



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria
Civile e Ambientale

*Monitoraggio delle Strutture in CLS Armato
nell'ambito del Progetto PON reCITY*

*Monitoring of Reinforced Concrete Structures within
PON reCITY project*

Relatore:

Prof.ssa Francesca Tittarelli

Tesi di laurea di:

Matteo Bissoni

Correlatori:

Ing. Elisa Blasi

Ing. Alessandra Mobili

Anno Accademico 2023-2024

INDICE

Introduzione

1. Il Calcestruzzo Armato

- 1.1 Il Cemento
- 1.2 Gli Aggregati
- 1.3 Gli Additivi
- 1.4 Classi di Esposizione
- 1.5 Tipologie di Cemento

2. La Corrosione delle Armature nel Calcestruzzo

- 2.1 Cause del Degrado
- 2.2 Corrosione Armature metalliche
- 2.3 Corrosione da Cloruri
- 2.4 Potenziale di Libera Corrosione
- 2.5 Metodi di Diagnosi
- 2.6 Metodi di Protezione delle Armature
- 2.7 Metodi Elettrochimici di Protezione e Prevenzione Catodica

3. Preparazione dei Provini in Calcestruzzo Armato

- 3.1 Nomenclatura e Caratterizzazione
- 3.2 Prove a Flessione
- 3.3 Isolamento dei Provini
- 3.4 Immersione dei Provini
- 3.5 Pompaggio dell'Acqua

4. Metodi di Acquisizione e Sonda Nplus

- 4.1 Elaborazione Dati
- 4.2 Tabelle Excel dei Valori del Potenziale

5. Cicli di Bagnasciuga

- 5.1 Cicli di Bagnasciuga in Acqua Potabile
- 5.2 Cicli di Bagnasciuga in NaCl
- 5.3 Grafici Potenziale di Corrosione

6. Test Vibrazionale con Accelerometri

- 6.1 Le Vibrazioni
- 6.2 Vibrometro Laser Doppler a Scansione

- 6.2.1 Funzione Tramite Effetto Doppler
- 6.3 Allestimento della Prova con LDV
- 6.4 Svolgimento della Prova con LDV
- 6.5 Sensore Accelerometrico o Accelerometro
 - 6.5.1 Montaggio Sensore Accelerometrico
- 6.6 Svolgimento Prova con Accelerometri

7. Conclusioni

Bibliografia e Sitografia

Introduzione

La presente tesi si inserisce nell'ambito del progetto PON di reCITY, in collaborazione con 2 diversi dipartimenti dell'Università Politecnica delle Marche: il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) e il Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). Tale studio consiste nel monitoraggio delle strutture in cemento armato, quale processo essenziale per garantire la sicurezza e la durabilità nel tempo di edifici e infrastrutture, con l'obiettivo di verificare il corretto funzionamento del sistema di acquisizione e della sonda *Nplus*. Il processo di verifica consiste in una prima fase di analisi in continuo del potenziale di libera corrosione di ferri di armatura, nello specifico di nove provini, immersi in una matrice cementizia appositamente confezionata, sottoposti a cicli di bagnasciuga in acqua e NaCl. Completata questa prima fase di studi, i campioni saranno sottoposti a test vibrazionale con accelerometri per analizzare l'influenza dei cicli di bagnasciuga nel degrado dell'armatura metallica.

Capitolo 1 | Il Calcestruzzo Armato

Il connubio calcestruzzo/ferro è un binomio ottimale: la matrice cementizia resiste a compressione e protegge il ferro dalla corrosione, mentre quest'ultimo, ha la caratteristica meccanica di assorbire sforzi di trazione e taglio. Il confezionamento del calcestruzzo è legato alla classe di resistenza richiesta da progetto, alla classe di esposizione e alla tipologia di applicazione finale del manufatto e dunque, nel processo di mix design degli elementi che lo compongono, è necessario tenere in considerazione ogni aspetto. I componenti principali che costituiscono il calcestruzzo armato sono: il cemento, gli aggregati, l'acqua e gli additivi.

1.1 Il Cemento

Il cemento è un legante che si presenta sotto forma di polvere grigia fine, quando entra a contatto con l'acqua perde l'iniziale plasticità. Quest'ultimo si ottiene dalla cottura di materie prime (calciari, argille, sabbie...etc) in forni rotanti a 1450°C. Il materiale raffreddato in uscita dal forno, chiamato clinker, è formato da quattro componenti mineralogici: il tri-calcio alluminato (C₃H), il bi-calcio silicato (C₂S), il tri-calcio silicato (C₃S) e il ferro-alluminato tri-calcico (C₄AF). Il cemento si ottiene dal clinker andandolo a macinare finemente in delle macchine assieme ad una percentuale in peso di gesso (circa 5%). Una volta miscelato il cemento con l'acqua, nel composto che ne deriva, definito pasta cementizia, avviene una reazione di idratazione:



- Il C-A-H, detto alluminato di calcio idrato, è il responsabile della fase di presa del cemento e della perdita di malleabilità dell'impasto. Con il passare del tempo la loro crescita si interrompe.
- Il C-S-H, detto silicato di calcio idrato, ha una struttura fibrosa che conferisce resistenza meccanica. Nel tempo in cui il cemento

inizia a far presa, queste fibre si intrecciano sempre di più causando l'indurimento della pasta cementizia.

- Il $\text{Ca}(\text{OH})_2$, detto idrossido di calce precipita sotto forma di cristalli a mano a mano che la reazione prosegue.

1.2 Gli Aggregati

Gli aggregati (o inerti) sono la componente lapidea del calcestruzzo che ne forniscono le usuali proprietà meccaniche. Questi sono categorizzati in base alle dimensioni (ghiaie o sabbie), alla forma (tonda o irregolare), alla natura di provenienza (alluvionale o da cave per frantumazione) che ne contraddistingue anche la rugosità e la porosità. Nello studio del mix design i dosaggi delle sabbie/ghiaie devono essere corretti col fine di ottenere un assortimento granulometrico ottimale dato dal compromesso tra:

- Volume minimo di vuoti tra gli aggregati (diminuisco il volume di pasta cementizia).
- Massima lavorabilità del calcestruzzo
- Minima segregazione (smiscelamento dell'impasto)

Esistono vari metodi che permettono di trovare l'assortimento ottimale degli inerti: uno tra questi sfrutta il così detto metodo dei setacci, che permette di conoscere la distribuzione granulometrica delle frazioni inerti a disposizione. A seconda dell'apertura dei setacci ottengo il peso trattenuto, la percentuale trattenuta, la percentuale cumulativa passante e trattenuta con cui ottengo il modulo di finezza. Il secondo step sarà scegliere una curva granulometrica ottimale tra la distribuzione di Fuller o quella di Bolomey sotto rappresentate:

1. Distribuzione di Fuller: $P_{ds} = 100 \times (d / D_{\max})^{1/2}$
2. Distribuzione di Bolomey: $P_{ds} = A_B + (100 - A_B) \times (d / D_{\max})^{1/2}$

P_{ds} = passante al setaccio

d = diametro dell'aggregato

D = diametro massimo dell'aggregato

A_B = valore che dipende dal tipo di aggregato e dalla lavorabilità

Infine, tramite il metodo grafico e il modulo di finezza trovato, ci si avvicina alla curva ottimale combinando le varie frazioni granulometriche a disposizione.

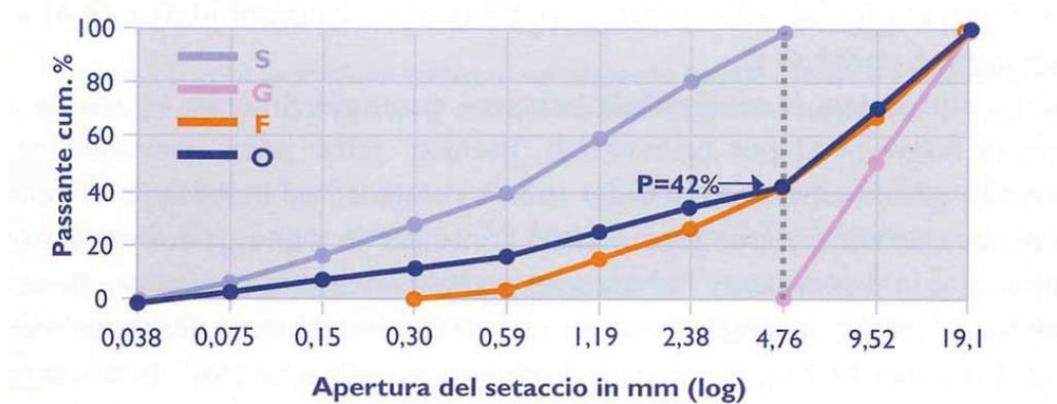


Figura 1.1: Curve granulometriche di una sabbia (S), di una ghiaia (G), di un aggregato ideale secondo Fuller (F) e di un aggregato combinato ottimale (O)

1.3 Gli Additivi

Gli additivi sono prodotti chimici aggiunti in piccole quantità al calcestruzzo armato per migliorarne una o più prestazioni meccaniche. Esistono vari tipi di additivi che si differenziano in base all'azione che svolgono nel calcestruzzo una volta miscelati:

- **Acceleranti di Presa e Indurimento:** utili per le applicazioni su pareti verticali e per velocizzare lo scasso in climi freddi. I composti inorganici a base di silicato o alluminio, carbonato di sodio, solfati di ferro o alluminio, che reagiscono con il calcio alluminato (C_3A) e l'acqua, accelerano l'azione di presa del cemento. I composti organici come cloruro di sodio e nitrato di calcio reagiscono, invece, con il calcio silicato (C_3S), accelerando l'azione di indurimento.
- **Ritardanti:** ritardano l'azione di idratazione del calcio silicato (S_3C) e sono utilizzati per ridurre la perdita di lavorabilità dell'impasto e allungare i tempi di presa in climi caldi. Possono essere di natura inorganica come Sali di piombo e zinco, oppure organica a base di zuccheri e glicerina.
- **Aeranti:** introdotti all'interno del calcestruzzo armato in climi freddi, quando l'acqua potrebbe gelare nei pori portando a fessure e distacchi.
- **Idrofobizzanti e Impermeabilizzanti:** vengono applicati sulla superficie o in massa nell'impasto e nelle malte. Nel primo caso si rivestono le pareti dei pori permettendo al vapore acqueo di fuoriuscire e impedendo all'acqua di entrare allo stato liquido.

L'impermeabilizzazione impedisce all'acqua di penetrare sia allo stato liquido che di vapore.

- Super-fluidificanti: permettono di aumentare la lavorabilità dell'impasto con meno acqua. Hanno un effetto deflocculante, evitando l'unione delle molecole di cemento.
- Modificatori di Viscosità: permettono di conciliare l'elevata fluidità con l'assenza di segregazione e bleeding.
- Espansivi: si trasformano in composti più voluminosi, aiutando a prevenire il ritiro del calcestruzzo durante il periodo di idratazione.

1.4 Classi di Esposizione

La norma tecnica UNI 11104 del 2004 individua 6 classi d'esposizione, per ognuna delle quali vengono date indicazioni per la progettazione, confezionamento e messa in opera del calcestruzzo:

Classe di esposizione	Ambiente	Struttura	Sottoclassi
X0	Assenza di rischio di corrosione o attacco	Calcestruzzo armato e non	X0
XC	Corrosione indotta da carbonatazione	Calcestruzzo armato	XC1, XC2, XC3, XC4
XD	Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare	Calcestruzzo armato	XD1, XD2, XD3
XS	Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare	Calcestruzzo armato	XS1, XS2, XS3
XF	Attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza sali disgelanti	Calcestruzzo armato e non	XF1, XF2, XF3, XF4
XA	Attacco chimico	Calcestruzzo armato e non	XA1, XA2, XA3

Figura 1.2: Classi di Esposizione

CLASSE X0: Per calcestruzzi privi di armatura o inserti metallici, impiegati in tutte le esposizioni, eccetto in presenza di cicli di gelo/disgelo o attacco chimico. Per calcestruzzi con armatura o inserti metallici, impiegati in ambiente molto asciutto.

