



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

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

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

**“Misura dell'impedenza elettrica di malte self-sensing esposte a cicli di
bagnasciuga in una soluzione simulante l'acqua marina”**

**“Electrical impedance measurement of self-sensing mortars exposed
to wet-dry cycles in a solution simulating sea water”**

Relatore:

Prof.ssa Francesca Tittarelli

Correlatori:

Ing. Alessandra Mobili

Prof. Tiziano Bellezze

Tesi di laurea di:

Mattia Gregori

Matr. 1079951

Anno Accademico A.A. 2019/2020

Sommario

1. Introduzione	1
1.1 Premessa	1
1.2 Stato dell'arte	3
1.3 Il progetto EnDurCrete	4
1.3.1 Introduzione	4
1.3.2 Concetti generali	4
1.3.3 Dimostratori	6
1.4 Obiettivo della tesi	7
2. Materiali	11
2.1 Introduzione	11
2.2 Cemento	11
2.3 Acqua	14
2.4 Aggregati	14
2.4.1 Sabbia	15
2.5 Additivi	16
2.5.1 Additivi superfluidificanti	17
2.6 Fibre	18
2.6.1 Fibre di carbonio	19
2.7 Filler carbonioso	20
2.7.2 Biochar	20
3. Malte con aggiunte conduttive: mix-design e caratterizzazione meccanica	23
3.1 Introduzione	23
3.2 Impasti definitivi	23
3.2.1 Mix-design delle malte	23
3.2.2 Preparazione dei casseri	24
3.2.3 Miscelazione degli ingredienti	27
3.2.4 Esecuzione del getto	28
3.3 Caratterizzazione meccanica delle malte	30
3.3.1 Introduzione	30
3.3.2 Resistenza meccanica a flessione	30
3.3.3 Resistenza meccanica a compressione	32
4. Corrosione delle armature metalliche	35
4.1 Introduzione	35
4.2 Processo elettrochimico	38

4.3 Metodi di analisi della corrosione	39
4.3.1 Misura del potenziale di corrosione	39
4.3.2 Misure elettrochimiche indirette	41
4.3.3 Metodo della polarizzazione lineare.....	42
4.4 Proprietà elettriche di calcestruzzi e malte	43
4.4.1 Introduzione	43
4.4.2 Metodo di rilevazione	45
5. Prove in condizioni ambientali	49
5.1 Prove elettriche sulle malte.....	49
5.2 Prove di corrosione sulle malte.....	50
5.2.1 Metodo di misurazione della corrosione.....	50
5.2.2 Risultati delle prove di corrosione	51
5.3 Discussione dei risultati.....	55
5.3.1 Risultati sul potenziale di corrosione (E_{corr})	55
5.3.2 Risultati sulla resistenza di polarizzazione (R_p).....	56
6. Prove di corrosione in presenza di cloruri	58
6.1 Resinatura dei provini.....	58
6.2 Corrosione promossa dai cloruri.....	58
6.3 Metodi di rilevazione	59
6.3.1 Prove di corrosione.....	59
6.3.2 Prove di impedenza elettrica	60
6.4 Prove elettriche sulle malte.....	60
6.4.1 Risultati delle prove elettriche.....	60
6.4.2 Discussione dei risultati.....	63
6.5 Prove di corrosione sulle malte.....	64
6.5.2 Risultati delle prove di corrosione	64
6.5.3 Discussione dei risultati.....	68
7. Conclusioni.....	71
Appendice I	73
Appendice II.....	82

1. Introduzione

1.1 Premessa

L'obiettivo principale della progettazione strutturale è quello di garantire che le opere progettate assolvano alle loro funzioni, in maniera economicamente sostenibile e con un adeguato livello di sicurezza.

Il concetto di sicurezza deve essere associato al periodo di funzionamento della struttura, ovvero alla sua vita utile (o nominale), intesa come il periodo di tempo in cui la struttura svolge la funzione per cui è stata realizzata senza interventi di manutenzione straordinaria. La vita utile è funzione della tipologia dell'opera (importanza civile e sociale), come indicato in Tab. 1.

Tab. 1 - Valori minimi della vita nominale (V_n) di progetto per i diversi tipi di costruzione.

Vita nominale V_n (anni)	Tipo di struttura
≤ 10	Opere provvisorie e strutture in fase costruttiva
> 50	Opere ordinarie, ponti, infrastrutture e dighe di dimensioni contenute o importanze normale
> 100	Grandi opere, ponti, infrastrutture e dighe di grandi dimensioni o importanza strategica

L'associazione del concetto di sicurezza al concetto di vita utile è necessario tenuto conto che le strutture, così come tutte le opere ingegneristiche, sono di norma soggette ad un degrado prestazionale nel tempo che può comprometterne la durabilità.

In tal senso, può spesso capitare che strutture che non presentano grossi danni rilevabili ad occhio nudo, risultino invece più o meno danneggiate. Per questo motivo sono fondamentali le tecniche di monitoraggio, grazie alle quali possiamo rilevare costantemente lo stato di salute degli elementi strutturali in modo da poter individuare, con sufficiente preavviso, l'insorgere di situazioni critiche.

Esistono tante tecniche di monitoraggio, ma le misurazioni vengono tutte condotte 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 successiva fase di diagnosi [1].

Negli ultimi anni, proprio con lo scopo di superare questo limite, sono stati progettati i cosiddetti “Materiali Intelligenti” (*Smart Materials*), cioè materiali con sensori integrati nella struttura in grado di reagire a determinati stimoli esterni modificando una caratteristica chimico/fisica: colore, viscosità, rigidità, ecc. (Fig. 1.1).

Quindi, inserendo questi materiali all'interno delle strutture sarà possibile diagnosticare autonomamente il loro stato, in termini di deformazione e tensione.

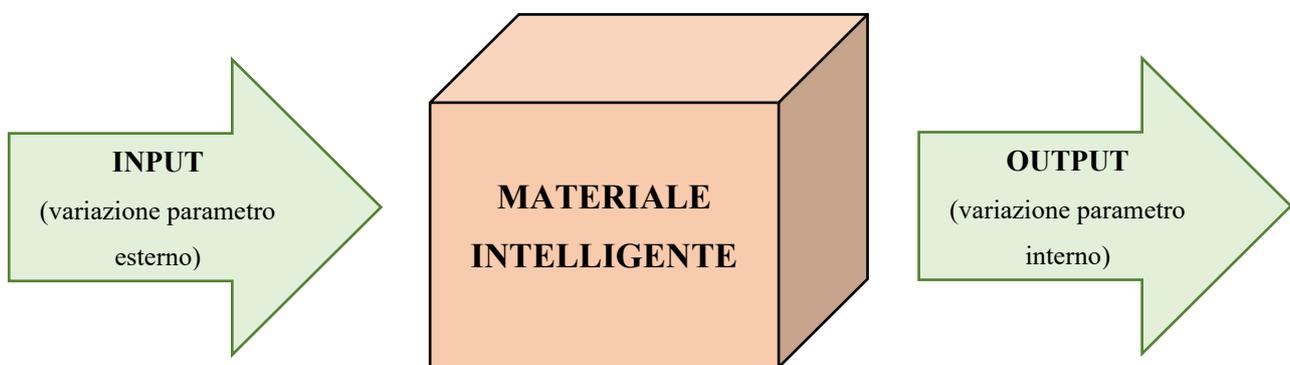


Fig. 1.1 - Concetto di "Materiale Intelligente" (*Smart Material*).

Nel caso dei materiali cementizi, quelli capaci di diagnosticare il proprio stato di deformazione prendono il nome di materiali “self-sensing”.

Essi sono ottenuti tramite l’aggiunta, all’interno della matrice cementizia, di materiali conduttivi, come fibre di carbonio e/o filler carboniosi, dotati di ottime proprietà elettriche e meccaniche.

In questo modo si produce una rete di conduttori che viene localmente interrotta in presenza di danneggiamento (Fig. 1.2).

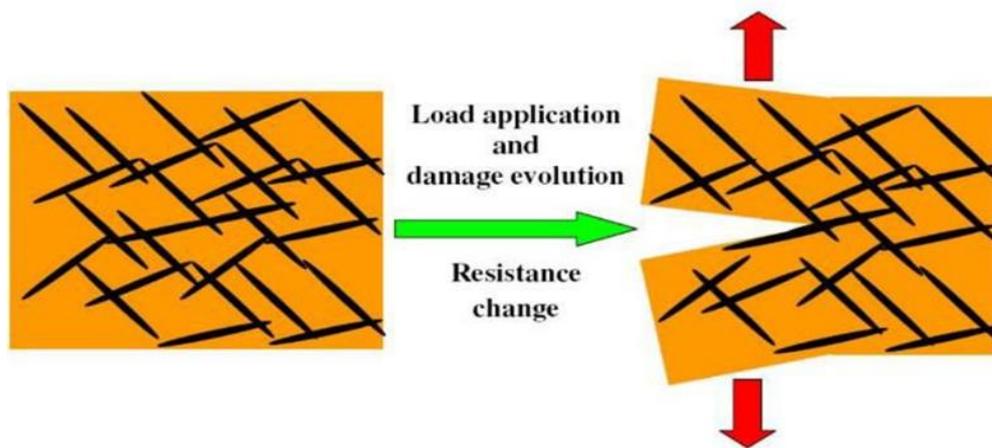


Fig. 1.2 - *Comportamento delle fibre e/o filler all'interno della matrice cementizia.*

Attraverso la variazione della risposta elettrica del componente è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore per monitorare l'innesco e l'evoluzione del danneggiamento [2].

1.2 Stato dell'arte

I primi materiali cementizi “self-sensing”, ottenuti con l’aggiunta di particolari particelle, risalgono ai primi anni ’90 [3]. 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 [4, 5], carbon black [6], nanotubi di carbonio [7, 8], grafene [9] o una combinazione di diverse tipologie [10, 11, 12].

Il primo utilizzo delle fibre di carbonio in ambito edilizio fu nel 1994, dove fibre di carbonio corte vennero impiegate per migliorare l’adesione all’interfaccia tra calcestruzzo nuovo ed esistente con finalità di ripristino.

Nello stesso anno, negli USA, vennero utilizzate fibre di acciaio e carbonio con l’intento di realizzare un calcestruzzo con capacità auto-monitoranti. In particolare, fu studiata 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.

Infine, con il passare degli anni, è aumentato sempre di più l’interesse verso questi nuovi materiali auto-diagnostici, con la realizzazione di diversi studi basati su nanoparticelle conduttive o combinazione di fibre-filler.

1.3 Il progetto EnDurCrete

1.3.1 Introduzione

La seguente sperimentazione fa parte del progetto europeo EnDurCrete “*New Environmental friendly and Durable conCrete, integrating industrial by-products and hybrid systems, for civil, industrial and offshore application*” (Fig. 1.3).

Il progetto, cominciato l’1 gennaio 2018 e della durata complessiva di 42 mesi, è guidato da HeidelbergCement e coinvolge 16 partner, tra cui l’Università Politecnica delle Marche con i dipartimenti DIISM e SIMAU.



Fig. 1.3 - Logo del progetto europeo EnDurCrete.

1.3.2 Concetti generali

Il cemento fondamentale, su cui si basano tutti i leganti idraulici moderni, è il cemento Portland, considerato il materiale di riferimento per edifici e infrastrutture durevoli, nonché per ambienti marini. Tuttavia, il suo processo di produzione è particolarmente dispendioso, sia perché consuma significative risorse minerali (calcare e argilla), sia perché richiede elevati consumi di energia e carburante.

A tutto ciò si aggiunge il fatto che tale processo ha un forte impatto ambientale, infatti è fonte di emissioni e di un contributo significativo di gas serra: basti pensare che ad oggi, globalmente, le compagnie produttrici di cemento realizzano circa 2 miliardi di tonnellate annue dei loro prodotti ed emettono circa 2 miliardi di tonnellate di CO₂ (1 tonnellata di CO₂ ogni tonnellata di cemento prodotta), che equivalgono al 7% dell’emissione di anidride carbonica dell’intero pianeta (Fig. 1.4) [13].

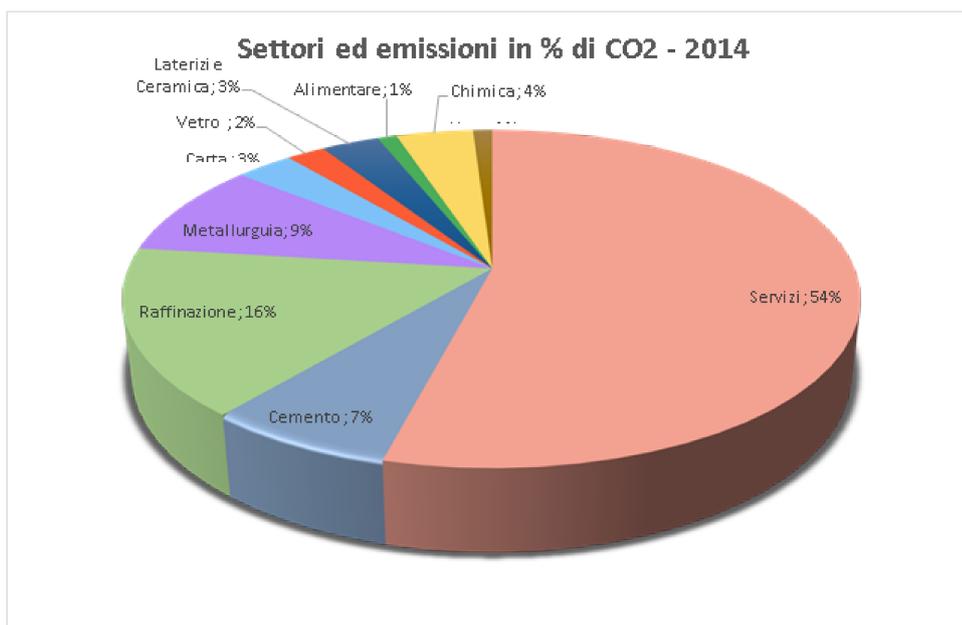


Fig. 1.4 - Emissioni di CO₂ per settori.

A tal proposito, sono in corso vari studi per migliorare la compatibilità ambientale del calcestruzzo, integrando materiali cementizi supplementari (SCM) come i sottoprodotti dei processi industriali oppure utilizzando materiali ecocompatibili, la cui sostituzione però, se effettuata in condizioni ambientali aggressive, può portare a prestazioni e durata delle strutture in calcestruzzo particolarmente critiche.

In questo quadro generale, il progetto EnDurCrete ha come principale obiettivo 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 nano/micro tecnologie e sistemi ibridi che assicurano una maggiore durabilità di strutture in calcestruzzo sostenibili con elevate proprietà meccaniche, capacità di autorigenerazione e automonitoraggio (Fig. 1.5).

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

- Nuovi cementi CEM II/C e CEM VI;
- Nuovi filler 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 per almeno il 30%.

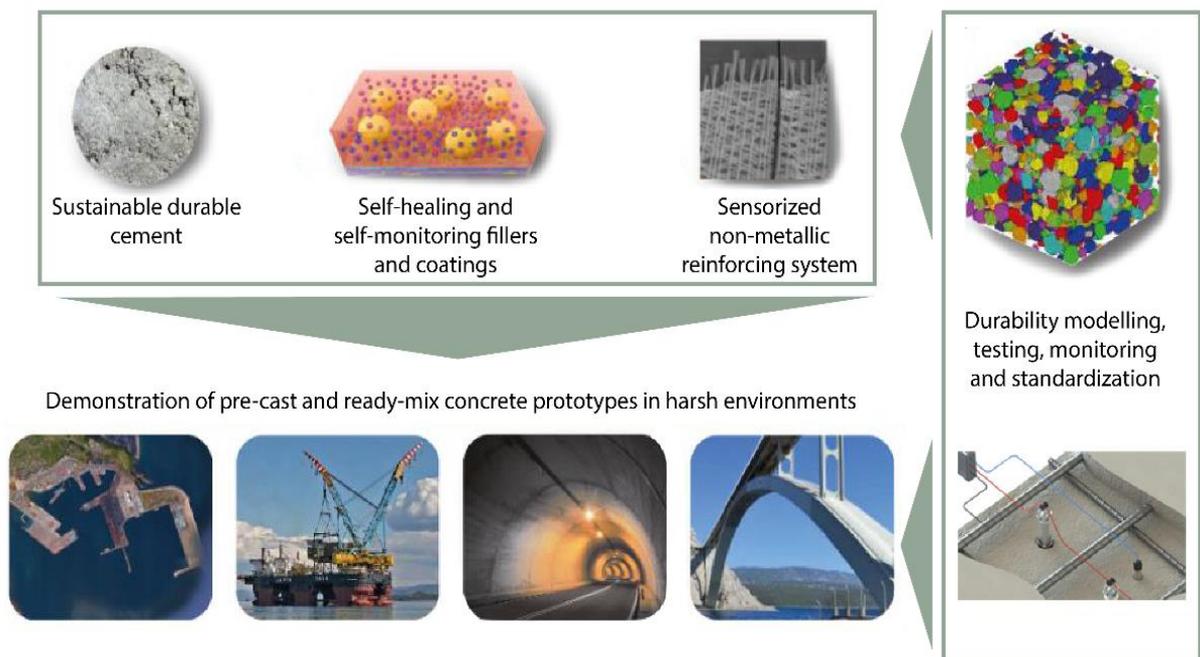


Fig. 1.5 - Concetto generale.

1.3.3 Dimostratori

I dimostratori saranno testati nei siti di lavoro di gallerie, porti e strutture offshore, al fine di dimostrare la maggiore durata (+30% = +30 anni) e la riduzione dei costi (-30%) dei nuovi sistemi di calcestruzzo in tali applicazioni critiche. Saranno condotti aspetti dell'innovazione quali standardizzazione, valutazioni del ciclo di vita, salute e sicurezza e attività di formazione (Fig. 1.6).

1. Porto di Gijón “El Musel” in Spagna;
2. Tunnel minerario situato a Leon in Spagna;
3. Ship Yard in Norvegia;
4. Ponte di Krk in Croazia.



Fig. 1.6 – Dimostratori.

1.4 Obiettivo della tesi

Il materiale studiato è stato realizzato inserendo fibre conduttive di carbonio (riciclate) e/o filler carboniosi (biochar derivante dalla pirolisi delle biomasse) all'interno di una matrice cementizia. La capacità di autodiagnosi si ottiene correlando la variazione dell'esposizione ambientale del composito con la variazione della sua resistenza elettrica.

Gli obiettivi della tesi sono sostanzialmente due:

- Il primo è stato quello di studiare il comportamento di calcestruzzi e malte

contenenti materiali elettricamente conduttivi a base di carbonio (fibre e/o filler carboniosi), che hanno il fine di aumentare la conducibilità elettrica e far diventare il materiale “self-sensing”. Nello specifico, è stato analizzato il comportamento della matrice cementizia dal punto di vista dell’impedenza elettrica (in generale, più è bassa e più il materiale è elettricamente conduttivo);

- Sapendo poi, come riportato in letteratura (Tab. 2) [14], che più il materiale è elettricamente conduttivo e più aumenta il rischio di corrosione delle barre di armatura in acciaio, il secondo obiettivo è stato quello di analizzare l’andamento della corrosione delle barre immerse nelle varie matrici, per verificare se tale rischio effettivamente aumenti oppure no. L’andamento è stato studiato sia durante il periodo di stagionatura del materiale che in un ambiente ad elevato rischio di corrosione ricco di ioni cloruro.

Tab. 2 - *Correlazione tra resistività elettrica del calcestruzzo a 20 °C e rischio di corrosione delle armature [15, 16].*

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

Bibliografia:

- [1] Fabio Sarchi. “Usi di materiali autodiagnosticanti 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Wen, S., & Chung, D. D. L. (2001). Cement-based controlled electrical resistivity materials. *Journal of electronic materials*, 30(11), 1448-1451.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] D'Alessandro A., Ubertini F., Materazzi A. L., 2016. Il calcestruzzo nanocomposito "intelligente" per il monitoraggio delle costruzioni. *Ingenio*, NO 42 p.48.
- [13] Giovanna Romanelli. “Confronto delle prestazioni di malte a base di cemento solfoalluminatico e Portland a parità di classe di resistenza”. Tesi di Laurea Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica Delle Marche, A.A. 2015/2016.
- [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.

2. Materiali

2.1 Introduzione

Il calcestruzzo è il materiale da costruzione più impiegato al mondo. È costituito da una miscela di legante idraulico (cemento), acqua e aggregati con differente granulometria (sabbia, ghiaia e ghiaio). In assenza dell'aggregato grosso (ghiaia e ghiaio) il composto viene chiamato malta.

A seconda delle necessità, oltre a questi elementi fondamentali, possono essere presenti additivi e/o aggiunte minerali che modificano le caratteristiche fisiche o chimiche, nonché le prestazioni del conglomerato, sia fresco che indurito.

2.2 Cemento

Il cemento fondamentale, definito il “padre” di tutti i cementi moderni, è il cemento Portland. Esso si ottiene tramite la cottura di una miscela di calcare e argilla, all'interno di forni, a circa 1450 °C (Fig. 2.1).

