

UNIVERSITÁ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÁ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile-Architettura

Dipartimento di Scienza e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente e Urbanistica

Valutazione della capacità "self-sensing" di conglomerati cementizi con aggiunte conduttive a basso impatto ambientale

Evaluation of the "self-sensing" capacity of cement conglomerates with conductive additions with low environmental impact

Relatore:

Tesi di Laurea di:

Eleonora Fiorini

Correlatori:

Ing. Alessandra Mobili

Prof.ssa Francesca Tittarelli

Ing. Gloria Cosoli

Anno Accademico 2021-2022

A chi ha dato forma e colore ad ogni mio sogno. A chi mi ha spronata a puntare in alto e a non mollare mai. A chi ha creduto in me più di me stessa. A mamma, babbo, Sara e Christian.

Indice

Indice
Premessa
1. Introduzione e obbiettivi
1.1 Stato dell'arte10
1.2 Obiettivi e metodi
Bibliografia14
2. Materiali
2.1 Introduzione
2.2 Acqua
2.3 Leganti
2.3.1 Cemento
2.4 Aggregati
2.5.1 Fibre di carbonio
Bibliografia
3.1 Introduzione
3.2 Mix Design
3.2.1 Mix Design <i>Getto 1</i>
3.2.2 Mix Design <i>Getto 2</i>
3.3 Lavorabilità del calcestruzzo56
3.4 La segregazione60
3.5 Maturazione getti di calcestruzzo60

3.6 Proprietà meccaniche del calcestruzzo	
3.6.1 Resistenza meccanica a compressione	63
3.6.2 Metodo di rilevazione	65
3.6.3 Risultati della prova	
3.6.4 Discussione dei risultati della prova	71
4. Getti definitivi	73
4.1 Introduzione	73
4.2 Preparazione dei casseri	73
4.3 Installazione dei sensori	
4.4.1 Sensori per la misura dell'impedenza elettrica	
4.4.2 Sonda Co.S.Mo.Net	
4.5 Mix Design	
Bibliografia	
5. Metodologie	
5.1 Introduzione	
5.2 Cenni di elettronica	
5.3 Impedenza elettrica	
5.3.1 Metodo di rilevazione dell'impedenza elettrica	
5.3.2 Risultati della prova	97
5.4 Il potenziale di libera corrosione	
5.4.1 Metodo di rilevazione del potenziale di libera corrosione	
5.4.2 Risultati della prova	
Bibliogarafia	

6. Test di carico a flessione	
6.1 Introduzione	
6.2 Prove a flessione	114
6.2.1 Metodo di rilevazione	116
6.2.2 Risultati della prova	117
6.3 Monitoraggio potenziale di libera corrosione	120
6.4 Monitoraggio dell'impedenza elettrica	
7. Test vibrazionali e analisi modale	129
7.1 Introduzione	129
7.2 Test vibrazionali	130
7.2.1 Sistema generale di misura delle FRF	134
7.3 Metodo di rilevazione	
7.4 FEM numerical model	141
7.5 Analisi modale	145
7.5.1 Tecniche di controllo basate su sistemi non distruttivi	148
7.5.2 Risultati analisi modale	150
Bibliogarafia	159
8. Conclusioni	161

Premessa

La progettazione di un edificio ha come obiettivo principale quello di garantire la sicurezza strutturale; pertanto, ogni costruzione deve assolvere alle funzioni per la quale è stata realizzata garantendo adeguati livelli di sicurezza. Può accadere che alcune strutture, a cui visivamente siano attribuiti danni poco rilevabili, risultino effettivamente danneggiate. Per tali ragioni è di fondamentale importanza monitorare costantemente l'integrità degli elementi strutturali in modo da poter individuare in maniera precoce l'insorgere di eventuali pericoli. Tutto ciò viene solitamente attuato attraverso tecniche di monitoraggio programmate con cadenze periodiche, che però potrebbero non essere sufficienti a prevenire l'insorgere di problemi legati alla durabilità. Quando questi si verificano occorre infatti eseguire interventi di manutenzione straordinaria che comportano disagi per gli utenti e costituiscono una voce di costo aggiuntiva rispetto ai normali costi di gestione.

Le ragioni per cui è fondamentale avviare attività di monitoraggio sono contenute all'interno della normativa UNI/TR 11634 [1]. Esse infatti consentono di:

- definire una miglior correlazione tra carichi/azioni agenti sulla struttura, quindi avere una più affidabile conoscenza del comportamento della struttura stessa;
- individuare precise modellazioni, di più efficienti criteri di dimensionamento e di una miglior valutazione della sicurezza, anche con riferimento alle fasi di costruzione;
- individuare tempestivamente eventuali anomalie della risposta strutturale, soprattutto causate dal decadimento delle risorse strutturali dovute al comportamento sotto azioni cicliche ripetute nel tempo (fatica) o da azioni occasionali;
- prolungare la vita attesa per la struttura;

- migliorare la gestione delle costruzioni;
- raccogliere dati statistici che potrebbero avere ricadute sui disposti normativi, anche con riferimento agli effetti delle variazioni climatiche.

Il monitoraggio strutturale, pertanto, sta acquisendo una rilevanza sempre crescente nell'ingegneria civile; in particolare, il monitoraggio in continuo della durabilità delle infrastrutture permette un cambio di paradigma nella loro gestione, consentendo il passaggio da una manutenzione programmatica all'attuazione di strategie di manutenzione predittiva, con un conseguente incremento della sicurezza della struttura nonché una riduzione dei costi di gestione.

È già noto dalla *Legge di de Sitter* che il costo per ripristinare le strutture in calcestruzzo armato degradate aumenta esponenzialmente con lo stato di degrado delle stesse al momento dell'intervento, pertanto, è evidente che sia necessario mettere in atto dei sistemi di ispezione capaci di rilevare quanto prima l'instaurarsi di condizioni favorevoli al degrado di una struttura. Efficaci strumenti di controllo, specie nelle zone ad elevato rischio sismico, possono permettere di valutare nelle strutture monitorate le condizioni di lavoro ed individuare eventuali anomalie di comportamento dovute a danneggiamenti in atto. I sensori tradizionali possono essere applicati solo in un limitato numero di punti fornendo una informazione parziale per la successiva fase di diagnosi.

Studi recenti sulle nanotecnologie hanno dimostrato che l'aggiunta di opportune nano-particelle conduttive all'interno di una matrice cementizia può dare origine a materiali compositi capaci di diagnosticare il proprio stato di deformazione e di tensione. La capacità di autodiagnosi si ottiene correlando la variazione dello stato di deformazione del composito con la variazione di alcune sue caratteristiche elettriche, come ad esempio la resistenza elettrica. Attraverso la misura di tali caratteristiche elettriche si possono quindi monitorare le prestazioni e le condizioni di lavoro dell'elemento. Per la natura del materiale costituente, questi nuovi sensori possono

essere inseriti all'interno di elementi in calcestruzzo e quindi trasformare le strutture stesse in sensori diffusi.

Il punto di partenza, quindi, è l'utilizzo di materiali compositi detti "materiali intelligenti" (Smart Materials), che permettono di combinare capacità portanti e capacità diagnostiche modificando una determinata caratteristica chimico-fisica a seconda del variare del parametro esterno.



Fig. 1.1.1 Smart Materials

Nascono dunque da tale necessità, i materiali cementizi "*self-sensing*" - capaci di autodiagnosticare il proprio stato di deformazione - ottenuti tramite l'aggiunta, all'interno della matrice, di materiali conduttivi con particolari proprietà elettriche. Tale effetto si può ottenere, ad esempio, grazie all'utilizzo delle fibre di carbonio e/o filler carboniosi. Le caratteristiche meccaniche di queste fibre, unite alla capacità di condurre corrente elettrica, costituiscono il punto di partenza per la realizzazione di materiali che permettano una valutazione non distruttiva dello stato tensionale e dello stato di danno della struttura [2-3].

I primi materiali cementizi *self-sensing* ottenuti con l'aggiunta di particolari particelle risalgono ai primi anni '90 e, 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 nano-fibre di carbonio, carbon black, nanotubi di carbonio, grafene o una combinazione di diverse tipologie [3]. Tali particelle/fibre conduttive modificando le caratteristiche elettriche delle matrici cementizie in cui sono inserite permettono di rilevare lo stato di deformazione grazie alla piezoresistività¹ che conferiscono alla matrice. Le nano-particelle possiedono un'elevata superficie specifica che rende le stesse particolarmente attive dal punto di vista chimico. Inoltre, caricando la matrice cementizia con una certa quantità di fibre di carbonio, è possibile ottenere una rete di conduttori che viene localmente interrotta in presenza di un danneggiamento [4]. Misurando quindi la variazione della risposta elettrica del componente è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore per monitorare l'innesco e l'evoluzione del danneggiamento.

1. Introduzione e obbiettivi

1.1 Stato dell'arte

L'attività di ricerca dell'Università Politecnica delle Marche è stata sviluppata nell'ambito del progetto PON "reCITY – Resilient City – Everyday Revolution" ed è volta allo sviluppo di una piattaforma di monitoraggio a lungo termine con caratteristiche di interoperabilità e modularità e in grado di fornire dati ed indicazioni utili, volti all'aumento della resilienza delle infrastrutture critiche come ad esempio ospedali e edifici della protezione civile. I sensori coinvolti nel monitoraggio ricoprono misure di diversa tipologia, al fine di garantire una panoramica ad ampio raggio:

- sensori per la dinamica strutturale (accelerometri) e per la salute strutturale (estensimetri);
- sensori per la misura di impedenza elettrica;

¹ La piezoresistività è la caratteristica che hanno tutti i materiali di variare la propria resistenza elettrica, se sottoposti all'azione di una forza esterna

- sensori a bordo di droni (sistemi di visione nel visibile e nell'infrarosso, sistemi per il rilevamento e la misura di cricche, ecc.);
- sensori per la misura dei consumi energetici.

Il sistema di monitoraggio è distribuito e ciò permette di monitorare una struttura o un territorio con una risoluzione spaziale adeguata ai peculiari obiettivi della misura. Oltre ai sensori tradizionali, vengono impiegati sensori più innovativi combinati all'impiego di materiali con capacità *self-sensing*, nonché tecniche di intelligenza artificiale, che consentono di interpretare i dati in maniera più globale, adottando tecniche di *data fusion*².

Tre sono gli scenari dimostrativi previsti per la dimostrazione delle potenzialità della piattaforma messa a punto:

- 1) monitoraggio frane e interazione con eventi sismici;
- 2) monitoraggio strutturale degli edifici in contesto post-sisma;
- 3) resilienza dei sistemi di distribuzione energetica.

Per la stesura di tale elaborato, l'attività di ricerca si è incentrata sull'approfondimento dello scenario numero 2, ossia monitoraggio strutturale degli edifici in contesto post-sisma.

A seguito di un evento sismico è fondamentale effettuare una valutazione rapida ed efficace dei danni, utile a rendere tempestivi ed efficienti gli interventi di messa in sicurezza degli edifici danneggiati dal sisma. Le attività speditive di valutazione dell'impatto e di rilievo dei danni sono particolarmente rilevanti per l'adozione di adeguate strategie di intervento [5].

In questo contesto, un monitoraggio strutturale (*Structural Health Monitoring*, SHM), combinato ad un sistema decisionale e di allerta, può rappresentare un enorme

² Il "data fusion" può essere interpretato come quel processo multilivello che si occupa dell'associazione, della correlazione, della combinazione di dati e informazioni da fonti singole e multiple all'interno di una struttura comune che permetta di fare analisi stime e valutazioni sui dati di partenza.

vantaggio, a supporto della gestione, dello sviluppo di adeguate strategie di *decision making* e della gestione del rischio (sismico, idrogeologico, eccetera).

Il monitoraggio strutturale in zona sismica risulta vantaggioso non soltanto perché permette interventi repentini, ma anche perché la raccolta continua di dati permette la calibrazione di modelli numerici potenzialmente utili per le diagnosi dei danni, anche per lo sviluppo di sistemi di *early warning*.³

1.2 Obiettivi e metodi

In questo scenario dimostrativo si vuole dimostrare come i sensori coinvolti nella piattaforma sviluppata in reCITY siano in grado di descrivere come la struttura reagisce in caso di eventi sismici, fornendo dati utili anche per identificare particolari valori di soglia di allarme. Verranno realizzati provini in calcestruzzo confezionati con una miscela innovativa contenente fibre e filler carboniosi, capace di rendere il materiale self-sensing, ossia capace di avere un comportamento piezoresistivo sotto carico. I provini in calcestruzzo saranno rinforzati e dotati di un sensore immerso in grado di monitorare l'impedenza elettrica del materiale e di un sensore interno per la misura del potenziale di libera corrosione dell'armatura di rinforzo. Si prevede di monitorare i provini sia durante il periodo di stagionatura sia durante la sollecitazione del materiale a flessione (prova di flessione a 3 punti in accordo alla norma UNI EN 12390-5 "Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 5: Resistenza a flessione dei provini"), fornendo un carico via via crescente, il cui valore verrà scelto in base alla resistenza meccanica della miscela. Prima del test di carico e a seguito di ciascuno step di carico, verrà eseguita un'analisi vibrazionale della struttura. Verranno misurate le funzioni di trasferimento del sistema e in particolare si calcoleranno le funzioni di risposta in frequenza (FRF),

³ Allarme preventivo.

che permetteranno di valutare il comportamento dinamico della struttura e di vedere come esso varia in seguito a lesioni causate mediante il test di carico. Tali lesioni sono assimilabili a quelle verificabili in caso di evento sismico.

La propagazione delle cricche verrà inoltre valutata con sistemi di visione, che permetteranno anche di quantificare l'apertura delle lesioni, mediante un sistema messo a punto da UNIVPM all'interno del progetto Europeo *"EnDurCrete - New Environmental friendly and Durable conCrete, integrating industrial by-products and hybrid systems, for civil, industrial and offshore applications"* finanziato dal programma di ricerca e innovazione H2020 dell'Unione Europea nell'ambito della convenzione di sovvenzione n° 760639⁴.

⁴ Consorzio guidato da HeidelbergCement e che ha coinvolto 16 partner, tra cui anche l'Università Politecnica delle Marche con i dipartimenti DIISM e SIMAU. L'obiettivo principale del progetto Endurcrete è stato quello di sviluppare un nuovo calcestruzzo armato sostenibile ed economico per applicazioni di lunga durata e a 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 e micro tecnologie e sistemi ibridi che garantiscono una maggiore durabilità di strutture in calcestruzzo sostenibili con elevate proprietà meccaniche, capacità di autorigenerazione e automonitoraggio.

Bibliografia

[1] UNI/TR 11634

[2] VENDITTOZZI, C. (2013). STUDIO E SPERIMENTAZIONE DI MATERIALI E SENSORI INTELLIGENTI BASATI SU TECNOLOGIA FBG.

[3] D'Alessandro A., Umbertini F., Materazzi A. L., 2016. Il calcestruzzo nanocomposito "Intelligente" per il monitoraggio delle costruzioni. Ingenio, No p.28.

[4] Marino Quaresism, Michele Zappalorto, 2014. Nanocompositi "self-sensing" per il monitoraggio dell'integrità struttrale di componenti in composito. Compositi magazine, No 32.

[5] Ferrante, FC, & Ambrosanio, M. (2021). Il caso della generazione automatica dei perimetri dei centri storici per la gestione del rischio sismico. *Il caso della generazione automatica dei perimetri dei centri storici per la gestione del rischio sismico*, 121.

D'Alessandro A., Umbertini F., Materazzi A. L., 2016. Il calcestruzzo nanocomposito "Intelligente" per il monitoraggio delle costruzioni. Ingenio, No p.28.

Marino Quaresism, Michele Zappalorto, 2014. Nanocompositi "self-sensing" per il monitoraggio dell'integrità struttrale di componenti in composito. Compositi magazine, No 32.

UNI/TR 11634

G. Cosoli, A. Mobili, E. Blasi, F. Tittarelli, M. Martarelli, and G. M. Revel, "Evaluation of the Metrological Performance of Self-Sensing Mortar Specimens containing Carbon-Based Conductive Additions," in *VI Forum Nazionale Delle Misure*, 2022, pp. 545–554.

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, doi: 10.1016/j.jobe.2018.06.011.

http://www.endurcrete.eu/

<u>https://www.ingenio-web.it/articoli/sistemi-innovativi-per-il-monitoraggio-continuo-della-</u> <u>durabilita-delle-infrastrutture-in-calcestruzzo/</u>

2. Materiali

2.1 Introduzione

Nella storia dei processi costruttivi il calcestruzzo armato giunge per ultimo, dopo che la muratura e il legno avevano dominato per millenni, e anche dopo che le costruzioni in acciaio avevano fatto la loro comparsa alla fine del XVIII secolo.

Agli inizi del XX secolo il calcestruzzo armato era ancora una tecnica sperimentale, alla fine dello stesso, la maggior parte delle costruzioni al mondo erano realizzate con questo materiale. Le ragioni di tale successo furono molteplici, principalmente di natura economica (basso costo) e tecnico-costruttiva (semplicità esecutiva e grande flessibilità). Oggi l'impiego del calcestruzzo armato, particolarmente in Italia, copre un campo molto vasto, che va dai piccoli edifici ad uno o due piani, ad opere di grandi dimensioni e complessità strutturale. Chiaramente il calcestruzzo armato trova impieghi anche fuori dal campo dell'edilizia, nelle costruzioni di dighe, ponti, opere di idraulica, ecc.

Il calcestruzzo armato è un sistema costruttivo che prevede l'impiego di due materiali con caratteristiche diverse tra loro, il calcestruzzo e l'acciaio, connessi in modo tale da operare sinergicamente, il calcestruzzo, quantitativamente prevalente, definisce la forma della struttura e sostiene le sollecitazioni di compressione, mentre l'acciaio assorbe le sollecitazioni di trazione a cui il calcestruzzo non sarebbe idoneo a resistere.

Con il termine "calcestruzzo" si intende un conglomerato artificiale, ottenuto mediante elementi lapidei di diversa natura e dimensione, mescolati tra loro e coesi mediante una malta. In questo senso il calcestruzzo è un materiale antichissimo, usato in quasi tutte le civiltà che utilizzavano la pietra come materiale da costruzione. In

epoca romana il legante più comunemente usato era la calce, ma gli stessi romani scoprirono che l'impiego della pozzolana in sostituzione della sabbia trasformava radicalmente le proprietà della calce, facendola diventare una malta idraulica, cioè che utilizza l'acqua e non l'aria per sviluppare l'indurimento, consentendone l'impiego anche in acqua. I romani chiamarono questo materiale *"opus caementicium"* (opera cementizia) e con esso realizzarono gran parte delle imponenti costruzioni spesso ancora oggi visibili.

Nelle moderne costruzioni in calcestruzzo armato, il calcestruzzo è composto da uno scheletro di materiali naturali di diversa granulometria ottenuto mescolando elementi più grandi (pietrisco ricavato dalla frantumazione di rocce, o ghiaia) con altri più sottili (sabbia), collegati attraverso un legante (comunemente il cemento Portland), la cui presa è attivata dall'aggiunta di acqua. Il calcestruzzo oggi può essere prodotto mediante impianti, strutture e tecniche organizzate sia in cantiere che in uno stabilimento esterno ad esso. Gli impianti per la produzione con processo industrializzato devono essere idonei ad una produzione costante, disporre di attrezzatura adeguate al confezionamento, nonché di personale esperto e di attrezzature idonee a provare, valutare e mantenere la qualità del prodotto.

Tutti i materiali per uso strutturale devono essere in possesso di marcatura CE. Il calcestruzzo come materiale composito non ha l'obbligo di marcatura, ma il produttore, organizzato per produrre con processo industrializzato, deve dotarsi di un sistema permanente di controllo della produzione (FPC o Controllo di Produzione in Fabbrica). Tale sistema di controllo deve essere certificato da organismi terzi che siano autorizzati dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavoro Pubblici.

Per quanto riguarda il calcestruzzo i riferimenti normativi sono: Le Linee Guida edite dal Servizio Tecnico Centrale del Servizio Superiore dei Lavori Pubblici, la Norma UNI EN 206-1:2006 e la UNI 11104:2004.

2.2 Acqua

L'acqua, come si è detto, ha la funzione di reagire con il cemento, dando luogo alle reazioni di idratazione, da cui derivano la presa e l'indurimento del calcestruzzo. Il quantitativo di acqua strettamente necessario a questo scopo è circa il 25% del peso del cemento. Tale valore della quantità di acqua rapportata a quella del cemento in un impasto di calcestruzzo sarebbe quello stechiometrico. Il rapporto stechiometrico indica la quantità teorica di acqua necessaria ad un grammo di cemento affinché le reazioni di idratazione siano condotte completamente a termine. In realtà il quantitativo che normalmente si impiega è molto superiore, perché l'acqua svolge anche la funzione di rendere lavorabile l'impasto. La lavorabilità del calcestruzzo aumenta al crescere del quantitativo d'acqua in eccesso rispetto a quella richiesta per le reazioni chimiche, ma dipende anche dalla natura e dimensione degli aggregati impiegati.

In accordo alla *Regola di Lyse*, dato un certo diametro massimo, maggiore è la classe di consistenza richiesta per il calcestruzzo fresco, maggiore deve essere la quantità di acqua nell'impasto. Gli aggregati di piccola granulometria richiedono tuttavia, più acqua di quelli aventi granulometria maggiore, mentre quelli di forma tondeggiante e liscia ne richiedono meno di quelli scabrosi e di forma allungata. Per ottenere un calcestruzzo avente buone caratteristiche è di fondamentale importanza definire il rapporto *acqua/cemento*, in quanto un elevato rapporto dello stesso, produrrebbe una rapida diminuzione delle prestazioni meccaniche (resistenza) e durabilità del calcestruzzo. Infatti, l'acqua in eccesso, rimasta libera, occupa degli spazi che, dopo la fuoriuscita della stessa, rimangono vuoti, aumentando la porosità del materiale. La presenza dei pori riduce la resistenza a compressione del calcestruzzo e ne aumenta la deformabilità; amplifica inoltre alcuni fenomeni di ritiro e viscosità. Inoltre, favorendo

la penetrazione di agenti esterni e la conseguente alterazione del materiale, ne riduce sensibilmente la durabilità.

