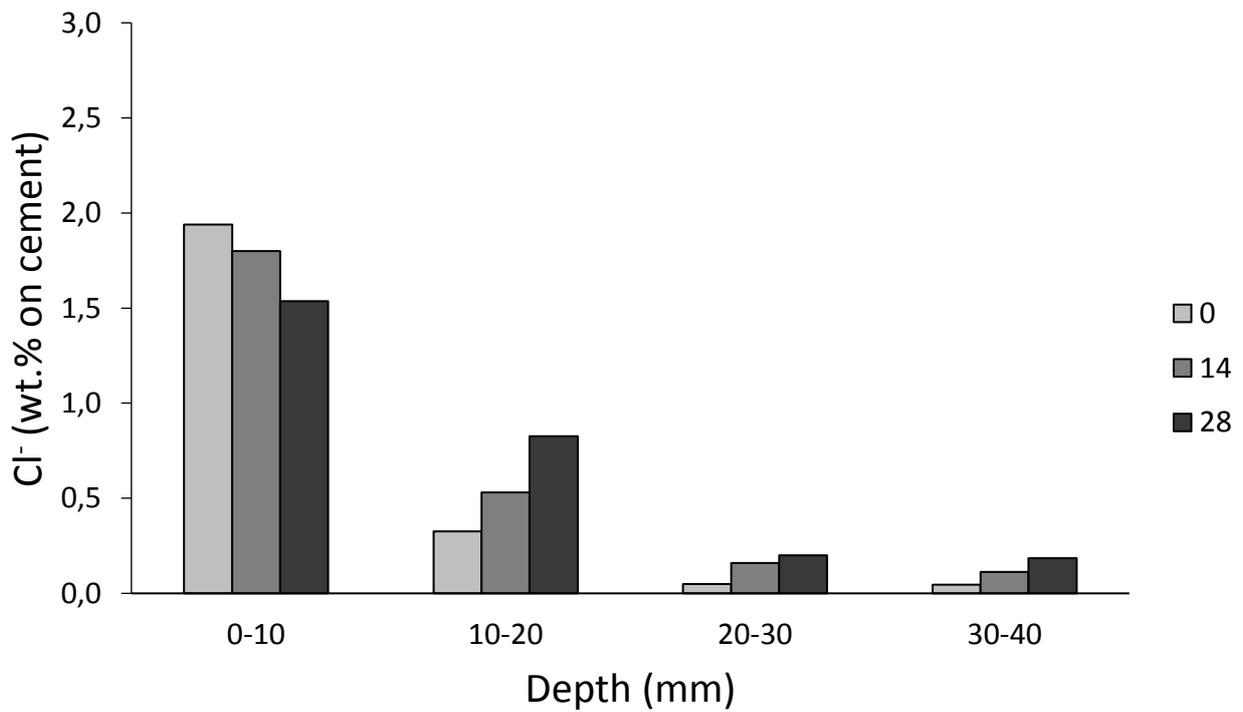


Figura 8.14. Analisi nebbia salina UNIVPM 2.