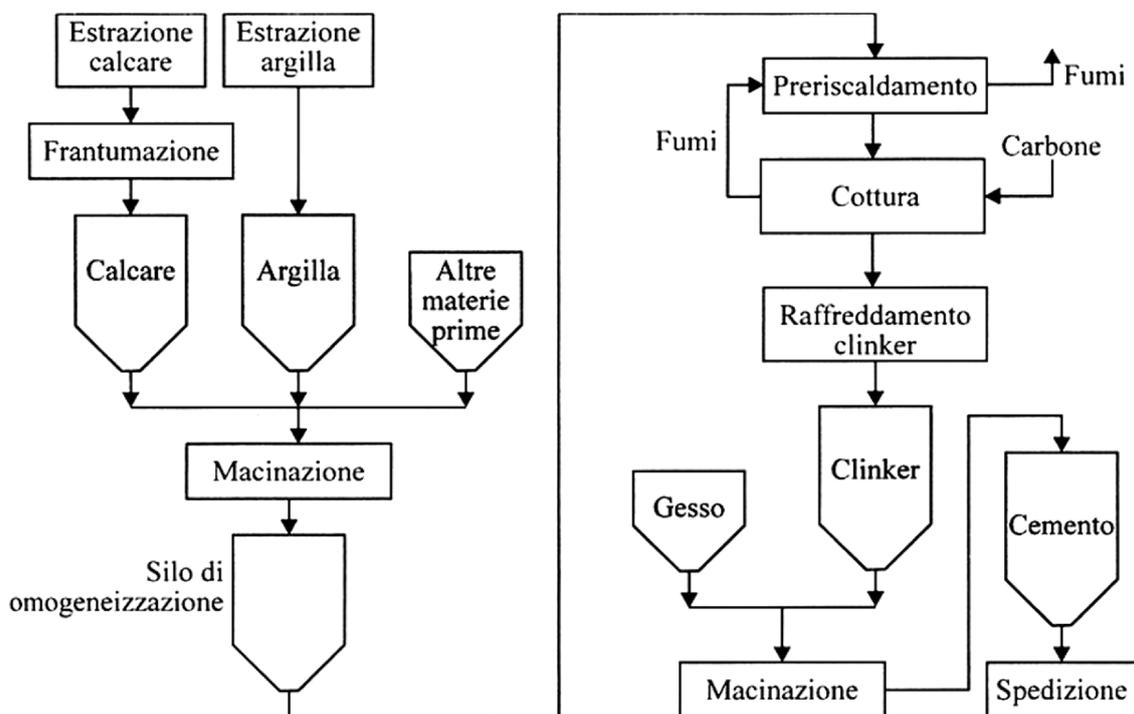


Fig. 2.1 - Processo di produzione del cemento Portland [1].

Ciò che in realtà si ottiene dalla cottura non è cemento, ma il cosiddetto clinker, cioè un materiale a forma di sferette ($\varnothing = 3-25$ mm) che costituisce la componente di maggior rilievo sul cemento Portland ($\geq 95\%$).

Poiché il clinker da solo presenterebbe dei limiti pratici di impiego nella miscelazione con acqua (presa rapida e difficoltà nella messa in opera), esso viene co-macinato con un determinato quantitativo di minerali solfatici (gesso o anidrite) nella misura del 4-8% sul cemento, che fungono da regolatori di presa. La miscela di clinker e gesso (o anidrite) è quella che viene denominata cemento Portland [2].

Oltre all'ingrediente principale, cioè il clinker di cemento Portland, 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].

Nella presente tesi è stato utilizzato un nuovo cemento, sviluppato nell'ambito del progetto EnDurCrete da Heidelberg Cement AG, con composizione percentuale e caratteristiche riservate, che non rientra nella normativa UNI-EN 197-1 (Tab. 3 - Tab. 4) con la 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. 3 - Requisiti meccanici dei cementi (Norma 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. 4 - Tipi di cementi previsti dalla normativa UNI EN 197-1 e composizione percentuale di massa.

Main types	Notation of the 27 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass ^a)										Minor additional constituents	
			Main constituents											
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone			
K	S	D ^b	P	Q	siliceous	calcareous	T	L	LL					
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silica fume cement	CEM III/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 III/A-M	80-94	←----- 6-20 ----->									0-5	
CEM III/B-M		65-79	←----- 21-35 ----->									0-5		
CEM III	Blastfurnace cement	CEM II/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B	20-34	65-90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/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 III/A-M and CEM III/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).

2.3 Acqua

L'acqua è uno dei tre protagonisti indispensabili, insieme al cemento e all'aggregato lapideo, nel processo produttivo del calcestruzzo. Senza l'acqua non si può produrre il calcestruzzo perché il cemento non si idrata e quindi non indurisce [2].

Le funzioni dell'acqua all'interno dell'impasto sono essenzialmente tre:

- Inizialmente rende plastica la miscela fresca, permettendo di modellarla;
- Reagisce con il legante ottenendo la resistenza meccanica prefissata;
- Svolge una funzione fillerizzante (chiude i pori).

Siccome il contenuto d'acqua all'interno del composto cementizio influisce notevolmente sulle sue proprietà allo stato indurito, deve essere determinato con un adeguato mix-design. Infatti, un eccessivo quantitativo di acqua comporterebbe una drastica riduzione delle caratteristiche meccaniche e della durabilità del prodotto. Viceversa, un quantitativo esiguo, potrebbe comprometterne la lavorabilità e la corretta posa in opera.

In realtà ciò che penalizza la resistenza meccanica e la durabilità del calcestruzzo non è tanto un'eccessiva quantità d'acqua, ma piuttosto un eccessivo rapporto tra acqua (a) e legante (c), definito rapporto a/c. In altre parole, si può anche aumentare la quantità di acqua, se questo serve a migliorare la lavorabilità del calcestruzzo per esigenze di getto, a patto che si aumenti in misura proporzionale la quantità di cemento in modo da lasciare immutato il rapporto a/c tra questi due ingredienti [2].

2.4 Aggregati

La pasta cementizia (cemento + acqua) è mescolata con un terzo componente lapideo, detto aggregato o inerte, in quanto non contribuisce al processo di idratazione, ma influisce notevolmente sulla resistenza meccanica del prodotto finale. Oltre ad una giustificazione prestazionale però, vi è anche un vantaggio tecnico legato all'aggregato, cioè il ritiro della pasta di cemento, che grazie all'aggiunta dell'inerte, viene diminuito proporzionalmente.

La caratteristica più evidente dell'inerte è la sua granularità, cioè il fatto che si presenta

in forma di granuli sciolti [2]. In particolare distinguiamo:

- Inerti finissimi (filler), con diametro inferiore a 0,063 mm;
- Inerti fini (sabbia), con diametro compreso tra 0,063 e 4 mm;
- Inerti grossi (ghiaia e ghiaino), con diametro superiore a 4 mm.

Non tutti gli inerti sono necessariamente idonei alla produzione del calcestruzzo o della malta. Esistono alcuni requisiti di idoneità 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 del calcestruzzo e sono contenuti nella normativa UNI EN 13055 [2].

2.4.1 Sabbia

Nella presente tesi, l'inerte utilizzato per la sperimentazione è la sabbia calcarea Esincalce 0/8, la cui densità è di $2,65 \text{ g/cm}^3$ (Fig. 2.2).



Fig. 2.2 - Sabbia Esincalce (0-8 mm).

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 saturi 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 relativi all'analisi granulometrica della sabbia (Tab. 5) e la corrispondente curva granulometrica (Fig. 2.3).

Tab. 5 - 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

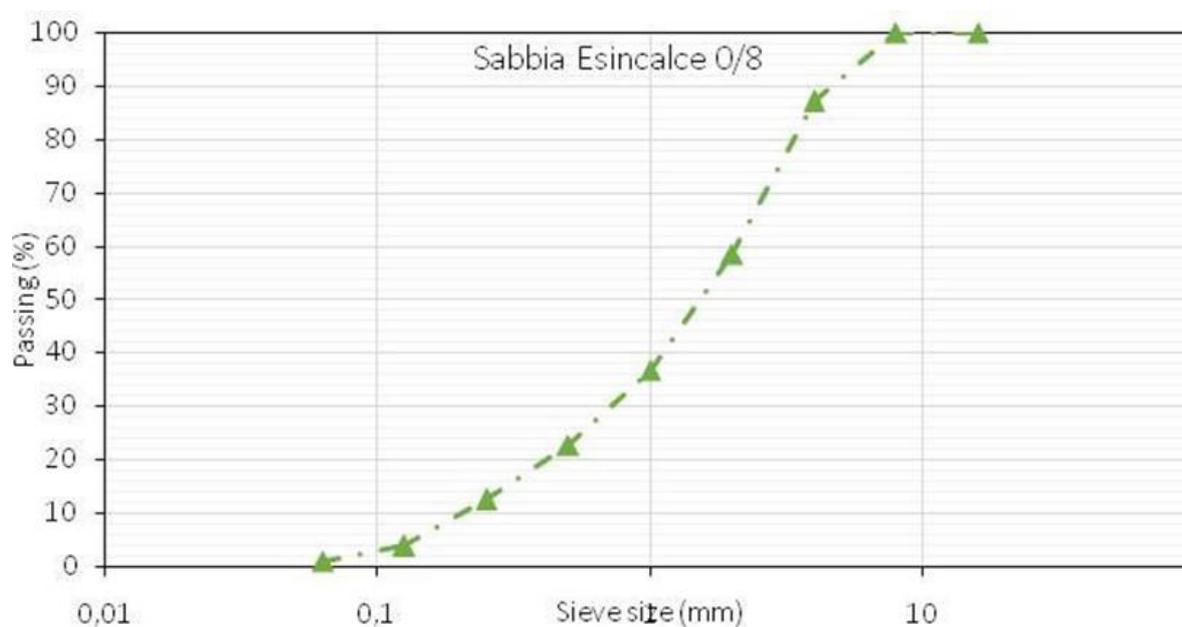


Fig. 2.3 - Curva granulometrica Sabbia Esincaice 0/8.

2.5 Additivi

Gli additivi sono prodotti chimici aggiunti, solitamente in piccole quantità, agli altri ingredienti del calcestruzzo, al fine di migliorarne una o più prestazioni [2].

I più importanti sono:

- Acceleranti;
- Ritardanti;

- Aeranti;
- Inibitori di corrosione;
- Battericidi;
- Idrofobizzanti;
- Anti-ritiro;
- Superfluidificanti;

Generalmente hanno sempre degli effetti collaterali, per cui bisogna tenerne conto non solo quando si utilizzano, ma anche quando si calcola il mix-design del calcestruzzo.

2.5.1 Additivi superfluidificanti

Sono sostanze polimeriche che si disciolgono in acqua ed esercitano un'azione disperdente dei granuli di cemento, aumentando la lavorabilità dell'impasto.

La principale proprietà degli additivi fluidificanti è quindi quella di deflocculare la pasta cementizia. Normalmente, i flocculi si creano nella pasta cementizia a causa dell'attrazione di natura elettrostatica tra i vari granuli di cemento, a seguito delle cariche elettrostatiche di segno opposto che si sono formate sulle superfici dei granuli per effetto della macinazione durante il processo produttivo del cemento [2].

Con la presenza di questi additivi, i diversi granuli sono deflocculati, cioè dispersi, a seguito di due possibili meccanismi: la repulsione elettrostatica (Fig. 2.4) o l'impedimento sterico (Fig. 2.5).

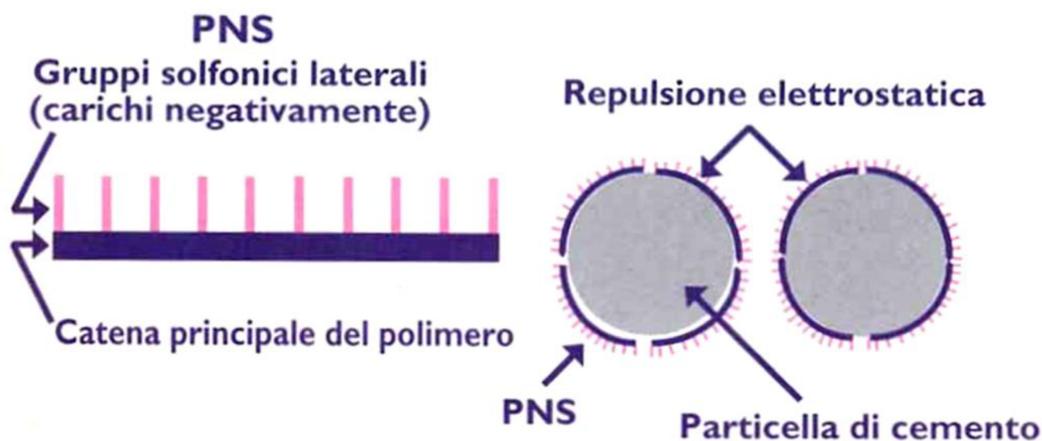


Fig. 2.4 - Deflocculazione per repulsione elettrostatica [2].

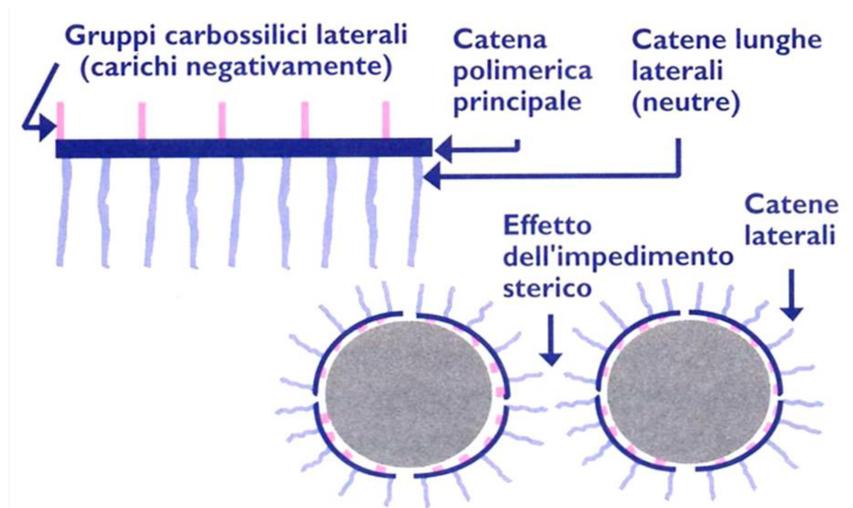


Fig. 2.5 - Deflocculazione per impedimento sterico [2].

Nella presente 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 tramite impedimento sterico.

2.6 Fibre

Le fibre sono diventate un materiale molto noto per la realizzazione del calcestruzzo fibro-rinforzato (FRC - *Fiber Reinforced Concrete*). Infatti, attraverso le fibre è possibile modificare alcune proprietà del calcestruzzo (comportamento post-fessurativo, tenacità, resistenza all'urto ecc.) ottenendo un materiale composito, cioè costituito da una matrice cementizia e da un rinforzo fibroso, con prestazioni maggiori dei calcestruzzi ordinari.

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].

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

2.6.1 Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio (FC) a struttura reticolare di grafite 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. 2.6).

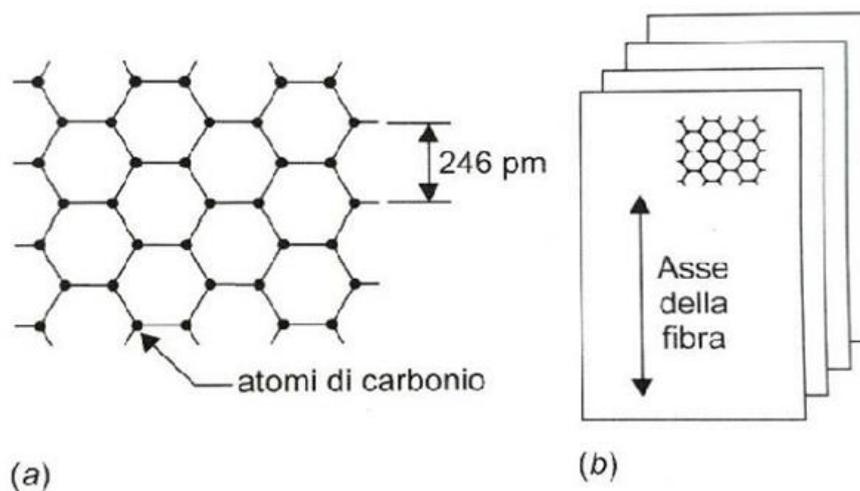


Fig. 2.6 - *Struttura grafitea delle fibre di carbonio: (a) reticolo esagonale degli atomi di carbonio nei diversi strati; (b) unità strutturale della fibra (insieme di piani paralleli all'asse della fibra).*

Le fibre di carbonio 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 poco usato), poliacrilonitrile (PAN), catrame/pece (PITCH).

Le fibre di carbonio sono disponibili in forma corta o continua. Le fibre corte si distinguono a loro volta 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) e rivestite con glicerolo (Fig. 2.7).

Le caratteristiche delle RCF sono riportate in Tab. 6.

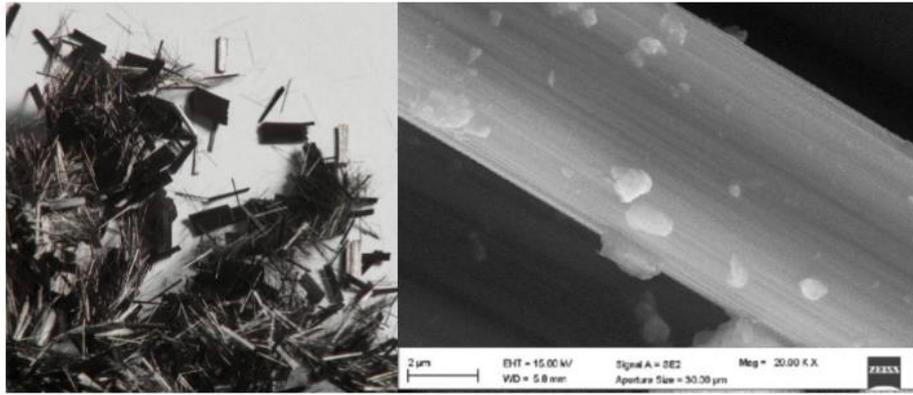


Fig. 2.7 - Fibre di carbonio riciclate (sinistra) e analisi SEM (destra).

Tab. 6 - Caratteristiche delle fibre 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

2.7 Filler carbonioso

2.7.2 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 CO₂.

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. 2.8).

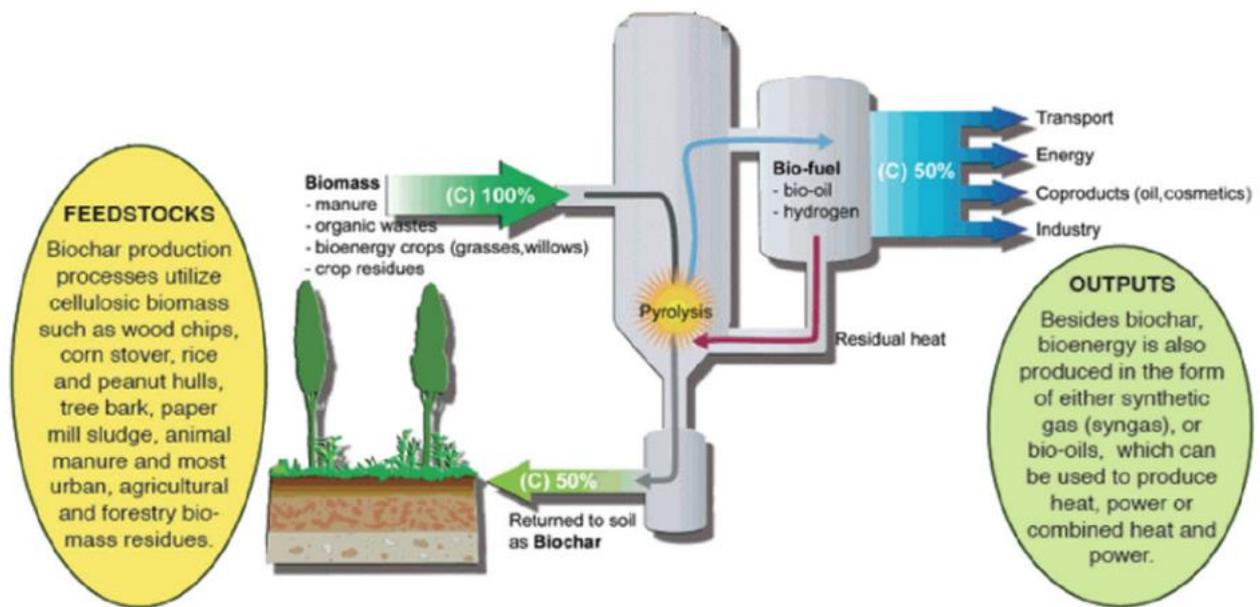


Fig. 2.8 - Processo di pirolisi lenta da cui si ottiene il biochar [4].

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. Quindi, il filler carbonioso utilizzato in questa tesi è il biochar.

Bibliografia:

- [1] V. Corinaldesi. Corso di materiali strutturali per l'Ingegneria Civile. A.A. 2018/2019.
- [2] Mario Collepari, Silvia Collepari e 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] <https://www.teasistemisrl.it/impianti-ecologici/cogenerazione-syngas/>.

3. Malte con aggiunte conduttive: mix-design e caratterizzazione meccanica

3.1 Introduzione

All'inizio le prove di corrosione sono state eseguite in ambiente non aggressivo, sia durante il periodo di stagionatura, cioè nei primi 28 giorni, che durante i successivi 28 giorni. Successivamente sono state eseguite con cicli settimanali di asciutto-bagnato in una soluzione simulante l'acqua marina (contenente 3,5% NaCl) per valutare lo stato di corrosione delle armature promosso dai cloruri.

Nella sperimentazione le prove di corrosione sono state eseguite su quattro provini di malta:

- Uno di riferimento (REF);
- Uno con aggiunta di fibre di carbonio riciclate (RCF);
- Uno con aggiunta di biochar (BCH);
- Uno con fibre di carbonio riciclate e biochar (RCF+BCH).

3.2 Impasti definitivi

3.2.1 Mix-design delle malte

Il mix-design è il “progetto della miscela”, cioè il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili (cemento, inerti, additivi) [1].

La malta è stata realizzata con un cemento CEM II/C-M (S-LL) (EDC-D), una sabbia Esincafce 0/8 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 un rapporto a/c = 0,50 e un rapporto i/c (inerte/cemento) = 3, con classe di lavorabilità plastica.

Nella Tab. 7 sono riportate le composizioni delle malte per le prove di corrosione.

Tab. 7 – Mix-design delle malte realizzate per le prove di corrosione.

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	208	254	1523	2,78	10,17	-
RCF+BCH	208	254 </td <td>1522</td> <td>2,78</td> <td>10,16</td> <td>0,917</td>	1522	2,78	10,16	0,917

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 altezza 12,5 cm (Fig. 3.1).