2.3 Leganti

Un legante è un materiale che, mescolato con acqua, forma una pasta di consistenza variabile, inizialmente plasmabile, ma che successivamente, perdendo gradualmente la sua plasticità, si rapprende (si dice che "fa presa") e indurisce, sviluppando resistenza meccanica. Sono detti leganti aerei quelli che induriscono a contatto con l'aria; sono chiamati leganti idraulici quelli che induriscono anche a contatto con l'acqua. In particolare:

- i leganti aerei (calce idrata e gesso) si impiegano solo in strutture destinate a permanere a contatto con l'aria; si tratta di materiali aventi resistenze meccaniche medio-basse;
- i leganti idraulici (cementi, calci idrauliche e agglomeranti cementizi) possono essere impiegati in strutture che svolgono la loro attività sia a contatto con l'aria, sia immerse in acqua; dopo indurimento possono sviluppare resistenze meccaniche molto elevate.

2.3.1 Cemento

Un cemento, sulla base della norma europea EN 197-1, è definito come "un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che, quando viene mescolato con acqua, forma una pasta che si fissa e indurisce per mezzo di reazioni e processi di idratazione e che, dopo l'indurimento, mantiene la sua resistenza e stabilità anche sotto l'acqua"[4]. Il cemento Portland è il tipo di cemento più diffuso e rappresentando di gran lunga la quota più alta della produzione globale di cemento annuale. Il cemento Portland è un legante idraulico costituito da una miscela di clinker e di gesso biidrato, o più raramente, di anidrite naturale. Esso si presenta come una polvere fine, di colore grigio o bianco, che mescolato con pozzolana oppure con loppa d'altoforno produce rispettivamente il cemento pozzolanico e quello d'altoforno. Il clinker è una miscela di silicato tricalcico (3CaO·SiO₂), β-silicato bicalcico (β-2CaO·SiO₂), alluminato tricalcico (3CaO·Al₂O₃) e una soluzione solida ternaria indicata normalmente come 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃. Sono inoltre presenti diversi componenti minori come alcali, fosfati, fluoruri e solfati che formano, solitamente, soluzioni solide con i silicati e gli alluminati di calcio. Sono note più di 30 materie prime utilizzate per la produzione del cemento Portland, che possono essere suddivise in quattro categorie distinte: calcaree, silicee, argillose e ferrifere.

2.3.1.1 Produzione cemento Portland

La fabbricazione del cemento prevede quattro diverse fasi: *estrazione, preparazione delle materie prime, clinkerizzazione* e *preparazione del cemento*. La Figura 2.3.1.1.1 rappresenta schematicamente la linea di produzione del cemento:

- estrazione della materia prima: le materie prime vengono estratte dalla cava sotto forma di blocchi di dimensioni variabili che non eccedono normalmente il metro cubo. Una volta estratti, i blocchi vengono avviati ad un frantoio che ne riduce le dimensioni. La frantumazione può variare per ogni singola unità produttiva e consiste nel sottoporre i blocchi delle materie prime a degli sforzi d'impatto, d'attrito, di taglio o di compressione. Le materie prime vengono trasportate, inizialmente, tramite pale gommate, mezzi cingolati, camion a benna e poi, dopo la macinazione, mediante nastri trasportatori, catene, elevatori e sistemi idraulici. La materia prima è costituita da una miscela di rocce composta per circa l'80% da calcare (che è principalmente composto da carbonato di calcio, CaCO₃) e 20% di argilla o scisto, fonte di silice, allumina e ossido di ferro.

- preparazione della materia prima: la seconda fase si avvia con l'omogeneizzazione, una serie di operazioni di miscelazione e macinazione per fornire un composto con proprietà chimiche e fisiche appropriate. Durante la macinazione le materie prime vengono introdotte in un mulino e sottoposte ad azioni meccaniche (urto, compressione, attrito), così da ottenere una polvere fine, detta farina cruda, che viene stoccata in silos.
- clinkerizzazione: il materiale finemente macinato viene essiccato, riscaldato all'interno di un forno rotante e poi nuovamente raffreddato. Questa serie di passaggi, a cui si fa riferimento come "clinkering", costituisce la caratteristica principale del processo di fabbricazione di Portland. Trasforma la miscela grezza in clinker, costituita da noduli grigi, duri come il vetro e di forma sferica, con un diametro compreso tra 5 e 25 mm. La clinkerizzazzione consiste, quindi, nell'essiccare, nel disidratare e nel decarbonatare parzialmente il materiale crudo andando a riutilizzare una parte del calore trasportato dai gas provenienti dal forno rotante. La polvere viene poi introdotta all'interno del forno (forno cilindrico in metallo rivestito internamente da materiale refrattario) dove avvengono le reazioni chimiche che la trasformano in clinker. Durante la cottura, il forno ruota intorno al proprio asse. Durante questo movimento il materiale in cottura si trasforma dal suo stato iniziale fino a quello cosiddetto clinkerizzato alla temperatura di 1450 °C. Terminata la cottura, si procede al raffreddatore. Il clinker viene raffreddato mediante uno o più raffreddatori, fino a raggiungere temperature comprese tra 120 e 200°C.

Questa fase permette al clinker di avere una struttura mineralogica e dimensionale appropriata.

preparazione del cemento: il clinker in uscita dal forno viene stoccato in un apposito silo che, da un lato, conferisce riserva all'impianto di macinazione del cemento in caso di fermata accidentale o programmata del forno e, dall'altro, evita al clinker il degrado chimico-fisico causato da uno stoccaggio prolungato all'aria aperta. Per ottenere il prodotto finale, il clinker viene mescolato con il gesso e macinato. La macinazione è un'operazione ad alto costo che consuma circa il 60% dell'energia elettrica totale coinvolta in una tipica cementeria. L'energia elettrica consumata nel processo di produzione del cemento convenzionale è dell'ordine di 110 kWh/tonnellata. Di questa, circa il 30% viene utilizzato per la preparazione delle materie prime, mentre circa il 40% viene investito per la macinazione finale. Il cemento finito viene pompato pneumaticamente in silos di stoccaggio da cui viene prelevato per essere imballato in sacchi di carta o per essere spedito in contenitori.



Fig. 2.3.1.1.1 Rappresentazione schematica della produzione del Cemento Portland

2.3.1.2 Idratazione del cemento Portland

Per idratazione si intende la reazione di un composto anidro con l'acqua, che dà origine a un composto idratato. Nella chimica del cemento, quindi, l'idratazione consiste nella reazione del cemento non idratato con l'acqua, con conseguenti cambiamenti chimici e meccanici. Anche se un'idratazione parziale può avvenire in aria umida, l'idratazione completa si ottiene mescolando la polvere di cemento con una quantità sufficiente di acqua. Quando il cemento viene mescolato con l'acqua, iniziano a verificarsi una serie di reazioni chimiche che causano la trasformazione da una pasta plastica lavorabile a un materiale duro e solido. Di conseguenza, la composizione del clinker influisce direttamente sulla trasformazione dell'intero materiale. L'idratazione del cemento Portland consiste in una serie di singole reazioni chimiche tra l'acqua e i principali componenti della polvere di cemento. Esse avvengono sia in parallelo che in successione. In generale, l'andamento dell'idratazione è influenzato principalmente dalla composizione delle fasi, dalla finezza del cemento (cioè dalla superficie specifica e dalla distribuzione granulometrica), dalla quantità di acqua di impasto rispetto alla quantità di cemento (rapporto acqua/cemento), dalla temperatura di stagionatura ed eventualmente dalla presenza di additivi chimici.

2.3.1.3 Classificazione dei cementi

La qualità della matrice cementizia e quindi del calcestruzzo dipende in massima parte dalle proporzioni di acqua e di cemento impiegati per l'impasto: poca acqua rispetto al cemento (cioè un rapporto acqua/cemento basso) è indispensabile per un calcestruzzo di qualità, in quanto predispone così la formazione di una matrice cementizia con caratteristiche fisico-meccaniche superiori. Tuttavia, a parità di rapporto acqua/cemento, come anche di tutti gli altri parametri (tipo e granulometria dell'aggregato, rapporto aggregato/cemento, presenza di additivi, qualità della stagionatura, ecc.), le prestazioni del calcestruzzo nella fase esecutiva, e soprattutto in servizio, possono variare significativamente in funzione del cemento impiegato. Insomma, non tutti i cementi sono uguali dal punto di vista prestazionale, pertanto sorge il problema di classificarli in base alla loro prestazione e composizione.

I criteri adottati per la classificazione dei cementi possono variare nel tempo a seconda della evoluzione tecnologica, della disponibilità delle materie prime e anche delle condizioni geo-politiche. Si potrebbe cominciare proprio da quest'ultimo aspetto. Fino al 1993 in Italia vigeva una normativa – emanata con un *Decreto Ministeriale del 1968* – che regolamentava la produzione dei cementi sul territorio nazionale. Con l'avvento delle regole comunitarie nell'Unione Europea, anche per il cemento è stata

concordata una nuova normativa (EN 197/1) basata su una classificazione unica. L'obiettivo è duplice: da una parte consentire la distribuzione del cemento, prodotto in un qualsiasi paese comunitario, su tutto il territorio dell'Unione; dall'altra, mettere in condizioni i tecnici delle costruzioni (preconfezionatori, prefabbricatori, imprese e studi di progettazione) di poter scegliere, con gli stessi criteri, il cemento più adatto allo specifico impiego in qualsiasi Paese dell'Unione essi si trovino ad operare.

La normativa europea sui cementi è incentrata su due requisiti fondamentali: la classe di resistenza ed il tipo di cemento, quest'ultimo inteso come composizione dei suoi ingredienti.

Esistono 25 diversi tipi di cemento, e ciascun tipo può essere disponibile in 6 diverse classi di resistenza. Da ciò deriva che in totale sono teoricamente possibili 150 diversi cementi.

In realtà, nel singolo Paese – per esempio l'Italia – non tutti e 25 i tipi vengono prodotti, per oggettiva mancanza locale di alcuni ingredienti o per mancanza di una tradizione pre-esistente a produrre ed impiegare alcuni determinati tipi di cemento. Nella tabella che segue (Tabella 2.3.1.3.1) è possibile vedere la classificazione dei cementi in funzione della resistenza meccanica a compressione a 2, 7 e 28 giorni.

Classe di Resistenza	Resistenza a compressione [N/mm ²] minima a garantita a:							
	2 Giorni	7 giorni	28 Giorni					
32.5N	-	16	32,5					
32.5R	10	-	32,5					
42.5N	10	-	42,5					
42.5R	20	-	42,5					
52.5N	20	-	52,5					
52.5R	30	-	52,5					

Tabella 2.3.1.3.1 Resistenza meccanica a compressione per le classi di resistenza dei cementi

Ciascun tipo di cemento viene fornito dal produttore in una delle seguenti classi di resistenza: 32,5N; 32,5R; 42,5N; 42,5R; 52,5N e 52,5R. Il numero (32,5, 42,5 oppure 52,5) individua la soglia minima di resistenza meccanica a compressione, in N/mm², misurata a 28 giorni. La presenza o meno del simbolo R dopo il numero sta a significare il comportamento meccanico del cemento alle brevi stagionature: per esempio sia il cemento di classe 32,5N, sia quello di classe 32,5R debbono superare a 28 giorni la resistenza meccanica di 32,5 N/mm²; tuttavia il cemento di classe 32,5R ("R" sta per rapido) deve anche superare la soglia di 10 N/mm² a 2 giorni, mentre quello di classe 32,5N deve garantire il raggiungimento di un limite prestazionale a 7 giorni. Analogamente la differenza tra le classi 42,5N e 42,5R (o tra 52,5 e 52,5R) sta solo nel diverso comportamento alla stagionatura di 2 giorni: quelli contrassegnati con R posseggono una maggiore resistenza meccanica a 2 giorni, mentre a 28 giorni i

requisiti di resistenza meccanica per le due classi di resistenza (42,5N e 42,5R, oppure 52,5N e 52,5R) sono identici.

A seconda della composizione, invece, la norma europea UNI EN 197 divide i cementi in cinque categorie principali (Fig.2.3.1.3.1):

- CEM I: sono costituiti almeno per il 95% da clinker e in misura variabile da 0 a 5% da costituenti minori. Sono generalmente utilizzati nella prefabbricazione di calcestruzzi armati semplici e precompressi;
- CEM II: hanno come costituenti principali oltre al clinker, presente in percentuale variabile dal 65 al 94%, le loppe granulate d'altoforno, la silica fume, le pozzolane, le ceneri volanti, scisti calcinati e calcare. Hanno proprietà molto simili a quelle dei CEM I che li rendono idonei ai più comuni impieghi nella realizzazione di calcestruzzi armati normali e precompressi, di elementi prefabbricati;
- CEM III: sono costituiti da clinker fino al 64%, e loppa granulata basica d'alto forno. Questo tipo è articolato in tre sottotipi con contenuti di loppa variabile dal 36% al 95%. Rispetto al cemento Portland, i CEM III sono principalmente indicati nelle situazioni in cui il calcestruzzo è soggetto ad ambienti chimicamente aggressivi e per la realizzazione di opere di grosse dimensioni;
- CEM IV: sono costituiti da clinker tra il 45 e 89%, e materiale pozzolanico naturale o artificiale. In base alla percentuale di materiale pozzolanico, variabile dal 11% al 55%, sono articolati in due sottotipi. Il termine "pozzolana" deriva dal nome da Pozzuoli, località della Campania dove si estraeva il materiale, destinato, fin dall'antichità, alla produzione malte idrauliche. Presentano una elevata resistenza all'attacco chimico;
- CEM V: sono costituiti da una miscela di clinker, loppa d'altoforno e pozzolana e sono adatti a realizzare calcestruzzi esposti ad ambienti mediamente aggressivi quali acqua di mare, acque acide, terreni solfatici, etc.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Composizione (percentuale in massa ^{a)})										
			Costituenti principali								Costituenti		
			Clinker	Loppa di altoforno S	Fumo di silice D ^{b)}	Pozzolana		Cenere volante		Scisto	Calcare		secondari
						naturale	naturale calcinata	silicea	calcarea	calcinato	ato		
						Р	Q	V	W	T	L	LL	1
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	<u>.</u>	1.00			-	- 14			- 2	0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20		*		-			-		0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35		÷.	•	-			-	•	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94		6-10	-	88						0-5
	Cemento Portland	CEM II/A-P	80-94	- 14	1723	6-20			12	12			0-5
	alla pozzolana	CEM IVB-P	65-79	а . С		21-35	<u>.</u>	-			- 2		0-5
		CEM II/A-Q	80-94				6-20					-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79			•	21-35					•	0-5
	Cemento Portland	CEM II/A-V	80-94		-	-		6-20		-	-	•	0-5
	alle ceneri volanti	CEM IVB-V	65-79		-	- 2	· ·	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	1.12	240		1.	-	6-20			1	0-5
		CEM IVB-W	65-79		() # ()		- 04 	-	21-35			- 10	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94			+				6-20		•	0-5
		CEM II/B-T	65-79							21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94			-					6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	14 I.	148	12	್	- 27	12	-	21-35	2	0-5
		CEM II/A-LL	80-94								-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79			•					-	21-35	0-5
	Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/A-M	80-88	-				12-20				-	0-5
		CEM IVB-M	65-79	-				21-35				*	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	÷.			- 27		-	-		0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	1.40	- 20							0-5
		CEM III/C	5-19	81-95		-					-	-	0-5
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{ci}	CEM IV/A	65-89		-		- 11-35				-	•	0-5
		CEM IV/B	45-64				- 36-55				-		0-5
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	-	- 18-30 -		1	12	2	2	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49		-	- 31-49				-	2	0-5
CEM V a) b) c)	Cemento composito ^{c)} I valori del prospetto s La proporzione di fum Nei cementi Portland CEM V/B i costituenti	CEM V/A CEM V/B i riferiscono alla i di silice è limita compositi CEM principali divers	40-64 20-38 somma d ta al 10% II/A-M e i dal clinke	18-30 31-49 ei costitue CEM II/B-1 r devono e	- nti princip M, nei ce		- 18-30 - - 31-49 - ndari. zolanici C diante la d	EM IV/A e	- - e CEM IV/ ne del cen	- B e nei ce	- - ementi co esempio	- - mpositi (vedere p	CEM

Fig. 2.3.1.3.1 Classificazione cementi secondo la norma UNI EN 197-1

Nella presente tesi è stato utilizzato un nuovo cemento che non rientra nella norma EN 197-1. È stato sviluppato da HeidelbergCement AG e denominato CEM II/C (S-LL). La composizione percentuale e le caratteristiche sono riservate (Fig. 2.3.1.3.2).

Tale cemento, è composto da clinker di cemento Portland (CEM I 52.5R), in combinazione con aggiunte minerali come loppa d'altoforno (S) e calcare (LL).



Fig. 2.3.1.3.2 CEM II/C (S-LL)

2.4 Aggregati

Il cemento costituisce il collante che tiene insieme lo "scheletro" del calcestruzzo, costituito da materiali inerti (aggregati) che non partecipano alle reazioni chimiche di presa e indurimento. Gli aggregati costituiscono la parte dominante (in peso) tra i costituenti del calcestruzzo e sono formati da materiali naturali, quali sabbia e pietrisco, o artificiali, come l'argilla espansa. Caratteristica degli aggregati è quella di essere formati da un'opportuna miscela di elementi di diversa dimensione (granulometria). L'opportunità di impiegare materiali di dimensioni diverse dipende dal fatto che se si usassero elementi di uguale dimensioni resterebbe un'elevata

percentuale di vuoti, che dovrebbe essere riempita dalla pasta cementizia, con conseguenze negative sia sulla qualità, sia sul costo del calcestruzzo. La presenza di elementi di dimensioni diverse nelle proporzioni opportune consente un ottimale riempimento dei vuoti, riducendo la quantità di cemento necessaria a "legare" tra loro gli inerti.

Gli inerti si distinguono, in base al diametro delle particelle, in:

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

Le proprietà differiscono in base al processo di estrazione o di fabbricazione da cui derivano, in base alla provenienza, alla forma che possiedono, e alla loro natura petrografica (sabbie silicee o calcaree).

L'analisi granulometrica di un aggregato si effettua mediante vagliatura con setacci aventi diversa apertura di maglia, ottenendo così i pesi delle singole frazioni granulometriche. I relativi pesi espressi in percentuale rispetto al peso dell'intero campione, consentono di calcolare il materiale passante ad ogni setaccio. La granulometria di un aggregato si rappresenta normalmente attraverso la sua curva granulometrica che si ottiene riportando in ascissa il diametro dei fori e in ordinata la percentuale (in peso) della parte passante attraverso i setacci di diametro crescente.

La curva granulometrica ottimale è quella di *Fuller*, ottenuta nell'ipotesi di particelle di forma sferica. La curva teorica di *Fuller* è espressa dalla seguente legge:

$$p = 100 \sqrt{\frac{d}{d_{max}}}$$

dove

- p è la percentuale di passante;
- *d* è il diametro dei fori del setaccio;

- *d_{max}* il diametro massimo degli inerti.

Bolomey ha modificato la curva di *Fuller* per tenere conto dei seguenti aspetti: forma degli inerti più grandi, superficie levigata (ghiaia) o scabra (pietrisco) degli stessi e lavorabilità dell'impasto. La curva di *Bolomey* ha espressione:

$$p = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{d_{max}}}$$

in cui A è un parametro che assume valori crescenti da 8 a 14 se aumenta la lavorabilità del calcestruzzo e se si passa da aggregati alluvionali tondeggianti ad aggregati di frantumazione di forma irregolare. L'aumento del parametro A comporta un aumento del contenuto del materiale fine.

La scelta di una o dell'altra curva, dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo che si vuole ottenere: in generale, per calcestruzzi "asciutti" (poco lavorabili), dove si mira a ridurre al minimo il volume dei vuoti interstiziali ed il dosaggio di cemento, si ricorre alla curva di *Fuller*; per calcestruzzi più lavorabili, è preferibile adottare come riferimento un inerte ideale in curva *Bolomey* per ridurre al minimo la segregazione del calcestruzzo grazie al maggior contenuto di elementi fini.

Affinché la resistenza del calcestruzzo dipenda dalla qualità e quantità di cemento occorre che la resistenza degli inerti, in particolare quelli di diametro maggiore, sia superiore alla resistenza finale del calcestruzzo. Questo avviene normalmente per i calcestruzzi che impiegano inerti naturali. Affinché i materiali lapidei naturali possano essere utilizzati come aggregati, senza creare problemi durante la vita in esercizio del calcestruzzo, devono avere composizione appropriata, cioè non contenere sostanze organiche, limi argillosi, cloruri, solfati e minerali alcali-reattivi.

I requisiti di accettazione degli inerti utilizzati per confezionare calcestruzzi e malte sono contenuti nella normativa europea UNI EN 13055-1: 2016.

Per la realizzazione dei getti nella presente sperimentazione sono stati utilizzati i seguenti inerti: ghiaia 10/15, ghiaino 5/10 e sabbia 0/5. (Fig. 2.4.1-3) Nella Figura 2.4.4 si riporta la curva granulometrica degli aggregati utilizzati.



Fig. 2.4.1 Ghiaia 10/15



Fig. 2.4.2 Ghiaino 5/10



Fig. 2.4.3 Sabbia 0/5



2.5 Fibre

L'idea di disperdere delle fibre in una matrice legante allo stato plastico per migliorarne le proprietà meccaniche, non può certamente considerarsi nuova. Infatti, già ai primordi della civiltà, si realizzavano mattoni impastando paglia e argilla e si impiegavano i crini di cavallo per rendere più resistenti le malte a base di calce.

Più recentemente, all'inizio del XX secolo sono state impiegate le fibre di amianto per migliorare le proprietà meccaniche delle paste di cemento, che successivamente si è scoperto essere cangerogene. In questi ultimi anni un notevole interesse è stato suscitato da fibre di diversa natura (acciaio, plastica, vetro, ghisa, ecc.) per rinforzare i materiali cementizi.

Negli ultimi decenni l'uso di fibre per la produzione di calcestruzzi fibrorinforzati ha riscosso un grande successo, al punto che le nuove norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018) includono il calcestruzzo fibrorinforzato tra i materiali per la realizzazione di elementi strutturali. Questo successo è dovuto dal miglioramento offerto dalle fibre sulle caratteristiche fisiche e meccaniche del calcestruzzo ordinario.

Il calcestruzzo fibrorinforzato è un materiale composito – appartiene alla famiglia dei calcestruzzi speciali – che oltre agli ingredienti normalmente impiegati (cemento, acqua, inerti ed additivi), contiene anche delle fibre. L'aggiunta di fibre in forma dispersa in un conglomerato cementizio ne modifica le proprietà meccaniche e fisiche e, in particolare, migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure. Inoltre, se il volume delle stesse è sufficientemente elevato, queste sono in grado di migliorare anche la resistenza a flessione e a taglio del calcestruzzo. In termini di resistenza a compressione non forniscono alcun vantaggio significativo.