### UNIVPM3

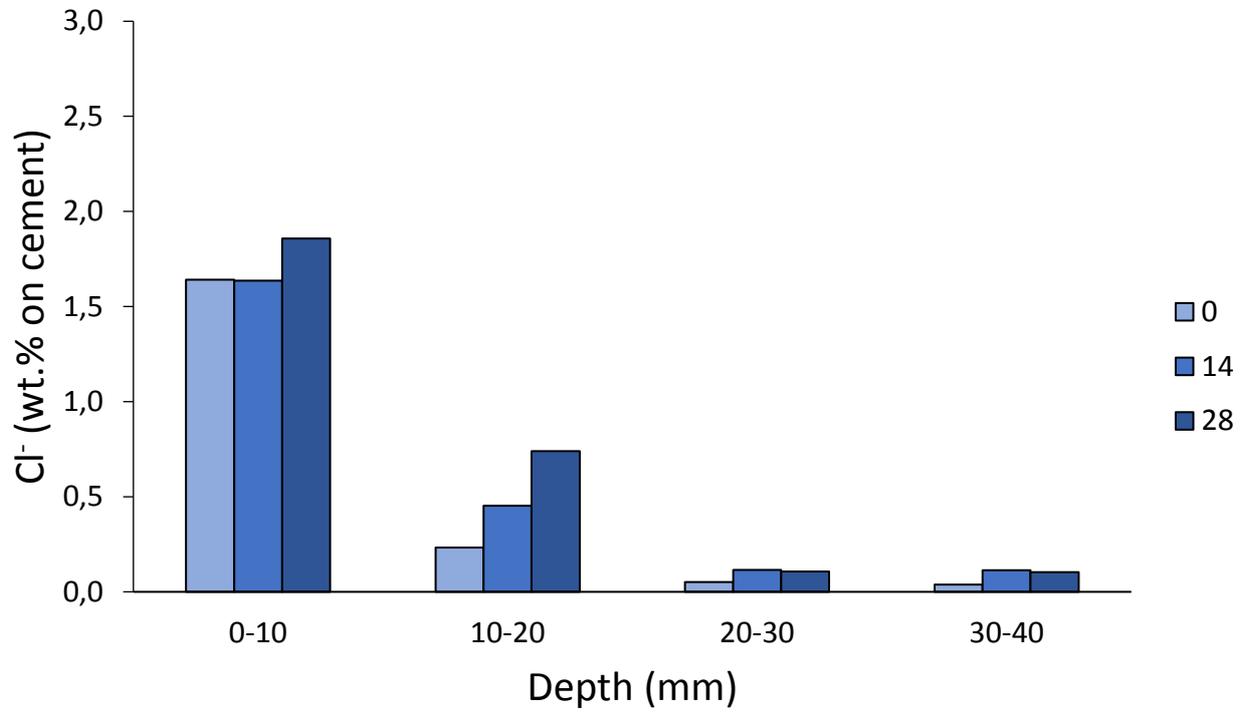


Figura 8.15. Analisi nebbia salina UNIVPM 3.

Tabella 8.11. Analisi nebbia salina campioni Acciona.

	Depht (mm)	Cl- [% on cement wt.]		
		Cycles n.		
		1	2	3
UNIIVPM 1	0-40	0.3	0.5	0.6
UNIVPM 2	0-40	0.6	0.7	0.7
UNIVPM 3	0-40	0.5	0.6	0.7

