



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE

Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica

**EFFETTO DI AGGIUNTE CONDUTTIVE SOSTENIBILI
SUL COMPORTAMENTO A CORROSIONE DI ARMATURE
IN CALCESTRUZZI "SELF SENSING"
ESPOSTI AD AMBIENTI RICCHI DI CLORURI**

**EFFECT OF SUSTAINABLE CONDUCTIVE ADDITIONS
ON THE CORROSION BEHAVIOUR OF REINFORCEMENTS
EMBEDDED IN "SELF-SENSING" CONCRETES
EXPOSED TO CHLORIDE-RICH ENVIRONMENTS**

Relatore:

Prof.ssa Francesca Tittarelli

Tesi di Laurea di:

Giacomo Pierini

Correlatori:

Ing. Alessandra Mobili

Prof. Tiziano Bellezze

Anno Accademico A.A. 2019/2020

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 Premessa	1
1.2 Stato dell'arte	3
1.3 Progetto EnDurCrete	4
1.4 Obbiettivi	5
Bibliografia	7
2. MATERIALI	9
2.1 Cemento	9
2.2 Acqua	12
2.3 Aggregato	12
2.3.1 Sabbia	13
2.4 Additivi	15
2.4.1 Superfluidificanti	15
2.5 Fibre	17
2.5.1 Fibre di carbonio	18
2.6 Filler carbonioso	20
2.6.1 Char di gassificazione	20
2.6.2 Biochar	22
Bibliografia	23
3. MALTE CON AGGIUNTE CONDUTTIVE	24
3.1 Introduzione	24
3.2 Impasti definitivi	24
3.2.1 Mix Design delle malte	24
3.2.2 Preparazione dei casseri	25
3.2.3 Miscelazione degli ingredienti (Norma UNI)	28
3.2.4 Esecuzione del getto	29
4. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	33
4.1 Introduzione	33
4.2 Resistenza meccanica a flessione	33
4.2.1 Risultati della prova a flessione	36
4.3 Resistenza meccanica a compressione	37
4.3.1 Risultati della prova a compressione	38

Bibliografia	40
5. CORROSIONE DELLE ARMATURE METALLICHE.....	41
5.1 Introduzione	41
5.2 Processo elettrochimico	44
5.3 Metodi di analisi della corrosione.....	46
5.3.1 Misura del potenziale di corrosione	46
5.3.2 Misure elettrochimiche indirette.....	48
5.3.3 Metodo della polarizzazione lineare	49
5.4 Proprietà elettriche dei calcestruzzi	51
5.4.1 Metodo di rilevazione	53
Bibliografia	55
6. PROVE IN CONDIZIONI AMBIENTALI	57
6.1 Prove elettriche sulle malte	57
6.2 Prove di corrosione sulle malte.....	58
6.2.1 Metodo di misurazione della corrosione	58
6.2.2 Risultati delle prove di corrosione	60
6.3 Discussione dei risultati	64
Bibliografia	66
7. PROVE DI CORROSIONE IN PRESENZA DI CLORURI	67
7.1 Resinatura dei provini.....	67
7.2 Azione dei cloruri nel processo corrosivo	67
7.3 Metodo di rilevazione	71
7.4 Prove elettriche sulle malte	73
7.5 Prove di corrosione sulle malte.....	75
7.5.1 Metodo di misurazione della corrosione	75
7.5.2 Risultati delle prove di corrosione	78
7.6 Discussione dei risultati	81
Bibliografia	83
8. CONCLUSIONI.....	84
8.1 Conclusioni finali	84
APPENDICE	90
RINGRAZIAMENTI.....	101

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1. Premessa

Il punto principale della progettazione di un edificio si basa sul garantire la sicurezza strutturale. Infatti, ogni costruzione deve assolvere alle funzioni per la quale è stata realizzata garantendo adeguati livelli di sicurezza.

Capita che strutture, a cui visivamente siano attribuiti danni poco rilevabili, risultino danneggiate. È perciò di primaria importanza rilevare costantemente l'integrità degli elementi strutturali in modo da poter individuare in maniera precoce l'insorgere di eventuali pericoli. Questo può essere attuato attraverso tecniche di monitoraggio.

La norma UNI/TR 11634 descrive le seguenti finalità di monitoraggio [1]:

- una miglior correlazione tra carichi/azioni agenti sulla struttura; [...] quindi una più affidabile conoscenza del comportamento della struttura;
- un'individuazione di più precise modellazioni, di più efficienti criteri di dimensionamento e di una miglior valutazione della sicurezza, anche con riferimento alle fasi di costruzione;
- un'individuazione tempestiva di eventuali anomalie della risposta strutturale [...], soprattutto causate dal decadimento delle risorse strutturali dovute al comportamento sotto azioni cicliche ripetute nel tempo (fatica) o da azioni occasionali, [...];
- un prolungamento della vita attesa per la struttura;
- una miglior gestione delle costruzioni;
- una raccolta di dati statistici che potrebbero avere ricadute sui disposti normativi, anche con riferimento agli effetti delle variazioni climatiche.

Esistono molte tecniche di monitoraggio, ma le rilevazioni sono effettuate tramite trasduttori elettro-meccanici il cui limite è rappresentato dalla necessità di applicare tali sensori in

corrispondenza della frattura, fornendo così un'informazione parziale per la fase successiva di diagnosi [2].

Ultimamente si è iniziato a testare una nuova classe di materiali, la cui particolarità è data da caratteristiche funzionali oltre a quelle meccaniche, fisiche e chimiche intrinseche.

Le proprietà funzionali si manifestano quando il materiale è progettato per reagire a determinati stimoli esterni attraverso azioni opportune: per esempio cambiando colore, viscosità, emettendo luce, variando la rigidità, a seguito di variazioni di temperatura, campo elettrico, campo degli sforzi, accelerazione, ecc.

Nascono i cosiddetti “materiali intelligenti” (Smart Materials), materiali con sensori integrati nella loro struttura, in grado di modificare una determinata caratteristica chimico/fisica a seconda del variare del parametro esterno (Fig. 1).



Fig.1 Smart Materials

I materiali cementizi capaci di monitorare l'insacco e l'evoluzione di un meccanismo di degrado o danneggiamento del materiale stesso prendono il nome di materiali “self-sensing”.

Queste proprietà vengono ottenute tramite l'aggiunta all'interno della matrice cementizia, di materie prime conduttive, che hanno quindi buone proprietà elettriche.

Si ottiene questo comportamento ad esempio aggiungendo alla matrice cementizia fibre di carbonio, le quali risultano essere materiali elettricamente conduttivi e presentano eccellenti caratteristiche meccaniche. In questo modo si produce una rete di conduttori che viene localmente interrotta in presenza di danneggiamento (Fig. 2).

Attraverso la variazione della risposta elettrica del componente è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore per monitorare l'insacco e l'evoluzione del danneggiamento [3].

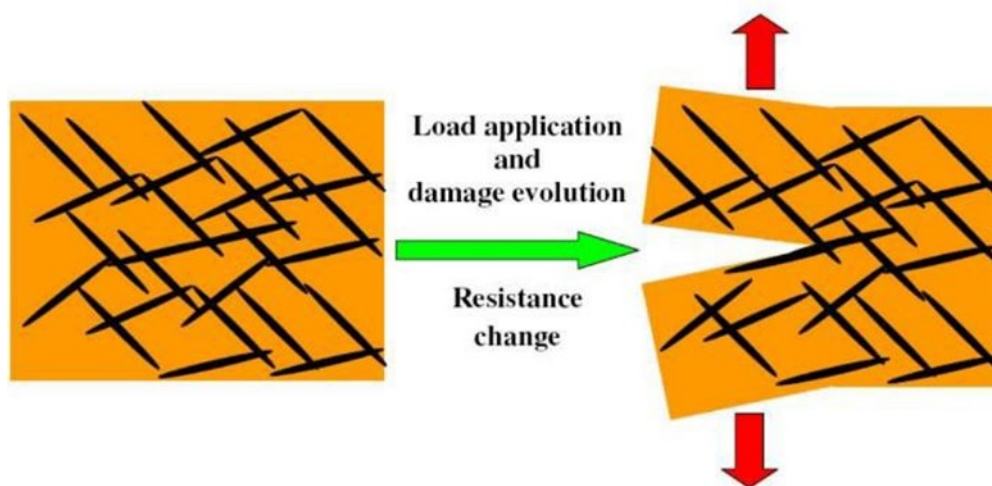


Fig.2 Comportamento delle fibre e/o fillers all'interno della matrice

Lo stesso effetto può essere ottenuto aggiungendo un filler carbonioso sempre in grado di modificare le proprietà elettriche della matrice.

1.2. Stato dell'arte

I primi materiali cementizi "self-sensing" ottenuti con l'aggiunta di particolari particelle risale ai primi anni '90 [4]. Da allora, diversi studi presenti in letteratura si sono occupati di materiali a base cementizia con l'aggiunta di particelle di carbonio, come ad esempio micro e nanofibre di carbonio [5,6], carbon black [7], nanotubi di carbonio [8,9], grafene [10] o una combinazione di diverse tipologie [11; 13].

Il primo utilizzo delle fibre di carbonio in ambito edilizio avvenne nel 1994 per migliorare l'adesione all'interfaccia tra calcestruzzo nuovo/esistente con la finalità del ripristino attraverso delle fibre di carbonio corte.

Negli USA nello stesso anno vennero utilizzate fibre di acciaio e carbonio con l'intento di realizzare un calcestruzzo con capacità auto-monitoranti.

In particolare, una nuova tecnologia di sensori sforzo/deformazione, basata sul concetto della variazione di conduzione elettrica durante l'estrazione della fibra che accompagna l'apertura di una fessura.

Negli ultimi anni è aumentato l'interesse attorno a questi nuovi materiali auto-diagnostici, con la realizzazione di diversi studi basati anche su nanoparticelle conduttive o combinazione fibre-fillers.

1.3. Progetto EnDurCrete



Il cemento Portland è considerato il materiale di riferimento per edifici e opere infrastrutturali. La sua produzione oltre a richiedere consumi energetici rilevanti, è anche fonte di emissione e di un contributo significativo di gas serra. Per produrre 1 tonnellata di cemento si emette nell'atmosfera circa 1 tonnellata di CO₂.

Inoltre, per la produzione vengono consumate significative risorse minerali (calcare e argilla di buona qualità).

Studi attuali, al fine di migliorare la compatibilità ambientale del calcestruzzo, integrano materiali cementizi supplementari (SCM), come i sottoprodotti dei processi industriali, la cui sostituzione però, se effettuata in condizioni ambientali aggressive, talvolta può portare a prestazioni e durata delle strutture in calcestruzzo particolarmente critiche.

L'obiettivo principale del progetto EnDurCrete è lo sviluppo di un nuovo calcestruzzo armato sostenibile ed economico per applicazioni di lunga durata e con valore aggiunto.

Il concetto si basa sull'integrazione di un nuovo cemento a basso contenuto di clinker, inclusi sottoprodotti industriali di alto valore, nuove tecnologie nano e micro e sistemi ibridi che assicurano una maggiore durabilità di strutture in calcestruzzo sostenibili con elevate proprietà meccaniche, capacità di autorigenerazione e automonitoraggio.

Il concetto di EnDurCrete si basa sulle seguenti nuove tecnologie e strumenti:

- Nuovi cementi CEM II/C e CEM VI;
- Nuovi fillers intelligenti a basso costo;
- Strumenti e procedure avanzati continui e non distruttivi di collaudo;
- Nuovi rivestimenti multifunzionali;
- Sistemi di rinforzo multifunzionali non metallici per calcestruzzo;
- Approccio sperimentale e computazionale accoppiato per la comprensione teorica e sperimentale dei fattori che influenzano la durabilità.

Lo scopo del progetto prevede:

- Rafforzare la competitività dell'Industria europea, anche nel campo delle tecnologie "verdi";
- Saldo LCA (strumento utilizzato per valutare il potenziale impatto ambientale di un prodotto) positivo;
- Durabilità del calcestruzzo migliorata di almeno il 30%;
- Diminuzione dei costi di almeno il 30%.

1.4. Obiettivi

La seguente sperimentazione è collocata all'interno del Progetto Europeo EnDurCrete e ha lo scopo di analizzare il comportamento di calcestruzzi e malte con aggiunte di fibre e fillers elettricamente conduttivi.

Il materiale sviluppato è stato realizzato inserendo fibre conduttive di carbonio riciclate e/o fillers carboniosi (biochar derivante dalla pirolisi delle biomasse) all'interno di una matrice cementizia, attraverso opportune modalità di miscelazione. La capacità di autodiagnosi si ottiene correlando la variazione dello stato deformativo del composito con la variazione della sua resistenza elettrica.

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è quello di verificare se le malte con aggiunta di fibre e fillers elettricamente conduttivi aumentano il rischio di corrosione delle barre di armature presenti al loro interno come riportato in letteratura (Tab. 1) [14].

Tab. 1 Correlazione tra resistività elettrica del calcestruzzo a 20 °C e rischio di corrosione delle armature immerse [15,16]

Concrete resistivity ρ_{concrete} ($\Omega \text{ m}$)	Risk of corrosion
< 100	high
100 - 500	moderate
500 - 1000	low
> 1000	negligible

Nella presente sperimentazione verrà pertanto analizzato l'andamento della corrosione delle barre in acciaio immerse nelle malte conduttive sia durante il periodo di stagionatura sia in un ambiente ad elevato rischio di corrosione a causa della presenza di ioni cloruro. La corrosione promossa dai cloruri è stata analizzata a cicli settimanali in asciutto-bagnato per un periodo di 30 giorni.

Bibliografia

[1] UNI/TR 11634:2016

[2] Fabio Sarchi. "Usi di materiali autodiagnostici per la determinazione dello stato di danno di elementi strutturali". Tesi di Laurea Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Pavia, A.A. 1999/2000.

[3] F. 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". Tesi di Laurea Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica Delle Marche, A.A. 2017/2018.

[4] Muto, N., Yanagida, H., Nakatsuji, T., Sugita, M., Ohtsuka, Y., & Arai, Y. (1992). Design of intelligent materials with self-diagnosing function for preventing fatal fracture. *Smart Materials and Structures*, 1(4), 324.

[5] Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E., & Garcés, P. (2014). Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture. *Cement and concrete composites*, 46, 90-98.

[6] Wen, S., & Chung, D. D. L. (2001). Cement-based controlled electrical resistivity materials. *Journal of electronic materials*, 30(11), 1448-1451.

[7] Li, H., Xiao, H. G., & Ou, J. P. (2006). Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 28(9), 824-828.

[8] Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2010). Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 110-115.

[9] Li, G. Y., Wang, P. M., & Zhao, X. (2007). Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 377-382.

[10] Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J. G., Wang, C. M., & Duan, W. H. (2014). Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 73, 113-124.

[11] Azhari, F., & Banthia, N. (2012). Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 34(7), 866-873.

[12] Cao, J., & Chung, D. D. L. (2004). Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement. *Cement and*

Concrete Research, 34(3), 481-485.

[13] D'Alessandro A., Ubertini F., Materazzi A. L., 2016. Il calcestruzzo nanocomposito "intelligente" per il monitoraggio delle costruzioni. *Ingenio*, NO 42 p.48.

[14] Polder R., Andrade C., Elsener B., Vennesland Ø., Gulikers J., Weidert R. & Raupach M. (2000). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures*, 33(10), 603-611.

[15] Alonso, M. C., Andrade, C. and Gonzalez, J. A., 'Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcement in carbonated mortar made with several cement types', *Cement and Concrete Research* 8 (1988) 687-698

[16] COST 509, 'Corrosion and protection of metals in contact with concrete', Final report, Eds. R.N. Cox, R. Cigna, O. Vennesland, T. Valente, European Commission, Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR 17608 EN, ISBN 92-828-0252-3, (1997) 148 pp.

CAPITOLO 2

MATERIALI

2.1. Cemento

Il cemento Portland si ottiene attraverso la cottura a circa 1450 °C di pietra calcarea e polvere argillosa, mescolata con le giuste proporzioni.

Ciò che si ottiene dalla cottura è il cosiddetto clinker, che è la componente di maggior rilievo sul cemento Portland all'incirca il 95%.

Il clinker ottenuto dalla cottura si presenta sotto forma di sfere dal diametro di qualche centimetro, che poi vengono sottoposte a macinazione per ottenere il cemento.

A seconda del tipo di macinatura a cui viene sottoposto il clinker otteniamo un cemento più o meno fine che va ad influire sulla reattività del cemento.

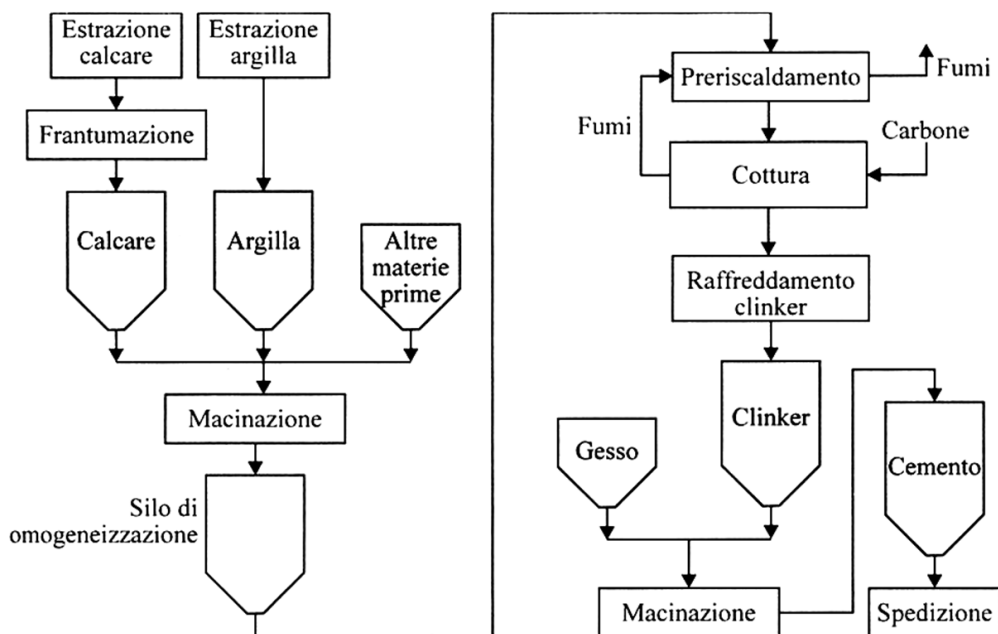


Fig. 3 Processo di produzione del cemento [1]

Poiché il clinker da solo avrebbe dei limiti pratici di impiego nella miscelazione con acqua (presa rapida e difficoltà nel trasporto e nella messa in opera), esso viene co-macinato con un determinato quantitativo di minerali solfatici (gesso o anidrite) nella misura del 4-8% sul

peso di cemento. Il gesso e l'anidrite fungono da regolatori di presa.

La miscela di clinker e gesso viene denominata cemento Portland [2].

I vari tipi di cemento si distinguono per la presenza in percentuali variabili di altri costituenti tutti di natura minerale, che includono: pozzolana naturale, pozzolana artificiale, loppa d'altoforno, cenere volante, fumo di silice e calcare [2].

Nel seguente lavoro di tesi è stato utilizzato un nuovo cemento sviluppato nell'ambito del progetto EnDurCrete, con composizione percentuale e caratteristiche riservate, che non rientrano nella normativa UNI-EN 197-1 (Tab. 2 e Tab. 3) sviluppato da Heidelberg Cement AG con seguente denominazione:

- CEM II/C (S-LL) (EDC-D) cemento Portland di miscela a cui si sostituisce una percentuale di clinker, che sviluppa un forte calore di idratazione e presenta una bassa resistenza agli attacchi chimici con la loppa di altoforno (S) e calcare (LL). La loppa di altoforno ha la caratteristica di indurire anche in assenza di calce e sviluppa minore calore di idratazione rispetto al clinker, mentre il calcare produce cementi di granulometria fine, riducendo anch'esso il calore di idratazione [3].

Tab. 2 Requisiti meccanici e fisici dei cementi (UNI EN 197-1)

Classe	Resistenza a compressione (N/mm ²)			Tempo di inizio presa (min)
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata	
	2 gg	7 gg	28 gg	
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 60
32,5 R	≥ 10	-		
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5 ≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20	-		
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5	≥ 45
52,5 R	≥ 30	-		

Tab. 3 Tipi di cementi previsti dalla normativa UNI EN 197-1 e composizione percentuale di massa.

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

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

2.2. Acqua

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

Le funzioni dell'acqua all'interno dell'impasto sono due:

- inizialmente rende plastica la miscela fresca, rendendola modellabile;
- reagisce con il legante ottenendo la resistenza meccanica prefissata. Infatti il rapporto acqua/cemento (a/c) influisce molto sulla porosità, la resistenza meccanica è indirettamente proporzionale alla porosità ed al rapporto a/c .

Per stabilire la giusta quantità di acqua da mettere, si valutano diverse caratteristiche: la lavorabilità, il tipo di inerte e dimensione, la presenza di additivi riduttori d'acqua e areanti. L'acqua insieme al cemento e all'aggregato è un elemento fondamentale per la produzione di un calcestruzzo o malta.

Senza l'acqua non avviene il processo di idratazione e successivamente quello di indurimento.

La giusta quantità di acqua all'interno dell'impasto deve essere determinata con un corretto e accurato mix-design, un eccessivo rapporto tra a/c penalizza la resistenza meccanica e la durabilità del prodotto finale.

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.

2.3. Aggregato

La pasta cementizia è mescolata con un componente lapideo, detto anche aggregato, che non reagisce con gli altri elementi e, dato il suo ruolo passivo di essere inglobato nella pasta legante (matrice cementizia), prende il nome di inerte.

Il compito fondamentale degli inerti è quello di influire sulla resistenza meccanica del prodotto finale e di poter ridurre il quantitativo del componente collante all'interno della malta (o del calcestruzzo). L'inerte costa molto meno del cemento e risulta quindi più vantaggioso avere un volume maggiore di aggregati. Oltre ad una giustificazione prestazionale ed economica però, vi è anche una caratteristica tecnica; si tratta del ritiro della pasta di cemento, che grazie all'aggiunta dell'inerte, viene diminuito proporzionalmente.

Gli inerti vengono suddivisi, in base alla loro grandezza, in:

- inerti finissimi (filler), con diametro inferiore a 0,063 mm;
- inerti fini (sabbia), con diametro compreso tra 0,063 - 4 mm;
- inerti grossi (ghiaia), con diametro maggiore di 4 mm.

Non tutti gli inerti sono necessariamente idonei alla produzione del calcestruzzo o della malta.

Esistono alcuni requisiti fondamentali (criteri di idoneità o accettazione) in assenza dei quali il calcestruzzo rischia di essere degradato anche se esposto in ambienti non aggressivi.

Questi requisiti prevedono l'assenza (o un limitato contenuto) di sostanze nocive alla durabilità, sono contenuti nella normativa UNI EN 13055, e prevedono l'assenza di sostanze nocive alla durabilità del calcestruzzo o della malta [2].

2.3.1. Sabbia

Nella presente tesi, l'inerte utilizzato per la sperimentazione è la sabbia calcarea Esincalce 0/8 (Fig. 4).



Fig. 4 Sabbia Esincalce 0-8mm.

Per la composizione delle malte la sabbia è stata considerata in condizioni di superficie satura asciutta (s.s.a.), considerando quindi i suoi pori all'interno pieni di acqua e la sua superficie asciutta, che si verifica quando la sabbia assorbe una quantità d'acqua pari al 2% in peso.

Di seguito sono riportati i dati rilevati dall'analisi granulometrica (Tab. 4), relativo grafico (Fig. 5) e densità (Tab. 5).

Tab. 4 Analisi granulometrica sabbia Esincaice 0/8

Apertura setaccio (mm)	Passante (%)
32	100
16	100
8	100
4	87
2	59
1	37
0,5	23
0,25	12
0,125	4
0,063	1

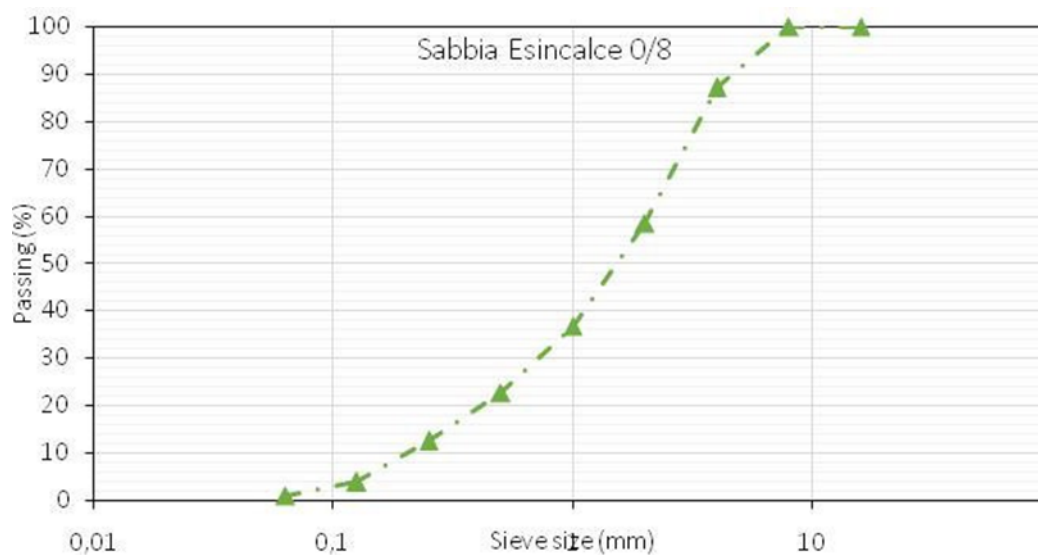


Fig. 5 Curva granulometrica Sabbia Esincaice 0/8.

Tab. 5 Densità Sabbia Esincaice 0/8

	Sabbia Esincaice 0/8
Densità (g/cm ³)	2,65

2.4. Additivi

Gli additivi sono prodotti chimici aggiunti in piccole quantità (circa 0,02%-1%) al calcestruzzo o alla malta, per migliorarne una o più prestazioni.

Esistono diverse tipologie di additivi a seconda della funzione svolta:

- superfluidificanti
- aeranti
- acceleranti o ritardanti
- idrofobizzanti
- modificatori di viscosità
- inibitori di corrosione
- battericidi
- anti-ritiro

Ognuna di queste tipologie utilizza interazioni chimiche-fisiche con la miscela di calcestruzzo o della malta al fine di condizionarne determinate proprietà.

2.4.1. Superfluidificanti

Sono sostanze polimeriche che si disciolgono in acqua ed esercitano un'azione disperdente sui grani di cemento.

La proprietà degli additivi fluidificanti è quella di deflocculare la pasta cementizia.

Normalmente i flocculi si creano nella pasta cementizia, questo avviene per l'attrazione di natura elettrostatica tra i vari granuli di cemento a seguito delle cariche elettrostatiche di segno opposto che si sono formate sulla superficie del granulo per effetto della macinazione. Esistono due grandi famiglie di additivi superfluidificanti, basati sulla repulsione elettrostatica e quelli ad impedimento sterico.

- Repulsione elettrostatica:

Appartengono a questa categoria i superfluidificanti mellamminico e neftalinico.

La parte della catena principale del polimero aderisce al granulo di cemento perché viene attratta; la catena principale del polimero ha dei gruppi solfonici laterali carichi negativamente.

Una volta che tutte le particelle di cemento vengono avvolte da questi additivi avviene una repulsione elettrostatica.

L'additivo da un lato ha la proprietà di aderire alla particella di cemento, dall'altra ha gruppi solfonici laterali di carica negativa.

Avvolgendo tutta la particella del cemento, ogni particella respinge l'altra, disperdendosi e non si formano granuli.

Questo conferisce all'impasto una maggiore fluidità.