Da qualche tempo alla funzione "antifessurativa", alla funzione di conferire il materiale elevata rigidità e resistenza meccanica si è affiancata anche la funzione di conduttore elettrico per rendere il calcestruzzo conduttivo così da permettere il monitoraggio della salute della struttura (SHM) attraverso l'utilizzo di appositi strumenti di misura.

Le fibre attualmente impiegate nei materiali cementizi sono di diversa natura e vengono prodotte in varie forme e dimensioni. Il parametro numerico correntemente impiegato per contraddistinguere una fibra è il "rapporto di aspetto", definito come il rapporto tra la lunghezza ed il *"diametro equivalente"* della fibra stessa. Fibre comunemente impiegate nei materiali cementizi, con una lunghezza variabile tra 1 e 80 mm, hanno un rapporto d'aspetto compreso tra 50 e 400.

Esistono diversi tipi di fibre impiegate per il confezionamento del calcestruzzo. Quelle maggiormente utilizzate sono di tipo metallico, polimerico, in vetro, in carbonio o in materiale naturale (cellulosa, legno ecc..). L'influenza delle fibre sulle proprietà meccaniche di un conglomerato cementizio dipende dalle proprietà materiale di cui sono costituite, in particolare dalla tenacità e dal modulo elastico a trazione, e da alcuni parametri geometrici come la forma, la lunghezza e il diametro equivalente.

Esistono fibre ondulate, uncinate, nervate, ad estremità schiacciate, definite a seconda della geometria della linea d'asse delle fibre e dall'eventuale variazione della loro sezione trasversale. A parità di composizione e di dosaggio, l'efficacia delle fibre migliora se aumenta il rapporto d'aspetto (rapporto tra la larghezza e l'altezza) e se la forma assume un contorno irregolare che favorisca l'adesione alla matrice cementizia.

Le fibre devono essere scelte in funzione della specifica applicazione. Nel caso in esame le fibre utilizzate per la realizzazione dei campioni sono le fibre di carbonio riciclate (RCF).

2.5.1 Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio, apparse sul mercato nei primi anni '60, sono fibre sintetiche caratterizzate da altissima resistenza meccanica ed altissima rigidità.

Per fibra di carbonio si intende un polimero di atomi di carbonio strutturato in forma grafitica con un diametro compreso tra 5 e 15 μ m. Queste fibre, pur

presentando un'ottima resistenza, specialmente nella direzione di orientamento dei filamenti, presentano un modulo di elasticità piuttosto basso. La struttura grafitica è, in effetti, la caratteristica fondamentale di queste fibre e la principale ragione del loro utilizzo nello sviluppo dei materiali compositi.

Industrialmente le fibre di carbonio vengono prodotte per lavorazione ad alta temperatura di particolari fibre polimeriche dette *"precursori"*. Il precursore attualmente più utilizzato per la produzione di fibre in carbonio è il poliacrilonitrile (PAN), un materiale di per sé molto utilizzato anche nel campo edilizio per prevenire la fessurazione da ritiro plastico nelle malte e nei calcestruzzi.

Il processo di produzione di fibre di carbonio dal poliacrilonitrile comprende una prima fase in cui il polimero viene trasformato in fibra attraverso il processo di filatura, che si suddivide in filatura a secco, filatura a umido o filatura per fusione. Una volta ottenute, le fibre di poliacrilonitrile vengono sottoposte a trattamento termico e stiramento, quest'ultimo processo in particolare conferisce loro l'orientamento desiderato.

Il termine "trattamento termico" comprende il processo di pirolisi, processo di decomposizione termochimica di materiali organici, ottenuto attraverso l'applicazione di calore, a temperature comprese tra 400 e 800 °C, in completa assenza di un agente ossidante, oppure con una ridottissima quantità di ossigeno. Il processo di pirolisi non comprende tutte le fasi di produzione delle fibre di carbonio, fasi che raggiungono temperature di trattamento molto più elevate, fino alla fase di grafitizzazione a 2500 °C. Più precisamente, infatti, il trattamento termico consente di ottenere fibre di carbonio attraverso la stabilizzazione che si suddivide in tre fasi:

 ossidazione, durante la quale la catena polimerica viene sottoposta a riscaldamento. Questo processo modifica la struttura della catena polimerica rendendola ad anelli chiusi e allineati. A seguito dell'ossidazione si verifica
un'espulsione di atomi d'idrogeno, (deidrogenazione), accompagnata dalla formazione di anelli a struttura rigida, detta ciclizzazione;

- carbonizzazione, che si svolge fino a una temperatura di 1300 °C in atmosfera inerte. Esso consente la formazione di fibre di carbonio che presentano una struttura grafitica pressoché pura, continua e regolare lungo tutta la fibra;
- grafitizzazione, che avviene a temperature comprese tra i 2500 °C e i 3000 °C e contribuisce a migliorare le caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio.
 La tipologia di prodotto finale è difficilmente standardizzabile e dipende dal tipo di processo applicato nella fase finale.

Dalla grafitizzazione si ottengono spesso fibre caratterizzate dall'alto modulo elastico (HM) e altissimo modulo elastico (UHM). Se invece viene applicato un trattamento superficiale, le fibre ottenute tendono ad essere caratterizzate da alta tenacità (HT) e modulo elastico standard.

Le FC sono offerte in commercio in forma corta o continua. Le fibre corte si distinguono in:

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

Date le dimensioni estremamente sottili delle fibre di carbonio, si è scoperto che i compositi cementizi confezionati con tali fibre risultano essere conduttori migliori rispetto ad altri confezionati con altri tipi di fibre, ad esempio quelle metalliche. Chiarello e Zinno [5] hanno studiato l'influenza delle caratteristiche dimensionali dei filamenti conduttivi, dimostrando che una maggiore lunghezza crea percorsi elettrici più efficaci a parità di volume di addizione. In particolare, hanno dimostrato che le fibre di carbonio lunghe 6 mm aumentano la conducibilità elettrica fino a due ordini di grandezza rispetto a materiali cementizi semplici. Le fibre di carbonio vengono spesso usate per aumentare il comportamento piezoresistivo dei materiali cementizi e rappresentano l'aggiunta più efficiente per evidenziare tale comportamento. Quando le fibre di carbonio corte vengono aggiunte al mix-design, la resistività elettrica varia con il carico applicato: è possibile ottenere una rete di conduttori che viene localmente interrotta in presenza di un danneggiamento. Misurando quindi la variazione della risposta elettrica del componente è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore per monitorare l'innesco e l'evoluzione del danneggiamento [6].

Per i principi di economia circolare, focalizzati alla riduzione dell'impatto ambientale del calcestruzzo, l'uso di fibre riciclate (*Recycled Carbon Fibers* – RCF), piuttosto che vergini, sta trovando largo impiego nel settore edilizio.

Nel caso in esame sono state utilizzate RCF (Fig. 2.5.1-3) provenienti da una miscela di fibre di carbonio e grafite ex-PAN di tutte le origini, rivestite con glicerolo, di lunghezza pari a 6 mm e diametro pari a 7 μ m, e con le seguenti caratteristiche:

Resistenza a trazione media [MPa]	Modulo Elastico medio, E [MPa]	Densità [g/cm³]	Allungamento a rottura %	Resistenza specifica [Ω·cm]
3500	230 000	1,7 < d < 2	1,5	0,0015

Tabella 2.5.1. Caratteristiche delle RFC utilizzate



Figura 2.5.1 Fibre di carbonio riciclate (RCF)



Figura 2.5.2 Fibra di carbonio riciclate viste al microscopio a scansione (SEM)



Figura 2.6.3 Filamenti di carbonio riciclato al microscopio a scansione (SEM)

2.6 Biochar

Se le fibre servono a formare una rete, i filler occorrono per riempire gli spazi lasciati tra le fibre con lo scopo di aumentare la conducibilità del materiale. Nella sperimentazione oggetto del presente elaborato, il filler carbonioso utilizzato è il biochar. Esso nasce come sottoprodotto di un processo di combustione principalmente di biomassa. Per biomassa si intende "*una frazione biodegradabile dei prodotti rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura (studio dei boschi) e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la componente biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani*" [7]. Si tratta quindi di un insieme di organismi di origine animale o *vegetale presenti in un determinato ambiente ed è spesso un concetto associato al* settore ecologico e a quello delle energie rinnovabili.

Negli ultimi anni si fa sempre più uso di energie rinnovabili e la biomassa ricopre un ruolo molto importante in questo contesto: quando si bruciano le biomasse,

estraendone l'energia immagazzinata nei componenti chimici, l'ossigeno presente nell'atmosfera si combina con il carbonio delle piante e produce anidride carbonica, uno dei principali gas responsabile dell'effetto serra. Tuttavia, la stessa quantità di anidride carbonica viene assorbita dall'atmosfera durante la crescita delle biomasse. Il processo è dunque ciclico. Da quest'attività di produzione di energia si ottengono dei residui liquidi, gassosi o solidi come, appunto, il biochar. Quest'ultimo è ottenuto riscaldando la biomassa ad una temperatura compresa tra i 400 °C e gli 800 °C in ambiente privo di ossigeno.

Tale processo prende il nome di pirolisi, che consiste in una decomposizione termochimica di materiali organici, ottenuta tramite l'applicazione di calore e in assenza di un agente ossidante (solitamente ossigeno). Questo trattamento termico consiste nella conversione energetica di diversi materiali organici come, ad esempio, le biomasse che derivano da colture arboree o dalle industrie agroalimentari. I materiali vengono decomposti termicamente in modo non ossidativo, ovvero senza alcun apporto di ossigeno dall'esterno.

Il biochar che si ottiene è un prodotto residuo con elevata porosità (maggiore di 300 m²/g), le cui caratteristiche chimico-fisiche dipendono dal tipo di biomassa utilizzato e dalle condizioni termiche in cui avviene il processo. Oltre al biochar, i prodotti ottenuti sono syngas e bio-oil.

La temperatura è una componente che determina in modo considerevole la struttura del biochar, influenzandone il contenuto di carbonio. Essa è costituita da strati di carbonio a struttura cristallina e non; all'aumentare della temperatura aumenta la cristallinità della struttura, che diventa così più ordinata. Questo avviene in modo proporzionale in condizioni termiche che non superano gli 800 °C, temperatura oltre la quale il biochar perde di rendimento e non migliora in termini di quantità di carbonio.

41

L'uso del biochar rappresenta un importante passo in avanti nei confronti delle maggiori problematiche che riguardano l'inquinamento ambientale e la sempre più crescente domanda di energia. In generale, il biochar sta diventando un materiale di sempre maggiore interesse per diverse sperimentazioni e una di queste è quella relativa all'aggiunta di micro/nano-particelle all'interno di impasti cementizi. Precedenti sperimentazioni hanno dimostrato che le particelle ottenute in seguito al processo di pirolisi di biomasse acquisiscono notevoli proprietà meccaniche, tanto da poter essere coinvolte nel settore delle costruzioni. I risultati più interessanti sono stati riscontrati nelle miscele per la realizzazione di compositi a base cementizia: aggiungendo all'impasto piccole percentuali di biochar, con dimensioni alla scala del micron, i prodotti hanno mostrato una maggiore resistenza a flessione e una maggiore energia di frattura, rendendo il percorso di frattura più tortuoso rispetto a quello del cemento privo di aggiunta.

Una delle problematiche circa l'uso del biochar negli impasti a base cementizia è la sua elevata capacità di assorbimento: come detto precedentemente le particelle di cui è composto hanno una struttura molto porosa che rende maggiore la necessità di acqua. Di conseguenza, la lavorabilità del materiale diventa più difficile essendo l'impasto più denso rispetto a quello tradizionale. Tuttavia, questa caratteristica fa sì che le particelle assorbano una determinata quantità di acqua che viene poi rilasciata durante la fase di idratazione iniziale, favorendo il processo di polimerizzazione del calcestruzzo e rendendo il materiale più rigido e resistente. Si tratta di una proprietà che ne favorisce l'indurimento ma allo stesso tempo è necessario calibrare le percentuali di aggiunta, per evitare un rapido addensamento dell'impasto che rende più complicata la lavorazione. È bene sottolineare che le prestazioni dei prodotti ottenuti da biochar dipendono anche dall'origine della biomassa utilizzata.

Solitamente il biochar è distribuito commercialmente sotto forma di pellet, ma dovrebbe essere macinato prima di essere aggiunto alla miscela del calcestruzzo. In

42

questo modo infatti la dispersione delle particelle può essere migliorata [8], [9], ottimizzandone l'effetto sulla resistività elettrica.

Nella presente sperimentazione, il biochar è stato fornito dall'azienda RES Società Cooperativa di Ravenna in forma di pellet (Fig. 2.6.1a), pertanto si è provveduto a macinarlo e setacciarlo per migliorare la sua dispersione all'interno del materiale cementizio (Fig. 2.6.1b).



Figura 2.6.1 Biochar in forma di pellet (a) e dopo la macinazione (b)

La macinatura è avvenuta mediante l'ausilio di un mulino a biglie (Fig. 2.6.2), parzialmente riempito di biochar (100 g alla volta), fatto ruotare intorno ad un asse orizzontale per circa 20 minuti. Successivamente, per ottenere una polvere finissima in grado di distribuirsi il più omogeneamente possibile, è stata eseguita una seconda fase di setacciatura con setaccio ASTM 200 (74 μ m) (Fig. 2.6.3).



Figura 2.6.2 Mulino a biglie

Figura 2.6.3 Setaccio 74 µm

Al termine della procedura il biochar ottenuto è un filler finissimo come si può vedere dalla Fig. 2.6.1b, mentre la curva granulometria è riportata in Figura 2.6.4.



Figura 2.6.4 – Curva granulometrica biochar

Bibliografia

[1] Collepardi, M., Collepardi, S., & Troli, R. (2009). Il nuovo calcestruzzo. Tintoretto.

[2] Bertolini, L. (2010). Materiali da costruzione: degrado, prevenzione, diagnosi, restauro. *Editore Città Studi*.

[3] Visconti, IC, Caprino, G., & Langella, A. (2009). *Materiali compositi: tecnologie, progettazione,* . U.Hoepli.

[4] BSI Standards Publication Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. 2011.

[5] Chiarello, M., & Zinno, R. (2005). Conducibilità elettrica del CFRC automonitorato. *Compositi di cemento e calcestruzzo*, *27* (4), 463-469.

[6] Marino Quaresism, Michele Zappalorto, 2014. Nanocompositi "self-sensing" per il monitoraggio dell'integrità struttrale di componenti in composito. Compositi magazine, No 32

[7] Della Repubblica, P. (2011). Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE Decreto legislativo n. 28 del 2011.

[8] S. Rukzon, P. Chindaprasirt, and R. Mahachai, "Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash," Int. J. Miner. Metall. Mater., vol. 16, no. 2, pp. 242–247, 2009, doi: https://doi.org/10.1016/S1674-4799(09)60041-8.

[9] W. Xu et al., "Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste," Constr. Build. Mater., vol. 89, pp. 90–101, 2015, doi: <u>https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.030</u>.

Achternbosch, M., Bräutigam, KR, Hartlieb, N., Kupsch, C., Richers, U., Stemmermann, P., & Gleis, M. (2003). Metalli pesanti nel cemento e nel calcestruzzo risultanti dal coincenerimento dei rifiuti nei forni da cemento per quanto riguarda la legittimità dell'utilizzo dei rifiuti. *Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH*.

Pavese, M., Mangani, N., Lavagna, L., & Suarez-Riera, D. Materiali cementizi contenenti plastica di scarto.

3. Getti preliminari

3.1 Introduzione

Il lavoro svolto in questa tesi è suddiviso in tre parti.

La prima parte del lavoro sperimentale ha come oggetto la realizzazione di due getti di prova (Getto 1- Getto 2) con differenti rapporti acqua/cemento (0,50 e 0,60) al fine di ottenere, a seguito delle prove di compressione, una miscela che al 28° giorno di stagionatura avesse resistenza meccanica circa pari a 40 MPa.

Poiché i test sperimentali devono essere eseguiti su 9 campioni di dimensioni 10 cm x 10 cm x 50 cm (scala 1:5 di un travetto), la seconda parte è incentrata sul montaggio dei casseri, installazione dei vari sensori per le fasi di monitoraggio e realizzazione del getto definitivo.

La terza parte mira a dimostrare come i sensori coinvolti siano in grado di descrivere le modalità con cui la struttura reagisce in caso di eventi sismici. Pertanto, i provini dopo essere sollecitati a flessione con incrementi di carico successivi, vengono sottoposti ad un'analisi vibrazionale per valutare la risposta in frequenza a seguito di ciascun step di carico. Definita la resistenza meccanica a flessione (R_f) della miscela le sollecitazioni applicate sono le seguenti:

- R₁ = 10% R_f
- $R_2 = 30\% R_f$
- $R_3 = 50\% R_f$
- R₄ = 90% R_f
- $R_5 = R_f$
- R₆ (dopo rottura)

La prima sollecitazione (R₁) è stata scelta per fare in modo che il campione rimanga in campo elastico e quindi integro; la seconda (R₂) per fare in modo che il carico porti il provino vicino al limite del campo elastico (possibile formazione di prime microfessure), la terza (R₃) per fare in modo che il carico superi tale campo e si formino microfessure via via crescenti, la quarta (R₄) per rientrare nel campo non elastico in maniera maggiore, la quinta (R₅) per generare la prima fessura al centro del provino, la sesta (R₆) per aprire la fessura di circa 1 mm.

3.2 Mix Design

Il mix design è letteralmente il "progetto della miscela", più precisamente è il "calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste dal progettista (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili (cemento, inerti, additivi)".

Il progettista strutturale deve redigere apposita relazione (relazione sui materiali) in cui descrive la qualità del calcestruzzo richiesto, indicando la classe di resistenza, la classe di esposizione, la classe di consistenza e la dimensione nominale massima dell'aggregato. È pertanto compito e responsabilità del produttore del calcestruzzo progettare una miscela idonea a soddisfare i requisiti richiesti dal progettista. Per effettuare il corretto mix design è necessario considerare che:

 la lavorabilità cresce all'aumentare del quantitativo di acqua utilizzata per l'impasto e dipende anche dalle caratteristiche degli inerti utilizzati (diametro massimo previsto e superficie dell'inerte: liscia o scabra) oltre che dalla presenza di eventuali additivi specifici (Fig. 3.2.1).

48



Figura 3.2.1 Influenza del diametro massimo (D_{max}) dell'inerte sulla correlazione slump-acqua di impasto

Infatti, a parità di D_{max}, la quantità d'acqua che occorre impiegare per confezionare un calcestruzzo con un determinato slump⁵, è maggiore se si utilizza un inerte frantumato dal contorno irregolare piuttosto che un inerte alluvionale dal contorno tondeggiante: ovvero, a parità di dimensione, un inerte dal contorno irregolare, rispetto a quello dal contorno tondeggiante, presenta un attrito maggiore nei confronti della matrice cementizia e richiede, quindi, un maggior quantitativo di acqua per conseguire la stessa lavorabilità, cioè la stessa mobilità, del calcestruzzo fresco.

 la resistenza meccanica è funzione del rapporto acqua/cemento e della quantità di cemento da utilizzare (se misurata a 28 giorni dipende anche dal tipo e dalla classe del legante): al diminuire del primo e al crescere della seconda aumenta la resistenza meccanica (Fig. 3.2.2).

⁵ Lo slump è la deformazione che un impasto subisce per effetto del proprio peso, quando viene privato del recipiente che lo sostiene.



Figura 3.2.2 Correlazione della Rck con il rapporto a/c per tre diversi cementi

 il grado di durabilità dipende da diversi fattori che influiscono sul mix-design, quali nello specifico: la necessità di classificare gli ambienti in base al loro carattere aggressivo nei confronti del calcestruzzo e/o dei ferri di armatura (classi di esposizione); l'adozione di un rapporto a/c tanto più basso quanto maggiore è il livello di aggressione ambientale per predisporre un calcestruzzo impermeabile alla penetrazione degli agenti aggressivi; la necessità di inglobare aria in forma di micro-bolle uniformemente distribuite nella matrice cementizia (ed in misura tanto maggiore quanto minore è il diametro massimo dell'inerte) nei calcestruzzi esposti ai cicli di gelo-disgelo.

Una volta individuato il rapporto a/c, deve essere determinato il volume dell'inerte (V_i) sottraendo al volume del calcestruzzo (V_{cls}) , il volume dell'acqua (V_a) , il volume del cemento (V_c) e il volume di aria intrappolata (V_a') , quest'ultima definita in funzione del diametro massimo degli inerti.

Il volume V_i dell'inerte totale viene ripartito in quello dei singoli inerti in base alle curve granulometriche di questi ultimi rispetto alla curva ottimale. I volumi di sabbia (V_s) e di ghiaia (V_g) così ottenuti vengono convertiti nelle corrispondenti masse moltiplicando i volumi per le corrispondenti masse volumiche ms e mg. [1]

3.2.1 Mix Design Getto 1

In partenza è stata definita la dimensione massima dell'aggregato (Dmax=15 mm), e la lavorabilità di riferimento (S5). Applicando la Regola di Lyse si è ricavato che la quantità d'acqua necessaria per realizzare 1 litro di miscela è pari a 245 kg/m³.

 Tabella 3.2.1.1 Richiesta d'acqua in funzione del diametro massimo dell'aggregato e della classe di consistenza

Diametro [mm]	Richi	esta d'acqu	ıa (kg/m³) pe	r classe di c	onsistenza
[]	S1	S2	53	S 4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230

Avendo a disposizione un aggregato di origine fluviale, caratterizzato da superficie più liscia e spigoli tondeggianti, alla quantità d'acqua ottenuta in precedenza sono stati sottratti 10 g/m³.

Il valore del rapporto acqua/cemento stabilito per il *Getto 1* è stato fissato a 0,50, pertanto, noto il peso dell'acqua (235g), è stata definita la quantità di cemento da aggiungere (470 g).