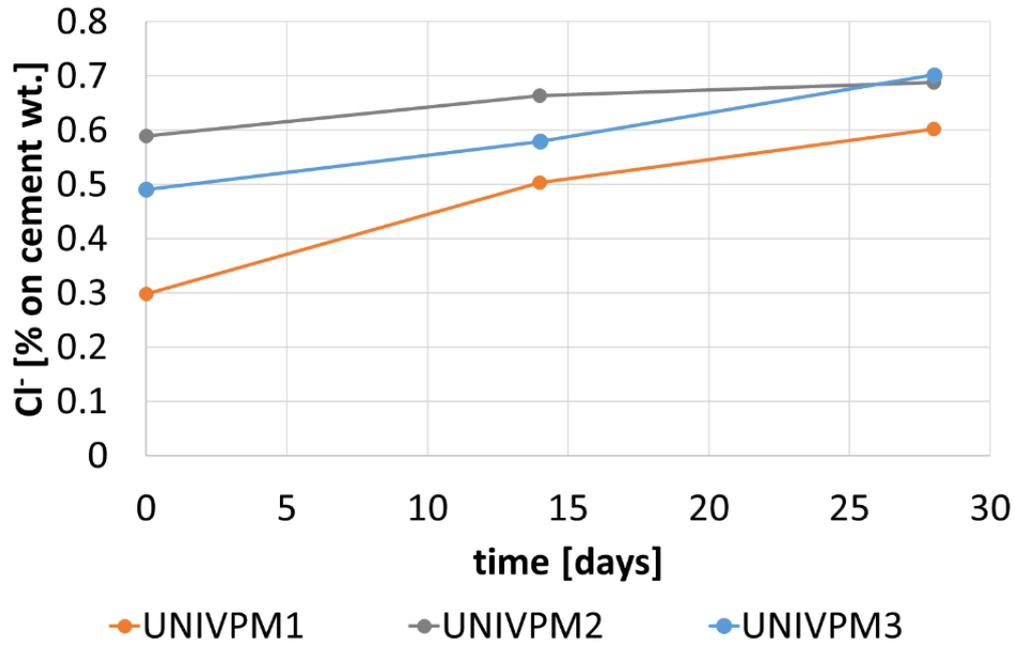


Figura 8.16. Penetrazione cloruri liberi nel tempo.

Anche in questo caso si nota un'importante diminuzione della resistenza elettrica dovuta non tanto dalla penetrazione di cloruri ma dall'assorbimento di acqua da parte del campione, infatti la maggiore diminuzione di resistenza elettrica si registra dopo la prima settimana di misurazione per via del cambiamento di condizioni ambientali.

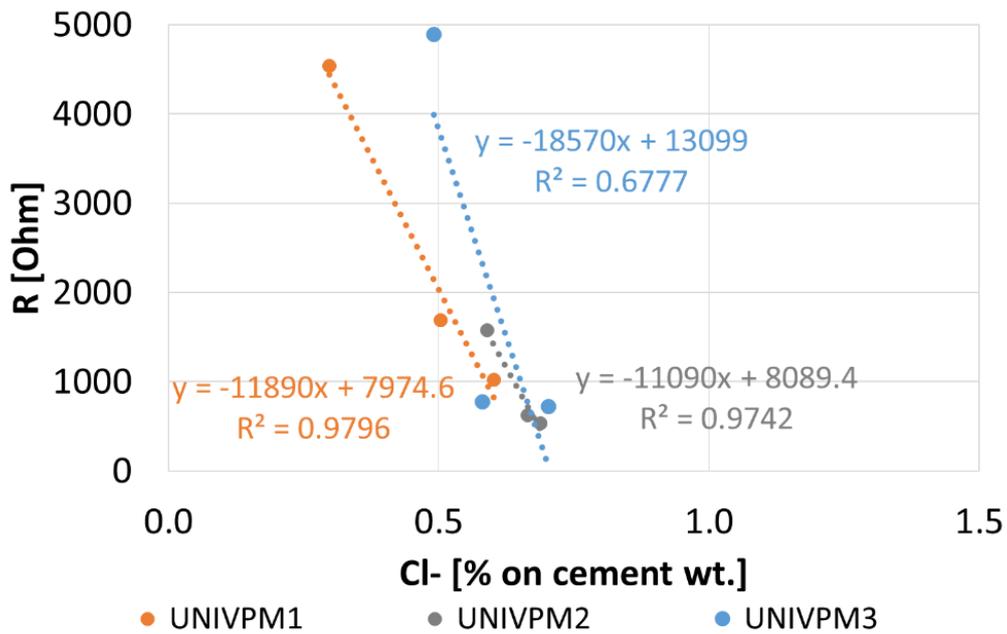


Figura 8.17. Correlazione resistenza-penetrazione cloruri.

## 8.5 Carbonatazione

Per quanto riguarda la carbonatazione non si è riuscito ad effettuare le misure di resistenza elettrica a causa degli elettrodi utilizzati per le misurazioni. Il riempimento di malta infatti ha subito un distacco dal campione e pertanto ha compromesso la misura della resistenza elettrica.

Per questi campioni è stato possibile soltanto misurare la profondità di carbonatazione nel tempo (figura 8.18). Il campione che risente di più di questo tipo di degrado è UNIVPM3, mentre quello che è risultato meno soggetto alla penetrazione della CO<sub>2</sub> è il campione UNIVPM2.