CLASSE XC: Per calcestruzzi soggetti a corrosione indotta dalla carbonatazione.

- XC1, utilizzata in ambiente asciutto o permanentemente bagnato
- XC2, utilizzata in ambiente bagnato, raramente asciutto
- XC3, utilizzata in ambiente ad umidità moderata
- XC4, utilizzata in ambiente ciclicamente asciutto e bagnato

CLASSE XD: Per calcestruzzi soggetti a corrosione indotta da cloruri, esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare.

- XD1, utilizzata in ambiente ad umidità moderata
- XD2, utilizzata in ambiente bagnato, raramente asciutto
- XD3, utilizzata in ambiente ciclicamente asciutto e bagnato

CLASSE XS: Per calcestruzzi, armati e non, soggetti a corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare.

- XS1, per zone esposte alla salsedine marina, ma non direttamente in contatto con l'acqua di mare
- XS2, per zone permanentemente sommerse
- XS3, per zone esposte agli spruzzi oppure alla marea

CLASSE XF: Per calcestruzzi, armati e non, impiegati in presenza di cicli gelo/disgelo, con o senza sali disgelanti.

- XF1, utilizzata in caso di moderata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante
- XF2, utilizzata in caso di moderata presenza di acqua, con agente disgelante
- XF3, utilizzata in caso di elevata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante
- XF4, utilizzata in caso di elevata saturazione d'acqua, con agente disgelante

CLASSE XA: Per calcestruzzi, armati e non, soggetti ad attacco chimico da parte di acque freatiche e fluenti.

- XA1, utilizzata in ambiente chimicamente debolmente aggressivo
- XA2, utilizzata in ambiente chimicamente moderatamente aggressivo
- XA3, utilizzata in ambiente chimicamente fortemente aggressivo

In caso di ambiente che comprenda più classi di esposizione, si dovrebbero realizzare tanti tipi di calcestruzzo quante sono le classi. Nella realtà, questa condizione non è sostenibile, di conseguenza, si opta per confezionare il calcestruzzo con le prescrizioni dettate dalla classe di esposizione peggiore tra le presenti.

1.5 Tipologie di Cemento

La normativa europea UNI EN 197-1 riconosce 27 tipi di cemento differenziati in base alla composizione dei costituenti principali in varie percentuali:

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Composizione (percentuale in massa) ^{a)}										UNI EN 197-1	
			Costituenti principali											Costituenti secondari
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
K	S	D ^{b)}	naturale P	naturale calcinata Q	silicea V	calcaica W	T	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-M	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/B-M	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IV/A	65-89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/B	45-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/A	40-64	18-30	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/B	20-38	31-50	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.
c) Nei cementi Portland composti CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi composti CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento

Figura 1.3: Tipi di cemento e composizione (percentuali in massa)

I cementi di miscela e di sviluppo (CEM II-V) hanno una minor percentuale in massa di clinker. Quest'ultimo può variare di molto in base alle percentuali in massa degli altri costituenti secondari con cui viene sostituito. Per questo motivo i cementi di miscela e sviluppo risultano più sostenibili del normale cemento Portland avendo:

1. Minor consumo di materie prime,
2. Minor consumo di energia,
3. Minori emissioni di CO₂,
4. Riciclo e utilizzo di scorie industriali.

Tra le varie aggiunte minerali quelle di maggiore interesse risultano essere:

- Pozzolane naturali: in prevalenza amorfe e di natura silico-alluminosa.

- Fumo di silice: sottoprodotto della produzione del silicio metallico e di altre leghe.
- Ceneri volanti: residuo delle centrali termiche a carbone.
- Loppa d'altoforno: scoria della produzione della ghisa e dell'acciaio.
- Scisti calcinati: residuo della torrefazione degli scisti argillosi, in particolare quelli alluminosi.
- Calcari: fungono da ottimo filler se finemente macinati.

Capitolo 2 | La Corrosione delle Armature nel Calcestruzzo

Le strutture in calcestruzzo armato, siano esse pareti, setti, travi o pilastri, devono essere sottoposte periodicamente a manutenzione perché soggette a degrado. Rispetto all'ispezione periodica, il monitoraggio in continuo permette di diminuire i costi andando ad inglobare delle sonde (elettrodi) permanentemente. Le cause sono molteplici e tutte possono contribuire a compromettere la durabilità e la funzionalità della mia opera. Il degrado del calcestruzzo armato è un fenomeno progressivo e inevitabile che rende necessari interventi di ripristino per ricostruire le parti ammalorate, eliminare le fessurazioni e proteggere le strutture sottostanti dalla penetrazione di sostanze in grado di corrodere i ferri d'armatura. In particolare, le problematiche più frequenti sono due: la carbonatazione e i casi di ammaloramento dovuti all'aggressione dei cloruri.

2.1 Cause del Degrado

I fattori che possono provocare il degrado del calcestruzzo armato sono, come detto inizialmente, di diversa natura ma possono essere comunque ricondotti a tre categorie:

- cause fisiche
- cause chimiche
- cause meccaniche
- difetti

Tra le cause fisiche possiamo individuare per esempio gli effetti dell'inquinamento atmosferico, le piogge acide e i cicli di gelo e disgelo dell'acqua presente all'interno delle porosità della matrice cementizia. In quest'ultimo caso il ghiaccio provoca uno stato tensionale che, con il trascorrere del tempo, provoca distacchi superficiali e fessurazioni. Per quanto riguarda le cause di natura chimica di degrado del calcestruzzo, due fattori molto frequenti sono la carbonatazione e gli attacchi dei cloruri. Il primo fenomeno è causato dal discioglimento nell'acqua dell'anidride carbonica, il secondo, da quello dei sali. Sul degrado progressivo del calcestruzzo possono incidere anche la scarsa qualità dei materiali impiegati in fase costruttiva e i possibili errori compiuti in fase di posa in opera; senza

considerare cause meccaniche come gli urti e gli incendi. Quest'ultimi sono più rari rispetto ai casi sopra menzionati, ma comunque possibili. Tra le altre cause di tipo meccanico, nel caso delle infrastrutture, possiamo citare anche i carichi e le sollecitazioni provocati dal traffico e dal transito continuo dei mezzi. Per quanto riguarda i difetti del calcestruzzo questi possono essere divisi in tre famiglie: 1) Difetti dovuti alla mal progettazione della miscela; 2) Difetti dovuti a una sbagliata composizione; 3) Difetti dovuti ad un'errata messa in opera. In particolare il fenomeno di cui andremo a parlare sarà legato alla corrosione delle armature metalliche immerse in un conglomerato cementizio.

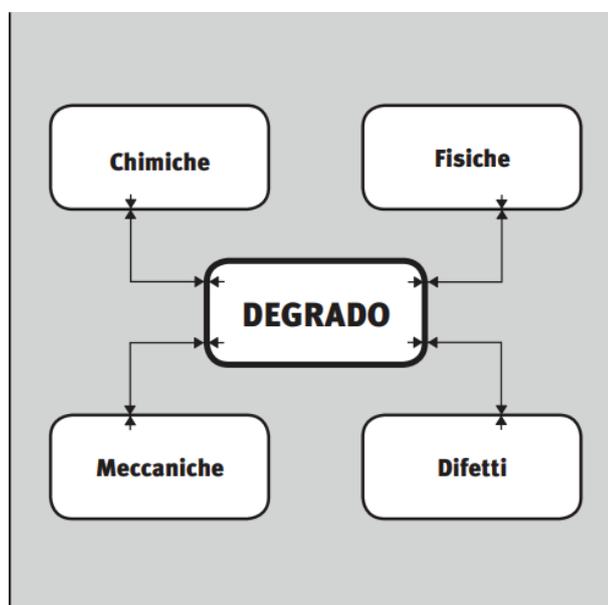


Figura 2.1: Cause del degrado

2.2 Corrosione Armature metalliche

La corrosione è un processo di natura elettrochimica e, come tutti i processi elettrochimici, richiede la presenza di un elettrolita. Nel caso del calcestruzzo, l'elettrolita è la soluzione presente nei suoi pori capillari di idrossido di sodio e di potassio, con un pH compreso tra 13 e 14 se il calcestruzzo è stato confezionato con cemento Portland o leggermente inferiore nel caso dei cementi di miscela. In soluzioni alcaline aerate con $\text{pH} > 11,5$ e in assenza di cloruri, il ferro si ricopre di un sottilissimo film di ossido che funge da protezione delle barre d'armatura. In queste condizioni, che sono dette di passività, la velocità di corrosione è praticamente nulla. La stessa cosa succede alle armature annegate nel calcestruzzo correttamente confezionato e messo in opera.

Nel tempo il calcestruzzo può perdere le caratteristiche protettive. Questo si verifica essenzialmente per tre motivi:

1. Partendo dagli strati più esterni e passando via via a quelli più interni, l'alcalinità del calcestruzzo può essere neutralizzata dall'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno. In questo modo, la soluzione all'interno dei pori del cls passa da un $\text{pH} > 13$ a un $\text{pH} < 9$, provocando un indebolimento del film di ossido passivante dell'armatura metallica.
2. A contatto con ambienti contenenti cloruri, nel calcestruzzo possono penetrare questi ioni fino a raggiungere le armature. Se alla superficie delle armature si supera un tenore critico di cloruri, il film protettivo può rompersi localmente.
3. Infine, nel caso di strutture interessate da campi elettrici e quindi percorse da correnti disperse (o vaganti) che interferiscono con le armature, il film protettivo può venir distrutto nelle zone in cui la corrente esce dalle armature.

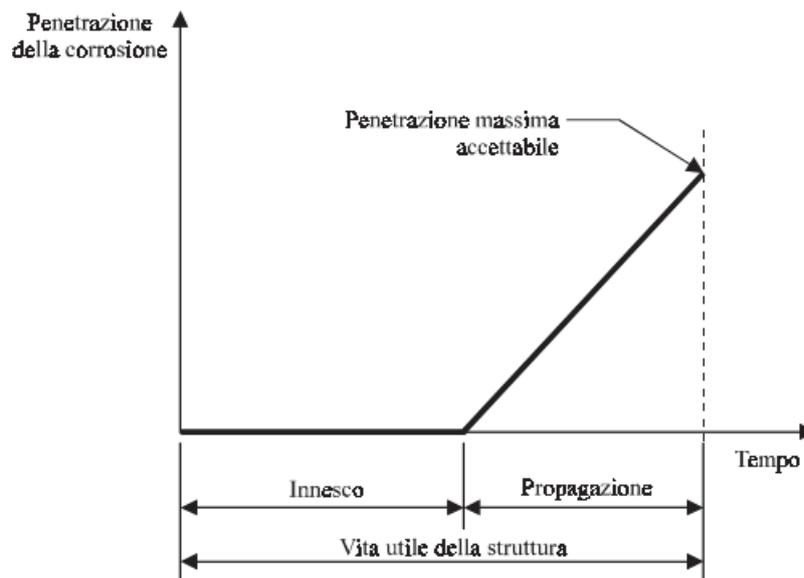


Figura 2.2: Periodo di innesco e periodo di propagazione della corrosione in una struttura in calcestruzzo armato (modello di Tuutti)

2.3 Corrosione da Cloruri

In generale, la corrosione da cloruri risulta di tipo localizzato con attacchi penetranti, che si configurano come crateri circondati da zone non corrose (a questo tipo di corrosione si dà il nome di pitting fig. 4.3). L'attacco corrosivo può aver luogo solo quando la concentrazione dei cloruri raggiunge un valore sufficientemente elevato nel calcestruzzo a

contatto con le armature. Il contenuto di cloruri necessario per danneggiare il film che protegge le armature dipende dal potenziale delle armature, che a sua volta è legato alla quantità di ossigeno che raggiunge la loro superficie. Di conseguenza, l'attacco può aver luogo per un contenuto di cloruri relativamente modesto quando il calcestruzzo è esposto all'atmosfera, dove l'ossigeno può raggiungere facilmente le armature; è invece necessario un tenore molto più elevato quando il calcestruzzo è immerso in mare o comunque l'apporto di ossigeno risulta ostacolato.