Al fine di ottenere una corretta progettazione della miscela, è necessario anche definire il volume di aria intrappolata (a') nel calcestruzzo compattato in funzione del diametro massimo dell'inerte, mediante l'utilizzo del grafico riportato in seguito, e pari a 2,5%:



Figura 3.2.1.1 Volume di aria intrappolata (a') nel calcestruzzo compattato in funzione del diametro massimo dell'inerte

Alla miscela tradizionale sono stati aggiunti materiali conduttivi sotto forma di filler e fibre, con lo scopo di incrementare la conducibilità elettrica del calcestruzzo, quali nello specifico:

- Biochar (BCH), con densità 2,0 g/cm³;
- Fibre di Carbonio Riciclato (RCF), con densità 1,85 g/cm³;

Di seguito vengono riportate le percentuali di aggiunte sul totale della miscela (1 litro):

Tipo Aggiunta	Aggiunta su % in volume
ВСН	0,50%
RCF	0,05%

Tabella 3.2.1.2 Percentuali aggiunte elementi

Nella seguente tabella vengono individuati i volumi dei singoli ingredienti finora ricavati.

Va	V _c	V _{a'}	V _{RCF}	V _{BCH}
[cm ³]				
235	152	25	0,5	5

Tabella 3.2.1.3 Volume dei principali componenti del calcestruzzo

Il volume degli inerti Vi su 1 litro di impasto si ottiene dalla relazione sottostante:

Al fine di ottenere una corretta distribuzione granulometrica, il valore di cui sopra è stato suddiviso in percentuali pari al 50% di sabbia, 20% di ghiaino e 30% di ghiaia, di seguito il volume per ciascun inerte e la relativa densità:

Inerte	Volume [cm³]	Densità [g/cm³]
Sabbia	291	2,73
Ghiaino	117	2,76
Ghiaia	175	2,72

Tabella 3.2.1.4 Quantità di inerti da aggiungere

Se gli inerti fossero stati in condizione satura ma a superficie asciutta (s.s.a.), le masse da prendere in esame per realizzare un litro di getto sarebbero state:

 Tabella 3.2.1.5 - Quantità degli elementi da aggiungere in condizione s.s.a. per realizzare 1 L di composto

a/c	Sabbia [g]	Ghiaino [g]	Ghiaia [g]	Cemento [g]	H ₂ 0 [g]	Aria %	RCF	ВСН
0,5	795	322	476	470	235	2,5	0,925	10

Trattandosi di aggregati secchi, considerata la capacità di assorbimento specifica per ciascun di essi, attraverso opportune proporzioni matematiche si è definita la massa di ciascun inerte.

Inerte	Assorbimento %	Massa [g]
Sabbia	1,3	785
Ghiaino	0,9	319
Ghiaia	0,7	472

Tabella 3.2.1.6 Quantità degli inerti da aggiungere per realizzare 1 L di composto

Tenuto conto di quanto riportato, è stato necessario aumentare il quantitativo di acqua fino a 16 g, pertanto, il mix design per realizzare 1 litro di getto è:

Tabella 3.2.1.7 Quantità degli elementi da aggiungere per realizzare 1 L di composto

a/c	Sabbia	Ghiaino	Ghiaia	Cemento	H ₂ 0	Aria	RCF	BCH
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%	[g]	[g]
0,5	785	319	472	470	251	2,5	0,925	10

Per eseguire le prove a rottura di due provini a 1, 7, 28 giorni dal getto, sono stati realizzati complessivamente 6 provini di forma cubica aventi lato 10 cm. Perciò, il volume finale di calcestruzzo da gettare, tenendo conto anche del 20% in più di volume rispetto a quello da calcolo, è risultato pari a 7,2 L.

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva del Mix Design per il Getto 1 (V_{getto}=7,2L)

Tabella 3.2.1.8 Mix Design Getto 1

a/c	Sabbia	Ghiaino	Ghiala	Cemento	H ₂ 0	Aria	RCF	BCH
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%	[g]	[g]
0,5	5653	2294	3401	3384	1810	2,5	6,7	72

Il calcestruzzo è stato impastato a mano con l'ausilio di una cazzuola. I componenti sono stati aggiunti seguendo un ordine ben preciso per garantire la massima amalgamazione:

- gli aggregati sono stati versati nel recipiente tutti insieme e mescolati per qualche minuto;
- in seguito è stato versato il cemento, il biochar, e le fibre di carbonio;
- ed infine l'acqua.

3.2.2 Mix Design *Getto 2*

Analogo procedimento è stato applicato per il mix design della seconda miscela caratterizzata da un rapporto acqua/cemento pari a 0,60.

Tabella 3.2.2.1 Quantità degli elementi da aggiungere in condizione s.s.a. per realizzare 1 L dicomposto

a/c	Sabbia	Ghiaino	Ghiaia	Cemento	H ₂ 0	Aria	RCF	BCH
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%	[g]	[g]
0,6	830	335	496	392	235	2,5	0,925	10

Tabella 3.2.2.2 Quantità degli elementi da aggiungere per realizzare 1 L di composto

a/c	Sabbia	Ghiaino	Ghiaia	Cemento	H ₂ 0	Aria	RCF	BCH
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%	[g]	[g]
0,6	819	332	493	392	252	2,5	0,925	10

Si riporta la tabella riassuntiva del Mix Design del *Getto 2* per il confezionamento di 6 provini (V_{getto}=7,2L):

Tabella 3.2.2.3 Mix Design Getto 2

a/c	Sabbia	Ghiaino	Ghiaia	Cemento	H ₂ 0	Aria	RCF	BCH
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%	[g]	[g]
0,6	5898	2394	3548	2820	1815	2,5	6,7	72

3.3 Lavorabilità del calcestruzzo

La lavorabilità è la caratteristica che indica la capacità del calcestruzzo fresco a muoversi e a compattarsi. In generale la mobilità del calcestruzzo è importante per facilitare il trasporto, il getto e l'avvolgimento dei ferri di armatura all'interno delle casseforme, mentre la compattazione è importante per agevolare la fuoriuscita dell'aria intrappolata dal calcestruzzo fresco ed assicurare, quindi, la massima densità possibile del materiale indurito, oltre che il massimo contatto superficiale tra ferri e calcestruzzo.

Esistono diversi metodi per la misura della lavorabilità ma quello universalmente più utilizzato per la sua semplicità è lo *slump test*. Questo consiste nel misurare l'abbassamento (slump) del calcestruzzo sformato da un tronco di cono metallico (cono di Abrams) rispetto all'altezza dello stesso calcestruzzo costipato in modo standardizzato all'interno di un cono alto 300 mm.



Figura 3.3.1 Prospetto 3 della norma UNI EN 206-1: classi di abbassamento al cono (slump)

La Fig. 3.3.1 mostra cinque diversi calcestruzzi a slump crescente da destra a sinistra, ciascuno dei quali appartiene ad un determinato intervallo che definisce la classe di consistenza, individuata dalla lettera S seguita da un numero da 1 a 5 che corrisponde ad un impasto sempre più fluido (Tab. 3.3.1).

Classe di consistenza	Slump [mm]	Applicazioni		
S1 - Umida	10-40	Pavimenti messi in opera con vibro-finitrice		
S2 - Plastica	50 – 90	Strutture circolari messe in opera con casseri rampanti		
S3 - Semi-fluida	100 – 150	Strutture non armate o poco armate o con pendenza		
S4 - Fluida	160 - 210	Strutture mediamente armate		
S5 - Super-fluida	>220	Strutture fortemente armate, di ridotta sezione e/o complessa geometria		

Tabella 3.3.1 Classe di consistenza richiesta per alcune tipologie strutturali

Il cono di Abrams è uno strumento grazie al quale, secondo la normativa UNI EN 12350-2 è possibile misurare la consistenza di un calcestruzzo fresco, realizzato con inerti ≤ 40 mm. Esso è costituito in lamiera acciaio inossidabile di spessore pari a 1,5 mm. Il suo interno deve essere liscio, privo di ammaccature, saldature e chiodature. Il cono ha le seguenti dimensioni:

- diametro della base inferiore: 200 ± 2 mm;

- diametro della base superiore: 100 ± 2 mm;
- altezza: 300 ± 2 mm.

Le basi inferiori e superiori sono aperte e formano angoli retti con l'asse del cono, il quale è dotato di due manici posti a 2/3 dell'altezza nella porzione superiore, e nella porzione inferiore di staffe che servono per mantenerlo fermo con i piedi nel corso del riempimento. Inizialmente il cono viene poggiato su una superficie rigida, liscia, umida e non assorbente. Durante la fase di riempimento il cono viene mantenuto immobile gravando con i piedi sulle due staffe di base. Prima di procedere alla rimozione dello stampo, la superficie viene pulita dal calcestruzzo caduto durante il riempimento. Successivamente lo stampo viene rimosso sollevandolo con cura in direzione verticale, facendo attenzione a non provocare movimenti laterali e di torsione nel calcestruzzo (Fig. 3.3.2). La prova, dall'inizio del riempimento fino alla rimozione del cono, viene eseguita senza interruzione.



Figura 3.3.2 Misurazione dello slump

Terminato l'impasto del *Getto 1* è stata eseguita la prova con il cono di Abrams. Avendo utilizzato come aggiunta le fibre di carbonio e il biochar, parte dell'acqua del composto è stata assorbita dalle stesse a discapito della lavorabilità. Si è ottenuto uno slump di 17 cm (Fig. 3.3.3), perciò la classe in cui rientra il calcestruzzo è S4. Pur essendo una classe di lavorabilità inferiore a quella stabilita in partenza, si è deciso di non aggiungere additivo superfluidificante.



Figura 3.3.3 Verifica di lavorabilità con il cono di Abram Getto 1

Analogamente per il *Getto 2*, una volta mescolati tutti gli ingredienti, è stata eseguita di nuovo la prova con il cono di Abram. Avendo ottenuto uno SLUMP maggiore di 21 cm si è confermata la classe di lavorabilità stabilita in partenza (Fig. 3.3.4). Anche in questo caso non si è aggiunto additivo superfluidificante.



Figura 3.3.4 Verifica di lavorabilità con il cono di Abram Getto 2

3.4 La segregazione

Per ottenere una buona lavorabilità e il raggiungimento di una completa costipazione, in termini rigorosi, dovrebbero esserci condizioni di assenza di segregazione. La segregazione può essere definita come la separazione tra loro dei costituenti di una miscela eterogenea, fino al punto che la loro distribuzione nella massa ne risulti disomogenea. Nel calcestruzzo, la causa principale di segregazione è la disomogeneità dimensionale delle particelle costituenti. Si ha il fenomeno della segregazione in due casi:

- quando le particelle più grandi tendono a scorrere più velocemente delle particelle fini;
- quando la pasta di cemento (cemento più acqua) si separa dalla massa degli inerti.

Per ovviare al primo caso di segregazione, essendo l'impasto troppo asciutto, si può aggiungere dell'acqua all'impasto, ma l'aggiunta eccessiva può portare comunque al verificarsi del secondo caso di segregazione. In generale, per evitare i fenomeni di segregazione, è importante che il calcestruzzo sia posto nella posizione in cui deve rimanere, senza trasporti o scorrimenti lungo le casseforme. Inoltre, si deve evitare di sottoporlo a vibrazioni inappropriate o prolungate durante il costipamento, per evitare che i costituenti più grandi si concentrino verso il fondo del getto.

3.5 Maturazione getti di calcestruzzo

Le prestazioni del calcestruzzo, in termini di resistenza e durabilità, dipendono anche da un'idonea maturazione del getto. Durante la maturazione il calcestruzzo fresco sviluppa gradualmente le sue proprietà meccaniche per effetto della progressiva idratazione del cemento. Per consentire una corretta maturazione è necessario conservare i provini in ambiente umido per tutto il periodo di stagionatura. L'assenza di un'adeguata stagionatura umida comporta il decadimento delle proprietà meccaniche, nascita di difettosità e conseguente riduzione della durabilità del calcestruzzo.

Per una corretta stagionatura dei provini sono state applicate le direttive riportate nella normativa, le quali prevedono la conservazione dei provini a umidità relativa (U.R.) del 95 ± 5% e temperatura pari a 20 ± 2 °C, all'interno dei casseri utilizzati, per almeno 24 ore. Quindi, dopo il confezionamento, i provini sono stati ricoperti da pellicola impermeabile in modo da mantenere una umidità relativa pari a 95 ± 5% e successivamente inseriti all'interno della camera di stagionatura nella quale si ha una temperatura pari a 21 ± 1 °C e umidità relativa pari a 50 ± 5% (Fig. 3.5.1-2).



Figura 3.5.1 Camera di stagionatura



Figura 3.5.2 Indicatore temperatura e pressione della camera di stagionatura

3.6 Proprietà meccaniche del calcestruzzo

La meccanica dei materiali è la disciplina che studia il comportamento meccanico dei materiali, al fine di poterli utilizzare razionalmente in ambito strutturale. Tale scienza studia il comportamento degli oggetti solidi sottoposti a stress e tensioni. Una delle proprietà fondamentali che un materiale da costruzione deve possedere risulta, quindi, essere la resistenza meccanica.

Per resistenza meccanica (R) si intende il massimo sforzo che un materiale, in forma di una porzione geometricamente determinata (provino), è in grado di sopportare prima della rottura. A seconda che lo sforzo applicato sia a compressione, a flessione o a trazione, si parlerà di resistenza meccanica a compressione (R_c), a flessione (R_f) o a trazione (R_t). Il calcestruzzo è un materiale che si comporta abbastanza bene sotto l'azione di uno sforzo a compressione, e mediocremente sotto quella di uno sforzo a trazione diretta o a trazione per flessione. Per questi motivi, ma anche per le difficoltà sperimentali insite nelle misure di R_t e R_f, di solito sul calcestruzzo si effettuano solo misure dirette di R_c e si ricorre al calcolo per determinare indirettamente R_t e R_f. I calcestruzzi rientrano nella categoria dei materiali fragili, tendono cioè a rompersi bruscamente, con precedenti fasi di deformazioni o snervamento trascurabili o del tutto assenti. L'aggiunta di fibre contribuisce a rendere il materiale meno fragile, consentendo maggiori deformazioni in caso di stress, prima di giungere alla rottura definitiva.

3.6.1 Resistenza meccanica a compressione

La prova di compressione monoassiale consente di determinare sperimentalmente il legame tensione-deformazione del calcestruzzo (legame costitutivo), da cui si ricava il valore della sua resistenza a compressione. La prova viene condotta imponendo spostamenti crescenti e misurando le corrispondenti forze, infatti, la forza P e lo spostamento Δ L sono legati alla tensione normale σ_c e alla deformazione ε_c attraverso le seguenti relazioni:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \qquad \qquad \varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L}$$

in cui:

- A è la l'area della sezione trasversale;
- L è la lunghezza iniziale del provino;
- ΔL è la variazione della lunghezza del provino sottoposto alla prova di compressione.

Il legame costitutivo che si ottiene è quello riportato nella Figura 3.6.1.1 e può essere suddiviso in tre fasi a seconda del valore del carico applicato:



Figura 3.6.1.1 Legame costitutivo σ-ξ del calcestruzzo a compressione

- carico compreso fra 0 e 40% R_c, in cui il comportamento macroscopico è prossimo a quello elastico-lineare e dal punto di vista microscopico l'incremento di carico non ha influenza sensibile sulle micro-fessure;
- carico compreso fra 40% e 85% R_c, in cui il comportamento macroscopico è sempre più marcatamente non lineare e le micro-fessure si propagano al crescere del carico. La propagazione si arresta nel tempo, giungendo ad un assetto stabile;
- carico compreso fra 85% R_c ed R_c, in cui la propagazione delle micro-fessure diventa instabile ed esse diventano evidenti a livello macroscopico. Raggiunto il valore di carico massimo R_c si ha una rottura fragile del provino.

Le prove a compressione possono essere eseguite sia su provini in calcestruzzo di forma cubica che cilindrica e le modalità di rottura cambiano in funzione della forma del provino. Nel caso dei provini cubici, le tensioni tangenziali nascono per l'attrito che si genera tra il provino e la piastra della macchina di prova provocando, la classica rottura a doppia piramide (Fig. 3.6.1.2). Nel caso dei provini cilindrici invece, il maggiore rapporto tra l'altezza e il diametro della base riduce l'effetto delle tensioni tangenziali e la rottura avviene secondo piani verticali. Questa è la ragione per cui, a parità di calcestruzzo, la resistenza cubica è maggiore di quella cilindrica.



Figura 3.6.1.2 Modalità di rottura in funzione della forma del provino

La normativa di riferimento per le prove di caratterizzazione meccanica del calcestruzzo a compressione è la UNI EN 13791.

3.6.2 Metodo di rilevazione

Per la prova a compressione è stata utilizzata una pressa idraulica con carico massimo pari a 1500 kN (Fig. 3.6.2.1). La pressione esercitata sul campione è rilevata da un trasduttore estensimetrico. Tale pressione viene visualizzata direttamente sul pc collegato all'apparecchiatura o direttamente sul monitor anche in termini di carico in Newton (N). Al termine della prova, il motore si arresta automaticamente e l'unità visualizza il risultato della prova. È possibile anche avere un report con tutti i dettagli relativi al test effettuato. L'apparecchio può essere collegato ad un pc, su cui deve

essere installato il software di gestione. Attraverso il computer, durante la prova è possibile visualizzare l'andamento del carico in N o della pressione in MPa al variare dell'abbassamento del pistone. Quando il campione arriva a rottura, il software mostra il valore di rottura e dà la possibilità di immettere i dati del campione (nome, data di confezionamento, condizioni, tempo di indurimento, ecc), ed è quindi possibile ottenere rapporti di prova per ciascuna prova effettuata.



Figura 3.6.2.1 Prova a compressione con pressa idraulica

Prima di posizionare i provini cubici 10x10x10 cm tra i due piatti della pressa, è stata eseguita la misura del peso degli stessi (m) attraverso l'uso di una bilancia elettronica, in modo tale che noto anche il volume del campione (V), si possa ricavare la densità (ρ):

$$\rho=\frac{m}{V}$$

È di fondamentale importanza, ai fini di una corretta esecuzione della prova, posizionare il provino al centro della pressa e fare in modo che le facce a contatto con i piatti siano perfettamente parallele, per far sì che la forza di compressione sia centrata e uniformemente distribuita.

La misura della resistenza a compressione (R_c) si calcola in base all'equazione di seguito riportata:

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

dove:

- R_c è la resistenza a compressione espressa in N/mm²;

- F è la forza massima applicata espressa in N;

- A è l'area di applicazione della forza espressa in mm².

Per ogni getto sono state eseguite prove di resistenza a compressione su 6 provini, e successivamente, facendo una media dei valori ottenuti si determina la resistenza media R_{cm}. La prova di compressione è stata effettuata dopo 1, 7 e 28 giorni di stagionatura, avvenuta ad umidità relativa di 95 \pm 5% e temperatura di 21 \pm 1 °C. In tutti i provini si è ottenuta la classica "rottura a clessidra" (Fig. 3.6.2.2) e in nessuno di essi non è stato riscontrato il problema della segregazione degli inerti (Fig. 3.6.2.3-4).

67



Figura 3.6.2.2 Rottura del provino sottoposto alla prova di compressione



Figura 3.6.2.3 Provino calcestruzzo (a/c=0,5)



Figura 3.6.2.3 Provino calcestruzzo (a/c=0,6)

3.6.3 Risultati della prova

Portando a rottura per compressione i provini si registra il valore massimo di resistenza

a compressione.

Tabella 3.6.3.1 Resistenza a compressione dei provini Getto 1 (a/c=0,5) dopo 1 giorno di stagionatura

Provino	a/c	Peso [g]	Volume [cm³]	Densità [g/cm³]	Media [g/cm ³]	Sezione [mm ²]	Forza [N]	R _c [N/mm ²]	R _{cm} [N/mm ²]
1	0,50	2343,04	1000	2,34	2,35	10000,00	183530,00	18,35	18,73
2		2354,60	1000	2,35		10000,00	191110,00	19,11	

Tabella 3.6.3.2 Resistenza a compressione dei provini Getto 2 (a/c=0,6) dopo 1 giorno di stagionatura

Provino	a/c	Peso [g]	Volume [cm ³]	Densità [g/cm³]	Media [g/cm³]	Sezione [mm ²]	Forza [N]	R _c [N/mm ²]	R _{cm} [N/mm ²]
1	0,60	2372,43	1000	2,37	2,35	10000,00	132010,00	13,2	12,9
2		2327,12	1000	2,33		10000,00	126910,00	12,7	

Provino	a/c	Peso [g]	Volume [cm ³]	Densità [g/cm ³]	Media [g/cm ³]	Sezione [mm ²]	Forza [N]	R _c [N/mm ²]	R _{cm} [N/mm ²]
1	0,50	2336,81	1000	2,34	2,34	10000,00	376080,00	37,61	35,62
2		2335,40	1000	2,34		10000,00	336290,00	33,63	

Tabella 3.6.3.3 Resistenza a compressione dei provini Getto 1 (a/c=0,5) dopo 7 giorni di stagionatura

Tabella 3.6.3.4 Resistenza a compressione dei provini Getto 2 (a/c=0,6) dopo 7 giorni di stagionatura

Provino	a/c	Peso [g]	Volume [cm ³]	Densità [g/cm³]	Media [g/cm³]	Sezione [mm ²]	Forza [N]	R _c [N/mm ²]	R _{cm} [N/mm ²]
1	0,60	2343,52	1000	2,34	2,34	10000,00	241760,00	24,18	25,50
2		2339,11	1000	2,34		10000,00	268150,00	26,82	

Tabella 3.6.3.5 Resistenza a compressione dei provini Getto 1 (a/c=0,5) dopo 28 giorni di stagionatura

Provino	a/c	Peso [g]	Volume [cm ³]	Densità [g/cm³]	Media [g/cm ³]	Sezione [mm²]	Forza [N]	R _c [N/mm ²]	R _{cm} [N/mm ²]
1	0,50	2329,73	1000	2,33	3 21	10000,00	412080,00	41,21	40.24
2		2298,08	1000	2,30	2,51	10000,00	392780,00	39,28	40,24

Tabella 3.6.3.6 Resistenza a compressione dei provini Getto 1 (a/c=0,5) dopo 28 giorni di stagionatura

Provino	a/c	Peso [g]	Volume [cm³]	Densità [g/cm³]	Media [g/cm ³]	Sezione [mm ²]	Forza [N]	R _c [N/mm ²]	R _{ɛm} [N/mm²]
1	0,60	2319,77	1000	2,32	2,30	10000,00	311370,00	31,14	31,22
2		2288,80	1000	2,29		10000,00	312930,00	31,29	

Di seguito si riportano i dati relativi alle prove di compressione in forma di istogramma per una migliore lettura dei risultati (Fig. 3.6.3.1).