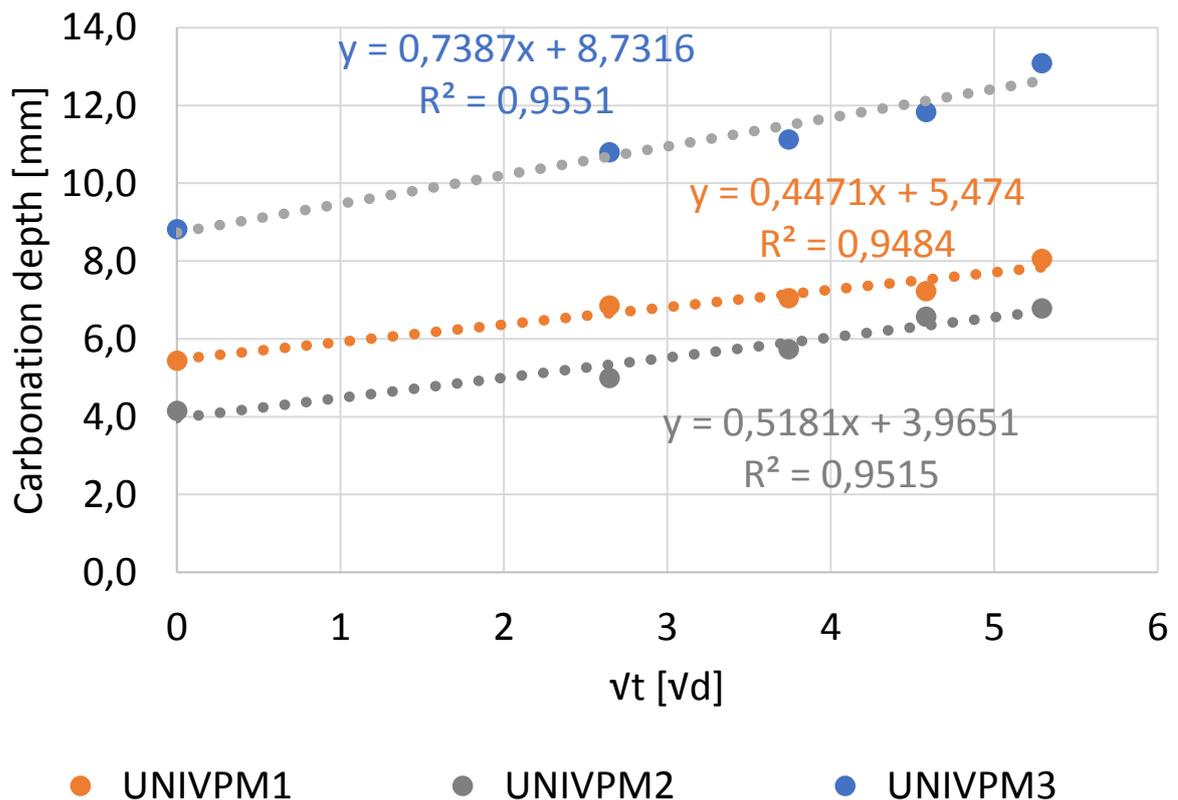


Figura 8.18. Carbonatazione nel tempo.

A seguito delle difficoltà di misura riscontrate per i campioni sottoposti a carbonatazione, sono stati eseguite delle prove su nuovi campioni per verificare i risultati ottenuti. In particolare, sullo stesso campione testato sono stati applicati sia elettrodi inseriti durante il getto sia elettrodi immersi nella malta di riempimento. I risultati ottenuti sono riportati nel seguente grafico.