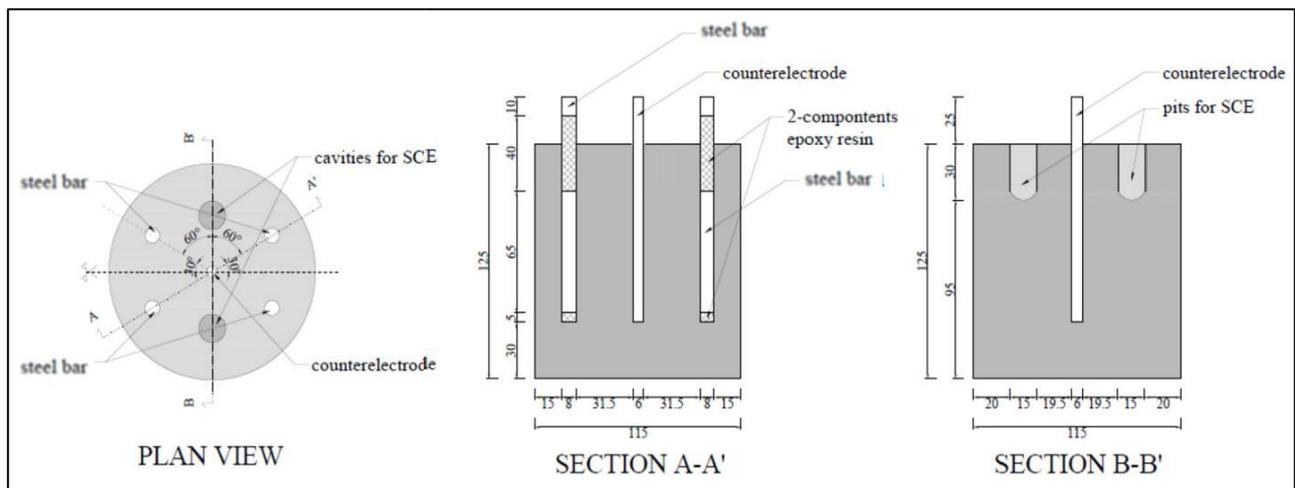


Fig. 3.1 - Dimensione dei provini cilindrici.

I campioni sono stati realizzati impiegando un tubo e due coperchi in PVC come cassaforma per il getto. Per realizzare la base del cassero, invece, sono stati uniti il coperchio e il tubo in PVC mediante il silicone per ottenere una cassaforma stagna impedendo così la fuoriuscita della malta cementizia verso l'esterno durante e dopo il getto (Fig. 3.2).



Fig. 3.2 - *Tubo in PVC sigillato.*

Sul coperchio superiore sono stati fatti dei fori per l'alloggiamento, durante il getto, delle quattro barre di armatura 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 e per due ulteriori elettrodi di riferimento in titanio.



Fig. 3.3 - *Elettrodo di riferimento al calomelano.*

Sono stati creati due alloggiamenti per l'elettrodo SCE di riferimento (Fig. 3.3) durante le prove di corrosione. In totale sono stati praticati nove fori, tutte le barre e gli elettrodi di riferimento sono stati fissati al coperchio superiore mediante degli anelli di

elastomero, così da impedirne la mobilità (Fig. 3.4). Per creare l'alloggiamento per l'elettrodo di riferimento al calomelano saturo (SCE) sono state utilizzate due provette.



Fig. 3.4 - Assemblaggio delle barre di armatura, degli elettrodi di riferimento e dei controelettrodi al coperchio superiore del campione.

Le barre di armatura, prima di essere inserite nei fori di alloggiamento, sono state isolate mediante una resina epossidica bicomponente in modo da delimitare su di esse un'area di misurazione di 16 cm² (Fig. 3.5).



Fig. 3.5 - Barre di armatura resinata.

Sono stati aggiunti due ulteriori fori per l'inserimento di altri elettrodi di riferimento in titanio (Fig. 3.6) con lo scopo di verificare se la differenza di misurazione con i due elettrodi di riferimento dipenda anche dalla caduta ohmica nella matrice cementizia.

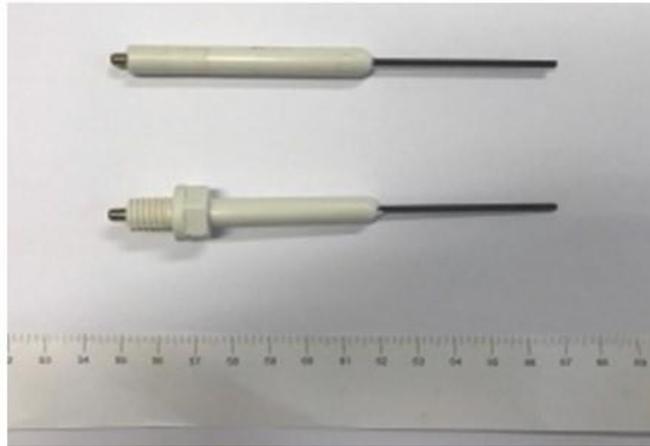


Fig. 3.6 - *Elettrodi di riferimento in titanio.*

3.2.3 Miscelazione degli ingredienti

La miscelazione prevede il mescolamento dei vari ingredienti fino ad ottenere un composto omogeneo. Le attrezzature utilizzate sono riportate in Fig. 3.7.



Fig. 3.7 - *Attrezzatura utilizzata per la miscelazione.*

La tecnica d'impasto utilizzata è quella indicata nella norma UNI EN 196-1. Inizialmente si mescolano la sabbia Esincalce con le fibre di carbonio e/o il biochar, se previsti, distribuendoli in modo uniforme. Si aggiungono poi il cemento, l'acqua e l'additivo, mescolando il tutto con l'ausilio di un trapano miscelatore per ogni aggiunta di materiale.

Gli impasti dopo l'aggiunta del superfluidificante si presentano molto lavorabili (Fig. 3.8).



Fig. 3.8 - Lavorabilità della malta di riferimento dopo l'aggiunta del superfluidificante.

3.2.4 Esecuzione del getto

Il composto ottenuto è stato versato negli appositi casseri e vibrato manualmente in modo da costipare la malta e ridurre la presenza di bolle d'aria al suo interno.

Oltre al campione cilindrico utilizzato per le prove di corrosione, per ogni getto sono stati realizzati tre provini di dimensioni 4x4x16 cm per le prove di resistenza meccanica e altri tre provini, delle stesse dimensioni, dotati di piolini per le prove di impedenza elettrica (Fig. 3.9).



Fig. 3.9 - Casseforme utilizzate per il getto delle malte.

In Tab. 8 sono riportati il numero e le dimensioni dei provini 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	(0,04x0,04x0,16) m	24
	1	1	1	1	Diametro 0,115 m Altezza 0,125 m	4

I casseri prima di accogliere l'impasto sono stati opportunamente trattati con un disarmante in modo tale da semplificare la scasseratura. L'impasto è stato poi versato negli appositi casseri e la superficie è stata rasata per rimuovere il materiale in eccesso ed ottenere provini uniformi (Fig. 3.10).

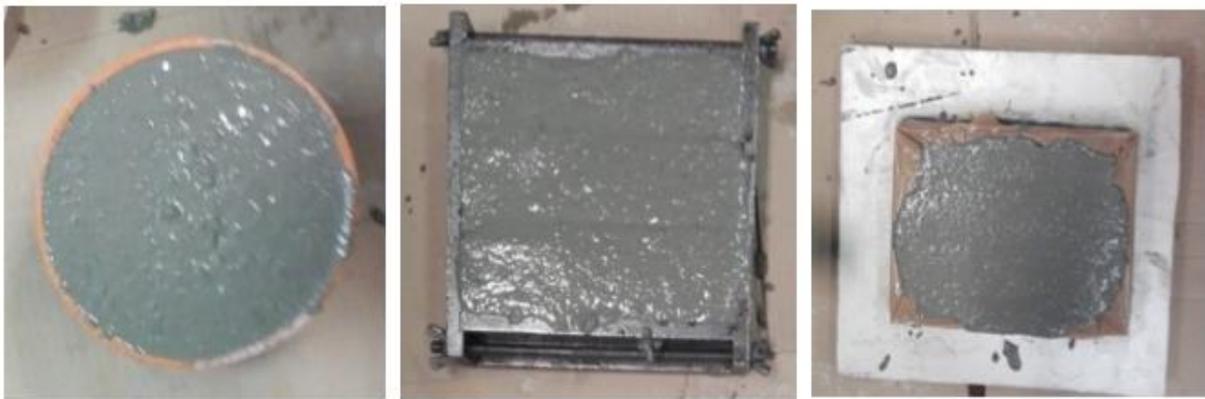


Fig. 3.10 - Rasatura della malta.

Dopo la rasatura, si inserisce il coperchio superiore al provino cilindrico (Fig. 3.11).

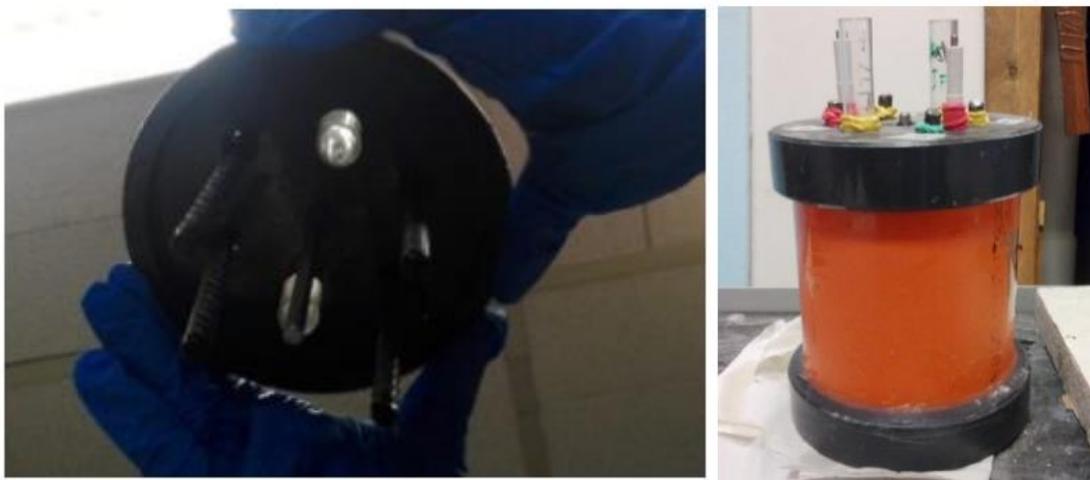


Fig. 3.11 - Inserimento del coperchio superiore del campione cilindrico per le prove di corrosione.

Infine, i provini sono stati 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.

La scasseratura dei provini è avvenuta 7 giorni dopo il getto (Fig. 3.12).



Fig. 3.12 - Provini dopo la scasseratura.

3.3 Caratterizzazione meccanica delle malte

3.3.1 Introduzione

La resistenza meccanica (R) è il massimo sforzo σ che un materiale, in forma di provino, è in grado di sopportare prima della rottura. A seconda che lo sforzo applicato sia a compressione (σ_c) o a flessione (σ_f), si parlerà di resistenza meccanica a compressione (R_c) o a flessione (R_f) [1].

In questa sperimentazione sono state effettuate prove di flessione e compressione, in accordo con la UNI EN 1015-11, su provini prismatici di dimensione 4x4x16 cm realizzati per tutte le miscele. Le prove sono state eseguite a 1, 7 e 28 giorni dal getto.

3.3.2 Resistenza meccanica a flessione

Dalla prova si ottiene la tensione massima a flessione (F) del provino, e si può ricavare la resistenza a flessione (R_f) mediante la seguente 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 (100 mm);
- b è la larghezza del provino (40 mm);
- h è l'altezza del provino (40 mm).

In Fig. 3.13 sono riportati i valori dei risultati ottenuti attraverso la prova a flessione per ogni tipologia di malta.

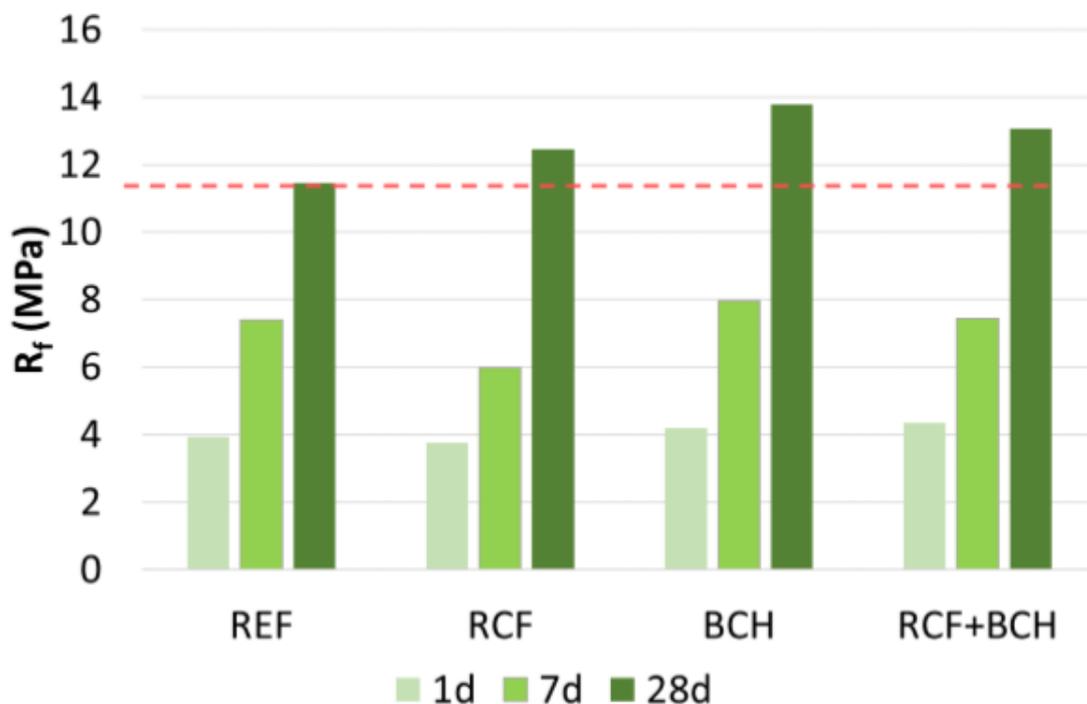


Fig. 3.13 - Resistenza meccanica a flessione.

Dal grafico si osserva che la resistenza meccanica a flessione aumenta all'aumentare del tempo di stagionatura per ogni miscela. Tutti i campioni contenenti aggiunte conduttive (RCF, BCH, RCF+BCH) presentano una resistenza a flessione maggiore

rispetto la miscela di riferimento (REF). Tra le tre, quella che ha il valore più alto di resistenza a flessione è la miscela con l'aggiunta del biochar (BCH).

3.3.3 Resistenza meccanica a compressione

Conoscendo la forza di rottura applicata durante la prova e l'area su cui è applicato il carico, si può determinare la resistenza meccanica a compressione (R_c) grazie alla formula:

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

dove:

- R_c è la resistenza a compressione [MPa];
- 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.

In Fig. 3.14 sono riportati i risultati ottenuti dalla prova a flessione per ogni provino.

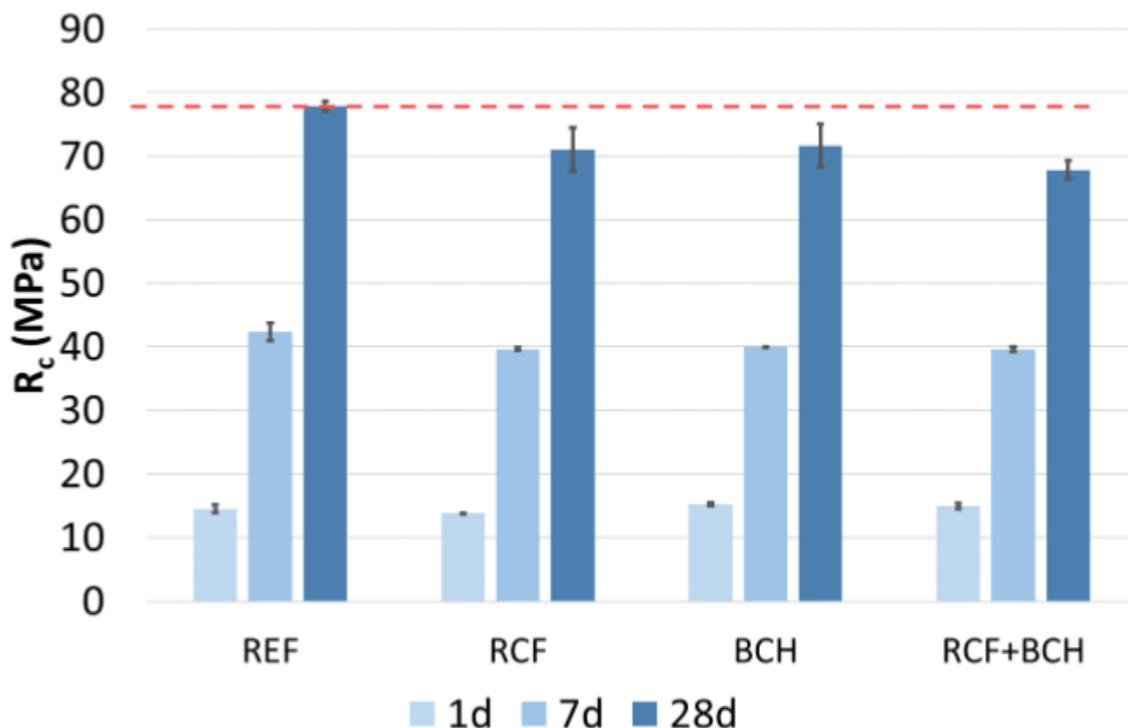


Fig. 3.14 - Resistenza meccanica a compressione.

Anche da questa prova si osserva che la resistenza meccanica a compressione aumenta all'aumentare del tempo di stagionatura per ogni miscela testata.

Contrariamente a quanto avviene per la resistenza meccanica a flessione, però, in questo caso è il provino di riferimento REF a registrare una resistenza a compressione maggiore, mentre tutti e tre i provini con aggiunte conduttive hanno dei valori inferiori ad esso.

Il minimo valore di resistenza a compressione è stato registrato nel provino realizzato con la combinazione di fibre e filler nella malta RCF+BCH, che comunque mostra una R_c superiore a 65 MPa.

Bibliografia:

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

4. Corrosione delle armature metalliche

4.1 Introduzione

La durabilità di una struttura è definita come la capacità dell'opera di conservare la propria funzionalità per la vita utile di progetto.

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 delle condizioni ambientali del sito dove sorgerà la costruzione. A tale scopo, la norma UNI-EN 206 prevede 6 classi di esposizione ambientale (XO, XC, XD, XS, XF ed XA), per ciascuna delle quali esistono più sottoclassi, che aiutano il progettista, in fase di progetto, nella scelta del calcestruzzo migliore.

Tab. 9 - Classi di esposizione secondo la UNI-EN 206 [1].

Classe di esposizione	Ambiente	Tipo di struttura	Numero di sottoclassi
XO	Nessun rischio di corrosione (interni di edifici con UR molto bassa)	Non armata e armata	1
XC	Corrosione delle armature promossa dalla carbonatazione	Armata	4
XD	Corrosione delle armature promossa dai cloruri esclusi quelli presenti in acqua di mare	Armata	3
XS	Corrosione delle armature promossa dai cloruri dell'acqua di mare	Armata	3
XF	Degrado del calcestruzzo per cicli di gelo-disgelo	Non armata e armata	4
XA	Attacco chimico del calcestruzzo (incluso quello promosso dall'acqua di mare)	Non armata e armata	3

Un calcestruzzo, correttamente confezionato e messo in opera, possiede un $\text{pH} > 13$ e quindi rappresenta un ambiente a forte basicità favorevole alla buona conservazione delle armature metalliche. Infatti, dalla termodinamica sappiamo che quando il ferro si trova esposto in un ambiente alcalino ($7 < \text{pH} < 14$) non si corrode, ma il fenomeno

che si genera è la passivazione. La passivazione consiste nella formazione di un sottilissimo film di ossido impermeabile e adesivo che riveste le armature e ne impedisce la corrosione.

Con il passare del tempo, però, il calcestruzzo può perdere le sue caratteristiche protettive e di conseguenza può attivarsi il processo corrosivo a causa di uno dei due seguenti meccanismi:

- Carbonatazione del calcestruzzo: l'alcalinità del calcestruzzo può essere neutralizzata dalla CO_2 proveniente dall'ambiente esterno, per cui il pH della matrice cementizia scende a valori inferiori di 9 ed il ferro perde la sua passività (depassivazione), cioè è in grado di subire la corrosione (Fig. 4.1).
- Penetrazione del cloruro: in presenza di sali disgelanti o in acque marine, gli ioni Cl^- possono penetrare nella matrice cementizia fino a raggiungere le barre di armatura. Raggiunta una certa concentrazione critica 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 sulla superficie delle armature, avviene il processo corrosivo che consiste nella trasformazione dell'acciaio in ruggine (Fig. 4.1).

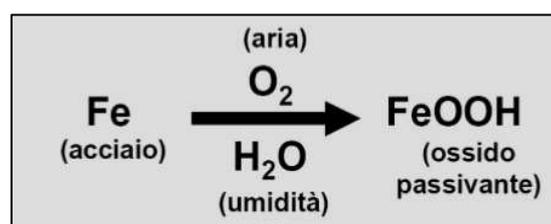


Fig. 4.1 - Processo corrosivo [2].

L'importanza del pH è stata dimostrata da Pourbaix attraverso il diagramma potenziale/pH: è un grafico dove lungo l'asse delle ordinate è riportato il potenziale elettrico Eh, nell'asse delle ascisse il pH e all'interno del grafico ci sono due rette tratteggiate che corrispondono alla reazione di riduzione dell'ossigeno (la più alta) e dell'idrogeno (la più bassa).