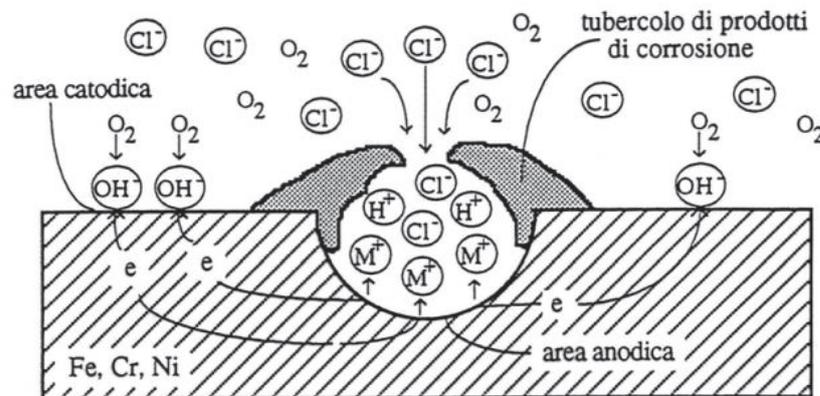


Figura 2.3: Meccanismo di crescita del pitting

2.4 Potenziale di Libera Corrosione

Il potenziale di libera corrosione delle armature metalliche, presenti all'interno della matrice cementizia, è un indice della probabilità di corrosione così come indicato nella normativa UNI 9535 e nell'ASTM C876:

- < -500 mV: ho una corrosione severa
- $-500 / -350$ mV: ho un'alta probabilità di corrosione
- $-350 / -200$ mV: ho una probabilità di corrosione media
- > -200 mV: ho una bassa probabilità di corrosione

La velocità di corrosione è un parametro importante che va monitorato in quanto se bassa allora non ci sono rischi per la struttura. La valutazione corretta della velocità di corrosione delle armature è utile non solo per conoscere il loro stato, ma anche per la valutazione del comportamento strutturale delle armature stesse. La valutazione della velocità di corrosione, anche in combinazione con la misura del

potenziale, è utile per verificare che l'armatura si trovi in condizioni di passività (velocità di corrosione trascurabile) oppure di attività (velocità di corrosione significativa). Nella fase di propagazione, la misura di velocità di corrosione permette di prevedere l'intervallo di tempo alla fine del quale sarà raggiunto lo stato limite di fessurazione.

2.5 Metodi di Diagnosi

Per la valutazione dell'attacco da ioni cloro, il calcestruzzo viene esposto al test colorimetrico con fluoresceina e nitrato di argento. Il metodo di prova consiste nel prelevare un campione di calcestruzzo dalla struttura (carota), per poi trattare la superficie interna con fluoresceina e nitrato di argento. Nell'applicare questa metodologia di prova, bisogna prestare molta attenzione alla presenza di carbonatazione, in quanto il test potrebbe fornire indicazioni errate. In presenza di carbonatazione dovrà essere applicata una soluzione di idrossido di sodio al 6% in modo da ripristinare l'ambiente basico (pH circa 13), modificato a seguito del processo. In fig. 4.4 si distingue la parte di calcestruzzo in cui c'è stata penetrazione dei cloruri (rosa chiaro) e quella che invece ne è priva (in scuro).



Figura 2.4: Test alla fluoresceina e AgNO

2.6 Metodi di Protezione delle Armature

Metodi di protezione che interessano l'ambiente circostante:

- Inibitori di corrosione: sono specie chimiche di natura inorganica che aggiunti nel calcestruzzo ne riducono il fenomeno corrosivo. La concentrazione dell'inibitore è in un certo rapporto fisso con quella dei cloruri.
- Disaerazione: elimino una delle due componenti necessarie all'innescio della corrosione (ossigeno, acqua).
- Riduzione della concentrazione di ioni aggressivi (Cl⁻).

Metodi di protezione che interessano il metallo:

- Scelta del materiale: armature in acciaio inox, acciaio nero, acciaio zincato, etc.
- Geometria: con lo scopo di favorire il drenaggio dell'acqua ed evitare accoppiamenti galvanici.
- Anodizzazione: si aumenta lo spessore del film di ossido per renderlo più stabile
- Rivestimenti: 1) Protezione Passiva: ho uno strato superficiale di materiale più resistente che isola il metallo dall'ambiente (smaltatura, placcatura, pittura con metalli più nobili di quello da proteggere). 2) Protezione Attiva: ho un substrato che si corrode preferenzialmente quando viene scoperto in seguito a danneggiamento (zincatura). 3) Protezione Mista: ho un metallo che svolge la funzione di anodo unito ad uno strato di materiale più resistente.
- Metodi elettrochimici.

2.7 Metodi Elettrochimici di Protezione e Prevenzione Catodica

Le principali tecniche elettrochimiche per il controllo della corrosione dei ferri nel calcestruzzo armato sono: la prevenzione catodica, la protezione catodica, la rimozione dei cloruri e la ri-alkalinizzazione del calcestruzzo. Il diagramma Pedeferri è un diagramma potenziale/concentrazione di cloruri che permette di prevedere e prevenire la corrosione localizzata da cloruri (pitting) dell'acciaio nel calcestruzzo armato. Proposto da Pietro Pedeferri nel 1993, trova applicazione come diagramma di prevenzione e protezione catodica del

calcestruzzo armato. Quest'ultimo, permette di individuare la zona di corrosione per pitting, la zona di passività e, a bassi potenziali, la zona di immunità termodinamica e di infragilimento da idrogeno su acciai suscettibili. In questo caso, il diagramma si presenta come un possibile strumento di supporto e utilità ingegneristica per la previsione del comportamento di un acciaio al variare delle condizioni di esposizione. Tuttavia, se si considerano solo le zone di corrosione e di passività, queste sono definite da parametri di tipo cinetico (potenziale di corrosione localizzata e di ripassivazione), non definibili in modo univoco. Essi non dipendono solo dal contenuto di cloruri e dal potenziale ma anche da variabili metallurgiche (composizione chimica dell'acciaio, finitura superficiale, presenza di inclusioni), ambientali (potere ossidante, pH, temperatura, composizione della soluzione, regime fluidodinamico) e geometriche (presenza di fessure o discontinuità nel componente), oltre che dal metodo sperimentale-elettrochimico utilizzato per misurarli.

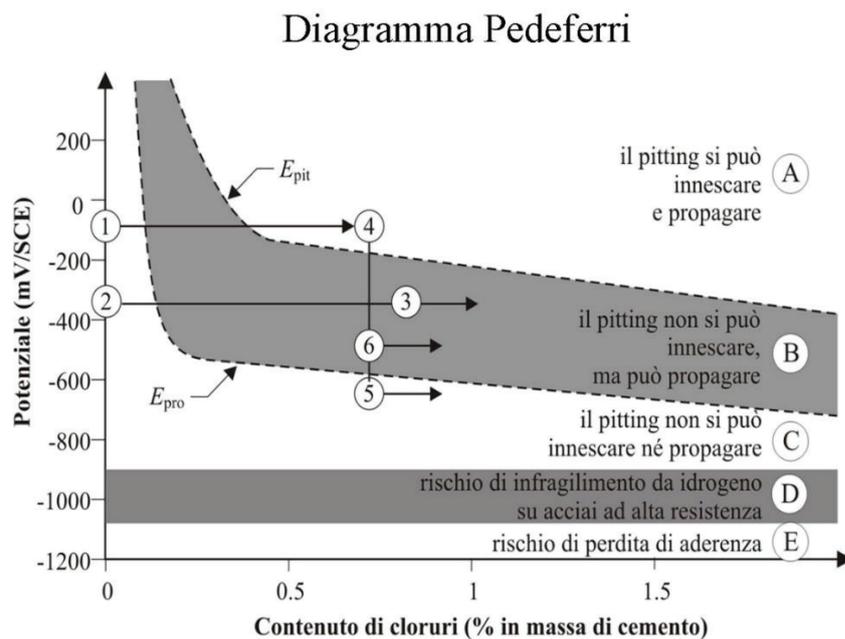


Figura 2.5: Diagramma Pedeferri

La prevenzione catodica si applica a nuove strutture che possono essere contaminate soprattutto da cloruri. Le armature vengono polarizzate svolgendo la funzione di catodo con lo scopo di aumentare la concentrazione di cloruri necessaria ad innescare l'attacco. La protezione catodica viene applicata a strutture già interessate dalla corrosione (soprattutto da cloruri). Le armature sono polarizzate in senso catodico, ovvero il loro potenziale è portato a valori più

elettronegativi rispetto a quello di corrosione libera, per cui la velocità di corrosione è ridotta o, addirittura, se si raggiunge un potenziale più negativo del valore di ripassivazione è nulla rispetto alla vita utile dell'opera. Tutte le tecniche elettrochimiche citate sono realizzate imponendo la circolazione di una corrente continua tra un anodo, fissato generalmente alla superficie esterna della struttura, e le armature. Lo scopo della prevenzione catodica è di impedire che l'attacco possa innescarsi e dare luogo a fenomeni di corrosione. La rimozione dei cloruri e la ri-alcinizzazione sono proposte in alternativa alle tecniche tradizionali per il ripristino di strutture contaminate da cloruri o carbonatate. Le due tecniche impiegano un sistema anodico simile, costituito dall'anodo e dall'elettrolita, posizionati all'esterno della struttura e rimossi al termine del trattamento. L'anodo può essere costituito da una rete metallica (di titanio generalmente), mentre l'elettrolita è spruzzato o fatto aderire all'anodo e al calcestruzzo. La quantità di cloruri rimossi dipende dalla carica totale circolata tra l'armatura e l'anodo (dalla corrente imposta e dalla durata del trattamento), nonché dall'efficienza di rimozione. La ri-alcinizzazione è un sistema anodico identico al precedente, tranne che per la natura dell'elettrolita. Essa è effettuata sia a partire dalla superficie esterna del calcestruzzo, dove l'elettrolita penetra all'interno del calcestruzzo, sia dalla superficie delle armature, dove la reazione catodica produce ioni OH⁻ (diventando più alcalina). In questo modo, si ottengono valori di pH anche superiori a 14 attorno alle armature e la regione ri-alcinizzata risulta abbastanza ampia da garantire il mantenimento delle condizioni di passività sulle armature per tempi lunghi dopo l'interruzione del trattamento.