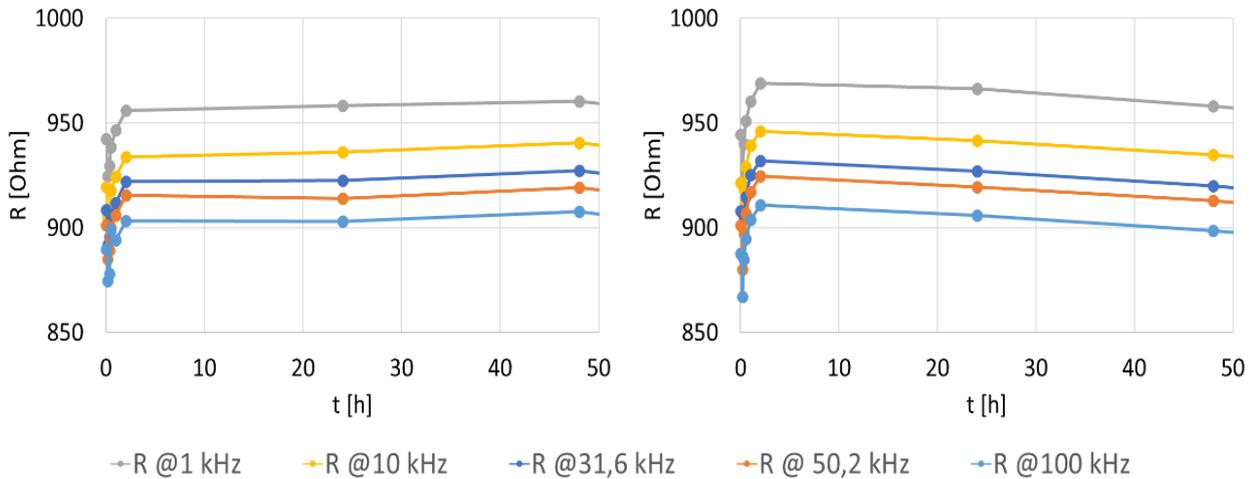


Figura 8.19. Comparazione tra elettrodi inseriti durante il getto (sinistra) ed elettrodi inseriti nei fori riempiti di malta (destra). La resistenza elettrica è misurata a diversi valori di frequenza.

Paragonando elettrodi incorporati durante il getto e quelli inseriti all'interno dei fori, è possibile evidenziare che la malta usata per riempire i fori ha un impatto negativo nella misurazione rendendo i risultati non comparabili. Infatti, la misurazione effettuata con gli elettrodi inseriti nei fori mostra un'inaspettata diminuzione nei valori di resistenza elettrica, probabilmente dovuta alla malta usata come riempitivo, che si comporta in maniera diversa rispetto al calcestruzzo circostante.

Per questo motivo, sono poi state testate diverse tipologie di elettrodi di misura per le misure di impedenza elettrica (figura 9.1):

- Elettrodi incorporati durante il getto
- Elettrodi superficiali monouso
- Elettrodi superficiali (incollati)
- Elettrodi inseriti all'interno dei fori, riempiti in seguito con malta.

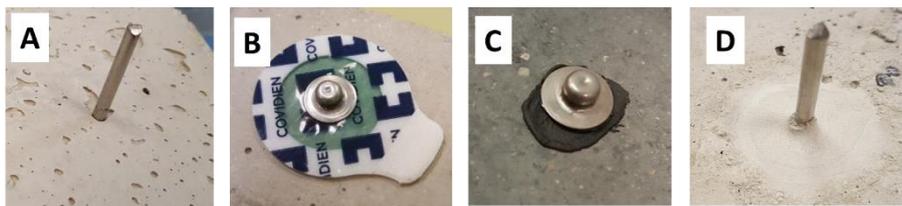


Figura 9.1. Diverse tipologie di elettrodi testate per la misura di impedenza elettrica: incorporate durante il processo (A), superficiali monouso (B), superficiali incollati (C), inseriti all'interno dei fori (D).