Il diagramma di Pourbaix esiste per ogni metallo della tavola periodica ed è di fondamentale importanza perché definisce quali sono i valori del potenziale e del pH per i quali la specie studiata è stabile termodinamicamente, si corrode o si passiva.

In altre parole, il diagramma consente di 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.

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.

In Fig. 4.2 è riportato il diagramma di Pourbaix per il ferro.

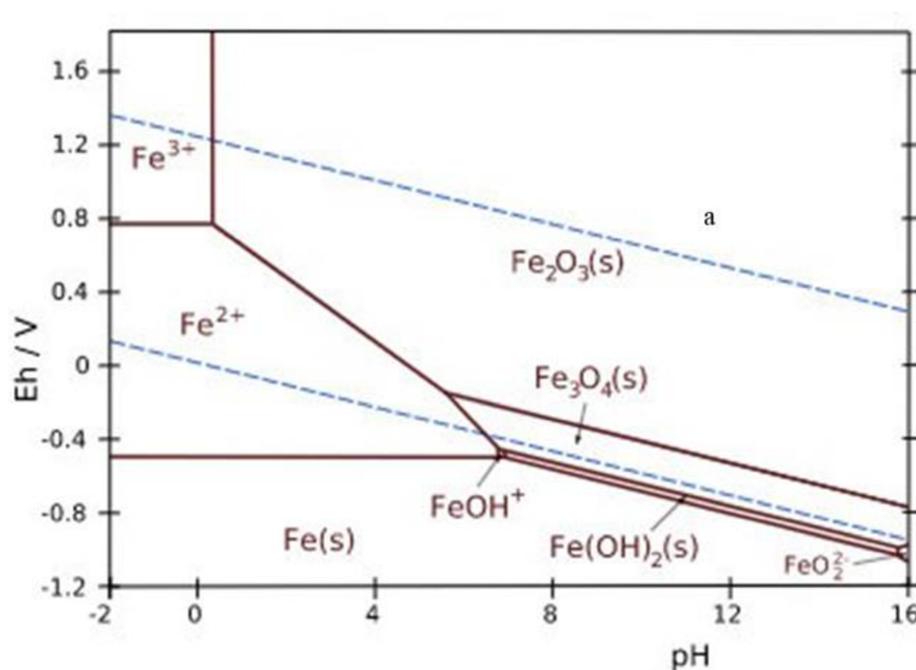


Fig. 4.2 - Diagramma di Pourbaix per il ferro.

Come si può osservare, la corrosione è possibile in due regioni, a bassi ed alti pH con formazione rispettivamente di Fe^{2+} (o di Fe^{3+} a più alti potenziali) e $HFeO_2^-$ (Fig. 4.3). Il ferro è stabile a bassi potenziali (zona di immunità) e può 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 [2].

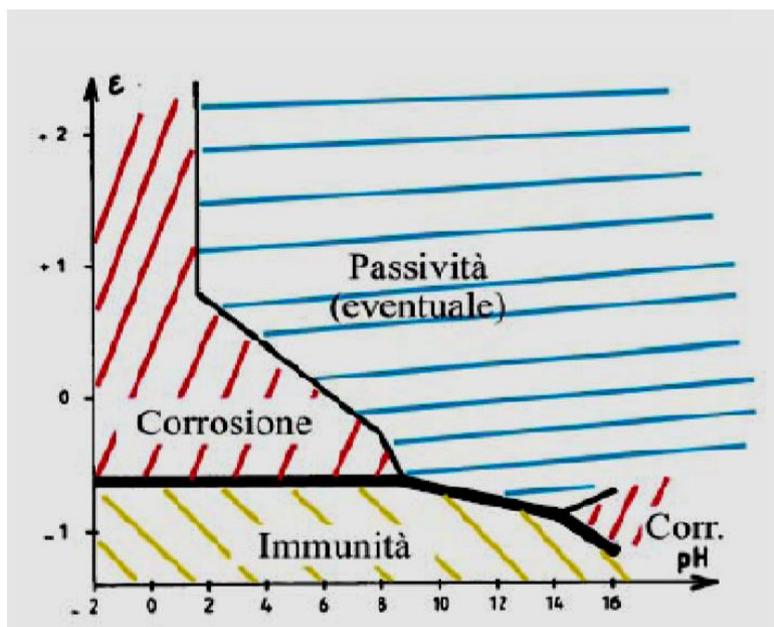


Fig. 4.3 - Zone di corrosione - passività - immunità nel diagramma di Pourbaix [3].

4.2 Processo elettrochimico

La corrosione è un processo elettrochimico formato da due semi reazioni (un processo anodico e uno catodico) a cui si sommano due trasporti di cariche, quello degli elettroni nel metallo e quello degli ioni nell'elettrolita a contatto con esso (Fig. 4.4).

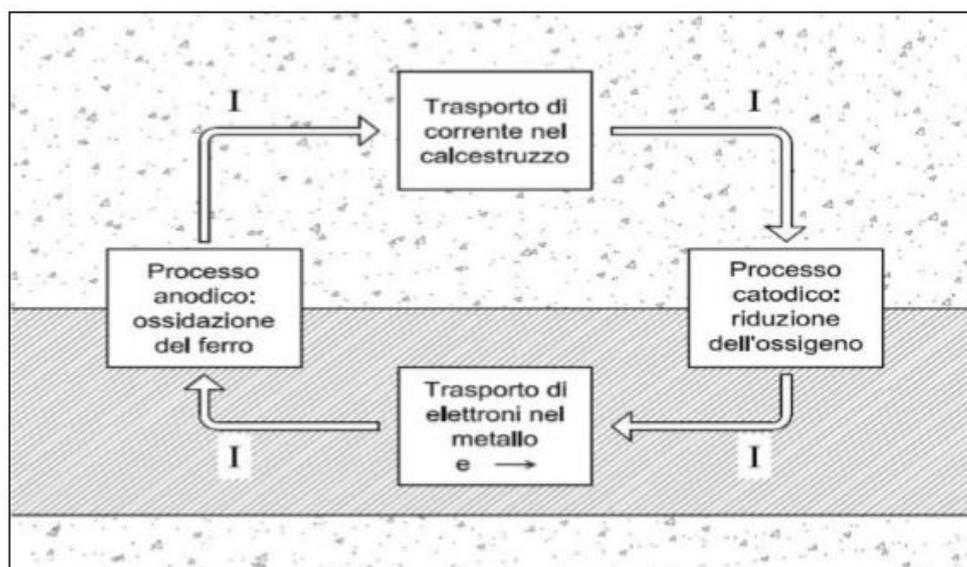


Fig. 4.4 - Schema dei processi parziali del processo di corrosione.

In pratica, il metallo si ossida sulla superficie e va in soluzione sotto forma di ioni (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 solo se avviene una semi-reazione complementare, cioè la reazione catodica, la quale consiste nella reazione degli elettroni in eccesso prodotti dalla semi-reazione anodica con qualche sostanza riducibile presente sulla superficie (generalmente l'ossigeno).

I processi sono (Fig. 4.4):

- Processo anodico (o di ossidazione), in cui avviene l'ossidazione del metallo che forma i prodotti della corrosione e libera elettroni nel metallo, secondo la formula: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$;
- Processo catodico, in cui abbiamo una riduzione dell'ossigeno e produzione dell'alcalinità, secondo la formula: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$;
- Trasporto degli elettroni all'interno della fase metallica dalla zona anodica dove sono prodotti alla regione catodica dove vengono consumati;
- Trasporto di corrente all'interno del calcestruzzo, portata questa volta dagli ioni, dalla regione anodica a quella catodica, che mi permette di chiudere il circuito.

4.3 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.

4.3.1 Misura del potenziale di corrosione

La misura del potenziale di corrosione 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 [4].

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 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. 4.5).

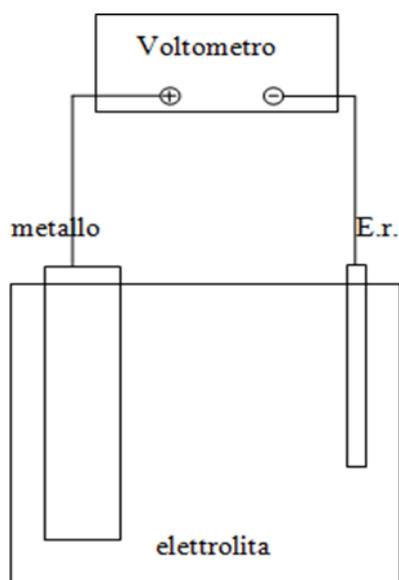


Fig. 4.5 - Schema di collegamento per la misura del potenziale.

L'elettrodo di riferimento maggiormente utilizzato è l'elettrodo al calomelano saturo (SCE) (Fig. 4.6).

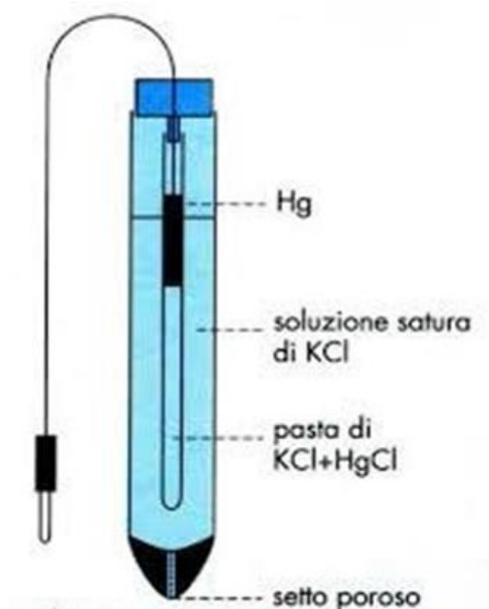


Fig. 4.6 – Elettrodo di riferimento al calomelano saturo (SCE).

L'elettrodo è formato da un involucro in cui è presente mercurio in equilibrio con il cloruro di mercurio. L'elettrodo 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) [1].

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

4.3.2 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 utilizzano un terzo elettrodo esterno con la funzione di erogare corrente per alterare le condizioni di corrosione del metallo, consentendo di risalire alla velocità di corrosione. Per l'erogazione della corrente si utilizza un potenziostato che è in grado di imporre un determinato potenziale al metallo, facendo circolare la corrente necessaria per la polarizzazione (Fig. 4.7).

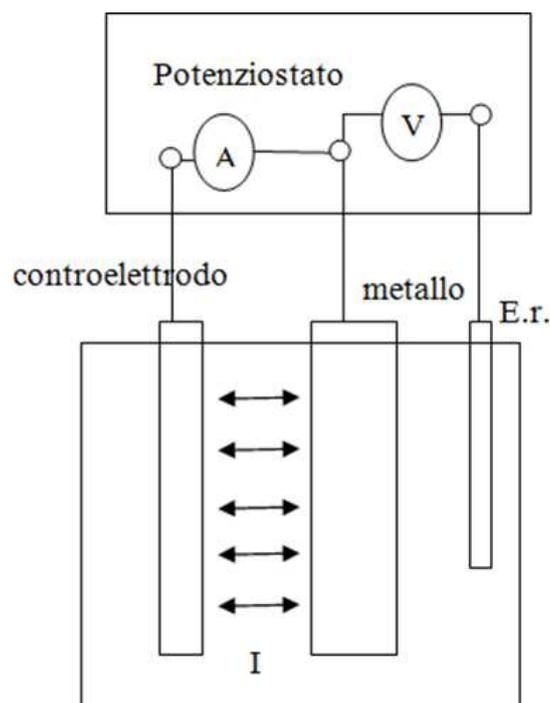


Fig. 4.7 - Schema di collegamento del circuito.

4.3.3 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 più utilizzato per determinare la velocità di corrosione è il metodo elaborato da Stern e Geary, detto metodo della resistenza di polarizzazione.

È una tecnica indiretta che consente di ottenere delle "curve di polarizzazione" (Fig. 4.8 - Fig. 4.9) di un metallo da dove si possono ricavare la resistenza di polarizzazione e la velocità di corrosione.

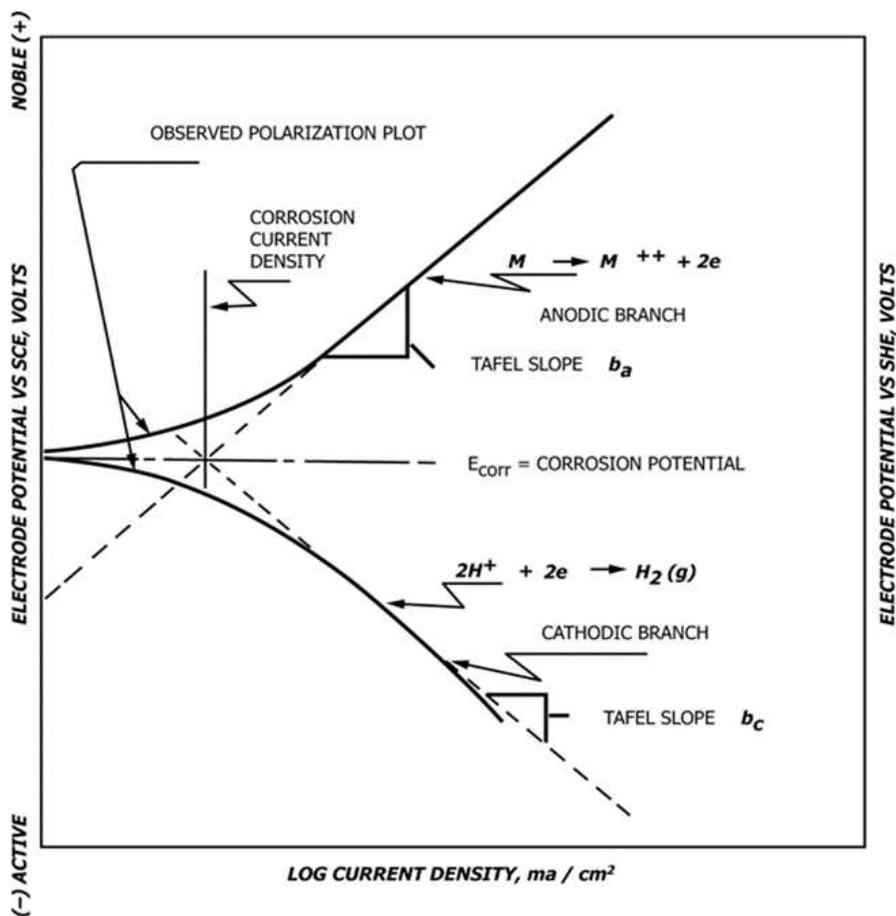


Fig. 4.8 - Curva di polarizzazione in scala logaritmica.

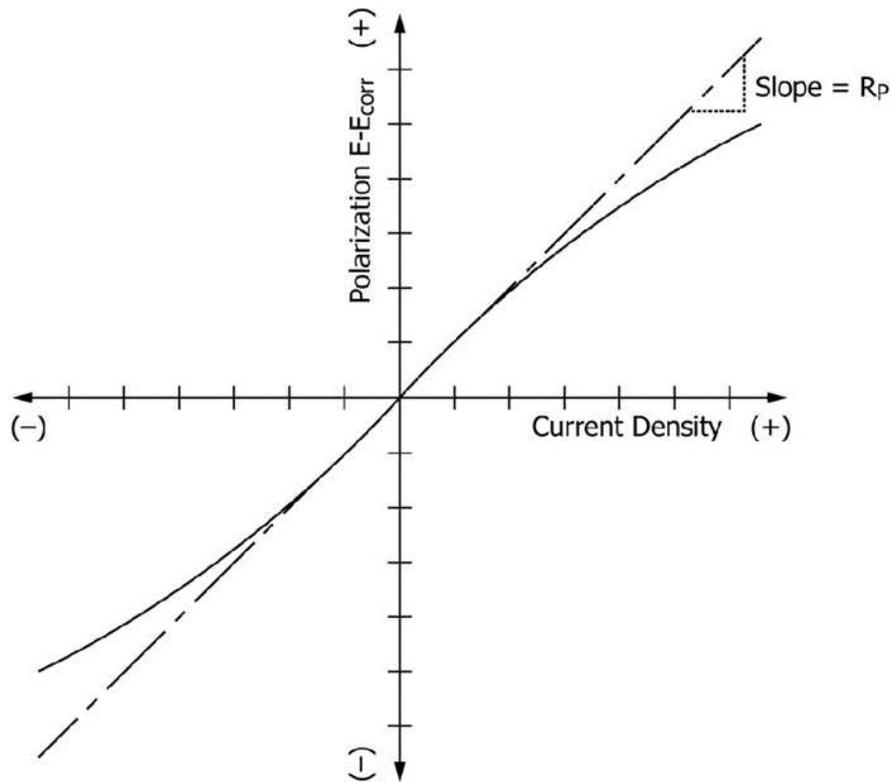


Fig. 4.9 - Curva di polarizzazione lineare.

Il metodo di misura 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 [4, 5].

Il metodo della polarizzazione lineare 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 in Fig. 4.9.

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

4.4 Proprietà elettriche di calcestruzzi e malte

4.4.1 Introduzione

La proprietà fondamentale che deve possedere un materiale cementizio “self-sensing” è la capacità di condurre energia elettrica. Tale proprietà si può ottenere aggiungendo,

all'interno della matrice cementizia, materie prime conduttive con ottime proprietà elettriche. Per sfruttare la proprietà di automonitoraggio del materiale, si esamina la sua capacità di opporsi al flusso di corrente elettrica. Possiamo avere due diversi casi:

- Analisi in corrente continua, in cui la valutazione avviene tramite la misurazione della resistenza elettrica del materiale;
- Analisi in corrente alternata, dove si va a misurare l'impedenza elettrica.

Nel presente lavoro di tesi le misurazioni sono state eseguite in corrente alternata. L'impedenza elettrica (Z) è definita dalla seguente equazione:

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

dove:

- Z_{Re} è la parte reale dell'impedenza elettrica [Ω];
- Z_{Im} è la parte immaginaria dell'impedenza elettrica [Ω];
- i è l'unità immaginaria ($i^2 = -1$).

Quando viene misurata l'impedenza elettrica, il materiale da testare viene eccitato e viene rilevata 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 a 4 elettrodi hanno funzioni separate, cioè due 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.

4.4.2 Metodo di rilevazione

Lo strumento utilizzato per la misurazione dell'impedenza elettrica è il potenziostato/galvanostato Reference 600 (Gamry [16]) (Fig. 4.10).



Fig. 4.10 - Potenziostato/galvanostato Reference 600 (Gamry).

Le misurazioni dell'impedenza elettrica sulle malte sono state eseguite in corrente alternata con 4 elettrodi (metodo di Wenner [17]). In particolare [18]:

- 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 due 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, in un intervallo di frequenza compreso tra 1 e 100 kHz. Nella fase di elaborazione dei dati, sono stati considerati valori di singola frequenza (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 scelta la frequenza a 10 kHz per il confronto dei dati tra i diversi provini visto che le curve alle varie frequenze mostrano andamenti simili.

La configurazione della prova per la misura dell'impedenza elettrica è riportata nella Fig. 4.11.

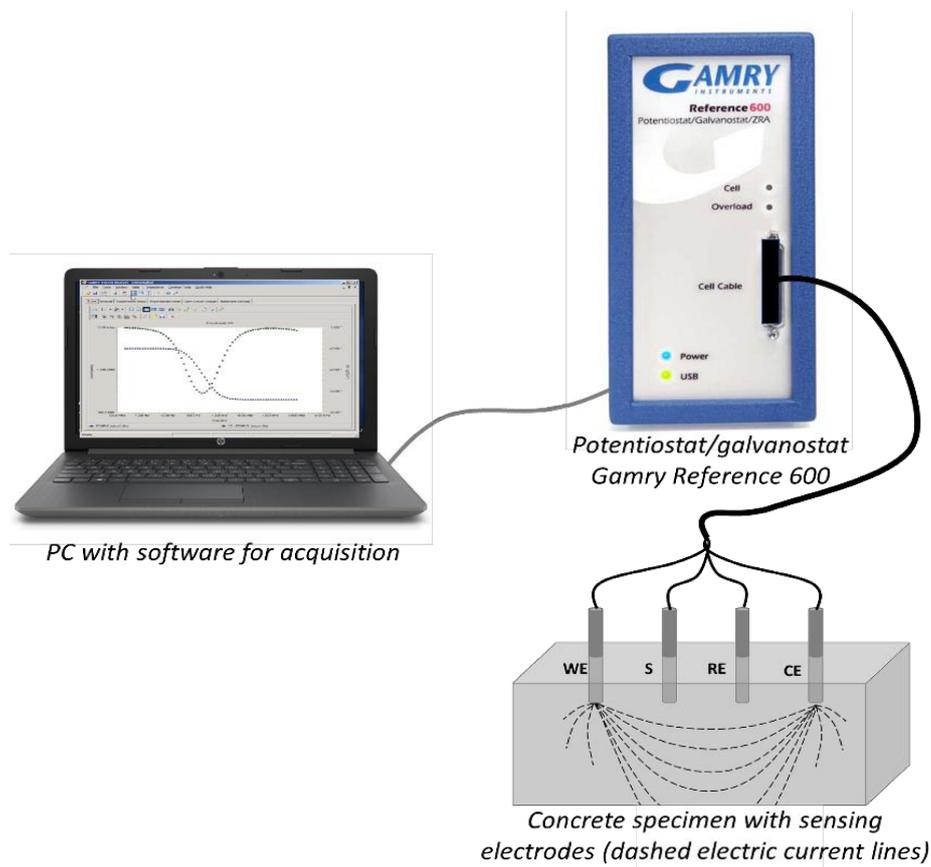


Fig. 4.11 - Strumentazione di laboratorio utilizzata per la misura dell'impedenza elettrica.