Capitolo 3 | Preparazione dei Provini in Calcestruzzo Armato

Nel mix-design dei provini presi in esame è stata utilizzata una malta realizzata con cemento Portland CEM II/A-LL di classe di resistenza 42.5R e una sabbia Esincalce 0/8 in condizioni di superficie satura asciutta, con assorbimento pari al 5% e un rapporto $a/c = 0,50$ e $i/c = 3$. I nove campioni di forma cilindrica, hanno una lunghezza pari a 50 cm, mentre la base quadrata ha lato pari a 10 cm. Ciascuno di essi presenta due tubi in PVC posti alle estremità immersi nella matrice cementizia. Questi tubi servono sia come protezione dei cavi che fuoriescono dal provino, collegati alla strumentazione, ma anche come punto di appoggio per il loro spostamento. A ciascun campione sono incollate 20 rondelle metalliche, ad un intervallo di 2,5 cm, che serviranno per i successivi test vibrazionali con accelerometri.



Figura 3.1: Particolare del provino F

3.1 Nomenclatura e caratterizzazione

I provini sono stati denominati con le lettere dell'alfabeto dalla lettera A alla lettera I e sono stati sottoposti a prova di flessione dopo aver compiuto la completa maturazione a 28 giorni di stagionatura. Un provino denominato M è stato utilizzato per determinare il valore del carico massimo da applicare ad ogni step di carico. Tali test sono stati

progettati in maniera tale da creare cricche sui campioni, con il fine di simulare gli effetti che un evento sismico potrebbe generare sulle strutture in calcestruzzo.

I carichi applicati sono stati definiti a partire dal valore di resistenza meccanica a flessione massima. Al fine di valutare l'influenza della presenza dei sensori all'interno del campione, i quali rappresentano un elemento di discontinuità, le prove di carico sono state eseguite su 3 campioni sensorizzati (A,B e C), altri 3 campioni con all'interno solo la barra d'acciaio (G,H, e I), mentre i restanti 3 provini (D,E e F) non sono stati sottoposti a prova di flessione.

3.2 Prove a flessione

La prova a flessione si esegue posizionando il provino all'interno della macchina di prova costituita da due appoggi inferiori, a sostegno del campione, e un dente di rottura superiore che applica il carico nella mezzeria del provino. Secondo quanto previsto dalla normativa di riferimento UNI EN 12390-5, gli appoggi devono essere posti ad una distanza che è pari a 3 volte il lato corto del campione. Poiché nel caso in esame il lato più corto del provino è pari a 10 cm, gli appoggi sono stati posizionati ad una distanza di 30 cm.



Figura 3.2: Macchina per prova a flessione

La resistenza a flessione del singolo provino si calcola con la seguente formula:

$$R_f = \frac{3 \cdot F_f \cdot d}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

dove:

- R_f è la resistenza a flessione, in N/mm² (o MPa);
- F_f è il carico massimo a rottura, in N;
- b è il lato della sezione quadrata del prisma, in mm (pari a 100 mm);
- h è l'altezza della sezione quadrata del prisma, in mm (pari a 100 mm);
- d è la distanza tra i supporti, in mm (pari a 300 mm).

3.3 Isolamento dei Provini

Il primo passaggio nell'ambito del progetto di reCITY è stato quello di andare ad isolare le estremità dei due tubi in PVC ancorati ai provini con una resina poliuretanic impermeabilizzante Marinflex 2310, con un rapporto resina/indurente 5:1. In tal modo, è stato possibile evitare che l'acqua, durante i cicli di bagnasciuga, penetrasse all'interno dei campioni attraverso vie preferenziali, danneggiandone i sensori.

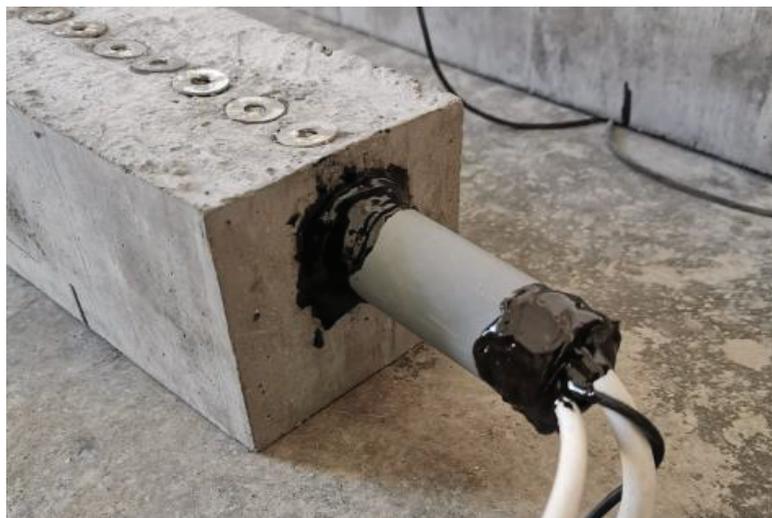


Figura 3.3: Particolare della resina poliuretanic Marinflex applicata su un provino

3.4 Immersione dei Provini

I 9 provini sono stati divisi in 3 appositi contenitori realizzati in materiale plastico trasparente, di dimensioni 79 x 57 x 18 cm ed immersi in acqua potabile, per 11 settimane, lasciando asciutta la faccia superiore con le rondelle ed elevandola dal pelo libero dell'acqua per circa 1 cm. I campioni vengono tenuti sollevati dal fondo delle vasche di circa 4 cm, attraverso l'uso di 18 spessori, due per campione, di materiale anch'esso plastico. L'utilizzo di questi spessori serve a migliorare l'asciugatura dei provini nei 5 giorni in cui sono esposti all'aria ed isolarli in modo ottimale dall'ambiente circostante oltre a semplificare la rimozione dell'acqua tramite una pompa. La quantità di acqua utilizzata durante la prova è stata pari a 25 l per vasca e il livello è stato tenuto costantemente per 1 cm al di sotto della superficie dei campioni, al fine di evitare una possibile ossidazione o distacco delle rondelle.



Figura 3.4: Fase di immersione per i provini da A a F

3.5 Pompaggio dell'Acqua

Per le prime tre settimane dei cicli di bagnasciuga, i campioni sono stati spostati manualmente dentro e fuori dalle vasche. Dalla quarta settimana e per tutti i successivi cicli, compresi quelli in NaCl, si è ricorso ad una piccola pompa. La necessità di un sistema meccanico di rimozione del liquido è emersa per evitare un possibile disturbo dei valori del potenziale registrati dalla strumentazione a seguito del ciclico

spostamento. La pompa utilizzata è una Rule 2000 da 12 Volt, del tipo ad immersione, indicata per lo svuotamento della sentina di imbarcazioni medio grandi o di pozzetti di raccolta. Per il corretto funzionamento della pompa, l'aspiratore deve essere immerso per almeno 4 cm nelle vasche e alloggiato in uno spazio di 6 cm accanto ai provini.

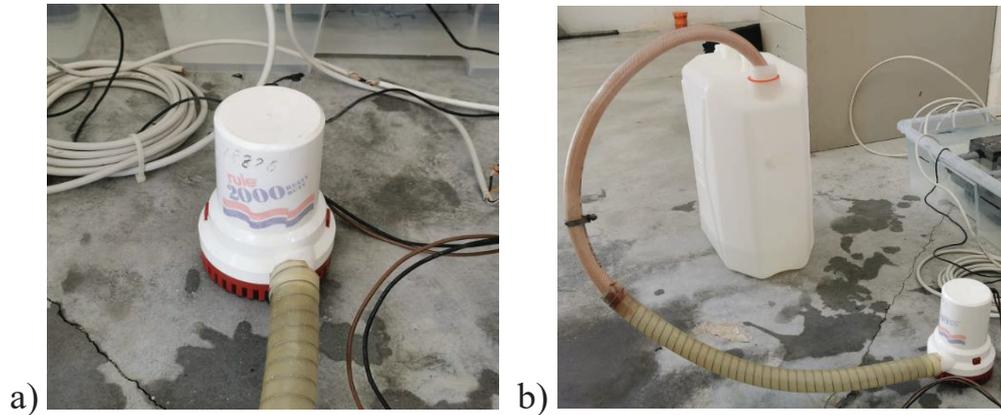


Figura 3.5: a) Pompa Rule utilizzata; b) Tanica di drenaggio dell'acqua

Capitolo 4 | Metodi di Acquisizione e Sonda Nplus

L'elettrodo di pseudoriferimento al Titanio attivato (CESCOR srl) e le barre di armatura dei provini A e B sono state collegate ad un sistema di acquisizione dei dati, fornito dall'Azienda Nplus S.r.l., con due sonde voltmetriche in parallelo ottenendo i valori di tensione (in Ohm) dei campioni. Prima di far circolare corrente nel circuito di misura, occorre verificare che il voltmetro non indichi alcuna tensione dovuta a correnti di dispersione estranee; in caso contrario dovrà essere individuata ed eliminata. La sonda voltmetrica è costituita da un contenitore metallico chiuso da due terminali sui quali sono montati i due connettori di interfaccia elettrica, rispettivamente verso la sorgente esterna da misurare e verso il Modulo PC-USB. La sonda voltmetrica è costituita da due circuiti elettronici, un circuito svolge le funzioni di misurazione e di gestione con il PC di acquisizione dati, mentre il secondo circuito svolge le funzioni di interfaccia, di trasmissione dati, di protezione di circuiti dai disturbi elettromagnetici e di buffer ad alta impedenza del segnale di ingresso. Il modulo PC-USB, infine, svolge la funzione di interfaccia tra la rete di trasmissione dati ed il PC di acquisizione collegato tramite una porta USB.



Figura 4.1: Sonde voltmetriche e modulo PC-USB

4.1 Elaborazione Dati in Excel

I valori del potenziale vengono elaborati in continuo dalle due sonde voltmetriche tramite il sistema di acquisizione Nplus, per tutta la durata della prova. Il sistema prende 24 misure al giorno del potenziale di libera corrosione (una ogni ora) e le inserisce automaticamente in un file Excel. Questi files, relativi ai vari giorni dei cicli di bagnasciuga, sono poi uniti e tabulati in uno unico regolarmente aggiornato. In concomitanza a periodi di festività, o di interruzione dei cicli per eventuali test sui provini, il programma di acquisizione dei dati, tramite il pannello d'interfaccia, veniva messo in stand-by e reso di nuovo operativo all'inizio di un nuovo ciclo.