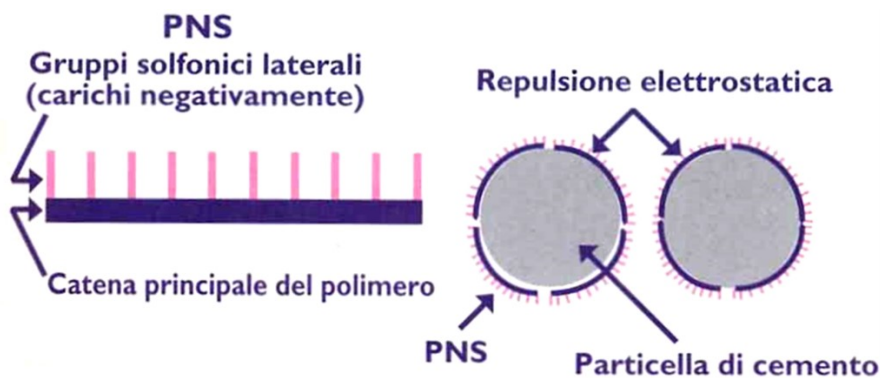


Fig. 6 Deflocculazione per repulsione elettrostatica [2]

- Impedimento sterico:

Appartiene a questa categoria il superfluidificante acrilico.

In questo caso la catena polimerica principale è formata da un lato dai gruppi carbossilici laterali (carichi negativamente); mentre dall'altro lato si hanno delle catene lunghe laterali (neutre); che creano un impedimento sterico.

Le particelle di cemento venendo ricoperte dal superfluidificante hanno sulla superficie queste catene lunghe laterali che ne impediscono l'avvicinamento; perché creano un ingombro volumetrico.

In questo modo aumenta ancora di più il grado di separazione delle particelle di cemento e quindi la fluidità dell'impasto.

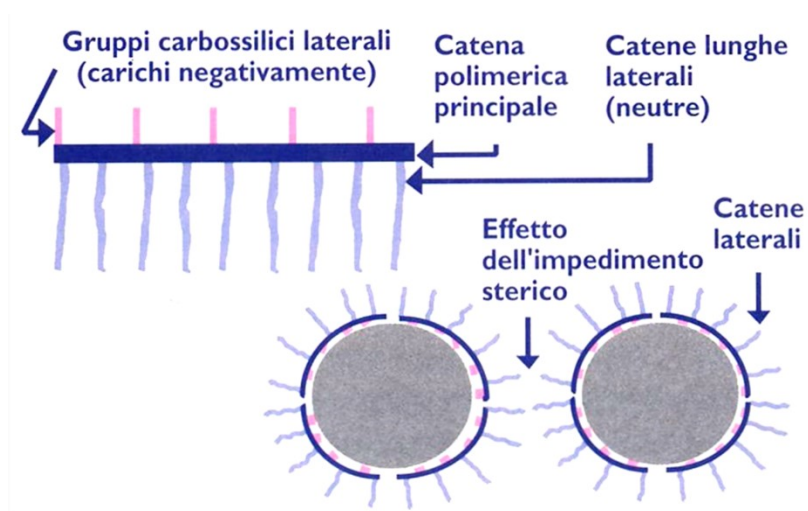


Fig. 7 Deflocculazione per impedimento sterico [2]

L'impiego dei superfluidificanti ha contribuito notevolmente a migliorare le qualità dei calcestruzzi e malte, infatti a seconda della modalità di impiego possono essere utilizzati per:

- Migliorare la lavorabilità (a pari rapporto a/c)
- Aumentare la R_{ck} e la durabilità riducendo il contenuto d'acqua e quindi il rapporto a/c (a pari lavorabilità)
- Ridurre il ritiro igrometrico, il gradiente termico e la deformazione viscosa riducendo sia l'acqua che il cemento (a pari rapporto a/c e lavorabilità)

Nella seguente sperimentazione è stato utilizzato un superfluidificante a base acrilica Dynamon SP1 Mapei, caratterizzato dalla presenza di ramificazione laterali che contribuiscono a fluidificare maggiormente il sistema con un effetto di impedimento sterico.

2.5. Fibre

Le fibre sono diventate un materiale molto noto per la realizzazione del calcestruzzo fibro-rinforzato. Attraverso le fibre è possibile modificare notevolmente alcune proprietà del calcestruzzo, ottenendo un materiale composito (matrice cementizia + rinforzo fibroso) che ha prestazioni maggiori dei calcestruzzi ordinari.

A seconda del tipo e del dosaggio di fibre, il comportamento meccanico del calcestruzzo fibro-rinforzato cambia notevolmente.

L'aggiunta di fibre migliora in maniera significativa il comportamento post-fessurativo e quindi la tenacità del materiale. Viene migliorata anche la resistenza all'urto.

Un'altra funzione che possono avere le fibre all'interno della matrice cementizia è quella di rendere malte e calcestruzzi elettricamente conduttivi così da permettere il monitoraggio del loro stato di "salute" [4].

Le fibre disponibili oggi in commercio sono di differenti tipologie e materiali, e devono essere scelte in funzione della specifica applicazione.

In questa sperimentazione sono state utilizzate fibre di carbonio con lo scopo di rendere la matrice elettricamente conduttiva ed ottenere un materiale self-sensing.

2.5.1. Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio (FC) a struttura reticolare di grafite sono state introdotte verso la fine degli anni '60 per soddisfare le esigenze dell'industria aerospaziale, che richiedeva fibre aventi una resistenza e un modulo di elasticità molto elevati.

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 (Fig. 8).

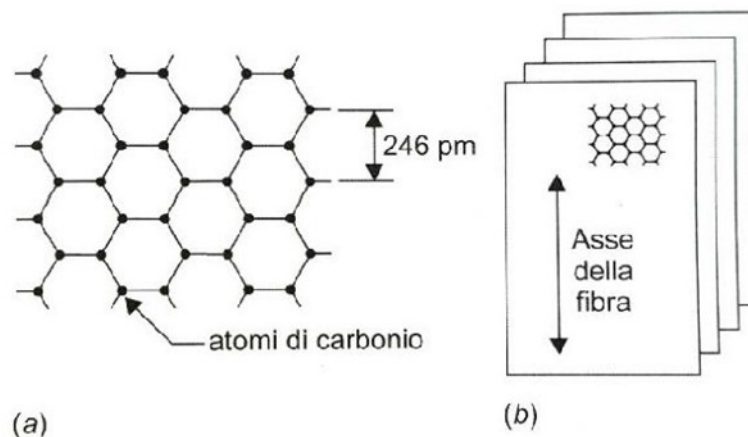


Fig. 8 Struttura grafitea delle fibre di carbonio: (a) reticolo esagonale degli atomi di carbonio nei diversi strati; (b) unità strutturale della fibra (insieme di piani paralleli all'asse della fibra).

Le fibre di carbonio FC che si trovano in commercio vengono ottenute attraverso il processo di pirolisi di fibre polimeriche, che rappresenta il materiale di partenza e viene chiamato precursore. I tipi di precursore sono: rayon (di qualità inferiore e attualmente poco utilizzato), poliacrilonitrile (PAN), catrame/pece (PITCH).

Il processo varia secondo la tipologia commerciale di fibra di carbonio ma in generale è

caratterizzato dai seguenti procedimenti:

- filatura del polimero precursore
- ossidazione da 220 a 300 °C, in cui il filamento del precursore è trasformato in un filamento infusibile, capace di essere riscaldato ulteriormente senza subire ritiro o alterazione di forma;
- carbonizzazione, cioè riscaldamento in atmosfera inerte da 300 a 1500 °C, in questo modo il filamento è liberato da altri prodotti volatili iniziando la formazione di cristalli di grafite;
- grafitizzazione, ovvero il riscaldamento in atmosfera inerte da 2000 fino ai 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.

Le caratteristiche meccaniche delle fibre, quali resistenza e modulo elastico dipendono principalmente dal precursore utilizzato, dal riscaldamento finale, e dall'orientamento dei piani cristallini.

Le fibre di carbonio sono disponibili in forma corta o continua.

Le fibre corte si distinguono in:

- macinate con dimensioni, in media, di 0,3 mm;
- corte di circa 6 mm di lunghezza;
- lunghe di 10-50 mm di lunghezza.

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 (Fig. 9).

Le caratteristiche delle RCF sono riportate nella Tab. 6.

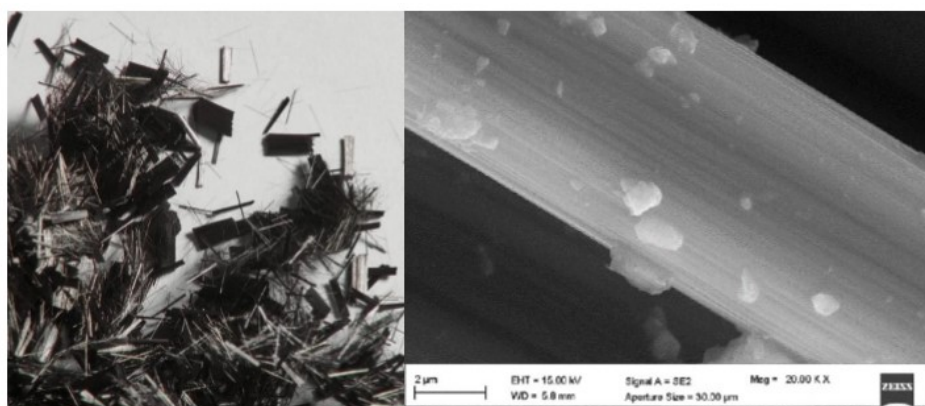


Fig. 9 Fibre di carbonio riciclate (sinistra) e analisi SEM (destra).

Tab. 6 Caratteristiche delle RCF

Resistenza a trazione media (MPa)	Modulo Elastico medio E (MPa)	Densità (g/cm ³)	Allungamento a rottura %	Resistenza spec. (Ohm·cm)
3500	230 000	1,7 < d < 2	1,5	0,0015

2.6. Filler carbonioso

2.6.1. Char di gassificazione

La gassificazione è un processo chimico che permette di trasformare un materiale ricco di carbonio, come la biomassa, in monossido di carbonio, idrogeno e componenti gassosi (Fig. 10). Il char di gassificazione si presenta come un residuo solido poroso, è un materiale amorfo, disordinato, isotropo, con struttura eterogenea che contiene principalmente carbonio elementare (50-80% in peso).

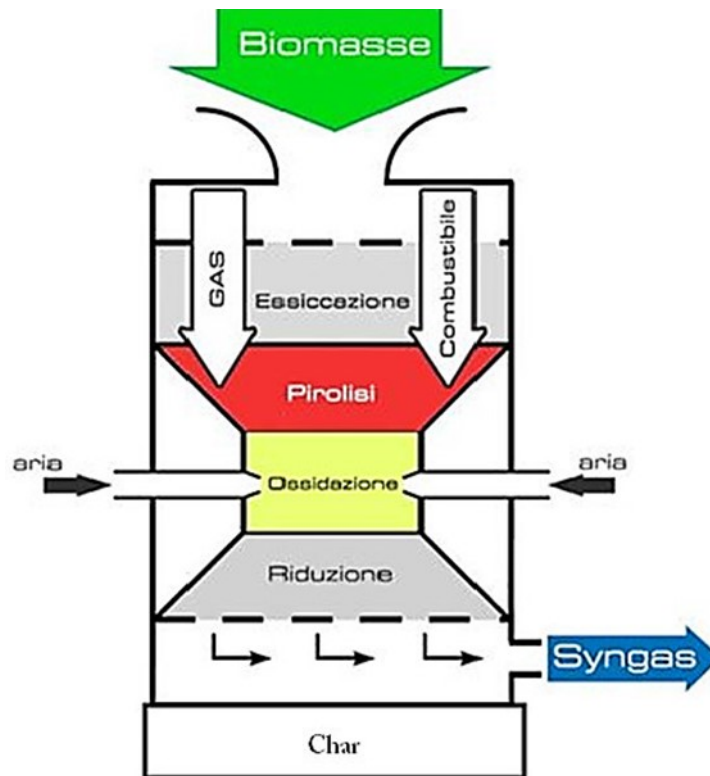


Fig. 10 Schema di funzionamento di un gassificatore [4].

Il processo di degradazione termica si sviluppa in presenza di un agente ossidante, tipicamente ossigeno, ed avviene a una temperatura superiore ai 700-800 °C.

Attraverso il processo di gassificazione si ottiene energia da differenti tipi di materiali organici. Questo processo ha il vantaggio che i gas di sintesi possono essere bruciati direttamente in motori a combustione interna, utilizzato per produrre metanolo o idrogeno, altrimenti può anche essere convertito in combustibile sintetico attraverso il processo di Fischer-Tropsch.

Il char ottenuto dal trattamento delle biomasse è molto poroso, con valori che vanno dal 40 al 50%, le dimensioni dei pori sono dell'ordine dei 20-30 micron. Per questo motivo il char ottenuto dalle biomasse risulta molto più reattivo rispetto un char ottenuto dal carbone minerale [4].

Il char di gassificazione può contenere elevate quantità di policiclici aromatici che non permettono il suo impiego all'interno di composti cementizi in tutti gli stati dell'Unione Europea, pertanto è necessario utilizzare un materiale più pulito con qualità simili al char di gassificazione che possa avere quindi un maggior impiego nei materiali da costruzione.

2.6.2. Biochar

Un'alternativa alla combustione e quindi al rilascio in atmosfera di grandi quantità di CO₂ è il processo di pirolisi, il quale si basa sulla composizione termochimica di materiali organici, attraverso l'applicazione di calore in assenza di agenti ossidanti.

Avviene un processo esotermico, cioè dopo l'apporto di calore iniziale si autosostiene e porta alla formazione di quantità minime di anidride carbonica.

Dalla pirolisi si ottiene un residuo carbonioso solido (*char*), un liquido nero viscoso (*tar*) e una miscela gassosa composta sostanzialmente da CO e H₂ (*syngas*).

Il biochar è un materiale di scarto ottenuto dalla pirolisi lenta delle biomasse. Viene definito processo di pirolisi lenta, la conversione termica della biomassa per riscaldamento lento con temperatura 400 °C - 650 °C ed in assenza di ossigeno (Fig. 11).

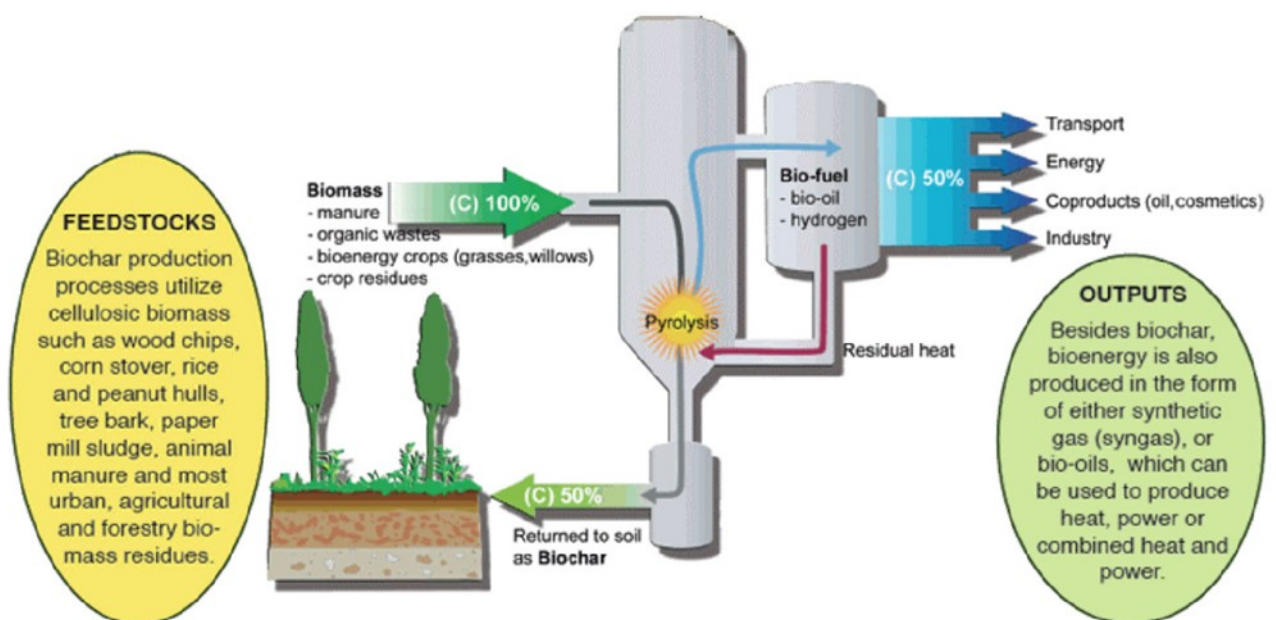


Fig. 11 Processo di pirolisi lenta da cui si ottiene come sottoprodotto il biochar [5].

Per poter utilizzare il biochar come filler, questo è stato macinato attraverso un mulino a biglie (100 g alla volta per 20 minuti) e successivamente setacciato a 74 µm.

La macinazione del biochar è stata necessaria per ottenere una polvere finissima in grado di distribuirsi in maniera uniforme all'interno della matrice cementizia.

Il filler carbonioso utilizzato in questa tesi è quindi il biochar.

Bibliografia

- [1] V. Corinaldesi. Corso di materiali strutturali per l'Ingegneria Civile. A.A. 2018/2019.
- [2] Mario Collepari, Silvia Collepari and Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo. EncoSrl. 2014.
- [3] Zavanella, Lieti, Veggetti. Corso di progettazione, costruzione e impianti. Zanichelli editore S.p.A., Bologna. 2012.
- [4] F. 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". Tesi di Laurea Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica Delle Marche, A.A. 2017/2018.
- [5] <https://www.teasistemisrl.it/impianti-ecologici/cogenerazione-syngas/>.
- [6] Dr. Francesco Primo Vaccari. "Processi produttivi e caratteristiche del biochar". Istituto di Biometeorologia – Consiglio Nazionale delle Ricerche Associazione ICHAR Roma.

CAPITOLO 3

MALTE CON AGGIUNTE CONDUTTIVE

3.1. Introduzione

Lo scopo di questa sperimentazione è stato quello di testare materiali a base cementizia con aggiunta di fibre e fillers elettricamente conduttivi. Queste aggiunte conduttive hanno il fine di aumentare la conducibilità elettrica, e far diventare il materiale self-sensing.

È stato analizzato il comportamento della matrice cementizia dal punto di vista dell'impedenza elettrica (più è bassa e più il materiale è elettricamente conduttivo).

Dalla letteratura si evince che più il materiale è elettricamente conduttivo e più aumenta il rischio di corrosione, lo scopo è stato quello di verificare l'andamento della corrosione di barre di armatura in acciaio immerse nelle matrici studiate.

Le prove di corrosione sono state eseguite nella prima fase in ambiente non aggressivo, quindi sia durante il periodo di stagionatura (primi 28 giorni) che durante i successivi 28 giorni.

Nella seconda parte le prove di corrosione sono state eseguite con cicli settimanali di asciutto e bagnato in una soluzione simulante l'acqua di mare (3,5% NaCl) per valutare lo stato di corrosione delle armature promossa dai cloruri.

Nella sperimentazione le prove di corrosione sono state eseguite su quattro provini di malta, uno di riferimento (REF), uno con sola aggiunta di fibre di carbonio riciclate (RCF), uno con sola aggiunta di biochar (BCH) e uno con fibre di carbonio riciclate e biochar (RCF+BCH).

3.2. Impasti definitivi

3.2.1. Mix Design delle malte

Di seguito nella Tab. 7 sono riportate le composizioni delle malte realizzate per le prove di corrosione.

Tab. 7 Mix design delle malte

Miscela	Cemento [kg/m ³]	Acqua [kg/m ³]	Sabbia Esincalce 0/8 [kg/m ³]	Dynamon SP1 [kg/m ³]	Biochar [kg/m ³]	Fibre [kg/m ³]
REF	510	255	1530	2.79	-	-
RCF	510	255	1529	2.79	-	0.922
BCH	508	254	1523	2.78	10.17	-
RCF+BCH	508	254	1522	2.78	10.16	0.917

La malta è stata realizzata con un cemento CEM II / C-M (S-LL) (EDC-D), una sabbia Esincalce (0-8 mm) in condizioni s.s.a. e un superfluidificante a base acrilica (Dynamon SP1, Mapei). Il biochar, nel getto BCH e RCF+BCH, è stato aggiunto allo 0,5% in volume sul totale del getto, mentre le fibre, nel getto RCF e RCF+BCH, sono state aggiunte a 0,05 % in volume sul totale del getto.

Le malte sono state preparate con rapporto acqua/cemento (a/c) pari a 0.50 e rapporto inerte/cemento (i/c) pari a 3, con classe di lavorabilità plastica.

3.2.2. Preparazione dei casseri

Per ogni tipologia di malta è stato realizzato un campione cilindrico rinforzato (lollipop) di diametro 11,5 cm e di altezza 12,5 cm, come riportato in Fig. 12

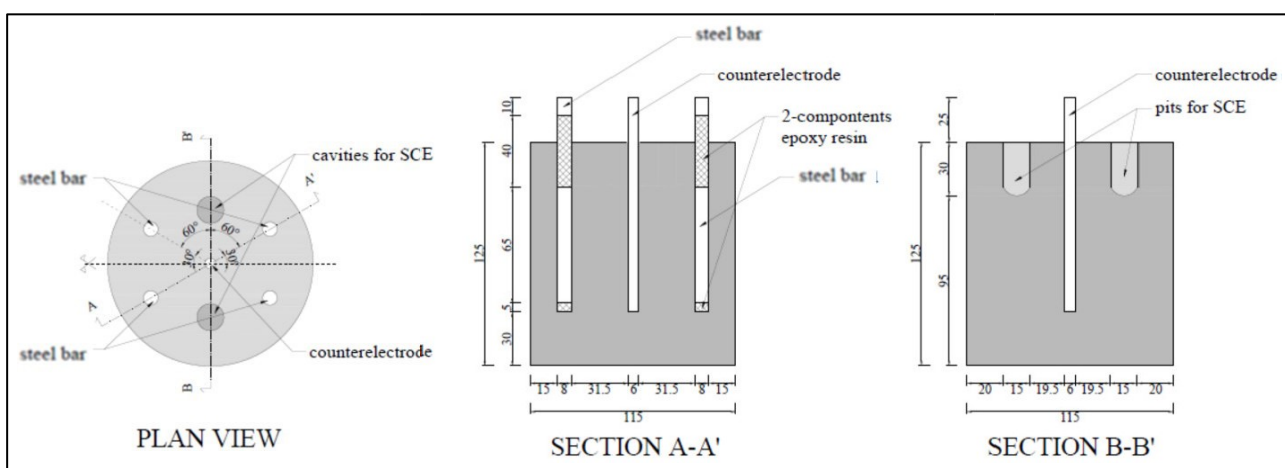


Fig. 12 Dimensioni dei provini cilindrici lollipop

Per realizzare i campioni cilindrici è stata utilizzata come cassaforma per il getto un tubo e due coperchi di materiale PVC. Per realizzare la base del cassero sono stati uniti il coperchio e il tubo in PVC mediante il silicone per ottenere una cassaforma stagna e impedire la fuoriuscita della malta cementizia verso l'esterno durante e dopo il getto (Fig. 13).



Fig. 13 Tubo in PVC sigillato

Il coperchio superiore è stato modificato in modo tale da fungere da supporto e alloggiamento durante il getto per le quattro barre di armature corrugate ($\varnothing = 8$ mm), per la barra in acciaio inossidabile AISI 316 ($\varnothing = 6$ mm) che funge da contro elettrodo per la misurazione della R_p , per due ulteriori elettrodi di riferimento in titanio.



Fig. 14 Elettrodo al calomelano

Sono stati creati due alloggiamenti per l'elettrodo SCE di riferimento (Fig. 14) durante le prove di corrosione.

Nello specifico sono stati praticati nove fori, tutte le barre e gli elettrodi riferimento sono stati fissati al coperchio superiore mediante degli anelli di elastomero, così da impedirne la mobilità (Fig. 15).

Per creare l'alloggiamento per l'elettrodo di riferimento al calomelano saturo (SCE) sono state utilizzate due provette.



Fig. 15 Assemblaggio delle barre di armatura, degli elettrodi di riferimento e dei controelettrodi al coperchio superiore del campione cilindrico.

Le barre di armatura, prima di essere inserite nei fori di alloggiamento, sono state ricoperte con una resina epossidica bicomponente in modo da delimitare su di esse un'area di misurazione di 16 cm² (Fig. 16).



Fig. 16 Barre di armatura ($\varnothing = 8$ mm) resinate.

Sono stati aggiunti due ulteriori fori per l'inserimento di altri elettrodi di riferimento in titanio (Fig. 17) con lo scopo di verificare se la differenza di misurazione con i due elettrodi di riferimento dipenda anche dalla caduta ohmica nella matrice cementizia.

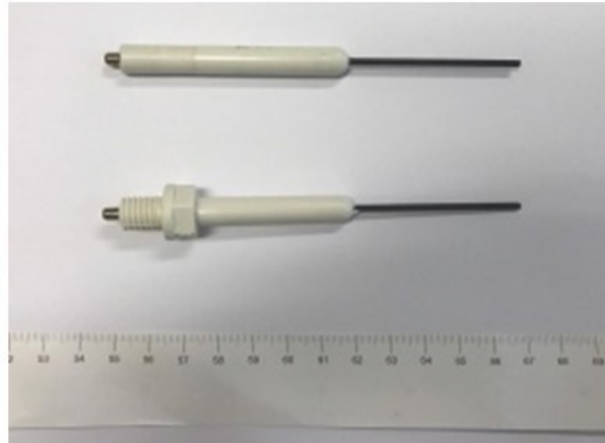


Fig. 17 Elettrodi di riferimento in titanio.

3.2.3. Miscelazione degli ingredienti (Norma UNI)

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

Le attrezzature impiegate sono riportate in Fig. 18.



Fig. 18 Attrezzatura utilizzata per l'esecuzione dei gatti.

Il primo passo della procedura prevede il mescolamento della sabbia Esincafce con le fibre di carbonio e/o il biochar, se previsti, distribuendoli il più uniformemente possibile.

Sono stati poi aggiunti il cemento e l'acqua e si è iniziato a mescolare con l'ausilio di un trapano miscelatore, il procedimento utilizzato è stato seguito come sintetizzato e riportato:

- aggiungere tutta l'acqua e mescolare a bassa velocità per 30 secondi;
- aggiungere la sabbia con le fibre di carbonio e/o il char in fase di miscelazione e dopo 30 secondi procedere ad alta velocità per altri 30 secondi;
- fermare il procedimento per 90 secondi (durante i primi 30 secondi rimuovere dalle pareti e dal fondo la malta);
- continuare a mescolare per altri 60 secondi ad alta velocità.

Gli impasti dopo l'aggiunta di superfluidificante si presentano molto lavorabili (Fig.19).



Fig. 19 Lavorabilità della malta di riferimento dopo l'aggiunta del superfluidificante.

3.2.4. Esecuzione del getto

Il composto ottenuto, dall'aspetto uniforme e lavorabile, è stato versato negli appositi casseri per la campionatura, vibrati poi manualmente in modo da costipare la malta e ridurre il più possibile la presenza di aria al suo interno.

Oltre al campione cilindrico (lollipop) utilizzato per eseguire le prove di corrosione ed in particolare misurare il potenziale di libera corrosione E_{corr} e la resistenza alla polarizzazione R_p delle armature, per ogni getto sono stati realizzati tre provini di dimensioni 4x4x16 cm, per le prove di resistenza meccanica e altri tre provini, anch'essi di 4x4x16 cm, dotati di piolini per le prove di impedenza elettrica.

Le tre casseforme utilizzate nei getti sono riportate in Fig. 20.



Fig. 20 Casseforme utilizzate per il getto delle malte.

Nella Tab. 8 sono riportati il numero e le loro dimensioni dei provini che sono stati realizzati per ogni getto.

Tab. 8 Campioni di malta per prove di corrosione (quantità e dimensioni)

Tipo di cemento	Miscela				Dimensione	Numero totale di campioni
	REF	RCF	BCH	RCF+BCH		
CEM II/C (S-LL) (EDC-D)	6	6	6	6	(0.04 x 0.04 x 0.16) m	24
	1	1	1	1	Diametro 0.115 m, Altezza 0.125 m	4

I casseri prima di accogliere l'impasto sono stato opportunamente trattati con un disarmante in modo tale da semplificare la scasseratura e avere un provino dalla forma geometrica il più regolare possibile.

L'impasto è stato versato negli appositi casseri, la superficie è stata rasata per rimuovere la malta in eccesso ed ottenere provini di dimensioni uniformi (Fig. 21).