Bibliografia:

- [1] Mario Collepari, Silvia Collepari and Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo. EncoSrl. 2014.
- [2] Corrosione e protezione dei materiali Pietro Pedferri, Anno Accademico 2004-05 - Corso di laurea in 'Ingegneria dei Materiali'
- [3] <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/426772>
- [4] Pietro Pedferri e Luca Bertolini. La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali. Città Studi Edizioni.
- [5] Normativa ASTM G3-14.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] P. Azarsa and R. Gupta, 'Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review', Advances in Materials Science and Engineering, 2017.
- [10] S. E. S. Mendes, R. L. N. Oliveira, C. Cremonez, 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.
- [11] J. Tanesi and A. Ardani, 'Surface Resistivity Test Evaluation as an Indicator of the Chloride Permeability of Concrete', TechBrief, Dec. 2012.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] K. Ostermiski, R. B. Polder, and P. Schießl, ‘Long term behaviour of the resistivity of concrete’, *Heron* 57 2012 3, 2012.
- [16] ‘Reference 600’. [Online]. Available: <https://www.gamry.com/support/legacy-devices/reference600-legacy/>. [Accessed: 28-Oct-2019].
- [17] F. Wenner, ‘A method for measuring Earth resistivity’, *J. Wash. Acad. Sci.*, vol. 5, no. 16, pp. 561– 563, 1915.
- [18] T.-C. Hou, ‘Wireless and Electromechanical Approaches for Strain Sensing and Crack Detection in Fiber Reinforced Cementitious Materials.’, PhD thesis, University of Michigan, 2008.

5. Prove in condizioni ambientali

5.1 Prove elettriche sulle malte

Le prove elettriche sulle 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. 5.1 è riportato l'andamento dell'impedenza elettrica (a 10 kHz di frequenza) per ogni tipologia di malta realizzata.

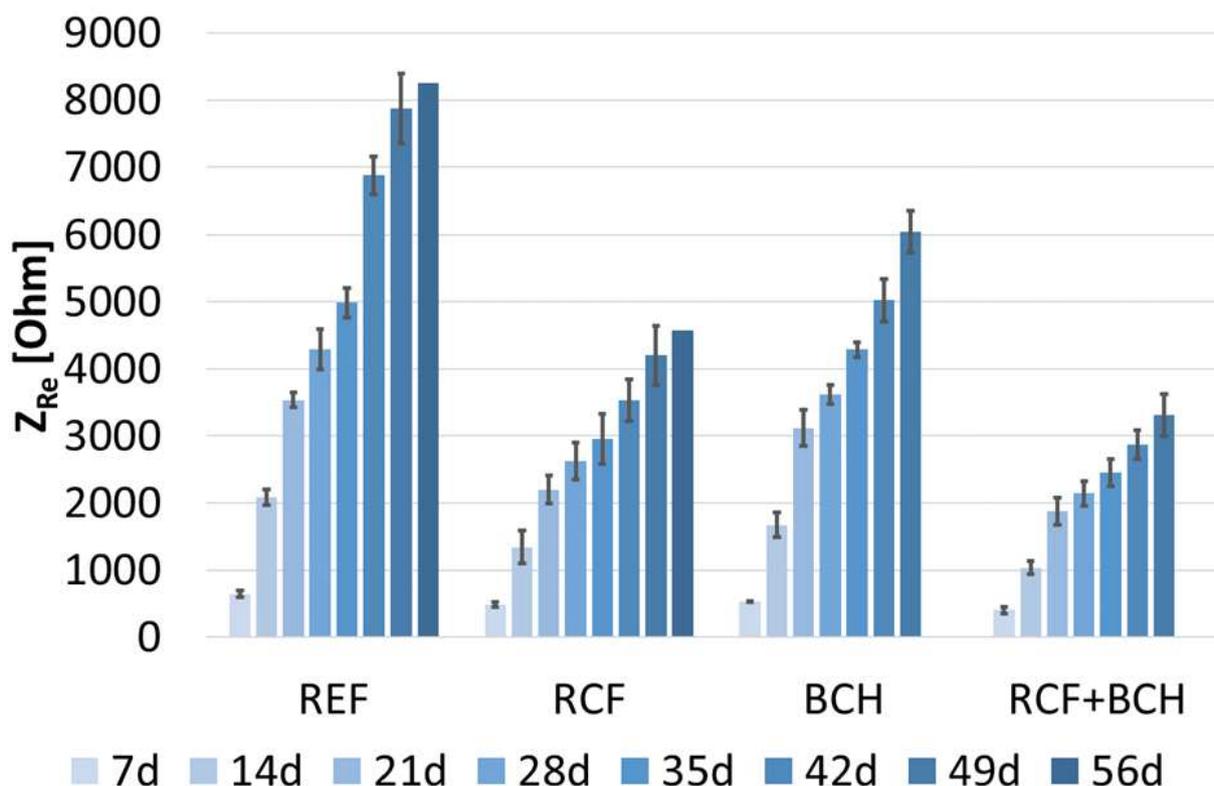


Fig. 5.1 - Impedenza elettrica (a 10 kHz) misurata sui campioni di malta.

Dai risultati si nota che l'impedenza aumenta all'aumentare del tempo di stagionatura in tutte e quattro le miscele. Questo effetto è dovuto alla progressiva idratazione della malta e alla contemporanea evaporazione dell'acqua di impasto.

Le tre miscele con aggiunte conduttive hanno un'impedenza minore rispetto alla malta di riferimento REF (senza aggiunte conduttive), che quindi risulta quella con la

conducibilità elettrica minore.

Il materiale migliore dal punto di vista elettrico, invece, risulta essere quello con la combinazione fibre e biochar (RCF+BCH), poiché presenta ad ogni misurazione un valore di impedenza elettrica minore rispetto a tutte le altre malte analizzate.

5.2 Prove di corrosione sulle malte

5.2.1 Metodo di misurazione della corrosione

Lo strumento utilizzato per le prove di corrosione è il potenziostato/galvanostato Autolab PGSTAT 204 [1]. Lo strumento è collegato al provino mediante tre morsetti: uno collegato all'elettrodo di riferimento, uno al contro elettrodo e l'altro alla barra in acciaio da analizzare (Fig. 5.2).

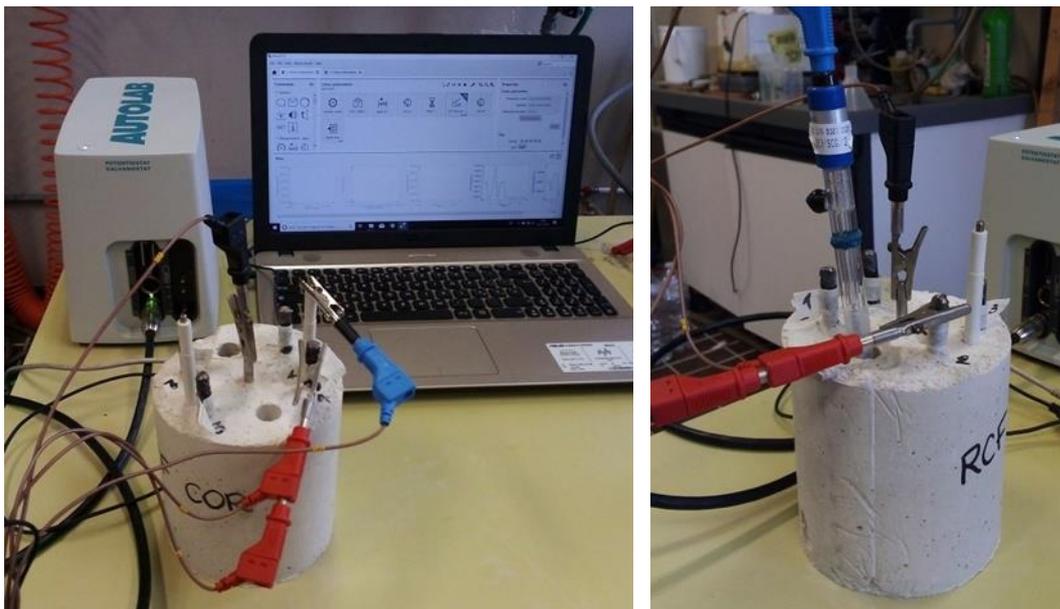


Fig. 5.2 - Strumentazione utilizzata per le prove di corrosione e collegamenti con il provino da testare.

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. 5.3).

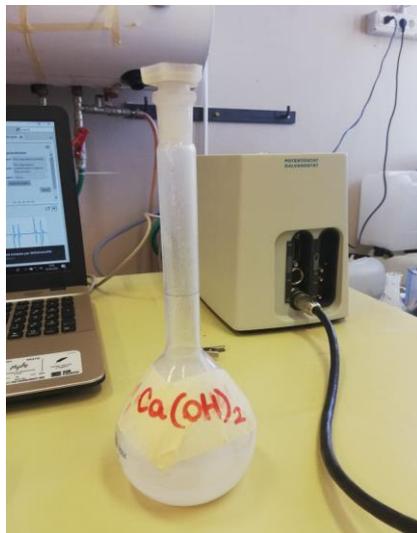


Fig. 5.3 - Soluzione satura di Ca(OH)_2 .

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 per il mese successivo. 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.

5.2.2 Risultati delle prove di corrosione

Le misure eseguite forniscono per ogni campione e per ogni periodo temporale quattro misure relative ai test effettuati per ogni barra di acciaio.

Calcolando la media si ottengono i valori riportati nelle Tab. 10 - Tab. 11 - Tab. 12 - Tab. 13.

Tab. 10 - Risultati delle prove di corrosione sul campione REF.

REF							
Tempo (gg)	Ecorr (mV)	Z(Ω)	Raut. (Ω)	R ₀ (Ω)	Rp ₀ (Ω*cm ²)	Ranod. (Ω)	Rpanod. (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. 11 - Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF.

RCF							
Tempo (gg)	Ecorr (mV)	Z(Ω)	Raut. (Ω)	R ₀ (Ω)	Rp ₀ (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. 12 - Risultati delle prove di corrosione sul campione BCH.

BCH							
Tempo(gg)	Ecorr(mV)	Z(Ω)	Raut. (Ω)	R ₀ (Ω)	Rp ₀ (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. 13 - 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

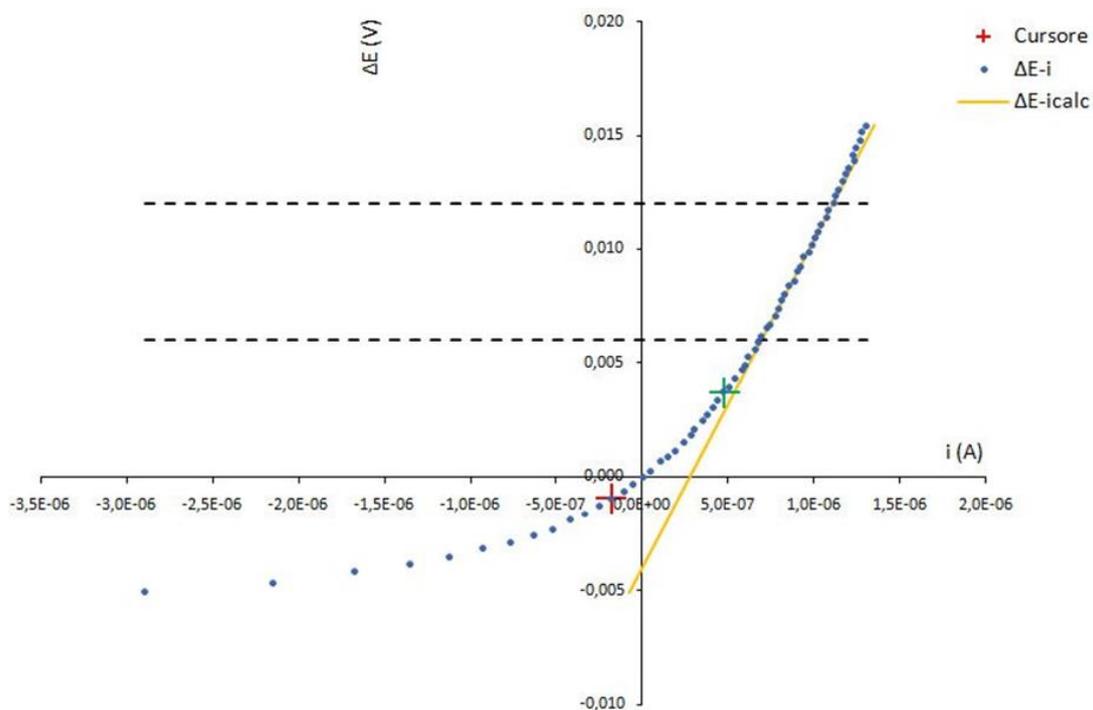


Fig. 5.4 - Curva di polarizzazione ottenuta dal foglio di calcolo Excel.

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 (16 cm²):

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

Di seguito sono riportati gli andamenti dei potenziali di corrosione (Fig. 5.5) e delle resistenze di polarizzazione (Fig. 5.6) per ogni campione di malta.

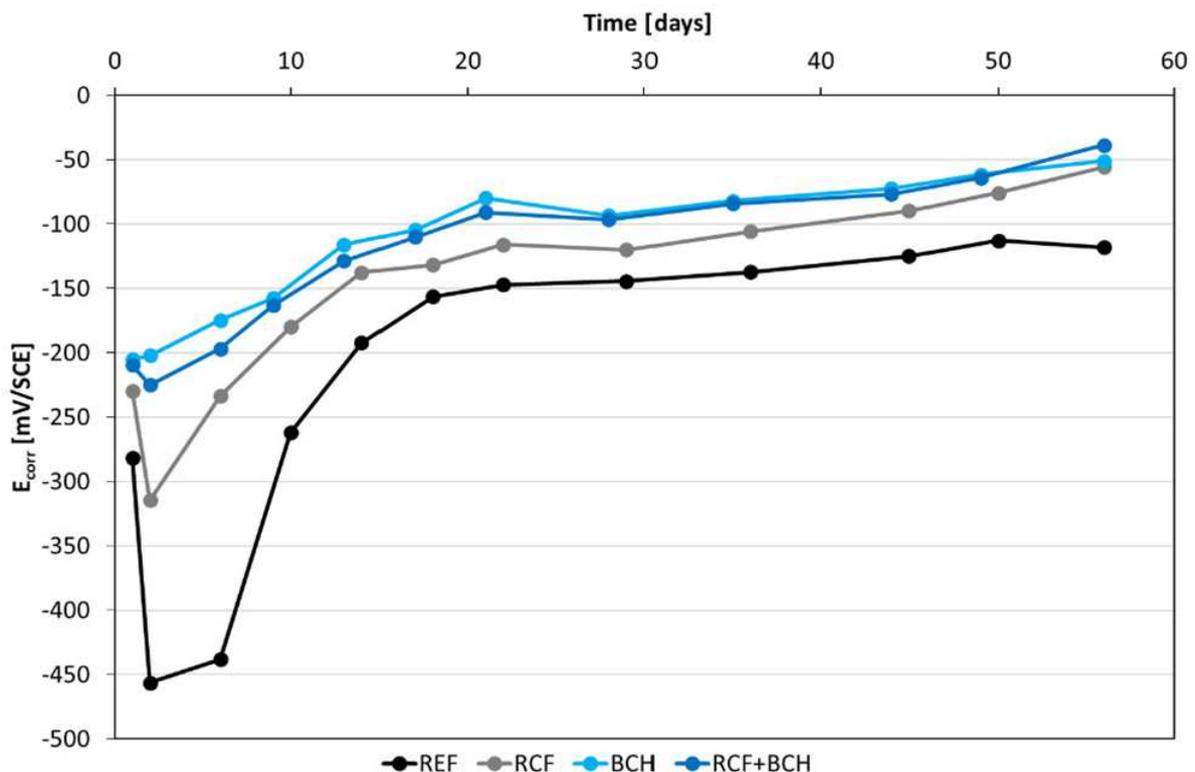


Fig. 5.5 - Andamento del potenziale di corrosione (E_{corr}) delle armature di acciaio incorporate nella malta.

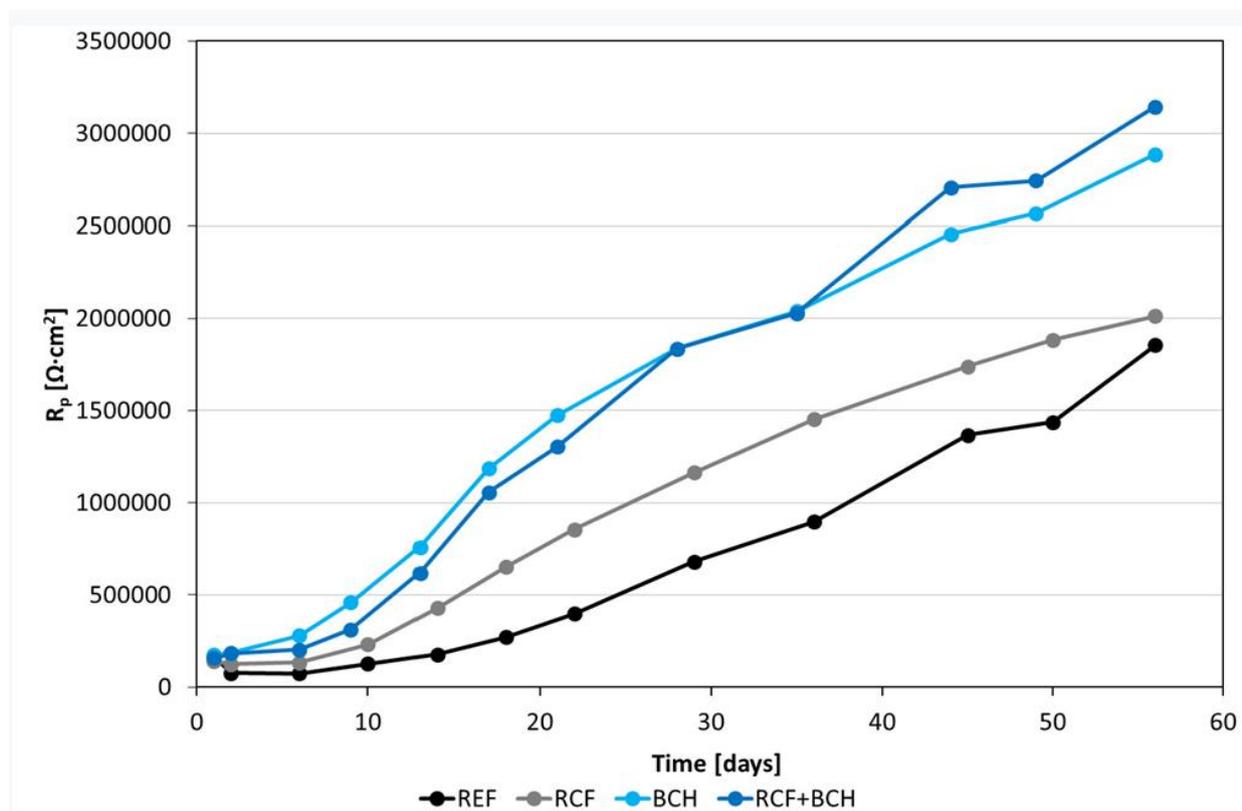


Fig. 5.6 - Andamento della resistenza di polarizzazione (R_p) delle armature di acciaio incorporate nella malta.

5.3 Discussione dei risultati

5.3.1 Risultati sul potenziale di corrosione (E_{corr})

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 provini RCF e BCH+RCF, in cui E_{corr} va rispettivamente da -230 a -315 mV / SCE e da -210 a -225 mV / SCE. 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. Come è noto, 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 pari a -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 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 $E_{\text{corr}} < -275 \text{ mV} / \text{SCE}$ (secondo ASTM C876 [3] quando E_{corr} risulta inferiore a questo valore il rischio di corrosione è elevato).

5.3.2 Risultati sulla resistenza di polarizzazione (R_p)

L'andamento della resistenza alla polarizzazione è abbastanza simile a quello 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.

6. Prove di corrosione in presenza di cloruri

6.1 Resinatura dei provini

Prima di iniziare le prove di corrosione in presenza di cloruri, le basi dei provini sono state resinare (Fig. 6.1) mediante una resina epossidica bicomponente, in modo tale che l'ingresso della soluzione contenente cloruri fosse possibile solo dalla superficie laterale del provino (penetrazione unidirezionale).

Le quattro barre di armatura sono state inserite all'interno dei campioni garantendo un copriferro pari a 1,5 cm.



Fig. 6.1 - Provino dopo la resinatura.

6.2 Corrosione promossa dai cloruri

Come descritto nel capitolo 4, la depassivazione delle armature metalliche può avvenire, oltre che per carbonatazione, anche per la presenza dello ione Cl^- sulla superficie dei ferri di armatura.

La penetrazione del cloruro dall'ambiente esterno può avvenire con due diversi meccanismi:

- Assorbimento per suzione capillare: l'acqua funge da veicolo per i Sali (incluso quindi il cloruro) in essa disciolti;
- Diffusione: la diffusione dei cloruri attraverso il calcestruzzo avviene secondo la seconda Legge di Fick in direzione ortogonale alla superficie del calcestruzzo.

Lo spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro può essere calcolato mediante la seguente formula:

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

dove:

- x è lo spessore di calcestruzzo penetrato per diffusione dai cloruri [mm];
- D è il coefficiente di diffusione dei cloruri [mm²/anno];
- t è il tempo [anni].

6.3 Metodi di rilevazione

6.3.1 Prove di corrosione

Le prove di corrosione sono state eseguite sui quattro provini cilindrici (lollipop), contenenti le barre di armatura in acciaio.

Per andare a studiare la corrosione promossa dai cloruri, i provini sono stati sottoposti a cicli settimanali di bagnato-asciutto, così strutturati: la prima misurazione del ciclo avviene in asciutto, dopodiché i provini vengono immersi dentro la soluzione acquosa contenete il 3,5% di NaCl e la seconda misurazione avviene trascorsi 2 giorni dall'immersione. Una volta finita, i provini vengono tolti dalla soluzione e lasciati in asciutto per 5 giorni consecutivi (Fig. 6.2). In tutto sono stati effettuati dieci cicli.

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



Fig. 6.2 - Provini in asciutto e in bagnato.

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

6.3.2 Prove di impedenza elettrica

Le prove elettriche per determinare l'impedenza elettrica nel ciclo bagnato-asciutto sono state eseguite sui provini di dimensione 4x4x16 cm, tramite metodo a 4 elettrodi.