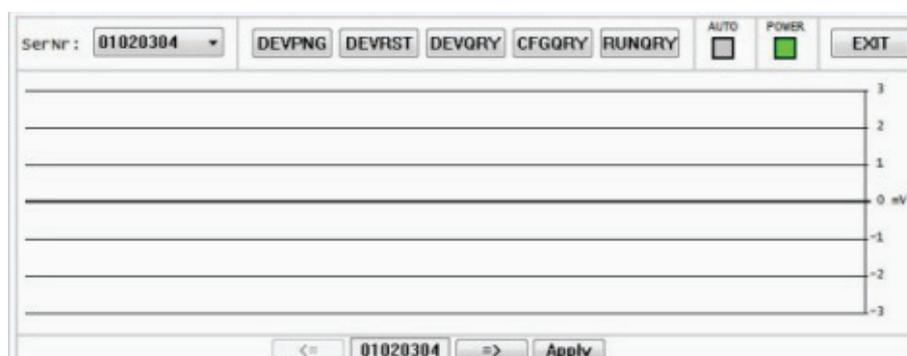


Figura 4.2: Interfaccia principale

4.2 Tabelle Excel dei Valori di Potenziale

Nel file Excel vengono riportati:

- Tempo: giorno e ora di acquisizione dei dati
- Massimo: valore massimo del potenziale rilevato nella serie
- Media + 3σ : valore medio incrementato di 3 Sigma (scarto quadratico medio)
- Media: valore medio del potenziale di libera corrosione
- Media - 3σ : valore medio diminuito di 3 Sigma (scarto quadratico medio)
- Minimo: valore minimo del potenziale rilevato nella serie

Di seguito, come esempio, sono riportati i dati tabulati (in mV) del primo ciclo di immersione in acqua potabile e NaCl del provino A:

Time	Massimo	Media+3Sigma	Media	Media-3Sigma	Minimo
26/03/2023 13:45	-149,77	-151,22	-151,46	-151,71	-153,19
26/03/2023 14:45	-149,52	-150,85	-151,08	-151,3	-152,68
26/03/2023 15:45	-148,89	-150,47	-150,71	-150,95	-152,46
26/03/2023 16:45	-149,05	-150,57	-150,81	-151,05	-152,58
26/03/2023 17:45	-149,28	-150,77	-150,99	-151,22	-152,51
26/03/2023 18:45	-149,47	-150,92	-151,15	-151,38	-152,54
26/03/2023 19:45	-149,59	-151,2	-151,44	-151,68	-153,05
26/03/2023 20:45	-149,98	-151,34	-151,57	-151,8	-153,35
26/03/2023 21:45	-150,29	-151,56	-151,79	-152,02	-153,48
26/03/2023 22:45	-150,14	-151,63	-151,88	-152,12	-153,45
26/03/2023 23:45	-150,15	-151,92	-152,18	-152,43	-153,99
27/03/2023 00:45	-150,5	-152,16	-152,4	-152,64	-153,97
27/03/2023 01:45	-150,63	-152,25	-152,49	-152,73	-154,46
27/03/2023 02:45	-150,82	-152,28	-152,53	-152,77	-154,35
27/03/2023 03:45	-150,73	-152,11	-152,34	-152,58	-154,37
27/03/2023 04:45	-150,42	-151,94	-152,19	-152,43	-153,69
27/03/2023 05:45	-150,67	-152,13	-152,38	-152,63	-154,2
27/03/2023 06:45	-150,77	-152,3	-152,55	-152,79	-154,32
27/03/2023 07:45	-150,75	-152,52	-152,77	-153,01	-154,58
27/03/2023 08:45	-150,9	-152,64	-152,9	-153,16	-154,73
27/03/2023 09:45	-150,77	-152,47	-152,72	-152,97	-154,33
27/03/2023 10:45	-150,74	-152,45	-152,7	-152,95	-154,49
27/03/2023 11:45	-150,95	-152,55	-152,78	-153,02	-154,5
27/03/2023 12:45	-150,67	-152,37	-152,62	-152,86	-154,45

Tabella I. Dati monitorati in asciutto precedenti al 1° Ciclo di immersione in acqua potabile (provino A)

Time	Massimo	Media+3Sigma	Media	Media-3Sigma	Minimo
27/03/2023 13:45	-217,35	-221,06	-221,55	-222,04	-224,34
27/03/2023 14:45	-218,5	-221,71	-222,22	-222,73	-224,91
27/03/2023 15:45	-220,02	-222,69	-223,22	-223,74	-226,65
27/03/2023 16:45	-219,45	-223,49	-223,95	-224,42	-226,49
27/03/2023 17:45	-220,41	-224,22	-224,64	-225,07	-228,72
27/03/2023 18:45	-220,61	-223,52	-224,04	-224,55	-226,83
27/03/2023 19:45	-223,76	-226,11	-226,61	-227,11	-230,16
27/03/2023 20:45	-221,32	-224,9	-225,35	-225,8	-227,56
27/03/2023 21:45	-224,6	-227,07	-227,53	-227,99	-230,75
27/03/2023 22:45	-235,43	-238,11	-238,66	-239,2	-243,01
27/03/2023 23:45	-242,56	-244,82	-245,32	-245,81	-248,9
28/03/2023 00:45	-252,58	-255,23	-255,72	-256,21	-258,79
28/03/2023 01:45	-253,63	-256,15	-256,62	-257,09	-259,61
28/03/2023 02:45	-254,95	-256,89	-257,31	-257,72	-260,9
28/03/2023 03:45	-250,99	-254,41	-254,79	-255,18	-257,56
28/03/2023 04:45	-252,56	-254,95	-255,39	-255,84	-258,33
28/03/2023 05:45	-254,65	-256,78	-257,21	-257,64	-260,47
28/03/2023 06:45	-255,28	-258,04	-258,46	-258,88	-260,95
28/03/2023 07:45	-257,91	-260,34	-260,83	-261,31	-265,54
28/03/2023 08:45	-259,32	-262,17	-262,6	-263,03	-265,38
28/03/2023 09:45	-261,57	-263,72	-264,12	-264,53	-267,52
28/03/2023 10:45	-262,54	-265,34	-265,71	-266,07	-269,21
28/03/2023 11:45	-262,66	-265,12	-265,57	-266,02	-268,27
28/03/2023 12:45	-262,17	-264,69	-265,11	-265,53	-267,89

Tabella II. Dati monitorati in bagnato relativi al 1°Ciclo di immersione in acqua potabile (provino A)

Dalle precedenti tabelle è possibile osservare come il valore medio del potenziale di libera corrosione in asciutto per il provino A si aggiri intorno ai -150 mV. Tuttavia, una volta immerso in acqua, è diminuito con costanza a valori sempre più elettronegativi fino a stabilizzarsi sui -265 mV. Per il campione B è stato verificato il medesimo comportamento, ma con potenziali che sono variati dai -150 mV in asciutto ai -220 mV in bagnato. I dati acquisiti durante il 1°Ciclo in acqua salata per il provino A risultano invece:

Time	Massimo	Media+3Sigma	Media	Media-3Sigma	Minimo
28/06/2023 13:45	-238,38	-241,86	-242,44	-243,01	-246,52
28/06/2023 14:45	-239,29	-242,35	-242,91	-243,47	-247,06
28/06/2023 15:45	-237,29	-241,89	-242,48	-243,08	-246,8
28/06/2023 16:45	-240,71	-243,81	-244,37	-244,93	-248,54
28/06/2023 17:45	-240,01	-243,54	-244,12	-244,71	-248,31
28/06/2023 18:45	-240,67	-244,33	-244,93	-245,52	-248,88
28/06/2023 19:45	-239,58	-244,01	-244,58	-245,15	-249,32
28/06/2023 20:45	-240,03	-244,96	-245,59	-246,22	-250,43
28/06/2023 21:45	-240,33	-244,75	-245,35	-245,96	-249,76
28/06/2023 22:45	-242,84	-246,55	-247,13	-247,71	-251,23
28/06/2023 23:45	-241,94	-245,47	-246,05	-246,62	-250,15
29/06/2023 00:45	-242,66	-246,24	-246,83	-247,42	-251,1
29/06/2023 01:45	-242,88	-247,54	-248,15	-248,76	-253,27
29/06/2023 02:45	-242,93	-246,9	-247,49	-248,09	-251,34
29/06/2023 03:45	-243,54	-248,14	-248,8	-249,47	-254,65
29/06/2023 04:45	-244,14	-247,76	-248,35	-248,93	-252,48
29/06/2023 05:45	-245,56	-248,86	-249,45	-250,04	-254,08
29/06/2023 06:45	-245,63	-248,96	-249,54	-250,12	-254,52
29/06/2023 07:45	-244,44	-248,01	-248,58	-249,16	-252,89

29/06/2023 08:45	-244,79	-248,39	-248,98	-249,57	-253,18
29/06/2023 09:45	-245	-248,53	-249,13	-249,73	-253,46
29/06/2023 10:45	-243,97	-248,83	-249,45	-250,06	-254,52
29/06/2023 11:45	-245,15	-248,43	-249,01	-249,58	-253,2
29/06/2023 12:45	-245,36	-249,51	-250,11	-250,7	-255,19

Tabella III. Dati monitorati in bagnato relativi al 1°Ciclo di immersione in acqua salata (provino A)

Time	Massimo	Media+3Sigma	Media	Media-3Sigma	Minimo
30/06/2023 13:45	-186,96	-188,41	-188,62	-188,84	-189,99
30/06/2023 14:45	-187,87	-189,24	-189,46	-189,68	-191,17
30/06/2023 15:45	-188,15	-189,21	-189,42	-189,64	-190,92
30/06/2023 16:45	-187,5	-189,07	-189,32	-189,56	-190,86
30/06/2023 17:45	-187,36	-189,2	-189,45	-189,69	-190,72
30/06/2023 18:45	-187,61	-189,33	-189,57	-189,82	-190,79
30/06/2023 19:45	-188,52	-189,94	-190,19	-190,45	-191,9
30/06/2023 20:45	-188,87	-190,04	-190,29	-190,55	-192,25
30/06/2023 21:45	-188,22	-189,87	-190,12	-190,37	-191,68
30/06/2023 22:45	-188,66	-190,1	-190,35	-190,6	-192,07
30/06/2023 23:45	-189,71	-190,94	-191,19	-191,44	-193,16
01/07/2023 00:45	-190,07	-191,79	-192,04	-192,3	-193,51
01/07/2023 01:45	-189,1	-190,75	-191,01	-191,28	-192,73
01/07/2023 02:45	-188,7	-190,71	-190,95	-191,2	-193,32
01/07/2023 03:45	-188,29	-190,36	-190,62	-190,88	-192,42
01/07/2023 04:45	-189,45	-190,73	-190,99	-191,25	-192,84
01/07/2023 05:45	-188,71	-190,54	-190,8	-191,05	-192,29
01/07/2023 06:45	-190,26	-191,38	-191,63	-191,88	-193,63

01/07/2023 07:45	-189,19	-190,88	-191,13	-191,38	-192,48
01/07/2023 08:45	-189,12	-190,84	-191,09	-191,34	-192,44
01/07/2023 09:45	-190,14	-191,53	-191,78	-192,04	-193,44
01/07/2023 10:45	-189,28	-191,25	-191,5	-191,75	-193,57
01/07/2023 11:45	-189,9	-191,27	-191,52	-191,78	-193,16
01/07/2023 12:45	-194,61	-196,55	-196,81	-197,06	-198,48

Tabella IV. Dati monitorati in asciutto relativi al 1°Ciclo di immersione in acqua salata (provino A)

Il valore medio del potenziale di libera corrosione, durante il primo ciclo di bagnato in NaCl del campione A, si è aggirato intorno ai -240/-250 mV; mentre è rimasto costante nei giorni successivi in asciutto per valori di -190 mV. Fin dalla seconda settimana e per tutti i restanti cicli, questo potenziale è improvvisamente schizzato a valori più elettronegativi arrivando a sfiorare i -500 mV in bagnato e tra i -350/-400 mV in asciutto. Se in precedenza il comportamento del secondo provino B si era dimostrato coerente con i dati registrati del primo, dalla seconda settimana di osservazione in NaCl il grafico del potenziale medio si è progressivamente allontanato dai picchi più elettronegativi del campione A. Il provino B ha fatto registrare un potenziale medio in bagnato compreso tra -250/-300 mV e -200/-250 mV in asciutto. I valori dei dati, riportati nelle precedenti tabelle, saranno successivamente ripresi ed inseriti in appositi grafici potenziale/tempo per poter essere analizzati nel Capitolo 5.1.

Capitolo 5 | Cicli di Bagnasciuga

I nove campioni sono stati monitorati per 17 cicli complessivi di cui 11 in acqua potabile e 6 in acqua e NaCl. Ogni ciclo, della durata di una settimana, incomincia con due giorni di immersione e cinque giorni in asciutto. Il provino A inizia il ciclo in bagnato alle ore 13:45, mentre per il provino B alle 13:15, terminando in asciutto al termine della settimana alla stessa ora.