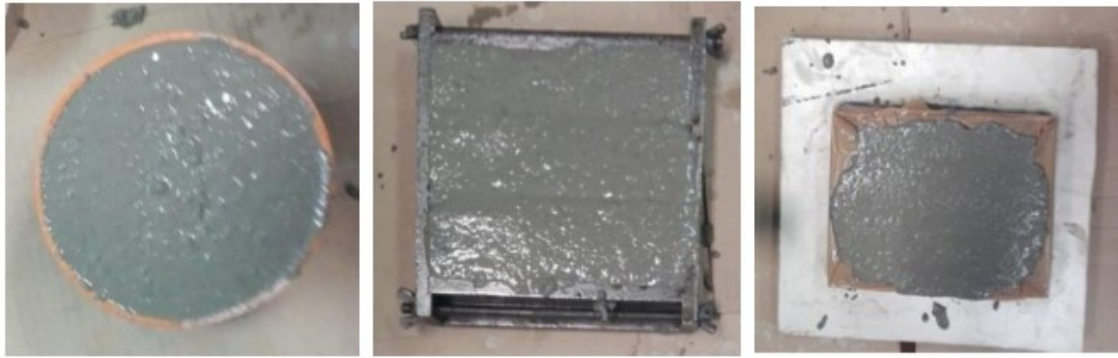


Fig. 21 Rasatura della malta.

Subito dopo aver eseguito la rasatura dei provini, del provino cilindrico viene aggiunto il coperchio superiore (Fig. 22) in cui sono alloggiate e fissate le quattro barre di armatura corrugate ($\varnothing = 8\text{mm}$), per la barra in acciaio inossidabile AISI 316 ($\varnothing = 6\text{mm}$), i due elettrodi di riferimento in titanio e le due provette per creare i due alloggiamenti per l'elettrodo SCE di riferimento.

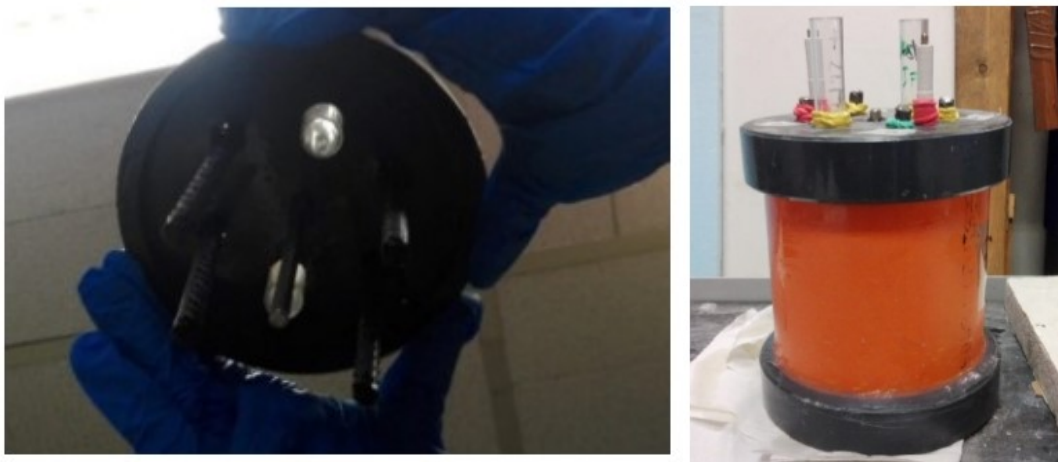


Fig. 22 Inserimento del coperchio superiore del campione cilindrico per le prove di corrosione.

I provini vengono poi rivestiti con la pellicola trasparente in modo tale da permettere all'acqua contenuta nell'impasto di non evaporare e sono stati stagionati a 20°C con UR = 100% per 7 giorni e poi lasciati in condizioni ambientali.

Lo scassero dei provini è stato effettuato dopo sette giorni dal getto (Fig. 23)



Fig. 23 *Provini dopo la scasseratura.*

CAPITOLO 4

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

4.1. Introduzione

Una delle caratteristiche rilevanti che un materiale da costruzione deve possedere è la resistenza meccanica. La resistenza meccanica R è il massimo sforzo σ che un materiale, in forma di una porzione geometrica determinata (provino), è in grado di sopportare prima della rottura. A seconda che lo sforzo applicato sia a compressione σ_c a flessione σ_f si parlerà di resistenza meccanica a compressione R_c o a flessione R_f . [1]

Le proprietà meccaniche possono essere misurate con diverse prove, in questa sperimentazione sono state effettuate le prove a flessione e compressione, su provini prismatici di dimensione 40x40x160 mm realizzati per tutte le miscele testate.

Le prove sono state eseguite a 1,7 e 28 giorni dal getto.

Le prove sono state eseguite in accordo con la UNI EN 1015-11 misurando la resistenza a compressione e la resistenza a flessione su provini di malte.

4.2. Resistenza meccanica a flessione

L'apparecchiatura utilizzata per lo svolgimento di questa prova consiste in una pressa idraulica con carico massimo di 400 kN munita di cella di carico collegata ad un terminale che registra i dati ottenuti (Fig. 24).

Attraverso la cella si è potuto ricavare il valore della forza opposta dal provino all'avanzamento del pistone cilindrico.



Fig. 24 Pressa idraulica per la prova a flessione

La prova di flessione a tre punti consiste nel disporre il provino longitudinalmente su un supporto costituito da due appoggi metallici posti ad una distanza di 100 mm tra loro, al di sopra del provino è applicato un carico di punta centrale di larghezza 50 mm in corrispondenza del baricentro del provino (Fig. 25).

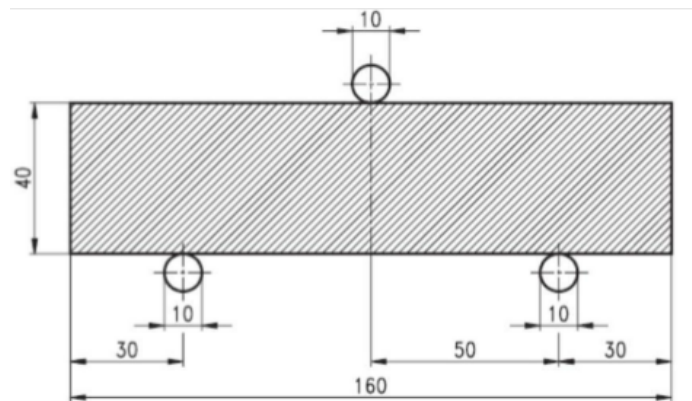


Fig. 25 Schema di vincolo prova a flessione a tre punti

Una volta posizionato correttamente il provino (Fig. 26) ha inizio la prova che consiste in un incremento graduale della forza applicata fino ad arrivare al collasso del provino.



Fig. 26 Posizionamento del provino

L'applicazione della forza genera una sollecitazione di trazione nella parte inferiore del provino e, in contemporanea, una sollecitazione di compressione nella parte superiore. La rottura si manifesta per la formazione di una fessura in mezzeria del provino, che si innesca nella parte inferiore sollecitata a trazione e si propaga con l'avanzare della prova verso la superficie superiore fino a dividere il provino in due parti. (Fig. 27).



Fig. 27 Rottura del provino

Dalla prova meccanica a flessione è stata ottenuta la tensione massima a flessione F del provino e, di conseguenza, è stata ricavata la resistenza a flessione R_f espressa in MPa mediante la relazione:

$$R_f = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

Dove:

- R_f è la resistenza a flessione (MPa);
- F è il carico massimo applicato (N);
- l è la distanza tra i due appoggi in metallo, pari a 100 mm;

- b è la larghezza del provino, pari a 40 mm;
- h è l'altezza del provino, pari a 40 mm.

4.2.1. Risultati della prova a flessione

In Fig. 28 vengono riportati i valori dei risultati ottenuti attraverso la prova a flessione per ogni tipologia di malta.

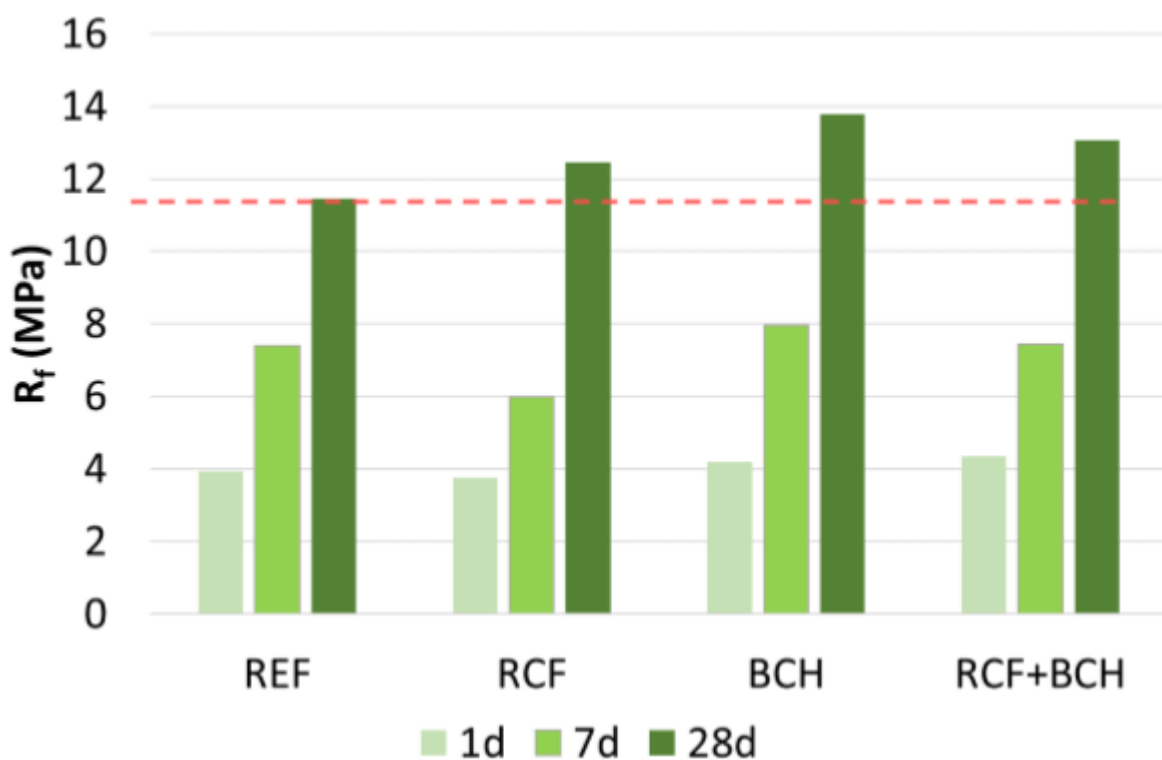


Fig. 28 Resistenza meccanica a flessione

Dai seguenti risultati si può notare che la resistenza meccanica a flessione R_f aumenta all'aumentare del tempo di stagionatura per ogni miscela testata.

Tutti i campioni contenenti aggiunte conduttive presentano una resistenza a flessione maggiore rispetto la miscela di riferimento.

La maggior valore di resistenza a flessione è stato ottenuto dal provino realizzato con l'aggiunta del biochar (BCH).

4.3. Resistenza meccanica a compressione

Per eseguire la prova di resistenza a compressione è stata utilizzata la pressa idraulica precedentemente descritta ma tramite un differente supporto costituito da due piastre e da perni metallici (Fig. 29).



Fig. 29 Provino inserito nella pressa idraulica

La prova viene eseguita esercitando una forza di compressione, perpendicolare al provino, su una superficie di dimensione 40x40 mm.

È possibile quindi risalire alla tensione di rottura conoscendo la forza di rottura e l'area su cui è applicato il carico.

La piastra superiore della superficie di 40x40 mm restituisce uniformemente al provino lo sforzo di compressione impresso dal pistone meccanico.

Il provino al termine della prova assume la caratteristica forma a clessidra (Fig. 30).



Fig. 30 Rottura del provino

Attraverso il terminale collegato alla pressa idraulica sono stati registrati i valori di carico a cui è stato sottoposto il provino.

La resistenza meccanica a compressione R_c , espressa in MPa, è stata determinata grazie alla seguente formula:

$$R_c = \frac{F_n}{A}$$

Dove:

- F_n è la forza massima applicata al provino (N);
- A è l'area della sezione trasversale di carico del provino, pari a 1600 mm².

4.3.1. Risultati della prova a compressione

In Fig. 31 viene riportato il grafico della resistenza a compressione per ogni provino.

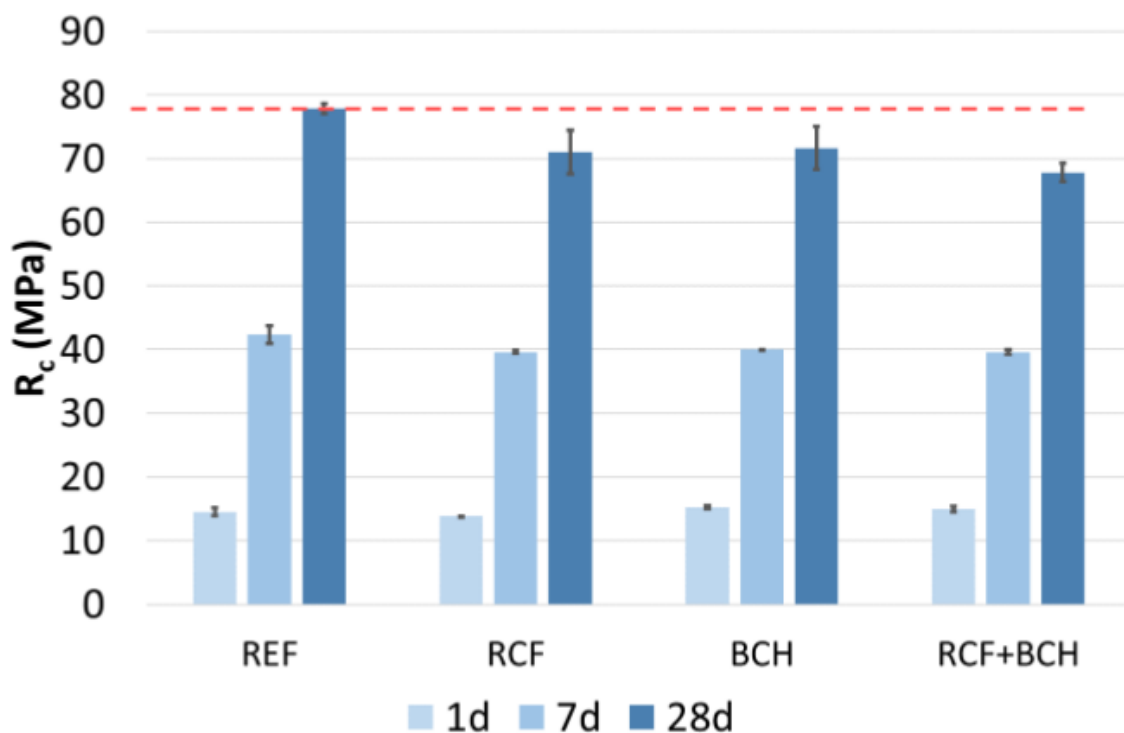


Fig. 31 Resistenza a compressione

Dai seguenti risultati si può notare che la resistenza meccanica a compressione R_c aumenta all'aumentare del tempo di stagionatura per ogni miscela testata.

Tutti i campioni contenenti aggiunte conduttive presentano una resistenza a compressione minore rispetto la miscela di riferimento.

Il minimo valore di resistenza a compressione è stato registrato nel provino realizzato con la combinazione di fibre e filler nella malta RCF+BCH.

In ogni caso, le resistenze meccaniche di tutte le malte testate sono elevate e superano a 28 giorni di stagionatura i 60 MPa.

Bibliografia

[1] Mario Collepari, Silvia Collepari and Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo. EncoSrl. 2014.

CAPITOLO 5

CORROSIONE DELLE ARMATURE METALLICHE

5.1. Introduzione

La durabilità di un'opera viene definita come la capacità dell'opera di svolgere la propria funzione per la sua vita utile di progetto, senza interventi di manutenzione straordinari.

Nel calcestruzzo armato la durabilità è legata alla capacità del calcestruzzo di proteggere le armature metalliche dai processi di corrosione più o meno severi a seconda dell'esposizione ambientale della struttura.

Inoltre, le norme tecniche sulle costruzioni stabiliscono che: “per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato, ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare quei provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e derivante dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo” [1].

Un calcestruzzo, correttamente confezionato e messo in opera, possiede un $\text{pH} > 13$ e in assenza di cloruri le armature sono in una condizione di passività, la velocità di corrosione è praticamente nulla.

Il ferro in assenza di cloruri si ricopre di un sottilissimo film di ossido, il cui spessore è di pochi strati molecolari che proteggono le barre di armatura dal processo corrosivo.

Con l'avanzare del tempo il calcestruzzo può perdere le sue caratteristiche protettive per due possibili motivi:

- Carbonatazione del calcestruzzo, l'alcalinità del calcestruzzo può essere neutralizzata dall'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno, per cui la matrice cementizia da un pH maggiore di 13 scende a un valore inferiore a 9.
- Penetrazione del cloruro, in presenza di sali disgelanti o in ambienti marini gli ioni Cl possono penetrare nella matrice cementizia fino a raggiungere le barre di armatura, arrivando a superare un tenore critico. Raggiunta una certa concentrazione di cloruri il film protettivo si rompe localmente, innescando, un

processo di corrosione localizzato.

Una volta distrutto il film, se sono presenti acqua e ossigeno nella superficie delle armature, avviene il processo corrosivo (Fig. 32).

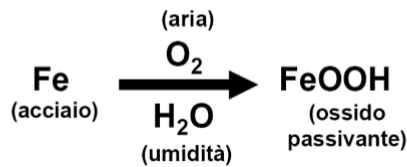


Fig. 32 Processo della corrosione [2]

Durante la vita utile delle strutture in calcestruzzo armato possiamo distinguere due fasi (Fig. 33). La prima fase è quella dell'innescò della corrosione, in cui si realizzano i processi che portano alla distruzione locale o generalizzata del film protettivo.

La seconda fase è quella di propagazione della corrosione.

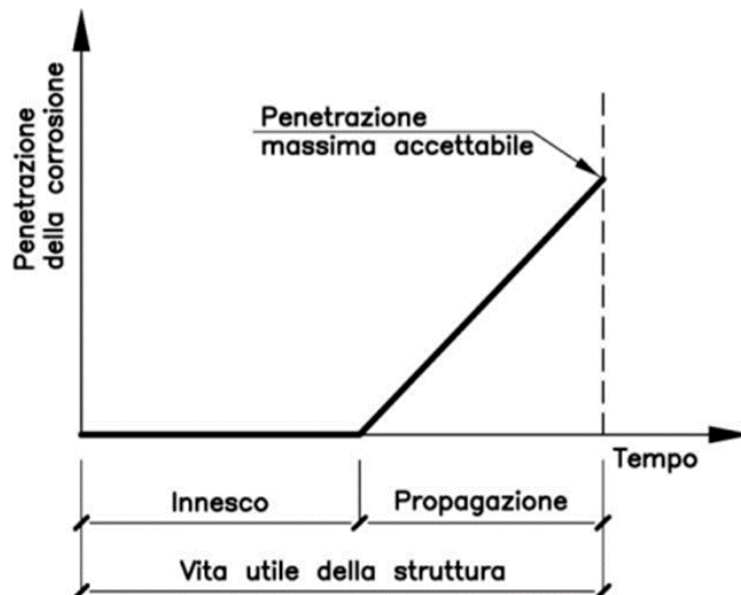


Fig. 33 Modello di Tuutti

L'importanza del pH è stata dimostrata da Pourbaix attraverso l'introduzione del diagramma potenziale/pH.

Il diagramma di Pourbaix rappresenta le possibili condizioni di un sistema elettrochimico in soluzione acquosa, a temperatura e pressione costanti.

Il diagramma viene utilizzato per determinare le zone in cui abbiamo condizioni di immunità

termodinamica del metallo, o invece le condizioni di possibile corrosione, nonché le condizioni di passivazione, ossia di possibile separazione di ossidi, idrossidi, sali basici, con conseguente possibilità di autoprotezione del metallo.

Nell'asse delle ordinate il diagramma di Pourbaix riporta il potenziale elettrico Eh , mentre nell'asse delle ascisse il pH, che è legato alla concentrazione di ioni idrogeno.

Le curve di equilibrio rappresentano dunque i valori dei potenziali elettrici associati alle semi-reazioni di riduzione e ossidazione che possono avere luogo nel sistema elettrochimico in esame, al variare del pH.

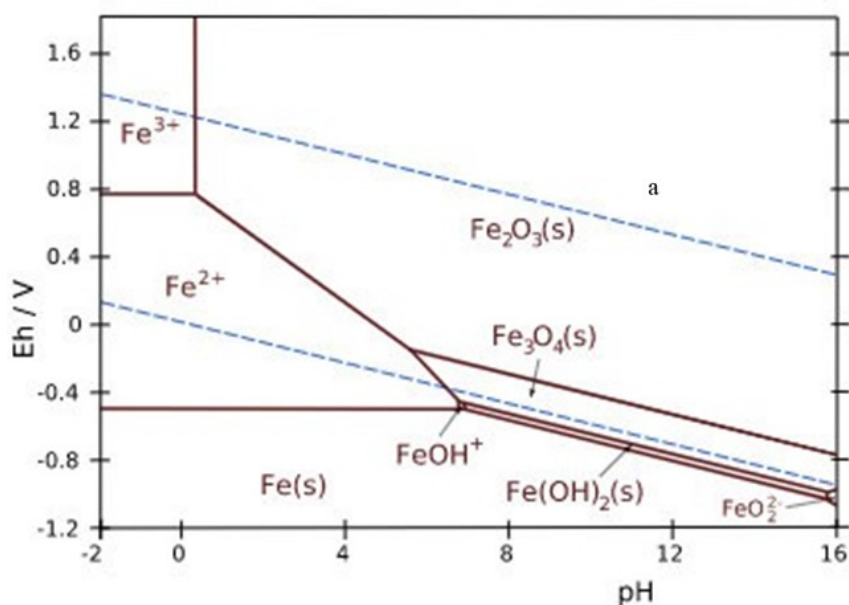


Fig. 34 Diagramma di Pourbaix per il ferro

In Fig. 34 è rappresentato il diagramma di Pourbaix per il ferro. La corrosione è possibile in due regioni a bassi ed alti pH con formazione rispettivamente di Fe^{2+} (o di Fe^{3+} ad alti potenziali) e $HFeO_2^-$. Il ferro è stabile a bassi potenziali (zona di immunità) e può (ma non è detto che in pratica lo sia) essere protetto nelle zone di passivazione dove è possibile che si formino ossidi Fe_3O_4 e Fe_2O_3 rispettivamente a bassi e ad alti potenziali. [3]

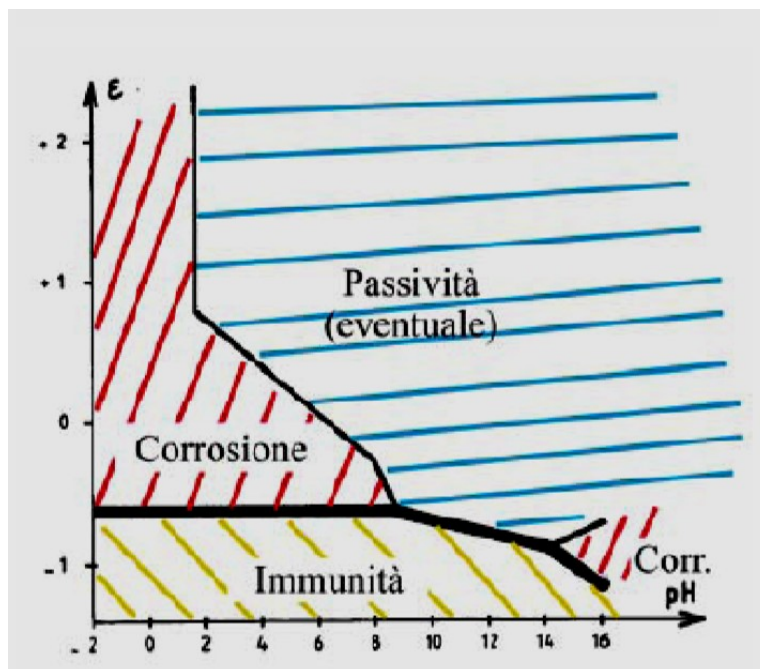


Fig. 35 Zone di corrosione – passività – immunità nel diagramma di Pourbaix [4]

5.2. Processo elettrochimico

La corrosione è un processo elettrochimico e pertanto può essere suddiviso in due semireazioni (un processo anodico e uno catodico) a cui si sommano due trasporti di cariche, elettroni nel metallo e ioni nell'elettrolita a contatto con esso (Fig. 36).

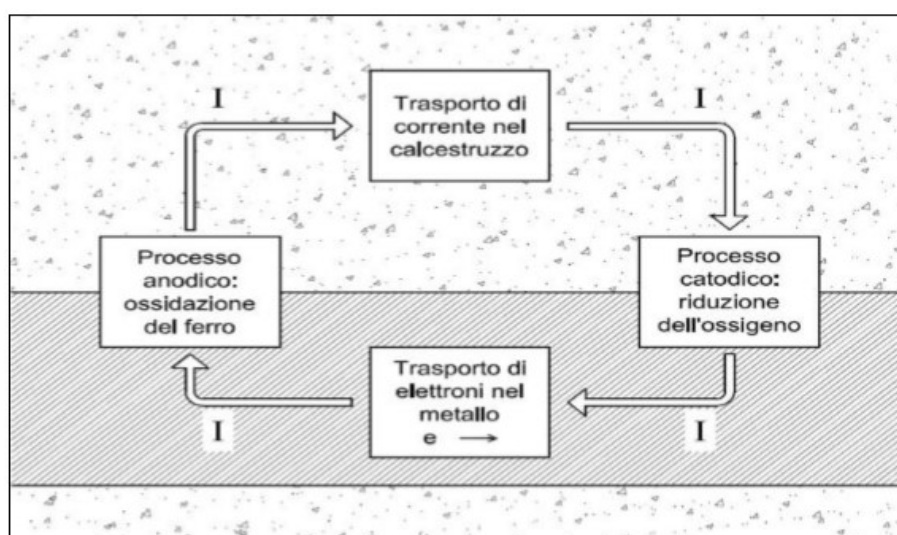


Fig. 36 Schema dei processi parziali della corrosione

Il processo avviene nel seguente modo, sulla superficie il metallo si ossida e va in soluzione sotto forma di ioni, questo processo prende il nome di reazione anodica, quindi la superficie del metallo si comporta da anodo. Gli ioni rilasciati creano un eccesso di elettroni sulla superficie del metallo.

Il processo della corrosione procede se avviene una semi-reazione complementare, definita reazione catodica. Consiste nella reazione degli elettroni in eccesso prodotti dalla semi-reazione anodica con qualche sostanza riducibile presente sulla superficie solitamente l'ossigeno.

I processi sono:

- Processo anodico: abbiamo l'ossidazione del metallo che forma i prodotti della corrosione e libera elettroni nel metallo. Si ha la seguente reazione
$$\text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^{-}$$
- Processo catodico: abbiamo una riduzione dell'ossigeno e produzione dell'alcalinità. Si ha la seguente reazione:
$$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^{-} \longrightarrow 4\text{OH}^{-}$$
- trasporto all'interno della fase metallica degli elettroni dalla zona anodica dove sono prodotti alla regione catodica dove vengono consumati. e quindi, siccome gli elettroni sono cariche di segno negativo, ad una corrente convenzionale in senso opposto
- trasporto di corrente all'interno del calcestruzzo, portata questa volta dagli ioni, dalla regione anodica a quella catodica, per cui il circuito si chiude.

Questi quattro processi si producono con la stessa velocità.

Infatti, il numero di elettroni liberati dalla reazione anodica nell'unità di tempo, cioè la corrente scambiata alla superficie metallica in senso anodico (I_a); quello degli elettroni che nello stesso tempo vengono consumati dalla reazione catodica, cioè la corrente scambiata in senso catodico (I_c); la corrente che passa all'interno del metallo dalla regione anodica dove gli elettroni sono prodotti a quella catodica dove sono consumati (I_m); e infine la corrente (I_{cls}) che, quella che circola all'interno della matrice cementizia, devono essere uguali tra loro.

$$I_a = I_{cls} = I_c = I_m = I_{corr}$$

Il valore comune di queste correnti (I_{cor}) misura, in unità elettrochimiche, la velocità del processo di corrosione.