I campioni testati sono in tutto 8, 2 per ogni composizione di miscela (Fig. 6.3).

Le prove sono state eseguite due volte per ogni provino, una misura in bagnato e una misura in asciutto, per un totale di dieci cicli.

La prima misurazione, cioè quella a $t = 0$, è in asciutto.



Fig. 6.3 - Provini utilizzati per l'impedenza elettrica immersi in soluzione 3,5% NaCl.

6.4 Prove elettriche sulle malte

Le misurazioni sono state eseguite in modalità EIS in un intervallo di frequenza da 1 kHz a 100 kHz, mentre per l'elaborazione dei dati sono stati considerati valori di singola frequenza (1 kHz, 10 kHz, 31,6 kHz, 50,2 kHz e 100 kHz).

6.4.1 Risultati delle prove elettriche

L'andamento dell'impedenza elettrica ottenuto dalle prove elettriche eseguite sui provini prismatici è quello riportato in Fig. 6.4.

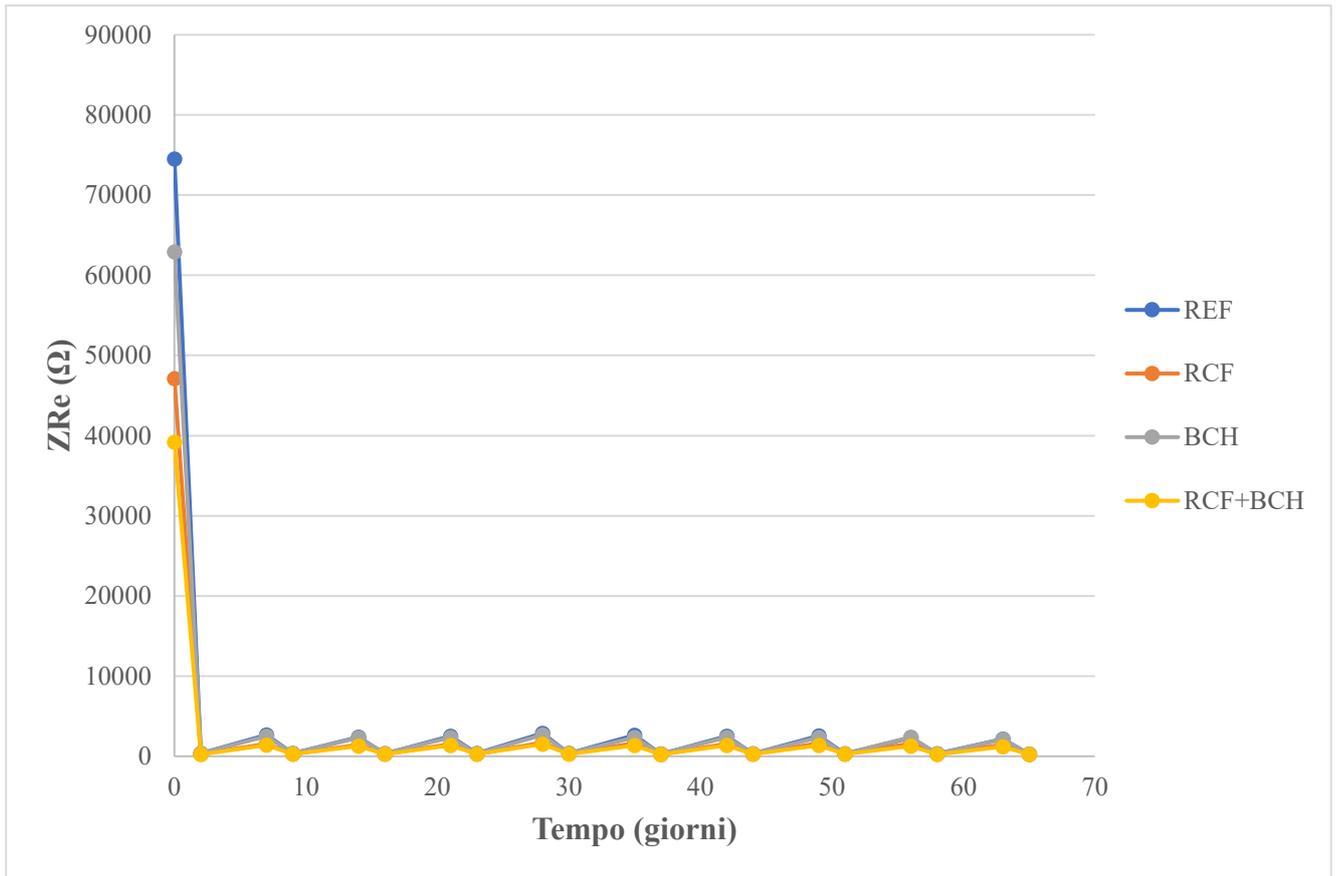


Fig. 6.4 – *Media dell'impedenza elettrica (a 10 kHz) misurata sui campioni prismatici 4x4x16 cm.*

In aggiunta a ciò, è stato realizzato il grafico in Fig. 6.5, in cui è riportata la situazione alla frequenza di 10 kHz per il confronto dei dati tra i diversi provini poiché le curve alle varie frequenze mostrano andamenti pressoché simili.

I relativi valori dell'impedenza elettrica sono riportati in Tab. 14.

Tab. 14 - Media dei risultati delle prove di impedenza elettrica (a 10 kHz).

10 kHz MEDIA	REF	RCF	BCH	RCF+BCH
Tempo (giorni)	Z _{Re} (Ω)	Z _{Re} (Ω)	Z _{Re} (Ω)	Z _{Re} (Ω)
0	74508.65	47125.10	62921.62	39193.22
2	352.22	267.06	338.45	248.67
7	2678.82	1544.36	2502.65	1411.67
9	359.54	281.47	353.31	273.85
14	2405.21	1441.88	2288.58	1278.54
16	318.77	286.69	350.61	289.47
21	2500.37	1521.19	2339.08	1353.60
23	341.26	282.14	330.09	276.37
28	2882.46	1703.68	2667.55	1498.95
30	345.33	302.89	351.00	289.87
35	2611.40	1613.00	2352.09	1345.86
37	289.87	249.56	302.24	251.01
42	2504.15	1562.86	2350.15	1344.91
44	307.34	265.08	318.30	273.29
49	2562.05	1640.03	2337.91	1366.28
51	311.48	266.07	323.18	272.17
56	2295.46	1601.94	2368.77	1256.33
58	309.97	268.43	309.21	256.89
63	2137.61	1441.41	2116.95	1205.57
65	278.35	248.60	288.34	245.93

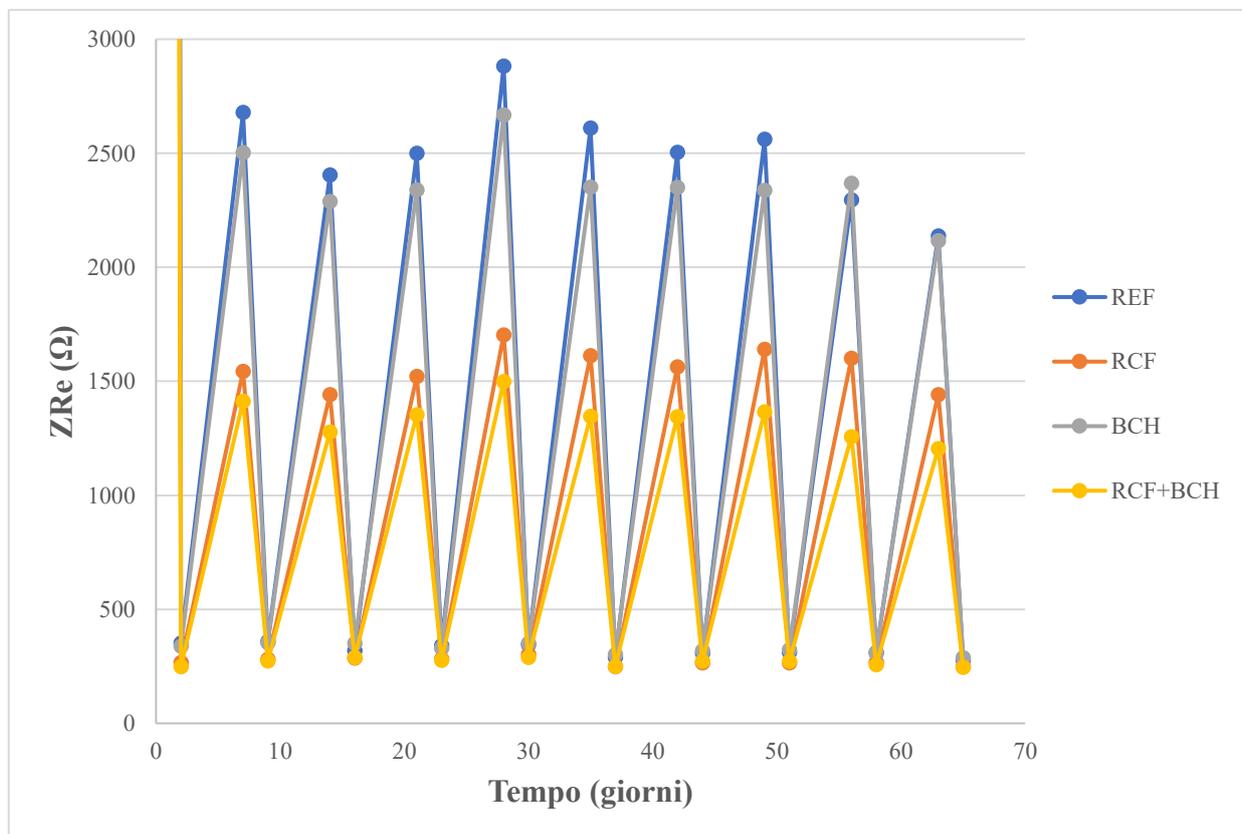


Fig. 6.5 - Media dell'impedenza elettrica (a 10 kHz) misurata sui campioni prismatici (INGRANDIMENTO).

6.4.2 Discussione dei risultati

Osservando la Fig. 6.4 si nota che la misura di impedenza elettrica effettuata sui quattro provini al tempo $t = 0$ ci restituisce valori molto diversi tra loro, rispetto a tutti gli altri. Tale risultato deriva dal fatto che questa misurazione è la prima effettuata in asciutto, subito prima di immergere i provini nella soluzione contenente NaCl ed iniziare quindi i vari cicli asciutto-bagnato.

In particolare, al tempo $t = 0$ si osserva che:

- Il valore più alto di impedenza elettrica è registrato dal provino REF, cioè dal materiale di riferimento senza aggiunte conduttive;
- Le altre tre malte, tutte con aggiunte conduttive, presentano un valore di impedenza elettrica inferiore rispetto ad esso (in ordine BCH, RCF e RCF+BCH);
- La malta con aggiunte di fibre di carbonio RCF mostra una conducibilità elettrica maggiore rispetto alla malta con aggiunta di biochar BCH;
- Il provino che mostra un comportamento migliore dal punto di vista conduttivo, cioè che ha il valore più basso di impedenza elettrica, è quello con la combinazione fibre e biochar RCF+BCH.

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

Dal grafico in Fig. 6.5 si può notare che il valore maggiore di impedenza elettrica è registrato dal provino di riferimento REF (2882,46 Ω a $t = 28$ gg), che in generale mostra i valori più alti di impedenza elettrica. Subito sotto di esso abbiamo il provino BCH, che registra dei valori leggermente più bassi, ma comunque molto simili.

Viceversa, i provini RCF e RCF+BCH mostrano una maggiore conducibilità elettrica (cioè hanno un'impedenza minore), e tra i due l'RCF+BCH è quello che ha registrato i valori più bassi.

Il valore di conducibilità elettrica della malta contenente fibre di carbonio RCF è del 37% maggiore rispetto al provino di riferimento, la conducibilità elettrica della malta

contenente biochar BCH è del 12% maggiore rispetto alla malta di riferimento. La contenente biochar e fibre di carbonio (RCF+BCH) arriva a valori 47% maggiori della malta di riferimento.

In ogni caso, le differenze nell'impedenza elettrica tra le diverse malte risultano essere più evidenti in asciutto piuttosto che in bagnato, dove i provini registrano dei valori pressoché uguali.

6.5 Prove di corrosione sulle malte

Le prove di corrosione sono state eseguite per ogni campione in tutte le 4 barre di armatura presenti, bagnato e asciutto. Le misurazioni sono state eseguite a determinati intervalli temporali, per ogni ciclo sono state effettuate misurazioni in asciutto e bagnato (Fig. 6.6) per tutti i campioni e tutte le barre.

Ogni ciclo bagnato-asciutto è effettuato nel seguente modo, i provini per 2 giorni erano immersi nella soluzione e per i restanti 5 giorni si trovavano in asciutto.



Fig. 6.6 - Esempio di prova di corrosione in bagnato.

6.5.2 Risultati delle prove di corrosione

Le misure eseguite 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. 15 - Tab. 16 - Tab. 17 - Tab. 18.

Tab. 15 - Risultati delle prove di corrosione sul campione REF.

REF			
Data	Tempo (giorni)	E_{corr} (mV)	Rp (Ω*cm2)
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
06/07/2020	42	-131	766564
08/07/2020	44	-172	593821
13/15/2020	49	-119	785880
15/07/2020	51	-159	685439
20/07/2020	56	-126	878480
22/07/2020	58	-147	698965
27/07/2020	63	-172	569144

Tab. 16 - Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF.

RCF			
Data	Tempo (giorni)	E_{corr} (mV)	Rp (Ω*cm2)
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
06/07/2020	42	-183	516740
08/07/2020	44	-227	471840
13/15/2020	49	-194	449452
15/07/2020	51	-237	482152
20/07/2020	56	-170	325168
22/07/2020	58	-258	455256
27/07/2020	63	-117	415212

Tab. 17 - Risultati delle prove di corrosione sul campione BCH.

BCH			
Data	Tempo (giorni)	E_{corr} (mV)	Rp (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
06/07/2020	42	-170	626724
08/07/2020	44	-180	623823
13/15/2020	49	-182	589900
15/07/2020	51	-206	641144
20/07/2020	56	-162	522056
22/07/2020	58	-214	692918
27/07/2020	63	-178	509412

Tab. 18 - Risultati delle prove di corrosione sul campione RCF+BCH.

RCF+BCH			
Data	Tempo (giorni)	E_{corr} (mV)	Rp (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	872396
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
06/07/2020	42	-131	435780
08/07/2020	44	-211	820332
13/15/2020	49	-134	799020
15/07/2020	51	-210	865724
20/07/2020	56	-169	559996
22/07/2020	58	-230	844392
27/07/2020	63	-180	430860

Nei grafici riportati di seguito in Fig. 6.7 - Fig. 6.8 sono illustrati gli andamenti dei potenziali di corrosione e delle resistenze di polarizzazione per ogni campione di malta realizzato.

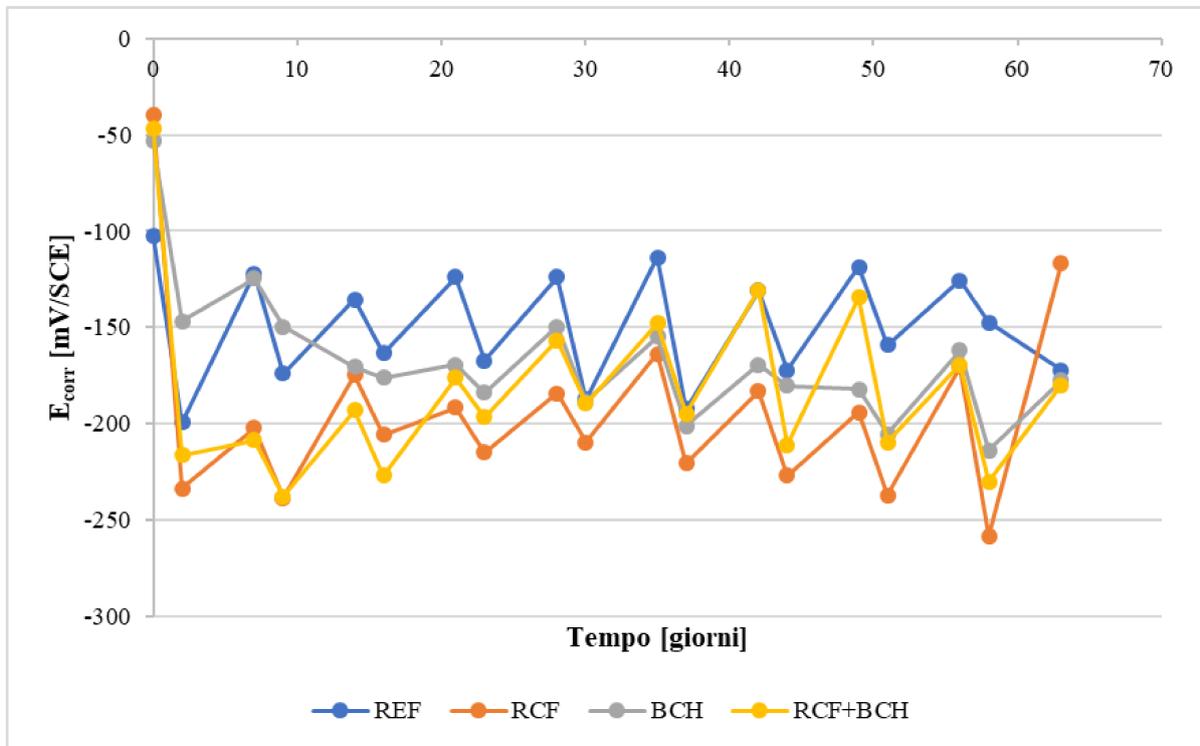


Fig. 6.7 - Andamento del potenziale di corrosione (E_{corr}) delle armature di acciaio immerse nella malta.

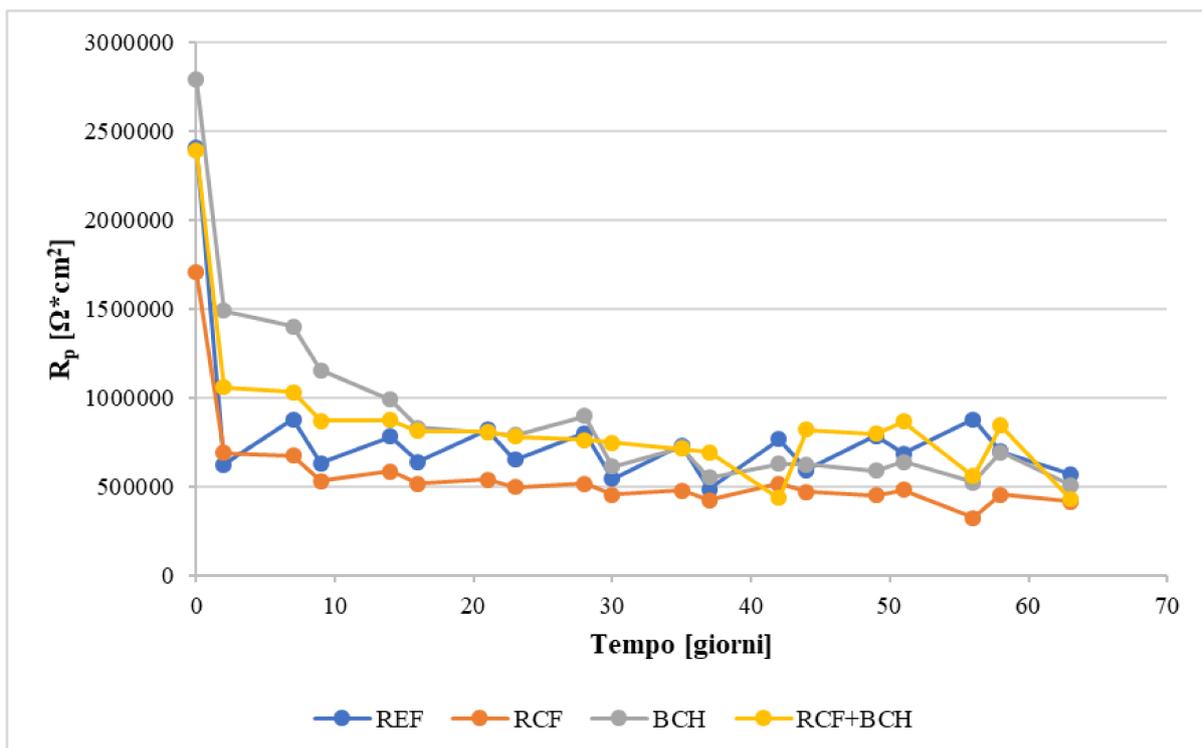


Fig. 6.8 - Andamento della resistenza di polarizzazione (R_p) delle armature di acciaio immerse nella malta.

6.5.3 Discussione dei risultati

Osservando la Fig. 6.9 si nota che i valori del potenziale di corrosione più elevati sono stati registrati nella prima misurazione eseguita a $t = 0$ per ogni provino, risultato giustificato dal fatto che è la misura eseguita subito prima di iniziare i cicli di bagnato-asciutto.

In generale, 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, che dalla misurazione effettuata a $t = 14$ mostra un andamento più smussato fino alla misura a $t = 21$, dopo la quale riprende il normale andamento.

Le armature che hanno registrato valori di potenziale di corrosione maggiore sono quelle che si trovano nel provino di riferimento REF, mentre quelle che hanno dato i valori più bassi sono le barre del provino RCF. Le armature immerse nei provini BCH e RCF+BCH hanno 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 (REF), quella contenente il biochar (BCH) e il provino contenete biochar più fibre di carbonio riciclate (RCF+BCH). Questi valori di E_{corr} non sono proprio 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 del provino di riferimento REF e da quello contenente 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.

Nell'ultima misurazione, cioè quella a $t = 63$, le malte mostrano valori simili di R_p . Stessa cosa vale per il potenziale di corrosione, dove tutte le malte hanno registrato valori simili di E_{corr} a $t = 63$, ad eccezione del provino RCF (ciò è dovuto probabilmente ad un errore durante la misurazione).