5.1 Cicli di Bagnasciuga in Acqua Potabile

Sono stati eseguiti 11 cicli in acqua potabile per tutti e nove i provini che hanno avuto inizio il 27 Marzo 2023 e sono terminati il 28 Giugno 2023. Per i primi 3 cicli i provini sono stati spostati manualmente fuori e dentro le vasche, si è poi passato all'impiego di una pompa per rimuovere l'acqua in modo tale da non sollecitare la strumentazione. Negli 11 cicli in acqua potabile si sono verificate due discontinuità durante la rilevazione dei dati, la prima avvenuta tra il 21 e il 26 Aprile 2023 dovuta alla sospensione delle attività universitarie; la seconda si è verificata in seguito all'inizio dei test vibrazionali con Laser Doppler a Scansione e accelerometri tra il 19 e il 24 Maggio 2023. Di seguito sono rappresentati i grafici del potenziale, inerenti ai cicli di bagnasciuga in acqua potabile (riquadrati in rosso e evidenziati con il simbolo ) e in acqua e NaCl, dei due provini:

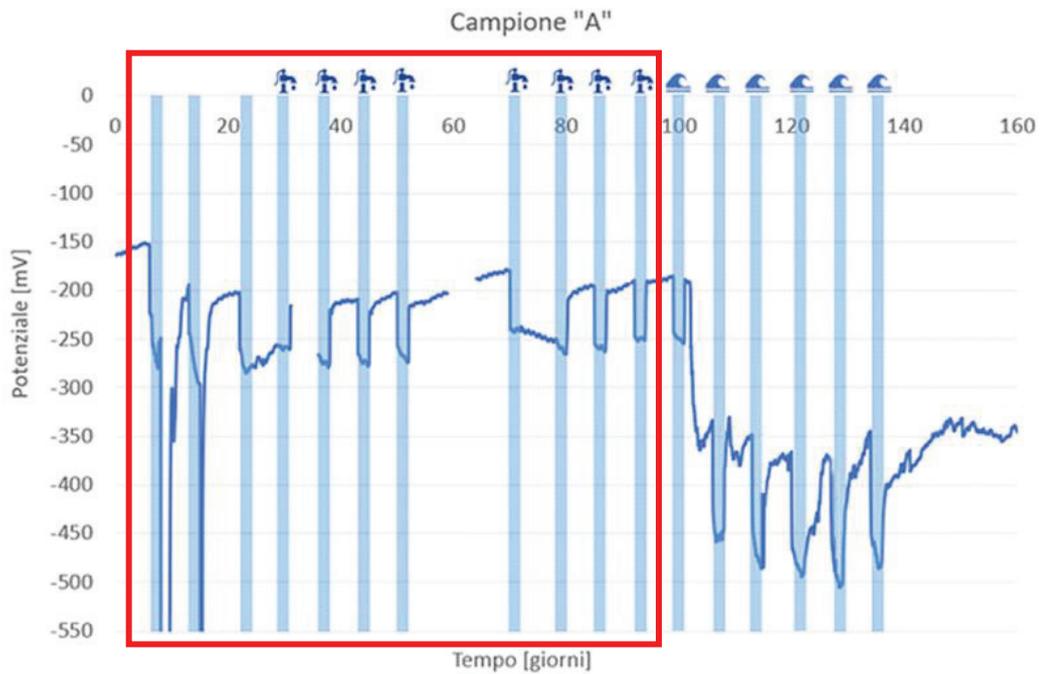


Figura 5.1: Andamento del potenziale in acqua potabile per il provino A

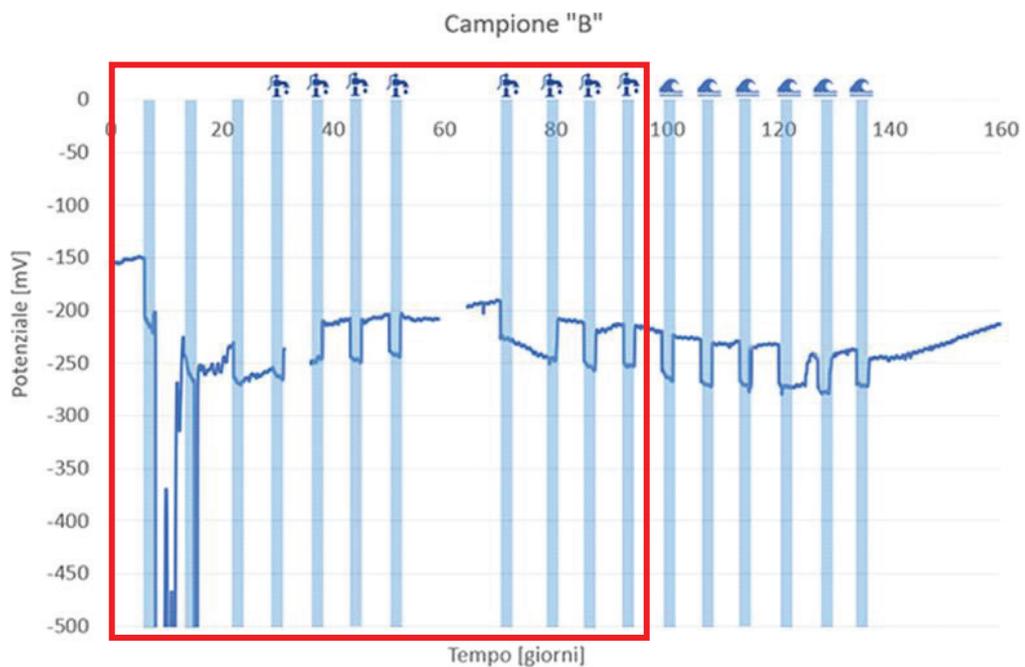


Figura 5.2: Andamento del potenziale in acqua potabile per il provino B

Facendo riferimento ai grafici 1 e 2, durante i primi 2 cicli di immersione in entrambi i provini si sono registrati potenziali estremamente bassi tali da risultare fuori scala (oltre -500 mV). In un primo momento si è ipotizzato che queste anomalie fossero dovute alla possibile interferenza generata dallo spostamento manuale dei campioni avvenuto durante i primi 3 cicli, poi smentito nel terzo ciclo di bagnasciuga dove, per entrambi i provini, questi valori si sono normalizzati intorno ai -200 mV in asciutto e i -250 mV in bagnato.

Questo comportamento può essere facilmente spiegato se si pensa ad una fase iniziale di assestamento del liquido all'interno delle cavità e nei pori dei provini, causando una lettura imprecisa da parte della strumentazione.

5.2 Cicli di Bagnasciuga in NaCl

Prima di poter immergere i campioni si è reso necessario il calcolo della quantità di sale da diluire nelle tre vasche di capienza complessiva di 75 litri (25 l per vasca). La concentrazione di NaCl voluta doveva risultare il più possibile vicina alla salinità media del mare e cioè pari al 3,5%:

$$(\text{Salinità}) 35 \text{ g/l} \times 25 \text{ l (per vasca)} = 875 \text{ g/l} : 1000 = 0,875 \text{ Kg/l} \quad (2)$$

A tale scopo sono stati pesati un complessivo di 2,625 Kg del normale sale da cucina, poi suddivisi in tre misurini di pari capacità e disciolti in tre taniche contenenti 25 litri di acqua potabile ciascuna. I cicli eseguiti sono stati un totale di 6 e sono iniziati il giorno 28 Giugno 2023 concludendosi il 9 Agosto 2023. Di seguito sono rappresentati i grafici del potenziale riguardanti i cicli di bagnasciuga in NaCl, rappresentati con un riquadro rosso ed il simbolo  :

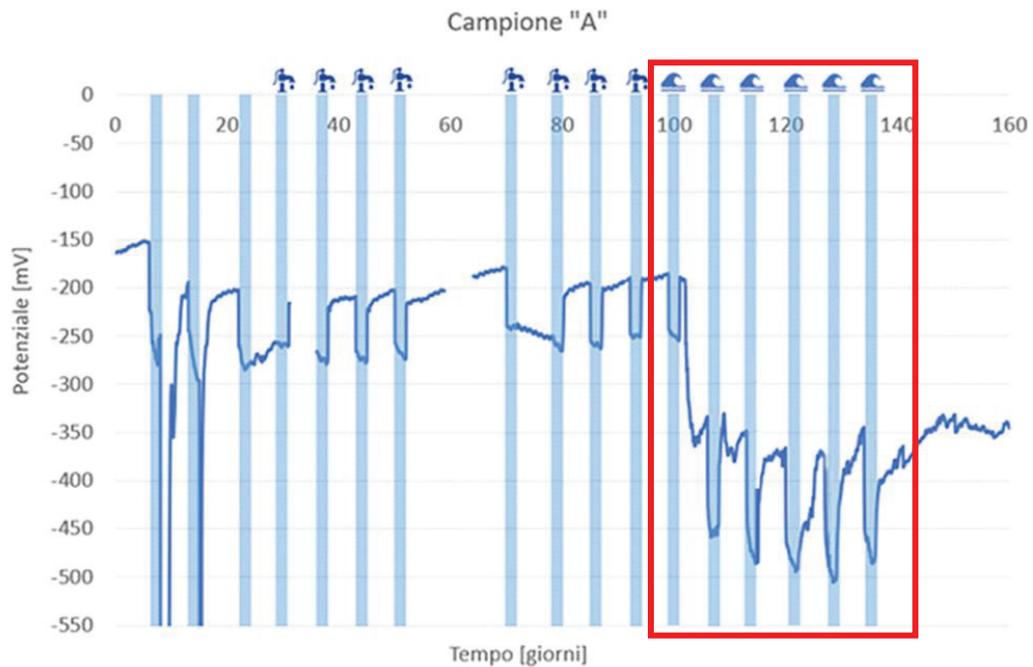


Figura 5.3: Andamento del potenziale in NaCl per il provino A

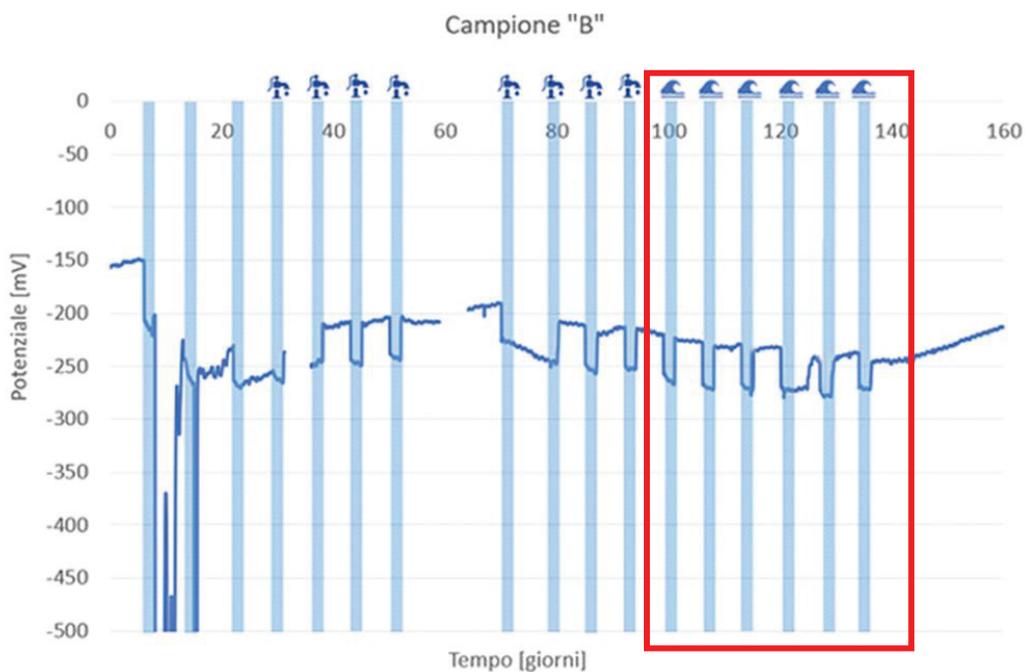


Figura 5.4: Andamento del potenziale in NaCl per il provino B

Durante il periodo di monitoraggio non si sono verificate interruzioni ed è stato evidenziato un notevole abbassamento del potenziale per il provino A e un leggero abbassamento nel provino B rispetto ai cicli in acqua naturale. In particolare, la sonda A nel primo ciclo di immersione non ha registrato alcun particolare abbassamento del potenziale a valori più elettronegativi non risentendo della presenza del sale disciolto. Questa diminuzione del potenziale si è verificata solo dopo il periodo in ammollo, ovvero nella prima fase in asciutto, dove è

improvvisamente sceso a valori intorno ai -350 mV. Nelle settimane successive i dati registrati del potenziale sono progressivamente calati fino a toccare i -500 mV in bagnato. Nella sonda B, fin dalla prima settimana, si è monitorato un calo continuo e graduale del potenziale poi stabilitosi tra i -225 mV in asciutto e i -375 mV in ammollo e senza quei salti di potenziale repentini che hanno distinto il caso A. Sebbene il secondo grafico rappresenti un andamento più attendibile del processo elettrochimico in atto nei ferri di armatura (esso richiede più tempo di quello analizzato per attivarsi), il campione A è un indice plausibile di tutti quei casi dove l'armatura risulta scoperta all'attacco dei cloruri, penetrati attraverso le fessure della matrice cementizia.