Figura 3.6.3.1 Resistenza media a compressione a 1,7 e 28 giorni dal getto con rapporto a/c=0,50 e a/c=0,60

3.6.4 Discussione dei risultati della prova

Dalle prove a compressione effettuate sui provini dopo 28 giorni di stagionatura, si nota che i provini realizzati utilizzando un rapporto acqua/cemento pari a 0,50, raggiungono una resistenza media a compressione pari a 40,2 MPa, mentre quelli realizzati utilizzando un rapporto acqua/cemento pari a 0,60 raggiungono una resistenza media a compressione pari a 32,2 MPa. La densità dei campioni invece non differisce a seconda del rapporto a/c utilizzato e si mantiene pressoché costante durante il periodo di stagionatura. Pertanto, essendo richiesta una resistenza media a compressione almeno di 40 MPa, per la realizzazione del getto definitivo si è deciso di ricorrere ad un rapporto acqua/cemento pari a 0,50.

Bibliogarafia

[1] Collepardi, M., Collepardi, S., & Troli, R. (2009). Il nuovo calcestruzzo . Tintoretto.

[2] Bertolini, L. (2010). Materiali da costruzione: degrado, prevenzione, diagnosi, restauro. Editore Città Studi .

[3] Ghersi, A. (2005). Il cemento armato. Dario Flaccovio Editore, Palermo.

[4] Cosenza, E., Manfredi, G., & Pecce, M. (2008). *Strutture in cemento armato–basi della progettazione*. Ulrico Hoepli Editore Spa.
4. Getti definitivi

4.1 Introduzione

Per procedere con la sperimentazione, come già anticipato, dovranno essere realizzati 11 provini di calcestruzzo di dimensioni 10 cm x 10 cm x 50 cm, rinforzati al centro con una barra di rinforzo in acciaio, così organizzati:

- 2 campioni senza sensori immersi per effettuare le prove di carico a flessione a
 28 giorni di stagionatura e conoscere così la resistenza a flessione del materiale
 (R_f);
- 3 campioni *con* sensori immersi per la misura del potenziale elettrico e dell'impedenza elettrica, su cui fare i test di carico e l'analisi vibrazionale. Al termine delle suddette prove, gli stessi campioni saranno usati per eseguire le prove di durabilità in una successiva sperimentazione;
- 3 campioni senza sensori immersi che rappresentano punti di discontinuità, di dimensioni per altro non trascurabili, su cui svolgere i test del punto precedente;
- 3 campioni *con* sensori immersi, da mantenere integri (non destinati alle prove di carico), su cui fare i test di durabilità in una successiva sperimentazione e da utilizzare come campioni di riferimento. Sugli stessi, è possibile fare l'analisi vibrazionale prima e dopo i test del degrado, per valutare come variano i risultati con il degrado dei campioni.

4.2 Preparazione dei casseri

In preparazione al getto dei provini con i quali si darà avvio all'attività di ricerca, sono stati realizzate 11 casseforme. Dovendo realizzare dei travetti di calcestruzzo aventi dimensione prestabilite (Fig.4.1.1) sono stati tagliati dei pannelli in legno seguendo le dimensioni riportate in Figura 4.1.2. I pannelli hanno spessore di 2,7 cm.



Figura 4.1.1 Prototipo di cassero studiato per consentire la realizzazione dei travetti dalle dimensioni richieste



Figura 4.1.2 Dimensioni dei pannelli utilizzati per l'assemblaggio del cassero

Successivamente le tavolette sono state assemblate mediante l'ausilio di viti autofilettanti di diametro 3,5 mm e lunghezza 50 mm, secondo il seguente schema (Fig. 4.1.3-4).





Figura 4.1.3 Schema di montaggio del cassero

Figura 4.1.4 Cassero assemblato

Al fine di garantire in passaggio dei cavi dei sensori annegati nel getto, e poiché la barra presenta dimensioni ridotte rispetto alla lunghezza della cassaforma (35 cm rispetto a 50 cm del campione), le estremità della stessa verranno preventivamente forate in entrambe i lati corti per consentire l'installazione di tubi in PVC (DN 32) che fungeranno da supporto a tutto il sistema (Fig. 4.1.5).



Figura 4.1.4 Cassero pronto per il getto con all'interno i sensori

4.3 Installazione dei sensori

I sensori che si possono adottare per il monitoraggio strutturale sono molteplici; nel caso specifico sono stati inclusi all'interno del getto:

- Array con 4 elettrodi per la misura dell'impedenza elettrica;
- elettrodo di pseudo-riferimento per il monitoraggio del potenziale elettrico.

L'installazione dei sensori all'interno dei campioni è stata accuratamente progettata tenendo conto delle necessità pratiche relative alla realizzazione dei campioni e dell'ottimizzazione della registrazione dei segnali.

La soluzione ritenuta ottimale è stata quella di predisporre delle barre d'acciaio lunghe circa 35 cm con diametro ϕ 8 mm all'interno della cassaforma su cui ancorare i due sensori mediante l'ausilio di fascette di plastica.

Di seguito si riportano le fasi di preparazione delle barre:

 molatura di una delle due estremità per permettere la realizzazione del foro che consenta l'ancoraggio del cavo per il monitoraggio del potenziale elettrico (Fig. 4.3.1);



Figura 4.3.1 Estremità appiattita per consentire l'esecuzione del foro

 esecuzione del foro mediante trapano a colonna con punta da 3 mm, previa preparazione della superficie del ferro con olio lubrificante per evitare fenomeni di surriscaldamento (Fig.4.3.2);



Figura 4.3.2 Esecuzione del foro mediante trapano a colonna

- molatura per rimozione delle bavette;
- sgrassatura della superficie (Fig. 4.3.3).



Figura 4.3.3 Barra dopo la sgrassatura

Realizzato il foro, la superficie delle barre è stata opportunamente pulita mediante spazzola metallica per rimuovere le porzioni corrose.

Per consentire la misura del potenziale elettrico, all'interno del foro è stato ancorato un cavo in silicone del diametro di 0,75 mm (Fig.4.3.4), opportunamente collegato alla barra mediante saldatura a stagno previo spargimento di sostanza disossidante per garantire migliore aderenza.



Figura 4.3.4 Collegamento tra la barra e il cavo per la misura del potenziale

Per proteggere il punto di collegamento tra il cavo e la barra dal calcestruzzo, si è ricorso all'uso di una resina bicomponente, distribuita simmetricamente rispetto al centro (Fig. 4.3.5), nelle due estremità (per schermare i limiti della barra) e al centro (per evitare il contatto diretto con i sensori di misura) della stessa. La lunghezza della barra a contatto con il calcestruzzo è circa 28,5 cm perciò l'area complessiva esposta, noto il diametro è pari a 71,6 cm².



Figura 4.3.5 Barre durante la resinatura all'interno della cappa aspirante

4.4.1 Sensori per la misura dell'impedenza elettrica

La caratteristica self-sensing dei calcestruzzi tradizionali oltre che essere migliorata attraverso aggiunte conduttive sotto forma di filler e fibre, che ne aumentano la conducibilità, prevede la necessità di adottare sensori specifici. Per la misurazione dell'impedenza elettrica, intesa come la capacità di un materiale di opporsi al flusso di corrente elettrica, si è ricorso ad un sistema tradizionale a basso costo (evaluation board EVAL-AD5940BIOZ con chip integrato AD5940 della Analog Devices). Per la misura dell'impedenza elettrica è stato utilizzato il cosiddetto metodo Wenner [1] a quattro punti equidistanti in corrente alternata (Fig. 4.4.1.1), così da evitare problemi di polarizzazione sia del materiale che all'interfaccia elettrodo-materiale.



Figura 4.4.1.1 Metodo Wenner per la misura di impedenza elettrica

Secondo tale metodo, la corrente viene iniettata attraverso gli elettrodi più esterni (*Working Electrode*, WE, e *Counter Electrode*, CE) e la corrispondente differenza di potenziale elettrico viene misurata tra quelli più esterni (*Sensing Electrode*, SE, e *Reference Electrode*, RE).

Nel caso specifico, sono state utilizzate 4 viti metalliche in acciaio inox che fungono da elettrodi, attorno alle quali sono stati avvolti i cavi elettrici secondo lo schema riportato in Figura 4.4.1.2., montate su array stampato in 3D. All'estremità opposta del cavo, di lunghezza circa 1,5 m, sono stati saldati dei pin per facilitare il collegamento con il cavo di connessione alla scheda di misura basata su AD5940. Di seguito è mostrato lo schema di installazione (Fig. 4.4.1.3).



Figura 4.4.1.2 Cavi elettrici prima e dopo il collegamento agli elettrodi



Figura 4.4.1.3 Schema collegamento elettrodo immerso e scheda di misura

Poiché la misura di impedenza elettrica è di tipo localizzato (si parla di volume sensibile, *sensing volume*), il posizionamento dei sensori nei punti critici della struttura stessa (es. aree più soggette a sforzi o penetrazione di agenti contaminanti e quindi più soggette a degrado e danneggiamento) è fondamentale per ottenere misure significative nell'ambito del monitoraggio strutturale, soprattutto quando si realizzano reti di monitoraggio distribuite. È pertanto necessario adottare un'appropriata strategia di selezione delle zone di concentrazione degli sforzi strutturali o laddove vi è una maggiore deformabilità o condizioni di esposizione degli elementi ad ambienti potenzialmente aggressivi per la durabilità. Dovendo pertanto sottoporre i campioni a

prove di flessione, si è ritenuto opportuno installare l'array con i quattro elettrodi nella mezzeria della barra, punto maggiormente sollecitato e pertanto soggetto alla formazione di fessure (Fig. 4.4.1.4).

4.4.2 Sonda Co.S.Mo.Net.

Il monitoraggio continuo di determinati parametri risulta essere un valido complemento, se non addirittura un'alternativa, alle ispezioni periodiche descritte in precedenza, data la maggiore possibilità di associare eventuali variazioni anomale dei parametri osservati a danneggiamenti e/o fenomeni di degrado incipienti. É evidente, pertanto, l'opportunità data da questi sistemi nel ridurre i costi di manutenzione e nel migliorare la sicurezza delle strutture attraverso interventi sempre più tempestivi.

Il potenziale di libera corrosione delle armature, ad esempio, è un parametro relativamente facile da misurare ma molto efficace per monitorare la durabilità di una struttura in calcestruzzo armato, perché il suo valore è influenzato dallo stato corrosivo dell'armatura (il potenziale di libera corrosione si sposta verso valori più negativi all'aumentare della probabilità di corrosione delle armature. Co.S.Mo.Net (Fig. 4.4.2.1), acronimo di *Concrete Structures Monitoring Network*, con brevetto dell'Università Politecnica delle Marche, rappresenta un efficace ed economico sistema di misura del potenziale di libera corrosione finalizzato al monitoraggio continuo della durabilità di strutture in calcestruzzo armato.

82



Figura 4.4.2.1 Il sistema di monitoraggio Co.S.Mo.Net

Il sistema monitora i segnali provenienti da sonde di misura inglobate nel calcestruzzo nei punti dove la probabilità di fessurazione dell'elemento strutturale è più elevata, ad esempio nelle zone di concentrazione degli sforzi strutturali o laddove vi è una maggiore deformabilità o condizioni di esposizione degli elementi particolarmente critiche per via di eventuali fenomeni di ritiro termico, igrometrico o di fatica.

L'impiego di strategie di monitoraggio continuo per la valutazione dello stato del calcestruzzo richiede altresì lo sviluppo di sensoristica dedicata da inserire nel materiale stesso. Il sensore per la misura del potenziale di libera corrosione installato sulla barra di armatura inserita all'interno dei provini è denominato "Ti MMO Electrode" prodotto dall'azienda Cescor S.r.l. (Fig. 4.4.2.2). Si tratta di un elettrodo di pseudo-riferimento al titanio pensato per rimanere incorporato all'interno degli elementi in calcestruzzo in maniera permanente.



Figura 4.4.2.2 Elettrodo di pseudo-riferimento al Titanio

Alla luce di quanto detto finora, si riporta di seguito uno schema illustrativo riguardo la disposizione dei diversi sensori applicati alla barra:



Figura 4.4.2.3 Schema installazione dei sensori

4.5 Mix Design

Tenuto conto di quanto riportato nei capitoli precedenti, il getto definitivo è stato realizzato utilizzando un rapporto acqua/cemento pari a 0,5.

Si riporta di seguito il mix design utilizzato per realizzare 1 litro di miscela:

a/c	Sabbia [g]	Ghiaino [g]	Ghiaia [g]	Cemento [g]	H ₂ 0 [g]	Aria %	RCF [g]	BCH [g]
0,5	795	322	476	470	235	2,5	0,925	10

 Tabella 4.5.1 Quantità degli elementi da aggiungere in condizione S.S.A per realizzare 1 L di composto

Le prove a rottura sono state eseguite a 28 giorni dal getto su 2 campioni, pertanto sono stati realizzati complessivamente 11 travetti. Perciò, il volume finale di calcestruzzo da gettare, tenendo conto anche del 20% in più di volume rispetto a quello da calcolo, è risultato pari a 66 L.



Figura 4.5.1 Componenti getto di calcestruzzo

Tenuto conto delle necessità pratiche il getto complessivo è stato realizzato in due momenti diversi:

- "Getto 1" in cui sono stati realizzati 36 L di calcestruzzo, per il riempimento di 6 casseri;
- "Getto 2" in cui sono stati realizzati 30 L di calcestruzzo, per il riempimento di 5 casseri.

In entrambe i casi il calcestruzzo è stato impastato con l'ausilio di una betoniera a bicchiere (Fig. 4.5.2). I componenti sono stati aggiunti seguendo un ordine ben preciso per garantire la massima amalgamazione:

- gli aggregati sono stati versati nel recipiente tutti insieme e mescolati per 2 minuti;
- in seguito è stato versato il cemento e mescolato per 2 minuti,
- è stato aggiunto il biochar e mescolato per 2 minuti;
- sono state inserite le fibre di carbonio e mescolate per 2 minuti;
- ed infine l'acqua mescolando il composto per 10 minuti.



Figura 4.5.2 Betoniera a bicchiere

Al termine della miscelazione è stata misurata la lavorabilità con il Cono di Abrams. Avendo ottenuto per entrambi i getti uno slump maggiore di 21 cm si è confermata la classe di lavorabilità (S5) stabilita in partenza (Fig.4.5.3).



Figura 4.5.3 Verifica di lavorabilità con il cono di Abram

Dopo aver distribuito il disarmante sui casseri (Fig. 4.5.4), si è gettato il calcestruzzo. Una volta riempito il cassero fino a circa la metà (Fig. 4.5.5), con l'ausilio della tavola vibrante, si è costipato il getto per garantire la massima omogeneità e compattezza della miscela.



Figura 4.5.4 Casseri pronti per il getto

Figura 4.5.5 Fase di getto

Nel giorno seguente al getto sono stati rimossi i casseri. Per scongiurare la presenza di vuoti rimasti all'interno del travetto, è stata realizzata una malta, a base di sabbia e

cemento con aggiunte di biochar e fibre di carbonio, dalla consistenza molto fluida per eseguire le iniezioni (Fig. 4.5.6).



Figura 4.5.6 Riempimento del tubo in PVC con malta

Poiché sui campioni sono stati eseguiti i test vibrazionali, a stagionatura avvenuta, sono state applicate, per ciascun provino, 20 basette su cui fissare gli accelerometri per misurare la risposta dinamica della struttura alle eccitazioni fornite con martello strumentato. Tali basette sono costituite da rondelle in acciaio inox aventi diametro pari a 17,5 mm posizionate accuratamente sulla faccia superiore del campione tramite apposite "maschere" (Fig.4.5.7), al fine di garantirne un posizionamento preciso.



Figura 4.5.7 Maschera per posizionamento rondelle

Per fissare le rondelle alla superficie del calcestruzzo è stata utilizzata una resina bicomponente.

Bibliografia

[1] F. Wenner, "A method for measuring Earth resistivity," J. Washingt. Acad. Sci., vol. 5, no. 16, pp. 561–563, 1915.

Collepardi, M., Collepardi, S., & Troli, R. (2009). Il nuovo calcestruzzo. Tintoretto.

G. Cosoli, A. Mobili, F. Tittarelli, G. M. Revel, and P. Chiariotti, "Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review," Appl. Sci., vol. 10, no. 24, p. 9152, Dec. 2020, doi: 10.3390/app10249152.

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, 1999, doi: 10.14359/655.

5. Metodologie

5.1 Introduzione

Una parte importante del presente elaborato è incentrata sul monitoraggio del potenziale di libera corrosione e dell'impedenza elettrica, sia durante la fase di stagionatura, sia durante le prove di carico crescente a flessione.

Prima di procedere con la discussione dei risultati ottenuti, si riportano le metodologie adottate durante la fase di sperimentazione con alcuni cenni teorici sulle grandezze fisiche scalari e le proprietà elettriche a cui si è fatto riferimento.

5.2 Cenni di elettronica

"L'elettricità" è definita come l'insieme dei fenomeni fisici originati dalle interazioni tra particelle cariche su scala molecolare i cui effetti macroscopici generano correnti elettriche. La carica può essere positiva o negativa, se trasportata rispettivamente da protoni o elettroni. Un elemento è caricato positivamente o negativamente quando ha rispettivamente un eccesso di protoni o di elettroni. Nei circuiti, la carica è trasportata dagli elettroni in movimento nei conduttori, pertanto la "corrente elettrica" è un moto ordinato di cariche elettriche presenti all'interno di un conduttore il cui moto è dovuto alla differenza di potenziale che si genera all'interno del circuito.

Si definisce invece "resistenza elettrica" la tendenza di alcuni elementi (generalmente resistori) ad opporsi ad un flusso di carica (corrente). Essa può essere espressa mediante la prima Legge di Ohm:

$$V = R \cdot I$$

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

In cui:

- V è la differenza di potenziale elettrico (V);
- I è l'intensità di corrente (A).

La resistenza elettrica di un elemento dipende dal materiale di cui è composto e dalla sua geometria. È quindi comprensibile che, a parità di materiale, maggiore è la lunghezza, maggiore è la resistenza elettrica. Inoltre, minore è la sezione trasversale, maggiore sarà la resistenza elettrica, a causa della maggiore difficoltà di una corrente a passare attraverso l'elemento. Un parametro per misurare la capacità resistiva e conduttiva dei materiali è la "resistività elettrica"; si tratta di una proprietà intrinseca di un materiale di resistere a un flusso di corrente ed è la proprietà che definisce la resistenza elettrica di un materiale, insieme alla sua geometria, attraverso la seconda legge di Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

In cui:

- ρ è la resistività elettrica (Ω·m);
- l è la lunghezza del cilindro (m);
- A è l'area della sezione trasversale del cilindro (m²).

Pertanto, maggiore è la resistività elettrica del materiale costituente, maggiore sarà la resistenza elettrica. Dato dunque un elemento, la sua resistività può essere determinata misurando la tensione e la corrente attraverso se stesso e combinando entrambe le equazioni sopra indicate, si ottiene:

$$\rho = \frac{VA}{I}$$

Si definisce invece "capacità" l'attitudine di un componente (es. condensatore) di immagazzinare carica elettrica, grazie ad una proprietà di alcuni materiali chiamata "dielettricità". I materiali dielettrici sono isolanti elettrici che possono essere polarizzati se sottoposti a un campo elettrico. Le cariche elettriche non fluiscono attraverso un materiale dielettrico come fanno in un conduttore elettrico, ma si spostano solo leggermente dalle loro posizioni di equilibrio medie causando la polarizzazione dielettrica.

A causa della polarizzazione dielettrica, le cariche positive vengono spostate verso il campo e le cariche negative si spostano nella direzione opposta, a causa della formazione di dipoli. Pertanto, quando un materiale dielettrico viene posto tra armature cariche, cioè un condensatore, e sottoposto ad una differenza di potenziale, la polarizzazione del mezzo produce un campo elettrico opposto al campo delle cariche sull'armatura. Un condensatore può quindi essere visto come un componente che ha la "capacità" di immagazzinare carica, producendo una differenza di potenziale tra le sue piastre (tensione statica), simile a una piccola batteria ricaricabile. Dopo la polarizzazione, i condensatori sono considerati "carichi" e non lasciano fluire ulteriori cariche, funzionando come interruttori aperti.

I materiali a base cementizia mostrano capacità a causa della natura dielettrica del cemento idratato. Pertanto, la sua comprensione gioca un ruolo molto importante nell'interpretazione del comportamento elettrico dei compositi cementizi multifunzionali e piezoresistivi e del loro principio di funzionamento.

Per introdurre il concetto di impedenza in regime AC (Alternating Current), è necessario fornire la definizione di "corrente alternata". Essa è un tipo di conduzione elettrica ottenuta dalla continua inversione della polarità elettrica nel tempo. A differenza della corrente continua, dove la polarità è fissa e il valore di corrente costante, con AC il polo positivo diventa negativo e viceversa, e l'alternanza (da cui il nome) avviene con frequenza fissa.

93

L'inversione di polarità non avviene bruscamente, ma con una variazione progressiva secondo modello sinusoidale. L'utilizzo della corrente alternata richiede di generalizzare la legge di Ohm, estendendola ai circuiti operanti in regime sinusoidale, il concetto di impedenza in regime AC deriva dal concetto di resistenza elettrica in DC (corrente continua).

5.3 Impedenza elettrica

L'opposizione totale al flusso di una corrente alternata a una certa frequenza è definita come impedenza elettrica, che è la combinazione di resistenza ohmica e reattanza.

L'impedenza (Z) è generalmente rappresentata usando la notazione complessa ed è espressa con l'unità Ohm (Ω):

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

Dove:

- Z è l'impedenza elettrica, in Ω;
- Z_{Re} è la parte reale dell'impedenza elettrica, detta anche resistenza elettrica ed espressa in Ω ;
- Z_{Im} è la parte immaginaria dell'impedenza elettrica, detta anche reattanza, espressa in Ω;
- i è l'unità immaginaria.

Per effettuare una misura di impedenza elettrica, il materiale da testare deve essere attraversato da una corrente elettrica (o deve essere applicato un potenziale elettrico), da cui poi viene misurato il corrispondente potenziale elettrico (o la corrispondente corrente elettrica). Come già detto, i materiali cementizi tradizionali a causa degli elevati valori di resistività $(2,5\cdot10^4 - 3,5\cdot10^4 \Omega \cdot m)$ [1] sono considerati isolanti, ma è grazie all'aggiunta di fibre e filler conduttivi che può aumentare esponenzialmente la conducibilità elettrica del composito, che subisce perciò una transizione da materiale isolante a conduttore.