Gli elettrodi incorporati durante il getto sono gli unici che attendibilmente sono adatti alla misura di impedenza elettrica. Infatti, gli elettrodi monouso non possono essere utilizzati per monitoraggi a lungo termine. Allo stesso modo gli elettrodi superficiali incollati sono soggetti all'effetto batteria e non possono essere usati, mentre quelli immersi nella malta di riempimento danno risultati non sempre attendibili.



## 9. Conclusioni

Questi calcestruzzi sono stati esposti a degrado accelerato e per la valutazione degli impatti dei test di durabilità sullo stato fisico del calcestruzzo è stato svolto un monitoraggio dell'impedenza elettrica mediante l'inserimento di elettrodi di misura in acciaio inox in fori realizzati sui campioni e poi riempiti con malta. In particolare, i test di durabilità accelerata condotti sui provini di calcestruzzo sono i seguenti:

- assorbimento d'acqua capillare;
- penetrazione dei cloruri tramite nebbia salina;
- carbonatazione;
- penetrazione dei cloruri tramite cicli di asciutto/bagnato.

I risultati ottenuti sono di seguito riportati.

L'assorbimento capillare ha evidenziato come la resistenza elettrica decresca al passare del tempo in quanto aumenta l'acqua assorbita per suzione capillare dal calcestruzzo. Ciò è dovuto dal fatto che l'acqua, essendo un conduttore migliore dell'aria e sostituendosi ad essa, fa aumentare la conducibilità del calcestruzzo.

I campioni che hanno riportato una variazione di resistenza elettrica maggiore sono UNIVPM3 ed UNIVPM1 mentre UNIVPM2 risulta essere quello che risente meno, in termini di variazione di resistenza elettrica, dell'assorbimento capillare nonostante assorba di più rispetto a UNIVPM1.

Questo probabilmente dipende dal tipo di cemento utilizzato per il suo mix design, si nota infatti che a differenza degli altri due provini il provino UNIVPM2 parte già da una resistenza elettrica molto minore.

Con la penetrazione di cloruri a seguito di cicli di asciutto/bagnato si è constatato che l'andamento generale della resistenza elettrica tende a diminuire ciclo dopo ciclo fino ai 21 giorni; la spiegazione di questo deriva dal fenomeno della penetrazione dei cloruri all'interno del calcestruzzo durante le fasi di bagnato. Dopo questo periodo si registra una leggera risalita della resistenza elettrica che probabilmente è dovuta al fatto che il campione non assorbe più tanta acqua ma continua a stagionare facendo ri-aumentare la resistenza elettrica. Come già detto, per quanto riguarda l'assorbimento capillare i campioni che risentono di più della variazione di resistenza elettrica sono UNIVPM3 e UNIVPM1 a differenza di UNIVPM2 che ne risente molto meno anche a livello di cicli asciutto/bagnato infatti le differenze di resistenza elettrica tra asciutto e bagnato sono molto meno evidenti per questa composizione.

Con la nebbia salina si nota un abbassamento elevato di resistenza elettrica nei primi 7 giorni dovuto prevalentemente al passaggio dalle condizioni di asciutto (U.R. = 50%) alla condizione di bagnato (U.R. = 100%). Dai 7 giorni ai 28 giorni l'andamento della resistenza elettrica è sempre in diminuzione ma con una pendenza meno elevata. I campioni che risentono maggiormente di un abbassamento della resistenza elettrica sono UNIVPM3 e UNIVPM1 a differenza di UNIVPM2 che partendo già da una resistenza più bassa rispetto agli altri risente meno dell'esposizione all'ambiente saturo d'acqua.

Per quanto riguarda la carbonatazione non si è riuscito ad effettuare le misure di resistenza elettrica a causa degli elettrodi utilizzati per le misurazioni. Il riempimento di malta infatti ha subito un distacco dal campione e pertanto ha compromesso la misura della resistenza elettrica.