Capitolo 6 | Test Vibrazionale LDV e Accelerometri

Giunti al termine del settimo ciclo in acqua potabile, i nove provini vengono scollegati dal sistema di acquisizione e dalle 2 sonde voltmetriche. Il provino D, non fessurato e con sonde, viene preso come campione di riferimento ed inviato nel laboratorio del dipartimento DIISM. Nella mattina del 22 Maggio 2023, in seguito ad una prima fase di preparazione, il campione viene sottoposto ai test vibrazionali con il Laser Doppler Vibrometer (LDV).

6.1 Le Vibrazioni

Le vibrazioni sono fenomeni caratterizzati dall'oscillazione o dal movimento ripetitivo di un oggetto attorno ad una posizione di equilibrio. Il corpo vibrante descrive un movimento oscillante attorno ad una posizione di riferimento, in cui la forza risultante è pari a zero. La frequenza, misurata in hertz (Hz), rappresenta il numero di oscillazioni complete che avvengono entro un secondo.

6.2 Vibrometro Laser Doppler a Scansione

La vibrometria Laser Doppler a Scansione consente di eseguire misure a tutto campo senza contatto e di utilizzare i dati così ottenuti per un'analisi strutturale o modale. È possibile eseguire misure su centinaia o addirittura migliaia di punti in tempi brevi e senza la necessità di cablaggi ed installazione di sensori. Poiché la misura è senza contatto non si hanno problemi relativi alla temperatura, ai campi magnetici, al tipo di materiale e non si influenza in alcun modo l'oggetto in prova, che nel nostro caso presenta dimensioni relativamente grandi (dell'ordine delle decine di cm). I dati acquisiti possono essere immediatamente utilizzati per visualizzare le deformate operative, essere esportati verso software di analisi modale o per confronto con programmi di calcolo ad elementi finiti. In questo ambito, un'importante applicazione del vibrometro a scansione è il suo utilizzo durante le prove di vibrazione. Con questa tecnologia, una prova di

vibrazione non si limita a certificare come l'oggetto abbia reagito alle sollecitazioni imposte (in casi estremi fino alla distruzione dello stesso), ma anche rappresentarne il comportamento dinamico quando sottoposto a vibrazioni. Lo strumento ha un'ampiezza di risoluzione del femtometro costante fino a gamme di frequenza molto elevate, raggiungendo praticamente più di 2 GHz. Queste proprietà sono indipendenti dalla distanza di misura, quindi questo principio viene utilizzato sia in operazioni microscopiche che su distanze molto grandi. La luce come sensore non influenza il campione, rendendolo non invasivo e consentendo quindi di effettuare misurazioni su strutture piccole ed estremamente leggere.

6.2.1 Funzione Tramite Effetto Doppler

Il segnale luminoso (onda) viene riflesso dal campione D, messo in movimento da un colpo di martelletto e risultando in una vibrazione poi rilevata dall'LDV. Lo spostamento di frequenza dell'onda, misurato dallo strumento al momento del colpo, può essere descritto come:

$$f_D = 2 \cdot v/\lambda \quad (3)$$

dove v è la velocità dell'oggetto e λ è la lunghezza d'onda dell'onda emessa. Per poter determinare al contrario la velocità di un oggetto, lo spostamento di frequenza deve essere misurato ad una lunghezza d'onda nota. Questo procedimento viene svolto dall'LDV utilizzando un interferometro laser. Il problema di questo tipo di dispositivi è che essi richiedono l'interferometro montato a terra, o su un luogo da considerarsi fisso, mentre il laser deve essere costantemente puntato verso l'oggetto.

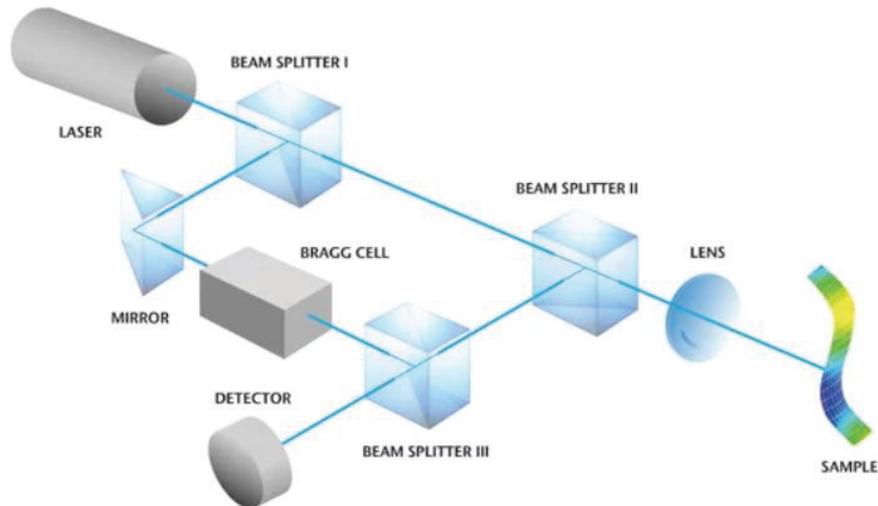


Figura 6.1: Funzionamento del segnale laser doppler

6.3 Allestimento della Prova con LDV

In fase preparatoria, il campione è stato posizionato su due supporti in gommapiuma, dello spessore di pochi millimetri, posti alle due estremità dello stesso. In questo modo è stato possibile isolare il provino dal piano di lavoro, evitando eventuali vibrazioni anomale del piano durante lo svolgimento della prova. Terminata questa prima fase, il secondo passo è stato calibrare lo strumento laser andandolo a centrare perpendicolarmente al di sopra del campione e alla sua linea di mezzeria. Il programma utilizzato dallo strumento, grazie ad una tecnologia a scansione basata su di una griglia di punti, permette di ottenere le deformate dell'oggetto in prova o l'esportazione dei dati ottenuti verso un software di analisi modale. L'ultimo passo ha richiesto che sul campione venissero evidenziati 65 punti, lungo tutto l'asse maggiore del provino, dove il laser avrebbe colpito la superficie. Questi, posti ad una distanza regolare pari a 0,960 cm, servono come punti di misura delle oscillazioni per lo strumento che li andrà poi a digitalizzare in un modello 3D dell'oggetto. A causa della scarsa ricezione del raggio laser di ritorno, dovuto alla superficie ruvida, scura e poco riflettente del calcestruzzo, si è ricorso ad una pasta bianca lucida, di solito utilizzata in ambito cosmetico, per marcare i punti di proiezione del laser e renderli più visibili e riflettenti.



Figura 6.2: Vibrometro Laser Doppler a Scansione (LDV)

6.4 Svolgimento della Prova con LDV

Il Test, svolto per il campione D con LVD, consiste in 5 colpi con un martelletto nel centro degli assi di simmetria del parallelepipedo di calcestruzzo, leggermente a lato della decima rondella. Il laser viene dunque centrato nel primo punto, precedentemente evidenziato sulla superficie del provino, per poi eseguire i 5 colpi in rapida successione. Il segnale viene poi ricalibrato e centrato sul secondo punto, poi sul terzo e così via per tutti e 65 i punti. La prova si è svolta manualmente da un operatore, il cui compito era quello di ripetere i colpi nel medesimo punto e con la stessa intensità. A volte, a causa del processo non automatico o di errori nella calibrazione dello strumento, il grafico delle oscillazioni risultava falsato. Nei casi in cui la lettura delle oscillazioni a varie frequenze risulti non veritiera, i dati trovati devono essere cancellati e i colpi ripetuti. Al termine della prova è stato ottenuto un modello 3D (ad elementi finiti) di tutti i 65 punti del provino D, con le relative oscillazioni, a varie frequenze e risultato in linea a quanto realmente atteso.



Figura 6.3: Martelletto utilizzato durante la prova LDV

6.5 Sensore Accelerometrico o Accelerometro

Un accelerometro è un dispositivo che misura l'accelerazione di un oggetto, il cui funzionamento, è basato su una massa smorzata montata su una molla. Quando l'accelerometro è sottoposto ad un'accelerazione, la massa si sposta in risposta a questa accelerazione. Questo spostamento viene misurato e convertito in unità di misura utili. Nel caso di un sensore di carica tradizionale, l'accelerazione lungo l'asse di misura provoca uno stress che a sua volta genera un flusso di ioni carichi proporzionale all'intensità dell'accelerazione. Il sensore comprende un pezzo di materiale piezoelettrico, come il quarzo o una ceramica piezoelettrica, posizionato accanto ad una massa fissa. Quando l'alloggiamento del sensore viene sottoposto ad accelerazione lungo l'asse di misura, la compressione della massa sul materiale piezoelettrico induce una generazione di carica elettrica nel materiale stesso. Questa carica elettrica può essere misurata utilizzando un sistema DAQ (Sistema di Acquisizione Dati).