Quando si esegue la misura di impedenza elettrica occorre tenere in considerazione diversi parametri:

- la tipologia di corrente elettrica usata per eccitare il materiale: come già indicato essa può essere sia diretta (*Direct Current*, DC) e fluire soltanto in una direzione, o alternata (AC) e cambiare periodicamente direzione;
- il numero di elettrodi utilizzati, infatti i due elettrodi usati per la misura possono o meno coincidere con quelli usati per l'eccitazione; si parla pertanto rispettivamente di misura a 2 e 4 elettrodi. Nel primo caso si possono avere problemi di polarizzazione all'interfaccia elettrodo-materiale, conseguenti all'errore di inserzione;
- la tipologia di elettrodi usati: in letteratura sono presenti diverse soluzioni, dagli elettrodi integrati nel campione a quelli usa e getta. Si possono usare fili metallici, piastre, reti, barre, adesivi e vernici conduttive; è importante evitare elementi conduttivi esposti all'aria, in quanto essi rappresentano percorsi preferenziali per l'ingresso di sostanze aggressive.

Una diversa scelta dei parametri sopra citati conduce a diversi risultati di misura, specialmente in termini di accuratezza.

Nella presente sperimentazione il metodo utilizzato per la misura dell'impedenza a corrente alternata (AC), come già accennato al paragrafo 4.4.1, è quello a 4 elettrodi (metodo Wenner) annegati all'interno del calcestruzzo. Separando gli elettrodi di eccitazione da quelli di misura, è possibile evitare errori di inserzione, ovvero la polarizzazione dell'interfaccia elettrodo-materiale.

La resistività elettrica decresce se:

- aumenta il contenuto di umidità [2];
- i pori sono riempiti dalla soluzione interstiziale, sono connessi e grandi o il rapporto acqua/cemento (a/c) è elevato e quindi aumenta la porosità totale
 [3], [4], [5];
- la temperatura aumenta [6] ;

d'altra parte decresce se:

- è presente una cricca [7];
- i pori sono disconnessi e piccoli, così che la tortuosità è elevata [8] ;
- l'età (o stagionatura) aumenta, di conseguenza l'idratazione accresce la discontinuità dei pori [8], [9].

La resistenza elettrica è legata anche alla composizione del calcestruzzo e alla conducibilità elettrica dei materiali impiegati nel mix design. Risulta pertanto evidente che la misura di impedenza elettrica abbia un grande potenziale nella valutazione della durabilità del calcestruzzo, poiché questa è legata ai fattori menzionati sopra.

5.3.1 Metodo di rilevazione dell'impedenza elettrica

Come già detto in precedenza, per misurare l'impedenza elettrica a corrente alternata (AC) dei provini di calcestruzzo si è collegata l'estremità del cavo a contatto con gli elettrodi disposti secondo il Metodo Wenner, alla scheda di misura AD5940, prodotta dall'azienda Analog Devices (Fig.5.3.1.1).



Figura 5.3.1.1 Schema per il monitoraggio dell'impedenza

Essa, funzionando come galvanostato e potenziostato, viene collegata anche al PC e attraverso l'interfaccia software SensorPal gestisce i parametri di misura dell'impedenza elettrica in termini di modulo e fase.

5.3.2 Risultati della prova

L'impedenza elettrica può anche essere vista infatti come un fasore, e pertanto può essere rappresentata nel piano polare attraverso il modulo |Z| e la fase ϕ , come riportato in Figura 5.3.2.1.



Figura 5.3.2.1 Rappresentazione geometrica dell'impedenza

Poiché il dato di interesse per le valutazioni sulla durabilità del calcestruzzo è la resistenza elettrica (parte reale dell'impedenza elettrica), è possibile ricavarla per via

grafica proiettando il fasore lungo l'asse delle ascisse secondo la relazione riportata di seguito:

$$Z_{Re} = |Z| \cos \varphi$$

In cui:

- |Z| è il modulo del fasore;
- *q* è la fase;

La reattanza (parte immaginaria) si ottiene con la seguente equazione, proiettando il fasore lungo l'asse delle ordinate:

$$Z_{Re} = |Z| sen \varphi$$

Dove:

- |Z| è il modulo del fasore;
- φ è la fase;

Si riportano di seguito i risultati delle misure di impedenza elettrica di ciascun provino durante la fase di stagionatura del getto.

		Provino A		
Tempo [gg]	Z [Ω]	φ	Ζ _{Re} [Ω]	Z _{im} [Ω]
1	0	0	0	0
8	216,70	-11,44	212,40	-42,97
14	242,67	-11,78	237,56	-49,54
21	260,59	-11,93	254,96	-53,88
28	279,29	-12,09	273,10	-58,49

Tabella 5.3.2.1 Monitoraggio impedenza elettrica del Provino A

		Provino B		
Tempo [gg]	Z [Ω]	ф	Z _{Re} [Ω]	Z _{im} [Ω]
1	105,29	-9,57	103,82	-17,51
8	201,39	-11,97	197,02	-41,76
14	226,66	-12,33	221,43	-48,42
21	245,12	-12,54	239,27	-53,23
28	262,57	-13,06	255,78	-59,32

Tabella 5.3.2.2 Monitoraggio impedenza elettrica del Provino B

Tabella 5.3.2.3 Monitoraggio impedenza elettrica del Provino C

		Provino C		
Tempo [gg]	Z [Ω]	ф	Z _{Re} [Ω]	Z _{im} [Ω]
1	160,09	-9,90	157,71	-27,51
8	272,68	-12,32	266,40	-58,16
14	437,73	-16,48	419,76	-124,15
21	495,07	-14,82	478,61	-126,60
28	500,73	-22,34	463,16	-190,31

Tabella 5.3.2.4 Monitoraggio impedenza elettrica del Provino D

		Provino D		
Tempo [gg]	Z [Ω]	ф	Ζ _{Re} [Ω]	Ζ _{Im} [Ω]
1	112,01	-9,41	110,50	-18,32
8	237,91	-12,14	232,59	-50,04
14	269,55	-12,56	263,10	-58,62
21	292,92	-12,71	285,75	-64,43
28	314,61	-12,88	306,69	-70,12

		Provino E		
Tempo [gg]	Z [Ω]	ф	Ζ _{Re} [Ω]	Ζ _{ιm} [Ω]
1	113,89	-9,07	112,47	-17,95
8	242,27	-11,84	237,12	-49,70
14	275,12	-12,17	268,94	-58,02
21	299,29	-12,38	292,33	-64,16
28	323,00	-12,57	315,26	-70,29

Tabella 5.3.2.5 Monitoraggio impedenza elettrica del Provino E

Tabella 5.3.2.6 Monitoraggio impedenza elettrica del Provino F

		Provino F		
Tempo [gg]	Z [Ω]	ф	Ζ _{Re} [Ω]	Z _{im} [Ω]
1	110,31	-7,79	109,29	-14,96
8	210,33	-11,31	206,24	-41,26
14	235,36	-11,82	230,37	-48,21
21	253,01	-12,62	246,90	-55,27
28	270,65	-12,96	263,76	-60,68

I dati di impedenza elettrica (in termini di modulo) sono riportati di seguito in Figura 5.3.2.2.



Figura 5.3.2.2 Trend del modulo di impedenza dei singoli provini

Dal grafico sopra si evince che il modulo dell'impedenza elettrica tende ad aumentare al trascorrere dei giorni di stagionatura. Il trend del provino C differisce notevolmente dagli altri. Tale difformità potrebbe dipendere dalla presenza di aggregati particolarmente grossi all'interno del volume di rilevamento (area di misura sottostante l'array per la misurazione dell'impedenza elettrica).

Nella figura 5.3.2.3 si riportano la media e la deviazione standard delle misure di impedenza elettrica effettuate nel tempo su tutti e 6 i provini di calcestruzzo.



Figura 5.3.2.3 Trend globale del modulo di impedenza dei provini

Il Grafico 5.3.2.3 conferma il trend di crescita dell'impedenza elettrica, in quanto con il passare del tempo l'acqua (conduttore) contenuta all'interno del calcestruzzo in parte evapora ed in parte continua ad idratare il cemento, conferendo maggiore resistenza al calcestruzzo. È proprio in questa fase che i pori si riducono, le tortuosità aumentano e l'impedenza elettrica cresce.

5.4 Il potenziale di libera corrosione

Mentre la misura dell'impedenza fornisce informazioni riguardo allo stato di salute della matrice cementizia, la misura del potenziale di libera corrosione, E_{corr}, è la tecnica che consente di monitorare il potenziale cui volge spontaneamente la barra di acciaio a contatto con una soluzione.

Collegando la barra al polo positivo di un voltmetro ad alta impedenza, e il polo negativo ad un elettrodo di riferimento, il circuito si chiude attraverso la soluzione acquosa presente nei pori del calcestruzzo (Fig. 5.4.1).



Figura 5.4.1 Misura del potenziale di armatura

Il valore del potenziale del metallo, rispetto all'elettrodo di riferimento, è la tensione letta dal voltmetro. Tale tecnica, non distruttiva, consente di individuare le zone in cui le armature sono prossime all'innesco della corrosione o quelle in cui il processo è già in atto. La misura è facilmente ripetibile in situ tramite l'apposizione di una spugna imbevuta di acqua (o una soluzione satura di idrossido di calcio) tra elettrodo e superficie del calcestruzzo in corrispondenza della barra di armatura. Ripetendo tale misura in punti successivi, a distanze predeterminate, è possibile avere una mappatura dei valori di potenziale di corrosione dell'intera barra esaminata.

L'elettrodo di riferimento con cui si misura il potenziale su calcestruzzo di un'armatura non è l'elettrodo ad idrogeno standard, ma generalmente si adottano elettrodi commerciali come quello al rame/solfato di rame (CSE-Cu/CuSO₄), o al calomelano saturo (SCE) costituito da mercurio su cui viene stratificata una pasta di mercurio e del sale poco solubile cloruro di mercurio Hg₂Cl₂.

Il valore del potenziale delle armature dipende dalle loro condizioni di corrosione pertanto la norma ASTM C876 propone i criteri di interpretazione esposti nella seguente Tabella 5.4.1.

Potenziale misurato (vs. CSE)	Probabilità di corrosione
E _{corr} > -200 mV	<10%
-350 < E _{corr} < -200 mV	≈50%
E _{corr} < -350 Mv	<90%

Tabella 5.4.1 Criteri di interpretazione del potenziale secondo ASTM C876

In realtà il potenziale di libera corrosione misurato dipende anche dalla resistività della matrice cementizia presente tra l'armatura e l'elettrodo di riferimento che influenza la chiusura delle linee di campo del sistema. Ancora una volta la resistività della matrice cementizia può variare a seguito di fessurazioni o penetrazione di acqua e ioni aggressivi quindi il monitoraggio in continuo del potenziale di libera corrosione consente di rilevare l'instaurarsi di potenziali situazioni di degrado anche prima che il processo corrosivo delle armature si sia innescato.

5.4.1 Metodo di rilevazione del potenziale di libera corrosione

Il monitoraggio del potenziale delle armature si basa sulla misura della differenza di potenziale tra la barra d'acciaio inserita nel campione e un elettrodo di riferimento.

Dei 6 campioni con all'interno i sensori, 5 sono stati sottoposti a monitoraggio con cadenza settimanale dall'ottavo al 35esimo giorno di stagionatura, mentre il provino A è stato monitorato in continuo per tutti e 28 i giorni.

Il sensore per la misura del potenziale è stato acquistato, come già anticipato nel Capitolo 4 al paragrafo 4.4.2, dall'azienda Cescor S.r.l.: Ti MMO Electrode (Fig. 5.4.1.1.).



Installation on **new** structures

Figura 5.4.1.1 Misura del potenziale di armatura con Ti MMO electrode

Per ciascun elettrodo di pseudo-riferimento sono stati forniti dalla casa produttrice i valori del potenziale al tempo iniziale riferiti all'elettrodo di riferimento al Calomelano Saturo-SCE (Tab. 5.4.1.1), solitamente utilizzato per le misure del potenziale condotte su strutture in cemento armato.

Provino	Potenziale misurato al tempo 0 E _{SCE,0} [mV]
А	-66
В	-63
С	-64
D	-50
E	-58
F	-66

Figura 5.4.1.1 Potenziale misurato al tempo 0 dei sensori associati a ciascun provino

Noto il valore del potenziale rispetto all'elettrodo di riferimento al calomelano saturo ($E_{SCE,0}$) al tempo 0 di ciascun sensore, è stato possibile convertire le misurazioni del potenziale compiute con l'elettrodo di pseudo-riferimento al titanio (E_{Ti}), all'elettrodo di riferimento (E_{SCE}) mediante l'uso della seguente relazione matematica:

$$E_{SCE} = E_{TI} + E_{SCE,0}$$

Le misure sono state eseguite con l'ausilio di un Tester elettrico e con la sonda voltmetrica dell'azienda Nplus S.r.l., caratterizzata dalla presenza di due connettori IP.68 di interfaccia elettrica, di cui uno utilizzato per il collegamento con sorgente esterna (provino), e l'altro per il Modulo PC-USB, elemento di interfaccia con il PC per l'acquisizione dei dati (Fig. 5.4.1.2). L'uso del Tester è stato effettuato per verificare che le misure ottenute con il sistema Nplus fossero veritiere.



Figura 5.4.1.2 Schema di collegamento della sonda voltmetrica al campione da monitorare e al pc

5.4.2 Risultati della prova

Si riportano di seguito i dati dell'acquisizione relativa a tutti i provini:

			Provino A Cescor Ti - 01823 -66			
DATA	DATA SONDA	TEMPO [gg]				
			Tester [mV]	Sonda [mV/Ti]	Calcolato [mV/SCE]	
20/09/2022	20/08/2022	8	-97,6	-97,6	-163,6	
27/09/2022	27/08/2022	15	-83,5	-83,5	-149,5	
03/10/2022	03/09/2022	21	-74,2	-74,4	-140,4	
10/10/2022	10/09/2022	28	-68,0	-68,4	-134,4	
17/10/2022	17/09/2022	35	-59,4	-60,8	-126,8	

Tabella 5.4.2.1 Risultati monitoraggio potenziale elettrico durante la stagionatura del Provino A

Tabella 5.4.2.2 Risultati monitoraggio potenziale elettrico durante la stagionatura del Provino B

			Provino B Cescor Ti - 01842				
DATA		TEMPO [gg]					
	DATA SONDA		-63				
			Tester [mV]	Sonda [mV/Ti]	Calcolato		
20/09/2022	20/08/2022	R	_135 7	_135.6	_198.6		
20/03/2022		0	-133,7	-100,0	-100,0		
27/09/2022	27/08/2022	15	-122,2	-121,8	-184,8		
03/10/2022	03/09/2022	21	-115,6	-115,4	-178,4		
10/10/2022	10/09/2022	28	-110,5	-110,0	-173,0		
17/10/2022	17/09/2022	35	-105,8	-105,6	-168,6		

			Provino C PO			
	DATA SONDA	TEMPO [gg]				
DATA						
			Tester [mV]	Sonda [mV/Ti]	Calcolato [mV/SCE]	
20/09/2022	20/08/2022	8	-85,0	-84,8	-148,8	
27/09/2022	27/08/2022	15	-68,2	-68,2	-132,2	
03/10/2022	03/09/2022	21	-62,0	-61,6	-125,6	
10/10/2022	10/09/2022	28	-59,6	-59,4	-123,4	
17/10/2022	17/09/2022	35	-55,5	-55,6	-119,6	

Tabella 5.4.2.3 Risultati monitoraggio potenziale elettrico durante la stagionatura del Provino C

DATA	DATA SONDA	TEMPO [gg]	Provino D Cescor Ti - 01843		
			Tester [mV]	Sonda [mV/Ti]	Calcolato [mV/SCE]
			20/09/2022	20/08/2022	8
27/09/2022	27/08/2022	15	-114,7	-114,5	-164,5
03/10/2022	03/09/2022	21	-104,9	-104,5	-154,5
10/10/2022	10/09/2022	28	-94,9	-95,0	-145,0
17/10/2022	17/09/2022	35	-86,4	-86,4	-136,4

Tabella 5.4.2.5 Risultati monitoraggio potenziale elettrico durante la stagionatura del Provino E

DATA	DATA SONDA	TEMPO [gg]	Provino E Cescor Ti - 01866			
			Tester [mV]	Sonda [mV/Ti]	Calcolato [mV/SCE]	
			20/09/2022	20/08/2022	8	
27/09/2022	27/08/2022	15	-91,8	-91,7	-149,7	
03/10/2022	03/09/2022	21	-88,5	-88,3	-146,3	
10/10/2022	10/09/2022	28	-80,1	-80,1	-138,1	
17/10/2022	17/09/2022	35	-73,8	-74,1	-132,1	
				Provino F		
------------	------------	-------	-------------------	---------------	-----------------------	--
		TEMPO	Cescor Ti - 01826			
DATA	DATA SONDA	[gg]	-66			
			Tester [mV]	Sonda [mV/Ti]	Calcolato [mV/SCE]	
20/09/2022	20/08/2022	8	-105,5	-105,3	-171,3	
27/09/2022	27/08/2022	15	-87,7	-87,6	-153,6	
03/10/2022	03/09/2022	21	-77,8	-77,8	-143,8	
10/10/2022	10/09/2022	28	-69,5	-69,7	-135,7	
17/10/2022	17/09/2022	35	-62,4	-62,7	-128,7	

Tabella 5.4.2.6 Risultati monitoraggio potenziale elettrico durante la stagionatura del Provino F

Nel primo grafico (Fig. 5.4.2.1) si riporta l'andamento nel tempo del potenziale elettrico della barra in acciaio di tutti i provini riferito all'elettrodo al titanio (Ti), mentre nel secondo (Fig. 5.4.2.2) si riporta l'andamento del potenziale elettrico riferito all'elettrodo al calomelano saturo (SCE).



Figura 5.4.2.1 Andamento del potenziale di libera corrosione nel tempo riferito allo pseudo-elettrodo al Titanio (Ti)



Figura 5.4.2.2 Andamento del potenziale di libera corrosione nel tempo riferito all'elettrodo al calomelano saturo (SCE)

Analizzando i grafici sopra riportati è possibile notare che il potenziale di libera corrosione tende a crescere all'aumentare dei giorni di stagionatura del calcestruzzo. I potenziali misurati rispetto all'SCE mostrano come le armature già dopo 8 giorni dal getto in tutti i provini abbiano un potenziale di libera corrosione maggiore di -200 mV/SCE e dopo 35 giorni potenziali ancora più positivi. Questo significa, come ci si aspettava, che tutte le armature si trovino in uno stato di passivazione e non siano quindi presenti stati attivi di corrosione.

Come già anticipato il provino A, contrariamente agli altri, è stato monitorato in continuo. Di seguito si riportano i dati dei monitoraggi in forma di grafico per una migliore lettura dei risultati (Fig. 5.4.2.3).



Figura 5.4.2.3 Andamento del potenziale di libera corrosione nel tempo del *Provino A* riferito all'elettrodo al calomelano saturo (SCE)

Dal grafico del monitoraggio in continuo del provino A si conferma il trend di crescita del potenziale di libera corrosione all'aumentare dei giorni di stagionatura. La presenza di picchi e valli coincide con l'alternarsi del giorno e della notte. Tendenzialmente durante le ore diurne, in cui la temperatura è più elevata, il potenziale tende a diminuire (aumenta in valore assoluto); mentre durante la fase notturna, a causa della diminuzione della temperatura, il potenziale tende ad aumentare (diminuisce in valore assoluto).

Bibliogarafia

[1] Rajabipour, F., & Weiss, J. (2007). Conducibilità elettrica dell'essiccazione della pasta cementizia. Materiali e strutture , 40 (10), 1143-1160.

[2] Y. Liu and F. J. Presuel-Moreno, "Normalization of Temperature Effect on Concrete Resistivity by Method Using Arrhenius Law," ACI Mater. J., vol. 111, no. 4, Jul. 2014.

[3] M. Collepardi, "The new concrete," 2010, Accessed: Jan. 31, 2022. [Online]. Available: https://www.libreriauniversitaria.it/new-concrete-collepardi-mario-tintoretto/libro/9788890377723.

[4] B. Dong, J. Zhang, Y. Wang, G. Fang, Y. Liu, and F. Xing, "Evolutionary trace for early hydration 40 of cement paste using electrical resistivity method," Constr. Build. Mater., vol. 119, pp. 16–20, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.127.

[5] W. López, J. A. González, and C. Andrade, "Influence of temperature on the service life of rebars," Cem. Concr. Res., vol. 23, no. 5, pp. 1130–1140, 1993, doi: https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90173-7.

[6] G. K. Glass, C. L. Page, and N. R. Short, "Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars," Corros. Sci., vol. 32, no. 12, pp. 1283–1294, 1991, doi: <u>https://doi.org/10.1016/0010-938X(91)90048-T</u>.

[7] J. F. Lataste, C. Sirieix, D. Breysse, and M. Frappa, "Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering," NDT E Int., vol. 36, no. 6, pp. 383–394, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0963-8695(03)00013-6.

[8] 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, doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.009.

[9] C.-T. Chen, J.-J. Chang, and W. Yeih, "The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete," Constr. Build. Mater., vol. 71, pp. 35–43, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009.

Seippel, RG (1974). Fondamenti di elettricità: basi di elettricità, elettronica, controlli e computer. Amer Technical Pub.

Han, B., Yu, X. e Ou, J. (2014). *Calcestruzzo autosensibile in strutture intelligenti*. Butterworth-Heinemann.

Rajabipour, F., & Weiss, J. (2007). Conducibilità elettrica dell'essiccazione della pasta cementizia. *Materiali e strutture , 40* (10), 1143-1160.

Collepardi, M., Collepardi, S., Olagot, JJO, & Troli, R. Diagnosi del degrado delle strutture in calcestruzzo deteriorate per un loro corretto restauro.

Pisani, MA, & Cattaneo, S. (2020). *Consolidamento delle strutture: guida ai criteri, ai materiali e alle tecniche più utilizzate*. Hoepli Editore.

Gowers, K. e Millard, S. (1999). Misura della resistività del calcestruzzo per la valutazione della corrosione. *Giornale dei materiali ACI , 96* (5), 536-541.

Nguyen, AQ, Klysz, G., Deby, F. e Balayssac, JP (2018). Valutazione dello stato elettrochimico dell'armatura in acciaio in calcestruzzo saturo d'acqua mediante misura della resistività. *Edilizia e materiali* da costruzione , *171*, 455-466.

6. Test di carico a flessione

6.1 Introduzione

Poiché lo scopo di tale sperimentazione è quello di dimostrare come i sensori coinvolti per la misura dell'impedenza elettrica e del potenziale, siano in grado di descrivere le modalità con cui la struttura reagisce in caso di eventi sismici, i provini sono stati sottoposti a test di carico a flessione.