Dalle misure effettuate si può affermare che, nonostante le aggiunte conduttive contribuiscano a diminuire l'impedenza elettrica (perché aumentano la conducibilità

elettrica) delle malte, a seconda della tipologia di aggiunta la corrosione delle barre di armatura avviene in modo differente.

Infatti, mentre il rischio di corrosione risulta più elevato, anche se sempre basso in termini assoluti visto che E_{corr} è comunque 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 di riferimento senza aggiunte conduttive (REF) e da quelle contenenti sia biochar che fibre di carbonio riciclate (RCF+BCH).

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.html>. [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.

7. Conclusioni

La seguente sperimentazione, che rientra nel progetto europeo EnDurCrete, è incentrata sullo studio di una nuova classe di materiali cementizi, i materiali “self-sensing”, cioè quelli in grado di autodiagnosticare il loro stato di salute.

Tale proprietà deriva dall’aggiunta, all’interno della matrice cementizia, di materiali conduttivi con buone proprietà elettriche. In questo lavoro, nello specifico, sono stati utilizzati come “aggiunte conduttive” delle fibre di carbonio riciclate e del biochar. Sono state quindi realizzate quattro malte cementizie: una di riferimento senza nessuna aggiunta conduttiva (REF), una con fibre di carbonio riciclate (RCF), una contenente biochar (BCH) e una realizzata con biochar e fibre di carbonio riciclate (RCF+BCH). Lo scopo della tesi è stato quello di analizzare allo stesso tempo l’impedenza elettrica e l’andamento della corrosione per verificare se l’aggiunta di questi materiali potesse influire o meno sul rischio di corrosione delle armature immerse. Questa analisi è stata effettuata sia in condizioni ambientali che sottoponendo i provini a cicli di bagnato-asciutto all’interno di una soluzione ricca di cloruri.

I risultati ottenuti mostrano che:

- Prima di iniziare i cicli, il valore più alto di impedenza elettrica è stato registrato dal materiale di riferimento (REF), mentre le altre tre malte hanno valori inferiori. Dal punto di vista dell’impedenza elettrica il materiale migliore, poiché più conduttivo, è quello con la combinazione fibre e biochar (RCF+BCH). In generale poi, si è visto che i valori di impedenza elettrica maggiori si sono registrati in asciutto, mentre la conducibilità elettrica aumenta in bagnato.
- Per quanto riguarda l’andamento della corrosione delle armature, questo dipende molto dal tipo di aggiunta conduttiva usata. 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 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 contenente fibre di carbonio RCF, i valori di R_p maggiori sono stati registrati dalla malta di riferimento senza aggiunte conduttive (REF) e dalla malta contenente biochar e fibre di carbonio (RCF+BCH), per tutto il tempo di prova.

In conclusione, si può dire che, nonostante le malte con aggiunte conduttive siano più elettricamente conduttive rispetto alla malta di riferimento, il rischio di corrosione promosso dai cloruri delle armature non aumenta se queste si trovano immerse nelle malte preparate con l'unione di biochar e fibre di carbonio (RCF+BCH).

Appendice I

Di seguito sono riportati i valori dell'impedenza elettrica registrati per ogni campione durante tutta la sperimentazione.

Tab. 19 - Impedenza elettrica misurata sul campione REF A (wet).

REF A WET			FREQUENZA				
DATA	TEMPO	PESO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
	(giorni)	(g)	Z_{Re}	Z_{Re}	Z_{Re}	Z_{Re}	Z_{Re}
			(Ω)				
27/05/2020	2	604.99	380.79	373.34	370.44	368.96	366.49
03/06/2020	9	604.68	363.68	363.80	362.72	362.00	360.68
10/06/2020	16	603.93	364.81	365.03	364.15	363.47	362.08
17/06/2020	23	603.85	335.94	334.50	331.84	331.19	329.52
24/06/2020	30	604.10	350.88	347.54	345.72	344.77	343.48
01/07/2020	37	604.48	296.14	291.64	290.27	289.51	288.57
08/07/2020	44	604.95	319.89	316.32	314.50	313.48	312.34
15/07/2020	51	605.89	318.08	314.92	312.77	312.11	310.32
22/07/2020	58	604.10	310.69	308.48	306.92	306.22	304.89
29/07/2020	65	604.07	278.05	276.54	275.96	275.30	274.21

Tab. 20 - Impedenza elettrica misurata sul campione REF B (wet).

REF B WET			FREQUENZA				
DATA	TEMPO	PESO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
	(giorni)	(g)	Z_{Re}	Z_{Re}	Z_{Re}	Z_{Re}	Z_{Re}
			(Ω)				
27/05/2020	2	600.42	334.78	331.10	328.19	326.91	324.92
03/06/2020	9	599.45	358.14	355.28	353.08	351.96	350.81
10/06/2020	16	598.86	271.86	272.50	271.80	271.29	271.05
17/06/2020	23	598.61	350.07	348.02	346.67	345.15	343.60
24/06/2020	30	598.83	344.55	343.12	341.33	340.24	339.31
01/07/2020	37	599.26	289.34	288.10	287.74	287.15	287.44
08/07/2020	44	599.86	298.74	298.37	298.91	298.89	299.67
15/07/2020	51	600.67	308.41	308.03	307.05	306.27	306.82
22/07/2020	58	599.27	312.68	311.47	309.89	309.17	308.49
29/07/2020	65	599.24	280.48	280.16	279.08	278.81	278.88

Tab. 21 - Media dell'impedenza elettrica misurata sul campione REF (wet).

REF WET MEDIA			FREQUENZA				
DATA	TEMPO	PESO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
	(giorni)	(g)	Z _{Re}				
			(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
27/05/2020	2	602.71	357.78	352.22	349.31	347.94	345.71
03/06/2020	9	602.07	360.91	359.54	357.90	356.98	355.74
10/06/2020	16	601.40	318.34	318.77	317.98	317.38	316.56
17/06/2020	23	601.23	343.00	341.26	339.26	338.17	336.56
24/06/2020	30	601.47	347.71	345.33	343.52	342.51	341.40
01/07/2020	37	601.87	292.74	289.87	289.00	288.33	288.01
08/07/2020	44	602.41	309.31	307.34	306.71	306.19	306.01
15/07/2020	51	603.28	313.24	311.48	309.91	309.19	308.57
22/07/2020	58	601.69	311.68	309.97	308.40	307.69	306.69
29/07/2020	65	601.66	279.26	278.35	277.52	277.05	276.55

Tab. 22 - Impedenza elettrica misurata sul campione REF A (dry).

REF A DRY			FREQUENZA				
DATA	TEMPO	PESO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
	(giorni)	(g)	Z _{Re}				
			(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	587.20	78373.98	70763.45	60205.40	53384.69	40411.84
01/06/2020	7	587.23	2973.39	2879.57	2811.72	2774.66	2701.38
08/06/2020	14	588.95	2616.20	2533.00	2472.99	2440.28	2375.47
15/06/2020	21	589.20	2741.03	2656.44	2588.16	2553.09	2481.86
22/06/2020	28	588.72	3127.63	3016.22	2933.89	2888.40	2798.08
29/06/2020	35	588.64	2822.95	2725.00	2656.69	2621.20	2551.31
06/07/2020	42	589.46	2685.28	2602.38	2539.79	2504.81	2438.56
13/07/2020	49	589.80	2715.37	2631.30	2564.69	2530.40	2460.40
20/07/2020	56	589.72	2337.49	2275.58	2227.16	2200.12	2150.07
27/07/2020	63	591.97	2219.66	2156.31	2110.24	2085.11	2037.04

Tab. 23 - Impedenza elettrica misurata sul campione REF B (dry).

REF B DRY			FREQUENZA				
DATA	TEMPO	PESO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
	(giorni)	(g)	Z _{Re}				
			(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	581.97	87608.06	78253.84	66691.63	59317.84	44596.65
01/06/2020	7	582.00	2558.51	2478.07	2422.71	2393.29	2338.02
08/06/2020	14	583.74	2352.86	2277.42	2225.73	2199.24	2150.33
15/06/2020	21	584.03	2420.71	2344.31	2292.34	2264.65	2215.00
22/06/2020	28	583.49	2847.42	2748.70	2677.67	2640.82	2570.50
29/06/2020	35	583.16	2582.49	2497.80	2437.34	2406.50	2347.94
06/07/2020	42	584.31	2480.12	2405.92	2351.86	2323.60	2272.10
13/07/2020	49	584.78	2571.59	2492.80	2434.16	2403.36	2346.91
20/07/2020	56	584.90	2380.02	2315.34	2266.40	2240.72	2193.34
27/07/2020	63	586.81	2179.93	2118.90	2073.78	2050.96	2008.42

Tab. 24 - Media dell'impedenza elettrica misurata sul campione REF (dry).

REF DRY MEDIA			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	584.59	82991.02	74508.65	63448.52	56351.27	42504.25
01/06/2020	7	584.62	2765.95	2678.82	2617.22	2583.97	2519.70
08/06/2020	14	586.35	2484.53	2405.21	2349.36	2319.76	2262.90
15/06/2020	21	586.62	2580.87	2500.37	2440.25	2408.87	2348.43
22/06/2020	28	586.11	2987.53	2882.46	2805.78	2764.61	2684.29
29/06/2020	35	585.90	2702.72	2611.40	2547.01	2513.85	2449.62
06/07/2020	42	586.89	2582.70	2504.15	2445.83	2414.21	2355.33
13/07/2020	49	587.29	2643.48	2562.05	2499.43	2466.88	2403.66
20/07/2020	56	587.31	2358.76	2295.46	2246.78	2220.42	2171.71
27/07/2020	63	589.39	2199.80	2137.61	2092.01	2068.04	2022.73

Tab. 25 - Impedenza elettrica misurata sul campione RCF A (wet).

RCF A WET			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
27/05/2020	2	602.92	330.22	272.16	230.91	216.49	199.24
03/06/2020	9	601.21	321.92	277.92	242.04	226.88	207.16
10/06/2020	16	600.41	312.67	279.03	246.37	230.97	209.48
17/06/2020	23	600.23	308.12	276.88	245.31	229.36	206.87
24/06/2020	30	599.90	338.94	302.23	270.29	254.24	230.91
01/07/2020	37	600.88	274.09	248.45	224.97	211.98	191.59
08/07/2020	44	601.39	282.22	258.87	235.08	221.73	200.30
15/07/2020	51	602.19	282.83	260.29	236.53	222.89	201.23
22/07/2020	58	600.63	288.42	264.62	240.55	226.64	204.59
29/07/2020	65	600.60	265.81	244.80	223.55	211.32	190.53

Tab. 26 - Impedenza elettrica misurata sul campione RCF B (wet).

RCF B WET			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
27/05/2020	2	618.29	318.49	261.96	222.05	208.41	192.40
03/06/2020	9	616.52	335.45	285.03	248.14	232.91	213.11
10/06/2020	16	615.73	336.75	294.36	259.92	243.86	221.75
17/06/2020	23	615.34	322.41	287.39	255.32	238.99	216.30
24/06/2020	30	615.70	344.18	303.55	269.70	252.69	228.31
01/07/2020	37	616.27	278.46	250.67	227.03	213.72	192.90
08/07/2020	44	616.73	303.11	271.29	244.43	229.31	206.39
15/07/2020	51	617.50	300.27	271.86	245.76	230.96	207.75
22/07/2020	58	615.85	298.62	272.24	247.25	232.87	210.16
29/07/2020	65	615.82	274.18	252.39	230.59	217.47	195.90

Tab. 27 - Media dell'impedenza elettrica misurata sul campione RCF (wet).

RCF WET MEDIA			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
27/05/2020	2	610.61	324.35	267.06	226.48	212.45	195.82
03/06/2020	9	608.87	328.68	281.47	245.09	229.89	210.13
10/06/2020	16	608.07	324.71	286.69	253.15	237.42	215.61
17/06/2020	23	607.79	315.27	282.14	250.31	234.18	211.58
24/06/2020	30	607.80	341.56	302.89	269.99	253.46	229.61
01/07/2020	37	608.58	276.27	249.56	226.00	212.85	192.24
08/07/2020	44	609.06	292.67	265.08	239.76	225.52	203.34
15/07/2020	51	609.85	291.55	266.07	241.15	226.93	204.49
22/07/2020	58	608.24	293.52	268.43	243.90	229.75	207.38
29/07/2020	65	608.21	269.99	248.60	227.07	214.39	193.22

Tab. 28 - Impedenza elettrica misurata sul campione RCF A (dry).

RCF A DRY			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	583.90	65327.55	51938.93	43215.20	38028.12	28527.68
01/06/2020	7	583.93	2370.67	1619.13	1464.33	1422.53	1365.84
08/06/2020	14	585.43	2138.94	1489.95	1339.57	1296.67	1240.58
15/06/2020	21	585.74	2215.43	1569.38	1414.06	1368.71	1304.93
22/06/2020	28	585.26	2521.91	1776.95	1603.31	1550.77	1477.92
29/06/2020	35	584.82	2339.27	1659.20	1487.89	1436.78	1366.65
06/07/2020	42	586.15	2216.18	1598.62	1429.85	1377.83	1305.74
13/07/2020	49	586.55	2249.47	1627.30	1454.62	1399.97	1324.75
20/07/2020	56	586.73	2200.64	1620.63	1448.98	1392.81	1314.78
27/07/2020	63	588.30	2029.85	1497.30	1336.72	1284.24	1211.10

Tab. 29 - Impedenza elettrica misurata sul campione RCF B (dry).

RCF B DRY			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	599.15	53180.91	42311.27	34850.35	30403.08	22508.32
01/06/2020	7	599.18	2107.35	1469.59	1333.17	1296.01	1245.93
08/06/2020	14	600.64	1974.32	1393.81	1258.43	1219.76	1167.92
15/06/2020	21	601.05	2065.90	1473.00	1334.46	1292.55	1238.86
22/06/2020	28	600.57	2299.79	1630.41	1474.93	1428.03	1362.00
29/06/2020	35	600.51	2214.27	1566.80	1410.74	1363.56	1297.94
06/07/2020	42	601.63	2124.31	1527.10	1370.56	1321.91	1254.60
13/07/2020	49	601.86	2313.64	1652.75	1486.15	1435.81	1360.28
20/07/2020	56	601.97	2167.23	1583.25	1420.25	1367.71	1293.84
27/07/2020	63	604.04	1877.27	1385.51	1239.77	1192.45	1125.76

Tab. 30 - Media dell'impedenza elettrica misurata sul campione RCF (dry).

RCF DRY MEDIA			FREQUENZA				
DATA	TEMPO	PESO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
	(giorni)	(g)	Z _{Re} (Ω)				
25/05/2020	0	591.53	59254.23	47125.10	39032.78	34215.60	25518.00
01/06/2020	7	591.56	2239.01	1544.36	1398.75	1359.27	1305.89
08/06/2020	14	593.04	2056.63	1441.88	1299.00	1258.22	1204.25
15/06/2020	21	593.40	2140.67	1521.19	1374.26	1330.63	1271.90
22/06/2020	28	592.92	2410.85	1703.68	1539.12	1489.40	1419.96
29/06/2020	35	592.67	2276.77	1613.00	1449.32	1400.17	1332.30
06/07/2020	42	593.89	2170.25	1562.86	1400.21	1349.87	1280.17
13/07/2020	49	594.21	2281.56	1640.03	1470.39	1417.89	1342.52
20/07/2020	56	594.35	2183.94	1601.94	1434.62	1380.26	1304.31
27/07/2020	63	596.17	1953.56	1441.41	1288.25	1238.35	1168.43

Tab. 31 - Impedenza elettrica misurata sul campione BCH A (wet).

BCH A WET			FREQUENZA				
DATA	TEMPO	PESO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
	(giorni)	(g)	Z _{Re} (Ω)				
27/05/2020	2	611.50	301.38	296.37	291.82	289.47	285.53
03/06/2020	9	610.16	305.89	305.35	301.70	299.79	296.64
10/06/2020	16	609.43	300.38	298.92	295.14	293.52	290.28
17/06/2020	23	609.37	288.14	283.64	279.46	277.64	274.40
24/06/2020	30	609.60	316.79	312.21	307.72	305.47	301.77
01/07/2020	37	610.14	265.81	263.32	260.66	259.18	256.52
08/07/2020	44	610.67	283.99	281.56	278.38	277.01	274.14
15/07/2020	51	611.64	277.17	275.37	272.93	271.40	268.64
22/07/2020	58	610.37	262.56	261.10	258.97	257.46	255.19
29/07/2020	65	610.34	248.09	246.09	244.34	243.51	241.89

Tab. 32 - Impedenza elettrica misurata sul campione BCH B (wet).

BCH B WET			FREQUENZA				
DATA	TEMPO	PESO	1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
	(giorni)	(g)	Z _{Re} (Ω)				
27/05/2020	2	599.98	386.64	380.53	375.01	372.15	367.45
03/06/2020	9	598.63	400.48	401.26	398.75	396.74	393.01
10/06/2020	16	598.02	403.02	402.31	398.96	396.79	392.92
17/06/2020	23	597.84	379.88	376.55	371.54	368.94	364.17
24/06/2020	30	598.20	392.73	389.79	386.57	384.60	381.13
01/07/2020	37	598.80	342.04	341.15	337.76	335.92	332.42
08/07/2020	44	599.49	357.39	355.04	351.34	349.31	346.02
15/07/2020	51	600.43	378.52	370.99	365.43	362.88	357.78
22/07/2020	58	599.37	363.34	357.32	352.57	350.26	346.33
29/07/2020	65	599.34	334.87	330.60	328.12	326.61	323.45

Tab. 33 - Media dell'impedenza elettrica misurata sul campione BCH (wet).

BCH WET MEDIA			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
27/05/2020	2	605.74	344.01	338.45	333.42	330.81	326.49
03/06/2020	9	604.40	353.18	353.31	350.22	348.27	344.83
10/06/2020	16	603.73	351.70	350.61	347.05	345.15	341.60
17/06/2020	23	603.61	334.01	330.09	325.50	323.29	319.29
24/06/2020	30	603.90	354.76	351.00	347.14	345.03	341.45
01/07/2020	37	604.47	303.92	302.24	299.21	297.55	294.47
08/07/2020	44	605.08	320.69	318.30	314.86	313.16	310.08
15/07/2020	51	606.04	327.84	323.18	319.18	317.14	313.21
22/07/2020	58	604.87	312.95	309.21	305.77	303.86	300.76
29/07/2020	65	604.84	291.48	288.34	286.23	285.06	282.67

Tab. 34 - Impedenza elettrica misurata sul campione BCH A (dry).

BCH A DRY			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	592.47	76631.76	66574.02	56375.29	50123.44	37996.44
01/06/2020	7	592.50	2430.72	2298.57	2213.57	2174.70	2109.12
08/06/2020	14	594.21	2193.73	2079.27	2004.60	1970.23	1912.89
15/06/2020	21	594.79	2271.12	2155.92	2078.61	2043.89	1983.53
22/06/2020	28	594.35	2722.19	2565.91	2463.41	2416.62	2335.48
29/06/2020	35	594.49	2373.08	2244.91	2159.48	2120.98	2055.01
06/07/2020	42	595.43	2360.70	2239.08	2156.26	2117.91	2052.15
13/07/2020	49	595.67	2590.74	2457.77	2356.91	2313.68	2237.47
20/07/2020	56	595.20	1984.06	1897.55	1837.69	1810.18	1761.87
27/07/2020	63	598.32	1937.15	1849.57	1789.96	1762.07	1713.92

Tab. 35 - Impedenza elettrica misurata sul campione BCH B (dry).

BCH B DRY			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	581.04	71573.49	62921.62	54564.59	49295.13	38195.17
01/06/2020	7	581.07	2651.90	2502.65	2407.50	2364.98	2296.02
08/06/2020	14	582.82	2421.24	2288.58	2203.52	2165.19	2103.62
15/06/2020	21	583.43	2479.27	2339.08	2255.06	2216.37	2150.98
22/06/2020	28	582.98	2834.04	2667.55	2560.14	2512.23	2431.57
29/06/2020	35	583.02	2488.66	2352.09	2263.87	2223.71	2158.08
06/07/2020	42	584.01	2482.65	2350.15	2261.97	2221.87	2153.85
13/07/2020	49	584.71	2466.29	2337.91	2252.20	2211.90	2141.41
20/07/2020	56	586.81	2497.58	2368.77	2281.64	2241.09	2170.49
27/07/2020	63	586.93	2230.40	2116.95	2039.79	2004.03	1942.28

Tab. 36 - Media dell'impedenza elettrica misurata sul campione BCH (dry).

BCH DRY MEDIA			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	586.76	74102.63	64747.82	55469.94	49709.29	38095.81
01/06/2020	7	586.79	2541.31	2400.61	2310.54	2269.84	2202.57
08/06/2020	14	588.52	2307.49	2183.93	2104.06	2067.71	2008.26
15/06/2020	21	589.11	2375.20	2247.50	2166.84	2130.13	2067.26
22/06/2020	28	588.67	2778.12	2616.73	2511.78	2464.43	2383.53
29/06/2020	35	588.76	2430.87	2298.50	2211.68	2172.35	2106.55
06/07/2020	42	589.72	2421.68	2294.62	2209.12	2169.89	2103.00
13/07/2020	49	590.19	2528.52	2397.84	2304.56	2262.79	2189.44
20/07/2020	56	591.01	2240.82	2133.16	2059.67	2025.64	1966.18
27/07/2020	63	592.63	2083.78	1983.26	1914.88	1883.05	1828.10

Tab. 37 - Impedenza elettrica misurata sul campione RCF+BCH A (wet).