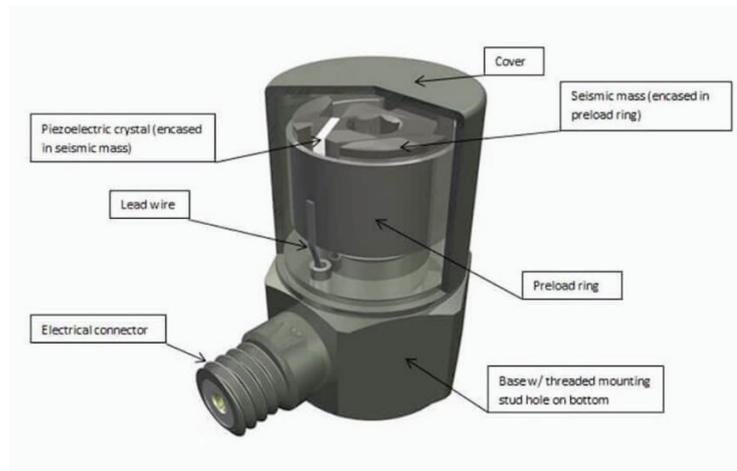


Figura 6.4: componenti di un sensore accelerometrico

6.5.1 Montaggio Sensore Accelerometrico

Esistono vari modi di montaggio dei sensori accelerometrici e il modo in cui tali sensori vengono montati può influire sulla larghezza di banda del sensore. Il metodo di montaggio è per questo un fattore da tenere in conto se si vogliono ottenere dati accurati delle misure di vibrazioni. Un montaggio inadeguato può comportare un filtraggio delle frequenze rilevate dal sensore e limitarne lo spettro utile dell'accelerometro. I metodi di montaggio più utilizzati sono:

- **Metodo a Perno:** pratico un foro sul corpo da analizzare e fisso il sensore alla superficie con una vite. Questo tipo di montaggio non influisce sulle proprietà del sensore, ma potrebbe non essere adatto nel caso in cui non si desidera modificare l'oggetto in studio.
- **Adesivo:** utilizzo di un sottile nastro biadesivo o cera d'api (che ha limitazioni di temperatura). Questo metodo può influire relativamente sulla larghezza di banda del sensore.
- **Magnete:** consente di ottenere una buona larghezza di banda, ma richiede che la superficie sia ferromagnetica (non alluminio o plastica).



Figura 6.5: Sensore Accelerometrico utilizzato nella prova

6.6 Svolgimento Prova con Accelerometri

Il giorno 24 Maggio 2023, terminati i test con laser doppler a scansione, sono iniziati i test con accelerometri su tutti e nove i campioni. Nello svolgimento della prova sono stati utilizzati un totale di cinque accelerometri del tipo AC, con uscita in carica, progettati per misurare le vibrazioni dinamiche. Per fissare le rondelle metalliche sulla superficie dei provini e i sensori accelerometrici, è stato utilizzato un metodo di montaggio di tipo adesivo con cera d'api. I cinque accelerometri sono collegati al sistema di acquisizione dati contemporaneamente, ed incollati rispettivamente alle prime cinque rondelle per eseguire la prova. Esattamente come per i test con LDV, un operatore colpisce con il martelletto per cinque volte, nello stesso punto, al centro degli assi principali del campione cilindrico. Una volta eseguiti i primi cinque colpi, si spostano i sensori nelle successive rondelle e si ripete il processo (20 rondelle 4 run). Al termine della prova si ottengono sia i tracciati di riferimento delle vibrazioni, sia il modello ad elementi finiti dell'oscillazione dei punti, a diverse frequenze. Completata la prova accelerometrica, abbiamo ricollegato i campioni alla strumentazione, ed iniziato un nuovo ciclo di monitoraggio in acqua potabile per osservare possibili differenze prima e dopo i test. Un'ulteriore prova con sensori accelerometrici, eseguita in conclusione ai cicli di bagnasciuga in NaCl, ha evidenziato un aumento dei picchi del segnale oscillatorio rispetto ai precedenti test in acqua potabile. La causa è dovuta principalmente ad una stagionatura

più prolungata del calcestruzzo (rispetto ai primi test) e ad un'asciugatura migliorata dal clima più favorevole nei giorni precedenti la prova. Questo dimostra che l'attacco dei cloruri, sui ferri di armatura dei provini, non ha intaccato la loro rigidezza, o comunque non abbastanza da poter essere registrata dalla strumentazione. A lungo termine ripetendo la prova, la rigidezza andrà pian piano a diminuire in quei campioni dove l'attacco chimico risulti particolarmente aggressivo.



Figura 6.6: Montaggio dei cinque sensori all'inizio del test

Capitolo 8 | Conclusioni

I dati ottenuti dalle due sonde hanno dimostrato che il sistema è effettivamente in grado di rilevare la penetrazione dell'acqua e dei sali di cloruro di sodio all'interno della matrice cementizia fessurata. Le osservazioni fatte e le analisi svolte sui provini hanno consentito una rilevazione precoce del degrado in atto e permesso una valutazione preventiva dei possibili interventi di protezione e prevenzione dell'armatura. In questo modo si è reso possibile intervenire in quei ferri di armatura, soggetti all'azione dei cloruri, prima ancora di un'effettiva propagazione del meccanismo corrosivo. Dai test vibrazionali svolti in laboratorio al termine della sperimentazione si è verificato l'aumento della rigidità del calcestruzzo a seguito della stagionatura prolungata rispetto i primi mesi di osservazione. L'attacco degli ioni cloro si è dimostrato particolarmente aggressivo con un tempo di innesco molto breve, ma con una fase di propagazione che non ha inciso, in tempi brevi, sull'effettiva resistenza delle barre metalliche. In futuro sarà possibile monitorare in continuo il degrado dei ferri di armatura in condizioni ambientali diversificate e con sensori sempre più innovativi e ad alta sensibilità. Ciò permetterà di rilevare le variazioni del potenziale e stabilire esattamente la probabilità di innesco della corrosione sulle barre metalliche in quell'esatto ambiente. In tal modo saremo sempre più capaci di garantire una maggiore longevità alla struttura e la conseguente sicurezza degli occupanti.

Bibliografia e Sitografia:

- ❖ Prof. F. Tittarelli, Scienza e Tecnologia dei Materiali, appunti del corso
- ❖ A. Mattia, “Misura in continuo del potenziale di libera corrosione delle armature per il monitoraggio delle strutture in calcestruzzo armato”, tesi di laurea.
- ❖ F. Eleonora, “Valutazione della capacità “self-sensing” di conglomerati cementizi con aggiunte conduttive a basso impatto ambientale”, tesi di laurea magistrale.
- ❖ M. Collepari, "Il nuovo calcestruzzo", Ed. Tintoretto.
- ❖ L. Bertolini, “Materiali da costruzione”, Città Studi Edizioni.
- ❖ P. Pedferri, L. Bertolini, “La corrosione nel cls e negli ambienti naturali”, Ed. Mc Graw Hill.
- ❖ Kimia S.p.a, Prodotti e tecnologie per il recupero edilizio, <https://www.kimia.it/it/blog/le-principali-cause-del-degrado-del-calcestruzzo#:~:text=L'attacco%20dei%20cloruri,ricopre%20i%20ferri%20d'armatura>, consultato il 20/11/2023.
- ❖ P. Pedferri, “La corrosione delle armature nel calcestruzzo”, https://dipcia.unica.it/superf/Ing_Civile/Pedferri%20Corrosione%20nel%20CLS%202004.pdf, consultato il 20/11/2023.
- ❖ A. Bossio, “ Le tecniche elettrochimiche per controllare la corrosione dei ferri nel calcestruzzo”, <https://www.teknoing.com/guide/guide-ingegneria/le-tecniche-elettrochimiche-per-controllare-la-corrosione-dei-ferri-nel-calcestruzzo/>, consultato il 22/11/2023.
- ❖ Mapei S.p.a, “il degrado del calcestruzzo”, https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider2/lines-technical-documentation/lines-technical-document-degrado-del-cls-it.pdf?sfvrsn=22ca4df4_4, consultato il 22/11/2023.
- ❖ General Admixtures, “Protezione, ripristino e riparazione delle strutture in calcestruzzo armato”, https://www.gageneral.com/wp-content/uploads/2020/06/Brochure_Ripristini_Rev3_2020_01_web.pdf, consultato il 22/11/2023.
- ❖ BPS VibroLAB, “Vibrometro laser doppler a scansione”, <https://www.bpsweb.it/vibrolab/attrezzature-vibrolab/vibrometro-laser-doppler-a-scansione/>, consultato il 10/12/2023.
- ❖ Polytec, “Laser doppler vibrometry”, <https://www.polytec.com/uk/vibrometry/technology/laser-doppler-vibrometry>, consultato il 10/12/2023.
- ❖ Ingenio, “Calcestruzzo armato | Patologie Edili”, <https://www.ingenio-web.it/articoli/velocita-di-corrosione-delle-armature-nel-calcestruzzo-confronto-tra-metodi-elettrochimici-e-perdita-di-massa/>, consultato il 15/12/2023.
- ❖ M. De Cecco, “Misure Accelerometriche”, <https://www.miro.ing.unitn.it/wp-content/download/Didactics/Misure1/Materiale%20del%20Corso/11%20Accelerometro%20a%20Massa%20Sismica/Misure%201%20->

[%20Accelerometri/Misure%20accelerometriche.pdf](#), consultato il 14/12/2023.

- ❖ DEWEsoft, “Misurare vibrazioni ed urti con sensori accelerometrici”, <https://dewesoft.com/it/blog/misurare-urto-vibrazione-con-accelerometri>, consultato il 14/12/2023.

Elenco delle Figure

Figura 1.1: Curve granulometriche di una sabbia (S), di una ghiaia (G), di un aggregato ideale secondo Fuller (F) e di un aggregato combinato ottimale (O)	8
Figura 1.2: Classi di esposizione	9
Figura 1.3: Tipi di Cemento e Composizione (percentuali in massa)	11
Figura 2.1: Cause del Degrado	14
Figura 2.2: Periodo di innesco e periodo di propagazione della corrosione in una struttura in calcestruzzo armato (modello di Tuutti)	15
Figura 2.3: Meccanismo di crescita del Pitting	16
Figura 2.4: Test alla fluoresceina e AgNO	18
Figura 2.5: Diagramma Pedeferrri	20
Figura 3.1: Particolare del provino F	21
Figura 3.2: Macchina per prova a flessione	22
Figura 3.3: Particolare della resina poliuretana Marinflex applicata su un provino	23
Figura 3.4: Fase di immersione per i provini da A a F	24
Figura 3.5: a) Pompa Rule utilizzata; b) Tanica di drenaggio dell'acqua	25
Figura 4.1: Sonde voltmetriche e modulo PC-USB	26
Figura 4.2: Interfaccia principale	27
Figura 5.1: Andamento del potenziale in acqua potabile per il provino A	34
Figura 5.2: Andamento del potenziale in acqua potabile per il provino B	34
Figura 5.3: Andamento del potenziale in NaCl per il provino A	36
Figura 5.4: Andamento del potenziale in NaCl per il provino B	36
Figura 6.1: Funzionamento del segnale laser doppler	40
Figura 6.2: Vibrometro Laser Doppler a Scansione (LDV)	41
Figura 6.3: Martelletto utilizzato durante la prova LDV	42
Figura 6.4: Componenti di un sensore accelerometrico	43
Figura 6.5: Sensore Accelerometrico utilizzato nella prova	44
Figura 6.6: Montaggio dei cinque sensori all'inizio del test	45

Elenco delle Tabelle

Tabella I: Dati monitorati in asciutto precedenti al 1° Ciclo di immersione in acqua potabile (provino A)	28
Tabella II: Dati monitorati in bagnato relativi al 1°Ciclo di immersione in acqua potabile (provino A)	29
Tabella III: Dati monitorati in bagnato relativi al 1°Ciclo di immersione in acqua salata (provino A)	30
Tabella IV: Dati monitorati in asciutto relativi al 1°Ciclo di immersione in acqua salata (provino A)	31

Ringraziamenti

Vorrei dedicare la qui presente tesi a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso e che non hanno mai smesso di credere in me. In particolare vorrei ringraziare la mia relatrice Francesca Tittarelli e l'ingegner Blasi Elisa che mi hanno aiutato durante tutto il tirocinio e nella stesura della tesi. Ringrazio la mia famiglia, che mi è stata accanto anche nei momenti bui in cui volevo mollare tutto. Grazie anche ai miei amici Federico, Riccardo e Vico con cui ho trascorso tre anni di gioia e duro lavoro. Infine, grazie alla mia ragazza, che mi ha sempre saputo consigliare saggiamente quando ero in dubbio. A voi dedico la mia tesi.