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

I carichi applicati sono stati definiti a partire dal valore di resistenza meccanica a flessione massima. Al fine di valutare l'influenza della presenza dei sensori all'interno del campione, i quali rappresentano un elemento di discontinuità, le prove di carico sono state eseguite su 3 campioni rinforzati sensorizzati e 3 con all'interno solo la barra di acciaio (non sensorizzati).

6.2 Prove a flessione

La prova a flessione si esegue posizionando il provino all'interno della macchina di prova costituita da due appoggi inferiori, a sostegno del campione, e un dente di rottura superiore per applicare il carico nella mezzeria del provino (Fig. 6.2.1).

Secondo quanto previsto dalla normativa di riferimento UNI EN 12390-5, gli appoggi devono essere posti ad una distanza (I) che è pari a 3 volte il lato corto del campione (d). Poiché nel caso in esame il lato più corto del provino è pari 10 cm, gli appoggi sono stati posizionati ad una distanza di 30 cm.



Figura 6.2.1 Configurazione del provino all'interno della macchina di prova

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

$$R_f = \frac{3 \cdot F_f \cdot d}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

dove:

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

6.2.1 Metodo di rilevazione

La prova è stata eseguita con una macchina Universale della Metrocom con fondo scala di 600 kN. Si chiama universale poiché si possono fare prove di trazione nella parte sottostante la traversa e prove di compressione e flessione nella parte superiore.

Per eseguire la prova i provini sono stati posizionati sopra gli appoggi della pressa, facendo attenzione che le due facce a contatto con gli appoggi e il dente di rottura, (rispettivamente la faccia inferiore e superiore), siano perfettamente parallele tra loro (Fig. 6.2.1.1).



Figura 6.2.1.1 Prova a flessione con macchina universale

Durante la prova il carico viene applicato ad una velocità costante pari a 0,1 mm/min. La macchina è collegata ad un pc e grazie ad un programma della ditta Zwick and Roell è possibile registrare il progredire del carico, lo spostamento della pressa e il carico massimo che porta a rottura il provino.

6.2.2 Risultati della prova

Per ottenere il valore di resistenza massima a flessione (R_{f,max}) dei provini, con cui calcolare le percentuali da applicare ad ogni step di carico prima di eseguire l'analisi modale, sono stati sottoposti alla prova i provini non sensorizzati L ed M.

Si riportano nella seguente tabella gli esiti della prova:

Provino L					
F _{flex,max} bhdR flex[N][mm][mm][mm][MPa]					
12000,00	100	100	300	5,4	

Tabella 6.2.2.1 Risultati prova a flessione Provino L

Tabella 6.2.2.2 Risult	iti prova a fl	essione Provino M
------------------------	----------------	-------------------

Provino M							
F _{flex,max} b h d R _{flex}							
[14]	[N] [mm] [mm] [mm]						
23000,00	23000,00 100 100 300 10,35						

Poiché durante la prova a flessione del provino M sono state riscontrate anomalie nel programma di acquisizione, per determinare il valore del carico massimo da applicare ad ogni step di carico si è fatto riferimento all'unico valore di resistenza meccanica a flessione del profilo L. Effettivamente a valle dei test, dopo aver portato a rottura tutti i campioni, lo scarto tra la media delle forze massime applicate non è significativo rispetto valore ottenuto nel provino L (Fig. 6.2.2.1).

Si riportano di seguito i risultati:

Tabella 6.2.2.3	Risultati p	orova a	flessione	Provino A
-----------------	-------------	---------	-----------	-----------

Provino A						
F _{flex,max} bhdR flex[N][mm][mm][mm][MPa]						
13100,00	100	100	300	5,90		

Tabella 6.2.2.4 Risultati prova a flessione Provino B

Provino B					
F _{flex,max} bhdR flex[N][mm][mm][mm][MPa]					
13100,00	100	100	300	5,90	

Tabella 6.2.2.5 Risultati prova a flessione Provino C

Provino C					
F _{flex,max} b h d R _{flex} [N] [mm] [mm] [mm] [MPa]					
15200,00	100	100	300	6,84	

Tabella 6.2.2.6 Risultati prova a flessione Provino G

Provino G					
F _{flex,max} b h d R _{flex} [N] [mm] [mm] [mm] [MPa]					
13800,00	100	100	300	6,21	

Tabella 6.2.2.7 Risultati prova a flessione Provino H

Provino H					
Fflex,maxbhdR flex[N][mm][mm][mm][MPa]					
11500,00	100	100	300	5,18	

Tabella	6.2.2.8	Risultati	prova a	flessione Pro	ovino I

Provino I					
Fflex,maxbhdR flex[N][mm][mm][mm][MPa]					
12300,00	100	100	300	5,54	

Tabella 6.2.2.9 Tabella riassuntiva dei risultati della prova a flessione

F _{flex,max A}	F _{flex,max B}	F _{flex,max C}	F _{flex,max G}	F _{flex,max H}	F _{flex,max I}	F _{flex,max L}	F _{flex,max,Media}
[N]							
13100,00	13100,00	15200,00	13800,00	11500,00	12300,00	12000,00	



Figura 6.2.2.1 Carico massimo a flessione raggiunto per ciascun provino confrontato con il valore medio dei carichi (linea tratteggiata)

6.3 Monitoraggio potenziale di libera corrosione

Alla fine di ogni step di carico a flessione, il campione A è stato sottoposto al monitoraggio del potenziale di libera corrosione, per valutare come quest'ultimo muti in funzione dell'aumento di tensione sulla barra e la deformazione del cls. Il sistema adottato è quello usato per il monitoraggio in fase di getto. Non è stato possibile effettuare il monitoraggio in continuo del potenziale di libera corrosione durante la prova di carico poiché il provino era già monitorato attraverso il sistema di monitoraggio dell'impedenza elettrica. Durante le prove, ci si è infatti accorti che ogni volta che il sistema Nplus acquisiva la misura di potenziale, il segnale dell'impedenza elettrica subiva un'oscillazione mostrando sul grafico un picco inatteso (Campione C, Figura 6.4.9).

I carichi come già ampiamente anticipato, sono stati definiti tenendo conto della resistenza massima a flessione dei campioni. Va specificato che solo i provini G e H sono stati sottoposti a step di carico pari al 10% di F_f - 30% di F_f - 50% di F_f, poiché a valle dei test vibrazionali non sono state apprezzate significative variazioni dei parametri. Alla luce di questo risultato, tutti gli altri campioni sono stati sollecitati partendo direttamente da un valore del carico pari al 90% di F_f, poi fino alla formazione della prima fessura, ed infine finché l'apertura della fessura non raggiunge circa 1 mm (Fig.6.3.1-2).

120



Figura 6.3.1 Formazione prima fessura (campione A)



Figura 6.3.2 Allargamento della fessura fino ad 1 mm (campione A)

Come si evince chiaramente dalla Figura 6.3.3, nei provini sollecitati a flessione la fessura si forma nella zona di prossimità della mezzeria dove le sollecitazioni flettenti sono maggiori.



Figura 6.3.3 Campione A fessurato nella mezzeria

Si riportano di seguito, nella Tabella 6.3.1, i risultati delle misure di potenziale di libera corrosione del provino A dopo ogni step di carico.

Tabella 6.3.1 – Tabella riassuntiva dei risultati del monitoraggio del potenziale di libera corrosione
durante gli step di carico a flessione

Provino A								
Tempo	Carico applicato	E _{corr} [mV/Ti]	E _{corr} [mV/SCE]					
то	Provino scarico	-52,51	-118,51					
Т4	90% F _f	-86,00	-152,00					
Т5	Formazione prima fessura	-95,82	-161,82					
т6	Dilatazione fessura fino a 1 mm	-131,00	-197,00					

Dai grafici sotto è possibile osservare graficamente il trend del potenziale con l'aumento progressivo del carico (Fig. 6.3.4-5).



Figura 6.3.4 Andamento del potenziale di libera corrosione per i vari step di carico riferito all'elettrodo al titanio TiMMO



Figura 6.3.5 Andamento del potenziale di libera corrosione per i vari step di carico riferito all'elettrodo al calomelano saturo (SCE)

Analizzando i grafici sopra riportati è possibile notare come il potenziale di libera corrosione tenda a ridursi all'aumentare dei carichi applicati.

6.4 Monitoraggio dell'impedenza elettrica

Per quanto riguarda le misure di impedenza elettrica effettuate secondo il metodo Wenner, è stato impiegato il chip AD5940 (Analog Devices) controllato dalla scheda EVAL-AD5940BIOZ (Analog Devices) come per le fasi di stagionatura del getto. Contrariamente alla misura del potenziale, quella dell'impedenza elettrica è stata eseguita in continuo durante l'applicazione del carico. Il monitoraggio è stato eseguito sui campioni sensorizzati A, B e C. Si riportano di seguito gli andamenti dell'impedenza elettrica al crescere del carico (Fig. 6.4.1-9).



Figura 6.4.1 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T4 (90% di F_f) del *Provino A*



Figura 6.4.2 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T5 (formazione prima fessura) del *Provino A*



Figura 6.4.3 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T6 (fessura 1 mm) del *Provino A*



Figura 6.4.4 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T4 (90% R_f) del *Provino B*



Figura 6.4.5 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T5 (formazione prima fessura) del *Provino B*



Figura 6.4.6 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T6 (fessura 1 mm) del *Provino B*



Figura 6.4.7 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T4 (90% R_f) del *Provino C*



Figura 6.4.8 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T5 (formazione prima fessura) del *Provino C*



Figura 6.4.9 Andamento dell'impedenza elettrica (sopra) e della forza (sotto) durante lo step di carico T6 (fessura 1 mm) del *Provino C*

A valle del monitoraggio è possibile notare come i campioni A, B e C abbiano sommariamente lo stesso andamento: l'impedenza elettrica aumenta all'aumentare del carico, tende a fare un salto quando si forma la prima fessura, per poi tornare a salire, finché non si raggiunge il carico massimo. Questo comportamento è legato alla proprietà piezoresistiva del materiale con cui è stato realizzato il provino in calcestruzzo; infatti, all'aumentare del carico l'impedenza elettrica aumenta. Ciò avviene perché il provino è caricato a flessione, quindi l'array di misura dell'impedenza elettrica lavora su un volume di misura posizionato al centro verso la parte tesa del materiale dove le particelle e le fibre conduttive in carbonio tendono ad allontanarsi.

Il provino C, come in fase di stagionatura, tende ad avere valori di impedenza maggiori rispetto agli altri due campioni e a mostrare un andamento instabile (Figura 6.4.9). Questo è legato a quanto riportato precedentemente; per lo step di carico T6, durante la misura in continuo dell'impedenza elettrica è stato misurato in continuo anche il potenziale di libera corrosione: ogni volta che il sistema acquisiva il valore di potenziale la misura dell'impedenza subiva un'oscillazione.

7. Test vibrazionali e analisi modale

7.1 Introduzione

La parte conclusiva della suddetta sperimentazione si è articolata nello specifico nelle seguenti fasi:

- test vibrazionale al tempo 0 al fine di ottenere i parametri modali del campione non fessurato con relativa analisi modale;
- carico 1 applicato al travetto (90% di F_f);

- test vibrazionale e analisi modale dopo il primo carico;
- carico 2 applicato al travetto (carico massimo a flessione);
- test vibrazionale e analisi modale dopo il secondo carico;
- carico 3 applicato al travetto (carico per aprire la fessura di circa 1 mm);
- test vibrazionale e analisi modale dopo il terzo carico;

I carichi come già ampiamente anticipato, sono stati definiti tenendo conto della resistenza massima a flessione dei campioni.

I test vibrazionali sono stati applicati per verificare il comportamento dell'elemento sottoposto ad un evento assimilabile con l'azione sismica, ed infine l'analisi modale per vedere come gli effetti della fessurazione, che potrebbero essere indotti dal sisma, modifichino il comportamento dinamico dell'elemento strutturale e in particolare i suoi parametri modali caratteristici.

Lo scopo di eseguire l'analisi modale al tempo 0 e poi ad ogni incremento di carico, nasce dalla volontà di confrontare il cambiamento della forma modale e della frequenza naturale di ciascun provino (e dello smorzamento caratteristico), quando quest'ultimo è integro, quando compare la prima fessura, e quando il quadro fessurativo evolve.

7.2 Test vibrazionali

Negli ultimi decenni, grazie alla crescente diffusione e maggiore efficienza dei calcolatori che ha ridotto i tempi di elaborazione ed interpretazione dei dati sperimentali e grazie all'evoluzione tecnologica della strumentazione di misura, più precisa e meno costosa, le tecniche di analisi modale sperimentale delle strutture hanno subito un rilevante sviluppo [1].

L'analisi modale di una struttura e la sua risposta sotto l'azione di una generica eccitazione impressa, può avvenire attraverso la definizione di un modello matematico che metta in correlazione forzante, deformazioni e risposta della struttura in termini di spostamenti, velocità ed accelerazioni.

Non essendo problemi facilmente risolvibili, è conveniente cercare la soluzione mediante la definizione delle funzioni di risposta in frequenza FRF, costituite da matrici complesse $H(\Omega)$, dalle quali si ricavano i parametri caratterizzanti il comportamento dinamico della struttura.

Le FRF sono tipicamente ottenute per mezzo di analisi del segnale mediante la trasformata di Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT)

L'intero processo di identificazione sperimentale dei parametri dinamici di una struttura è sinteticamente illustrato nel diagramma di flusso di Figura 7.2.1..



Figura 7.2.1 Diagramma di flusso dell'analisi dinamica sperimentale

Due sono i possibili approcci che ne permettono la conoscenza:

 l'approccio analitico: partendo dalla conoscenza della geometria della struttura, delle condizioni al contorno e delle caratteristiche dei materiali, la distribuzione di massa, rigidezza e smorzamento della struttura è espressa tramite matrici di massa, rigidezza e smorzamento; da qui è possibile, risolvendo un problema agli autovalori, pervenire alla determinazione dei parametri modali del sistema (frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modali); - l'approccio sperimentale: partendo dalla misura dell'input dinamico sulla struttura e della risposta strutturale, si calcolano le funzioni di risposta in frequenza e si stimano, a partire da esse, i parametri modali della struttura.

L'ipotesi fondamentale che sta alla base delle tecniche sperimentali di analisi modale è quella di linearità delle strutture: testare strutture lineari significa esaminare sistemi che si comportano in modo lineare nel campo delle piccole deformazioni, con risposta sempre proporzionale all'eccitazione; la risposta ad una certa combinazione di ingressi al sistema è uguale alla medesima combinazione delle rispettive risposte, ossia è applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti.

Quindi, come conseguenza dell'ipotesi di linearità dei sistemi, le funzioni di risposta in frequenza godranno di tre importanti proprietà:

- sovrapponibilità: le FRF sono indipendenti dal tipo di eccitazione applicata (sinusoidale, a banda larga o ad impatto);
- omogeneità: le FRF sono indipendenti dal livello di eccitazione impartito;
- reciprocità: per la simmetria dei sistemi lineari (teorema di Maxwell) la FRF misurata tra due qualsiasi dei gradi di libertà è indipendente dal fatto che uno di essi venga usato per l'applicazione dell'eccitazione o per la misura di risposta.

Oltre a tale ipotesi, si ipotizza che il comportamento delle strutture sia:

- causale: la vibrazione è causata solo dall'eccitazione;
- stabile: la vibrazione cesserà alla rimozione dell'eccitazione;
- osservabile: le misure di eccitazione e risposta che vengono effettuate, contengono una quantità di informazioni sufficienti per sviluppare un corretto modello di comportamento della struttura. L'inosservabilità di una struttura è dovuta, ad esempio, alla presenza di componenti "sciolti", il cui moto non può essere eccitato e "sentito" da sensori posizionati sul resto

della struttura, oppure dall'esistenza di gradi di libertà di moto che non sono misurati;

 invariabile nel tempo: durante le misure le caratteristiche dinamiche rimarranno invariate; pertanto i coefficienti delle equazioni differenziali che reggono il problema, sono costanti rispetto al tempo.

Il principale motivo d'interesse nei riguardi dell'analisi modale sperimentale è legato alla considerazione che il comportamento dinamico di una struttura è una sorta di "impronta digitale", nel senso che esso dipende solo dalle sue caratteristiche intrinseche (massa, rigidezza, smorzamento, grado di vincolo) e non dall'entità e/o dal tipo di carico applicato: pertanto, se non intervengono modificazioni interne al manufatto, come ad esempio dei danni strutturali, il comportamento della struttura rimane inalterato; in caso contrario, si noterà una variazione delle frequenze e dei modi propri di vibrare [2].

7.2.1 Sistema generale di misura delle FRF

I principali elementi costituenti la catena del sistema di misura delle FRF sono:

- *il meccanismo di eccitazione*; la sorgente per il segnale di eccitazione dipende dal tipo di test che si sta effettuando. Il meccanismo è in genere costituito a sua volta da un amplificatore di potenza, necessario per guidare il dispositivo utilizzato per mettere in vibrazione la struttura, e da un eccitatore, che può essere comunemente di due tipi: un generatore di vibrazione (*shaker*) ancorato alla struttura oppure un martello strumentato (*impact hammer*);
- sistema di trasduzione, di cui fanno parte i trasduttori e gli amplificatori di condizionamento che hanno il compito di rafforzare i segnali generati dai trasduttori, generalmente deboli, in modo che possano essere fruibili

dall'analizzatore per la misura. I trasduttori piezoelettrici risultano i più ampiamente utilizzati in entrambe le applicazioni;

 analizzatore, la cui funzione è quella di misurare i vari segnali sviluppati dai trasduttori al fine di determinare l'ampiezza delle forze eccitanti e delle risposte. L'analizzatore è un voltmetro molto sofisticato di cui esistono diversi tipi, la cui scelta dipende dal tipo di eccitazione usata: sinusoidale, periodica, causale, transitoria.

7.2.1.1 Impact Test: martello strumentato

Le prove dinamiche sperimentali, oggetto della presente tesi, sono state eseguite mediante la tecnica di eccitazione ad impatto, utilizzando un apposito martello strumentato PCB 086B04 mostrato in Fig. 7.2.1.1.1. Sebbene questo tipo di prova abbia esigenze maggiori nella fase di analisi del processo di misurazione, risulta essere un mezzo relativamente semplice per mettere in vibrazione la struttura; infatti, richiede un'attrezzatura minima e tempi di set-up limitati che la rendono adatta a test rapidi o a misure sul campo.



Figura 7.2.1.1.1 Martello strumentato PC 086B04

L'apparecchiatura è costituita da un martello fornito di una serie di punte e teste necessarie ad estendere i range di forza e frequenza, per essere in grado di testare un'ampia varietà di strutture. Il martello è fornito di un trasduttore di forza, che permette di misurare la forza applicata dalla punta, supposta uguale ed opposta a quella subita dalla struttura; mentre all'estremità del trasduttore viene, eventualmente, applicata una massa aggiuntiva, per favorire il controllo della rigidezza (Fig. 7.2.1.1.2).

L'eccitazione d'impatto è dunque un segnale transitorio, un impulso di durata limitata rispetto al tempo di acquisizione.



Figura 7.2.1.1.2 Martello strumentato Brüel & Kjær, Type 8202 descritto nelle sue componenti

7.2.1.2 Acquisizione della risposta: accelerometri

La misura della risposta, in termini di spostamento, velocità o accelerazione può essere effettuata tramite diverse tipologie di dispositivi appartenenti a due gruppi:

- trasduttori laser (senza contatto);
- trasduttori piezoelettrici.

I trasduttori piezoelettrici sono quelli maggiormente usati per la misurazione dei parametri d'interesse nelle prove modali. Il principio base di funzionamento dei trasduttori piezoelettrici sfrutta il fatto che un elemento costituito da materiale piezoelettrico (cristallo naturale o sintetico) genera una carica elettrica attraverso le sue facce di estremità se soggetto a tensioni meccaniche. Essi godono delle seguenti proprietà:

- buona linearità;
- peso ridotto, che riduce l'aumento di massa;
- ampia gamma dinamica (fino a 160 dB);
- ampia gamma di frequenza (da 0,2 Hz a oltre 10 kHz);
- robustezza;
- semplicità di montaggio.

La risposta dinamica dei provini è stata misurata da 5 accelerometri PCB 352C33 fissati sulle basette metalliche tramite cera d'api (Fig. 7.2.1.2.1); i 5 accelerometri sono stati posti consequenzialmente sui 20 punti di misura previsti sull'elemento strutturale.



Figura 7.2.1.2.1 Accelerometri piezoelettrici fissati alle basette attraverso la cera d'api

7.3 Metodo di rilevazione

Il campione durante il test è stato posizionato sotto la pressa e appoggiato sopra i due supporti metallici posti ad una distanza di 30 cm, in condizioni non vincolate.

Il campione viene dunque messo in vibrazione, mediante un impulso di durata molto breve (idealmente infinitesima) fornito attraverso il martello strumentato (Fig. 7.3.1).



Figura 7.3.1 Impact test

La risposta dinamica della struttura viene misurata con l'accelerometro triassiale che viene spostato consecutivamente da una basetta alla successiva, per un totale di 20 punti di misura posizionati ad un interasse di 2,5 cm.

Lo stimolo viene impartito in direzione -z, mentre gli accelerometri misurano lungo z. Si noti che vengono misurati simultaneamente i segnali accelerometrici su 5 punti; pertanto, con 4 sessioni di misura si completa la scansione dell'intero travetto. L'acquisizione viene triggerata mediante il segnale di forza data in ingresso, così da registrare il transitorio e la risposta dinamica smorzata. L'acquisizione viene fatta in una banda spettrale di 4096 Hz, con 1024 linee spettrali, con una durata dell'acquisizione di 0,25 s. Per ciascuna posizione dell'accelerometro vengono effettuate 5 acquisizioni e se ne calcola la media, così da aumentare il rapporto segnale-rumore (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR).

Il sistema di misura utilizzato per l'impact test è l'LMS SCADAS Mobile (Siemens), a cui vengono connessi il martello strumentato e 5 accelerometri (Fig. 7.3.2). In Figura 7.3.3 si riporta uno schema esplicativo relativo all'installazione delle componenti necessarie all'esecuzione della prova.