# BIBLIOGRAFIA

- 1 D'Alessandro A., Ubertini F., Materazzi A. L., 2016. Il calcestruzzo nanocomposito "Intelligente" per il monitoraggio delle costruzioni. *Ingenio*, No 42 p. 28.
- 2 Marino Quaresimin, Michele Zappalorto, 2014. Nanocompositi "self-sensing" per il monitoraggio dell'integrità strutturale di componenti in composito. *Compositi magazine*, No 32.
- 3 Luca Bertolini, "Materiali da costruzione", volume primo.
- 4 Guizani, Chamseddine, et al. "Biomass char gasification by H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and their mixture: Evolution of chemical, textural and structural of the chars". *Energy* 112, 2016: pp 133-145.
- 5 Hernandez, Juan J., Magin Laupuerda, and Esperanza Monedero. "Characterisation of residual from biomass gasification: effect of the gasifier operating conditions". *Journal of cleaner Production*, 2016
- 6 Tesi di Laurea Francesco Canali, "Influenza del tempo di stagionatura e dell'umidità relativa sulle proprietà elettriche e meccaniche di malte con capacità self-sensing contenenti diversi dosaggi di filler"
- 7 Torrents, Josep and Juan-García, P and Aguado, Antonio, 2007, "Electrical impedance as a technique for civil engineer structures surveillance: considerations on the galvanic insulation of samples".
- 8 Tsung-Chin Hou, 2008, "WIRELESS AND ELECTROMECHANICAL APPROACHES FOR STRAIN SENSING AND CRACK DETECTION IN FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS MATERIALS", University of Michigan, Civil and Environmental Engineering.

# ELENCO FIGURE

Figura 1.1: concetto di materiale intelligente.

Figura 2.2: Strumento Gamry con elettrodi.

Figura 2.2: Schema semplificato del ciclo di produzione del cemento Portland.

Figura 2.2: Struttura grafica delle fibre di carbonio: (a) reticolo esagonale degli atomi di carbonio nei diversi strati; (b) unità strutturale della fibra.

Figura 2.3: Trucioli di legno destinati alla gassificazione.

Figura 3.1: setacci su tavola vibrante.

Figura 3.2: Curve granulometriche aggregati Acciona.

Figura 3.3: Curva granulometrica 0.45 power curve.

Figura 3.4: Curva granulometrica ottimale Acciona.

Figura 3.5: Curva granulometrica Sabbia Lavata 0/8.

Figura 3.6: Sabbia Lavata 0/8.

Figura 3.7: Curva granulometrica Misto Tondo 10.

Figura 3.8: Misto Tondo 10.

Figura 3.9: Curva granulometrica Simonetti Mucchio 6.

Figura 3.10: Curva granulometrica Ripanti River Gravel 10/15.

Figura 3.11: Ripanti River Gravel 10/15.

Figura 3.12: Curva granulometrica Ripanti Edilizia Mucchio 6.

Figura 3.13: Confronto tra curve granulometriche.

Figura 3.14. Cilindro graduato.

Figura 3.15. Misura ssa Ripanti River Gravel 10/15.

Figura 3.16: misura ssa Misto Tondo 10.

Figura 3.17: misura ssa Sabbia Lavata 0/8; (sx): condizione ssa non raggiunta; (dx) condizione ssa raggiunta.

Figura 5.1: Carbonatazione calcestruzzo.

Figura 5.2: Espulsione copriferro.

Figura 5.3: Penetrazione Cloruri.

Figura 7.1: Procedura impiegata per installare gli elettrodi nei fori: foro (A), foro per gli elettrodi (B), riempimento con malta ed elettrodi (c), campione completo (D).

Figura 7.2: Assorbimento capillare di acqua del calcestruzzo di ACCIONA – setup.

Figura 7.3: Nebbia salina campioni Acciona.

Figura 7.4: Prelievo di campioni di polvere per l'analisi di cloruri.

Figura 7.5: Provini nella camera di carbonatazione.

Figura 7.6: Test fenolftaleina.

Figura 7.7: Calcolo carbonatazione con AutoCad.