Il processo di trasporto degli elettroni non è mai un processo lento, ciò che può influenzare la velocità di corrosione è la velocità del processo anodico, del processo catodico e del trasporto di corrente nel calcestruzzo.

5.3. Metodi di analisi della corrosione

Le analisi elettrochimiche consistono nella misura di parametri direttamente legati allo svolgimento del processo corrosivo.

I metodi più utilizzati sono:

- la misura del potenziale di corrosione;
- misure elettrochimiche indirette.

5.3.1. Misura del potenziale di corrosione

La misura del potenziale è un metodo elettrochimico utilizzato per valutare lo stato di corrosione delle armature, attraverso una misura diretta.

Per eseguire questa analisi si utilizza un voltmetro in grado di misurare la differenza di potenziale tra due punti di un circuito [5].

La tecnica prevede la misura del potenziale delle armature attraverso un elettrodo di riferimento ($Cu/CuSO_4$), appoggiato sulla superficie del calcestruzzo ed immerso in un'opportuna soluzione compatibile con l'elettrolita, in modo tale da far sviluppare la reazione elettrochimica.

Il metallo, di cui si vuole misurare il potenziale, viene collegato al polo positivo del voltmetro ad alta impedenza e l'elettrodo di riferimento al polo negativo. Il circuito si chiude attraverso l'elettrolita e la tensione letta dal voltmetro rappresenta il potenziale del metallo misurato rispetto all'elettrodo di riferimento (Fig. 37).

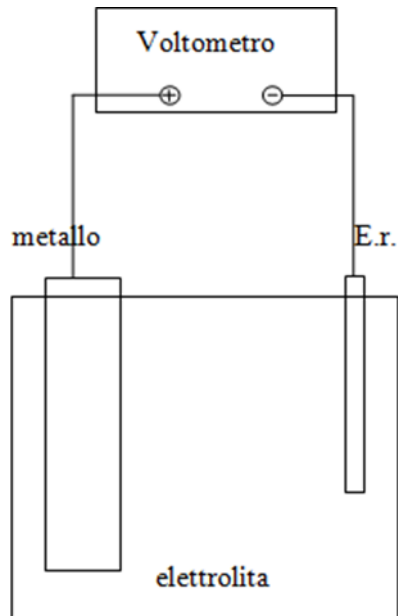


Fig. 37 Schema di collegamento per la misura del potenziale

Si possono utilizzare diversi elettrodi come riferimento, quello utilizzato più comunemente è l'elettrodo al calomelano saturo (SCE) (Fig. 38).

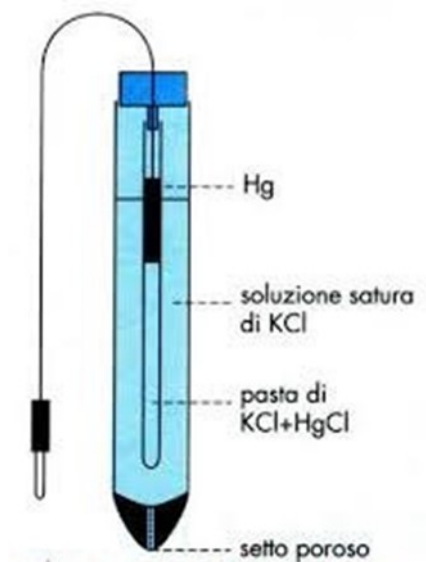


Fig. 38 Elettrodo al calomelano saturo

L'elettrodo è formato da un involucro in cui è presente mercurio in equilibrio con il cloruro di mercurio. L'elettrodo di riferimento SCE viene messo a contatto con la matrice cementizia e immerso in una soluzione di cloruro di potassio (KCl).

L'elettrodo è dotato di un setto poroso che permette il contatto elettrico con il materiale.

Il potenziale dell'elettrodo al calomelano saturo è di +241 mV rispetto all'elettrodo standard ad idrogeno (SHE) [2].

Il potenziale misurato con l'elettrodo di riferimento è il potenziale di corrosione, questa grandezza può consentire di verificare lo stato di corrosione del metallo.

5.3.2. Misure elettrochimiche indirette

La misura del potenziale di corrosione è una grandezza qualitativa non essendoci alcuna relazione diretta tra il potenziale di corrosione e la velocità di corrosione.

Esistono dei metodi elettrochimici che, alterando le condizioni di corrosione del metallo attraverso l'applicazione di correnti esterne, consentono di risalire alla velocità di corrosione. Si utilizza un terzo elettrodo che ha la funzione di erogare corrente durante la prova per polarizzare catodicamente o anodicamente il metallo.

Per l'erogazione della corrente si utilizza un potenziostato che, grazie ad un circuito di retroazione, è in grado di imporre un determinato potenziale al metallo, facendo circolare la corrente necessaria per la polarizzazione (Fig. 39).

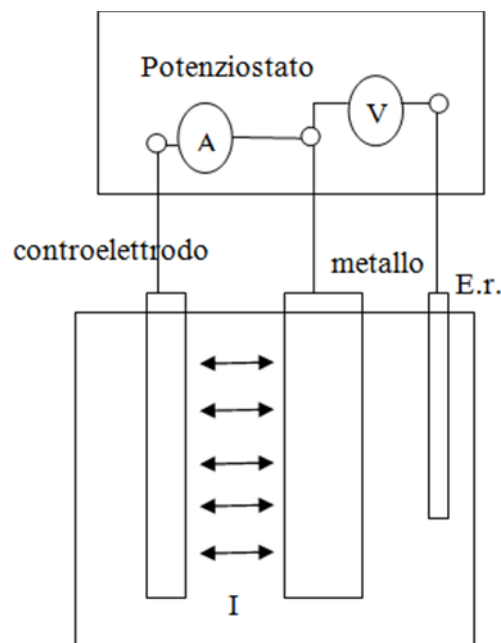


Fig. 39 Schema di collegamento del circuito

5.3.3. Metodo della polarizzazione lineare

La costruzione delle curve di polarizzazione e l'estrapolazione delle rette di Tafel permette la determinazione della velocità di corrosione con buona precisione.

Il metodo non è però pratico, specie quando vi sono più processi anodici e/o catodici concomitanti.

Inoltre, il grande campo di polarizzazione che si deve impostare può alterare le reazioni di corrosione.

Il metodo elettrochimico di determinazione della velocità di corrosione di gran lunga più utilizzato è il metodo di Stern e Geary detto anche della resistenza di polarizzazione.

È una tecnica indiretta che consente di ottenere delle "curve di polarizzazione" (Fig. 40 - Fig. 41) di un metallo da dove si possono ricavare i valori della resistenza di polarizzazione e la velocità di corrosione.

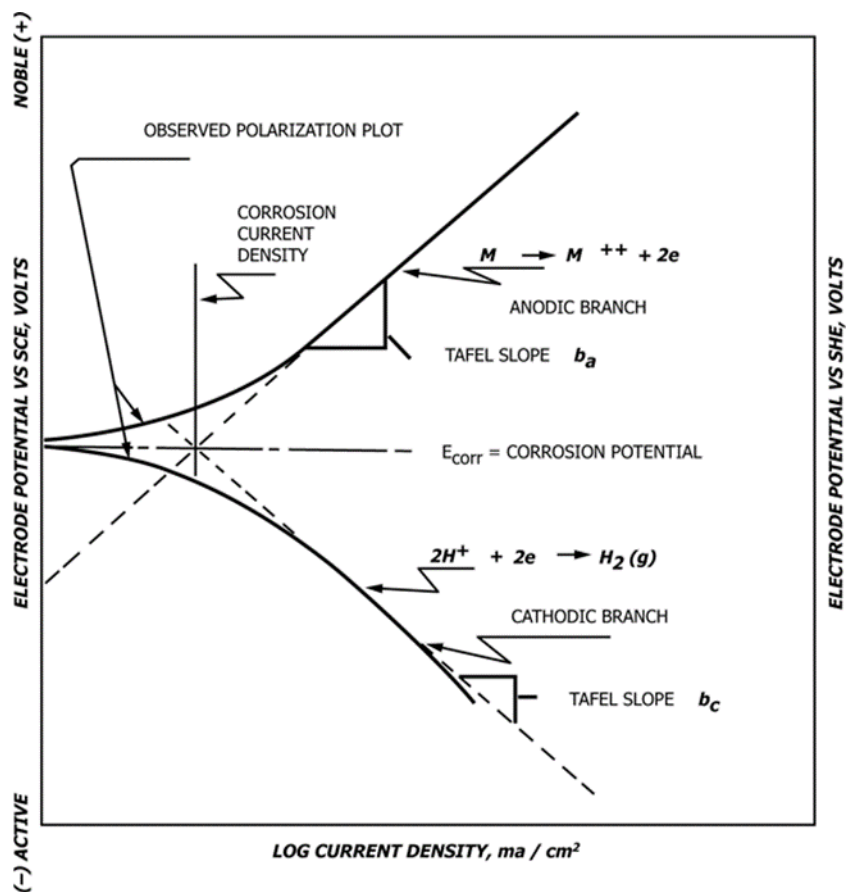


Fig. 40 Curva di polarizzazione in scala logaritmica

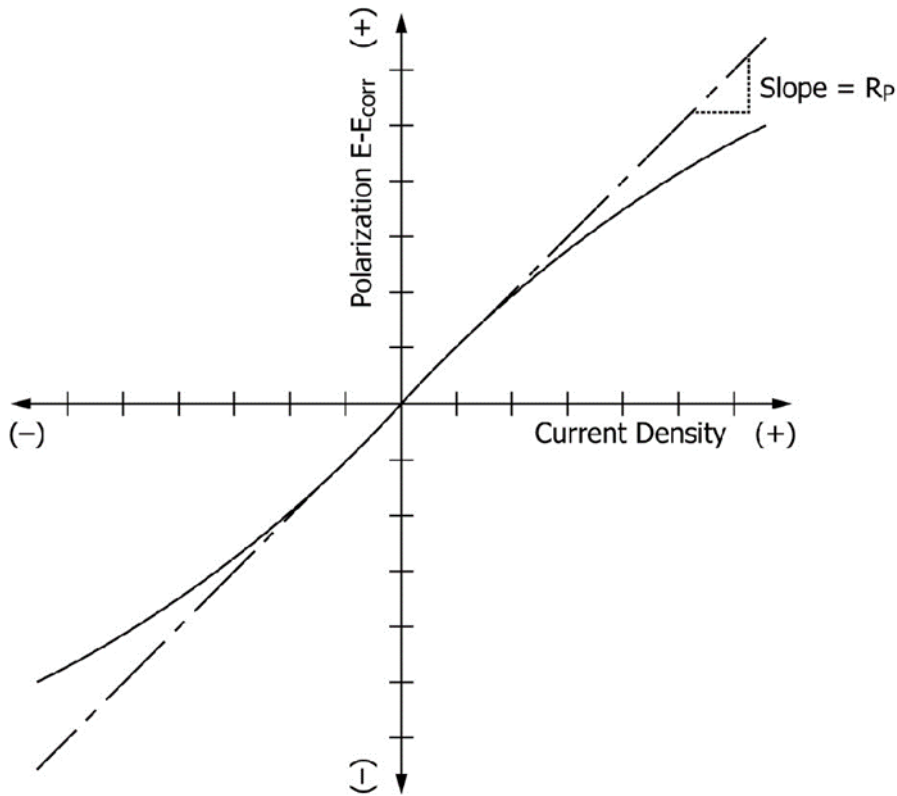


Fig. 41 Curva di polarizzazione lineare

Il metodo di misura è stato elaborato da Stern e Geary e consiste nel sottoporre il metallo ad una lieve polarizzazione, ovvero perturbare mediante una corrente esterna l'interfaccia metallo - elettrolita in modo da ottenere una variazione di potenziale ΔE [5, 6].

Il metodo della polarizzazione lineare ci consente di misurare la velocità di corrosione del metallo in esame senza modificare in modo significativo il suo potenziale.

Si polarizza il metallo in un intervallo molto piccolo ($\pm 10\text{mV}$) e all'intorno del suo potenziale di corrosione libera, dove il legame tra il potenziale (E) e la corrente esterna (i_{esterna}) è pressoché lineare, come si può osservare nella curva di polarizzazione della (fig. 41).

Il metodo messo a punto da Stern e Geary ha dimostrato che la pendenza della retta che lega E e i nell'intorno di E_{corr} rappresenta la resistenza di polarizzazione R_p .

5.4. Proprietà elettriche dei calcestruzzi

La proprietà fondamentale che deve possedere un materiale “self-sensing” è la capacità di condurre energia elettrica.

Queste proprietà vengono ottenute tramite l’aggiunta all’interno della matrice cementizia, di materie prime conduttive, con buone proprietà elettriche.

Attraverso la variazione della risposta elettrica del componente è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore al fine di avere un automonitoraggio.

Il materiale stesso diventa un sensore che permette di controllare la salute dell’intera struttura (Structural Health Monitoring, SHM) [7].

Si va ad esaminare la capacità della malta di opporsi al flusso di corrente elettrica per valutare il grado di automonitoraggio del materiale stesso.

Se realizziamo un’analisi in corrente continua questa valutazione avviene tramite la misurazione della resistenza elettrica del materiale, mentre nel caso di corrente alternata si misura l’impedenza elettrica.

In questo lavoro le misurazioni sono state eseguite in corrente alternata.

L’impedenza elettrica è definita dall’equazione:

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

- Z_{Re} è la parte reale dell’impedenza elettrica in Ω
- Z_{Im} è la parte immaginaria dell’impedenza elettrica in Ω
- i è l’unità immaginaria ($i^2 = -1$)

Eseguendo la misurazione di impedenza elettrica, il materiale da testare viene eccitato e viene misurata la corrispondente differenza/corrente di potenziale elettrico applicata sul campione.

Le prove elettriche possono essere svolte in diversi modi:

- corrente continua o corrente alternata (DC/AC);
- misurazione a 2 o 4 elettrodi: nella misura con 2 elettrodi gli elettrodi utilizzati per la misurazione e per l’eccitazione sono gli stessi, mentre nella misura con 4 elettrodi gli elettrodi hanno funzioni separate, due elettrodi sono utilizzati per

l'eccitazione e gli altri due per la misurazione, in questo modo non ci sono problemi di polarizzazione tra gli elettrodi e l'interfaccia del materiale.

La resistività elettrica (ρ), è l'attitudine di un materiale ad opporre resistenza al passaggio di cariche elettriche. Per la valutazione della resistività elettrica viene utilizzata la seconda legge di Ohm:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad [\Omega]$$

- ρ è la resistività elettrica, in $\Omega \text{ m}$
- L è la lunghezza del conduttore, in m
- A è la sezione del conduttore, in m^2

La resistenza di un elemento conduttore è legata al tipo di materiale e alle sue caratteristiche geometriche, quali lunghezza e sezione.

La resistività elettrica è il parametro comunemente usato in letteratura per caratterizzare diversi aspetti, come la corrosione delle armature [8, 9], la durabilità del calcestruzzo [10, 11]), la resistenza alla penetrazione dei cloruri [12], il rilevamento di fessure [13, 14], la determinazione del tempo di presa [15, 16], il di contenuto di umidità e valutazione della qualità del materiale.

Il valore di resistività elettrica diminuisce se:

- aumenta il contenuto di umidità;
- il contenuto di cloruri aumenta, essendo presenti più ioni che contribuiscono alla conducibilità;
- i pori sono riempiti dalla soluzione interstiziale e interconnessi;
- la temperatura aumenta, poiché aumenta la mobilità degli ioni.

Il valore di resistività elettrica aumenta se:

- la profondità di carbonatazione aumenta, in questo modo si riduce la concentrazione di ioni del fluido interstiziale;
- sono presenti fessure;
- i pori sono piccoli e discontinui.

5.4.1. Metodo di rilevazione

La strumentazione utilizzata per la misurazione dell'impedenza elettrica è il potenziostato/galvanvanostato Reference 600 (Gamry [17]) e la configurazione della misurazione è riportata nella Fig. 42.

Le misurazioni dell'impedenza elettrica sulle malte realizzate nel Progetto EnDurCrete sono state eseguite in corrente alternata con 4 elettrodi (metodo di Wenner [18]).

In particolare [19]:

- l'eccitazione in AC evita la polarizzazione del materiale, poiché i dipoli (ad es. ioni, acqua) non si allineano (non c'è abbastanza tempo per lo sviluppo della polarizzazione). Inoltre, è necessario utilizzare una frequenza maggiore di 1 kHz, altrimenti la misurazione "oscilla" con la frequenza di eccitazione, a causa di una piccola polarizzazione del materiale
- con 4 elettrodi non si verifica alcun errore di inserzione: separare gli elettrodi di misura da quelli di eccitazione aiuta ad evitare la loro carica indiretta (gli elettrodi sono paragonabili ai condensatori) mediante la corrente di eccitazione, che causerebbe la polarizzazione dell'area dell'interfaccia elettrodo-materiale. Di conseguenza, se si eseguisse una misurazione con 2 elettrodi in AC, ci sarebbe comunque la polarizzazione, poiché i punti di misurazione e di eccitazione sono gli stessi. Si può affermare che le misurazioni AC si concentrano sulla microstruttura del materiale, mentre quelle DC sull'interfaccia elettrodo-calcestruzzo/malta
- le misurazioni sono state eseguite in modalità EIS, generalmente in un intervallo di frequenza compreso tra 1 e 100 kHz. Nella fase di post-elaborazione, sono stati considerati valori di singola frequenza (ovvero 1 kHz, 10 kHz, 31,6 kHz, 50,2 kHz e 100 kHz) al fine di estrarre la parte reale dell'impedenza a ciascuna frequenza ed è stata poi selezionata la frequenza a 10 kHz per il confronto dei dati tra i diversi provini poiché le curve alle varie frequenze mostrano andamenti simili.

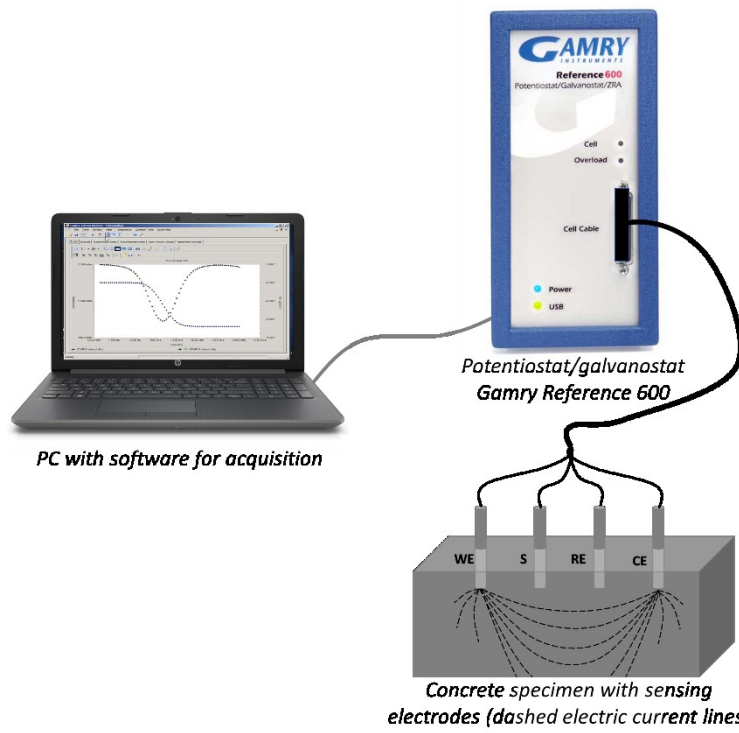


Fig. 42 Strumentazione per la misura di impedenza elettrica

Bibliografia

- [1] NTC 2018 § 11.2.11
- [2] Mario Collepari, Silvia Collepari and Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo. EncoSrl. 2014.
- [3] Corrosione e protezione dei materiali Pietro Pedferri, Anno Accademico 2004-05 - Corso di laurea in 'Ingegneria dei Materiali'
- [4] <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/426772>
- [5] Pietro Pedferri e Luca Bertolini. La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali. Città Studi Edizioni.
- [6] Normativa ASTM G3-14.
- [7] D. D. L. Chung, 'Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing', Festschr. Dedic. Peter Thrower Ed.--Chief 1972 - 2012, vol. 50, no. 9, pp. 3342–3353, Aug. 2012.
- [8] K. R. Gowers and S. G. Millard, 'Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique', Mater. J., vol. 96, no. 5, pp. 536–541, Sep. 1999.
- [9] A. Q. Nguyen, G. Klysz, F. Deby, and J. P. Balayssac, 'Assessment of the electrochemical state of steel reinforcement in water saturated concrete by resistivity measurement', Constr. Build. Mater., vol. 171, pp. 455–466, May 2018.
- [10] P. Azarsa and R. Gupta, 'Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review', Advances in Materials Science and Engineering, 2017.
- [11] S. E. S. Mendes, R. L. N. Oliveira, C. Cremones, E. Pereira, E. Pereira, and R. A. Medeiros-Junior, 'Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model', Constr. Build. Mater., vol. 192, pp. 610–620, Dec. 2018.
- [12] J. Tanesi and A. Ardani, 'Surface Resistivity Test Evaluation as an Indicator of the Chloride Permeability of Concrete', TechBrief, Dec. 2012.
- [13] M. Goueygou, O. Abraham, and J.-F. Lataste, 'A comparative study of two non-destructive testing methods to assess near-surface mechanical damage in concrete structures', NDT E Int., vol. 41, no. 6, pp. 448–456, Sep. 2008.
- [14] N. Wiwattanachang and P. H. Giao, 'Monitoring crack development in fiber concrete beam by using electrical resistivity imaging', J. Appl. Geophys., vol. 75, no. 2, pp. 294–304, Oct. 2011.

- [15] J. Donnini, T. Bellezze, and V. Corinaldesi, 'Mechanical, electrical and self-sensing properties of cementitious mortars containing short carbon fibers', *J. Build. Eng.*, vol. 20, pp. 8–14, Nov. 2018.
- [16] K. Osterminski, R. B. Polder, and P. Schießl, 'Long term behaviour of the resistivity of concrete', *Heron* 57 2012 3, 2012.
- [17] 'Reference 600'. [Online]. Available: <https://www.gamry.com/support/legacy-devices/reference600-legacy/>. [Accessed: 28-Oct-2019].
- [18] F. Wenner, 'A method for measuring Earth resistivity', *J. Wash. Acad. Sci.*, vol. 5, no. 16, pp. 561– 563, 1915.
- [19] T.-C. Hou, 'Wireless and Electromechanical Approaches for Strain Sensing and Crack Detection in Fiber Reinforced Cementitious Materials.', PhD thesis, University of Michigan, 2008.

CAPITOLO 6

PROVE IN CONDIZIONI AMBIENTALI

6.1. Prove elettriche sulle malte

Le prove elettriche delle malte sono state eseguite mediante le misure di impedenza elettrica (metodo a 4 elettrodi) su 8 campioni (4x4x16 cm), 2 per composizione. Le misurazioni sono state eseguite a 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 e 56 giorni dal getto.

Nel grafico in Fig. 43 è riportato l'andamento dell'impedenza elettrica (a 10 kHz di frequenza) per ogni tipologia di malta realizzata.

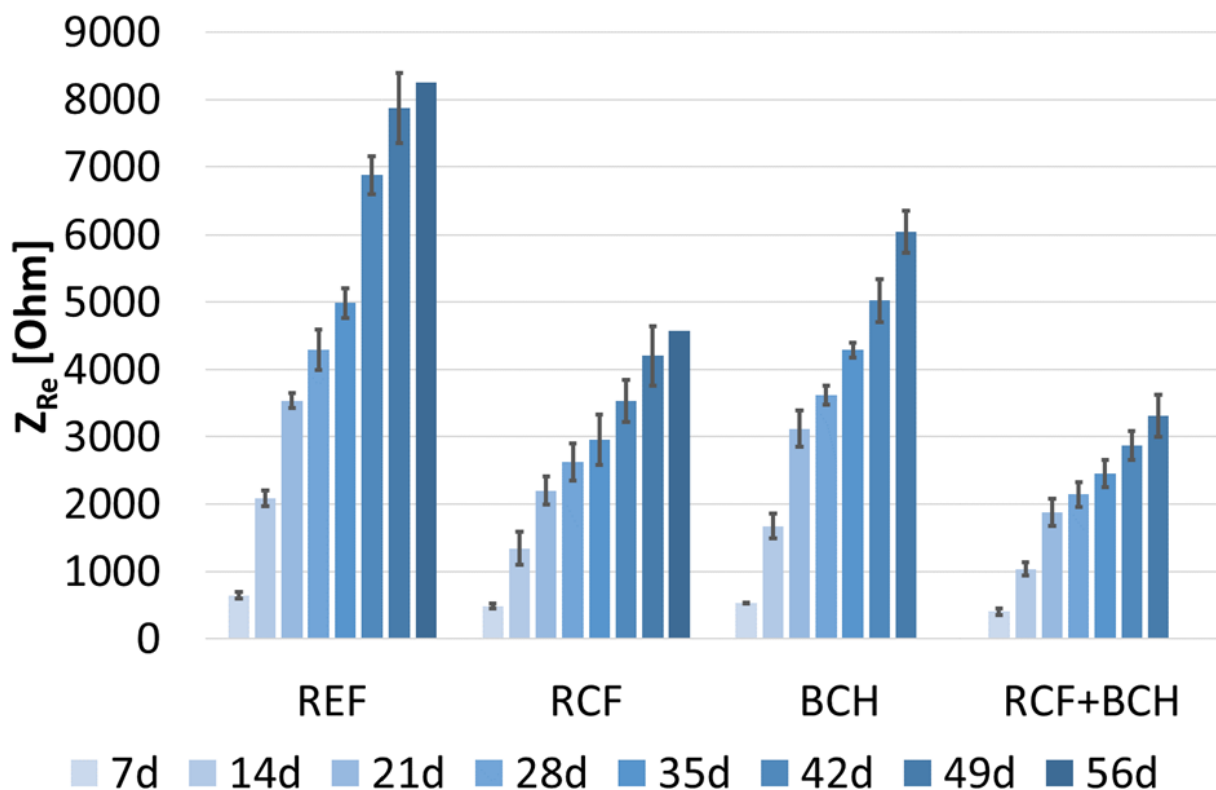


Fig. 43 Impedenza elettrica (a 10 kHz) misurata sui campioni di malta.

Osservando i risultati si nota che l'impedenza aumenta all'aumentare del tempo di stagionatura, questo comportamento è presente in tutte e quattro le diverse miscele.

Questo effetto è dovuto alla progressiva idratazione della malta e alla progressiva evaporazione dell'acqua di impasto dovuta all'esposizione delle malte in condizioni ambientali.

Le tre miscele con aggiunte conduttive presentano un'impedenza inferiore rispetto alla malta di riferimento (senza aggiunte conduttive).

Prendendo in riferimento la malta con aggiunta di fibre di carbonio riciclate (RCF), rispetto alla malta con aggiunta di biochar (BCH), si nota un aumento di conducibilità elettrica maggiore nel provino RCF.

Il materiale migliore dal punto di vista conduttivo risulta essere quello con la combinazione fibre e biochar (RCF+BCH), poiché presenta a tutti i periodi di misura un'impedenza elettrica minore rispetto a tutte le altre malte analizzate.

6.2. Prove di corrosione sulle malte

6.2.1. Metodo di misurazione della corrosione

Lo strumento utilizzato per le prove di corrosione è il potenziostato/galvanostato Autolab PGSTAT 204 [1].

Lo strumento viene collegato al provino da testare mediante tre morsetti di cui uno collegato all'elettrodo di riferimento, uno al controelettrodo e l'altro alla barra in acciaio da analizzare (Fig. 44).