Figura 7.3.2 Sistema di acquisizione per impact test



Figura 7.3.3 Schema di collegamento delle componenti per l'impact test

7.4 FEM numerical model

Per effettuare un test preliminare in termini di analisi modale, sono state effettuate simulazioni numeriche in ambiente COMSOL Multiphysics[®], sfruttando il Finite Element Method (FEM). In particolare, la trave in calcestruzzo progettata è stata simulata in diverse configurazioni:

- Provini in scala (10 cm x 10 cm x 50 cm) e provini di calcestruzzo a grandezza naturale (50 cm x 50 cm x 250 cm), senza armatura;
- Campione di calcestruzzo in scala (10 cm x 10 cm x 50 cm), con armature di rinforzo;
- Provino di calcestruzzo in scala (10 cm x 10 cm x 50 cm), con armature di rinforzo e sensori incorporati.

I sensori incorporati rappresentano discontinuità all'interno del campione così come i tubi di plastica utilizzati per l'installazione dell'armatura nei sensori influenzano i parametri modali dell'elemento strutturale. Pertanto, questi modelli preliminari aiutano a comprendere meglio il comportamento dell'elemento nei test di carico e vibrazionali, nonché a identificare le frequenze naturali di interesse e le relative forme modali nei travetti sensorizzati e non.

La geometria dei modelli in calcestruzzo armato sensorizzato e non sensorizzato è riportata rispettivamente in Figura 7.4.1 e in Figura 7.4.2.

141



Figura 7.4.1 Geometria del modello FEM relativo al provino di calcestruzzo sensorizzato in scala.



Figura 7.4.2 Geometria del modello FEM relativo al provino di calcestruzzo scalato non sensorizzato

I risultati ottenuti da travi non rinforzate in scala e a grandezza naturale mostrano che le frequenze naturali variano insieme al fattore di scala; in particolare le frequenze naturali saranno circa 5 volte superiori a quelle dell'elemento a grandezza naturale. Ad esempio, considerando la prima forma modale (Fig. 7.4.3), la frequenza naturale è stimata a 241 Hz per la struttura a grandezza naturale (f_{n,real}) e a 1205 Hz per il provino scalato (f_{n,scaled}); ciò significa che f_{n,scaled} è circa 5 volte f_{n,real}. Per questo motivo è necessario valutare gli effetti di un evento sismico a frequenze superiori a quelle tipiche di un terremoto, che sono comprese tra 1 e 10 Hz [3], [4]. L'armatura sembra non influenzare le frequenze naturali della trave in calcestruzzo, almeno a frequenze fino a 4000 Hz, che è stato l'intervallo spettrale considerato nell'analisi modale sperimentale; ciò significa che la geometria dell'armatura non è particolarmente influente in termini di rigidezza dell'elemento. Tuttavia, la presenza dei tubi esterni modifica il comportamento dinamico dell'elemento strutturale; in particolare, le linee nodali della prima forma modale (Fig. 7.4.4) si muovono sui tubi stessi e la relativa frequenza propria aumenta fino a 1529 Hz (circa +27%). Ciò significa che l'elemento strutturale è leggermente più rigido a causa dei componenti incorporati, che influenzano anche la deformazione, oltre a rendere il provino meno omogeneo.



Figura 7.4.3 Forma della prima modalità per il travetto a grandezza naturale (frequenza naturale: 241 Hz, corrispondente a 1205 Hz per il travetto in scala 1:5)



Figura 7.4.4 Forma della prima modalità per il raggio sensorizzato in scala (frequenza naturale: 1529 Hz)

Considerando la seconda forma modale, è possibile osservare che la presenza di tubi di plastica introduce due ulteriori linee nodali poste sui tubi stessi, anche se la frequenza naturale associata è pressoché la stessa (2841 Hz) per il campione non sensorizzato, Figura 7.4.5 e per quello sensorizzato (2846 Hz, Figura 7.4.6.).



Figura 7.4.5 Seconda forma modale per travetto scalato non sensorizzato (frequenza naturale: 2841 Hz)


Figura 7.4.6 Seconda forma modale per travetto sensorizzato scalato (frequenza naturale: 2846 Hz)

7.5 Analisi modale

L'analisi modale è stata effettuata tramite il software associato al sistema di acquisizione LMS Scadas, chiamato Simcenter Testlab 2019, grazie al quale è stato possibile analizzare i segnali acquisiti dagli accelerometri, attraverso l'input fornito dal martello strumentato, per ottenere le Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF).

Le Funzioni di Risposta in Frequenza si possono immaginare come una sorta di rapporto tra la risposta ottenuta dal sistema e l'eccitazione che la ha originata, attraverso le quali si ricavano i parametri modali che descrivono la struttura in termini di smorzamento, frequenze proprie e forme modali. Attraverso la distribuzione delle vibrazioni sul campione testato è possibile identificare le zone soggette a maggiore vibrazione o caratterizzate dalla presenza di discontinuità legate al danno o come nel caso in esame alla presenza di sensori all'interno del campione. È per tale ragione che sono stati sottoposti ad analisi modale sia campioni sensorizzati, che quelli senza sensori.

Osservando il segnale di risposta nel tempo, si osserverà che esso amplifica l'ingresso quando la frequenza di quest'ultimo si avvicina a una frequenza naturale della struttura, in corrispondenza della quale il livello del segnale è massimo. L'FRF ci dice quindi che il sistema si comporta come un filtro rispetto alla forza in ingresso: amplifica la forza alle frequenze di risonanza, la abbatte alle anti-risonanze. Alle diverse frequenze di risonanza, la struttura presenta diversi modi di vibrare, tanto più complessi quanto più si sale in frequenza; la struttura presenterà poi delle linee nodali, in corrispondenza delle quali non ci saranno spostamenti.

I modi di vibrare vengono derivati dalle Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF) mediante analisi modale sperimentale. Di seguito di riportano i modi di vibrare tipici di una trave appoggiata (Fig. 7.5.1).



Figura 7.5.1 Forme modali trave in semplice appoggio

Il processo di derivazione delle Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF), al fine di ottenere le forme modali, si basa sui metodi di interpolazione del dominio del tempo o della frequenza, che permettono di ricavare i modi di vibrare della struttura e i relativi fattori di smorzamento. Il modello di risposta della struttura all'eccitazione fornita è dato dall'insieme delle FRF misurate sulla struttura, in numero pari ai modi di vibrare della struttura stessa nel range di frequenze di interesse. In generale, quindi, le prove sperimentali per la determinazione dei parametri modali sono basate sulla possibilità di descrivere il comportamento dinamico della struttura o mediante un set di equazioni differenziali nel dominio del tempo, oppure mediante un set di equazioni algebriche nel dominio della frequenza. Le tecniche di identificazione dinamica possono, pertanto, essere raggruppate in tecniche nel dominio del tempo e tecniche nel dominio della frequenza.

Le tecniche nel dominio del tempo sono basate sulle soluzioni del seguente sistema di equazioni differenziali nel dominio del tempo:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\}\$$

I metodi nel dominio del tempo sfruttano, allora, procedure di curve fitting per stimare i parametri modali di una struttura a partire dai dati sperimentali. Nel caso delle tecniche nel dominio della frequenza, invece, il comportamento dinamico della struttura viene descritto tramite la funzione di risposta in frequenza, che contiene implicitamente al suo interno tutte le informazioni sulle caratteristiche dinamiche della struttura.

Nel dominio della frequenza, dunque, la soluzione del suddetto sistema di equazioni differenziali viene ricercata sfruttando la trasformazione funzionale nota come "trasformata di Fourier". Il vantaggio legato a questa trasformazione consiste nel passaggio da un sistema di equazioni differenziali ordinarie ad un sistema di equazioni algebriche di più semplice risoluzione:

$$(M\omega^2 + C\omega + K)X(t) = F(\omega)$$

La funzione di risposta in frequenza (FRF) è esprimibile come rapporto tra la trasformata di Fourier della risposta e quella dell'ingresso:

$$H(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)}$$

La funzione di risposta in frequenza e la corrispondente funzione di risposta all'impulso formano una coppia di trasformate di Fourier.

In altre parole, la funzione di risposta all'impulso si può ottenere applicando la trasformata inversa di Fourier a una funzione di risposta in frequenza e, viceversa, la funzione di risposta in frequenza può essere ricavata applicando la trasformata di Fourier alla funzione di risposta all'impulso.

La mappa delle vibrazioni si ottiene plottando l'ampiezza della funzione *H* in corrispondenza delle risonanze della struttura. L'algoritmo utilizzato è il Polymax, che stima i parametri modali nel dominio della frequenza basandosi sull'interpolazione delle Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF) mediante funzioni polinomiali fratte.

7.5.1 Tecniche di controllo basate su sistemi non distruttivi

Lo scopo delle tecniche di controllo non distruttive è quello di verificare l'integrità di un componente o dell'intera struttura, identificando eventuali discontinuità geometriche quali fessure, cricche, porosità, non inficiando la funzionalità del sistema esaminato; verifica questa, che non riguarda solo la rilevazione di danni improvvisi o progressivi, ma anche il monitoraggio delle condizioni di esercizio o durante particolari situazioni ambientali quali ad esempio i terremoti, a cui la struttura può essere soggetta [5].

I metodi che analizzano la risposta dinamica della struttura sono, in effetti, delle tecniche globali di ispezione non distruttiva in quanto è possibile correlare la variazione dei parametri modali di una struttura, con la variazione del grado di integrità della stessa.

148

Si consideri una struttura danneggiata, a parità di carico statico sollecitante: la struttura in oggetto si deforma maggiormente rispetto a quanto si sarebbe deformata da integra, il che equivale a dire che il danno ha incrementato la cedevolezza della struttura, incremento che è funzione delle sole caratteristiche geometriche del difetto. Dalla relazione:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

in cui:

- k è la rigidezza (reciproco della cedevolezza)

m è la massa

pertanto si deduce che:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{c \cdot m}}$$

dove c rappresenta la cedevolezza.

La relazione riportata sopra mette in evidenza come un aumento della cedevolezza della struttura, lasciando invariata la massa, manifesti in una riduzione della pulsazione naturale della struttura stessa. Conseguentemente anche altre caratteristiche modali (smorzamento, modi propri di vibrare...) subiscono una variazione in seguito alla presenza di un danno.

Pertanto, in campo dinamico la differenza tra la risposta della struttura danneggiata e quella della struttura integra dipende solo dall'aumento di cedevolezza, e quindi dalle caratteristiche geometriche del danno.

7.5.2 Risultati analisi modale

A valle dell'analisi modale, i modi ritenuti maggiormente significativi sono il 3 e 4 (Fig. 7.5.2.1-2).



Figura 7.5.2.1 Confronto tra il modo 3 del *Provino A* al tempo T0 (linea gialla) e al tempo T4 (linea celeste)



Figura 7.5.2.2 Confronto tra il modo 4 del *Provino A* al tempo T0 (linea gialla) e al tempo T4 (linea celeste)

La Figura 7.5.2.3 riporta le Funzioni di Risposta in Frequenza di tutti i campioni sottoposti al test vibrazionale prima di essere sottoposti al carico flessionale.



Figura 7.5.2.3 Funzioni di Risposta in Frequenza dei campioni al tempo TO

Dall'immagine sopra riportata è possibile individuare la posizione dei 4 modi propri di vibrare: nella parte di estrema destra del grafico, per bassi valori di frequenza, è possibile individuare il modo 1 e 2; nella parte centrale si colloca il modo 3, ed infine nell'estremità a sinistra, per elevati valori di frequenza, il modo 4.

A mano a mano che il campione si fessura, le frequenze si riducono ed i vari picchi traslano verso sinistra.

Si riportano di seguito i risultati di tutti i campioni testati, per ogni incremento di carico (Tab. 7.5.2.1-6).

	F	Provino A		
TEMADO	MO	MODO 3		DO 4
TEIVIPO	fr [Hz]	ղ[%]	fr [Hz]	ղ[%]
то	1520,00	2,19	3381,00	0,80
T4 (90% R _f)	1505,00	0,89	3378,00	0,74
T5 (R _f - Formazione prima fessura)	790,00	3,29	3275,00	1,17
T6 (Fessura≈1 mm)	715,00	2,52	2882,00	1,30

Tabella 7.5.2.1 Esiti analisi modale Provino A

Tabella 7.5.2.2 Esiti analisi modale Provino B

Provino B					
	MOI	MODO 3		DO 4	
TEIVIPO	fr [Hz]	ղ[%]	fr [Hz]	ղ[%]	
то	1447,00	2,02	3218,00	0,58	
T4 (90% R _f)	1446,00	2,11	3285,00	0,74	
T5 (R _f - Formazione prima fessura)	736,00	9,20	3172,00	1,34	
T6 (Fessura≈1 mm)	469,00	9,20	2861,00	1,91	

Tabella 7.5.2.3 Esiti analisi modale Provino C

Provino C					
темаро	MODO 3		мо	MODO 4	
	fr [Hz]	ղ[%]	fr [Hz]	η[%]	
то	1467	2,07	3314	0,93	
T4 (90% R _f)	1468	1,48	3322	1,57	
T5 (R _f - Formazione prima fessura)	844	3,44	3171	2,61	
T6 (Fessura≈1 mm)	602	8,05	2885	3,7	

Provino G					
TEMPO	мо	MODO 3		DO 4	
	fr [Hz]	ղ[%]	fr [Hz]	ղ[%]	
то	1519	1,52	3340	0,81	
T4 (90% R _f)	1490	1,99	3330	0,74	
T5 (R _f - Formazione prima fessura)	772	8,89	3228	0,42	
T6 (Fessura≈1 mm)	869	9,36	2875	1,77	

Tabella 7.5.2.4 Esiti analisi modale Provino G

Tabella 7.5.2.5 Esiti analisi modale Provino H

Provino H					
ТЕМРО	MODO 3		MODO 4		
	fr [Hz]	ղ[%]	fr [Hz]	ղ [%]	
то	1419	1,62	3267	1,15	
T4 (90% R _f)	1411	2,04	3316	1,44	
T5 (R _f - Formazione prima fessura)	961	0,45	3129	2,70	
T6 (Fessura≈1 mm)	610	5,72	2940	2,36	

Tabella 7.5.2.6 Esiti analisi modale Provino I

Provino I					
ТЕМРО	MODO 3		MODO 4		
	fr [Hz]	ղ[%]	fr [Hz]	η [%]	
то	1402,00	1,74	3238,00	0,79	
T4 (90% R _f)	1414,00	1,52	3194,00	2,75	
T5 (R _f - Formazione prima fessura)	990,00	7,17	3153,00	1,40	
T6 (Fessura≈1 mm)	685,00	9,34	2856,00	5,33	

Come previsto, aumentando il carico fino al raggiungimento della fessurazione del provino, si ha una diminuzione della frequenza propria del campione e un aumento dello smorzamento dovuto alla formazione del danno.

Per valutare meglio come lo stato di evoluzione del danno modifichi i parametri di risposta dinamica della struttura si riportano di seguito i dati con la variazione della frequenza e dello smorzamento rispetto alla condizione di provino integro (Tab 7.5.2.7-12).

Provino A					
TEMPO	MODO 3		мо	DO 4	
TEIMPO	Δfr/f0 %	Δη%	Δfr/f0 %	Δη%	
T4	-0,99	-1,30	-0,09	-0,06	
Т5	-48,03	1,10	-3,14	0,37	
T6	-52,96	0,33	-14,76	0,50	

Tabella 7.5.2.7 Variazione frequer	a e smorzamento all'aumen	tare del carico Provino A
------------------------------------	---------------------------	---------------------------

Tabella 7.5.2.8 Variazione frequenza e smorzamento all'aumentare del carico Provino B

Provino B					
TEMDO	MODO 3		MO	DO 4	
TEMPO	Δfr/f0 %	Δη%	Δfr/f0 %	Δ η%	
T4	-0,07	0,09	2,08	0,16	
T5	-49,14	7,18	-1,43	0,76	
T6	-67,59	7,18	-11,09	1,33	

Tabella 7.5.2.9 Variazione	frequenza e smorzamento	all'aumentare d	el carico	Provino C

	Р	rovino C		
ТЕМДО	MODO 3 MODO 4			0 4
TEMPO	Δfr/f0 %	Δη%	Δfr/f0 %	Δ η%
Т4	0,07	-0,59	0,24	0,64
Т5	-42,47	1,37	-4,32	1,68
Т6	-58,96	5,98	-12,95	2,77

	Р	rovino G		
TEMPO	MOD	MODO 3		DO 4
TEIMPO	Δfr/f0 %	Δη%	Δfr/f0 %	Δη%
T4	-1,91	0,47	-0,30	-0,07
Т5	-49,18	7,37	-3,35	-0,39
Тб	-42,79	7,84	-13,92	0,96

Tabella 7.5.2.10 Variazione frequenza e smorzamento all'aumentare del carico Provino G

Tabella 7.5.2.11 Variazione frequenza e smorzamento all'aumentare del carico Provino H

Provino H						
ТЕМРО	MODO 3		MODO 4			
	Δfr/f0 %	∆ ŋ%	Δfr/f0 %	Δη%		
T4	-0,56	0,42	1,50	0,29		
T5	-32,28	-1,17	-4,22	1,55		
T6	-57,01	4,10	-10,01	1,21		

Tabella 7.5.2.12 Variazione frequenza e smorzamento all'aumentare del carico Provino B

Provino I						
ΤΕΜΡΟ	MODO 3		MODO 4			
	Δfr/f0 %	Δη%	Δfr/f0 %	Δη%		
T4	0,86	-0,22	-1,36	1,96		
Т5	-29,39	5,43	-2,63	0,61		
Т6	-51,14	7,60	-11,80	4,54		

Per una migliore comprensione dei risultati si riportano i dati per via grafica (Fig. 7.5.2.4-9):



Figura 7.5.2.4 Andamento frequenza naturale Provino A



Figura 7.5.2.5 Andamento frequenza naturale Provino B



Figura 7.5.2.6 Andamento frequenza naturale Provino C



Figura 7.5.2.7 Andamento frequenza naturale Provino G



Figura 7.5.2.8 Andamento frequenza naturale Provino H



Figura 7.5.2.9 Andamento frequenza naturale Provino I

Bibliogarafia

[1] Fabbrocino, G., Rainieri, C., & Verderame, G. M. (2007). L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti. *Controllo e monitoraggio di edifici in Calcestruzzo Armato: il caso-studio di Punta Perotti Giornata di Studio ENEA*.

[2] Muftì, AA (2002). Monitoraggio della salute strutturale di strutture innovative di ingegneria civile canadese. *Monitoraggio della salute strutturale*, *1* (1), 89-103.

[3] S. Takemura, M. Kobayashi, and K. Yoshimoto, "Prediction of maximum P- and S-wave amplitude distributions incorporating frequency- and distance-dependent characteristics of the observed apparent radiation patterns 4. Seismology," Earth, Planets Sp., vol. 68, no. 1, pp. 1–9, Dec. 2016, doi: 10.1186/S40623-016-0544-8/FIGURES/5.

[4] P. Tosi, P. Sbarra, and V. De Rubeis, "Earthquake sound perception," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, no. 24, p. 24301, Dec. 2012, doi: 10.1029/2012GL054382.

[5] Aktan, AE, Catbas, FN, Ciloglu, SK e Grimmelsman, QP (2005). Opportunità e sfide nel monitoraggio sanitario dei sistemi costruiti mediante analisi modale.

Lynch, J. P. "Decentralization of wireless monitoring and control technologies for smart civil structures" Blume Earthquake Engineering Center, Technical Report #140, Stanford University, Stanford, CA, 2002.

Bendat, J. S., and Piersol, A.G.: "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley & Sons, 1993

Zhang, L. e Brincker, R. (2005). Una panoramica dell'analisi modale operativa: principali sviluppi e problemi. In *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, 26-27 aprile 2005, Copenhagen, Danimarca* (pp. 179-190). Università di Aalborg.

G. Cosoli *et al.*, "Performance of concretes manufactured with newly developed low-clinker cements exposed to water and chlorides: Characterization by means of electrical impedance measurements," *Constr. Build. Mater.*, vol. 271, p. 121546, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121546.

8. Conclusioni

Lo scopo dell'attività di ricerca volto alla realizzazione di tale elaborato è stato quello di studiare il comportamento di provini di calcestruzzo confezionati con una miscela innovativa contenente fibre e filler conduttivi riciclati a base di carbonio capaci di conferire alla struttura proprietà piezoresistive, installando sensori specifici incorporati, sotto condizioni di carico a flessione crescenti fino alla fessurazione del materiale.

Il comportamento è stato valutato attraverso il monitoraggio di due grandezze: l'impedenza elettrica, per monitorare il comportamento del calcestruzzo al carico applicato, ed il potenziale di libera corrosione per il monitoraggio della corrosione della barra di acciaio inserita all'interno del campione. A valle della ricerca è possibile affermare che:

- durante la fase di stagionatura, il potenziale di libera corrosione già dall'ottavo giorno mostra un andamento crescente, legato al fatto che le barre si trovino in stato di passivazione, grazie alla formazione di un film che protegge la barra. Il monitoraggio in continuo eseguito sul campione A mette chiaramente in luce la dipendenza del potenziale rispetto alla temperatura, compiendo delle oscillazioni durante il periodo notturno e diurno;
- il monitoraggio dell'impedenza elettrica durante la fase di stagionatura, mostra che con la diminuzione della quantità d'acqua all'interno del calcestruzzo, e con la riduzione della dimensione dei pori, la parte reale dell'impedenza del calcestruzzo aumenta in tutti i campioni;
- durante i test di carico a flessione, il potenziale di libera corrosione tende a diminuire, mantenendo comunque il suo stato di passivazione, in quanto non si raggiungono valori della soglia di allarme di innesco corrosione,

161

neanche portando a fessurazione il materiale. Nei test di durabilità che verranno eseguiti in seguito la fessura rappresenterà chiaramente una corsia preferenziale per la penetrazione di sostanze aggressive come l'acqua di mare contenente ioni cloruro, portando più rapidamente il materiale a corrodersi;

- l'andamento dell'impedenza elettrica durante le prove a flessione è, come ci si aspettava, in crescita finché il carico indotto non porta il materiale a fessurazione. È proprio in corrispondenza dell'applicazione della forza massima che innesca la fessura che si registra un salto nella curva del monitoraggio;
- l'analisi modale evidenzia come le frequenze proprie, rappresentative dell'elemento, subiscono diminuzioni significative all'aumentare dell'entità del danno dell'elemento per effetto dei carichi.

A conclusione di ciò è possibile affermare che la grandezza che meglio rappresenta lo stato del materiale in questa fase è l'impedenza elettrica. Poiché però la misura del potenziale risente della variazione di alcuni parametri ambientali, quali ad esempio la temperatura, si potrebbe valutare la possibilità di includere dei sensori che monitorino la variazione degli stessi.