Figura 7.8: Penetrazione di cloruri campioni Acciona.

Figura 7.9: Pesatura campioni e sistemazione nei contenitori a tenuta stagna.

Figura 8.1: Correlazione Resistenza-Tempo a varie frequenza di misura.

Figura 8.2: Risultati di assorbimento capillare di acqua su provini Acciona: resistenza elettrica a 10 kHz.

Figura 8.3: Risultati di assorbimento capillare di acqua su provini Acciona: acqua assorbita per unità di area.

Figura 8.4: Correlazione tra resistenza elettrica ed acqua assorbita per unità di area dei campioni Acciona.

Figura 8.5: Risultati della penetrazione cloruri su provini Acciona: resistenza elettrica 10 kHz.

Figura 8.6: Analisi cloruri UNIVPM 1.

Figura 8.7: Analisi cloruri UNIVPM 2.

Figura 8.8: Analisi cloruri UNIVPM 3.  
Figura 8.9: Analisi cloruri campioni Acciona - media su tutte e quattro le profondità (0-40 mm).  
Figura 8.10: Penetrazione cloruri nel tempo.  
Figura 8.11: Correlazione resistenza-penetrazione cloruri.  
Figura 8.12: Resistenza nel tempo.  
Figura 8.13: Analisi nebbia salina UNIVPM 1.  
Figura 8.14: Analisi nebbia salina UNIVPM 2.  
Figura 8.15: Analisi nebbia salina UNIVPM 3.  
Figura 8.16: Penetrazione cloruri liberi nel tempo.  
Figura 8.17: Correlazione resistenza-penetrazione cloruri.  
Figura 8.18: Carbonatazione nel tempo.  
Figura 8.19: Comparazione tra elettrodi inseriti durante il getto (sinistra) ed elettrodi inseriti nei fori riempiti di malta (destra). La resistenza elettrica è misurata a diversi valori di frequenza.  
Figura 9.1: Diverse tipologie di elettrodi testate per la misura di impedenza elettrica: incorporate durante il processo (A), superficiali monouso (B), superficiali incollati (C), inseriti all'interno dei fori (D).

## ELENCO TABELLE

Tabella 3.1: Analisi granulometrica aggregati Acciona.  
Tabella 3.2: Caratteristiche fisiche aggregati Acciona.  
Tabella 3.3: Analisi granulometrica curva ottimale Acciona.  
Tabella 3.4: Analisi granulometrica aggregati impiegati nella sperimentazione.  
Tabella 3.5: Dati relativi a Misto Tondo 10.  
Tabella 3.6: Dati relativi a Ripanti River Gravel 10/15.  
Tabella 3.7: Dati relativi a Sabbia Lavata 0/8.  
Tabella 3.8: Densità materiali.  
Tabella 3.9: Contenuto di umidità degli aggregati.  
Tabella 4.1: Mix-design calcestruzzo campioni Acciona.  
Tabella 4.1: Campioni calcestruzzo Acciona.  
Tabella 4.3: Campioni Acciona ottenuti dopo il taglio.  
Tabella 7.1: Mix-design della malta usata per riempire i fori.  
Tabella 8.1: Analisi polveri t0 – inizio prova.  
Tabella 8.2: Analisi polveri t9 - Ciclo 2.  
Tabella 8.3: Analisi polveri t23 - Ciclo 4.  
Tabella 8.4: Analisi cloruri UNIVPM 1.  
Tabella 8.5: Analisi cloruri UNIVPM 2.  
Tabella 8.6: Analisi cloruri UNIVPM 3.  
Tabella 8.7: Analisi cloruri campioni Acciona - media su tutte e quattro le profondità (0-40 mm).  
Tabella 8.8: Analisi nebbia salina t0.  
Tabella 8.9: Analisi nebbia salina t14.  
Tabella 8.10: Analisi nebbia salina t28.  
Tabella 8.11: Analisi nebbia salina campioni Acciona.

---