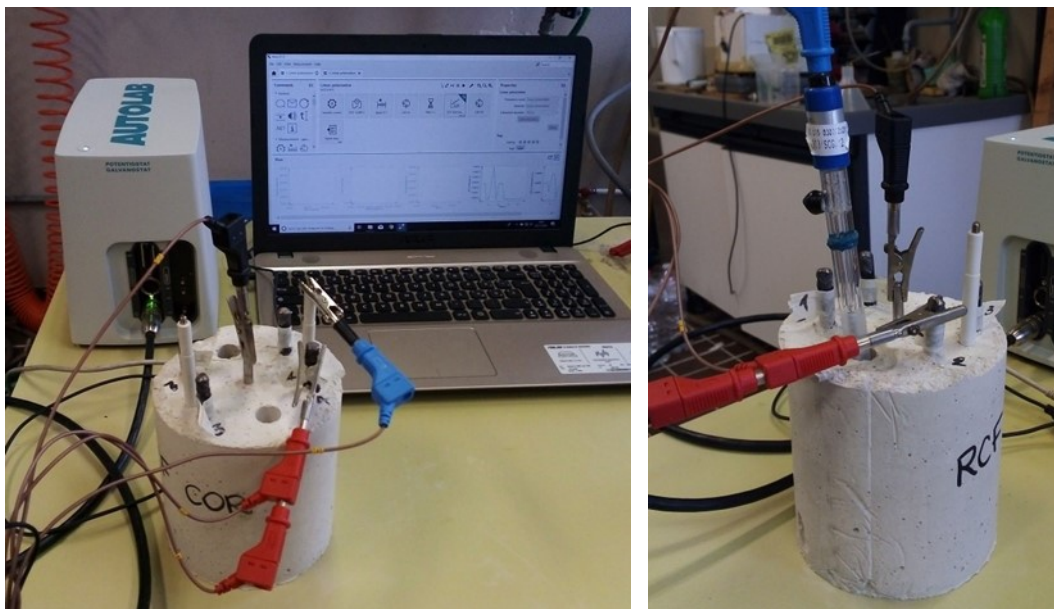


Fig. 44 Strumentazione utilizzata per le prove di corrosione e collegamenti con il provino da testare.

La resistenza alla corrosione delle barre di armatura è stata valutata mediante misurazioni della resistenza di polarizzazione (R_p).

L'andamento della corrosione nelle barre di acciaio è stato valutato mediante misurazioni del potenziale di corrosione libero (E_{corr}), usando come riferimento un elettrodo al calomelano saturo (SCE, +0,241 mV vs SHE). Per garantire il contatto elettrolitico tra l'SCE e la matrice cementizia, i fori presenti nel provino per l'inserimento dell'elettrodo di riferimento, sono stati riempiti con una soluzione satura di $Ca(OH)_2$ (Fig. 45).

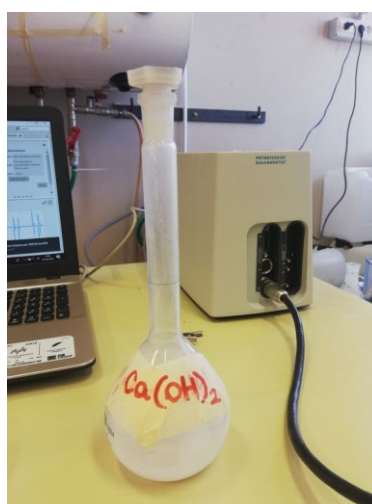


Fig. 45 Soluzione satura di $Ca(OH)_2$

La R_p è stata misurata con il metodo della polarizzazione lineare [2], in cui il potenziale è

stato variato da -10 mV a +10 mV rispetto a E_{corr} (velocità di scansione = 0,167 mV se potenziale di passo 0,244 mV).

Le prove di corrosione sono state eseguite per ogni campione in tutte le 4 barre di armatura presenti.

Le misurazioni sono state eseguite, a determinati intervalli temporali per due mesi, quindi sia durante il periodo di stagionatura (28 giorni dal getto) sia successivamente per un altro mese. I campioni sono stati sottoposti ad un UR = 100% e $T = 20 \pm 1$ °C per i primi 7 giorni, poi sono stati lasciati in condizioni ambientali.

6.2.2. Risultati delle prove di corrosione

Le misure eseguite con il potenziostato/galvanostato Autolab PGSTAT 204, ci forniscono per ogni campione e per ogni periodo temporale, 4 misure relative ai test effettuati per ogni barra di acciaio.

Calcolando la media si ottengono i valori riportati nelle Tab. 8 - Tab. 9 - Tab. 10 - Tab. 11.

Tab. 8 Risultati delle prove di corrosione sul campione REF.

REF							
Tempo (gg)	E _{corr} (mV)	Z(Ω)	R _{aut.} (Ω)	R ₀ (Ω)	R _{p0} (Ω*cm ²)	R _{anod.} (Ω)	R _{panod.} (Ω*cm ²)
1	-281.350	53.000	5174.825	5969.915	95518.640	10279.308	164468.920
2	-456.200	67.500	2552.000	3185.208	50963.320	4690.305	75044.880
6	-438.103	172.500	2447.600	2614.068	41825.080	4587.949	73407.191
10	-262.000	301.750	5581.275	5675.658	90810.520	7893.680	126298.880
14	-192.250	403.750	6478.225	7110.250	113764.000	10994.250	175908.000
18	-156.250	508.500	8401.000	9255.000	148080.000	16942.500	271080.000
22	-147.041	629.250	11373.125	10998.856	175981.689	24808.740	396939.842
29	-144.287	750.000	19611.489	-*	326217.183	42549.151	680786.423
36	-137.276	870.000	18688.000	20754.224	332067.580	56085.117	897361.880
45	-124.817	997.500	24025.175	20771.087	332337.388	85423.071	1366769.144
50	-112.701	1090.000	20595.100	33800.919	540814.707	89782.705	1436523.274
56	-117.996	1302.500	16203.250	32348.830	517581.278	115920.296	1854724.734

* Errore di valutazione

Tab. 9 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF

RCF							
Tempo (gg)	Ecorr (mV)	Z(Ω)	Raut. (Ω)	R _o (Ω)	Rp _o (Ω *cm ²)	Ranod. (Ω)	Rpanod. (Ω *cm ²)
1	-229.500	46.000	4115.500	4289.750	68636.000	8703.750	139260.000
2	-314.500	67.500	4130.500	5375.250	86004.000	7810.750	124972.000
6	-233.750	175.500	4478.750	5150.750	82412.000	8251.250	132020.000
10	-180.000	292.000	7715.750	8539.250	136628.000	14510.750	232172.000
14	-137.500	306.000	10196.000	10766.250	172260.000	26709.250	427348.000
18	-131.750	348.000	12971.750	18623.750	297980.000	40789.500	652632.000
22	-116.005	431.250	13689.800	20321.399	325142.384	53494.299	855908.784
29	-119.926	504.750	8787.225	19863.509	317816.147	72669.505	1162712.088
36	-105.743	580.000	13075.148	-*	341158.572	90755.642	1452090.274
45	-89.676	712.500	4908.275	19494.563	311913.007	108730.707	1739691.305
50	-75.842	752.500	5670.350	18808.358	300933.728	117727.904	1883646.468
56	-55.651	860.000	5279.250	22582.889	361326.232	125742.868	2011885.881

* Errore di valutazione

Tab. 10 Risultati delle prove di corrosione sul campione BCH

BCH							
Tempo(gg)	Ecorr(mV)	Z(Ω)	Raut. (Ω)	R _o (Ω)	Rp _o (Ω *cm ²)	Ranod. (Ω)	Rpanod. (Ω *cm ²)
1	-205.000	45.250	6109.750	7394.000	118304.000	10859.750	173756.000
2	-202.250	62.500	6584.500	8221.500	131544.000	11642.000	186272.000
6	-174.500	159.250	8445.750	9553.750	152860.000	17505.500	280088.000
9	-157.500	235.250	11448.750	13493.750	215900.000	28754.250	460068.000
13	-116.000	336.750	18858.500	21350.750	341612.000	47419.250	758708.000
17	-104.500	431.250	23527.000	26877.750	430044.000	74145.500	1186328.000
21	-79.857	547.250	20821.125	31014.802	496236.838	92115.801	1473852.824
28	-93.430	653.750	11495.600	57521.668	920346.695	114696.674	1835146.778
35	-81.795	766.250	9970.750	32093.137	513490.198	127471.732	2039547.706
44	-72.304	970.000	7660.250	29173.186	466770.981	153579.312	2457268.985
49	-61.592	1015.000	6720.425	27729.123	443665.966	160405.277	2566484.427
56	-50.945	1147.500	7167.250	31534.714	504555.429	180337.429	2885398.866

Tab. 11 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF+BCH.

RCF+BCH							
Tempo(gg)	Ecorr(mV)	Z(Ω)	Raut. (Ω)	R _o (Ω)	Rp _o (Ω *cm ²)	Ranod. (Ω)	Rpanod.(Ω *cm ²)
1	-209.500	48.000	5244.750	6558.500	104936.000	9833.500	157336.000
2	-225.000	67.000	6137.000	7401.000	118416.000	11414.000	182624.000
6	-197.000	163.250	7348.000	7893.500	126296.000	12694.750	203116.000
9	-163.250	258.750	9585.500	11149.000	178384.000	19512.000	312192.000
13	-128.500	367.250	15833.750	18697.000	299152.000	38719.000	619504.000
17	-110.029	319.250	19083.000	27771.500	444344.000	65963.878	1055422.055
21	-90.752	411.500	18587.275	27632.367	442117.873	81526.974	1304431.577
28	-96.581	472.500	-*	31512.245	504195.916	114732.590	1835721.443
35	-83.954	545.000	8481.475	26948.332	431173.318	126680.185	2026882.963
44	-76.736	682.500	6960.250	30884.390	494150.248	169182.081	2706913.289
49	-64.178	700.000	5469.600	19880.225	318083.592	171415.425	2742646.802
56	-38.760	812.500	6085.000	29335.048	469360.772	196548.779	3144780.469

* Errore di valutazione

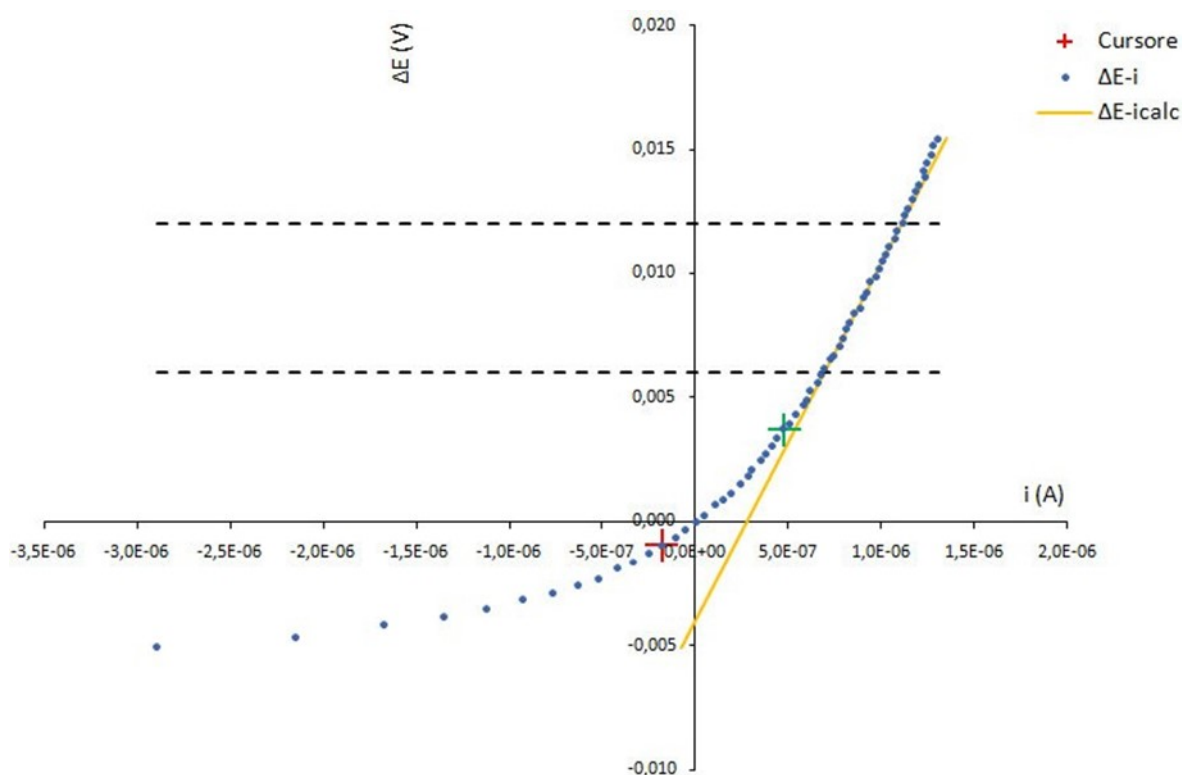


Fig. 46 Curva di polarizzazione ottenuta dal foglio di calcolo Excel.

Si precisa che la determinazione della resistenza attraverso la curva di polarizzazione lineare espressa nella normativa ASTM G3-14 è descritta in linea generale e viene eseguita analizzando sia il ramo anodico che catodico.

Per la determinazione della resistenza di polarizzazione nelle barre di armatura immerse in una matrice cementizia si fa riferimento solamente al ramo anodico.

La resistenza (R) è stata calcolata, quindi, considerando il valore della pendenza in un tratto lineare della curva nel ramo anodico lontano dall'intorno di zero:

$$R[\Omega] = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

La resistenza di polarizzazione è ottenuta moltiplicando la resistenza R per la superficie della barra esposta a corrosione che nella presente sperimentazione è 16 cm²:

$$Rp [\Delta \cdot cm^2] = R \cdot A_b$$

Nei grafici riportati di seguito in Fig. 47 - Fig. 48 sono illustrati gli andamenti dei potenziali di corrosione e delle resistenze di polarizzazione per ogni campione di malta realizzato.

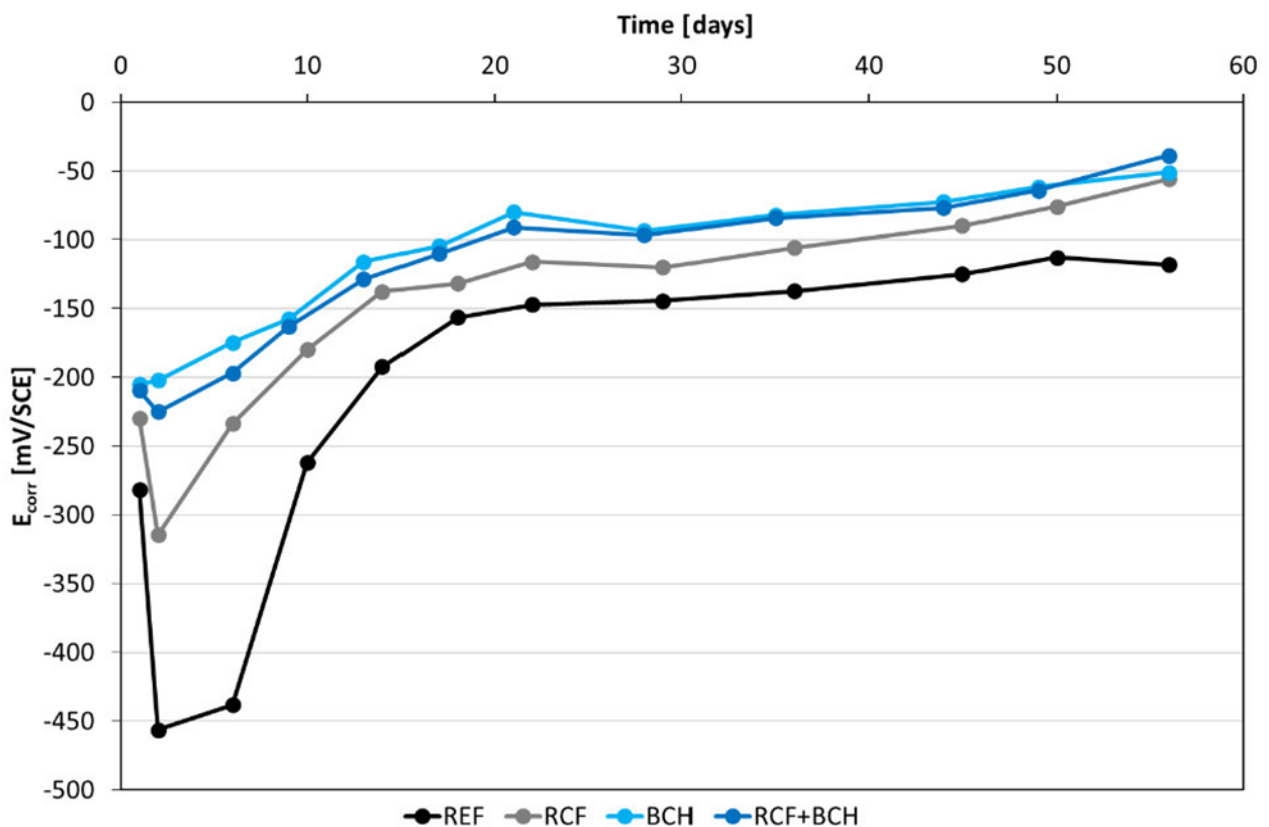


Fig. 47 Andamento del potenziale di corrosione (E_{corr}) delle armature di acciaio incorporate nella malta.

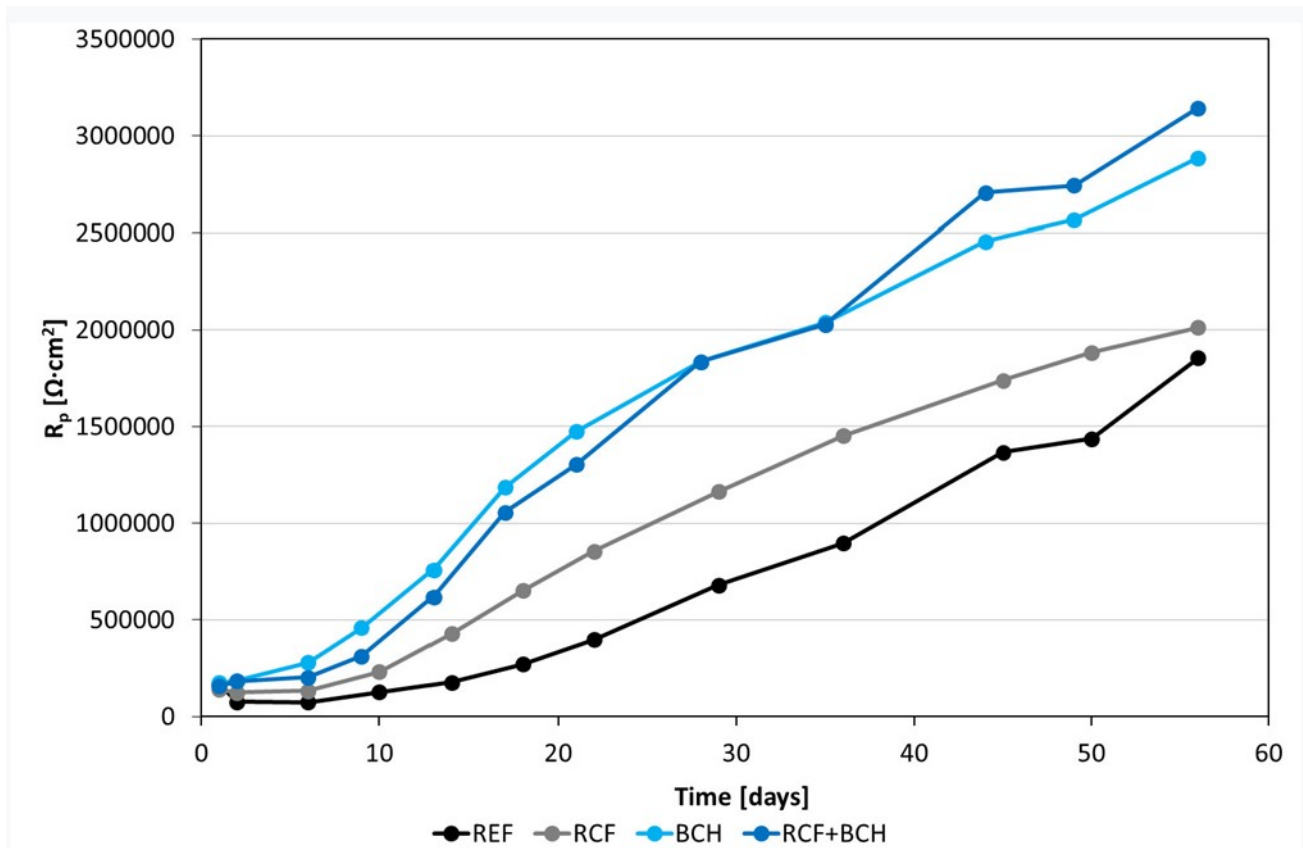


Fig. 48 Andamento della resistenza di polarizzazione (R_p) delle armature di acciaio incorporate nella malta.

6.3. Discussione dei risultati

Osservando i risultati ottenuti dalle prove di corrosione si nota che i valori del potenziale di corrosione delle armature all'interno del campione REF mostrano una diminuzione dopo i primi due giorni dal getto, da -280 mV/SCE a -450 mV/SCE.

La stessa tendenza è stata rilevata anche nelle armature dei RCF e BCH + RCF, in cui E_{corr} va da -230 a -315 mV / SCE e da -210 a -225 mV / SCE, rispettivamente.

Solo le armature all'interno della malta BCH mostrano un andamento crescente dopo i primi giorni.

Nella prima settimana sono stati registrati valori di E_{corr} molto bassi nel campione REF.

Ad un valore di E_{corr} molto basso è correlato un alto rischio di corrosione, tuttavia dopo 10 giorni dal getto, il potenziale di corrosione inizia ad aumentare, raggiungendo un valore di -120 mV/SCE a 56 giorni.

Diversamente accade per le armature all'interno delle matrici cementizie con aggiunte

conduttive, in cui i valori di E_{corr} aumentano fino a -50 mV/SCE dopo 56 giorni.

Dai dati ricavati durante le prove si deduce che la probabilità di corrosione rimane sempre bassa per le armature inserite nelle matrici cementizie con aggiunte conduttive (RCF, BCH, RCF+BCH), mentre la probabilità di corrosione risulta elevata soprattutto nei primi 10 giorni di stagionatura per le armature immerse nel provino di riferimento REF che non contiene aggiunte conduttive, dove si registra $E_{\text{corr}} < -275 \text{ mV / SCE}$ (secondo ASTM C876 [3] quando E_{corr} risulta inferiore a questo valore il rischio di corrosione è elevato).

La tendenza della resistenza alla polarizzazione ricalca abbastanza bene l'andamento del potenziale di corrosione, infatti si ottengono valori più bassi di R_p nelle armature all'interno del provino REF.

Le barre di acciaio inserite nella malta RCF sembrano più protette dalla corrosione e i valori di R_p più alti sono calcolati per le armature in RCF + BCH e in BCH. Dopo 56 giorni dal getto, le armature del campione RCF + BCH mostrano la più alta resistenza di polarizzazione.

Analizzando i risultati si nota come le aggiunte conduttive forniscono valori più elevati di E_{corr} e R_p rispetto la matrice di riferimento.

Le aggiunte conduttive hanno un effetto positivo di protezione contro la corrosione delle armature anche se aumentano la conducibilità elettrica della matrice.

Bibliografia

- [1] 'Autolab PGSTAT204'. [Online]. Available: <https://www.metrohm-autolab.com/Products/Echem/CompactNonModular/PGSTAT204.html>. [Accessed: 12-Nov-2019].
- [2] S. Mundra, M. Criado, S. Bernal, and J. Provis, 'Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes', *Cem. Concr. Res.*, vol. 100, pp. 385–397, 2017.
- [3] Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

CAPITOLO 7

PROVE DI CORROSIONE IN PRESENZA DI CLORURI

7.1. Resinatura dei provini

L'operazione preliminare eseguita prima di iniziare le prove di corrosione in presenza di cloruri è stata quella di resinare le due basi di ogni provino (Fig. 49).

Si è utilizzato una resina epossidica bicomponente in modo tale da avere una penetrazione dei cloruri unidirezionale, in direzione perpendicolare alle barre di armatura.

L'ingresso della soluzione contenente cloruri è consentito solamente dalla superficie laterale del provino.

Le quattro barre di armatura corrugate presenti all'interno di ogni provino sono state posizionate in modo tale da garantire un copriferro dello spessore di 1,5 cm.



Fig. 49 Provino dopo l'applicazione della resina

7.2. Azione dei cloruri nel processo corrosivo

La passivazione è un fenomeno di natura elettrochimica che può rallentare o impedire completamente la reazione di corrosione dei materiali metallici che altrimenti questi ultimi subirebbero.

Il fenomeno consiste sostanzialmente nella formazione di un sottile film (costituito da prodotti della corrosione, sostanze presenti nell'ambiente aggressivo o ossigeno adsorbito sulla superficie del metallo) che aderisce perfettamente alla parte della superficie del pezzo a contatto con l'ambiente aggressivo (ad esempio acqua o aria). Perché il fenomeno della passivazione possa avvenire, il film deve ostacolare la diffusione dell'agente ossidante (generalmente ossigeno), per cui deve essere "compatto", ovvero denso e poco poroso.

La depassivazione delle armature metalliche può avvenire per la presenza dello ione cloruro sulla superficie delle armature, a seguito della esposizione ai cloruri presenti nei sali disgelanti applicati d'inverno sulle pavimentazioni stradali o nelle acque marine.

Per far avvenire il processo di corrosione oltre alla depassivazione delle armature per effetto dei cloruri è necessario che il processo sia alimentato da acqua e aria (Fig. 50).

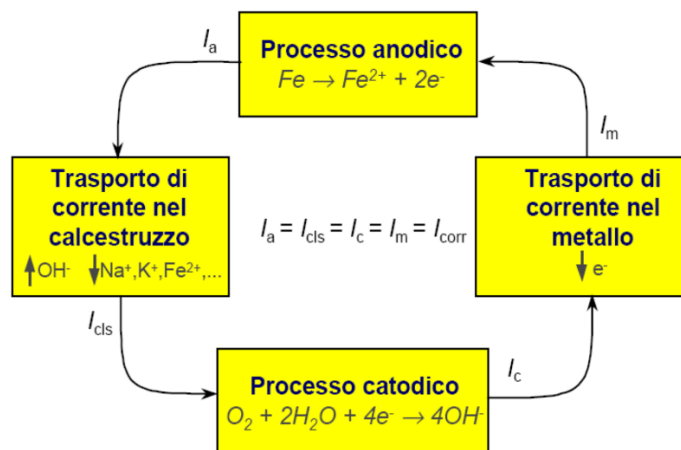


Fig. 50 Processo elettrochimico di corrosione [1]

Il processo di corrosione in una struttura in calcestruzzo armato completamente immersa in acqua marina, è trascurabile per via della bassa concentrazione di ossigeno, fondamentale per alimentare il processo e la velocità della corrosione.

Assolutamente diverso è il caso delle strutture immerse in ambienti ricchi di cloruri e soggette a cicli di bagnato-asciutto, in cui la corrosione procede velocemente a causa della presenza di acqua e ossigeno (Fig. 51).



Fig. 51 Corrosione dei ferri promossa dalla presenza del cloruro in acqua di mare [2]

La penetrazione dei cloruri attraverso il copriferro può avvenire per:

- **Suzione capillare:**

L'acqua funge da veicolo per i cloruri in essa disciolti. La pressione capillare che spinge l'acqua dipende dal raggio dei capillari vuoti.

- **Diffusione (gradiente di concentrazione):**

La diffusione dei cloruri attraverso il calcestruzzo avviene secondo l'equazione della seconda legge di Fick in direzione ortogonale alla superficie del calcestruzzo. Se c'è una concentrazione a contatto con il calcestruzzo C_s , la determinazione del calcestruzzo penetrato può essere determinato attraverso le seguenti curve (Fig. 52).