RCF+BCH A WET			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
27/05/2020	2	606.67	294.19	228.48	188.91	176.65	162.97
03/06/2020	9	605.22	316.95	256.60	215.87	201.47	184.33
10/06/2020	16	604.40	335.19	278.33	235.95	219.58	199.32
17/06/2020	23	604.30	307.03	261.25	223.45	207.63	187.52
24/06/2020	30	604.52	328.37	278.82	239.70	223.08	201.79
01/07/2020	37	605.08	271.01	235.56	206.20	192.53	173.62
08/07/2020	44	605.59	294.35	257.24	224.90	209.53	188.63
15/07/2020	51	606.53	300.75	262.76	230.02	214.54	193.00
22/07/2020	58	605.77	275.68	242.61	213.27	198.71	178.46
29/07/2020	65	605.74	274.71	240.75	213.51	199.95	179.94

Tab. 38 - Impedenza elettrica misurata sul campione RCF+BCH B (wet).

RCF+BCH B WET			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
27/05/2020	2	592.23	339.52	268.86	224.46	210.31	193.95
03/06/2020	9	590.75	352.53	291.10	246.15	229.44	209.14
10/06/2020	16	590.03	357.13	300.62	255.97	238.12	215.89
17/06/2020	23	589.82	339.28	291.50	249.99	232.48	209.56
24/06/2020	30	590.10	349.77	300.91	258.52	240.27	216.51
01/07/2020	37	590.60	304.18	266.47	231.32	215.51	193.84
08/07/2020	44	591.06	330.41	289.35	251.63	234.48	210.84
15/07/2020	51	591.96	320.38	281.59	245.44	228.50	204.98
22/07/2020	58	590.88	307.85	271.18	236.80	220.61	197.90
29/07/2020	65	590.85	282.85	251.12	221.77	207.49	186.82

Tab. 39 - Media dell'impedenza elettrica misurata sul campione RCF+BCH (wet).

RCF+BCH WET MEDIA			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
27/05/2020	2	599.45	316.86	248.67	206.69	193.48	178.46
03/06/2020	9	597.99	334.74	273.85	231.01	215.45	196.73
10/06/2020	16	597.22	346.16	289.47	245.96	228.85	207.60
17/06/2020	23	597.06	323.15	276.37	236.72	220.06	198.54
24/06/2020	30	597.31	339.07	289.87	249.11	231.67	209.15
01/07/2020	37	597.84	287.59	251.01	218.76	204.02	183.73
08/07/2020	44	598.33	312.38	273.29	238.27	222.01	199.73
15/07/2020	51	599.25	310.56	272.17	237.73	221.52	198.99
22/07/2020	58	598.33	291.76	256.89	225.03	209.66	188.18
29/07/2020	65	598.30	278.78	245.93	217.64	203.72	183.38

Tab. 40 - Impedenza elettrica misurata sul campione RCF+BCH A (dry).

RCF+BCH A DRY			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	587.07	46714.32	37118.37	30595.64	26853.74	20244.36
01/06/2020	7	587.10	1891.15	1293.41	1161.18	1122.41	1070.60
08/06/2020	14	589.06	1679.78	1158.03	1035.80	999.25	950.74
15/06/2020	21	589.52	1763.17	1230.34	1101.88	1063.39	1009.12
22/06/2020	28	589.20	1932.91	1345.61	1208.17	1165.81	1107.08
29/06/2020	35	589.10	1746.14	1215.85	1082.90	1043.86	989.90
06/07/2020	42	590.20	1706.30	1204.79	1072.01	1031.27	976.49
13/07/2020	49	590.80	1727.19	1226.69	1090.33	1049.32	992.03
20/07/2020	56	593.07	1690.81	1216.86	1082.66	1040.07	981.98
27/07/2020	63	593.19	1538.14	1112.05	987.34	947.65	893.09

Tab. 41 - Impedenza elettrica misurata sul campione RCF+BCH B (dry).

RCF+BCH B DRY			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	573.48	51654.69	41268.07	34099.32	29860.92	22238.32
01/06/2020	7	573.51	2231.08	1529.92	1378.71	1334.65	1276.44
08/06/2020	14	575.44	2021.01	1399.04	1255.55	1212.96	1156.68
15/06/2020	21	575.86	2106.10	1476.86	1325.98	1280.26	1219.50
22/06/2020	28	575.49	2356.88	1652.28	1488.08	1437.80	1367.01
29/06/2020	35	575.51	2102.52	1475.87	1318.94	1271.21	1207.04
06/07/2020	42	576.38	2096.14	1485.02	1324.48	1275.00	1207.24
13/07/2020	49	576.68	2111.08	1505.87	1341.55	1290.10	1221.47
20/07/2020	56	579.04	1778.33	1295.80	1151.65	1106.11	1045.11
27/07/2020	63	579.16	1790.10	1299.08	1153.63	1107.94	1046.90

Tab. 42 - Media dell'impedenza elettrica misurata sul campione RCF+BCH (dry).

RCF+BCH DRY MEDIA			FREQUENZA				
			1 kHz	10 kHz	31.6 kHz	50.2 kHz	100 kHz
DATA	TEMPO	PESO	Z _{Re}				
	(giorni)	(g)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
25/05/2020	0	580.28	49184.51	39193.22	32347.48	28357.33	21241.34
01/06/2020	7	580.31	2061.12	1411.67	1269.95	1228.53	1173.52
08/06/2020	14	582.25	1850.40	1278.54	1145.68	1106.11	1053.71
15/06/2020	21	582.69	1934.64	1353.60	1213.93	1171.83	1114.31
22/06/2020	28	582.35	2144.90	1498.95	1348.13	1301.81	1237.05
29/06/2020	35	582.31	1924.33	1345.86	1200.92	1157.54	1098.47
06/07/2020	42	583.29	1901.22	1344.91	1198.25	1153.14	1091.87
13/07/2020	49	583.74	1919.14	1366.28	1215.94	1169.71	1106.75
20/07/2020	56	586.06	1734.57	1256.33	1117.16	1073.09	1013.55
27/07/2020	63	586.18	1664.12	1205.57	1070.49	1027.80	970.00

Appendice II

Di seguito sono riportati i valori del potenziale di corrosione e della resistenza di polarizzazione ottenuti per ogni provino durante la prova.

Tab. 43 - 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	451	13509	25105	401680	24654	394464	
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	
06/07/2020	42	-0.1552	1392	14686	44130	706080	42738	683808	
08/07/2020	44	-0.22906	694	18415	30777	492430	30083	481326	
13/07/2020	49	-0.12075	1461	13754	48006	768096	46545	744720	
15/07/2020	51	-0.13456	743	25802	50908	814531	50165	802643	
20/07/2020	56	-0.10516	1526	4339	50625	810000	49099	785584	
22/07/2020	58	-0.11913	750	22371	51927	830835	51177	818835	
27/07/2020	63	-0.26866	1434	6408	12610	201760	11176	178816	

Tab. 44 - 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	13507	216112	13016	208256	
01/06/2020	7	-0.17919	1375	17970	31143	498288	29768	476288	
03/06/2020	9	-0.3261	533	6468	9365	149840	8832	141312	
08/06/2020	14	-0.19467	1146	12480	19376	310016	18230	291680	
10/06/2020	16	-0.31538	563	6044	8572	137152	8009	128144	
15/06/2020	21	-0.1718	1197	12203	19485	311760	18288	292608	
17/06/2020	23	-0.30441	574	5612	7796	124736	7222	115552	
22/06/2020	28	-0.17699	1222	12154	18642	298272	17420	278720	
24/06/2020	30	-0.28728	548	5335	7297	116752	6749	107984	
29/06/2020	35	-0.16705	1083	11501	17969	287504	16886	270176	
01/07/2020	37	-0.2858	500	5173	7168	114688	6668	106688	
06/07/2020	42	-0.17806	1136	12341	20912	334592	19776	316416	
08/07/2020	44	-0.26909	768	6266	8707	139315	7939	127027	
13/07/2020	49	-0.16395	1210	11141	18536	296576	17326	277216	
15/07/2020	51	-0.25902	608	7429	10277	164429	9669	154701	
20/07/2020	56	-0.20568	1215	11392	17194	275104	15979	255664	
22/07/2020	58	-0.24749	608	7788	10967	175464	10359	165736	
27/07/2020	63	-0.19627	1153	10643	17158	274528	16005	256080	

Tab. 45 - 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	7673	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	46831	749296	45671	730736	
01/07/2020	37	-0.082063	715	9020	43507	696112	42792	684672	
06/07/2020	42	-0.0886	1244	12660	59923	958768	58679	938864	
08/07/2020	44	-0.0774	826	10306	48172	770759	47346	757543	
13/07/2020	49	-0.08699	1309	11978	60178	962848	58869	941904	
15/07/2020	51	-0.077331	875	10196	46128	738046	45253	724046	
20/07/2020	56	-0.088421	1339	22542	59382	950112	58043	928688	
22/07/2020	58	-0.078381	868	10002	51798	828772	50930	814884	
27/07/2020	63	-0.098318	1266	11260	53027	848432	51761	828176	

Tab. 46 - 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	-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	
06/07/2020	42	-0.10134	1274	23951	66676	1066816	65402	1046432	
08/07/2020	44	-0.11337	738	23333	60799	972781	60061	960973	
13/07/2020	49	-0.1024	1336	28377	69750	1116000	68414	1094624	
15/07/2020	51	-0.16569	781	23707	64047	1024749	63266	1012253	
20/07/2020	56	-0.10392	1358	28982	92419	1478704	91061	1456976	
22/07/2020	58	-0.14455	786	27370	60049	960787	59263	948211	
27/07/2020	63	-0.1255	1370	27608	59491	951856	58121	929936	

Tab. 47 - 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	5085	81360	4784	76544	
01/06/2020	7	-0.34005	820	7221	8503	136048	7683	122928	
03/06/2020	9	-0.41488	339	2761	3156	50496	2817	45072	
08/06/2020	14	-0.34173	720	4738	5784	92544	5064	81024	
10/06/2020	16	-0.40019	369	3129	3726	59616	3357	53712	
15/06/2020	21	-0.3314	737	5946	7464	119424	6727	107632	
17/06/2020	23	-0.38492	404	3860	4741	75856	4337	69392	
22/06/2020	28	-0.367	747	4204	4754	76064	4007	64112	
24/06/2020	30	-0.39948	378	2650	3168	50688	2790	44640	
29/06/2020	35	-0.2999	675	3617	5131	82096	4456	71296	
01/07/2020	37	-0.39385	349	2548	3041	48656	2692	43072	
06/07/2020	42	-0.297943	912	2176	3835	61360	2923	46768	
08/07/2020	44	-0.39492	380	2417	2987	47792	2607	41712	
13/07/2020	49	-0.31015	757	2246	3416	54656	2659	42544	
15/07/2020	51	-0.40364	398	2194	2791	44656	2393	38288	
20/07/2020	56	-0.31531	747	1791	2727	43632	1980	31680	
22/07/2020	58	-0.42713	397	2398	2838	45408	2441	39056	
27/07/2020	63	-0.05063	720	2113	2916	46656	2196	35136	

Tab. 48 - 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	8598	50834	813344	49984	799744	
17/06/2020	23	-0.1021	552	11112	48751	780016	48199	771184	
22/06/2020	28	-0.081487	854	9163	50581	809296	49727	795632	
24/06/2020	30	-0.088435	522	9849	44649	714384	44127	706032	
29/06/2020	35	-0.076143	751	9266	45850	733600	45099	721584	
01/07/2020	37	-0.091198	468	10042	40922	654752	40454	647264	
06/07/2020	42	-0.07297	789	7010	49515	792240	48726	779616	
08/07/2020	44	-0.087744	524	9316	40048	640768	39524	632384	
13/07/2020	49	-0.06781	859	5416	41392	662272	40533	648528	
15/07/2020	51	-0.089703	541	10691	44751	716016	44210	707360	
20/07/2020	56	-0.068115	855	5086	39015	624240	38160	610560	
22/07/2020	58	-0.10622	540	11792	43366	693856	42826	685216	
27/07/2020	63	-0.062775	814	6679	34587	553392	33773	540368	

Tab. 49 - 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	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	6307	100912	5414	86624	
03/06/2020	9	-0.35693	321	3000	3655	58480	3334	53344	
08/06/2020	14	-0.19118	771	6945	12882	206112	12111	193776	
10/06/2020	16	-0.25163	356	4727	8486	135776	8130	130080	
15/06/2020	21	-0.258	821	4418	5995	95920	5174	82784	
17/06/2020	23	-0.29906	380	3575	5076	81216	4696	75136	
22/06/2020	28	-0.21903	833	4330	6579	105264	5746	91936	
24/06/2020	30	-0.28592	380	3235	4814	77024	4434	70944	
29/06/2020	35	-0.20586	744	2777	5526	88416	4782	76512	
01/07/2020	37	-0.32754	347	2578	3365	53840	3018	48288	
06/07/2020	42	-0.29367	776	4963	5341	85456	4565	73040	
08/07/2020	44	-0.36359	373	2360	2703	43248	2330	37280	
13/07/2020	49	-0.31988	852	3968	4646	74336	3794	60704	
15/07/2020	51	-0.37986	372	1948	2423	38768	2051	32816	
20/07/2020	56	-0.24609	838	1984	1753	28048	915	14640	
22/07/2020	58	-0.39141	366	1947	2459	39344	2093	33488	
27/07/2020	63	-0.2869	763	3193	3976	63616	3213	51408	

Tab. 50 - 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	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	89941	1439056	88936	1422976	
03/06/2020	9	-0.081551	685	13733	73697	1179152	73012	1168192	
08/06/2020	14	-0.084942	883	9403	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	8860	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	
06/07/2020	42	-0.06844	787	14198	70494	1127904	69707	1115312	
08/07/2020	44	-0.062212	629	12751	72222	1155552	71593	1145488	
13/07/2020	49	-0.07858	857	11916	62909	1006544	62052	992832	
15/07/2020	51	-0.07525	647	14184	70573	1129168	69926	1118816	
20/07/2020	56	-0.0524	848	3439	37797	604752	36949	591184	
22/07/2020	58	-0.10915	637	17908	65151	1042416	64514	1032224	
27/07/2020	63	-0.06632	3333	13933	62324	997184	58991	943856	

Tab. 51 - 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	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	
06/07/2020	42	-0.14581	1334	7210	29824	477184	28490	455840	
08/07/2020	44	-0.16747	981	14394	37933	606933	36952	591237	
13/07/2020	49	-0.11993	1447	3741	25673	410768	24226	387616	
15/07/2020	51	-0.13692	1017	18735	40097	641544	39080	625272	
20/07/2020	56	-0.08633	1427	3066	23219	371504	21792	348672	
22/07/2020	58	-0.13723	1006	17567	45647	730356	44641	714260	
27/07/2020	63	-0.07587	1349	4451	33900	542400	32551	520816	

Tab. 52 - 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	4109	5433	86928	4851	77616	
15/06/2020	21	-0.27379	1132	6078	8734	139744	7602	121632	
17/06/2020	23	-0.29879	619	4188	6671	106736	6052	96832	
22/06/2020	28	-0.23688	1158	6301	10658	170528	9500	152000	
24/06/2020	30	-0.26174	601	4537	8061	128976	7460	119360	
29/06/2020	35	-0.237777	1036	6546	11739	187824	10703	171248	
01/07/2020	37	-0.29785	542	3723	6509	104144	5967	95472	
06/07/2020	42	-0.235718	1139	6036	10586	169376	9447	151152	
08/07/2020	44	-0.23998	642	5190	9878	158043	9236	147771	
13/07/2020	49	-0.28384	1275	4518	6581	105296	5306	84896	
15/07/2020	51	-0.32149	663	3746	5538	88616	4875	78008	
20/07/2020	56	-0.22305	1225	4274	7344	117504	6119	97904	
22/07/2020	58	-0.31355	651	3964	6598	105572	5947	95156	
27/07/2020	63	-0.26859	1145	4170	6578	105248	5433	86928	

Tab. 53 - 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	4783	124837	1997392	120947	1935152	16
27/05/2020	2	-0.074092	510	8627	87003	1392048	86493	1383888	
01/06/2020	7	-0.071681	1281	4844	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	8184	58381	934096	57758	924128	
15/06/2020	21	-0.055357	1089	3679	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	8604	11232	179712	10634	170144	
06/07/2020	42	-0.23895	1079	16674	19764	316224	18685	298960	
08/07/2020	44	-0.26307	701	8834	12511	200175	11810	188959	
13/07/2020	49	-0.25864	1180	12077	15725	251600	14545	232720	
15/07/2020	51	-0.31538	716	5890	6893	110288	6177	98832	
20/07/2020	56	-0.29147	1143	6021	6795	108720	5652	90432	
22/07/2020	58	-0.33736	715	5114	6303	100842	5588	89402	
27/07/2020	63	-0.3118	1087	6929	7266	116256	6179	98864	

Tab. 54 - 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	9012	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	
06/07/2020	42	-0.05759	1517	28980	96507	1544112	94990	1519840	
08/07/2020	44	-0.050555	1094	28952	95634	1530140	94540	1512636	
13/07/2020	49	-0.06574	1658	30566	99496	1591936	97838	1565408	
15/07/2020	51	-0.048291	1106	22855	107758	1724128	106652	1706432	
20/07/2020	56	-0.04687	1597	39145	93156	1490496	91559	1464944	
22/07/2020	58	-0.068303	1090	31119	114681	1834902	113591	1817462	
27/07/2020	63	-0.05399	1535	31054	79609	1273744	78074	1249184	

Tab. 55 - 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	-0.35462	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	91554	1464864	90645	1450320	
03/06/2020	9	-0.083314	460	16406	80634	1290144	80174	1282784	
08/06/2020	14	-0.090874	805	6135	81415	1302640	80610	1289760	
10/06/2020	16	-0.078159	502	15923	79871	1277936	79369	1269904	
15/06/2020	21	-0.063279	808	5080	76557	1224912	75749	1211984	
17/06/2020	23	-0.069354	505	14478	76495	1223920	75990	1215840	
22/06/2020	28	-0.059588	803	3968	74856	1197696	74053	1184848	
24/06/2020	30	-0.06584	474	13907	75353	1205648	74879	1198064	
29/06/2020	35	-0.060956	715	3811	63736	1019776	63021	1008336	
01/07/2020	37	-0.070374	448	14049	67042	1072672	66594	1065504	
06/07/2020	42	-0.036213	770	2233	32366	517856	31596	505536	
08/07/2020	44	-0.069125	508	9554	88779	1420464	88271	1412336	
13/07/2020	49	-0.03885	845	2896	75165	1202640	74320	1189120	
15/07/2020	51	-0.068618	518	9631	82980	1327680	82462	1319392	
20/07/2020	56	-0.04718	813	2854	48248	771968	47435	758960	
22/07/2020	58	-0.071162	513	13257	84903	1358448	84390	1350240	
27/07/2020	63	-0.0484	823	3214	35022	560352	34199	547184	

Tab. 56 - 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	-89421	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	7409	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	
06/07/2020	42	-0.05261	773	7217	58990	943840	58217	931472	
08/07/2020	44	-0.071581	601	19600	109303	1748848	108702	1739232	
13/07/2020	49	-0.05389	843	7908	106317	1701072	105474	1687584	
15/07/2020	51	-0.066659	608	16932	125202	2003232	124594	1993504	
20/07/2020	56	-0.0593	817	7597	80487	1287792	79670	1274720	
22/07/2020	58	-0.070751	601	16989	120085	1921360	119484	1911744	
27/07/2020	63	-0.06082	782	6358	63731	1019696	62949	1007184	

Tab. 57 - 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	5935	7174	114784	6894	110304	
01/06/2020	7	-0.31077	808	8712	11228	179648	10420	166720	
03/06/2020	9	-4205	297	2272	2634	42144	2337	37392	
08/06/2020	14	-0.29657	680	6442	7753	124048	7073	113168	
10/06/2020	16	-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	3994	4795	76720	4402	70432	
22/06/2020	28	-0.24849	718	7195	9267	148272	8549	136784	
24/06/2020	30	-0.30648	367	3479	4453	71248	4086	65376	
29/06/2020	35	-0.22502	648	7051	9263	148208	8615	137840	
01/07/2020	37	-34318	333	2829	3477	55632	3144	50304	
06/07/2020	42	-0.202026	694	10545	11220	179520	10526	168416	
08/07/2020	44	-0.37835	364	2814	3235	51760	2871	45936	
13/07/2020	49	-0.20203	781	11089	12574	201184	11793	188688	
15/07/2020	51	-0.31728	380	4626	5723	91568	5343	85488	
20/07/2020	56	-0.28369	734	6625	6832	109312	6098	97568	
22/07/2020	58	-0.38757	382	2974	3523	56368	3141	50256	
27/07/2020	63	-0.33771	725	4252	4598	73568	3873	61968	

Tab. 58 - 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	8182	193918	3102688	190887	3054192	16
27/05/2020	2	-0.34932	257	2214	2740	43840	2483	39728	
01/06/2020	7	-0.33396	779	5694	6745	107920	5966	95456	
03/06/2020	9	-0.37041	315	2499	3059	48944	2744	43904	
08/06/2020	14	-0.29483	707	5324	5411	86576	4704	75264	
10/06/2020	16	-0.35846	359	2702	3502	56032	3143	50288	
15/06/2020	21	-0.30157	714	4510	5595	89520	4881	78096	
17/06/2020	23	-0.35236	389	2445	3274	52384	2885	46160	
22/06/2020	28	-0.26086	751	5102	6600	105600	5849	93584	
24/06/2020	30	-0.3163	377	2440	3425	54800	3048	48768	
29/06/2020	35	-0.22648	674	4798	6512	104192	5838	93408	
01/07/2020	37	-0.29205	358	2523	3915	62640	3557	56912	
06/07/2020	42	-0.231506	734	5178	6369	101904	5635	90160	
08/07/2020	44	-0.32521	383	2535	3766	60256	3383	54128	
13/07/2020	49	-0.242767	824	4880	5699	91184	4875	78000	
15/07/2020	51	-0.38659	366	2045	2526	40416	2160	34560	
20/07/2020	56	-0.286896	752	3917	4432	70912	3680	58880	
22/07/2020	58	-0.39164	369	2011	2587	41392	2218	35488	
27/07/2020	63	-0.272858	734	3626	4364	69824	3630	58080	