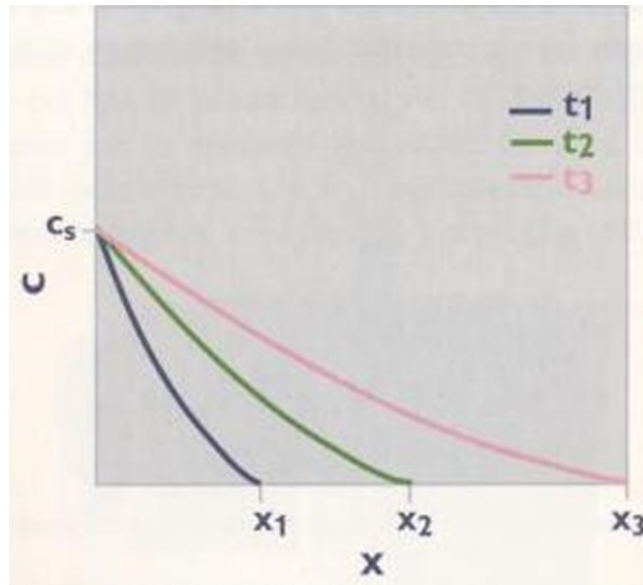


Fig. 52 Concentrazione di cloruro in funzione dello spessore di calcestruzzo [2]

Per calcolare lo spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro vale la seguente relazione:

$$x = k\sqrt{t} = 4\sqrt{Dt}$$

dove:

x = spessore di calcestruzzo penetrato per diffusione dai cloruri [mm]

D = coefficiente di diffusione dei cloruri [mm²/anno]

t = tempo [anni]

Il tempo necessario all'insacco della corrosione dipende da vari fattori quali le caratteristiche della matrice cementizia, dallo spessore del copriferro, e dal contenuto dei cloruri.

Tale tempo di insacco cresce in funzione dell'alcalinità, che tende a contrastare l'effetto dei cloruri, similmente a quanto avviene nei processi di corrosione per carbonatazione.

La corrosione delle armature inizia quando nel calcestruzzo, o come in questa sperimentazione nella malta, a contatto con le armature si raggiunge una concentrazione di cloruri tale da danneggiare il film protettivo delle barre.

L'entità di questa concentrazione dipende dal tipo di ossido passivante e dal potenziale delle stesse barre di armatura, a sua volta funzione dell'ossigeno presente sulla loro superficie.

All'insacco del fenomeno corrosivo, si formano dei processi di depassivazione dell'acciaio, in modo localizzato, sulla sua superficie (pitting) (Fig. 53).

Si formano quindi zone attive e passive che fungono da anodi e catodi, rispettivamente nelle zone in cui il film protettivo è distrutto e nelle zone circostanti.

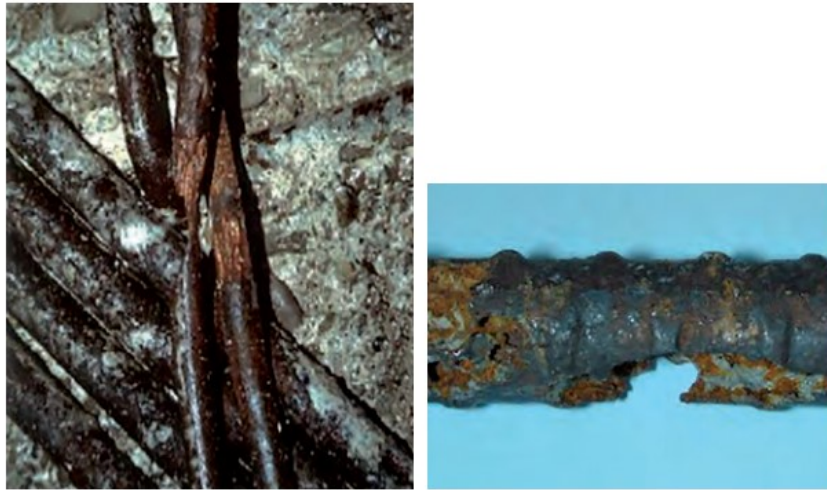


Fig. 53 Corrosione localizzata (pitting) per effetto dei cloruri [3]

L'azione dell'anidride carbonica distrugge completamente il film protettivo delle barre provocando una corrosione diffusa, mentre i cloruri rompono puntualmente l'equilibrio, cioè lo strato protettivo di ossido, provocando una corrosione localizzata.

La depassivazione delle armature metalliche in forma localizzata è una situazione peggiore, perché non c'è una vasta area che fa da catodo, ma una piccola area che si corrode in profondità.

L'innesco di questa coppia galvanica contribuisce ad aumentare ulteriormente l'aggressività del calcestruzzo nella zona anodica, che viene arricchita da ulteriori cloruri trasportati dalla corrente, abbassandone l'alcalinità. Viceversa, il film protettivo presente nelle zone circostanti viene rafforzato.

Una volta avvenuto l'innesco, dunque, il procedere dell'attacco corrosivo viene stabilizzato e accelerato, fino a raggiungere velocità di penetrazione molto elevate.

7.3. Metodo di rilevazione

Per andare a studiare la corrosione promossa dai cloruri, i provini di malta sono stati sottoposti a cicli settimanali di bagnato-asciutto.

Le prove di corrosione sono state eseguite sui quattro provini (lollipop), contenenti le barre

di armatura in acciaio.

È stata preparata una soluzione acquosa contenente il 3,5% di NaCl, e si è provveduto a tenere i provini per 2 giorni in bagnato (Fig. 54) e i restanti 5 giorni in asciutto (Fig. 55).

Per garantire che la concentrazione di cloruri non variasse nel tempo, si è prestata attenzione a mantenere sempre il livello della soluzione costante nel tempo, ed effettuando aggiunte di soluzione ogni qual volta fosse necessario.

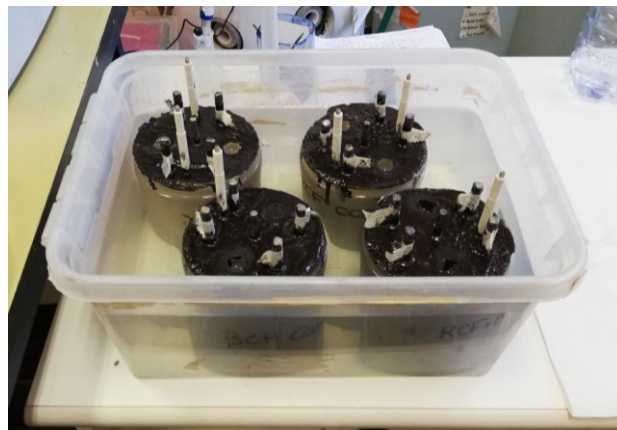


Fig. 54 *Provini in bagnato*



Fig. 55 *Provini in asciutto*

Sono state eseguite le misurazioni del potenziale di corrosione (E_{corr}) e della resistenza di polarizzazione (R_p) due volte per ogni ciclo.

La prima misurazione eseguita durante il ciclo è in asciutto appena prima di immergere i

campioni dentro la soluzione, la seconda misurazione avviene trascorsi due giorni dall'immersione dei provini nella soluzione, una volta terminata la misurazione i provini vengono messi in asciutto per 5 giorni.

I provini sono stati sottoposti a 6 cicli di bagnato-asciutto.

La stessa metodologia è stata eseguita anche per i provini di dimensione 4x4x16 cm in cui sono state eseguite le misure di impedenza elettrica (metodo a 4 elettrodi) su 8 campioni, 2 per ogni composizione di malta (Fig. 56).



Fig. 56 *Provini utilizzati per l'impedenza elettrica immersi in soluzione 3,5% NaCl*

7.4. Prove elettriche sulle malte

Le prove elettriche per determinare l'impedenza elettrica nel ciclo bagnato-asciutto sono state eseguite due volte per ogni provino, una misura in bagnato e una misura in asciutto, per un totale di 5 cicli. I provini analizzati sono 8, 2 per ogni composizione di miscela, con dimensioni di 4x4x16 cm.

Nei grafici in Fig. 57 e 58 è riportato l'andamento dell'impedenza elettrica (a 10 kHz di frequenza) per ogni tipologia di malta realizzata.

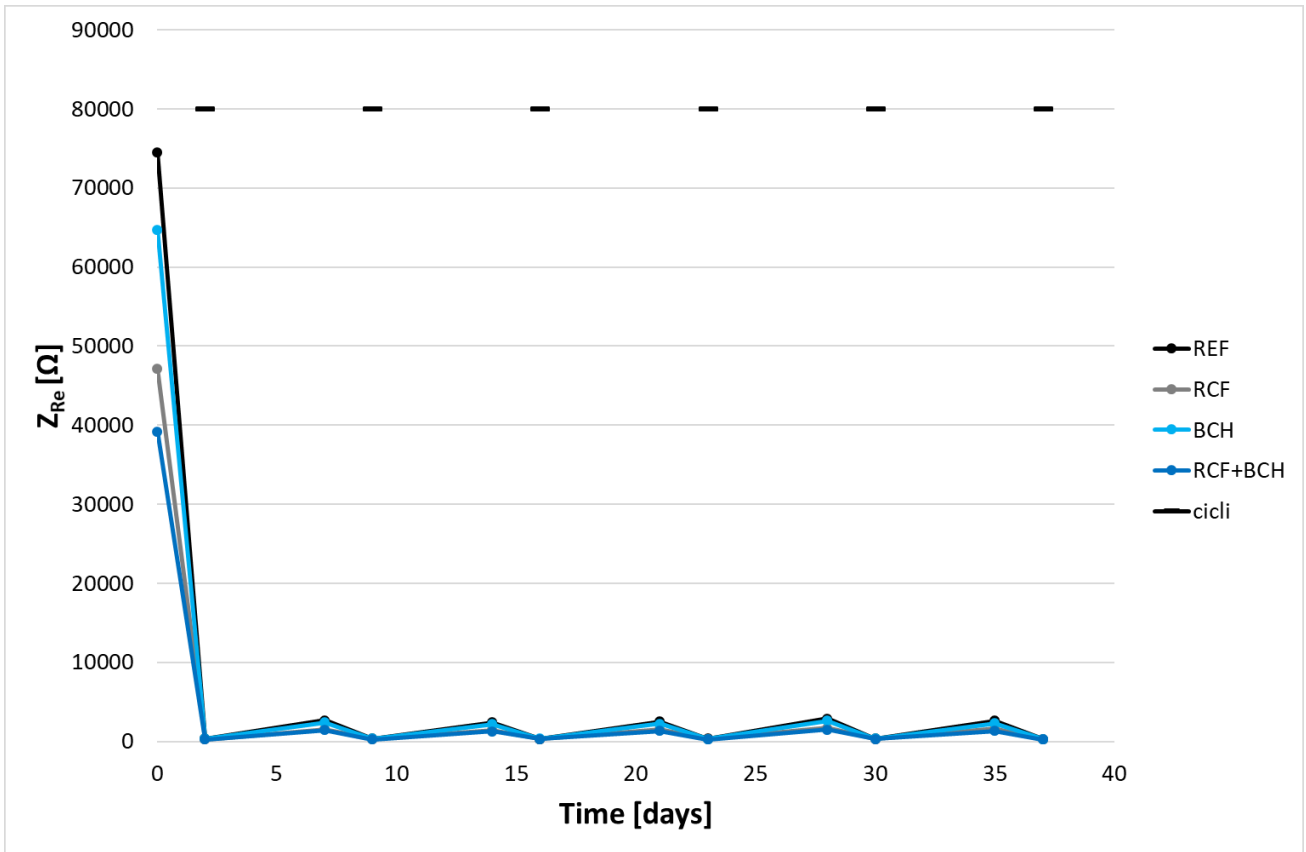


Fig. 57 impedenza elettrica (a 10 kHz) misurata sui campioni di malta per prove di corrosione

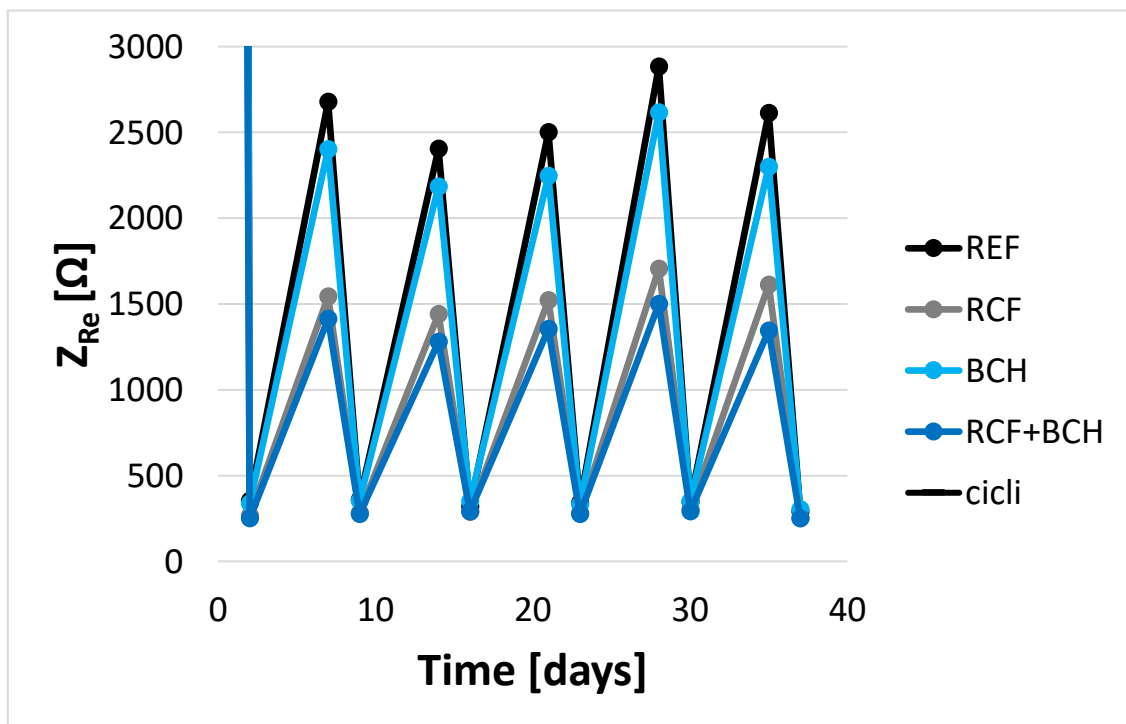


Fig. 58 impedenza elettrica (a 10 kHz) misurata sui campioni di malta per prove di corrosione (ingrandimento)

Osservando i grafici si nota che la prima misura di impedenza elettrica effettuata sui 4 diversi provini a tempo t_0 ci restituisce valori molto differenti, rispetto a tutti gli altri.

Questo perché è la prima misura effettuata in asciutto subito prima di immergere i provini nella soluzione contenente NaCl ed iniziare la serie di cicli.

Prima di cominciare i cicli bagnato-asciutto si nota il seguente comportamento:

il valore massimo di impedenza elettrica è mostrato dal materiale di riferimento (senza aggiunte conduttive).

Le tre malte con aggiunte conduttive presentano un'impedenza inferiore rispetto alla malta di riferimento (senza aggiunte conduttive).

La malta con aggiunte conduttive di fibre di carbonio RCF, rispetto alla malta con aggiunta di biochar BCH, mostra una conducibilità elettrica maggiore.

Il materiale migliore dal punto di vista conduttivo risulta essere quello con la combinazione fibre e biochar.

Durante i cicli di asciutto bagnato, come era plausibile immaginare, i valori di impedenza elettrica maggiori sono stati registrati nelle misure in asciutto, mentre la conducibilità elettrica aumenta nelle misure in bagnato.

La maggiore impedenza elettrica è stata registrata dal provino di riferimento, mentre il provino confezionato con l'aggiunta di biochar mostra valori paragonabili al provino di riferimento. Al contrario, la maggiore conducibilità elettrica è stata registrata nel provino con le fibre di carbonio RCF e nella malta con la combinazione fibre e biochar.

Il valore di conducibilità elettrica delle barre immerse nella malta contenente fibre di carbonio (RCF) è del 37% maggiore rispetto a quelle immerse nel provino di riferimento, la conducibilità elettrica delle barre immerse nella malta contenente biochar (BCH) è del 12% maggiore rispetto alla malta di riferimento.

Mentre le barre immerse nella malta contenente biochar e fibre di carbonio (RCF+BCH) arriva a valori 47% maggiori delle barre immerse nella malta di riferimento.

Comunque sia le differenze nell'impedenza delle diverse malte, come aspettato, risultano essere più evidenti nella condizione asciutta che nella condizione bagnata.

7.5. Prove di corrosione sulle malte

7.5.1. Metodo di misurazione della corrosione

Lo strumento utilizzato per le prove di corrosione è il potenziostato/galvanostato Autolab

PGSTAT 204 [4].

Lo strumento viene collegato al provino da testare mediante tre morsetti (Fig. 59) di cui uno collegato all'elettrodo di riferimento (RE, reference electrode), uno al contro elettrodo (CE, counter electrode) e l'altro alla barra in acciaio da analizzare (WE, working electrode, unito al WS, working sense).

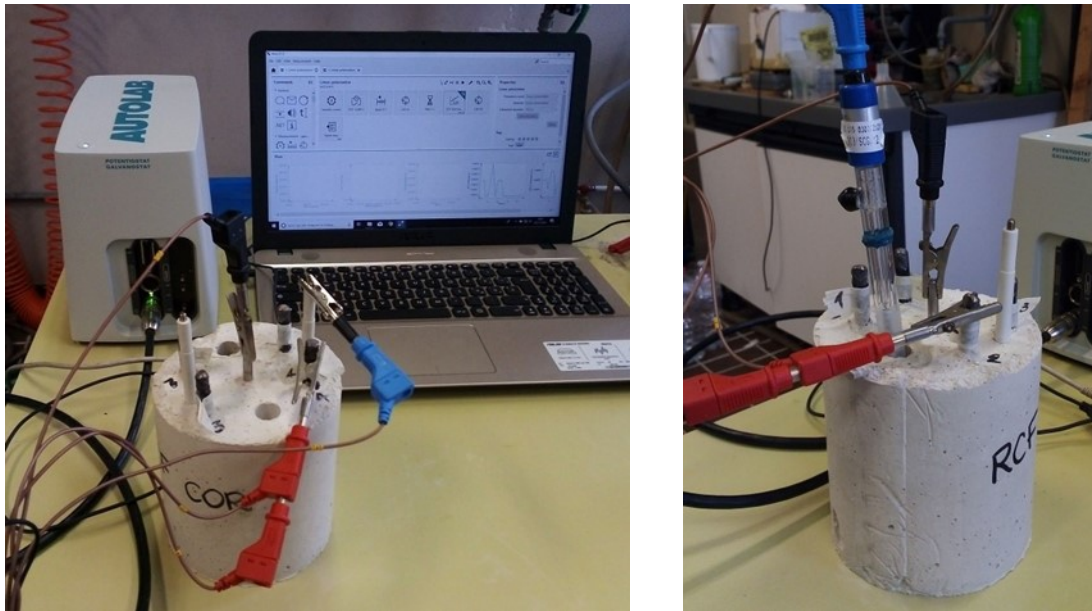


Fig. 59 Esempio di prova di corrosione in asciutto

La resistenza alla corrosione delle barre di armatura è stata valutata mediante misurazioni della resistenza di polarizzazione (R_p).

L'andamento della corrosione nelle barre di acciaio è stato valutato mediante misurazioni del potenziale di corrosione libero (E_{corr}), usando come riferimento un elettrodo al calomelano saturo (SCE, +0,241 V vs SHE). Per garantire il contatto elettrolitico tra l'SCE e la matrice cementizia, i fori presenti nel provino per l'inserimento dell'elettrodo di riferimento, sono stati riempiti con una soluzione satura di $Ca(OH)_2$ (Fig. 60).

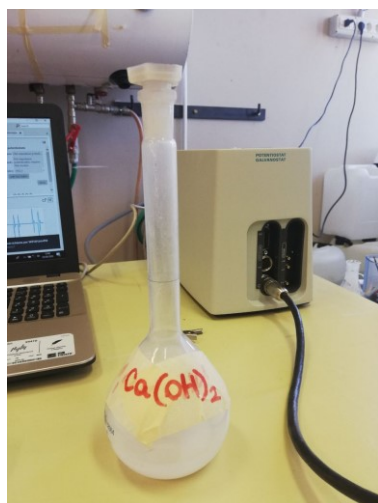


Fig. 60 Soluzione satura di Ca(OH)_2

La R_p è stata misurata con il metodo della polarizzazione lineare [5], in cui il potenziale è stato variato da -10 mV a $+10$ mV rispetto a E_{corr} (velocità di scansione = $0,167$ mV/ se potenziale di passo $0,244$ mV).

Le prove di corrosione sono state eseguite per ogni campione in tutte le 4 barre di armatura presente, bagnato e asciutto.

Le misurazioni sono state eseguite a determinati intervalli temporali, per ogni ciclo sono state effettuate misurazioni in asciutto e bagnato (Fig. 61) per tutti i campioni e tutte le barre.

Ogni ciclo bagnato-asciutto è effettuato nel seguente modo, i provini per due giorni erano immersi nella soluzione e per i restanti 5 giorni si trovavano in asciutto.



Fig. 61 Esempio di prova di corrosione in bagnato

7.5.2. Risultati delle prove di corrosione

Le misure eseguite con il potenziostato/galvanostato Autolab PGSTAT 204, forniscono per ogni campione e per ogni periodo temporale, 4 misure relative ai test effettuati per ogni barra di acciaio.

Calcolando la media si ottengono i valori riportati nelle Tab.12 -Tab.13 - Tab.14 - Tab.15.

Tab.12 Risultati delle prove di corrosione sul campione REF

REF			
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (mV)	R _p (Ω*cm ²)
25/05/2020	0	-102	2409628
27/05/2020	2	-200	622912
01/06/2020	7	-122	879356
03/06/2020	9	-174	629916
08/06/2020	14	-135	782032
10/06/2020	16	-163	641016
15/06/2020	21	-124	821692
17/06/2020	23	-167	649940
22/06/2020	28	-124	800180
24/06/2020	30	-187	544452
29/06/2020	35	-114	733708
01/07/2020	37	-192	487320

Tab.13 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF

RCF			
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (mV)	R _p (Ω*cm ²)
25/05/2020	0	-40	1706156
27/05/2020	2	-234	688588
01/06/2020	7	-202	673176
03/06/2020	9	-239	533532
08/06/2020	14	-175	584788
10/06/2020	16	-206	515644
15/06/2020	21	-192	539540
17/06/2020	23	-215	495468
22/06/2020	28	-184	514652
24/06/2020	30	-210	454772
29/06/2020	35	-164	476892
01/07/2020	37	-221	422592

Tab.14 Risultati delle prove di corrosione sul campione BCH

BCH			
Data	Tempo (gg)	E_{corr} (mV)	R_p (Ω*cm²)
25/05/2020	0	-53	2790060
27/05/2020	2	-147	1489484
01/06/2020	7	-125	1401256
03/06/2020	9	-150	1156572
08/06/2020	14	-170	988188
10/06/2020	16	-176	831456
15/06/2020	21	-170	803216
17/06/2020	23	-184	788180
22/06/2020	28	-150	896388
24/06/2020	30	-189	611840
29/06/2020	35	-155	720000
01/07/2020	37	-201	551084

Tab.15 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF+BCH

RCF+BCH			
Data	Tempo (gg)	E_{corr} (mV)	R_p (Ω*cm²)
25/05/2020	0	-47	2392284
27/05/2020	2	-217	1059788
01/06/2020	7	-209	1031544
03/06/2020	9	-238	869556
08/06/2020	14	-193	876396
10/06/2020	16	-227	811416
15/06/2020	21	-176	810164
17/06/2020	23	-197	781200
22/06/2020	28	-157	762500
24/06/2020	30	-190	747860
29/06/2020	35	-148	711660
01/07/2020	37	-195	693136

Si precisa che la determinazione della resistenza attraverso la curva di polarizzazione lineare espressa nella normativa ASTM G3-14 è descritta in linea generale e viene eseguita analizzando sia il ramo anodico che catodico.

Per la determinazione della resistenza di polarizzazione nelle barre di armatura immerse in una matrice cementizia si fa riferimento solamente al ramo anodico.

La resistenza (R) è stata calcolata, quindi, considerando il valore della pendenza in un tratto lineare della curva nel ramo anodico lontano dall'intorno di zero:

$$R[\Omega] = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

La resistenza di polarizzazione è ottenuta moltiplicando la resistenza R per la superficie della barra esposta a corrosione (A_b) che in questo caso è 16 cm^2 :

$$Rp [\Delta \cdot \text{cm}^2] = R \cdot A_b$$

Nei grafici riportati di seguito in Fig. 63 - Fig. 64 sono illustrati gli andamenti dei potenziali di corrosione e delle resistenze di polarizzazione per ogni campione di malta realizzato.

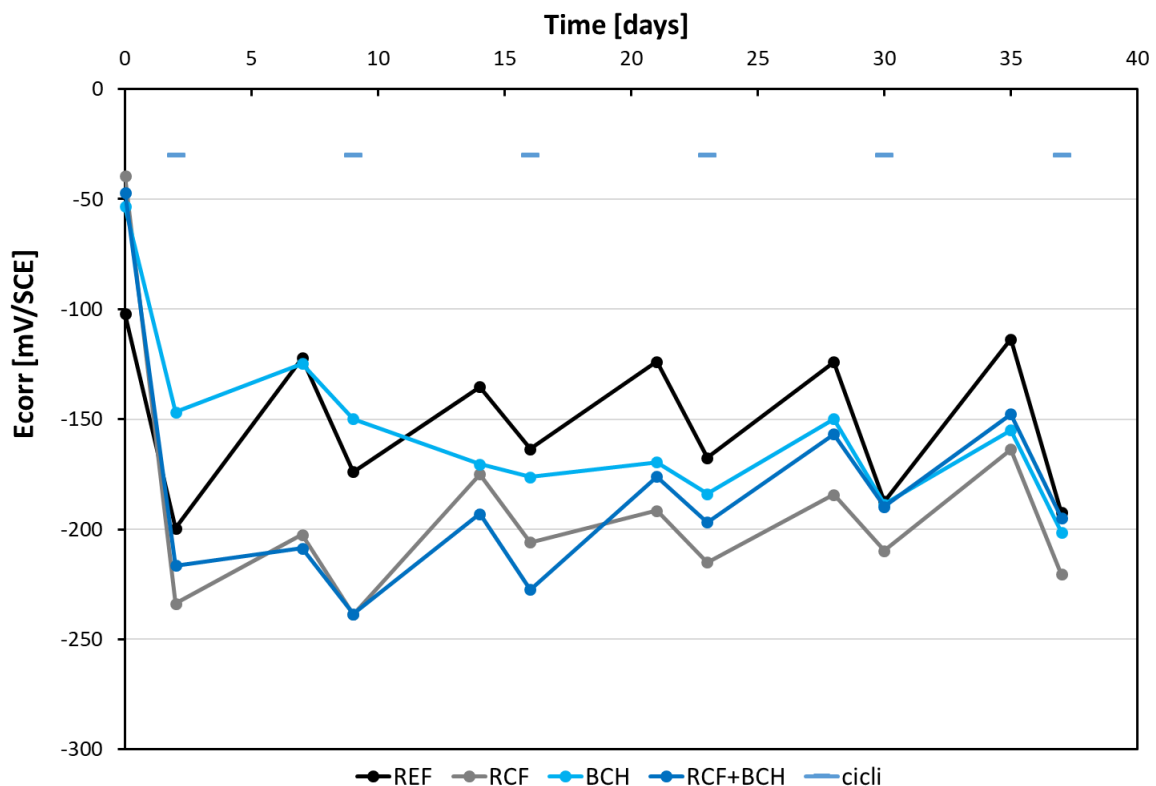


Fig 63 Andamento del potenziale di corrosione (E_{corr}) delle armature di acciaio incorporate nella malta.

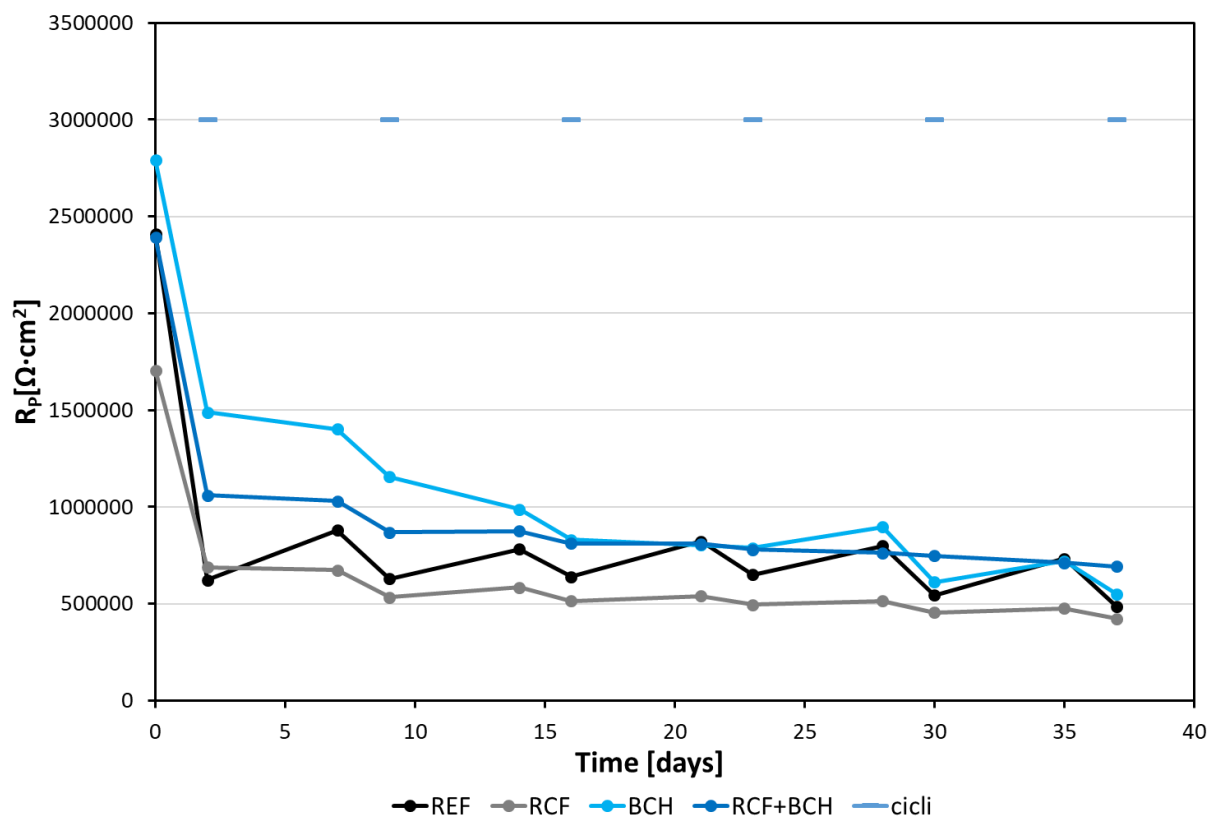


Fig. 64 Andamento della resistenza di polarizzazione (R_p) delle armature di acciaio incorporate nella malta.

7.6. Discussione dei risultati

Osservando i risultati ottenuti dalle prove di corrosione si nota che i valori del potenziale di corrosione più elevati sono stati registrati nella prima misurazione eseguita a tempo t_0 per ogni provino.

Ovviamente si attendeva questo risultato essendo la misura eseguita subito prima di iniziare i cicli di bagnato-asciutto.

I potenziali di corrosione hanno la tendenza a registrare valori più elevati nella misurazione in asciutto e valori più bassi in bagnato.

Questa tendenza è mostrata da tutti i provini tranne per il BCH in cui dalla misurazione effettuata a t_{14} non mostra più questo andamento, che al contrario risulta appiattito fino alla misura t_{21} , per poi riprendere il normale andamento.

Le misurazioni eseguite mostrano che le armature immerse nel provino di riferimento REF possiedono i valori di potenziale di corrosione maggiore, mentre quelle immerse nella malta contenete fibre di carbonio RCF mostrano il valore più basso, facendo presagire a un maggior rischio di corrosione.

Le armature immerse nelle due malte preparate con biochar e biochar più fibre di carbonio

riciclate invece si posizionano sul grafico con valori di E_{corr} intermedi.

Le due misure eseguite in bagnato al tempo t_{30} e t_{37} hanno fatto registrare valori molto simili del potenziale di corrosione per le armature immerse nella malta di riferimento, quella contenente biochar, e il provino contenete biochar più fibre di carbonio riciclate.

Questi valori di E_{corr} non sono del tutto confermati dalle misure di resistenza alla polarizzazione, infatti durante tutto il periodo di prova i valori più elevati di R_p sono stati registrati dalle barre immerse nella matrice contenente biochar BCH e biochar e fibre di carbonio RCF+BCH, mentre i valori più bassi sono stati registrati dalle armature immerse nel provino contenente fibre di carbonio RCF.

Dalle misure effettuate si può affermare che nonostante le aggiunte conduttive contribuiscano a diminuire l'impedenza elettrica delle malte, a seconda della tipologia di aggiunta la corrosione delle barre di armatura immerse a seguito dell'esposizione a cicli di bagnasciuga in una soluzione contenente cloruri avviene in modo differente.

Infatti, mentre il rischio di corrosione risulta più elevato, anche se sempre basso in termini assoluti visti che E è sempre < -275 mV / SCE secondo ASTM C876 [3], per le armature immerse nella malta contenente le sole fibre di carbonio riciclate, la maggiore resistenza alla polarizzazione è registrata per le armature immerse nelle malte contenenti sia biochar da solo sia biochar e fibre di carbonio riciclate. Inoltre si nota come le aggiunte conduttive facciano diminuire l'ampiezza delle oscillazioni di E e R_p tra la fase asciutta e quella bagnata delle malte corrispondenti. Al termine dei cicli di bagno-asciuga, che continueranno oltre questa tesi, dovrà essere misurato il quantitativo di cloruri penetrato nelle varie miscele capace di innescare il processo corrosivo.

Bibliografia

[1] V. Corinaldesi. Corso di materiali strutturali per l'Ingegneria Civile. A.A. 2018/2019.

[2] Mario Collepari, Silvia Collepari and Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo. EncoSrl. 2014.

[3] <https://www.ingegneri.cc/danni-da-cloruri-degrado-cemento-armato.html>

[4] 'Autolab PGSTAT204'. [Online]. Available: <https://www.metrohmautolab.com/Products/Echem/CompactNonModular/PGSTAT204.htm>. [Accessed: 12-Nov-2019].

[5] S. Mundra, M. Criado, S. Bernal, and J. Provis, 'Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes', *Cem. Concr. Res.*, vol. 100, pp. 385–397, 2017.

CAPITOLO 8

CONCLUSIONI

8.1. Conclusioni finali

In questo lavoro di tesi, inserito all'interno del progetto EnDurCrete, sono state testate diverse tipologie di malte cementizie contenenti aggiunte conduttive per lo sviluppo di un nuovo materiale composito autodiagnosticante che permette di realizzare sensori intelligenti per il monitoraggio strutturale.

Inserendo nella matrice cementizia una certa quantità di fibre di carbonio e filler conduttivi, è possibile ottenere una rete di conduttori che viene localmente interrotta in presenza di danneggiamento dovuto alla variazione della risposta elettrica.

Il seguente lavoro di tesi ha avuto come scopo quello di analizzare l'andamento della corrosione per verificare se effettivamente con un materiale più conduttivo aumenta il rischio di corrosione delle armature immerse.

Sono state quindi realizzate quattro malte cementizie: una di riferimento senza aggiunte conduttive (REF), una realizzata con fibre di carbonio riciclate (RCF), una contenente biochar come filler conduttivo (BCH) e una realizzata con biochar e fibre di carbonio riciclate (RCF+BCH).

In particolare, si è andato ad analizzare il comportamento corrosivo delle barre di armatura immerse in suddette malte sia in condizioni ambientali durante i primi due mesi di stagionatura sia in condizioni aggressive durante i cicli di asciutto e bagnato in ambiente ricco di cloruri.

Dai risultati della sperimentazione sulle prove in condizioni ambientali si nota come l'impedenza e la resistenza meccanica aumentano all'aumentare del tempo di stagionatura. I valori di resistenza a compressione sono leggermente inferiori a confronto del materiale di riferimento (Fig. 65), mentre per la resistenza a flessione si registrano valori superiori rispetto il campione di riferimento (Fig. 66).

Le aggiunte conduttive all'interno delle malte hanno fatto registrare un aumento in termini di conducibilità sia utilizzando biochar che fibre riciclate da sole o insieme (Fig. 67).

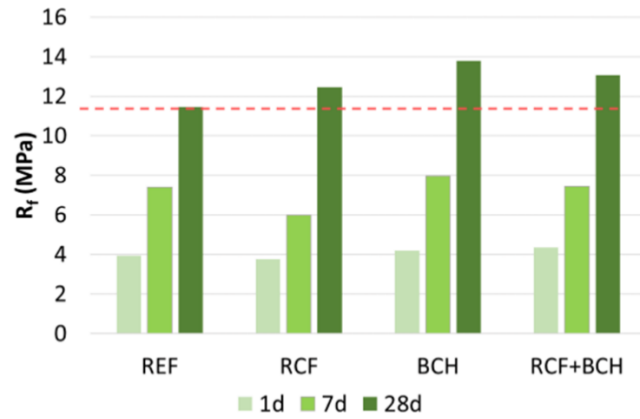


Fig. 65 Resistenza meccanica a flessione

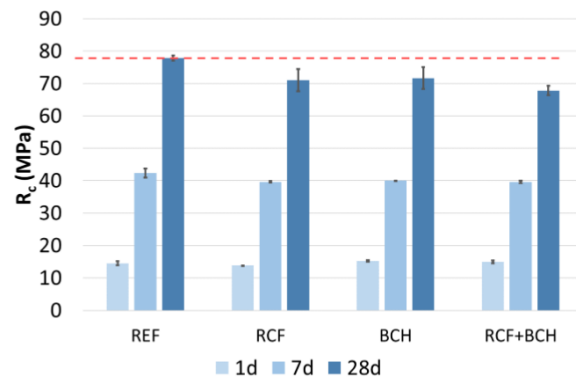


Fig. 66 Resistenza a compressione

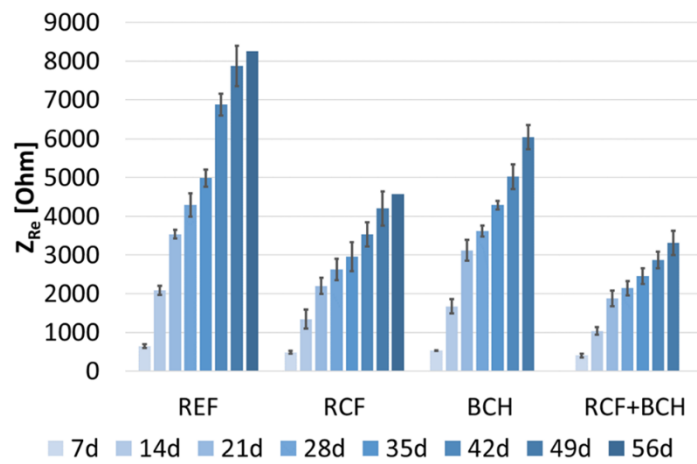


Fig. 67 Impedenza elettrica (a 10 kHz)

Dai risultati ottenuti durante le prove di corrosione in condizioni ambientali, si nota come la probabilità di corrosione risulta bassa nelle malte contenute biochar e fibre di carbonio riciclate, sia utilizzate separatamente che in combinazione.

L'andamento che è stato notato è che la malta di riferimento presenta un elevato rischio di corrosione nei primi 10 giorni.

Dopo 56 giorni dal getto, le armature immerse nella malta RCF + BCH mostrano la più alta resistenza di polarizzazione.

Confrontando i valori ottenuti, è possibile notare che le aggiunte conduttive forniscono alle barre di armatura immerse valori più elevati di E_{corr} e R_p rispetto alla malta di riferimento (Fig. 68)

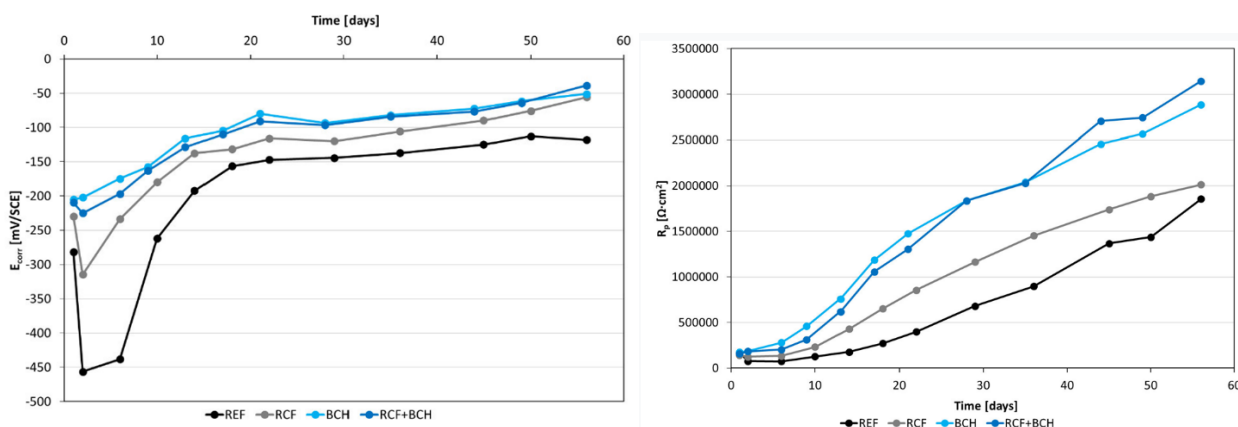


Fig. 68 Andamento del potenziale di corrosione e della resistenza di polarizzazione nelle diverse malte durante la stagionatura.

Analizzando i valori dell'impedenza elettrica sotto l'azione aggressiva durante cicli asciutto bagnato in una soluzione ricca di cloruri, si possono trarre le seguenti conclusioni.

Prima di iniziare i cicli bagnato-asciutto il valore massimo di impedenza elettrica è mostrato dal materiale di riferimento (senza aggiunte conduttive).

Le tre malte con aggiunte conduttive presentano un'impedenza inferiore rispetto alla malta di riferimento.

Il valore di conducibilità elettrica maggiore è stato registrato dalla malta con la combinazione fibre e biochar (Fig. 69).

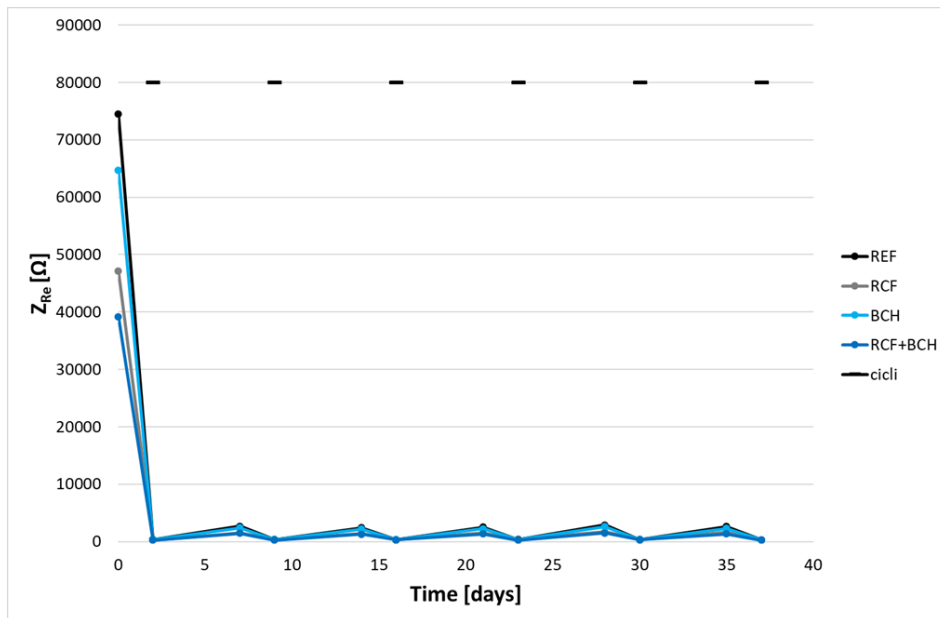


Fig. 69 Impedenza elettrica (a 10 kHz) misurata sui campioni di malta durante la stagionatura.

Quando i provini vengono sottoposti ai cicli di asciutto-bagnato si registrano valori molto simili sia solo nella misurazione in asciutto.

I valori di impedenza elettrica maggiori sono stati registrati nelle misure in asciutto, mentre la conducibilità elettrica aumenta nelle misure in bagnato.

La tendenza mostra una maggiore impedenza elettrica nel provino di riferimento e in quello contenente solo biochar, mentre la maggiore conducibilità elettrica è stata misurata nella malta contenente le fibre di carbonio RCF e nella malta con la combinazione fibre e biochar (Fig. 70).

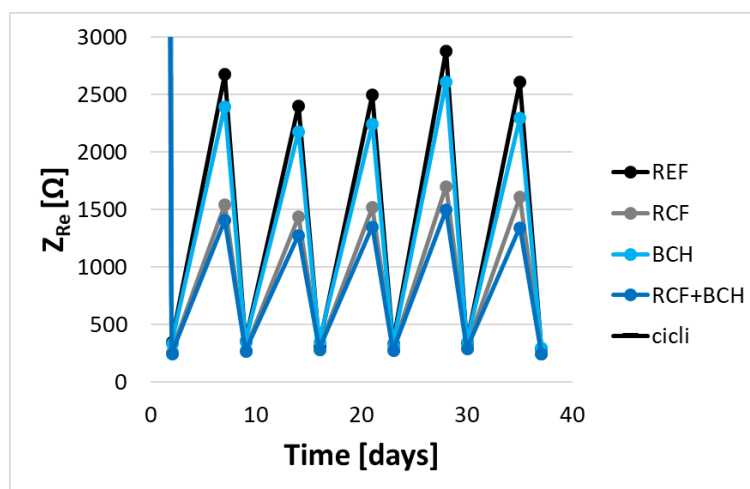


Fig. 70 Impedenza elettrica (a 10 kHz) misurata sui campioni di malta (ingrandimento)

Per quanto riguarda l'andamento della corrosione delle armature in acciaio sotto l'azione aggressiva durante cicli asciutto-bagnato in una soluzione ricca di cloruri, questo dipende molto dal tipo di aggiunta conduttiva utilizzata.

Come ipotizzato, i potenziali di corrosione e la resistenza alla polarizzazione hanno la tendenza a registrare valori più elevati nella misurazione in asciutto e valori più bassi in bagnato.

I dati sperimentali mostrano che il provino di riferimento REF possiede i valori di potenziale di corrosione maggiore, mentre la malta con al suo interno le fibre di carbonio, registra il valore più basso che potrebbe indicare un maggiore rischio di corrosione.

I valori del potenziale di corrosione non sono del tutto confermati dalle misure di resistenza di polarizzazione in cui si nota che mentre i valori più bassi di resistenza di polarizzazione sono stati registrati dal provino contenete fibre di carbonio RCF, i valori di R_p maggiori sono stati registrati dalla malta contenete biochar (BCH) e dalla malta contenete biochar e fibre di carbonio (RCF+BCH), per tutto il tempo di prova.

In particolare, dopo 37 giorni di esposizione (6 cicli), le armature immerse nel provino con le fibre di carbonio riciclate (RCF) registrano una diminuzione del 13% della resistenza di polarizzazione rispetto la malta di riferimento. La R_p delle barre immerse nella malta contenente biochar (BCH) è 13% maggiore rispetto a quelle immerse nel provino di riferimento, mentre la R_p delle barre immerse nella malta contenente biochar e fibre di carbonio (RCF+BCH) arriva a valori 42% maggiori delle barre immerse nella malta di riferimento.

Le malte con aggiunta di biochar, nonostante siano molto più conduttive della miscela di riferimento sembrano però essere più protettive per le armature immerse sia durante la fase di stagionatura sia durante l'esposizione all'azione aggressiva indotta dai cloruri.

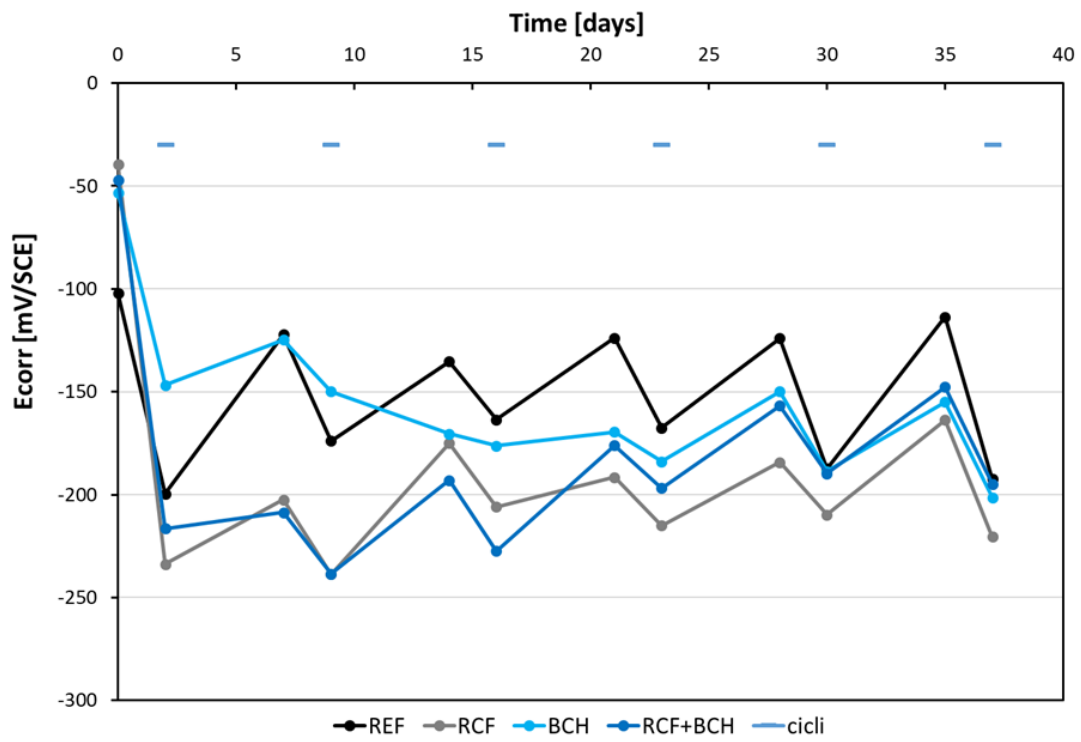


Fig. 71 Andamento del potenziale di corrosione (E_{corr})

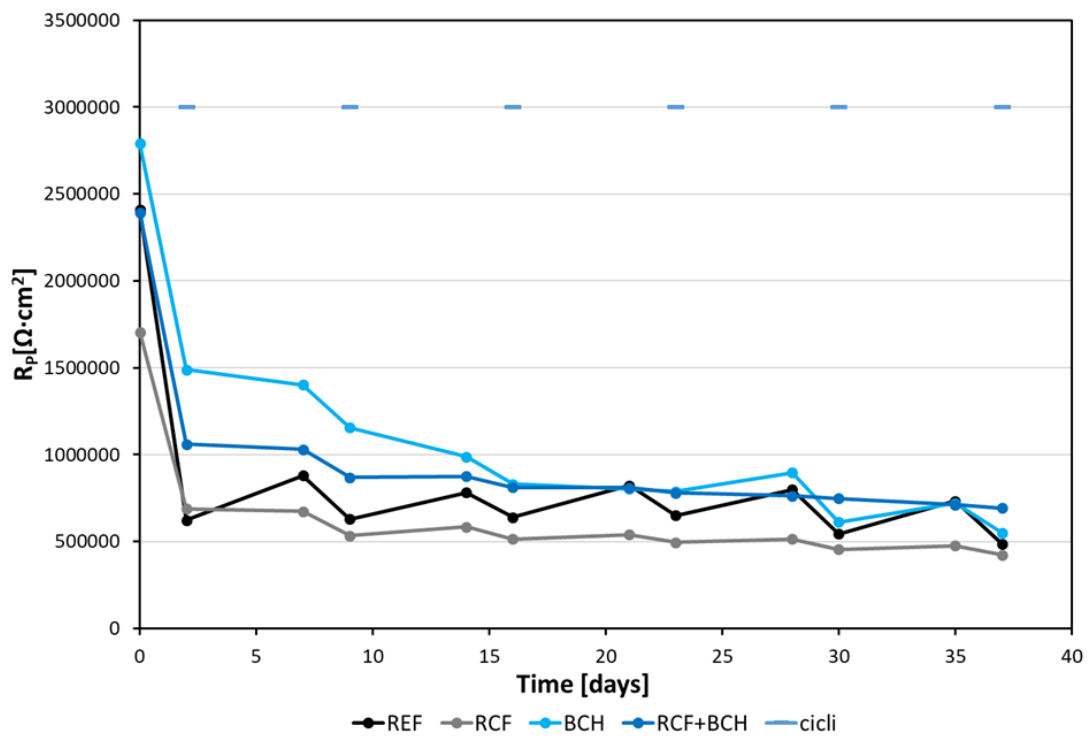


Fig. 72 Andamento della resistenza di polarizzazione (R_p)

APPENDICE

IMPEDENZA ELETTRICA

Tab. 16 impedenza elettrica misurata sui campioni di malta REF A

REF A		Z _{Re} (Ω)				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	78373.98	70763.45	60205.4	53384.69	40411.84
27/05/2020	2	380.7878	373.3441	370.4407	368.9572	366.4945
01/06/2020	7	2973.393	2879.571	2811.724	2774.656	2701.384
03/06/2020	9	363.6811	363.8013	362.7159	362.0027	360.6751
08/06/2020	14	2616.198	2533.004	2472.986	2440.282	2375.471
10/06/2020	16	364.808	365.0295	364.1536	363.474	362.0768
15/06/2020	21	2741.033	2656.437	2588.158	2553.087	2481.862
17/06/2020	23	335.9386	334.5045	331.8372	331.189	329.5177
22/06/2020	28	3127.634	3016.219	2933.89	2888.402	2798.082
24/06/2020	30	350.881	347.5422	345.718	344.7725	343.4794
29/06/2020	35	2822.951	2725	2656.692	2621.197	2551.305
01/07/2020	37	296.1376	291.6353	290.2691	289.5071	288.5739

Tab. 17 impedenza elettrica misurata sui campioni di malta REF B

REF B		Z _{Re} (Ω)				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	87608.06	78253.84	66691.63	59317.84	44596.65
27/05/2020	2	334.7794	331.097	328.185	326.9128	324.9245
01/06/2020	7	2558.511	2478.071	2422.706	2393.288	2338.015
03/06/2020	9	358.1364	355.2755	353.0791	351.9649	350.8141
08/06/2020	14	2352.858	2277.415	2225.734	2199.24	2150.333
10/06/2020	16	271.8637	272.5023	271.7972	271.2907	271.0466
15/06/2020	21	2420.714	2344.305	2292.343	2264.646	2214.998
17/06/2020	23	350.068	348.0199	346.6736	345.1519	343.6049
22/06/2020	28	2847.424	2748.704	2677.67	2640.823	2570.498
24/06/2020	30	344.5465	343.1206	341.33	340.2405	339.3129
29/06/2020	35	2582.487	2497.804	2437.335	2406.503	2347.939
01/07/2020	37	289.3378	288.1035	287.7366	287.1533	287.4406

Tab. 18 impedenza elettrica media misurata sui campioni di malta REF

REF MEDIA		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	82991.02	74508.65	63448.52	56351.27	42504.25
27/05/2020	2	357.7836	352.2206	349.3129	347.935	345.7095
01/06/2020	7	2765.952	2678.821	2617.215	2583.972	2519.7
03/06/2020	9	360.9088	359.5384	357.8975	356.9838	355.7446
08/06/2020	14	2484.528	2405.21	2349.36	2319.761	2262.902
10/06/2020	16	318.3359	318.7659	317.9754	317.3824	316.5617
15/06/2020	21	2580.874	2500.371	2440.251	2408.867	2348.43
17/06/2020	23	343.0033	341.2622	339.2554	338.1705	336.5613
22/06/2020	28	2987.529	2882.462	2805.78	2764.613	2684.29
24/06/2020	30	347.7138	345.3314	343.524	342.5065	341.3962
29/06/2020	35	2702.719	2611.402	2547.014	2513.85	2449.622
01/07/2020	37	292.7377	289.8694	289.0029	288.3302	288.0073

Tab. 19 impedenza elettrica misurata sui campioni di malta RCF A

RCF A		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	65327.55	51938.93	43215.2	38028.12	28527.68
27/05/2020	2	330.218	272.1577	230.9112	216.4878	199.2375
01/06/2020	7	2370.667	1619.133	1464.329	1422.526	1365.84
03/06/2020	9	321.9151	277.9184	242.0377	226.8803	207.1606
08/06/2020	14	2138.936	1489.952	1339.575	1296.672	1240.583
10/06/2020	16	312.6739	279.0334	246.3697	230.9699	209.4753
15/06/2020	21	2215.431	1569.378	1414.059	1368.715	1304.93
17/06/2020	23	308.1215	276.8833	245.3058	229.3622	206.8688
22/06/2020	28	2521.906	1776.949	1603.314	1550.774	1477.916
24/06/2020	30	338.944	302.2328	270.2924	254.2367	230.9101
29/06/2020	35	2339.265	1659.202	1487.887	1436.778	1366.65
01/07/2020	37	274.0919	248.4509	224.9689	211.9836	191.5861

Tab. 20 impedenza elettrica misurata sui campioni di malta RCF B

RCF B		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	53180.91	42311.27	34850.35	30403.08	22508.32
27/05/2020	2	318.4909	261.9608	222.0488	208.4079	192.3964
01/06/2020	7	2107.355	1469.595	1333.173	1296.005	1245.933
03/06/2020	9	335.4451	285.025	248.1401	232.9086	213.1089
08/06/2020	14	1974.322	1393.815	1258.431	1219.76	1167.92
10/06/2020	16	336.7491	294.3553	259.9232	243.8617	221.7516
15/06/2020	21	2065.902	1472.989	1334.458	1292.554	1238.857
17/06/2020	23	322.4114	287.3937	255.3194	238.9949	216.296
22/06/2020	28	2299.791	1630.406	1474.931	1428.026	1361.997
24/06/2020	30	344.177	303.5535	269.6955	252.692	228.3149
29/06/2020	35	2214.265	1566.8	1410.74	1363.564	1297.941
01/07/2020	37	278.4565	250.6655	227.031	213.715	192.8979

Tab. 21 impedenza elettrica media misurata sui campioni di malta RCF

RCF MEDIA		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	59254.23	47125.1	39032.78	34215.6	25518
27/05/2020	2	324.3545	267.0593	226.48	212.4479	195.817
01/06/2020	7	2239.011	1544.364	1398.751	1359.266	1305.887
03/06/2020	9	328.6801	281.4717	245.0889	229.8945	210.1348
08/06/2020	14	2056.629	1441.884	1299.003	1258.216	1204.252
10/06/2020	16	324.7115	286.6944	253.1465	237.4158	215.6135
15/06/2020	21	2140.667	1521.184	1374.259	1330.635	1271.894
17/06/2020	23	315.2665	282.1385	250.3126	234.1786	211.5824
22/06/2020	28	2410.849	1703.678	1539.123	1489.4	1419.957
24/06/2020	30	341.5605	302.8932	269.994	253.4644	229.6125
29/06/2020	35	2276.765	1613.001	1449.314	1400.171	1332.296
01/07/2020	37	276.2742	249.5582	226	212.8493	192.242

Tab. 22 impedenza elettrica misurata sui campioni di malta BCH A

BCH A		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	76631.76	66574.02	56375.29	50123.44	37996.44
27/05/2020	2	301.3823	296.3682	291.8245	289.4747	285.5267
01/06/2020	7	2430.719	2298.571	2213.566	2174.7	2109.116
03/06/2020	9	305.886	305.3546	301.7003	299.7939	296.6436
08/06/2020	14	2193.727	2079.266	2004.596	1970.228	1912.887
10/06/2020	16	300.376	298.922	295.1434	293.5185	290.2794
15/06/2020	21	2271.12	2155.922	2078.615	2043.89	1983.533
17/06/2020	23	288.1447	283.641	279.4581	277.6432	274.4017
22/06/2020	28	2722.193	2565.907	2463.409	2416.622	2335.476
24/06/2020	30	316.7902	312.2093	307.7177	305.4741	301.7748
29/06/2020	35	2373.08	2244.909	2159.485	2120.984	2055.015
01/07/2020	37	265.8082	263.3223	260.6574	259.1758	256.5215

Tab. 23 impedenza elettrica misurata sui campioni di malta BCH B

BCH B		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	71573.49	62921.62	54564.59	49295.13	38195.17
27/05/2020	2	386.6437	380.5309	375.0121	372.1479	367.4539
01/06/2020	7	2651.898	2502.647	2407.501	2364.984	2296.021
03/06/2020	9	400.4811	401.2639	398.7451	396.7437	393.0138
08/06/2020	14	2421.24	2288.584	2203.519	2165.195	2103.623
10/06/2020	16	403.0188	402.307	398.9612	396.789	392.9225
15/06/2020	21	2479.272	2339.081	2255.057	2216.373	2150.976
17/06/2020	23	379.8833	376.5468	371.542	368.9439	364.1691
22/06/2020	28	2834.039	2667.547	2560.143	2512.232	2431.568
24/06/2020	30	392.7267	389.7915	386.5707	384.5956	381.1282
29/06/2020	35	2488.656	2352.092	2263.874	2223.706	2158.077
01/07/2020	37	342.0353	341.148	337.7586	335.9204	332.4242

Tab. 24 impedenza elettrica media misurata sui campioni di malta BCH

BCH MEDIA		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	74102.63	64747.82	55469.94	49709.29	38095.81
27/05/2020	2	344.013	338.4496	333.4183	330.8113	326.4903
01/06/2020	7	2541.309	2400.609	2310.534	2269.842	2202.569
03/06/2020	9	353.1836	353.3093	350.2227	348.2688	344.8287
08/06/2020	14	2307.484	2183.925	2104.058	2067.712	2008.255
10/06/2020	16	351.6974	350.6145	347.0523	345.1538	341.601
15/06/2020	21	2375.196	2247.502	2166.836	2130.132	2067.255
17/06/2020	23	334.014	330.0939	325.5001	323.2936	319.2854
22/06/2020	28	2778.116	2616.727	2511.776	2464.427	2383.522
24/06/2020	30	354.7585	351.0004	347.1442	345.0349	341.4515
29/06/2020	35	2430.868	2298.501	2211.68	2172.345	2106.546
01/07/2020	37	303.9218	302.2352	299.208	297.5481	294.4729

Tab. 25 impedenza elettrica misurata sui campioni di malta RCF+BCH A

RCF+BCH A		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	46714.32	37118.37	30595.64	26853.74	20244.36
27/05/2020	2	294.194	228.4822	188.9089	176.6499	162.969
01/06/2020	7	1891.153	1293.412	1161.184	1122.41	1070.598
03/06/2020	9	316.9494	256.6011	215.8693	201.4705	184.3313
08/06/2020	14	1679.777	1158.031	1035.797	999.251	950.737
10/06/2020	16	335.1941	278.3288	235.9469	219.5822	199.3178
15/06/2020	21	1763.171	1230.344	1101.884	1063.387	1009.124
17/06/2020	23	307.0343	261.2517	223.446	207.6308	187.522
22/06/2020	28	1932.912	1345.615	1208.17	1165.812	1107.082
24/06/2020	30	328.3696	278.8197	239.6991	223.077	201.7929
29/06/2020	35	1746.141	1215.845	1082.897	1043.861	989.903
01/07/2020	37	271.0075	235.5608	206.1994	192.5276	173.6236

Tab. 26 impedenza elettrica misurata sui campioni di malta RCF+BCH B

RCF+BCH B		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	51654.69	41268.07	34099.32	29860.92	22238.32
27/05/2020	2	339.5197	268.862	224.4625	210.3106	193.953
01/06/2020	7	2231.077	1529.922	1378.712	1334.652	1276.443
03/06/2020	9	352.5269	291.095	246.1461	229.4383	209.1376
08/06/2020	14	2021.011	1399.04	1255.55	1212.963	1156.679
10/06/2020	16	357.1283	300.6207	255.9659	238.1227	215.8914
15/06/2020	21	2106.096	1476.857	1325.977	1280.259	1219.499
17/06/2020	23	339.2752	291.4956	249.9924	232.4846	209.5612
22/06/2020	28	2356.883	1652.279	1488.083	1437.803	1367.012
24/06/2020	30	349.7653	300.9107	258.5166	240.2709	216.5064
29/06/2020	35	2102.518	1475.866	1318.942	1271.212	1207.037
01/07/2020	37	304.1819	266.4687	231.3189	215.5115	193.8377

Tab. 27 impedenza elettrica media misurata sui campioni di malta RCF+BCH

RCF+BCH MEDIA		$Z_{Re} (\Omega)$				
DATA	TEMPO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
25/05/2020	0	49184.51	39193.22	32347.48	28357.33	21241.34
27/05/2020	2	316.8569	248.6721	206.6857	193.4803	178.461
01/06/2020	7	2061.115	1411.667	1269.948	1228.531	1173.521
03/06/2020	9	334.7382	273.8481	231.0077	215.4544	196.7345
08/06/2020	14	1850.394	1278.536	1145.674	1106.107	1053.708
10/06/2020	16	346.1612	289.4748	245.9564	228.8525	207.6046
15/06/2020	21	1934.634	1353.601	1213.931	1171.823	1114.312
17/06/2020	23	323.1548	276.3737	236.7192	220.0577	198.5416
22/06/2020	28	2144.898	1498.947	1348.127	1301.808	1237.047
24/06/2020	30	339.0675	289.8652	249.1079	231.674	209.1497
29/06/2020	35	1924.33	1345.856	1200.92	1157.537	1098.47
01/07/2020	37	287.5947	251.0148	218.7592	204.0196	183.7307

POTENZIALE DI CORROSIONE E RESISTENZA DI POLARIZZAZIONE

Tab.28 Risultati delle prove di corrosione sul campione REF 1

REF_1_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.12454	4129	10581	128952	2063232	124823	1997168	16
27/05/2020	2	-0.2309	450.88	13509	25105	401680	24654	394466	
01/06/2020	7	-0.12676	1572	21720	60209	963344	58637	938192	
03/06/2020	9	-0.14766	552	17960	41359	661744	40807	652912	
08/06/2020	14	-0.11916	1376	15428	56425	902800	55049	880784	
10/06/2020	16	-0.13449	612	19661	45932	734912	45320	725120	
15/06/2020	21	-0.098274	1455	20873	63854	1021664	62399	998384	
17/06/2020	23	-0.13072	658	19744	50882	814112	50224	803584	
22/06/2020	28	-0.12201	1475	19392	61740	987840	60265	964240	
24/06/2020	30	-0.25549	643	17155	24303	388848	23660	378560	
29/06/2020	35	-0.12201	1312	17557	54342	869472	53030	848480	
01/07/2020	37	-0.27209	594	14192	20660	330560	20066	321056	

Tab.29 Risultati delle prove di corrosione sul campione REF 2

REF_2_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.12001	3826	17968	124420	1990720	120594	1929504	16
27/05/2020	2	-0.31096	491	9332.3	13507	216112	13016	208256	
01/06/2020	7	-0.17919	1375	17970	31143	498288	29768	476288	
03/06/2020	9	-0.3261	533	6467.9	9365	149840	8832	141312	
08/06/2020	14	-0.19467	1146	12480	19376	310016	18230	291680	
10/06/2020	16	-0.31538	563	6044.1	8572	137152	8009	128144	
15/06/2020	21	-0.1718	1197	12203	19485	311760	18288	292608	
17/06/2020	23	-0.30441	574	5612.1	7796	124736	7222	115552	
22/06/2020	28	-0.17699	1222	12154	18642	298272	17420	278720	
24/06/2020	30	-0.28728	548	5334.5	7297	116752	6749	107984	
29/06/2020	35	-0.16705	1083	11501	17969	287504	16886	270176	
01/07/2020	37	-0.2858	500	5172.6	7168	114688	6668	106688	

Tab.30 Risultati delle prove di corrosione sul campione REF 3

REF_3_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.076193	3580	5022.6	137031	2192496	133451	2135216	16
27/05/2020	2	-0.13083	709	12443	61102	977632	60393	966288	
01/06/2020	7	-0.088178	1480	7672.7	51829	829264	50349	805584	
03/06/2020	9	-0.1055	779	10679	47136	754176	46357	741712	
08/06/2020	14	-0.1194	1294	11030	55572	889152	54278	868448	
10/06/2020	16	-0.099413	801	10245	47393	758288	46592	745472	
15/06/2020	21	-0.099804	1289	10189	53865	861840	52576	841216	
17/06/2020	23	-0.095425	818	9344	47601	761616	46783	748528	
22/06/2020	28	-0.094898	1293	6523.4	51626	826016	50333	805328	
24/06/2020	30	-0.082227	786	9921	47553	760848	46767	748272	
29/06/2020	35	-0.072129	1160	6427.1	46831	749296	45671	730736	
01/07/2020	37	-0.082063	715	9020	43507	696112	42792	684672	

Tab.31 Risultati delle prove di corrosione sul campione REF 4

REF_4_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.088275	4360	8756.7	212004	3392064	207644	3322304	16
27/05/2020	2	-0.12535	511	17260	56014	896224	55503	888048	
01/06/2020	7	-0.094616	1473	17693	76658	1226528	75185	1202960	
03/06/2020	9	-0.11645	591	18779	59619	953904	59028	944448	
08/06/2020	14	-0.10829	1264	21112	64135	1026160	62871	1005936	
10/06/2020	16	-0.10459	635	18180	58357	933712	57722	923552	
15/06/2020	21	-0.12558	1304	23531	68219	1091504	66915	1070640	
17/06/2020	23	-0.13919	696	21416	56206	899296	55510	888160	
22/06/2020	28	-0.10213	1329	20383	68037	1088592	66708	1067328	
24/06/2020	30	-0.12469	679	21772	56960	911360	56281	900496	
29/06/2020	35	-0.09366	1193	20025	64285	1028560	63092	1009472	
01/07/2020	37	-0.12949	627	21764	50495	807920	49868	797888	

Tab.32 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF 1

RCF_1_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.018028	2923	4317.2	96996	1551936	94073	1505168	16
27/05/2020	2	-0.36163	301	4429.4	5085	81360	4784	76544	
01/06/2020	7	-0.34005	820	7220.7	8503	136048	7683	122928	
03/06/2020	9	-0.41488	339	2760.8	3156	50496	2817	45072	
08/06/2020	14	-0.34173	720	4738	5784	92544	5064	81024	
10/06/2020	16	-0.40019	369	3129.1	3726	59616	3357	53712	
15/06/2020	21	-0.3314	737	5945.7	7464	119424	6727	107632	
17/06/2020	23	-0.38492	404	3859.5	4741	75856	4337	69392	
22/06/2020	28	-0.367	747	4204.1	4754	76064	4007	64112	
24/06/2020	30	-0.39948	378	2649.7	3168	50688	2790	44640	
29/06/2020	35	-0.2999	675	3617.4	5131	82096	4456	71296	
01/07/2020	37	-0.39385	349	2547.7	3041	48656	2692	43072	

Tab.33 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF 2

RCF_2_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.0588	2631	10163	132808	2124928	130177	2082832	16
27/05/2020	2	-0.09796	411	10245	66888	1070208	66477	1063632	
01/06/2020	7	-0.093197	966	8828	63543	1016688	62577	1001232	
03/06/2020	9	-0.10087	502	10555	52875	846000	52373	837968	
08/06/2020	14	-0.08166	839	8190	54054	864864	53215	851440	
10/06/2020	16	-0.095125	520	10242	49064	785024	48544	776704	
15/06/2020	21	-0.10185	850	8597.5	50834	813344	49984	799744	
17/06/2020	23	-0.1021	552	11112	48751	780016	48199	771184	
22/06/2020	28	-0.081487	854	9163.4	50581	809296	49727	795632	
24/06/2020	30	-0.088435	522	9848.7	44649	714384	44127	706032	
29/06/2020	35	-0.076143	751	9266.4	45850	733600	45099	721584	
01/07/2020	37	-0.091198	468	10042	40922	654752	40454	647264	

Tab.34 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF 3

RCF_3_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.059719	3319	8700.4	106793	1708688	103474	1655584	16
27/05/2020	2	-0.36886	258	2707	3149	50384	2891	46256	
01/06/2020	7	-0.28753	893	5741.1	6307	100912	5414	86624	
03/06/2020	9	-0.35693	321	3000.4	3655	58480	3334	53344	
08/06/2020	14	-0.19118	771	6944.9	12882	206112	12111	193776	
10/06/2020	16	-0.25163	356	4726.6	8486	135776	8130	130080	
15/06/2020	21	-0.258	821	4418	5995	95920	5174	82784	
17/06/2020	23	-0.29906	380	3575.4	5076	81216	4696	75136	
22/06/2020	28	-0.21903	833	4330	6579	105264	5746	91936	
24/06/2020	30	-0.28592	380	3234.9	4814	77024	4434	70944	
29/06/2020	35	-0.20586	744	2777.3	5526	88416	4782	76512	
01/07/2020	37	-0.32754	347	2578.3	3365	53840	3018	48288	

Tab.35 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF 4

RCF_4_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.021864	2045	3165.1	89942	1439072	87897	1406352	16
27/05/2020	2	-0.10679	722	13220	97025	1552400	96303	1540848	
01/06/2020	7	-0.089042	1005	9234.4	89941	1439056	88936	1422976	
03/06/2020	9	-0.081551	685	13733	73697	1179152	73012	1168192	
08/06/2020	14	-0.084942	883	9402.8	73477	1175632	72594	1161504	
10/06/2020	16	-0.076979	664	15130	67635	1082160	66971	1071536	
15/06/2020	21	-0.075151	865	11463	70592	1129472	69727	1115632	
17/06/2020	23	-0.074004	665	12155	65299	1044784	64634	1034144	
22/06/2020	28	-0.06955	856	8859.7	66749	1067984	65893	1054288	
24/06/2020	30	-0.065308	632	11114	61062	976992	60430	966880	
29/06/2020	35	-0.072841	737	11171	62716	1003456	61979	991664	
01/07/2020	37	-0.069534	571	13558	58320	933120	57749	923984	

Tab.36 Risultati delle prove di corrosione sul campione BCH 1

BCH_1_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.040185	4214	6674.3	151603	2425648	147389	2358224	16
27/05/2020	2	-0.093391	842	22516	128854	2061664	128012	2048192	
01/06/2020	7	-0.092055	1659	10595	113156	1810496	111497	1783952	
03/06/2020	9	-0.077669	859	19237	102964	1647424	102105	1633680	
08/06/2020	14	-0.23896	1402	22185	44342	709472	42940	687040	
10/06/2020	16	-0.25594	894	21365	34245	547920	33351	533616	
15/06/2020	21	-0.27837	1398	16755	21660	346560	20262	324192	
17/06/2020	23	-0.28844	909	12188	16346	261536	15437	246992	
22/06/2020	28	-0.20632	1400	14303	32094	513504	30694	491104	
24/06/2020	30	-0.21335	881	15257	27050	432800	26169	418704	
29/06/2020	35	-0.17401	1233	12226	29259	468144	28026	448416	
01/07/2020	37	-0.17464	819	13595	29193	467088	28374	453984	

Tab.37 Risultati delle prove di corrosione sul campione BCH 2

BCH_2_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.059876	4541	7521	150827	2413232	146286	2340576	16
27/05/2020	2	-0.32731	405	3093	3906	62496	3501	56016	
01/06/2020	7	-0.26003	1270	7904	13692	219072	12422	198752	
03/06/2020	9	-0.31634	539	4275	5627	90032	5088	81408	
08/06/2020	14	-0.28239	1112	5842	8040	128640	6928	110848	
10/06/2020	16	-0.31946	582	4108.7	5433	86928	4851	77616	
15/06/2020	21	-0.27379	1132	6078.4	8734	139744	7602	121632	
17/06/2020	23	-0.29879	619	4188.1	6671	106736	6052	96832	
22/06/2020	28	-0.23688	1158	6300.8	10658	170528	9500	152000	
24/06/2020	30	-0.26174	601	4536.8	8061	128976	7460	119360	
29/06/2020	35	-0.237777	1036	6546.1	11739	187824	10703	171248	
01/07/2020	37	-0.29785	542	3722.5	6509	104144	5967	95472	

Tab.38 Risultati delle prove di corrosione sul campione BCH 3

BCH_3_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.04099	3890	4782.7	124837	1997392	120947	1935152	16
27/05/2020	2	-0.074092	510	8627	87003	1392048	86493	1383888	
01/06/2020	7	-0.071681	1281	4843.8	72642	1162272	71361	1141776	
03/06/2020	9	-0.1242	594	13010	57542	920672	56948	911168	
08/06/2020	14	-0.080306	1088	11912	71318	1141088	70230	1123680	
10/06/2020	16	-0.067711	623	8183.9	58381	934096	57758	924128	
15/06/2020	21	-0.055357	1089	3678.5	58926	942816	57837	925392	
17/06/2020	23	-0.072583	671	12427	60272	964352	59601	953616	
22/06/2020	28	-0.08261	1107	10411	65250	1044000	64143	1026288	
24/06/2020	30	-0.22481	641	11392	20525	328400	19884	318144	
29/06/2020	35	-0.24718	987	13375	17413	278608	16426	262816	
01/07/2020	37	-0.27636	598	8603.9	11232	179712	10634	170144	

Tab.39 Risultati delle prove di corrosione sul campione BCH 4

BCH_4_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.072282	3970	9011.9	270248	4323968	266278	4260448	16
27/05/2020	2	-0.092216	1144	27519	152608	2441728	151464	2423424	
01/06/2020	7	-0.074846	1933	19021	150824	2413184	148891	2382256	
03/06/2020	9	-0.080957	1106	29570	123010	1968160	121904	1950464	
08/06/2020	14	-0.079999	1659	25169	123347	1973552	121688	1947008	
10/06/2020	16	-0.061767	1095	27778	109805	1756880	108710	1739360	
15/06/2020	21	-0.070749	1525	21456	111484	1783744	109959	1759344	
17/06/2020	23	-0.075417	1081	37966	113756	1820096	112675	1802800	
22/06/2020	28	-0.07343	1626	28838	116095	1857520	114469	1831504	
24/06/2020	30	-0.054543	1024	24424	97324	1557184	96300	1540800	
29/06/2020	35	-0.24471	980	11510	16470	263520	15490	247840	
01/07/2020	37	-0.056609	927	26946	90837	1453392	89910	1438560	

Tab.40 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF+BCH 1

RCF+BCH_1_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.035462	2609	7030	111957	1791312	109348	1749568	16
27/05/2020	2	-0.10469	417	14020	87652	1402432	87235	1395760	
01/06/2020	7	-0.098337	909	5586.3	91554	1464864	90645	1450320	
03/06/2020	9	-0.083314	460	16406	80634	1290144	80174	1282784	
08/06/2020	14	-0.090874	805	6134.9	81415	1302640	80610	1289760	
10/06/2020	16	-0.078159	502	15923	79871	1277936	79369	1269904	
15/06/2020	21	-0.063279	808	5079.5	76557	1224912	75749	1211984	
17/06/2020	23	-0.069354	505	14478	76495	1223920	75990	1215840	
22/06/2020	28	-0.059588	803	3968.3	74856	1197696	74053	1184848	
24/06/2020	30	-0.06584	474	13907	75353	1205648	74879	1198064	
29/06/2020	35	-0.060956	715	3811.2	63736	1019776	63021	1008336	
01/07/2020	37	-0.070374	448	14049	67042	1072672	66594	1065504	

Tab.41 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF+BCH 2

RCF+BCH_2_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.047059	2435	10514	199229	3187664	196794	3148704	16
27/05/2020	2	-0.097518	564	22106	167381	2678096	166817	2669072	
01/06/2020	7	-0.091477	945	10184	148359	2373744	147414	2358624	
03/06/2020	9	-0.079597	617	19857	131062	2096992	130445	2087120	
08/06/2020	14	-0.089421	827	12193	123520	1976320	122693	1963088	
10/06/2020	16	-0.080194	614	19108	115878	1854048	115264	1844224	
15/06/2020	21	-0.064917	830	12792	114182	1826912	113352	1813632	
17/06/2020	23	-0.068435	608	15210	110736	1771776	110128	1762048	
22/06/2020	28	-0.0578	815	7408.5	99902	1598432	99087	1585392	
24/06/2020	30	-0.070323	579	17432	103734	1659744	103155	1650480	
29/06/2020	35	-0.078448	710	20523	98404	1574464	97694	1563104	
01/07/2020	37	-0.073772	533	17385	98850	1581600	98317	1573072	

Tab.42 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF+BCH 3

RCF+BCH_3_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.040456	3073	5185	92967	1487472	89894	1438304	16
27/05/2020	2	-0.31459	280	5934.7	7174	114784	6894	110304	
01/06/2020	7	-0.31077	808	8712.2	11228	179648	10420	166720	
03/06/2020	9	-0.4205	297	2271.8	2634	42144	2337	37392	
08/06/2020	14	-0.29657	680	6441.6	7753	124048	7073	113168	
10/06/2020	16	-0.39286	344	3062	3603	57648	3259	52144	
15/06/2020	21	-0.27441	690	5008	6207	99312	5517	88272	
17/06/2020	23	-0.29677	393	3993.7	4795	76720	4402	70432	
22/06/2020	28	-0.24849	718	7194.6	9267	148272	8549	136784	
24/06/2020	30	-0.30648	367	3478.6	4453	71248	4086	65376	
29/06/2020	35	-0.22502	648	7051.3	9263	148208	8615	137840	
01/07/2020	37	-0.34318	333	2829.1	3477	55632	3144	50304	

Tab.43 Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF+BCH 4

RCF+BCH_4_SCE									
Data	Tempo (gg)	E _{corr} (V)	Z(Ω)	Rautolab (Ω)	Ranod. (Ω)	R _p (Ranod.) (Ω*cm ²)	Ranod.-Z (Ω)	R _p (Ranod.-Z) (Ω*cm ²)	A (cm ²)
25/05/2020	0	-0.065293	3031	8181.9	193918	3102688	190887	3054192	16
27/05/2020	2	-0.34932	257	2213.5	2740	43840	2483	39728	
01/06/2020	7	-0.33396	779	5694.4	6745	107920	5966	95456	
03/06/2020	9	-0.37041	315	2499	3059	48944	2744	43904	
08/06/2020	14	-0.29483	707	5324.4	6411	102576	5704	91264	
10/06/2020	16	-0.35846	359	2702.3	3502	56032	3143	50288	
15/06/2020	21	-0.30157	714	4509.6	5595	89520	4881	78096	
17/06/2020	23	-0.35236	389	2445	3274	52384	2885	46160	
22/06/2020	28	-0.26086	751	5101.7	6600	105600	5849	93584	
24/06/2020	30	-0.3163	377	2439.6	3425	54800	3048	48768	
29/06/2020	35	-0.22648	674	4798.1	6512	104192	5838	93408	
01/07/2020	37	-0.29205	358	2523.3	3915	62640	3557	56912	

RINGRAZIAMENTI

Giunto alla conclusione della tesi vorrei ringraziare la professoressa Francesca Tittarelli, per avermi accettato come tesista facendomi partecipare a questo interessante e importante lavoro sperimentale, mostrandosi molto disponibile per qualsiasi chiarimento e confronto.

Ringrazio il correlatore Tiziano Bellezze e in particolare la mia correlatrice Alessandra Mobili per l'incredibile disponibilità dimostrata e per i suoi preziosi consigli.

Ringrazio con affetto i miei genitori e tutta la mia famiglia, per avermi supportato e incoraggiato in questi anni e per avermi sempre sostenuto nelle mie scelte, consentendomi di portare a termine gli studi con serenità.

Grazie a mio fratello Mirco che riesce sempre a strapparmi un sorriso in qualsiasi situazione ed a rallegrare le mie giornate.

Ringrazio i miei nonni i quali con i loro modi di fare mi hanno fatto capire i valori fondamentali della vita, oltre a incoraggiarmi ogni volta che un esame non andava bene, e a gioire insieme a me per ogni successo.

Un ringraziamento speciale va a Greta, per essermi stata sempre vicina in questi anni di studio e per avermi sempre supportato nei momenti più impegnativi e difficili.

Infine, vorrei ringraziare tutti i miei amici ed i miei compagni di università, per aver condiviso momenti di spensieratezza, fatica e soddisfazioni durante questo percorso.